ISSN 1000 － 4548
CODEN YGXUEB

岩土工程学报

Chinese Journal of Geotechnical Engineering

第44卷　　第 7 期（总380期）
Vol.44　　No. 7 (Total 380)

7

2022

主　办

中国水利学会　中国土木工程学会
中国力学学会　中国建筑学会
中国水力发电工程学会　中国振动工程学会

ISSN 1000-4548
07>

前　言

随着我国国民经济的飞速发展，特别是国家西部大开发战略的全面实施，越来越多的重大工程建设将面临更加严酷的环境条件，呈现出“高、大、深、重”特点，涉及许多新的岩土工程问题：我国广大的北部和西部高原地区气候极端寒冷，土体的反复冻融过程会造成建筑物地基破坏，严重威胁工程的建设与安全运行；作为重要的水电建设基地，我国西南地区许多大型水利水电工程位于强震区，高地震烈度下的土体液化会造成水电基础设施的破坏，成为制约工程建设的技术瓶颈；我国正在兴建一批 300 m 级高土石坝，高应力场、高压力水头下的岩土体变形与渗透问题给大坝的设计带来巨大的挑战；随着滇中调水、引汉济渭等长距离引调水工程的开工建设，高地应力、高压力水头下的深埋长大隧洞的安全问题备受关注。

除了恶劣的环境条件，全球气候变化加剧了极端暴雨、地震等发生频率，引起滑坡、泥石流、堰塞体等次生灾害，造成巨大的经济损失和人民生命财产的安全。近年来，受地形地貌、地质构造及气象水文等条件综合作用，我国长江流域上游地区的堰塞体呈多发、频发态势：2008 年“5·12”汶川地震形成较大堰塞体 27 处，最大为唐家山堰塞体。2018 年滑坡形成金沙江江达白格和雅鲁藏布大峡谷加拉两大堰塞体。2019 年贵州水城突降大暴雨，造成“7·23”重大山体滑坡，43 人死亡，9 人失踪。

国家对此类问题十分重视，“十三五”期间启动“水资源高效利用”和“重大自然灾害监测预警与防范”两个重点研发专项，针对相关问题开展技术攻关，形成了一批重要的科研成果。为了加速这些成果的推广应用，促进相关学术交流，本学报特辟一期专刊，征集遴选了 13 篇与岩土工程相关的“十三五”国家重点研发计划项目优秀论文，内容涉及高土石坝的强度与变形、膨胀土边坡稳定、堰塞体的风险评估与处治、长距离引调水工程建设与安全等，以飨读者。

《岩土工程学报》主编　蔡正银

二〇二二年七月

《岩土工程学报》第十三届编委会名单

2021 年 5 月 15 日　北京

名誉编委： 周　镜　　孙　钧　　魏汝龙　　殷宗泽　　李广信

主　　任： 陈生水

副 主 任： 蔡正银　　龚晓南　　孔令伟　　宫剑飞　　陈祖煜　　张建民

编　　委：（以汉语拼音为序）

白　冰　　蔡国军　　蔡袁强　　蔡正银　　陈国兴　　陈锦剑　　陈仁朋　　陈生水　　陈卫忠
陈育民　　陈云敏　　陈正汉　　陈祖煜　　程展林　　崔新壮　　杜修力　　杜延军　　范嘉程
冯世进　　冯夏庭　　高福平　　高文生　　高玉峰　　宫剑飞　　龚晓南　　何满潮　　何　宁
洪振舜　　胡黎明　　黄茂松　　蒋明镜　　孔纲强　　孔令伟　　赖远明　　李典庆　　李术才
李　霞　　李运辉　　梁发云　　刘汉龙　　刘　润　　刘松玉　　路德春　　马　巍　　梅国雄
明经平　　缪林昌　　邵生俊　　沈　强　　沈水龙　　施　斌　　施建勇　　宋二祥　　孙德安
唐朝生　　汪小刚　　王复明　　王兰民　　王立忠　　王明洋　　王　睿　　王卫东　　王玉杰
王　媛　　韦昌富　　翁孟嘉　　吴宏伟　　谢和平　　谢永利　　徐长节　　徐永福　　许怀后
薛　强　　杨春和　　杨光华　　杨　峻　　杨　庆　　杨仲轩　　姚仰平　　于玉贞　　俞　缙
詹良通　　张　嘎　　张鸿儒　　张建红　　张建民　　张璐璐　　张伟文　　张文忠　　赵绍铮
郑　刚　　郑　宏　　郑俊杰　　周创兵　　周小平　　朱　斌　　朱合华　　朱俊高　　邹德高
邹维列

M. Arroyo　　M. D. Bolton　　J. C. Chai　　Ta-teh Chang　　J. Chu
G. Crosta　　Y. J. Cui　　D. Frost　　W. D. Guo　　J. Han
L. Laloui　　F. H. Lee　　X. S. Li　　A. Murakami　　Y. Nakata
F. Nicot　　C. O'Sullivan　　J. C. Santamarina　　S. Utili　　C. Viggiani
J. H. Yin　　H. S. Yu　　F. Zhang

主　　编： 蔡正银

副 主 编： 汪小刚　　杨春和　　明经平

责任编辑： 明经平　　李运辉　　胡海霞　　孙振远　　黄贤沙

岩土工程学报

（月刊 1979 年创刊）

第 44 卷第 7 期（总 380）2022 年 7 月出版

主　　管　中国科学技术协会

主　　办　中国水利学会　中国土木工程学会
中国力学学会　中国建筑学会
中国水力发电工程学会　中国振动工程学会

承　　办　南京水利科学研究院

编辑出版　《岩土工程学报》编辑部
地址：南京虎踞关 34 号，210024
电话：（025）85829534，85829556 传真：（025）85829555
电子信箱：ge@nhri.cn

主　　编　蔡正银

印　　刷　江苏河海印务有限公司

发行范围　公开发行

订　　阅　全国各地邮局（南京邮局总发行）
国内邮发代号 28－62

国外总发行　中国国际图书贸易总公司（北京 399 信箱）
国外发行代号 MO 0520

网　　址　www.cgejournal.com

Chinese Journal of Geotechnical Engineering

(Monthly, Started in 1979)

Vol. 44, No. 7 (Total No. 380) Published in July 2022

Competent Authority:
China Association for Science and Technology

Sponsors:
Chinese Hydraulic Engineering Society, China Civil Engineering Society, The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, The Architectural Society of China, Chinese Society for Hydropower Engineering and Chinese Society for Vibration Engineering

Published under the Auspices of
Nanjing Hydraulic Research Institute

Edited and Published by
Editorial Office of Chinese Journal of Geotechnical Engineering
Address: 34 Hujuguan, Nanjing 210024, China
Tel: 86-25-85829534, 85829556　Fax: 86-25-85829555
E-mail: ge@nhri.cn

Editor-in-Chief:
CAI Zheng-yin

Printed by　Jiangsu Hohai Printing Limited Company

Overseas Distributor:
China International Book Trading Corporation
P. O. Box 399, Beijing, China

Web Site:　www.cgejournal.com

广 告 登 记　江苏省工商行政管理局登记编号：广登 32000000054

《岩土工程学报》征稿简则

本刊于1979年创刊，是中国水利学会、中国土木工程学会、中国力学学会、中国建筑学会、中国水力发电工程学会、中国振动工程学会联合主办的学术性科技期刊。本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊，并在建筑类核心期刊位于前列；本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录；本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录；本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录；本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址（www.cgejournal.com）全文发布本刊所有刊载文章。

1 宗旨及内容

（1）本刊旨在促进学科理论和实践的发展、促进海内外学术交流、加速科研成果向现实生产力转化。

（2)刊登土力学和岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿，倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿，并优先刊用这些稿件。

（3）本刊为月刊，主要栏目有：黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

2 来　　稿

（1）来稿应符合科技论文写作惯例和基本要求，作者自留底稿。请优先采取网络在线投稿（www.cgejournal.com），本刊保留书面投稿（一式两份）和电子邮件投稿（ge@nhri.cn）。

（2）来稿一般在3个月内提出处理意见，请不要一稿两投，若3个月后仍未收到稿件处理通知，作者有权自行处理来稿。

（3）来稿注明作者姓名、性别、出生年月、出生地、学历、学位、技术职称、简历以及研究课题、单位全称及所属部门、地址、电话、传真、电子信箱及邮编等。

（4）署名者应为稿件执笔人或稿件内容的主要责任者。

（5）稿件可能涉及机密资料时应由作者单位出具非泄密证明。

（6）凡被海内外正式出版物公开发表或已录用的稿件本刊不再受理。

3 稿件选用和清稿体例

（1）稿件文责由作者自负。编者对稿件内容和论点不作改动。稿件一经选用应由第一作者参考审阅意见、稿面质疑、本刊体例作必要的修改补正或删减。文图、资料、数据务求准确无误，一次定稿。

（2）作者收到稿件录用通知后，应在45天内将修改清稿（WORD排版打印)连同同意发表稿件的作者声明一并寄回本部,并在线上载或E-mail发送修改清稿的电子文件。

（3）修改清稿版面，黄文熙讲座和综述文章一般不超过15页，论文一般不超过9页，短文和工程实录不超过7页，焦点论坛不超过2页，讨论不超过1页。

（4）稿件一经发表即付稿酬，并按发表文章页数收取版面费。

（5）凡本刊刊登的稿件均收入相应期刊光盘版及期刊网，并与印刷稿一次性付稿酬。

（6）本刊版面为A4开本，双栏排版，版芯为25.4 cm×17.8 cm。

（7）文章清稿层次体例为：中文文题、作者姓名、单位及所属部门、单位地址邮编、摘要、关键词、中图分类号、文献标识码、文章编号、作者简介；英文文题、作者姓名、单位及所属部门、单位地址邮编、摘要、关键词；基金项目及编号(首页下注)；正文（按1 2 3，1.1　1.2　1.3，(1)　(2)　(3)，a)　b) c)分章节)；参考文献。

（8）图表设计恰当，具自明性；先见引文，后见图表；表名和图名一律中英文并列。表格用三线表。单栏图图幅宽为8.0 cm，双栏图图幅宽为17.0 cm。插图比例宜适当，图面宜清晰，线条宜均匀，主线选5号线，坐标线选4号线，辅助线选3号线，图中汉字为小5号宋体字，图中字符务必与正文一致。

（9）计量单位使用我国法定计量单位，公式及中外文字符务必分清大小写，正斜体，黑白体，上下角标等，易混淆字符第一次出现时用铅笔注明。

（10）摘要应写成报道性内容，直接阐明研究的目的、方法、结果和结论，具独立性和自明性，以300字左右为宜。摘要应排除本学科领域中常识性内容，引言中出现的内容不宜写入摘要；不对论文的内容作自我评价；不要简单重复题目中已有的信息；不出现数学公式、化学结构式、插图和表格，不引入参考文献序号。关键词选词规范，以3～8个为宜。鼓励内容较为丰富详细的英文摘要，且语法正确、术语规范。

（11）参考文献限于作者亲自阅读、本文明确引用、公开发表或有案可查者。参考文献全部列于文后，按正文首次引用的先后次序编号，并在正文引用处右上角注明参考文献序号。多次引用同一著者的同一文献时，在正文标注首次引用的文献序号，并在序号的“[]”外著录引文页码。原始语种非英文参考文献后同时附相应的英文项目，并注明其原始语种。参考文献著录项目、体例如下：

a）专著（普通图书、会议文集、学位论文、报告、汇编、标准等)：[参考文献序号] 主要责任者.题名:其他题名信息[文献类型标识/文献载体标识].其他责任者.版本项.出版地:出版者,出版年:引文页码[引用日期].获取和访问路径.数字对象唯一标识符.

b）专著中析出文献：[参考文献序号] 析出文献主要责任者.析出文献题名[文献类型标识/文献载体标识].析出文献其他责任者//专著主要责任者.专著题名：其他题名信息.版本项.出版地:出版者,出版年:析出文献起止页码 [引用日期].获取和访问路径.数字对象唯一标识符.

c）连续出版物（期刊、报纸等）中析出文献：[参考文献序号] 析出文献主要责任者.析出文献题名[文献类型标识/文献载体标识]. 连续出版物题名:其他题名信息,年,卷(期):起止页码 [引用日期].获取和访问路径.数字对象唯一标识符.

d）专利：[参考文献序号] 专利申请者或所有者.专利题名:专利号[文献类型标识/文献载体标识].公告日期或公开日期 [引用日期].获取和访问路径.数字对象唯一标识符.

e）电子资源：[参考文献序号] 主要责任者.题名：其他题名信息[文献类型标识/文献载体标识].出版地：出版者，出版年:引文页码（更新或修改日期）[引用日期].获取和访问路径. 数字对象唯一标识符.

外文文献著录规则同中文文献。外国人名，姓前名后，名用缩写，不加缩写点。

注：①文献类型标识：M—普通图书，C—会议录，G—汇编，N—报纸，J—期刊，D—学位论文，R—报告，S—标准，P—专利，DB—数据库，CP—计算机程序，EB—电子公告，A—档案，CM—舆图，DS—数据集，Z—其他。②文献载体标识：MT—磁带，DK—磁盘，CD—光盘，OL—联机网络。③a),b),c),d) 4项中文献属于原始电子资源的著录“文献载体标识、引用日期、获取和访问路径” 项，文献属于二次电子资源的不著录；e) 项电子资源指除a),b),c),d) 4项中包含的文献类型以外的电子资源；“数字对象唯一标识符”依照原文献如实著录，“获取和访问路径” 项中已包含的省略。

4 退　　稿

（1）未录用稿件一般以E-mail发送退稿通知。

（2）作者收到稿件录用通知3个月仍未寄回修改清稿又未向编辑部说明情况者，即视为作者自动撤稿。

（3）退稿不承诺提供审阅意见。

5 本刊编辑部

本刊编辑部设在南京水利科学研究院科技信息研究中心。地址：南京市虎踞关34号，邮政编码：210024，电话：(025) 85829534，85829556，85829553，85829543，传真：(025) 85829555，电子信箱：ge@nhri.cn，网址： www.cgejournal.com。　　（2019年12月修订）

岩 土 工 程 学 报
YANTU GONGCHENG XUEBAO
第 44 卷　第 7 期（总 380 期）
2022 年 7 月

目　次

论　文

堰塞坝险情处置与开发利用保障技术与装备研发 …… 张宗亮，何　宁，周彦章，王环玲，赵　春，张　嘎，肖恩尚（1175）

长距离调水工程建设与安全运行集成研究及应用 …… 杨启贵，张传健，颜天佑，刘　琪，李建贺（1188）

高土石坝变形破坏过程预测理论和防控技术创新 …… 陈生水（1211）

枢纽工程重要构筑物（群）与地质环境互馈作用机制与控制技术 ……
…… 汪小刚，陈益峰，卢　波，王玉杰，徐卫亚，杨　强，张希巍（1220）

高寒区长距离供水工程能力提升与安全保障技术 …… 蔡正银，张　晨，朱　洵，黄英豪，王　羿（1239）

季节冻土区非饱和膨胀土水－热－变形耦合冻胀模型 …… 凌贤长，罗　军，耿　琳，唐　亮（1255）

堰塞湖风险评估快速检测与应急抢险技术和装备研发 … 蔡耀军，周　招，杨兴国，魏迎奇，郑东健，彭文祥，钟启明，王　衡（1266）

膨胀土滑坡和工程边坡新型防治技术研究 …… 徐永福，程　岩，肖　杰，林宇亮，戚顺超（1281）

膨胀土滑坡与工程边坡新型防治技术与工程示范研究 …… 叶为民，孔令伟，胡瑞林，查甫生，石胜伟，刘樟荣（1295）

堤防险情演化机制与隐患快速探测及应急抢险技术装备 …… 邬爱清，吴庆华（1310）

强震作用下特高土石坝多耦合体系损伤演化机理及安全评价准则 ……
…… 邹德高，刘京茂，孔宪京，陈　楷，屈永倩，宁凡伟，龚　瑾（1329）

特大滑坡实时监测预警与技术装备研发 …… 朱　武，张　勤，朱建军，黄观文，王彦平，朱鸿鹄，胡　伟，胡　俊（1341）

水库大坝安全诊断与智慧管理关键技术与应用 …… 盛金保，向　衍，杨德玮，严吉晔，董　凯（1351）

简　讯

中国土木工程学会第十四届全国土力学及岩土工程学术大会通知（第一号）……（1238）

The 13th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development ……（1265）

彩色插图索引 ……（1328）

《岩土工程学报》征订启事 ……（1340）

《岩土工程学报》第十三届编委会名单 ……（扉页Ⅰ）

征稿简则 ……（扉页Ⅱ）

期刊基本参数：CN 32－1124/TU * 1979 * m * A4 * 192 * zh * P * ￥40.00 *3000* 13* 2022－07

Chinese Journal of Geotechnical Engineering
Vol. 44, No. 7 (Total No.380) July 2022

CONTENTS

PAPERS

Research and development of guarantee technologies and equipments for dangerous situation disposal and utilization of barrier dams
…… ZHANG Zong-liang, HE Ning, ZHOU Yan-zhang, WANG Huan-ling, ZHAO Chun, ZHANG Ga, XIAO En-shang（1175）

Integrated research and application of construction and safe operation of long-distance water transfer projects ……
…… YANG Qi-gui, ZHANG Chuan-jian, YAN Tian-you, LIU Qi, LI Jian-he（1188）

Innovations in prediction theories and prevention technologies for deformation-induced failure process of high earth and rockfill dams
…… CHEN Sheng-shui（1211）

Control technology and interaction mechanism between important structures of multi-purpose projects and geological environment
…… WANG Xiao-gang, CHEN Yi-feng, LU Bo, WANG Yu-jie, XU Wei-ya, YANG Qiang, ZHANG Xi-wei（1220）

Improvement of capacity and safety protection technology for long-distance water delivery projects in cold regions ……
…… CAI Zheng-yin, ZHANG Chen, ZHU Xun, HUANG Yin-hao, WANG Yi（1239）

Coupled hydro-thermo-deformation frost heave model for unsaturated expansive soils in seasonally frozen soil regions ……
…… LING Xian-zhang, LUO Jun, GENG Lin, TANG Liang（1255）

Rapid detection for risk assessment, emergency disposal technology and equipment development of barrier lakes … CAI Yao-jun,
…… ZHOU Zhao, YANG Xing-guo, WEI Ying-qi, ZHENG Dong-jian, PENG Wen-xiang, ZHONG Qi-ming, WANG Heng（1266）

New prevention and control technology for expansive soil slopes ……
…… XU Yong-fu, CHENG Yan, XIAO Jie, LIN Yu-liang, QI Shun-chao（1281）

New prevention and treatment techniques and their applications to landslides and engineering slopes of expansive soils ……
…… YE Wei-min, KONG Ling-wei, HU Rui-lin, ZHA Fu-sheng, SHI Sheng-wei, LIU Zhang-rong（1295）

Evolution mechanism of dike risks, quick detection of hidden dangers, and technical equipments of emergency rescues ……
…… WU Ai-qing, WU Qing-hua（1310）

Damage evolution mechanism and safety evaluation criterion of ultra-high rockfill dam system under strong earthquakes ……
…… ZOU De-gao, LIU Jing-mao, KONG Xian-jing, CHEN Kai, QU Yong-qian, NING Fan-wei, GONG Jin（1329）

Real-time monitoring and early warning technology for huge landslides ……
…… ZHU Wu, ZHANG Qin, ZHU Jian-jun, HUANG Guan-wen, WANG Yan-ping, ZHU Hong-hu, HU Wei, HU Jun（1341）

Key technologies and applications of safety diagnosis and smart management of reservoir dams ……
…… SHENG Jin-bao, XIANG Yan, YANG De-wei, YAN Ji-hao, DONG Kai（1351）

NEWS ……（1238，1265，1328，1340）

Members of Editorial Board of Chinese Journal of Geotechnical Engineering ……（head page Ⅰ）

Invitation for original papers ……（head page Ⅱ）

Serial parameters: CN 32－1124/TU * 1979 * m * A4 * 192* zh * P * $40.00 *3000* 13 * 2022－07

DOI：10.11779/CJGE202207001 “十三五”国家重点研发计划项目

堰塞坝险情处置与开发利用保障技术与装备研发

张宗亮[1]，何 宁[2, 3]，周彦章*[2, 3]，王环玲[4]，赵 春[5]，张 嘎[6]，肖恩尚[7, 3]

(1. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司，云南 昆明 650051；2. 南京水利科学研究院，江苏 南京 210029；3. 水利部水库大坝安全重点实验室，江苏 南京 210029；4. 河海大学，江苏 南京 210024；5. 中国水利水电科学研究院，北京 100038；6. 清华大学，北京 100084；7. 中国水电基础局有限公司，天津 301700)

摘 要：为保障人民生命财产安全和国家社会经济安全可持续发展，应对自然灾害时趋利避害，在减少灾害损失的同时最大程度地利用自然界的无穷力量为人民造福，是国家和行业发展要求的重大趋势。“十三五”国家重点研发计划项目“堰塞坝险情处置与开发利用保障技术与装备研发”针对重大科技问题挑战，从机理揭示和基础理论及应用基础研究、应用技术与装备研发、技术集成与应用示范多层次开展研究工作，在堰塞坝险情演化过程、长期工作性态演变机理、开发利用理论与综合整治技术等方面形成了具有新时期行业特色的创新成果，能够为堰塞坝险情处置、开发利用工程建设和长期安全运行提供重要理论依据和先进技术保障，确保堰塞坝开发利用工程充分发挥消除洪水灾害隐患、改善当地供水与灌溉条件、除害兴利等作用功效，社会经济效益显著。



关键词：堰塞坝；险情处置；开发利用；安全保障；长期工作性态；综合整治技术

中图分类号：TV22 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2022)07－1175－13

作者简介：张宗亮(1963—)，男，中国工程院院士，全国工程勘察设计大师，博士，天津大学、河海大学博士生导师，水工结构工程专家。现任中国电力建设集团有限公司首席专家，水电水利规划设计总院专家委员会主任委员，中国电建集团昆明勘测设计研究院总工程师、副总经理，国家能源水电工程技术研发中心副主任兼高土石坝分中心主任。长期致力于高坝工程设计和建设研究与实践，主持和组织设计建成糯扎渡、天生桥一级、红石岩、观音岩、黄登等24座大型水利水电工程。在土石坝筑坝材料、坝体结构和设计理论与方法等方面做出创新性贡献，建立了300 m级特高心墙坝设计体系，发展了200 m级面板坝设计体系，提出了100 m级堰塞坝设计体系，提升了我国土石坝建设技术水平。主持和组织完成国内外75座水电站（总装机容量3470万kW）勘察设计科研工作，作为首席科学家主持国家重点研发计划项目“堰塞坝险情处置与开发利用保障技术与装备研发”1项，参与国家973计划项目1项，国家支撑计划项目12项，主持云南省重大科技专项2项；主编标准6项；发明专利16项；软件著作权17项；论文105篇；专著10部。获国家科技进步二等奖6项，省部级科技进步特等奖3项，一等奖7项。获光华工程科技奖、何梁何利科学与技术创新奖、杰出工程师奖和云南省杰出贡献奖，高土石坝团队获中央企业优秀创新团队。E-mail: zhang_zl@powerchina.cn。

Research and development of guarantee technologies and equipments for dangerous situation disposal and utilization of barrier dams

ZHANG Zong-liang[1], HE Ning[2, 3], ZHOU Yan-zhang[2, 3], WANG Huan-ling[4], ZHAO Chun[5], ZHANG Ga[6], XIAO En-shang[7, 3]

(1. Power China Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. MWR Key Lab of Reservoir Dam Safety, Nanjing 210029, China; 4. Hohai University, Nanjing 210024, China; 5. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 6. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 7. Sinohydro Foundation Engineering Corporation Limited, Tianjin 301700, China)

Abstract: In order to ensure the safety of people's lives and properties and the sustainable development of the national social and economic security in China, it is a major trend required by the development of the country and industry to seek advantages and avoid disadvantages when dealing with natural disasters, and to maximize the use of the infinite power of nature to benefit the people while reducing disaster losses. The National

基金项目：国家重点研发计划项目（2018YFC1508500）
收稿日期：2022－02－28
*通信作者（E-mail: yzzhou@nhri.cn）

Key R & D Program of China “Research and development of guarantee technologies and equipments for dangerous situation disposal and utilization of barrier dams” aims at the challenges of the major scientific and technological problems, and multiple levels of work are carried out in this research program, such as mechanism disclosure, basic theory, equipment development, technology integration, application studies and application demonstration. The innovative achievements with industrial characteristics in the new era have been made in terms of the evolution process of dangerous situations of barrier dams, the evolution mechanism of long-term working behaviors, the development and utilization theory and the comprehensive treatment technologies. The important theoretical basis and advanced technical support can be provided for the disposal of barrier dam hazards, the construction of development and utilization projects and the long-term safe operation. The research achievements ensure that the development and utilization of the barrier dams can fully play the role of eliminating dangers of flood control disasters in the upstream and downstream of the barrier lakes, improving the local water supply and irrigation conditions, eliminating harm and promoting profits, with significant social and economic benefits.

Key words: barrier dam; dangerous situation disposal; development and utilization; security guarantee; long-term working behavior; comprehensive treatment technology

0 引 言

为贯彻落实党中央、国务院防灾减灾救灾工作重大部署，提升国家防灾减灾救灾能力，保障人民生命财产安全和国家社会经济安全可持续发展，“十三五”期间，科技部会同相关部门和地方，设计了国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项。2018 年 11 月，“堰塞坝险情处置与开发利用保障技术与装备研发”经公示立项，对应指南“重大水旱灾害监测预警与防范”方向，项目由南京水利科学研究院牵头，中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司、河海大学、中国水利水电科学研究院、清华大学、中国水电基础局有限公司、武汉大学、四川大学、长江勘测规划设计研究有限责任公司、中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司共 10 家单位共同参与。项目围绕堰塞坝险情处置与开发利用安全保障需要，通过三年时间联合攻关，解决了基于堰塞坝形成机理和探测技术的堰塞坝病险情分析理论、堰塞坝长期工作性态演变机理、堰塞坝开发利用评价和设计及堰塞坝安全评价理论等关键科学问题，研发了堰塞坝病险情探测识别、堰塞坝险情空天地一体化监测、堰塞坝原位检测以及堰塞坝料试验、堰塞坝综合整治等创新性技术成果与装备，形成了堰塞坝整治技术安全评价与运行管理系统，构建了堰塞坝开发利用安全保障成套技术支撑体系，为堰塞坝险情处置和开发利用工程建设及其长效安全运行提供了有力的科学依据和技术支撑。本文就项目研究背景、关键科学技术问题、主要研究内容、主要创新成果和成果应用示范情况等进展情况作简要介绍。

1 项目研究背景

堰塞坝常常伴随着地质灾害而产生，在世界各地山区广泛分布，如 2008 年“5·12”汶川地震形成以唐家山为代表的大小堰塞坝 30 余座。2018 年 10 月 11 日 7 时 10 分许，西藏自治区江达县波罗乡境内发生山体滑坡，造成金沙江断流并形成堰塞湖。完成堰塞坝应急抢险后，对堰塞坝进行病险情处置、加固处理及开发利用，使之成为调蓄水库和绿色电站，具有良好的社会经济效益。

20 世纪 80 年代以来，国内外专家已经对堰塞坝形成条件和机制、失稳溃决特性及稳定分析方法、应急除险技术等开展了相关研究。汶川地震发生后，有关单位相继开展了“震损水库及堰塞湖风险评估与处置关键技术研究”等多个堰塞坝相关的国家和行业科研项目研究，中国在堰塞坝应急处置技术方面的研究得到快速发展（图 1）。2009 年，水利部颁布实施了《堰塞湖应急处置技术导则：SL 451—2009》等行业技术标准，在甘肃舟曲特大山洪泥石流堵江等堰塞湖应急处置中发挥了重要作用。目前，虽然中国在堰塞坝应急处置方面的技术发展迅速，但是在堰塞坝开发利用评价理论、病险情处置、勘察设计、加固处理与安全保障等技术方面存在明显不足，在险情处置、开发利用及长效安全运行工作方面面临重大科技挑战，在堰塞坝险情处置和开发利用工程建设及堰塞坝长效安全运行相应理论和技术缺乏系统研究[1-2]。

问题挑战 1：堰塞坝形成诱因、形成机理和特征有所不同，有待开展基于堰塞坝形成机理基础上的堰塞坝体病险情隐患探测和识别技术研究，针对性地进行加固处理和开发利用；为满足堰塞坝应急抢险需要，目前基于遥感观测等技术对堰塞坝及高边坡形态进行监测的技术逐步得到应用，但仅限于单项技术的应用，为满足堰塞坝加固处理和开发利用需要，识别和评价堰塞坝空间结构和物性参数（密实性、级配、均匀性和结构特性）的监测和原位检测技术有待深化研究；

堰塞坝料的室内试验研究以往多参照土石坝有关规范进行，但两者间存在显著差别，亟需研究适用于超宽级配堰塞坝料的室内试验方法并开发相应试验设备。



图 1 近年中国典型堰塞坝及险情处置实例（白格、米林、唐家山、红石岩）

Fig. 1 Examples of typical barrier dams and dangerous situation disposal in China in recent years

问题挑战 2：堰塞坝应力变形和渗流特性及稳定性分析大多按照土石坝的理论方法，但与常规土石坝不同，滑坡形成的堰塞坝体与基础、库岸边坡存在着天然的复杂联系，堰塞坝复杂体系工作性态和安全性的演化，是现有的分析理论方法难以合理考虑的，涉及土与结构相互作用、多过程耦合分析、多尺度理论等非线性力学和岩土工程等领域的交叉创新，亟需深入研究堰塞坝多体多过程相互作用特性及长期工作性态演变机理，发展出复杂条件下堰塞坝变形、渗流与稳定性的大规模一体化计算方法。

问题挑战 3：国内外针对堰塞坝的研究工作主要集中于堰塞湖应急抢险方面，关于堰塞坝开发利用的相关研究少见报道。目前国内外直接利用堰塞坝或堰塞湖的工程案例很少，缺乏相应的开发利用评价方法、设计技术、综合治理技术、加固处理技术、安全监测和安全保障技术成果，亟需开展深化研究，为堰塞坝开发利用提供理论与技术支撑。国内正在进行综合开发利用的仅有中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司负责设计的牛栏江红石岩堰塞坝整治工程[3]。通过对多个典型堰塞坝应用示范工程开展深入研究，形成堰塞坝安全评价与运行管理系统，构建堰塞坝开发利用安全保障技术成套支撑体系，可为指导堰塞坝险情处置及开发利用奠定良好基础。

2　研究目标与内容

2.1　项目研究目标

作为“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项支撑重大水旱灾害监测预警与防范任务方向，“堰塞坝险情处置与开发利用保障技术与装备研发”项目立足于整体提升中国堰塞坝险情处置与开发利用安全保障的科技水平，有效保障人民生命和财产安全提供科技支撑，重点解决堰塞坝病险情分析理论、堰塞坝长期工作性态演变机理、堰塞坝开发利用评价和设计及其安全评价理论等 3 大关键科学问题，突破堰塞坝病险情探测识别与评价技术、堰塞坝原位检测及其坝料试验技术、堰塞坝长期工作性态一体化计算技术、堰塞坝病险情处置和加固技术、堰塞坝开发利用评估和设计技术、堰塞坝一体化监测和预警技术等关键技术并研发 8 套技术装备，构建基于 BIM 技术的堰塞坝综合治理安全保障技术平台，在 3 个以上不同类型堰塞坝工程开展示范应用。

2.2　主要研究内容

项目设置了六大任务目标，即 6 个课题开展研究工作，课题设置、承担单位及负责人如表 1，各课题间逻辑关系如图 2。

表 1 课题设置情况表

Table 1 Arrangement of tasks

序号	名称	承担单位	负责人
1	堰塞坝病险情辨别与探测技术	河海大学	王环玲
2	堰塞坝空间结构识别及材料参数空间变异特性与试验技术	中国水利水电科学研究院	赵　春
3	堰塞坝长期工作性态演变机理与一体化分析方法	清华大学	张　嘎
4	堰塞坝改良加固专用技术与装备研发	中国水电基础局有限公司	肖恩尚
5	堰塞坝开发利用理论与安全评价体系	南京水利科学研究院	何　宁
6	堰塞坝综合整治技术及工程应用示范	中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司	张宗亮

3　关键科学技术问题

围绕任务目标，“堰塞坝险情处置与开发利用保障技术与装备研发”项目着重解决 3 个关键科学问题。

（1）基于堰塞坝形成机理和探测技术的堰塞坝病险情分析理论。研究地震动力高边坡失稳破坏形成堰塞坝险情过程与演化机制，揭示地震滑坡灾变的时空响应机制和演化规律，建立堆积颗粒土体的动态本构模型和分析方法。

（2）堰塞坝长期工作性态演变机理。研发堰塞坝材料物理力学特性声波等原位检测技术和装备；研究准确描述高边坡及堰塞坝几何特征的新方法；研究堰塞坝材料室内试验技术和方法，研究堰塞坝材料长

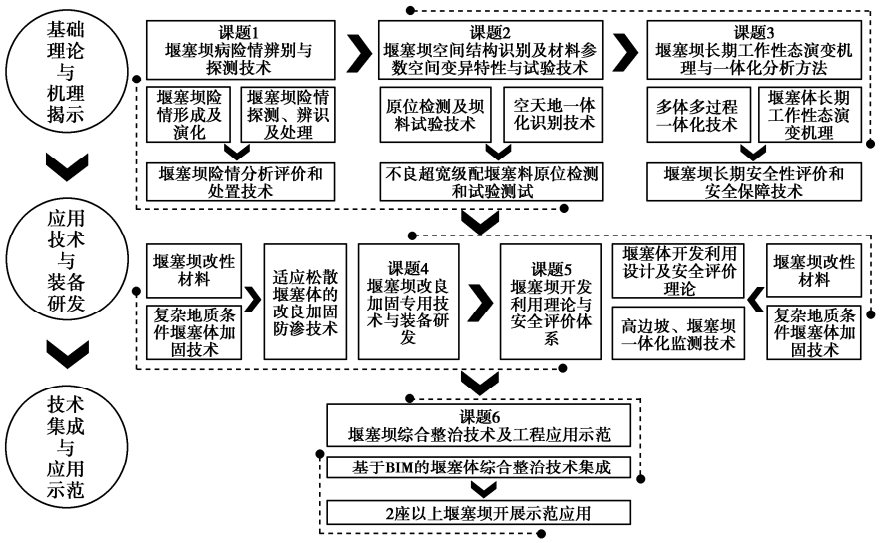


图 2 课题间逻辑关系图

Fig. 2 Logical relationship among tasks

期变形特性；研究堰塞坝材料参数空间变异性，建立堰塞坝材料物理力学参数数据库；针对堰塞坝坝体、基础及库岸构成的多体多尺度相互作用系统，着重考虑材料强非线性、界面强非连续、多过程耦合效应等复杂条件，从机理入手着力于研究一体化的大规模、精细化数值计算方法，准确分析高边坡、堰塞坝结构一体化的变形、渗流与稳定性状，揭示堰塞坝长期工作性态演变机理。

（3）堰塞坝开发利用评价和设计及其安全评价理论。多层次多因素决策的堰塞坝开发目标论证数学模型和堰塞坝开发利用必要性和合理性的决策方法，堰塞坝开发利用评价方法与设计技术；堆积颗粒土体的动态本构模型和分析方法，考虑空间变异性的堰塞坝材料参数确定方法；复杂条件下高边坡、堰塞坝一体化的大规模、精细化数值计算方法；堰塞坝安全评价理论和方法等。

本项目重点解决的关键技术问题包括：①堰塞坝病险情探测识别技术与装备；②堰塞坝病险情风险分析评价和处置技术；③堰塞坝险情空天地一体化监测技术；④堰塞坝原位检测以及堰塞坝料试验技术与装备；⑤堰塞坝病险情处置和加固技术与装备；⑥高边坡、堰塞坝一体化监测技术与装备；⑦堰塞坝开发利用综合整治技术。

4 主要创新性成果

4.1 堰塞体病险情识别、探测与试验技术

（1）提出了地震动力高边坡失稳形成堰塞坝演化过程非连续细观颗粒材料动态本构模型及数值模拟方法（图 3），结合岩体宏细观力学参数，有效反映岩体的拉、压变形与强度特性，得到宏细观参数随应变率演化规律；基于数字图像细观介质识别与重构，利用颗粒材料软弱矿物协同，建立了反映裂隙岩体细观尺度非均质性的元胞自动机细观数值模拟方法[4]。提出了细观数值模拟地震动力施加方法与模型边界控制方法，有效模拟地震波在岩体中传播过程；基于数值模拟与现场监测，揭示地震动力作用下岩质边坡失稳形成堰塞坝的运动特征与堆积演化，揭示了堰塞体险情形成过程与演化机理。

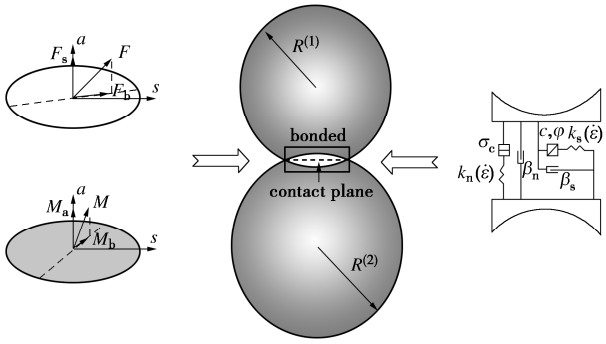


图 3 地震动力作用下颗粒材料动态本构模型

Fig. 3 Dynamic constitutive model for granular materials under seismic dynamic action

（2）提出了基于模糊层次法和广义熵值法的堰塞体病险情识别和风险评估方法，辨识出地震滑坡形成堰塞坝病险情主要风险因子，建立了堰塞坝病险情综合评价指标体系，评估揭示了性态演化的多过程多体相互作用机理[5]。开展基于 COW 算子赋权法的堰塞坝灰色聚类风险分析与评价，研发降低堰塞坝应急处置风险的现场专家打分快速风险评估系统；构建基于降低系统风险的堰塞坝病险情集成处置技术，建立了病险情应急风险处置技术体系（图 4）。

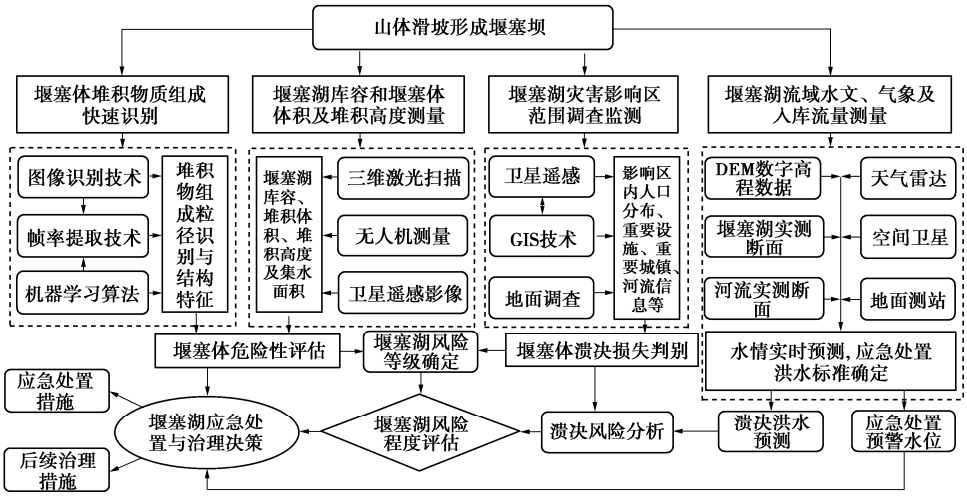


图 4　堰塞坝病险情应急风险处置技术体系

Fig. 4 Technical system for emergency risk disposal of diseases of barrier dams

（3）集成研发了堰塞体外部形态和空间结构识别探测技术（图 5）。基于空天地一体化技术实现了堰塞体及高边坡的形变异常探测和预警，揭示了外部表观形态和空间变异趋势，利用地基合成孔径雷达干涉测量（GB-InSAR）并融合无人机探测获取目标对象的结构、形态和实时微小变形，对堰塞坝及高边坡的外部形态和空间变异趋势进行掌控，实现变形异常风险预警。应用于红石岩堰塞体右岸高边坡变形安全预警和高边坡分区域变形规律研究，开展了堰塞体外观岩体粒径识别技术研究，提升影像资料处理的智能化、自动化水平。

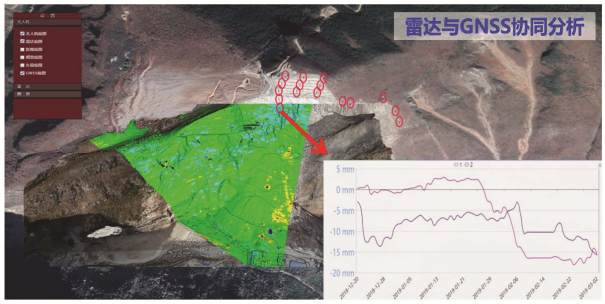


图 5　堰塞坝及高边坡的外部形态和空间变异识别探测

Fig. 5 Identification and detection of external shape and spatial variation of barrier dams and high slopes

（4）改进研发综合勘察、原位检测和室内试验技术[6]。通过开展孔内及地表原位检测方法研究（图 6），综合比对形成堰塞体多参数综合评价体系，揭示堰塞体物性特征和材料参数，通过波速、波幅、振动频率、频散特性等一系列堰塞坝材料物性研究，评价堰塞坝密实特性，为堰塞坝稳定性评价和施工处理提供依据。开展多项针对超宽级配堰塞坝料的室内试验（三轴对比试验、不同方法缩尺试验、击实试验、湿化试验等）并取得成果，为堰塞坝长期工作性态演变机理与评价分析奠定了基础[7]。

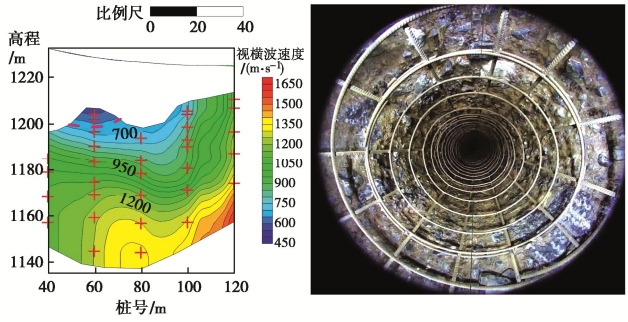


图 6　堰塞坝空间结构和物性参数检测识别

Fig. 6 Detection and recognition of spatial structure and physical parameters of barrier dams

4.2　堰塞坝长期工作性态演变机理与评价分析方法

（1）通过堰塞坝防渗结构接触特性研究，建立了土与结构界面三维弹塑性损伤本构模型和结构局部裂缝 FEM（有限元）－PD（近场动力学）耦合多尺度模型（图 7）；提出了堰塞坝变形破损的跨尺度计算方法，建立了堰塞坝防渗墙破损的等效模型；基于 CSUH 模型框架，建立了考虑块体效应细观机制的堰塞料弹塑性本构模型，提出了复杂条件下防渗结构破损特性精细化分析方法，开发了堰塞坝防渗结构变形破损多尺度精细化数值计算软件，有效地模拟混凝土的复杂裂缝形态及其扩展过程[8]。

（2）建立了基于浸没边界法的 LBM-DEM 方法的流固耦合程序，模拟了水力作用下堰塞体颗粒侵蚀的初始化和扩散，渗流条件下颗粒体系经历了平衡—不平衡—准平衡的转换过程，颗粒的侵蚀区域与路径受到应力状态以及力链结构的影响，统计多座堰塞坝颗粒级配进特征，采用 LBM-DEM 方法计算分析代表性级配试样渗透特性，表明颗粒粒径分布显著影响试样内部孔隙通道的结构性，揭示了堰塞坝发生渗流侵

蚀并最终破坏的细观触发机制和宏观响应（图 8）；基于混合流体简化思路将孔隙水和孔隙气视为一种可压缩的混合流体，通过建立混合流体和孔隙水的连续性方程，提出了基于流固耦合的渗透系数空间变异等复杂条件下堰塞坝-坝基-库岸系统渗流计算方法[9]。

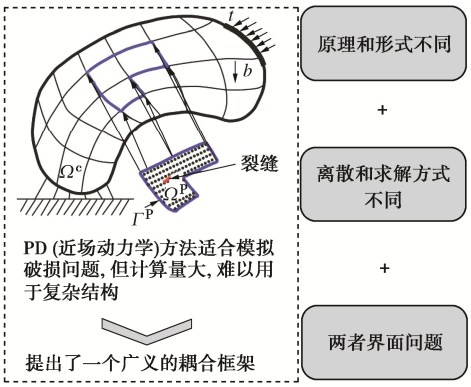


图 7 FEM（有限元）－PD（近场动力学）耦合方法

Fig. 7 FEM (finite element) – Pd (near field dynamics) coupling method

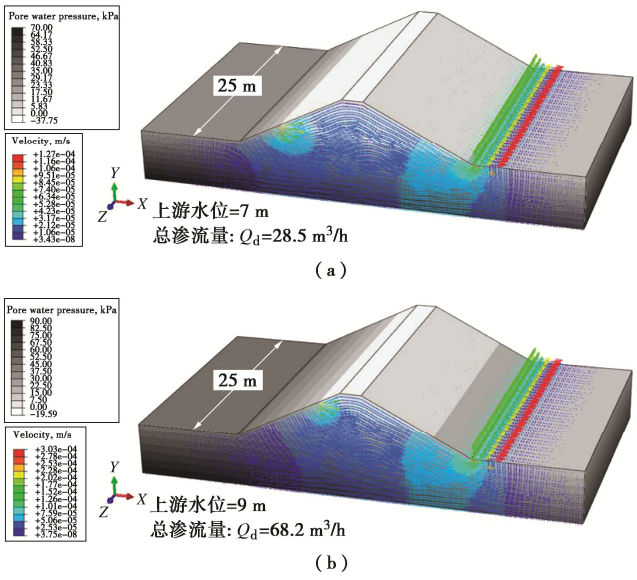


图 8 不同水位条件下的确定性分析结果（渗透系数保持常数）

Fig. 8 Deterministic analysis results under different water level conditions (permeability coefficient keeping constant)

（3）通过试验观测堰塞料的宏观力学特性与细观组构响应，建立了堰塞料宏细观一体化本构模型，合理描述了堰塞料的非线性、压硬性、剪胀性等基本宏观力学特性；发展了堰塞坝料破碎演化方程和界面流变模型；通过自主研发的堰塞坝离心模型试验，揭示了堰塞体与防渗结构、堰塞体与基础边坡之间的相互作用机理，提出了堰塞坝与边坡一体化长期变形分析方法，开发了数值计算软件。依托红石岩堰塞坝工程开展堰塞坝一体化计算，分析得到堰塞坝空间变异性随机性特征，研究了架空结构及渗透空间变异性对堰塞坝应力变形与渗流特性的影响规律，揭示了堰塞坝工作性态变异规律（图 9）。阐明了从施工、蓄水到运行过程的堰塞坝变形、破损、渗流等工作性态，揭示了堰塞坝长期工作性态演变机理和空间变异规律[10]。

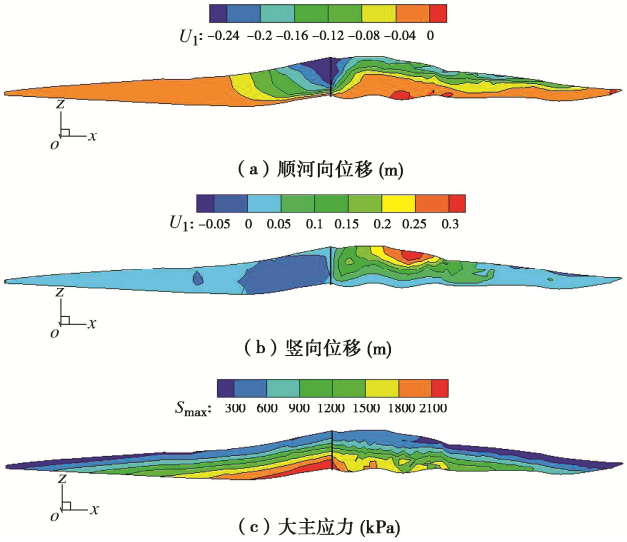


图 9 红石岩堰塞坝工程蓄水运行期典型纵剖面应力变形分布

Fig. 9 Distribution of stress and deformation of typical longitudinal section of Hongshiyan dam project during water storage and operation

4.3 堰塞坝开发利用理论与综合整治技术体系

（1）堰塞坝开发利用分析方法和综合评价体系与模型。根据堰塞坝开发利用分析要求，通过全面获取堰塞坝开发利用评估基础数据，提出了包括防洪减灾要求分析、供水灌溉要求分析以及发电要求分析在内的堰塞坝整治开发综合利用分析理论与方法，结合区域经济发展和社会需要，分析评估了堰塞坝开发利用的经济社会效益；根据环境影响、社会效益和经济效益等方面评价要求，构建了堰塞坝开发利用综合评价指标体系（图 10），应用多目标综合决策指标体系、多层次多目标决策建立了开发利用评价数学模型和综合评价方法，得到国内多座典型堰塞坝开发利用综合评价结果，其中红石岩堰塞坝、唐家山堰塞坝开发利用综合效益较高，舟曲泥石流堰塞坝、白格堰塞坝综合效益较低，为堰塞坝开发利用经济社会效益分析评估和综合评价提供理论和实践依据，解决了堰塞坝开发利用分析和量化综合评价的关键技术问题。

（2）堰塞坝开发利用综合勘察设计技术体系（图 11）。应用无人机、倾斜摄影技术等先进技术，开展堰塞湖核心及相关区域地形测量，获取相关地形及灾害数据，提出了适合堰塞坝的三维地形模型构建技术[11]。针对堰塞堆积体地形起伏较大，大孤石、块石多，架

空现象严重，堆积深厚，且物质组成不均匀、无明显层状结构，绝大多数物探方法不具备作业条件的难题，采用被动源面波法、瞬变电磁法、水上折射波法、高密度电法、综合测井等相结合的综合物探方法，创新了水上地震折射数据采集方法、开发了滑坡体综合物探方法解释软件，并参考地质测绘、重型勘察成果进行综合解释，可有效提高勘探精度，实现了堰塞坝物质不均性、相对密实情况、空间分布及底界面深度的准确探测。用地质测绘、地形数据、综合物探数据、重型勘探（含大竖井）数据等，基于自主研发的三维地质系统，构建了堰塞湖核心区的三维地质模型（图 12），为综合整治设计提供了可靠的数据依据，可全面准确展现各阶段工程地质条件，实现了地质模型与建筑物模型的融合、地质与设计的三维无缝对接和 CAD/CAE 集成应用。

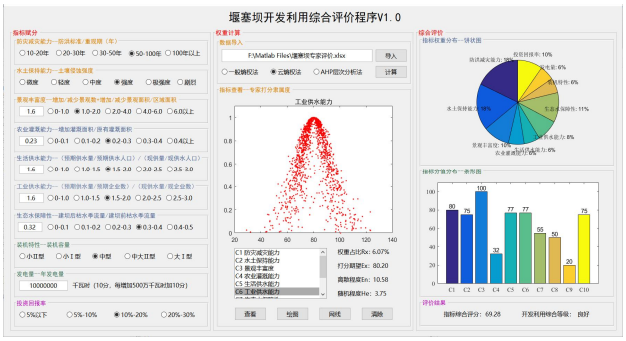


图 10　堰塞坝开发利用综合评价程序软件界面

Fig. 10 Software interface of comprehensive evaluation program for development and utilization of barrier dams

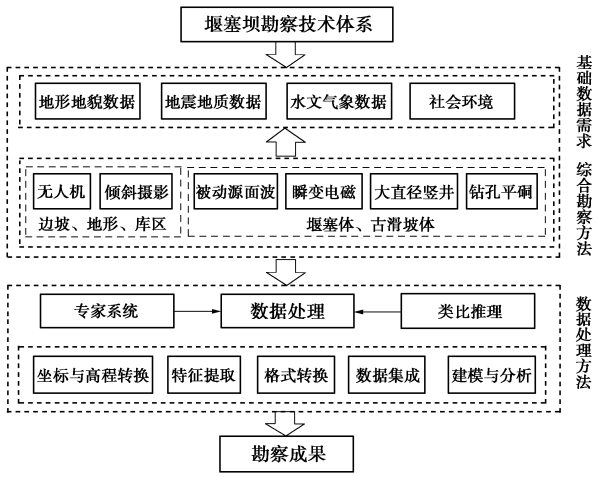


图 11　堰塞坝综合勘察技术体系

Fig. 11 Comprehensive investigation technology system of barrier dams

以红石岩堰塞坝整治开发利用典型工程为例，研究提出了堰塞坝整治工程泄水建筑物、高陡边坡稳定加固和堰塞坝及其基础防渗加固等关键技术与设计优化方法。通过堰塞坝高陡边坡岩体力学参数反演，开展基于 FLAC^{3D} 的边坡破坏模式、基于非连续变形分析（DDA）的破坏过程数值模拟，确定高陡边坡主要受控因素，对高陡边坡不同分区采用不同的加固治理设计方案；对比混凝土防渗墙和自流控制灌浆防渗两种方案，综合提出堰塞体采用防渗墙+防渗帷幕、两岸通过灌浆洞帷幕灌浆的坝体及其基础防渗加固设计方案，形成了堰塞坝开发利用工程关键部位优化设计技术体系（图 13）；通过堰塞坝各阶段结构整体性及其他部位衔接设计计算，构建了堰塞体与周边山体衔接加固和堰塞体与水工建筑物衔接加固设计技术。

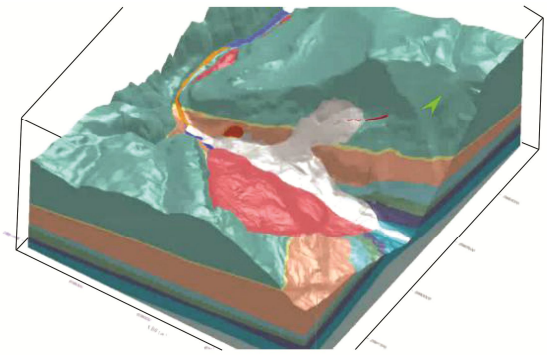


图 12　红石岩堰塞坝核心区三维地质模型

Fig. 12 Three-dimensional geological model for core area of Hongshiyan barrier dam

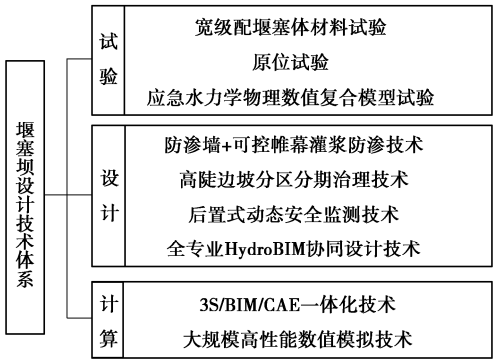


图 13　红石岩堰塞开发利用设计技术体系

Fig. 13 Development and utilization design technology system for Hongshiyan barrier dam

（3）研发了堰塞坝开发利用改良加固专用技术。通过研发堰塞料强夯模型试验装置，开展唐家山、易贡、舟曲宽级配堰塞料进行强夯、振冲和冲击碾压试验，建立了堰塞料强夯数值计算模型并得到其密实效果，从宏微观角度分析堰塞料密实机理；研发松散堰塞料动力密实装置及采集系统，通过应力发展、变形累计、颗粒破碎及颗粒运动特征，揭示其动力密实机理并分析其和加固效果；研究提出了强夯、振冲、冲击碾压 3 种松散堰塞料的动力密实技术。

（4）研发了复杂地质条件百米级松散堰塞坝防渗体系施工关键技术与装备。开展堰塞坝混凝土防渗

墙加固技术和装备研发，提出了成墙钻孔过程中的预爆破方法（图 14），形成优化气浆混合堵漏的成槽堵漏技术；优化灌浆方式及灌浆工艺参数，研发新型灌浆材料并进行室内及现场试验；设计优化自动拔管机结构，现场试验验证装备效果，研发低净空液压跟管钻机。开发了堰塞体跟管钻进造孔技术并研发了配套施工装备，解决了百米级堰塞坝防渗墙施工及其基础帷幕灌浆加固技术难题。



图 14 全液压跟管钻机预灌预爆孔

Fig. 14 Pre-filling and pre-blasting hole of full hydraulic pipe following drill

（5）堰塞坝动态安全监测、安全评价与预警技术体系。开展了堰塞体内部水平位移分布式传感测量监测技术、基于并联式大量程位移计的堰塞体内部沉降及其基础变形自动化监测技术等研发与实际应用；研发了从感知层、网络层到运用层的安全监测智能采集成套装备，提出了基于现代物联网技术的库岸边坡施工期智能安全监测方案，构建了堰塞坝-高边坡全生命周期一体化监测技术体系[12]，用于堰塞坝整治开发及长期利用过程安全监测，验证了技术方法用于滑坡和堰塞坝开发利用中安全监测的可行性及可靠性。

基于多源信息融合理论构建了堰塞坝的安全诊断模型；建立了能够反映堰塞坝堰塞模式、处置方式、河谷形态等基本结构特征的概化模型，计算揭示了不同类型堰塞坝的应力变形特征；提出了用于待反演参数及测点位置联合优选的“参数-测点优选度”方法，实现了不考虑参数空间变异情况下的堰塞坝材料力学参数实时反演、多材料“解耦”反演以及材料空间变异参数随机反演；基于广义熵值法、神经网络法和模糊层次分析法，建立了堰塞坝的安全预警模型和安全评价指标体系，分析了报警指标、预警权重和预警阈值等确定方法，解决了堰塞坝安全评价与预警技术等关键技术问题，为堰塞坝整治工程安全保障提供技术支撑。

4.4 仪器装备与材料研发

（1）堰塞体原位堆积材料钻孔内弹性波检测仪

为满足堰塞坝等松散体中检测的需求，从震源、接收器和数据采集器等方面改进研发了堰塞体原位堆积材料钻孔内弹性波检测仪（图 15），制造了初代设备。通过设计研发新型电火花探头震源，在探头内部预埋光纤，解决了由于电火花激发时产生的高电压、大电流的干扰，能精准的获取震源激发的时刻；数据采集器技术指标从传统的最小采样间隔 100 μs，动态范围大于 110 dB，提高到最小采样间隔 5 μs，动态范围大于 125 dB。经过与现有设备进行对比测试，显著改进其触发时间准确性，大幅提高采集信噪比和精度。



图 15 松散堆积材料钻孔内弹性波检测系统

Fig. 15 Elastic wave detection system in borehole of loosely accumulated materials

（2）堰塞体结构隐患探测设备与数据采集装置

基于多源面波法及弹性波 CT 技术，研发堰塞坝堆积体结构特征隐患探测辨识技术装备，揭示地震滑坡形成堰塞坝的堆积体内在结构特征[13]。对红石岩堰塞坝和白格堰塞体开展查勘和现场试验，测试成果显示出了滑坡体的厚度及边界（图 16），为滑坡稳定性计算分析及危险性评价提供有效证据。面波法有效探测深度为 30～60 m，速度结构特征分布明显；可根据速度有效区分岩体结构分布；探测出滑坡体厚度与边界，探测深度可达到 180 m。

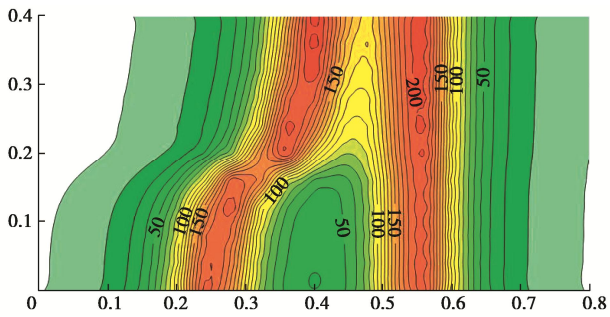


图 16 红石岩堰塞体面波波速剖面

Fig. 16 Wave velocity profile on surface of Hongshiyan barrier dam

（3）堰塞体渗漏通道隐患探测设备

提出了堰塞坝抗干扰渗漏通道探测方法，设计研发了新型渗漏检测技术，将伪随机辩识技术应用于磁电勘探技术中，提高其精度及抗干扰能力；结合磁通门磁传感器与传统的伪随机激电仪器，使用伪随机电流代替传统交变电流，利用相关辨识原理进行磁场的降噪处理，研发了适用于堰塞坝渗漏通道磁电勘探设备；通过电流环路试验、水槽渗漏通道探测试验、土石坝模型渗漏通道探测试验及红石岩堰塞坝现场试验等验证了工作性能[14]。测量系统简单便携，对地形适应性强，可满足各种复杂地质条件要求，在检测渗漏通道等良导地质体上具有技术优势，揭示了堰塞坝堆积体渗透结构和渗流通道特征（图 17），形成了堰塞坝堆积体渗透结构和渗漏路径辨识技术。

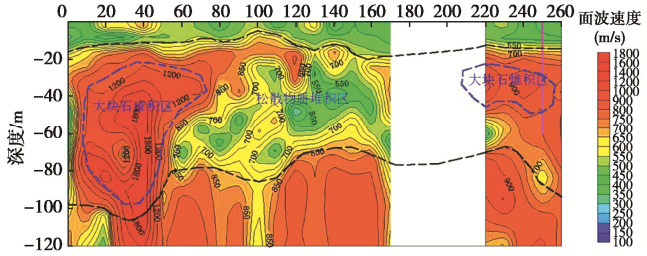


图 17　典型渗流通道模型磁场平面分布图

Fig. 17 Plane distribution of magnetic field in typical seepage channel model

（4）高精度分级加载超大型高压水平渗透试验设备

针对目前堆石料渗透系数试验一般采用直径为 30 cm 的大型渗透试验仪、最大试验粒径为 6 cm 的现状，与堰塞坝材料近 10 m 的最大粒径相比，缩尺效应非常明显；现有大型渗透试验水流方向自下而上，与堰塞坝建成之后的水平渗透实际不符，仅能开展单层料渗透试验。为准确测量并掌握不良超宽级配堰塞坝料的渗透性能，研发了长为 1 m，宽为 1 m，渗径长达 1.5 m 且可变渗径的大型高压水平渗透试验箱；通过对加压系统升级改造，将原有一级水压加载系统改造为分级加载，并将水流流量调节为 0.0018^{-6} m^3/h，实现了水头压力的高中低顺利切换与准确测试，实现了不同水头作用下堰塞坝料渗透稳定性的准确测试[15]。

（5）基于分布式光纤传感技术的堰塞坝内部水平位移智能监测设备

开展了基于分布式光纤传感测量的堰塞坝防渗墙及坝体内部水平位移变形与受力智能监测技术与设备研发与应用，基于研发设备的工程应用分析讨论了蓄水初期红石岩堰塞坝混凝土防渗墙及坝体内部变形与受力规律[16]。分布式光纤传感测量监测技术能够满足混凝土防渗墙及坝体内部变形和受力监测需要和精度要求。测得蓄水初期红石岩堰塞坝防渗墙墙体变形量较小，墙体混凝土总体受压，墙体变形与受力规律受蓄水过程影响明显，沿深度方向整体向下游位移；墙体混凝土受力总体小于墙体 C35 混凝土材料强度指标，防渗墙保有良好的安全余量，满足工程安全需要，堰塞坝堆石体对防渗墙混凝土具有良好支撑作用；堆石体对防渗墙的支撑力存在较多的应力集中，堆石体材料呈明显不均匀性。

（6）钻孔安装的基于大量程位移计的并联式堰塞坝内部沉降监测技术与设备

提出了钻孔安装的基于大量程位移计的并联式堰塞坝内部沉降及其基础变形自动化监测技术与设备，位移传感器为高精度、大量程（可达 1000 mm）电感式大量程位移传感器，各位移监测单元的位移传感器并联连接，测量所得各个不同深度的位移相互无影响，测量监测精度能够实现毫米级；通过钻孔安装的方式，将测量各土层压缩变形的大量程位移传感器及其位移板牢固准确定位于被测土层，可提升堰塞坝内部沉降及其基础变形测量的准确性；各安装组件均设计为装配式，便于现场快速组装和安装，适合堰塞坝现场快速埋设实施，并可实现远程自动化实时测量。

（7）百米级松散堰塞坝防渗墙施工装备——全自动智能拔管机

针对百米级松散堰塞坝防渗墙施工要求，研发了施工装备新型全自动智能拔管机，采取抱、卡结合方式，由电脑判断起拔时间并自动起拔，压力异常自动报警，降低了人为失误，提高了防渗墙施工的拔管成功率。设备液压系统设计工作压力 25 MPa，设计垂直起拔力约 3800 kN（卡键式，油缸顶升），设计抱紧力约 2400 kN；拔管机机械形式采用抱紧式，为兼顾卡键式拔管的需要，设计选配使用浮置式顶升架；接头管型式采用圆柱开槽式，兼顾抱紧式及顶升式拔管使用，连接方式采用插销式，直径采用 900 mm；导管下设起拔、接头管下设、混凝土浇筑数据及其性能参数录入电脑，控制系统根据槽孔内混凝土浇筑及导管起拔情况及混凝土性能等数据，自主起动、完成一定回次的接头管起拔并自主停止拔管；设备操作模式兼容纯液压手动、电气手动、电气自动 3 种操控模式。

（8）松散堰塞坝帷幕灌浆施工装备——低净空液压跟管钻机。

根据红石岩堰塞坝两岸防渗设计通过灌浆洞进行帷幕灌浆防渗加固要求，特别针对廊道低矮空间作业的结构设计研发了松散堰塞坝帷幕灌浆施工装备——FEC12-00 型低净空液压跟管钻机（图 18），解决了洞内低矮空间钻孔的技术难题，提高了钻孔效率。

动力源采用电机驱动，噪音低、无废气排放，改善了作业环境，扭矩大、运行平稳、可实现转速调节，适应复杂地质条件下跟管钻孔；液压系统设计采用了负载敏感系统，减少了动力无谓消耗，节能环保，降低了施工成本；可远离钻孔点进行无线遥控钻孔操作，降低了操作者的劳动强度；采用履带行走和臂架结构，在廊道内可灵活施工，凿孔时可对凿孔位置进行微调，保证凿孔施工精度要求，性能稳定，复杂孤石层中的凿孔速度达到 5 min/m，复杂地层中钻孔达到 50 m/d。

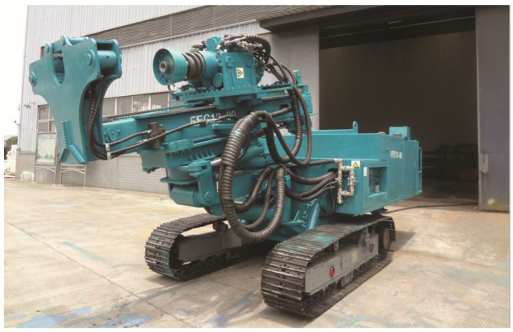


图 18 松散堰塞坝帷幕灌浆施工装备——低净空液压跟管钻机

Fig. 18 Curtain grouting construction equipments for loose barrier dam—low clearance hydraulic pipe following drill

（9）针对松散堰塞体材料改良加固的改性砂浆和改性混凝土材料。

a）受现有自流灌浆材料性能限制，自流控制浆液无法实现对毫米级以下的缝隙形成有效的填充，分层度、保水性等浆液稳定性指标差，抗水流稀释能力差，固结体力学强度不高。通过大量室内试验分析比选合适的体积水粉比、体积砂率、复合外加剂的掺量，优选出四组改性砂浆配合比，定量分析超高、高、中等不同流动性的改性砂浆基本性能（图 19），各配比砂浆固结体渗透压力为 0.6 MPa，渗透系数均在 10^{-9} m/s 量级，灌浆技术对于砂砾石地层一般达到的工程效果，渗透系数取为 5×10^{-7} m/s，该系列配比改性砂浆流动性能良好、稳定性优良、抗水流稀释能力强、固结体力学强度高，抗渗性能好，满足堰塞坝改良加固工程不同工况的需求。

b）通过在改性砂浆中掺加粗骨料的方式研发了松散堰塞体复杂地质条件灌浆的改性混凝土，结合自密实混凝土相关规范要求及研究成果，确定粗骨料的最大粒径、级配及形态以及与流动性能优异的砂浆进行混合时的体积比例，按照配比配制自密实混凝土，测试其流动性、稳定性、抗水流稀释及固结体力学性能，鉴于改性砂浆良好的抗渗性能，自密实混凝土固结体具有优良的力学强度，其固结体防渗性能满足工程应用需求。改性混凝土具有良好的抗水流稀释能力，静水环境对于混凝土稳定性及力学性能影响较小，水下试模质量损失率最大为 5.7%，固结体抗压强度最大损失率约为 7.4%。该系列配比改性混凝土具有良好扩展度、填充性及稳定性，抗水流稀释能力强、固结体力学强度高，能够满足堰塞坝改良加固工程松散堰塞体复杂地质条件不同灌浆工况的应用需求。



图 19 松散堰塞体材料改良加固改性砂浆

Fig. 19 Loose barrier dam material-improved reinforcement modified mortar

5 成果应用示范

5.1 红石岩堰塞坝综合整治工程集成应用示范

（1）应急抢险数据采集与处理

提出了基于分布式水文模型的乏资料地区水文泥沙计算方案，利用无人机、遥感卫星、InSAR 和三维激光扫描仪快速获取地形资料，快速制作满足应急抢险需求的地形图、数字高程模型、地形三维模型，进行变形监测分析。

（2）堰塞湖风险识别及评估

识别和评估了水文气象、地形地质、堰塞体危险性和溃决损失等 4 个方面的灾害风险，红石岩堰塞湖作为大型堰塞湖，堰塞体溃决损失严重性为严重，应急处置期洪水标准为 5 a 一遇（P=20%）。

（3）应急处置

根据堰塞体多种工况下渗流及坝坡稳定性分析[17]，堰塞体在最高水位 1222 m 及以下水位挡水时，渗透稳定、变形稳定、坝坡稳定均满足要求，红石岩堰塞体是安全的。红石岩堰塞湖上游有已建小岩头电站和德泽水库，下游天花板混凝土拱坝和黄角树混凝土面板堆石坝；应急处置采取开挖泄流槽的措施，泄流槽开挖至 1208 m，底宽不小于 5 m，开挖后泄流槽具有较强的应急泄洪能力，可快速降低湖前水位，避免对上游电站和水库的影响；同时开挖深泄流槽措施后，红石岩堰塞湖遭遇上游洪水时最大可减小溃堰库容约 1 亿 m^3，降低溃堰洪峰流量，有效降低对下游天花板

和黄角树水库大坝和电站整体安全影响。

（4）综合整治与开发利用

通过对红石堰堰塞坝开发利用分析与综合评价，应用综合勘察设计技术体系，首次将综合物探技术和重型勘察技术集成应用于复杂条件下的堰塞坝勘察，查明了堰塞坝物质不均匀性、相对密实情况、空间分布及底界面深度[18-19]，工程设计采用堰塞体、坝基及两岸岸坡进行防渗加固及堰坡部分整治，堰塞体防渗处理采用防渗墙及帷幕灌浆相结合的方案。通过堰塞坝综合勘察设计技术体系、长期工作性态演变与一体化计算分析方法、加固技术与装备、动态安全监测、安全评价与预警技术体系等成果的集成应用（图 20），保证了红石岩堰塞坝综合整治和开发利用的顺利实施，保障了工程安全。



图 20　堰塞坝应急处置全专业协同设计与全生命周期智能安全运行平台

Fig. 20 Full discipline collaborative design and full life cycle intelligent safe operation platform for emergency disposal of barrier dams

作为世界首例“应急抢险—后续处置—整治利用”一体化的水利枢纽工程（图 21），2020 年 6 月 22 日，红石岩堰塞坝整治工程首台机组并网发电，运行后堰塞坝渗流量微小、变形稳定，工程运行安全，实现了消除地震可能引发洪水等次生灾害、工程防洪标准提高到 2000 a 一遇等防洪减灾功效，可为 8.08 万人供水，满足 6.62 万亩农田灌溉，形成水库总库容 1.85 亿 m^3，能够提供装机容量 20.1 万 kW、年发电量 8 亿千瓦时的清洁电力，经济社会与生态环境效益极为显著。



图 21　整治后的红石岩堰塞坝工程

Fig. 21 Hongshiyan barrier dam project after regulation

5.2　唐家山堰塞坝整治工程勘察评价应用示范

对唐家山堰塞坝进行现场调研，采用无人机对唐家山堰塞坝及周边进行航拍，建立了唐家山堰塞坝三维数字模型，研究了唐家山堰塞坝现今形态与规模。基于试验成果，开展了综合稳定性宏观判断与定性分析，唐家山堰塞坝经历近 12 a 的河流下切、降雨、整治等地表改造，主要经历了“2010-08-19”和“2013-07-09”两次洪水自然灾害的影响，残余的堰塞体依然整体稳定；唐家山滑坡体高陡的后壁在各种工况下基本稳定，发生较大规模的滑坡可能性较小，唐家山滑坡后缘山体整体基本稳定，主要表现为坡面的小规模崩塌。

利用大比例尺地质测绘、无人机测绘、数值分析等技术手段，充分利用唐家山堰塞坝相关勘探试验、研究成果，对唐家山堰塞坝综合整治与评价开展示范研究[20]。开展了唐家山高速地震滑坡堰塞坝形成机理、堆积形成过程及空间结构和材料参数的分析研究；通过研究泄流后堰塞坝整体与局部稳定性，唐家山堰塞坝右岸高边坡稳定性、泄流后形成的天然泄流槽行洪能力复核、相关影响对象调查等内容，系统地对唐家山堰塞坝安全性进行研究；在安全评价结果的基础上，提出堰塞坝综合整治与利用方案。

5.3　舟曲泥石流堰塞坝开发利用综合评价应用示范

针对舟曲泥石流堰塞坝淤积体来源特点，开展堰塞坝病险情辨别应用研究，识别堰塞坝淤积体空间结构，开展其材料参数的空间变异特性实验应用研究，分析舟曲泥石流堰塞坝安全性态演变，开展舟曲泥石流堰塞坝开发利用综合评价。

综合考虑堰塞体材料组成特性、过流特征及相关堰塞湖处置经验，舟曲泥石流堰塞坝可能发生的溃决方式为下游堰塞体冲刷失稳溃决模式，计算得舟曲泥石流堰塞坝溃决洪峰流量低于白龙江 20 a 一遇的防洪标准，堰塞坝溃决不会对下游城镇和居民带来较大风险；泥石流堰塞坝灾害损失主要是堰塞湖壅水淹没大量房屋和道路，应以尽快清除堰塞体、降低堰塞湖水位、恢复县城居民正常的生活工作条件为应急抢险措施（图 22）。

根据各影响因素指标评价结果，舟曲泥石流堰塞坝安全性指标得分较高，其他影响因素可以归结为开发收益性因素，整体评分低，治理开发可行性评分较低，开发利用综合效益评分较低，熵值计算得分区间属于效益较低与效益低之间，开发利用综合效果较差，不适宜进行后期治理开发，应以治理清除为目标，不进行开发收益。



图 22 舟曲县三眼峪泥石流沟口综合整治现状

Fig. 22 Present situations of comprehensive treatment of debris flow gully in Sanyanyu, Zhouqu

5.4 白格堰塞坝堆积体结构隐患探测技术应用

基于高密度电法及多源面波法，研发磁测电阻率探测及面波法设备，应用于白格堰塞坝堆积体结构特征探测。有效区分大块石、破碎岩体、土体、河床砂层、左岸岩体等不同物质组成及其结构形态，堆积体为解体后的碎块状岩体，且形成时间较短，压实度不高，导致结构体速度较低。探测结果显示出了滑坡体的厚度及边界，可以为滑坡稳定性计算分析及危险性评价提供有效证据，面波法在白格堰塞坝堆积体结构隐患探测深度达到 180 m。

6 结 语

为保障人民生命财产安全和国家社会经济安全可持续发展，充分利用各类自然资源，应对各种自然灾害时趋利避害，在减少灾害损失的同时最大程度利用自然界的无穷力量为人民造福。项目围绕堰塞坝险情处置与开发利用保障工作实际，从机理揭示和基础理论及应用基础研究、应用技术与装备研发、技术集成与应用示范多层次开展研究工作，在堰塞坝险情演化、长期工作性态演变、开发利用理论与综合整治等方面形成了具有新时期行业特色的创新成果体系，能够推动相关领域的科技进步。

目前国内外直接利用堰塞坝或堰塞湖的综合开发工程案例较少，堰塞坝开发利用评价理论、病险情处置、勘察设计、加固处理与安全保障技术等明显缺乏，险情处置和开发利用及长效安全运行保障工作面临重大科技挑战。项目研究成果将为堰塞坝险情处置、开发利用和长期安全运行提供先进的理论依据和技术保障，能够确保堰塞坝开发利用工程充分发挥消除堰塞湖上下游防洪灾害隐患、改善当地供水与灌溉条件、除害兴利等作用功效，社会经济效益显著。

在各参加单位和项目团队的共同努力下，项目研发各项工作进展顺利，研究指标全面完成（部分超出），研究成果达到了预定目标。截止至 2022 年 1 月，本项目发表论文 142 篇（其中 SCI/EI 收录 73 篇）；出版专著 3 部；申请国家发明专利 46 项、获批 26 项，获得软件著作权 28 项。研究过程中培养中国工程院院士 1 名，项目团队 1 人次入选国家级人才称号、4 人次入选省部级人才称号；相关项目成果荣获省部级一等奖 4 项。相关技术依托红石岩堰塞坝整治工程等取得了良好的应用，为堰塞坝险情处置和开发利用工程建设提供了有力的科学依据，有效保障了工程长效安全运行，研究成果具有良好的应用前景。

参考文献：

[1] 何 宁, 娄 炎, 何 斌. 堰塞体的加固与开发利用技术[J]. 中国水利, 2008(16): 26－28. (HE Ning, LOU Yan, HE Bin. Technologies of dammed lake strengthen and utilization[J]. China Water Resources, 2008(16): 26－28. (in Chinese))

[2] 张宗亮, 张天明, 杨再宏, 等. 牛栏江红石岩堰塞湖整治工程[J]. 水力发电, 2016, **42**(9): 83－86. (ZHANG Zong-liang, ZHANG Tian-ming, YANG Zai-hong, et al. Remediation project of hongshiyan dammed lake in niulan river[J]. Water Power, 2016, **42**(9): 83－86. (in Chinese))

[3] 张宗亮, 吴学明, 王 昆, 等. 堰塞湖风险分析与应急抢险关键技术研究与应用[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊 2): 13－19. (ZHANG Zong-liang, WU Xue-ming, WANG Kun, et al. Researches and application of key technologies for risk analysis and emergency rescue of landslide-dammed lakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S2): 13－19. (in Chinese))

[4] WANG H L, LIU S Q, XU W Y, et al. Numerical investigation on the sliding process and deposit feature of an earthquake-induced landslide: a case study[J]. Landslides, 2020, **17**(11): 2671－2682.

[5] 王如宾, 万 宇, 阳 龙, 等. 基于模糊层次法和广义熵值法的堰塞坝病险情风险分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, **42**(4): 16－21. (WANG Ru-bin, WAN Yu, YANG Long, et al. Risk analysis of barrier dam diseases based on fuzzy analytic hierarchy process and generalized entropy method[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2020, **42**(4): 16－21. (in Chinese))

[6] LI X Y, LEI T J, ZHAO C, et al. Research on improved image registration algorithm based on PROSAC algorithm[C]//Proc SPIE 11179, Eleventh International Conference on Digital Image Processing (ICDIP 2019), 2019, **11179**: 694－700.

[7] 茆大炜, 杜少华, 李地元, 等. 基于大型三轴试验的蚀变花

岗岩力学行为及浸水湿化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(9): 1819－1831. (MAO Da-wei, DU Shao-hua, LI Di-yuan, et al. Mechanical behaviors and wetting-induced deformation of metamorphic granite based on large-scale triaxial test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(9): 1819－1831. (in Chinese))

[8] ZHANG G, ZHANG J M. Constitutive rules of cyclic behavior of interface between structure and gravelly soil[J]. Mechanics of Materials, 2009, **41**(1): 48－59.

[9] REHMAN Z U, ZHANG G. Cyclic behavior of gravel–steel interface under varying rotational shear paths[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, **58**(3): 305－316.

[10] UR REHMAN Z, ZHANG G. Three-dimensional elasto-plastic damage model for gravelly soil-structure interface considering the shear coupling effect[J]. Computers and Geotechnics, 2021, **129**: 103868.

[11] 罗宇凌, 姚翠霞, 汪志刚. 红石岩堰塞湖整治工程综合勘察技术应用探讨[C]// 土石坝技术 2019 年论文集, 2021: 171－176. (LUO Yu-ling, YAO Cui-xia, WANG Zhi-gang. Discussion on application of comprehensive investigation technology in Hongshiyan barrier lake regulation project [C]// 2019 Proceedings of Earth Rock Dam Technology, 2021: 171－176. (in Chinese))

[12] 陈亚军, 李　黎, 许后磊, 等. 基于 BIM+GIS 的流域库坝安全监测系统设计与实现[J]. 云南水力发电, 2021, **37**(1): 53－58. (CHEN Ya-jun, LI Li, XU Hou-lei, et al. Design and implementation of safety monitoring system for dam in basin based on BIM+GIS[J]. Yunnan Water Power, 2021, **37**(1): 53－58. (in Chinese))

[13] JI J J, YAO Q, WU F M, et al. Evaluation of particle size distribution of granular blasting materials based on the fractal theory[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, **11**(10): 168781401988156.

[14] 张化鹏, 钱　卫, 刘　瑾, 等. 基于伪随机信号的磁电法渗漏模型试验[J]. 物探与化探, 2022, **46**(1): 198－205. (ZHANG Hua-peng, QIAN Wei, LIU Jin, et al. Leakage model-based experimental study on magnetometric resistivity method combined with pseudo-random signal technology[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, **46**(1): 198－205. (in Chinese))

[15] 徐卫卫, 石北啸. 冻融及上覆荷载作用下堆石料渗透性试验研究[J]. 人民长江, 2021, **52**(3): 188－192. (XU Wei-wei, SHI Bei-xiao. Experimental study on permeability of rockfill materials under freezing-thawing and overburden load[J]. Yangtze River, 2021, **52**(3): 188－192. (in Chinese))

[16] 何　宁, 何　斌, 张宗亮, 等. 蓄水初期红石岩堰塞坝混凝土防渗墙变形与受力分析[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(6): 1125－1130. (HE Ning, HE Bin, ZHANG Zong-liang, et al. Deformation and stress of concrete cut-off wall of Hongshiyan dammed body at initial stage of water storage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(6): 1125－1130. (in Chinese))

[17] 王　昆, 张宗亮, 吴学明. 红石岩堰塞坝长期变形稳定性数值模拟分析[J]. 云南水力发电, 2021, **37**(7): 101－105. (WANG Kun, ZHANG Zong-liang, WU Xue-ming. Numerical simulation and analysis of long-term deformation stability of hongshiyan barrier dam[J]. Yunnan Water Power, 2021, **37**(7): 101－105. (in Chinese))

[18] 张宗亮, 程　凯, 杨再宏, 等. 红石岩堰塞坝应急处置与整治利用关键技术[J]. 水电与抽水蓄能, 2020, **6**(2): 1－10, 25. (ZHANG Zong-liang, CHENG Kai, YANG Zai-hong, et al. Key technology of emergency remedy and treatment for hongshiyan barriers lake dam[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2020, **6**(2): 1－10, 25. (in Chinese))

[19] 陈亚军, 李　黎, 徐晓坤, 等. 基于云计算微服务架构和 DevOps 理念的水利水电工程安全监测云平台应用研究[J]. 数字技术与应用, 2020, **38**(3): 160－164. (CHEN Ya-jun, LI Li, XU Xiao-kun, et al. Application research on hydropower engineering safety monitoring cloud platform based on microservice architecture and DevOps idea[J]. Digital Technology & Application, 2020, **38**(3): 160－164. (in Chinese))

[20] 李青春, 胡亚东, 施裕兵. 唐家山堰塞湖残余堰塞体稳定性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, **16**(增刊 2): 993－998. (LI Qing-chun, HU Ya-dong, SHI Yu-bing. The stability of remnant landslide dam of Tangjiashan dammed lake[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, **16**(S2): 993－998. (in Chinese))

DOI：10.11779/CJGE202207002 “十三五”国家重点研发计划项目

长距离调水工程建设与安全运行集成研究及应用

杨启贵[1]，张传健[1]，颜天佑[2]，刘 琪[2]，李建贺[2]
（1. 长江设计集团有限公司，湖北 武汉 430010；2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司，湖北 武汉 430010）



摘 要：基于国家跨流域调水工程建设重大需求和相关学科国内外最新研究发展，以滇中引水、引汉济渭、新疆大埋深隧洞等典型调水工程为依托，针对“大埋深隧洞开挖围岩响应模式与灾变机制”、“大埋深隧洞围岩－支护体系协同承载机理与全寿命设计理论”、“地震等自然灾害下输水建筑物的响应特征及灾变模式”等重大科学问题，以及“大埋深隧洞灾害预测预报与防治成套技术”、“隧洞穿越活断层抗断技术”、“大跨度高架渡槽抗震技术”、“闸泵阀关键设备研发及智能控制技术”、“调水工程全寿命周期安全监控与调控技术”等关键技术，开展了包括“大埋深隧洞岩体工程特性测试技术与综合评价方法”在内的10个方面的研究。提出了千米级深埋隧洞的地球物理探测及岩体特性测试技术与围岩特性评价方法，形成了隧洞高压突涌水预测与防治成套技术，开发了15 MPa超高压灌浆技术装备，提出了隧洞穿越错动量达0.5 m活断层抗断结构，研发了Ⅷ度强震区大型高架渡槽的抗震技术，并研制完成了220 m扬程40 MW级泵组、DN2000智能流量调节阀安全控制成套技术，形成了长距离调水工程建设及安全运行成套技术装备。项目相关研究成果已在依托工程中示范应用，为工程建设运行提供了坚实的技术支撑，同时有助于推动长距离调水及相关工程领域的技术进步，保障中国水资源宏观调控战略的有效实施，具有显著的社会、经济和生态效益。

关键词：长距离调水工程；大埋深隧洞；围岩-支护体系；不良地质；智能仿真；高架渡槽；闸泵阀系统；运行保障
中图分类号：TV68 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2022)07－1188－23

作者简介：杨启贵(1964—)，男，正高级工程师，全国工程勘测设计大师，长江设计集团有限公司党委委员、副总经理，水利部首批5151人才工程部级专家、国家百千万人才工程国家级人选、有突出贡献中青年专家，全国抗震救灾模范，全国创新争先奖获得者，获水利部第三届“最美水利人”荣誉称号，享受国务院政府特殊津贴，兼任中国岩石力学与工程学会常务理事、湖北省灾害防御协会副会长等。先后承担了葛洲坝、隔河岩、三峡、水布垭、引大济湟等40余项大中型工程的设计工作，目前负责滇中引水工程等西部高原地区复杂地质环境水工隧洞的设计研究工作，在水工结构、岩土工程、病险工程治理设计等领域取得丰硕成果。负责或参与重大科研项目30余项，获国家科技进步二等奖2项（分别排名第1，第2），省部级奖20余项，授权专利50余项，主编专著9部，主（参）编标准8部，发表论文80余篇，主持完成了国家重点研发计划项目“长距离调水工程建设与安全运行集成研究及应用”。E-mail: yangqigui@cjwsjy.com.cn。

Integrated research and application of construction and safe operation of long-distance water transfer projects

YANG Qi-gui[1], ZHANG Chuan-jian[1], YAN Tian-you[2], LIU Qi[2], LI Jian-he[2]
(1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China; 2. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: According to the major needs of the national inter-basin water transfer projects in China and the worldwide research situations of related disciplines, the research program focuses on the integrated research and application of construction and safe operation of long-distance water transfer projects. Based on the typical water transfer projects such as the water diversion project in central Yunnan, the water diversion project from Hanjiang River to Weihe River and the tunnel project with large buried depth in Xinjiang. The researches on ten aspects including “Testing technology and comprehensive evaluation method for rock mass characteristics of tunnels with large

基金项目：“十三五”国家重点研发计划项目（2016YFC0401800）
收稿日期：2022－03－05

buried depth” are conducted, aiming at the significant scientific issues such as “response mode and disaster mechanism of excavation of surrounding rock of large buried tunnels”, “coordinated bearing mechanism and life-cycle design theory of surrounding rock-support system of large buried tunnels” and “response characteristics and disaster mode of water conveyance buildings under natural disasters such as earthquakes”, and the following key technologies: “complete set of disaster prediction and prevention technology of large buried tunnels”, “fracture resistance technology of tunnel lining crossing active faults”, “seismic mitigation technology of long-span high-rise aqueduct”, “development and intelligent control technology of key equipments of gates, pumps and valves”, and “life cycle safety monitoring and regulation technology of water transfer projects”. The geophysical detection, the testing technology of rock mass characteristic and the evaluation method for characteristics of surrounding rock of deep buried tunnels are put forward. A complete set of technology for the prediction and prevention of high-pressure water inrush in tunnels is formed. A 15 MPa ultra-high pressure grouting technical equipment is developed. The anti-fracture structure of the tunnel crossing an active fault with a displacement of 0.5 m is put forward. A large-scale high-pressure grouting structure in the Ⅷ-degree strong earthquake area is developed. The seismic mitigation technology of aqueduct and the complete set of safety control technology of 220 m-lift and 40 MW-grade-power pump unit and DN2000 intelligent flow-control valve are developed and completed. The relevant research results are applied in some projects, and satisfactory benefits are achieved.

Key words: long-distance water transfer project; deep buried tunnel; surrounding rock-support system; unfavorable geology; intelligent simulation; high-rise aqueduct; sluice-pump-valve system; operation guarantee

0　引　　言

建设长距离、跨流域调水工程是解决中国水资源分布与社会经济发展需求不匹配，提升国家重大战略水资源保障能力的重要措施。《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》将“水资源优化配置与综合开发利用”列为重点领域及其优先主题，而“十三五”国家重点研发计划“水资源高效开发利用”重点专项 2016 年第一批项目申报指南也设立了“重大水利工程建设与安全运行”方向。

国家重点研发计划项目“长距离调水工程建设与安全运行集成研究及应用”（项目编号：2016YFC0401800）于 2016 年 7 月正式获批立项。该项目牵头承担单位为长江勘测规划设计研究有限责任公司，负责人为杨启贵正高级工程师，由来自科研机构、高校、设计、施工、装备制造、建设及运行管理等 19 家不同的专业化单位的高水平精干力量组成研究团队。项目围绕中国长距离调水工程面临的隧洞深埋超千米、单洞长度百千米级、隧洞穿活动断裂、Ⅷ度地震区高架渡槽、220 m 扬程 40 MW 级大流量高扬程泵组、DN2000 智能流量调节阀等世界前沿难题开展科研攻关，在大埋深隧洞开挖围岩响应模式与灾变机制、大埋深隧洞围岩－支护体系协同承载机理与全寿命设计理论、地震等自然灾害下输水建筑物的响应特征及灾变模式等重大科学问题，以及大埋深隧洞灾害预测预报与防治成套技术、隧洞穿活断层抗断技术、大跨度高架渡槽抗震技术、闸泵阀关键设备研发及智能控制技术、调水工程全寿命周期安全监控与调控技术等关键技术问题方面取得了多项创新突破，有力地推动了长距离调水及相关工程领域的技术进步，保障了中国水资源宏观调控战略的有效实施。本文就项目的研究背景、研究内容、主要创新成果，以及成果的应用情况等作简要介绍。

1　背景及国内外研究现状

国内外已建的调水工程主要以明渠方式输水，局部辅以隧洞，而以大埋深长隧洞为主要载体的调水工程较少。据不完全统计，目前已建的世界上最长的输水隧洞是芬兰的 Päiänne 隧洞，单洞长 120 km，最大埋深 130 m；国外埋深最大的是非洲 lesotho 隧洞，单洞长 45 km，最大埋深 1200 m。中国在大型调水工程输水隧洞建设方面已取得了举世瞩目的成就，相继建成了引滦入津、引大入秦、引碧入连、引黄入晋、引洮供水等跨流域调水工程，未来 10 年将是中国长距离调水工程输水隧洞建设的高峰期。目前在建和拟建的长距离输水隧洞大多要穿越西部地质构造背景复杂的山岭地区，不仅面临自然环境恶劣、地震烈度高、地形地质条件复杂等不利因素，且输水隧洞单洞长、埋深大，在建工程最长单洞已达 283 km，最大埋深 2268 m，无论是工程建设难度还是隧洞运营风险都将大大增加，面临更为复杂的科学技术难题。

深埋长隧洞需穿越多个复杂地质单元，由于埋深大、地应力高，常规的地球物理勘探手段、岩体试验技术及围岩分类方法等均存在较大的局限性[1]。近年来，国内在大埋深隧洞的勘察手段和试验技术方面已有一定的发展，如采用音频大地电磁测深法对深部异常地质体进行探测，高围压加卸载现场岩体试验设备

的研制等，但基于千米级深钻孔的岩体特性评价与地应力测试技术、基于 TBM 施工的深埋隧洞围岩分类方法等还有待于研究[2-4]。

围岩大变形和岩爆是大埋深隧洞建设中时常遇到的施工地质灾害，目前还缺乏行之有效的预测方法与灾变防控技术[5-6]。近年来微震监测技术的发展为岩爆预测提供了新的手段。采用先进的测试手段和数值模拟方法开展隧洞围岩大变形和岩爆孕灾机制研究，据此构建合理的预测预报方法，研发适应于围岩变形破坏模式的新型锚固支护技术是未来发展的趋势[7-8]。

穿越活动断层的衬砌结构型式选择与抗断措施是隧洞设计中的难点问题，目前国内外对活动断裂的形变场和应力场演变特征及规律认识不清，亟待开展隧洞穿越活断层的应对措施和设计方法研究[9-10]。高外水压力的确定及地下水作用下隧洞围岩－支护体系的长期安全控制是大埋深隧洞设计的又一难点，最新研究主要集中在外水压力折减系数的修正、岩体多场耦合分析理论等方面，针对复杂环境及荷载长期作用下隧洞围岩－支护结构体系协同承载机制和大埋深水工隧洞设计理论方面的研究还十分匮乏，构建大埋深隧洞围岩－支护体系的全寿命设计方法是隧洞建设的迫切需要[11-12]。

高压突涌水等不良地质的超前预报及 TBM 穿越富水和复杂地层的灾害控制一直是困扰深埋长隧洞施工的技术难题，目前国内外隧道超前预报在含水构造的定量预报、中小构造识别定位等方面的研究尚处于初步阶段[13]。研究不良地质体的准确定量探测方法及其诱发灾害的快速处治技术、实现 TBM 卡机的有效防控等是未来深埋长隧洞施工的发展方向；此外，大埋深长距离隧洞建设过程受多种复杂风险因素综合作用，开展多风险因素耦合作用下大埋深长距离隧洞施工智能仿真与信息集成技术研究也是未来的热点[14]。

输水渡槽是长距离调水工程的重要结构型式之一，穿越深山峡谷的大型高架渡槽具有高墩大跨的特点，对结构抗震安全十分不利，这方面的理论成果和抗震措施还十分匮乏，针对强震作用下大跨度高架渡槽抗震安全问题的研究亟待开展[15]。闸泵阀是长距离输水系统中重要的水力控制设备，研发高扬程大流量超大功率泵组、自适应智能阀门以及闸泵阀系统的安全控制技术是适应大型调水工程建设与运行需求的发展方向[16-17]。

国内外在长距离调水工程的安全监控和应急处置等方面的研究尚处于起步阶段，复杂调水工程全寿命周期的监测技术及预警指标体系、工程风险评估与调控技术、工程长效安全运行应急处置技术，以及复杂输水渠隧系统的水力调控技术等均是长距离调水工程亟需解决的关键技术问题[18-19]。

2 研究目标、内容及关键科学问题

2.1 研究目标及内容

项目针对长距离调水工程建设及安全运行的需求，以滇中引水、引汉济渭、新疆大埋深隧洞等典型调水工程为依托，重点研究大埋深隧洞围岩大变形和岩爆孕灾机理、不同断层活动模式下隧洞－衬砌结构变形破坏规律、应力－渗流耦合作用下围岩－支护体系协同承载机制，以及强震作用下大型高架渡槽的动力响应等关键科学问题，揭示复杂条件下输水隧洞和高架渡槽的响应模式与灾变机制，提出大埋深隧洞全寿命设计理论。研发适用于大埋深隧洞围岩特性的测试技术、灾害预测预报与防控技术、隧洞穿越活断层抗断技术、高架大型输水渡槽抗震技术、闸泵阀关键设备及智能控制、调水工程全寿命周期安全监控与调控等关键技术，形成大埋深长距离调水工程建设及安全运行成套技术装备，在典型工程中示范应用。

项目下设 10 个课题，课题名称及承担单位、负责人情况如表 1 所示。其中，课题 1～6 以输水隧洞相关关键技术为研究对象，课题 7 研究高地震烈度区高架大型输水渡槽的抗震安全问题，课题 8 研究长距离调水工程闸泵阀系统的关键设备及安全控制，课题 9 围绕长距离复杂调水工程长效安全运行保障方面的问题，课题 10 重点研究长距离输水工程运行调度方面的问题。

表 1 课题设置

Table 1 Setting of tasks

序号	课题名称	承担单位	负责人
1	大埋深隧洞岩体工程特性测试技术与综合评价方法	水利部水利水电规划设计总院	王志强
2	大埋深隧洞围岩大变形及岩爆预测与防控技术	长江水利委员会长江科学院	丁秀丽
3	隧洞穿越活断层围岩－衬砌灾变机制与抗断技术	中国长江三峡集团公司	吴海斌
4	大埋深隧洞围岩－支护体系协同承载机理与全寿命设计理论及方法	长江勘测规划设计研究有限责任公司	杨启贵
5	高压水害等不良地质条件下深埋长隧洞施工灾害处治和成套技术研究	水利部水利水电规划设计总院	刘志明
6	大埋深长距离隧洞建设智能仿真与建设信息集成技术	天津大学	王晓玲
7	高烈度区高架大型输水渡槽抗震及减隔震关键技术研究	中国水利水电科学研究院	王海波
8	长距离调水工程闸泵阀系统关键设备与安全运行集成研究及应用	中国水利水电科学研究院	殷峻暹
9	长距离复杂调水工程长效安全运行保障技术与示范	南京水利科学研究院	何勇军
10	长距离输水渠隧系统水力特性及安全高效调控关键技术研究	长江勘测规划设计研究有限责任公司	黄会勇

2.2　关键科学技术问题

根据国家跨流域调水工程重大需求、相关学科国际学术前沿以及国内外研究现状，本项目紧密围绕长距离调水工程建设与安全运行集成研究及应用问题，从问题的多学科交叉的视角，凝练出需解决的 3 个重大科学问题和 5 个关键技术问题。

（1）重大科学问题：①大埋深隧洞开挖围岩响应模式与灾变机制；②大埋深隧洞围岩－支护体系协同承载机理与全寿命设计理论；③地震等自然灾害下输水建筑物的响应特征及灾变模式。

（2）关键技术：①大埋深隧洞灾害预测预报与防治成套技术；②隧洞穿越活断层抗断技术；③大跨度高架渡槽抗震技术；④闸泵阀关键设备研发及智能控制技术；⑤调水工程全寿命周期安全监控与调控技术。

3　主要创新成果

3.1　千米级深埋隧洞勘测技术

（1）适用于千米级欠稳定钻孔的绳索取芯钻杆水压致裂地应力测试方法和设备

水压致裂法是目前深孔地应力测试的主要方法，是学术界研究及工程应用中的重要测试方法。传统的采用绳索取芯钻进工艺的深孔水压致裂地应力测试技术，存在水量需求大、欠稳定地层作业风险高、推拉阀控制难、易产生高压软管孔内打结以及钻杆系统耐高压性能差等问题，千米级欠稳定钻孔条件下综合实施难度较大。

如图 1 所示，本项目改进传统技术，采用绳索取芯钻杆内置式双回路高压软管水压致裂地应力测试方法[20]，通过管路卡子和特制钻杆接头实现管路在钻杆内的固定。进行试验时，首先将变接头、封隔器、连接油管等联接，起吊后放进孔内并利用钻杆卡座放置在孔口；随后将双管软管固定在下一根连接钻杆中从顶端固定，依次连接双管软管和钻杆至放到指定孔深开展地应力测试。待试验完成后，逆向进行前述工序即可回收试验设备。当钻孔水位过低且仍采用液体座封时，封隔器的内外压力差过大会导致封隔器无法收缩，进而导致钻杆无法提升等严重事故。对此，研发了气体座封技术，其采用瓶装高压氮气作为压力源，压力源之后增设气体控制装置，封隔器试验压力大于 7 MPa。

千米级欠稳定地层绳索取心钻杆地应力测试技术[21]具有以下优点：①采用双回路测试，测量可靠性高；②气体座封技术可适应孔内低水位条件测试；③施作过程不改换钻杆，对于欠稳定地层的地应力测试安全具有重要意义；④节省了钻杆密封的试验时间和调换钻杆的经费等。该技术通过滇中引水 10 余个钻孔的应用和改进，已发展成为成熟实用技术。

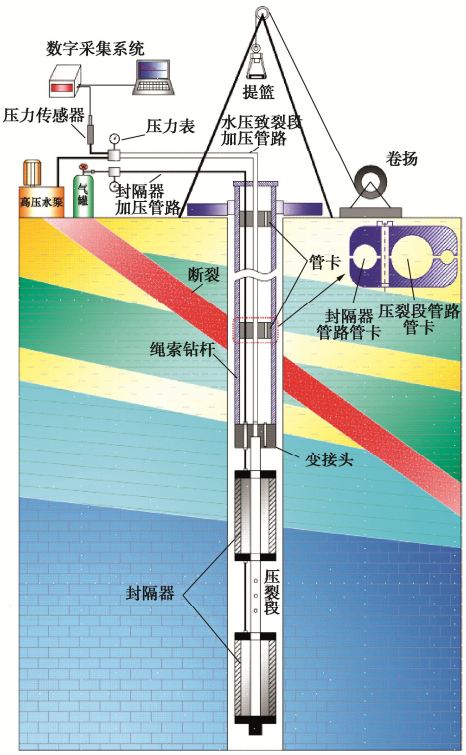


图 1　千米级欠稳定地层绳索取芯钻杆地应力测试技术示意图

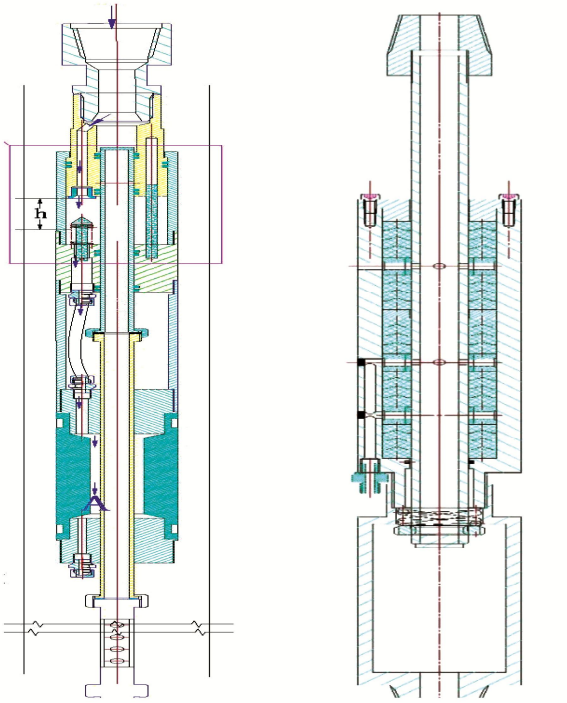
Fig. 1 Schematic diagram of in-situ stress testing technology of rope cored drill pipe in kilometer-class unstable formation

（2）千米级深孔岩体水文地质参数原位测试技术及设备

钻孔压水试验是一种在钻孔内进行的岩体原位渗透试验，主要任务是测定岩体的透水性，为评价岩体的渗透特性提供基本资料。水压式栓塞较其他类型栓塞可靠、灵活，但深孔压水试验需配备一套单独的高压充水泵、以及全孔深的高压供水管路，压水试验过程很难一直保持密封状态，且栓塞水压软胶管与钻杆极易发生缠绕现象，下入和起出试验器时需进行捆扎固定和拆分，操作繁琐和费时，同时也存在试验结束后排水卸压难题，极易造成胶囊卡孔事故，甚至导致整孔报废。鉴于此，研制了深孔压水试验装置[22]（图 2（a））和钻孔压水试验多通道转换快速卸压装置[23]（图 2（b）），实现了千米级埋深钻孔岩体高压压水试验。

深孔压水试验装置包括变径接头、活塞组件、单向阀组件和栓塞胶囊体，通过两条独立且可适时打开或封闭、适时转换的水流通道，操作单向阀功能实现高压水充胀栓塞、充塞水道封闭、单向止流密封、快速可靠卸压；钻孔压水试验多通道转换快速卸压装置主要包括芯管、芯管套、下芯管孔和上芯管孔以及胶

囊通道的排水孔和进出水孔，通过上下运动芯管，使芯管上芯管孔、下芯管孔与胶囊通道孔相互配合进行多通道转换，实现胶囊充水封隔试验段、试验压水和胶囊快速排水卸压。



（a）深孔压水试验装置 （b）多通道转换快速卸压装置

图 2 新型深孔岩体水文地质参数原位测试设备

Fig. 2 New in-situ testing equipments for hydrogeological parameters of deep-hole rock mass

两种压水试验装置及相关技术通过独立且可适时打开或封闭、适时转换的水流通道，实现高压水充胀栓塞封隔试验段，试验结束后，能快速排水卸压，解决了深钻孔特别是千米级超深钻孔中地下水埋深大、内外水头高压差条件下止水胶囊卸压困难等高压压水试验技术难题，试验具有操作简单，劳动强度小，减少工序、节约上下钻时间、节约成本等优点，可选择常规钻具或绳索钻具钻进工艺，适用不同钻孔口径，并可灵活采用单栓塞或双栓塞试验方案，实现了千米级深孔全孔单次多点灵活依次分段压水试验，快速准确获取深部岩体水文地质参数，在大埋深隧洞水文地质参数测试技术方面取得了重大突破，已应用于引江补汉工程深孔压水试验，最大实测深度 1001.5 m。

研制了集钻孔电视、电子罗盘、压力传感器于一体的深孔振荡试验设备[24]，如图 3 所示。该设备不仅能采集到振荡试验条件下钻孔中水位变化与时间的对应关系数据，而且能准确获得钻孔中裂隙发育情况，并自动计算裂隙产状、隙宽等裂隙几何特征。同时，该设备基于裂隙介质水动力学和振荡试验理论，能够快速完成现场测试、数据处理并计算得到裂隙岩体的渗透参数（裂隙渗透系数、当量渗透系数和渗透系数张量），已在滇中引水等多个工程现场开展应用。



图 3 深孔振荡试验设备

Fig. 3 Deep-hole oscillation testing equipments

（3）基于深钻孔数字钻进技术的岩体质量特征指标探测设备及方法

研发了基于深钻孔数字钻进技术的岩体质量特征指标探测设备（图 4），设备包括高精度数字传感器、自动采集仪以及配套数据分析软件，可监测钻机钻进压力 F、钻杆转速 N、钻进扭矩 M、钻进位移 S，用

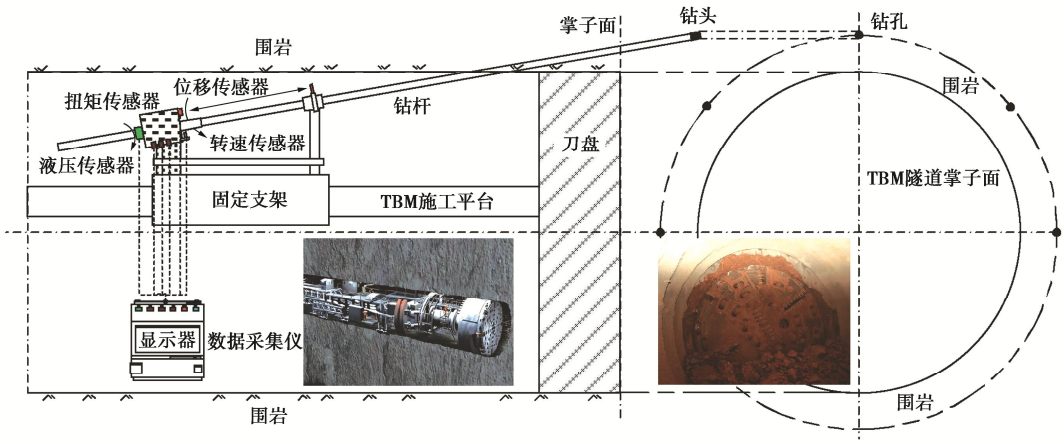


图 4 基于深钻孔数字钻进技术的岩体质量探测

Fig. 4 Quality detection of rock mass based on deep-borehole digital drilling technology

于获取岩体质量特征指标。经过大量研究获取了钻头侵入复合岩体破岩响应特征，建立了数字钻机破岩过程的数学模型，抽象裂隙、软弱夹层和完整岩石等多种介质中钻进过程，实现裂隙岩体数字钻进数据蕴藏的有效信息解译[25]。在此基础上，提出了基于深钻孔数字钻进技术特定指标，包括钻进过程指数（DPI）、钻进切深斜率（K_{slope}）和单位体积钻进耗能，建立了定量评价岩体完整性、岩石单轴抗压强度与磨蚀性的新方法，已在引松工程成功实践（图 5）。



图 5　利用深钻孔数字钻进技术在引松工程现场测试

Fig. 5 Application of deep-borehole digital drilling technology in field tests

3.2　深埋隧洞不良地质灾害致灾机理与综合防治

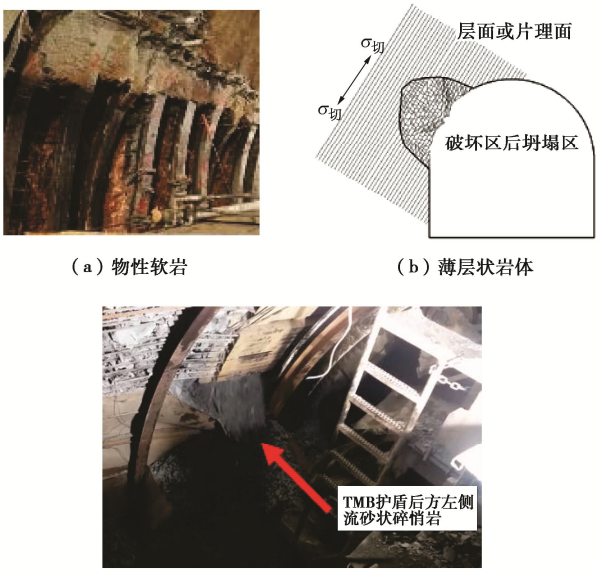
（1）基于赋存环境条件和地层条件的围岩大变形发生机制

工程实践表明，围岩大变形发生条件复杂，影响因素众多。为此，基于对国内外典型大变形工程案例的分析，总结了基于不同赋存环境和地层条件组合的 8 种围岩大变形发生机制并划分为 4 种类型围岩大变形，分别为挤压型、膨胀型、松动型和复合型[26]，详见表 2 和图 6。

表 2　不同地层条件的大变形发生机制

Table 2 Mechanism of large deformation under different foundation conditions

赋存环境条件	地层条件	大变形发生机制
高地应力及由此引发的强烈卸荷	物性软岩	软岩强度低，在高地应力作用下发生持续塑性变形
	薄层状岩体	高应力卸荷扰动使与主应力矢量小角度相交的层面张开、层间岩体弯折破裂
地层富水，或开挖卸荷引发地下水向临空面汇集，或施工用水排泄不及时渗入围岩	薄层状岩体遇水软化岩石	层间充填物与地下水作用导致岩体强度持续降低，诱发局部显著变形并垮塌
	蚀变岩遇水膨胀岩石	岩石遇水软化导致强度降低，使得软化部位显著变形 蚀变岩强度低，使得蚀变部位显著变形 含亲水性矿物岩石遇水后体积膨胀，导致显著变形
	弱胶结/无胶结岩体	胶结性能差，开挖扰动诱发地层松动，粉细砂遇水显著劣化加剧变形
	断层破碎带	岩体完整性差，开挖卸荷进一步使围岩碎裂化，导致围岩显著变形坍塌



（a）物性软岩　（b）薄层状岩体

（c）断层破碎带

图 6　典型软岩大变形地层条件

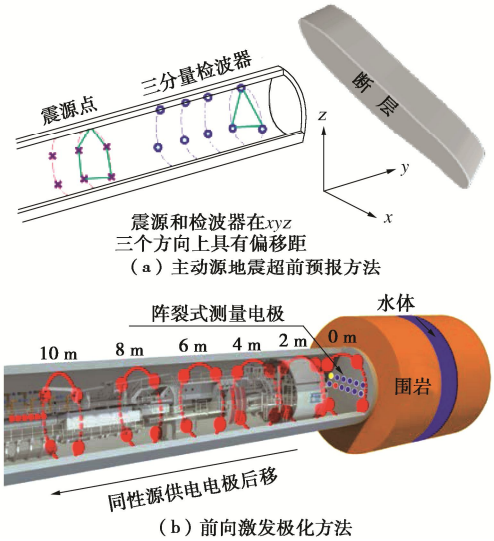
Fig. 6 Formation conditions of typical soft rock with large deformation

（2）大埋深隧洞灾害预测预报与防治成套技术

a）不良地质体

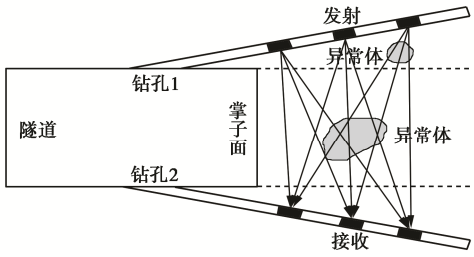
如图 7 所示，针对大埋深隧洞施工过程中可能遭遇的断层破碎带、岩溶、导水通道等灾害源超前探测的难题，项目研究发展和完善了大埋深隧洞不良地质超前定量探测方法。

对于隧洞主动源地震超前预报方法，通过对波束向前定向、定位成像计算、TBM 搭载等方面的改进，可实现掌子面前方 100 m 内断层破碎带等致灾构造定位与成像[27-30]；对于前向激发极化探水与阵列雷达方法，重点开展 TBM 抗干扰方法、适应性更强的水量估算方法、亚米级钻孔激发极化方法以及对边界刻画能力更强的阵列式雷达方法研究，实现了掌子面前方 30 m 内灾害水源定位；对于跨孔雷达精细探测方法，研究提出钻孔雷达逆时偏移成像与全波反演成像方法，实现了孔间区域内溶洞、导水裂隙的准确成像。



（a）主动源地震超前预报方法

（b）前向激发极化方法



（c）跨孔雷达精细探测方法

图 7 大埋深隧洞不良地质超前定量探测方法

Fig. 7 Advance quantitative detection method for unfavorable geology in large buried tunnel

项目研究实现了TBM搭载地震-激电超前预报技术装备（图 8），并提出了震-电信息约束联合反演方法，实现了震-电信息融合，提高了灾害源定位与成像准确性；开发了隧洞岩体地质大数据虚拟展示系统（图 9），实现了岩体与不良地质的定量化和可视化表达。

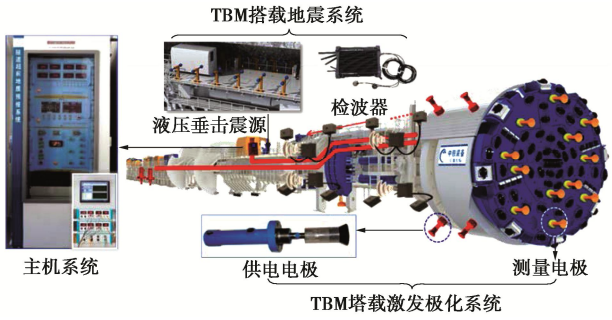


图 8 TBM 搭载的联合超前探测系统

Fig. 8 Joint advance detection system carried by TBM



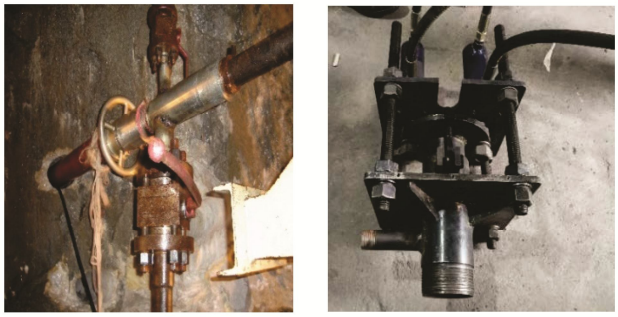
图 9 隧洞岩体地质虚拟展示系统

Fig. 9 Virtual display system of rock mass geology of tunnel

b）高压超前预注浆新设备及新工艺

深埋隧洞超前钻探或超前灌浆钻孔过程中，若钻至高压富水层，高压水会沿着钻杆喷射而出，对施工设备及人员形成较大的威胁。预灌浆施工要求及时封堵，一旦钻杆被顶出后将无法下设灌浆管进行处理，故相应的封堵装置及成孔工艺十分重要，然而目前相关技术产品并不成熟。

项目团队针对高压水条件下的安全钻孔、加钻及退钻需求，研制形成了一种高承压水地层中安全钻进（图 10）与孔口封闭止浆装置、15 MPa 超高压灌浆泵（图 11）以及配套的施工工艺（图 12）。其中，防高压水钻孔孔口封闭装置通过前段孔口管内设置的膨胀密封塞与密封圈共同作用抵御高压水推力。改进研制了 15 MPa 超高压灌浆泵设备，现场测试试验结果表明“15 MPa 压力条件下压力、流量可长时间保持平稳；灌浆泵可用于隧洞超前超高压预注浆”。研发的高压单孔劈裂循环注浆工艺，适用于可灌性差地层，具有“成拱稳定，劈裂止水”作用[31]。



（a）机械式 （b）液压式

图 10 防高压水钻孔孔口封闭装置

Fig. 10 Sealing devices for anti-high-pressure water drilling hole orifice

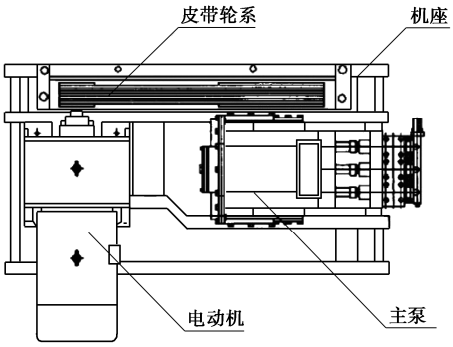


图 11 15 MPa 超高压灌浆泵结构图

Fig. 11 Structural drawing of 15 MPa ultra-high pressure grouting pump

c）高压超前预注浆新材料、新技术

在超前预灌浆应用中，现有的灌浆材料存在以下需解决的问题：①以水泥基灌浆材料为代表的经济型灌浆材料，对直径小于 0.1～0.2 mm 的孔隙、裂缝难以灌注，可灌性有待提高；②化学灌浆价格较贵且污染环境；③纯水泥浆易于析水、分层、沉淀；④水泥-水玻璃浆液固结体耐久性较差。本项目研发团队基于已有研究基础，进一步开发了快速封堵灌浆浆液与适宜于超前预灌浆的经济型浆液（图 13），并对不同浆液特性进行了分析研究，提出了灌浆浆液选取参考

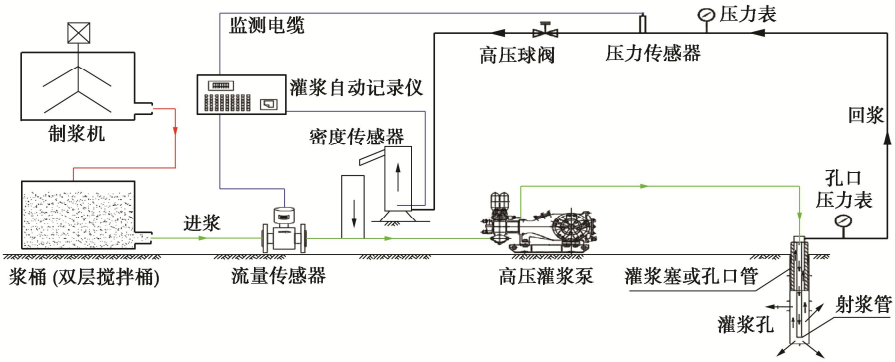


图 12 高压单孔劈裂循环注浆工艺

Fig. 12 High-pressure single-hole splitting circulation grouting technology

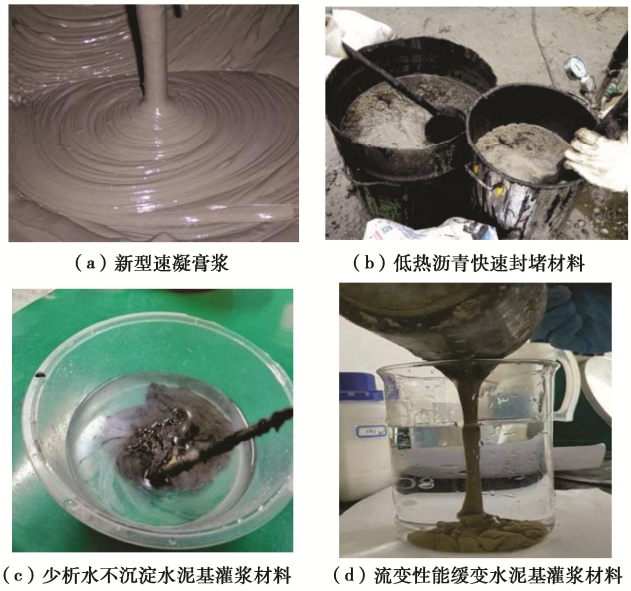


图 13 超前预注浆新材料

Fig. 13 Advanced pre-grouting new materials

方法[32-34]。同时，提出了隧洞预注浆动态设计理念和“限量排放、限时封堵”的双限设计思路及施工方案，允许围岩出现一定程度的可控渗水，待开挖洞段通过后，再采用封堵措施进行灌浆处理。

（3）断层活动下隧洞围岩－衬砌结构响应特征及分析方法

受选线限制，长大输水隧洞往往接近或跨越地震活动断裂带，受到严重的活断裂错动威胁。断层错动下围岩－衬砌结构响应特征将是隧洞抗错断研究中的重要基础。

围绕这一关键问题，首先开展了断层位错不同力学表征模型的研究，探讨了隧洞－围岩体系中不同错断位移模式的施加理论与方法[35]，基于不均匀沉降两端固支梁挠曲线假定，提出了一种 S 型错动位移模式。研究揭示了活动断裂不同错断位移模型对隧洞衬砌的变形、弯矩、轴力、剪力的影响机制。

研究结合试验与精细数值分析手段，建立了隧洞围岩－衬砌结构响应分析方法。如图 14 所示，基于三维离散－连续耦合的跨断层隧洞错动破坏数值仿真方法，分析了不同断层模式下围岩－衬砌体系响应规律[36]。如图 15 所示，研制了走滑断层作用下隧洞模型试验装置，该装置中可基于粒子图像测速技术（PIV）技术研究错断位移分布特征、可实时观测隧洞衬砌内部破坏发展全过程。利用试验结果标定离散－连续耦合模型，开展隧洞在活断层错断条件下响应与抗断技术的综合研究。开展了走滑错断下衬砌变形破坏规律的试验研究[37]，剖析了断层带倾向、倾角、宽度、材料参数等因素对隧洞变形破坏特征的影响机理。研究结果表明：浅埋深、破碎围岩中的隧洞更易发生侧向挤压破坏，而深埋硬岩隧洞更易发生剪切断破坏；衬砌厚度、模量等设计参数较难改变隧洞的变形特征，但可以较好地改善受力特征，并限制错断过程中破坏范围。

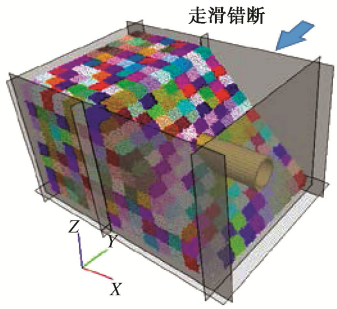


图 14 三维离散-连续耦合的跨断层隧洞错动破坏数值仿真方法

Fig. 14 Three-dimensional discrete continuous coupling numerical simulation method for staggered failure of tunnel crossing faults

（4）隧洞穿越活断层抗断技术

在隧洞穿越活断层技术方面，以滇中引水香炉山隧洞为背景工程，通过小尺度物理模型试验（图 16）结合数值计算的方法，对断层错动模拟过程中的隧洞上覆围岩破裂形态、衬砌破坏形态和裂纹发展、应变分布特征等关键响应特征开展分析，深入地研究了走滑断层错动影响下跨活断层铰接隧洞的破坏形式及破坏机制[38]。

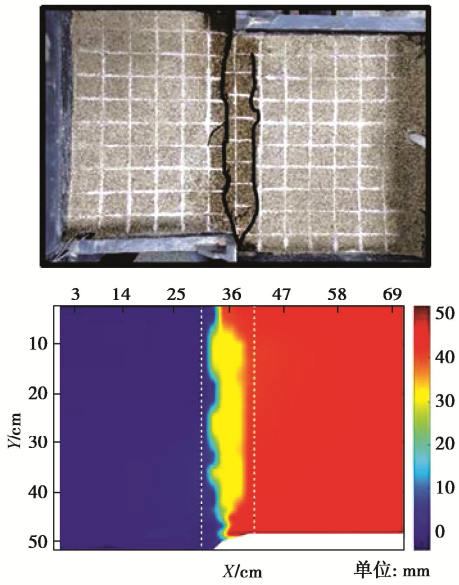


图 15 隧洞错断模型试验与断裂带位移分布 PIV 监测

Fig. 15 Model tests on tunnel faults and PIV monitoring of displacement distribution in fault zone

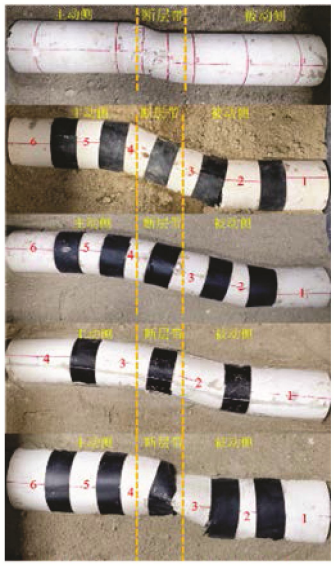


图 16 铰接隧洞变形

Fig. 16 Deformations of articulated tunnel

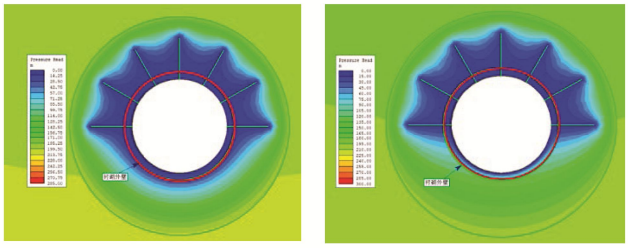
对于铰接隧洞抗错断设计参数，详细研究了衬砌节段长度、衬砌厚度、隧洞直径、隧洞轴线与断层带夹角、隧洞断面形式，衬砌材料力学特性等因素对铰接设计隧洞抗断性能的影响[39]。为寻求合理的铰接设计设防长度，在抗错断效果与造价经济性之间取得平衡，基于正交试验设计，系统讨论了铰接设防手段中各设计参数的效应，取得了最优铰接设计参数组合以及综合断层错断模式、衬砌－围岩接触参数取值、隧洞衬砌错断力学特性响应研究成果，提出了易于应用的衬砌铰接设计参数估算方法。

根据研究成果香炉山隧洞跨活动断层，所需抗错断设防长度范围为(1.12～2.0)L，L 为隧洞穿越活动断层（含影响带）宽度；最优铰接设计参数组合为“节段长度 6 m，柔性连接段宽度为 0.1 m，弹性模量为 0.5 GPa”。

3.3 隧洞围岩－支护体系协同承载机理与全寿命周期管理

（1）基于现场监测的衬砌外水压力确定方法和复合衬砌新型减压技术

针对基于规范确定的外水压力折减系数范围变化较大且对排堵水措施考虑不周等因素，以及深埋长大输水隧洞传统排堵水处理后的偏压风险，基于渗流理论推导出了施工期隧洞开挖后围岩渗流场分布的解析解，提出了利用现场监测数据确定远场稳定水头及其半径的方法，为深埋长大隧洞外水压力确定提供了理论依据。在现有复合衬砌结构型式基础上，提出一种在围岩与衬砌中间部位增加汇水层的新型复合衬砌结构型式，可更好地实现“堵水减渗、排水降压、汇水平压”目的，为高外水隧洞渗控处理提供了新手段。如图 17 所示，复合衬砌有无汇水层结构对外水压力分布具有明显的影响。



（a）衬砌外有汇水层　　（b）衬砌外无汇水层

图 17 汇水层对外水压力分布的影响

Fig. 17 Influence of catchment layer on distribution of external water pressure of lining structure

（2）围岩－支护体系协同承载机制与安全控制

围岩－支护体系荷载分担比例一直以来是业界难点。《公路隧道设计细则》建议了围岩、初期支护和二次衬砌的荷载分担比例，但支护体系承载比例高，不适用于深埋高地应力隧洞。为此，通过理论分析、真三维地质力学模型试验（图 18）、数值模拟和现场监测研究了围岩－支护体系承载比例及其演化规律，基于安全系数和可靠度分别建立了隧洞围岩－支护体系协同承载的安全控制指标及控制标准，提出了大埋深输水隧洞合理支护时机与支护强度的确定方法（图 19），解决了深埋隧洞荷载取值不合理、控制指标与标准欠缺等问题，为滇中引水、引江补汉等深埋隧洞结构设计提供了重要技术支撑。

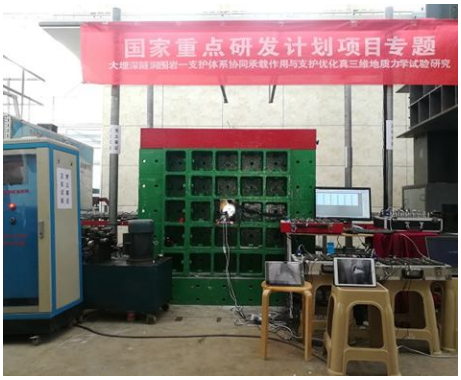


图 18 真三维地质力学试验

Fig. 18 True 3D geomechanical tests

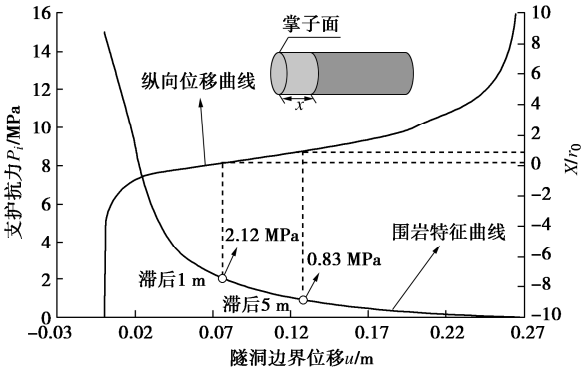


图 19 隧洞支护时机与所需支护强度

Fig. 19 Support time of tunnel and required support strength

（3）基于时变可靠度的大埋深输水隧洞衬砌结构长期安全设计方法

大埋深输水隧洞工程存在围岩时效变形、衬砌结构老化等时间效应，而传统的可靠度设计方法多以结构随机变量不随时间改变为前提，无法将时间效应纳入可靠度评价的范畴。为此，从衬砌强度衰减角度建立抗力随时间衰减的数学模型以及衬砌承载力极限状态的时变函数模型，借助时变可靠度的有限元响应面法研究隧洞二次衬砌的可靠度（β，P_f）随时间变化的规律（图 20），并结合滇中引水工程香炉山隧洞实际，提出了融合大埋深隧洞施工期支护参数动态设计、围岩－支护体系长期安全控制设计、运行期监测与维护的大埋深输水隧洞全生命周期设计方法[40]。

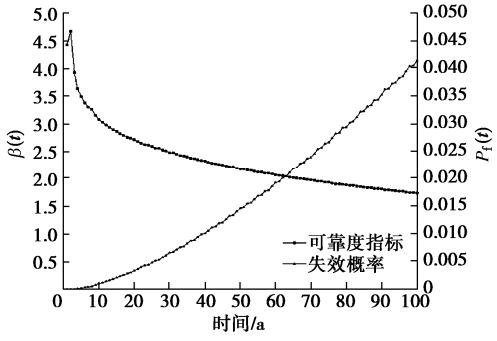


图 20 可靠度指标和失效概率随时间变化规律

Fig. 20 Variation law of reliability index and failure probability with time

（4）调水工程全寿命周期安全监控与调控技术

基于典型建筑物的破坏模式和系统动力学分析方法，综合考虑复杂引调水工程的运行特性，通过贝叶斯网络与系统动力学方法联合构建了集工程风险评估、险情诊断于一体的评价方法，提出了长距离复杂引调水工程全寿命期内安全性态演变规律与灾变机理。如图 21 所示，为该评价方法针对堤防工程所建立的风险反馈模型。依据典型破坏模式及影响因子评价体系两部分内容提出了复杂引调水工程风险分级标准，建立了险情诊断综合评价方法[41]。

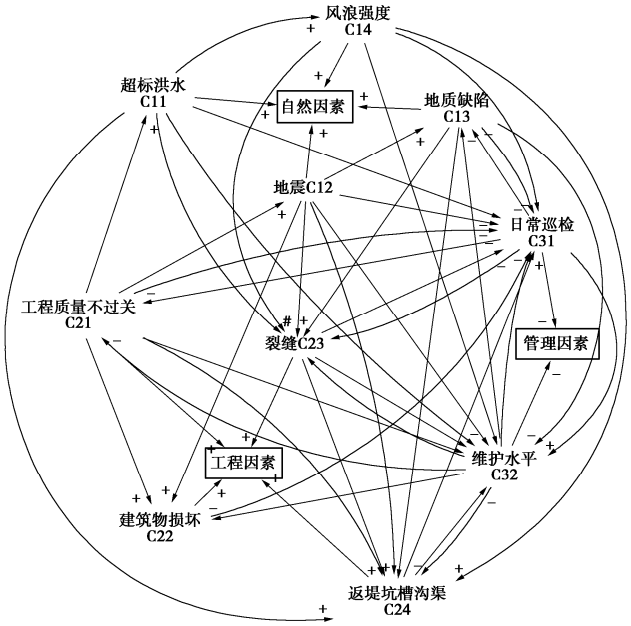


图 21 基于系统动力学的堤防工程风险反馈模型

Fig. 21 Risk feedback model for embankment engineering based on system dynamics

构建了长距离复杂引调水工程安全实时监测及预警智慧管理平台[42]，针对自然灾害监测预警建立了变化环境下的应急机制和处置方法库，以应急管理全过程为主线，提出了涵盖调水工程各生命周期下的自然灾害应急管理能力评价指标。其通过数据库集成使得建筑物组成、历史险情信息及相关工程影响因子的关联性更加紧密，将信息统一编码整合，便于调用。优化工程安全信息，通过分析传统巡检存在的不足，构建了智能巡检系统。

3.4　隧洞建设智能仿真与“互联网+”信息集成分析

面向引调水工程安全监控实际需求，融合安全监测理论与方法，结合云计算与大数据技术构建了引调水工程智能监控系统，可实现各类水工建筑物工程安全信息的高效管理、专业分析、安全监控与可靠预警，其总体架构如图 22 所示。

（1）多风险因素耦合作用下的大型深埋长距离隧洞施工过程智能仿真模型

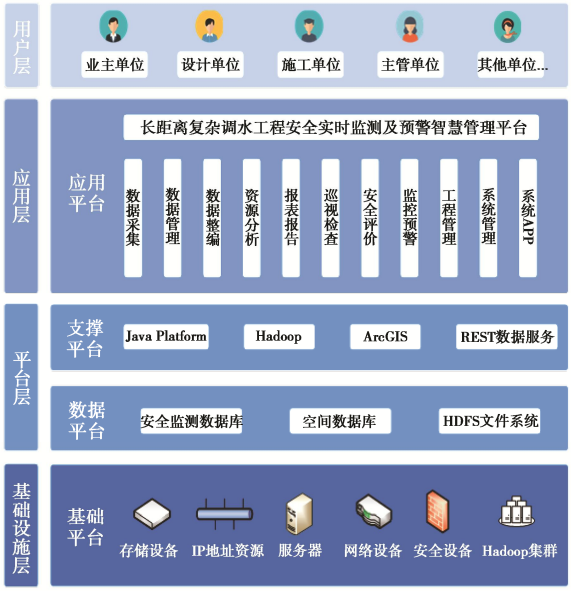


图 22 长距离复杂调水工程安全实时监测及预警智慧管理平台系统总体架构

Fig. 22 Overall architecture of safety real-time monitoring and early warning intelligent management platform system for long-distance complex water transfer project

针对现有隧洞施工仿真研究未能全面考虑地质风险、设备风险、技术风险等多源风险耦合作用的不足，建立了地质风险分析的直觉模糊贝叶斯网络，研究了施工机械故障率预测的改进 M5P 方法[43]，提出了技术风险分析的高斯混合模型及模型求解的 K 均值-EM-BIC 方法，并基于施工通风数值模拟实现了通风参数的优化取值，进而建立了多风险因素耦合作用下隧洞施工分层仿真模型（图 23）。进一步，推导了高斯混合分布的增量更新公式，提出了仿真模型参数自适应更新的增量高斯混合模型，弥补了传统参数更新方法需要假设分布类型，且分布类型在更新过程中保持不变的缺陷[44]。

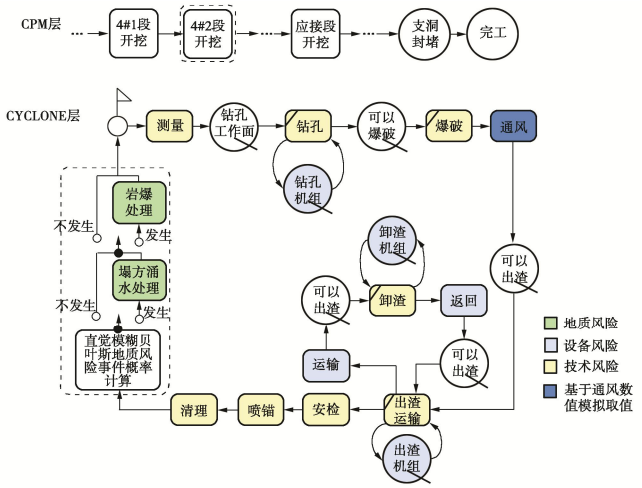


图 23 多风险耦合作用下的施工分层仿真模型

Fig. 23 Layered simulation model for construction under multi-risk coupling

（2）考虑围岩传热的深埋引水隧洞 TBM 施工通风数值模拟方法

针对深埋引水隧洞 TBM 施工由于隧洞储热作用和围岩散热导致通风降温除尘困难的问题，提出了基于多边形离散裂隙网络模型的围岩等效导热系数分形分析方法，建立了综合考虑围岩内部热传导和隧洞壁面与风流的对流热交换的深埋引水隧洞 TBM 施工通风 Euler-Lagrange 两相流数学模型，进而探讨了隧洞与围岩热交换规律，分析了隧洞内风流场、温度场分布和粉尘迁移扩散特征[45]。图 24 即为考虑围岩传热影响的深埋引水隧洞 TBM 施工通风数值模拟结果。

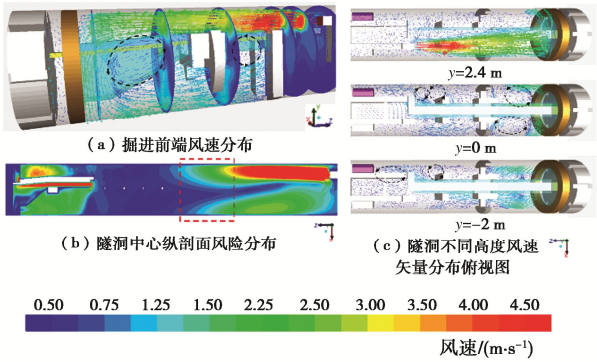


图 24 隧洞内部风速分布

Fig. 24 Distribution of wind speed in tunnel

（3）大埋深长距离隧洞建设信息集成与可视化分析系统平台

依托引汉济渭工程，综合利用 3DGIS、网络技术、动态可视化技术，建立了大埋深长距离隧洞建设信息集成与可视化分析平台，实现了三维场景下工程地质、施工进度、施工通风、施工资源等多源异构信息关联集成与三维可视化分析，并进一步提出“互联网+”模式下的深埋长隧洞建设信息集成与系统分析模式。图 25 为该平台下隧洞施工进度信息集成与分析功能示意图。

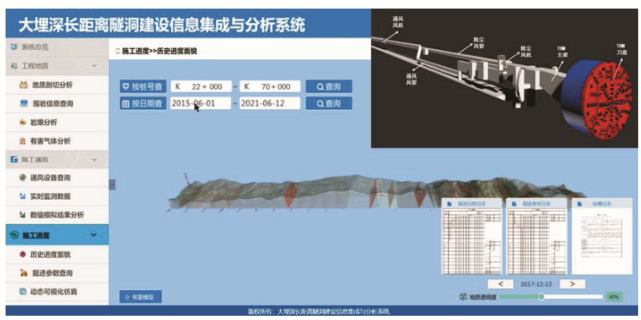


图 25 隧洞施工进度信息集成与分析功能示意图

Fig.25 Schematic diagram of tunnel construction progress information integration and analysis function

3.5 大型高架渡槽抗震及减隔震技术

（1）U 形渡槽结构－水体动力相互作用机理

西南高地震烈度区高架大型渡槽面临抗震安全问题。项目团队通过振动台动力模型试验（图 26）及基于流固耦合数值模拟分析，研究了 U 形渡槽结构－水体动力相互作用。定量确定了 U 形渡槽内流体冲击作用与对流作用，验证了渡槽－水体相互作用等效模型的有效性及应用于渡槽抗震动力分析的可行性，提高了渡槽结构动力响应数值模拟分析的效率[46-48]。

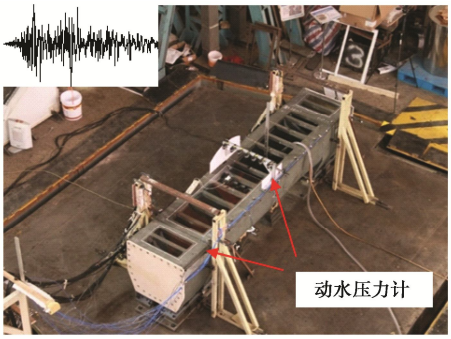
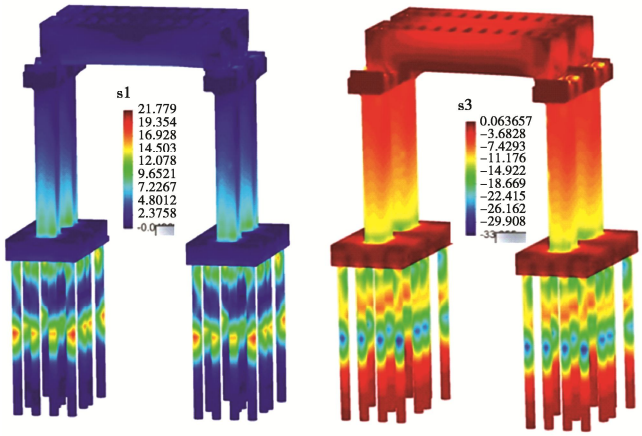


图 26 渡槽模型振动台流固相互作用动力试验

Fig. 26 Dynamic tests on fluid-solid interaction on shaking table of aqueduct model

（2）大型渡槽结构非线性动力响应特征

基于非线性波动分析建立了考虑渡槽、槽墩、桩基础和水体相互作用的有限元模型，采用基于云计算平台研发的渡槽结构大规模并行计算专用软件，开展了滇中引水工程积福村整体渡槽结构非线性动力响应分析。计算结果如图 27 所示，有效地揭示了强地震作用下渡槽结构的非线性动力响应特征和抗震薄弱部位。



（a）静动综合主拉应力极值　　（b）静动综合主压力极值

图 27 渡槽结构的非线性地震响应计算结果

Fig. 27 Calculation results of nonlinear seismic response of aqueduct structure

（3）大型渡槽结构减隔震措施

如图 28 所示，通过设置槽墩塑性铰，可利用其墩底截面作为潜在的塑性铰区域，合理确定截面与配筋，使地震作用下槽墩的损伤局限于预定的墩底区域，且变形可控、不发生脆性破坏。



图 28 墩槽塑性铰力学性能试验

Fig. 28 Tests on mechanical properties of plastic hinge of pier slot

研发了一种震后能够完全复位、减隔震效果好的斜面导向式减隔震自复位支座[49]（图 29），其通过自身的摩擦摆耗散地震能量并降低结构地震响应，并采用振动台对比试验验证了其对渡槽的良好减隔震效果和自复位功能，为提高遭遇强地震后渡槽快速检修恢复输水功能奠定了基础。



图 29 斜面导向式减隔震自复位支座

Fig. 29 Self-resetting support of inclined plane-guided vibration reduction and isolation

3.6　闸泵阀系统关键设备及智能监测控制

（1）高扬程大流量水泵关键技术

国内在水泵行业起步较晚，尤其在大型水泵方面整体技术水平相对落后，220 m 扬程段功率 40 MW 级离心泵技术在国内尚属空白。项目团队针对高扬程大流量离心式水泵的设计，开发了水泵参数化仿真平台，平台结构如图 30 所示，建立了叶轮建模、网格划分和流场计算的自动优化体系。如图 31 所示，针对高扬程大功率水泵的小流量驼峰问题，提出了进口二次流抑制技术，改善了小流量驼峰以及运行不稳定问题。通过流速控制、叶轮和导叶优化设计以及材料选择，可显著减轻过流部件泥沙磨损的程度。针对高扬程大流量离心泵对真机结构的高要求，提出了超大功率立式、单级、单吸离心式泵的结构方案，以及高性能密封、过流部件抗磨损技术。

为检验水泵的性能指标，研发了一套针对 220 m 扬程功率 40 MW 级水泵的水力模型装置，如图 32 所示，测试得到的水泵模型关键性能指标具有国际先进

性，主要包括：模型最优效率 90.57%；运行范围内不发生空化，σ_p/σ_i>1.1，σ_p/σ_c>1.5，无叶区压力脉动相对值 $\Delta H/H$ <7%。研究成果填补了国内 220 m 扬程功率 40 MW 级离心泵的技术空白。

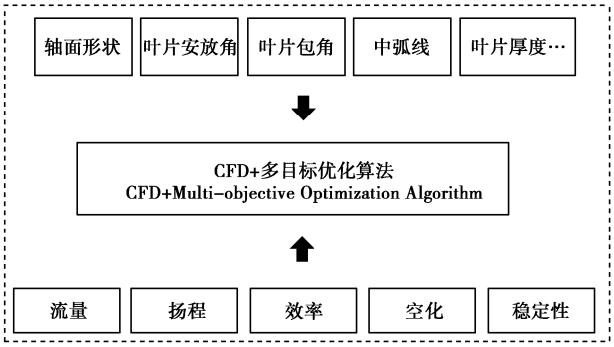


图 30 优化平台结构图

Fig. 30 Structural diagram of optimization platform

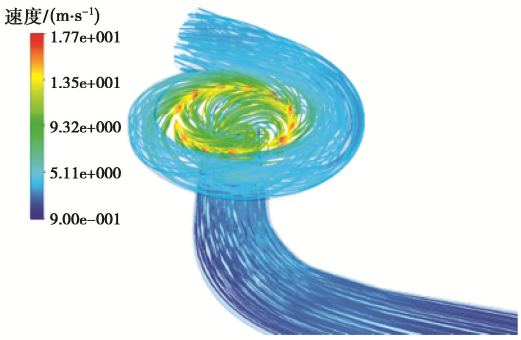


图 31 全流道流线

Fig. 31 Full channel streamline

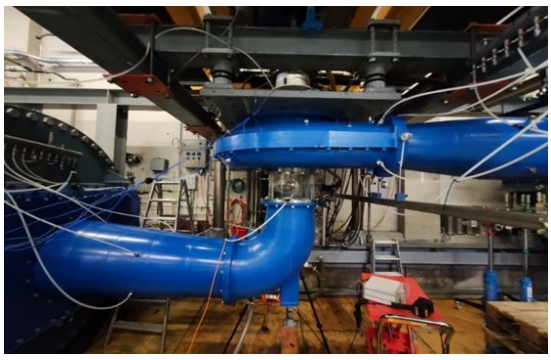


图 32 A1573 水泵模型试验装置

Fig. 32 Model test devices for A1573 pump

（2）高压差超大口径流量调节阀关键技术

如图 33 所示，针对高压差（最高压差达 96 m）、宽流量调节范围（流量 2.0～15.5 m³/s）以及强瞬变条件下工作的活塞式流量调节阀，提出了变流阻系数及收敛扩张型喷孔的抗空化和振动的智能阀设计技术，其内部流线如图 34 所示，实现了在任一压差下都有宽广的流量工作范围，解决了复杂工况下大口径调流阀面临的阀门空化、振动、噪声、流量调控困难等问题。

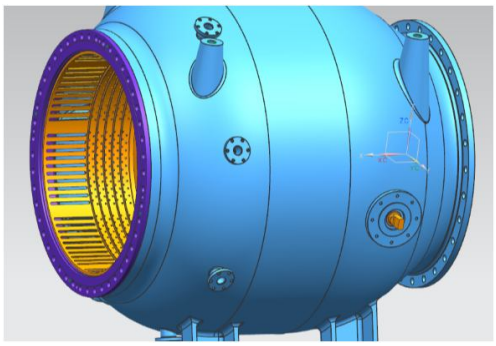


图 33 流量调节阀模型

Fig. 33 Model for flow regulating valve

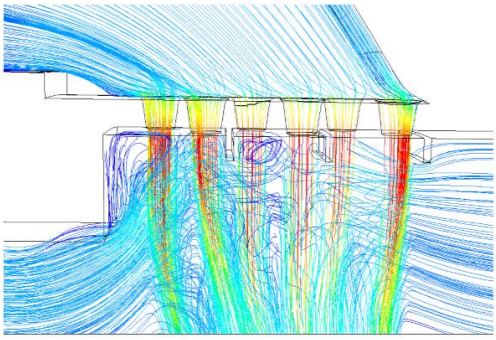


图 34 内部流线图

Fig. 34 Diagram of internal streamline

如图 35 所示，根据研究成果研制的 DN2000 智能流量调节阀，其最大压差为 96 m，流量调节范围为 2.0～15.5 m³/s，抗空化性能、流量和压力调节特性等关键性能达到世界先进水平，是当时世界压差最大、流量最大、调节幅度最大的管路末端调流调压阀，并为世界最大口径（DN2400）调流调压阀的研制奠定了基础。

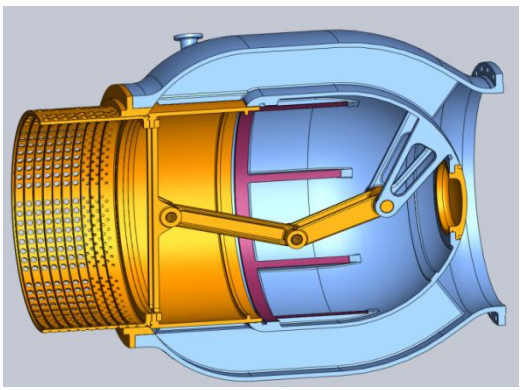


图 35 DN2000 流量调节阀三维模型图

Fig. 35 Three-dimensional model for DN2000 flow regulating valve

（3）引汉济渭—闸泵阀系统设备在线安全监控系统

为保证水泵机组长期稳定、安全运行，建立了水泵机组运行状态在线监测及远程故障诊断系统。该系

统基于 SOA 架构的模块化设计，分为数据采集、状态监测（图 36）和远程故障智能诊断 3 个子模块，能够结合专家知识图谱，对水泵机组的关键部件的故障原因进行概率定位，并提供相应的解决方案，保证机组安全稳定运行。

在阀门控制方面，研发了基于物联网的多传感器数据融合和高频在线监测技术，形成了阀门的健康诊断技术和协同自适应调节及安全控制系统（图 37），解决了供水工程瞬态压力监测频率不足、多参数监测等问题。

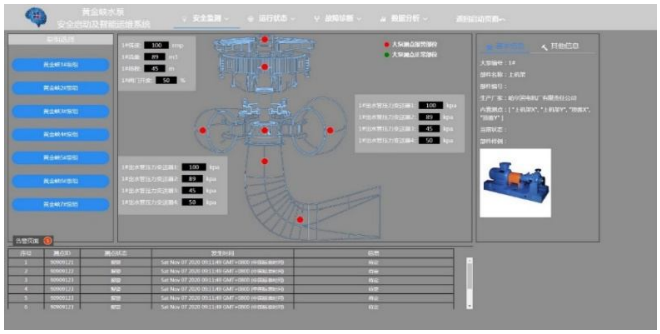


图 36 水泵机组数据采集与状态监测

Fig. 36 Data acquisition and condition monitoring of water pump unit

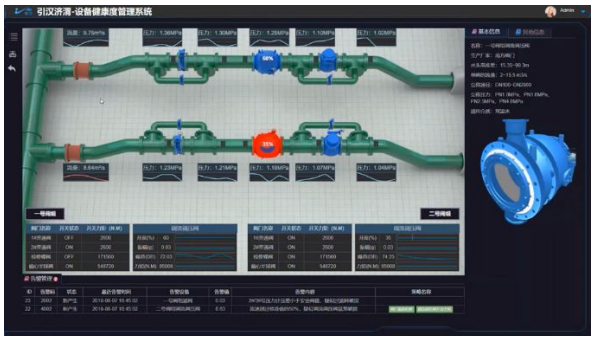


图 37 阀门安全管理系统

Fig. 37 Valve safety management system

3.7 渠隧系统水力特性及安全高效调控技术

（1）阶跃流量变化下长距离输水渠隧系统蓄量动态控制技术

滇中引水工程渠首采用泵站提水，流量为单泵设计流量的整数倍，处于阶跃入流状态；渠段调蓄能力较差，无在线调蓄水库，可能存在干线出入流不平衡问题。

如图 38 所示，项目团队研究提出了渠段自身蓄量动态调控技术，构建了多渠段耦合的蓄量动态控制模型；提出了基于实测数据的数据优化—参数动态辨识—控制器在线整定的技术方法，建立了控制参数在线辨识的自动控制模型，可实现输水渠系入流与出流不平衡条件下的安全平稳调控。

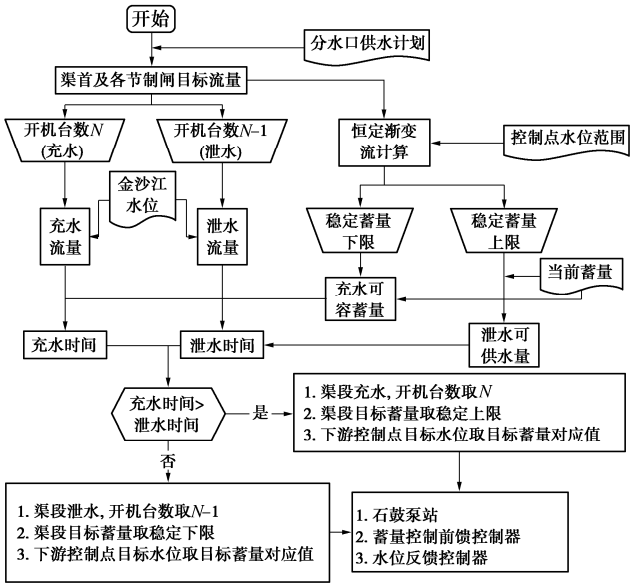


图 38 蓄量动态控制的执行和实现流程

Fig. 38 Implementation and realization process of storage dynamic control

（2）应急事故调度闸门操作减灾及有压输水隧洞水锤防护体系关键技术

针对渠隧系统可能存在明满流交替等不利流态以及有压隧洞具有高摩阻、易发生线路充填的水力特征问题，项目研究建立了渠隧系统闸门群流量耦合的应急调度模型（图 39），提出以减灾为导向的闸门群联合调控规则。同时，构建了长距离有压输水工程水锤联合防护技术体系：①大流量、小落差的输水系统，采用双空气罐+下游关阀联合防护技术；②地形落差较大的输水系统，采用空气罐+超压泄压阀联合防护技术；③管道走势前陡后缓的输水系统，采用空气罐+出口溢流池联合防护技术。

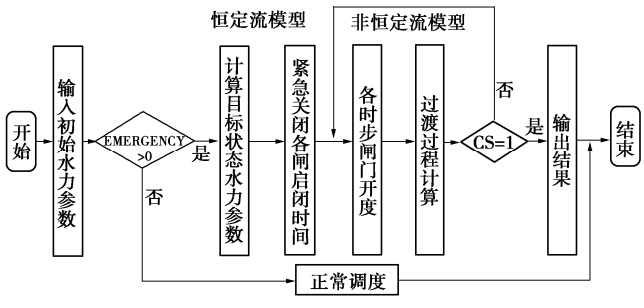


图 39 应急调度主程序流程图

Fig. 39 Flow chart of main program of emergency dispatching

（3）长距离输水渠隧水力响应及运行控制仿真平台

平台构建了调度一张图，提供调水工程线路、受水区分布、建筑物设计参数等基本信息查询功能。

通过集成输水渠隧系统水动力学模型、蓄量动态

控制模型、应急调度模型等，实现了调度方案设计和正常运行模拟的核心功能，以及明满流交替模拟、水锤分析计算、应急调度预案生成三大辅助应用功能(图40)，为输水调度高效决策提供了依据。



图 40 事故应急调度、水锤模拟及防护交互界面

Fig. 40 Interactive interface of emergency dispatching of accident, simulation and protection of water hammer

4 成果应用及社会经济效益

4.1 滇中引水工程成果应用

（1）千米级欠稳定钻孔地应力测试

项目团队研发的千米级欠稳定钻孔的绳索取芯钻杆水压致裂地应力测试方法和设备在滇中引水工程中成功应用（图41，42），成果获得了2017年度中国岩石力学与工程学会科技进步奖一等奖，并被列入《2020年度水利部先进实用技术重点推广指导目录》。



图 41 滇中引水工程应用现场

Fig. 41 Application site of water diversion project in central area of Yunnan

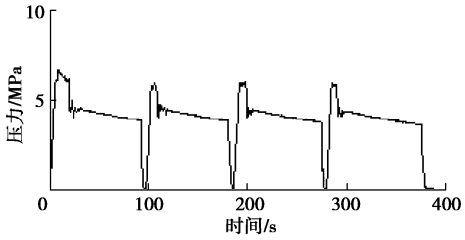
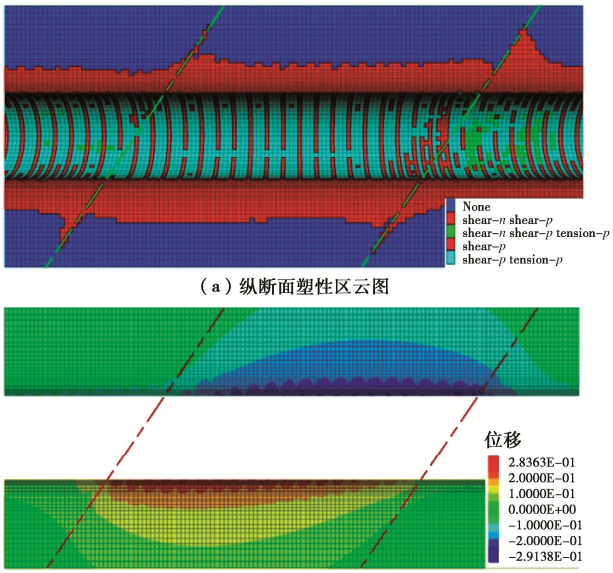


图 42 水压致裂测试采集曲线

Fig. 42 Acquisition curves of hydraulic fracturing tests

（2）深埋隧洞围岩稳定与支护优化

针对滇中引水工程香炉山隧洞开展了隧洞围岩稳定与衬砌结构受力分析以及隧洞围岩支护措施优化及软岩大变形防治（图 43）。研究成果为隧洞支护设计优化和安全掘进，提供了重要技术支撑[50]。



（a）纵断面塑性区云图

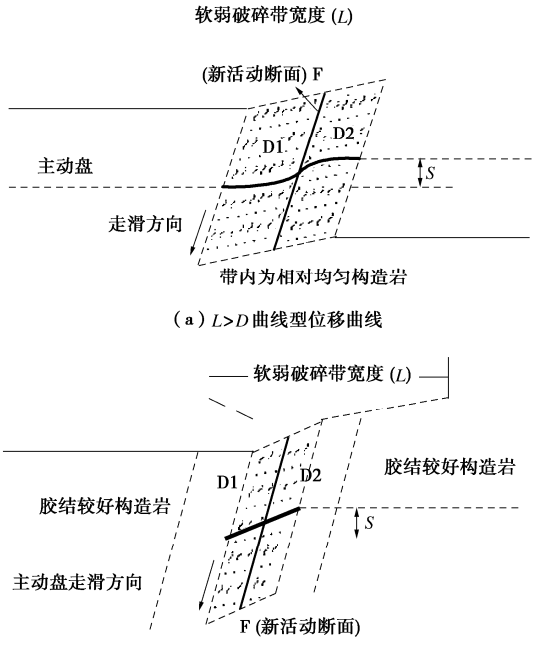
（b）纵断面竖向变形云图 (m)

图 43 香炉山隧洞 TBM 过芹菜塘断裂带纵剖面塑性区及位移场

Fig. 43 Plastic zones and displacement fields of longitudinal section of Xianglushan tunnel TBM through Qincaitang fault zone

（3）活动断裂工程活动性分带理论与调查技术

如图 44 所示，对香炉山隧洞活动断层工程活动性分带的构造学剖面、活地球化学和矿物学剖面、地球物理综合参数剖面、活动断层震间应变速率进行了系统研究，给定了其累计位移量值及变形带宽度。



（a）$L>D$ 曲线型位移曲线

（b）$L>D$ 直线型位移曲线

图 44 蠕滑活动断层滑动方式判定标准

Fig. 44 Criteria for determining slip mode of creep active fault

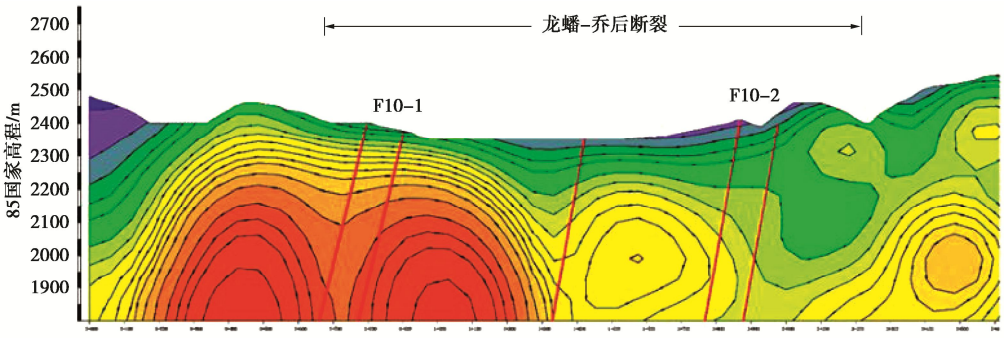


图 45　香炉山隧洞活动断层高频大地电磁剖面

Fig. 45 High-frequency magnetotelluric profile of active fault in Xianglushan tunnel

应用可控源音频大地电磁法的活动断裂调查技术，结合地质构造调查对相关活断层电阻率分布进行综合地质解译（图 45），确定了断层、岩性界面等地质要素。

（4）隧洞穿越活断层围岩－衬砌灾变机制及抗断技术

针对活动断层错断变形模式、隧洞穿越活断裂破坏机制、铰接设计下隧洞变形破坏形式、铰接设计设防长度的确定、铰接设计影响因素敏感性分析、铰接设计柔性链接材料等方面开展研究，为香炉山隧洞活断层的工程应对措施和抗错断技术提供了重要参考数据与技术指导。图 46 为模拟得到的隧洞活动断裂错动位移云图。

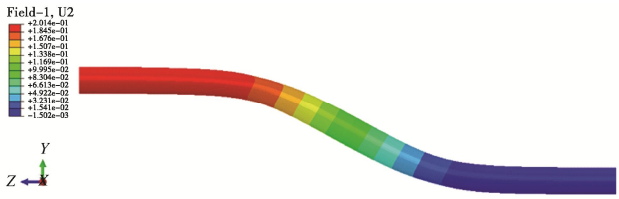


图 46　活动断裂错动位移云图

Fig. 46 Staggered displacement nephogram of active fault

（5）高烈度区高架大型输水渡槽抗震及减隔震关键技术

大型高架渡槽动力非线性整体分析的数值模型及基于云平台大规模并行计算专用分析软件应用于滇中引水工程积福村渡槽地震响应分析及抗震安全分析评价（图 47），为滇中引水工程大型高架渡槽抗震设计提供了重要科学依据。

（6）工程安全监测自动化系统

如图 48 所示，针对滇中引水工程深埋、穿越活断层等特点，开展了工程安全监测自动化系统专门研究，给出了系统设计架构，用于指导工程安全监测系统构建。

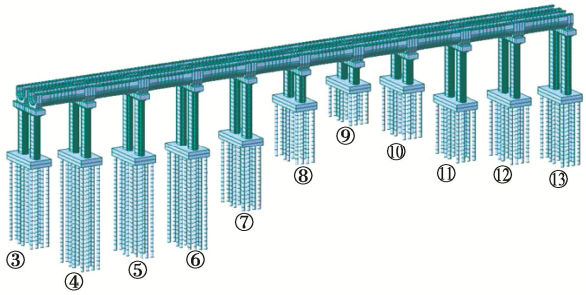


图 47　积福村渡槽三维有限元模型

Fig. 47 Three-dimensional finite element model for Jifu village aqueduct

4.2　引汉济渭工程成果应用

（1）超长深埋隧洞岩爆预测预报与防治技术

如图 49 所示，针对引汉济渭工程秦岭超长深埋隧洞岭南段的岩爆洞段，研究成果为不同烈度的岩爆预测预报提供了合适方法和依据，为岩爆防治提供了可靠的应对策略、优化的支护参数，以及可行的施工方法。

（2）大埋深长距离隧洞施工过程智能仿真

如图 50 所示，采用建立的多风险耦合作用下隧洞施工智能仿真模型对引汉济渭秦岭隧洞岭南段第二掘进段进行自适应仿真。以 2019 年 6 月底作为初始仿真时间，每个季度更新仿真模型，共进行 6 次更新。结果表明，在考虑地质、设备、技术等多源风险影响下，秦岭隧洞岭南段第二掘进段于 2022 年底全部完工（含衬砌、封堵和其它收尾工作）的概率为 86.88%。

（3）大埋深长距离隧洞建设信息集成与分析系统应用

依托研发大埋深长距离工程建设信息集成与分析系统（图 51），项目研究实现了对引汉济渭工程地质信息、施工进度、施工通风以及施工资源配置等信息的综合集成与可视化分析，为现场施工过程多源信息管理与分析提供了有力的平台和技术支持。

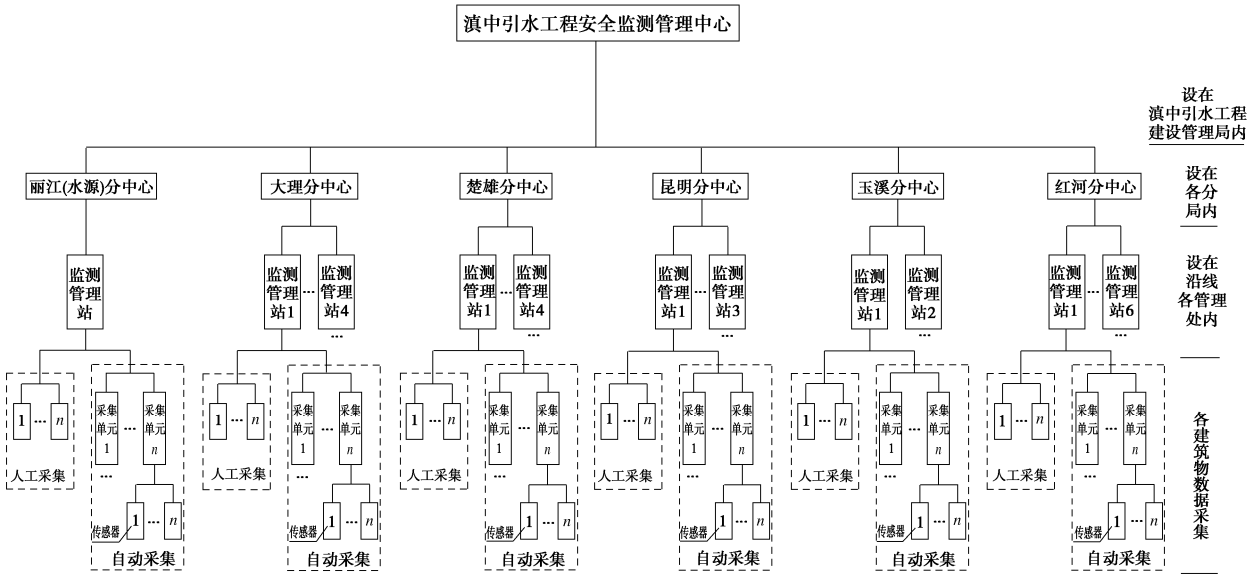


图 48 自动化监测系统架构

Fig. 48 Architecture of automatic monitoring system



图 49 岩爆加强支护

Fig. 49 Reinforced support for rock burst

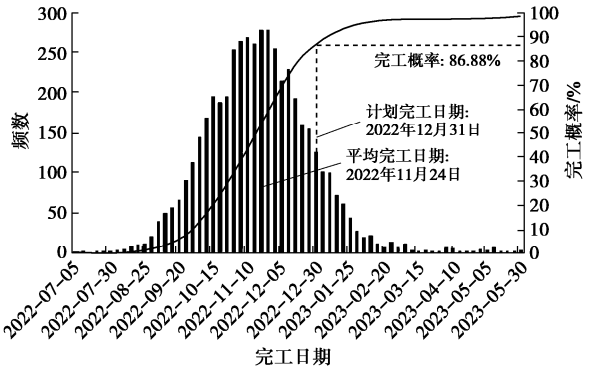


图 50 第二掘进段仿真工期分布和完工概率曲线图

Fig. 50 Distribution of simulated duration and curves of completion probability of second tunneling section

（4）高压差超大口径流量调节阀

如图 52 所示，根据研究成果研制的 DN2000 智能流量调节阀是当时世界压差最大、流量最大、调节幅度最大的管路末端调流调压阀，已成功应用于陕西省引汉济渭工程三河口水利枢纽的供水系统中。

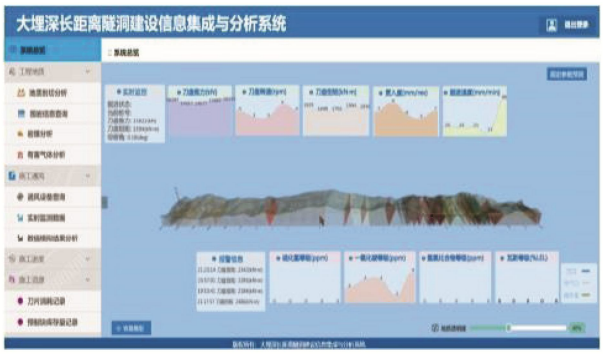


图 51 系统主界面

Fig. 51 Main interface of system



图 52 三河口水利枢纽 DN2000 流量调节阀

Fig. 52 Application of Sanhekou water control project

4.3 新疆大埋深隧洞工程成果应用

（1）深埋隧洞断层部位工程赋存环境与作用研究

依托新疆大埋深隧洞工程开展的跨断层带岩体矿

物成分（图 53）、跨断层带结构面与岩体力学特性、隧洞衬砌材料动态力学特性等，研究成果为隧洞过断裂带适应性设计提供了重要参考。

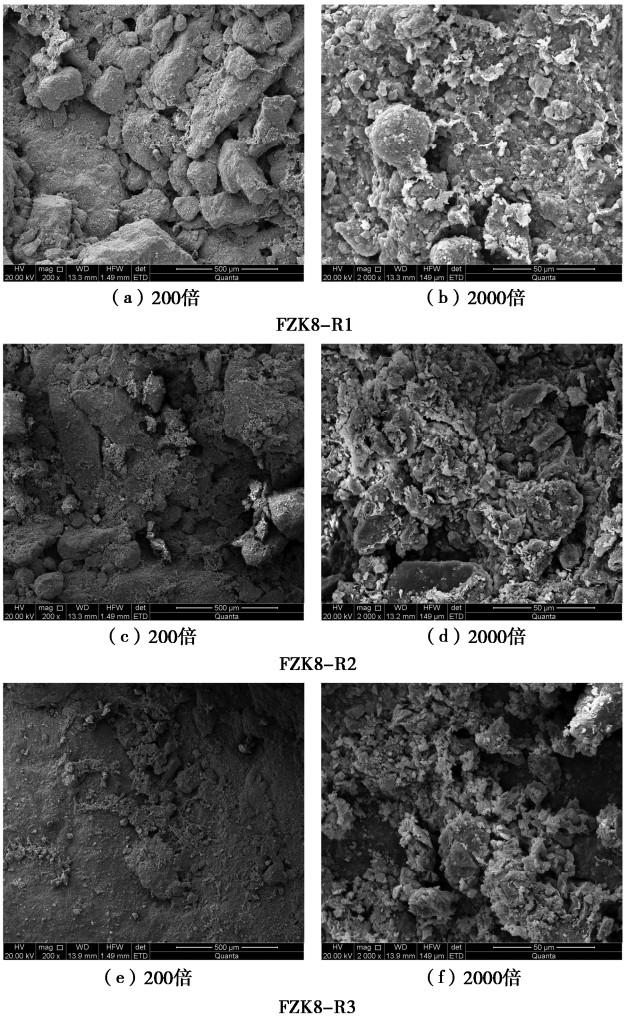


图 53 断层泥样本微观结构扫描

Fig. 53 Microstructural scanning of fault gouge samples

专门研制的岩体－混凝土接触面循环剪切仪（图 54），解决了断裂带错断过程中岩体－隧洞混凝土衬砌之间的岩－混凝土接触面多次循环条件下接触参数取值问题[51]。

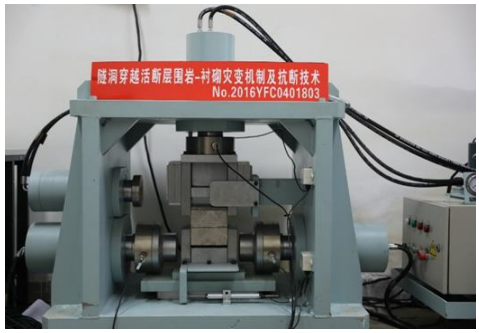


图 54 岩体－混凝土接触面循环剪切仪

Fig. 54 Rock-mass concrete contact surface cyclic shear apparatus

（2）深埋长隧洞软岩洞段围岩变形稳定与防治

依托新疆大埋深隧洞工程开展了围岩动态反馈分析与设计优化，针对第三系软岩，提出了膨胀–挤压复合型围岩大变形控制关键技术并成功应用（图 55），有效保障了施工安全，优化了支护设计，效益显著[52]。

（3）高压涌水超前灌浆

新疆大埋深隧洞工程线路内穿越众多富水的断层和破碎带，围岩岩性复杂，区域内存在承压水，其中最大的承压水压力超过 4 MPa。

针对高压涌水“灌不住”问题，采用高压下水下不分散缓变型水泥基灌浆材料封堵较大破碎通道及填充部分溶腔，形成有效的封闭体系。采用高压水地层安全钻进孔口封闭改进装置+模袋止浆装置，解决了高压水封闭及孔口止浆问题，快速封堵前后的隧洞掌子面围岩出水情况如图 56 所示，注浆堵水效果显著。

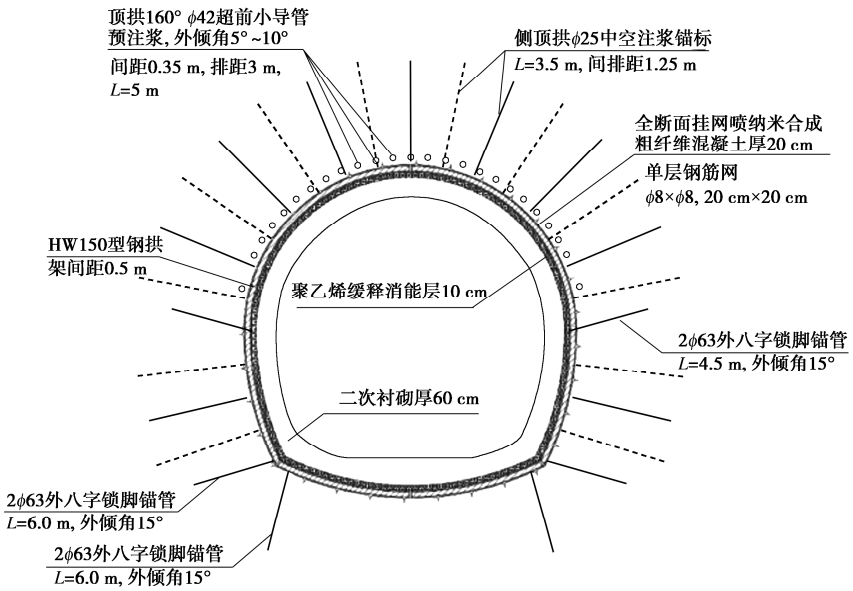


图 55 HW150 型钢拱架+缓释消能层复合支护结构

Fig. 55 Composite support structure of HW150 steel arch + slow release energy dissipation layer



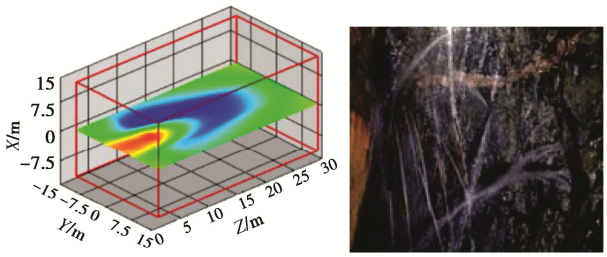
图 56 快速封堵前后的掌子面围岩出水情况

Fig. 56 Water outflow of surrounding rock of tunnel face before and after rapid plugging

4.4 其它工程典型成果应用

（1）兰州水源地引水工程

兰州水源地引水工程 T9+199—T9+299 里程采用地震波-激发极化联合超前地质预报技术，对前方不良地质体进行综合探测预报。综合探测中激发极化结果（图 57）显示掌子面前方 30 m 范围内存在大范围低阻区，可能出现大面积渗水或线状流水；地震波结果（图 58）显示隧洞前方出现大量正负反射，推断可能发生掉块与塌腔。开挖揭露 T9+199—T9+202 围岩较破碎，节理发育，风化蚀变严重，局部坍塌并伴有线状滴水；T9+238—T9+241 围岩完整性差，节理裂隙发育，裂隙流水。预报结论与开挖揭露情况较为吻合，为施工应对提供了有效指导。



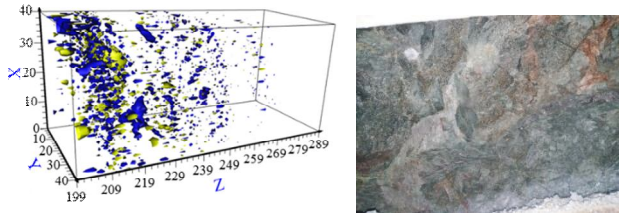
（a）激发极化三维成像 （b）裂隙流水

图 57 T9+199 激发极化探测与开挖揭露情况

Fig. 57 Polarization detection and excavation exposure at the mileage of T9+199

（2）牛栏江—滇池补水工程

工程线路总长 115 km，其中隧洞 10 条，长度 104.52 km。针对运行期引调水工程实际，通过部署项目研发的智慧管理平台（图 59），实现了数据汇集、融合分析、评估诊断、监测预警的一体化决策支持，切实保障了复杂引调水工程的运行安全。



（a）地震波三维成像 （b）节理风化蚀变

图 58 T9+199 地震波超前探测与开挖揭露情况

Fig. 58 Seismic wave detection and excavation exposure at the mileage of T9+199

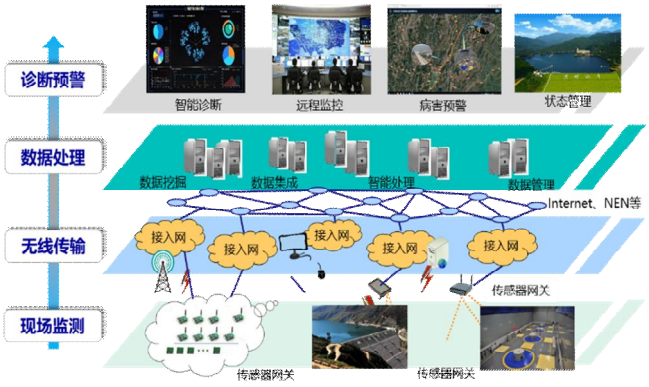


图 59 牛栏江—滇池补水智慧管理系统构架

Fig. 59 Framework of Niulanjiang-Dianchi water replenishment intelligent management system

5 结 语

“十三五”国家重点研发计划项目“长距离调水工程建设与安全运行集成研究及应用”围绕我国跨流域调水工程全寿命周期建设与运行重大需求开展科研攻关，取得了一系列创新性研究成果，并在依托工程中开展了示范应用，有力地推动了相关工程领域的技术进步，主要体现在以下 3 个方面。

（1）促进了长距离调水相关学科的理论发展。项目团队针对不良地质深埋隧洞建设挑战与高烈度区高架渡槽建设难题，通过大量案例统计、理论分析、数值模拟、现场与室内试验等多种研究手段，揭示了高地应力条件下隧洞围岩致灾机理；提出了断层活动下隧洞围岩－衬砌结构响应特征及分析方法；揭示了围岩－支护体系协同作用机制，提出了围岩－支护体系的荷载分担比例理论；揭示了大型渡槽结构－水体动力相互作用机理及非线性动力响应特征。相关研究成果有力地促进了岩石力学、结构力学、材料力学、水力学等学科在长距离调水工程领域的具体结合与应

用。

（2）形成了跨流域调水工程建设及运行的关键技术群。项目针对当前制约长距离调水工程进一步发展和应用的大埋深隧洞、高架渡槽、闸泵阀系统、安全运行与调控等领域的关键技术难点开展了重点科研攻关。研发形成了以千米级欠稳定钻孔绳索取芯钻具水压致裂地应力测试方法和设备为代表的深埋隧洞勘探技术；提出了高地应力隧洞围岩大变形控制成套技术；建立了大埋深隧洞灾害预测预报与防治成套方法；提出了高外水压力深埋隧洞复合衬砌新型减压技术；开发了调水工程安全实时监测及预警智慧管理平台以及隧洞建设智能仿真与信息集成系统；攻克了高扬程大流量水泵及高压差超大口径流量调节阀设计制造关键技术；提出了渠隧系统安全高效调控技术。进而形成了适用于长距离复杂地质条件下的调水工程建设及运行关键技术群，可为中国水资源宏观调控战略的有效实施提供重要技术支撑。

（3）推动了相关关键技术的实践应用与标准化。项目执行期间产出的隧洞超前地质预报研究成果已纳入《水电水利地下工程地质超前预报技术规程：DL/T 5783—2019》、《隧道全断面岩石掘进机施工超前地质预报技术规程：T/CGS 001—2019》，隧洞安全监测技术成果已纳入《地质灾害地下变形监测技术规程：T/CAGHP 046—2018》、《水工隧洞安全监测技术规范：SL 764—2018》。上述研究成果的标准化工作，对今后进一步的技术实践、推广应用与发展具有重要意义。

本项目相关研究已在国内刊物上发表论文共 257 篇，其中 SCI 检索 44 篇，EI 检索 54 篇；出版专著 17 部；授权发明专利 86 项，授权实用新型专利 36 项；获得软件著作权 38 项；编制行业标准、规范 11 部；编制工法 4 项；培养硕士/博士研究生 104 名。项目下“复杂水工岩体地应力测试关键技术与实践”获得中国岩石力学与工程学会科技进步一等奖，“水工隧洞绳索钻杆双回路水压致裂法地应力测试技术”等 3 项技术被列入《水利先进实用技术重点推广指导目录》。相关研究成果在滇中引水、引汉济渭、新疆大埋深隧洞等长距离调水工程中取得良好应用效果，为工程建设的顺利推进和运行期安全保障提供了有效的技术支撑，同时还可推广到其他复杂地质条件下的水利、交通等重大工程建设，应用前景广阔。

参考文献：

[1] 叶　英. 隧道施工超前地质预报[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (YE Ying. Tunnel construction ahead geological prediction[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))

[2] 李建平, 王庆学, 张晓慧. 深孔地应力测试在铁路隧道工程勘察中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2013, **25**(9): 47－51. (LI Jian-ping, WANG Qing-xue, ZHANG Xiao-hui. Application of deep borehole crustal stress testing on railway tunnel engineering prospecting[J]. Coal Geology of China, 2013, **25**(9): 47－51. (in Chinese))

[3] 申建平. 测井技术对隧道深孔试验的指导作用研究[J]. 铁道工程学报, 2013, **30**(3): 58－61. (SHEN Jian-ping. Research on effect of logging technology on guiding tunnel deep bore testing[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, **30**(3): 58－61. (in Chinese))

[4] 殷黎明, 杨春和, 罗超文, 等. 高压压水试验在深钻孔中的应用[J]. 岩土力学, 2005, **26**(10): 1692－1694. (YIN Li-ming, YANG Chun-he, LUO Chao-wen, et al. Application of high water-pressure test to deep borehole[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(10): 1692－1694. (in Chinese))

[5] 李生杰, 谢永利, 吴丹泽, 等. 穿越煤系地层隧道围岩大变形机制及处治研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(S2): 3501－3508. (LI Sheng-jie, XIE Yong-li, WU Dan-ze, et al. Research on mechanism of large deformation and countermeasures of surrounding rocks of tunnel through coal strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 3501－3508. (in Chinese))

[6] 李国良, 刘志春, 朱永全. 兰渝铁路高地应力软岩隧道挤压大变形规律及分级标准研究[J]. 现代隧道技术, 2015, **52**(1): 62－68. (LI Guo-liang, LIU Zhi-chun, ZHU Yong-quan. On the large squeezing deformation law and classification criteria for the Lanzhou-Chongqing railway tunnels in soft and high geostress rocks[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, **52**(1): 62－68. (in Chinese))

[7] 吴世勇, 周济芳, 陈炳瑞, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞TBM 开挖方案对岩爆风险影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(4): 728－734. (WU Shi-yong, ZHOU Ji-fang, CHEN Bing-rui, et al. Effect of excavation schemes of TBM on risk of rock burst of long tunnels at Jinping Ⅱ hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(4): 728－734. (in Chinese))

[8] 何满潮, 李　晨, 宫伟力, 等. NPR 锚杆/索支护原理及大变形控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(8): 1513－1529. (HE Man-chao, LI Chen, GONG Wei-li, et al. Support principles of NPR bolts/cables and control techniques of large deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(8): 1513－1529. (in Chinese))

[9] 孙风伯, 赵伯明, 许丁予, 等. 活动断裂工程危害、破裂参数评价与工程应用[J]. 土木工程学报, 2015, **48**(增刊 1): 137-141. (SUN Feng-bo, ZHAO Bo-ming, XU Ding-yu, et al. The engineering critically analysis of active faults, the evaluation methods of fracture parameters and engineering application[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, **48**(S1): 137－141. (in Chinese))

[10] 刘学增, 谷雪影, 代志萍, 等. 活断层错动位移下衬砌断面型式对隧道结构的影响[J]. 现代隧道技术, 2014, **51**(5): 71－77. (LIU Xue-zeng, GU Xue-ying, DAI Zhi-ping, et al. Influence of lining section type on a tunnel structure under active fault movement[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, **51**(5): 71－77. (in Chinese))

[11] 张顶立. 隧道围岩稳定性及其支护作用分析[J]. 北京交通大学学报, 2016, **40**(4): 9－18. (ZHANG Ding-li. Analysis of surrounding rock stability and support action in tunnels[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2016, **40**(4): 9－18. (in Chinese))

[12] 孙 毅, 张顶立. 隧道复杂支护结构体系的协同作用原理[J]. 工程力学, 2016, **33**(12): 52－62. (SUN Yi, ZHANG Ding-li. Synergy principle of complex supporting structural systems in tunnels[J]. Engineering Mechanics, 2016, **33**(12): 52－62. (in Chinese))

[13] 李术才, 刘 斌, 孙怀凤, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(6): 1090－1113. (LI Shu-cai, LIU Bin, SUN Huai-feng, et al. State of art and trends of advanced geological prediction in tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(6): 1090－1113. (in Chinese))

[14] 谭忠盛, 王秀英, 万 飞, 等. 关角隧道突涌水防治技术体系研究[J]. 土木工程学报, 2017, **50**(增刊 2): 1－7. (TAN Zhong-sheng, WANG Xiu-ying, WAN Fei, et al. Research on prevention and control technology system of sudden water inflow of Guanjiao tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, **50**(S2): 1－7. (in Chinese))

[15] 朱旭鹏. 大型渡槽抗震性能试验研究及分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2013. (ZHU Xu-peng. Test research and analysis on seismic behavior of large-scale aqueduct[D]. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese))

[16] 杨晓蕾, 邱象玉, 杨进新. 长距离输水管道启泵水锤模拟及试验验证[J]. 水利规划与设计, 2016(3): 116－118. (YANG Xiao-lei, QIU Xiang-yu, YANG Jin-xin. Simulation and experimental verification of actuating pump water hammer in long distance water transmission pipeline[J]. Water Resources Planning and Design, 2016(3): 116－118. (in Chinese))

[17] 徐 放, 李志鹏, 邹顺利, 等. 高扬程泵站停泵水锤防护措施的比较与分析[J]. 给水排水, 2017, **53**(12): 106－110. (XU Fang, LI Zhi-peng, ZOU Shun-li, et al. Comparison and analysis of protective measures against pump-failure water hammer in high lift pumping station[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, **53**(12): 106－110. (in Chinese))

[18] 李 强. 长距离输水系统明满流及水力控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2007. (LI Qiang. Study on Free-Surface-Pressurized Flow and Hydraulic Control in the Long-Distance Water Diversion System[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese))

[19] 王桂平, 刘国彬. 水工隧洞运营期风险管理应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, **5**(4): 820－824, 828. (WANG Gui-ping, LIU Guo-bin. Application and research on risk administration of hydraulic engineering tunnel in the operation period[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, **5**(4): 820－824, 828. (in Chinese))

[20] 邬爱清, 韩晓玉, 尹健民, 等. 一种新型绳索取芯钻杆内置式双管水压致裂地应力测试方法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(5): 1126－1133. (WU Ai-qing, HAN Xiao-yu, YIN Jian-min, et al. A new hydraulic fracturing method for rock stress measurement based on double pressure tubes internally installed in the wire-line core drilling pipes and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(5): 1126－1133. (in Chinese))

[21] 尹健民, 邬爱清, 李会中, 等. 绳索取芯钻杆双回路水压致裂法地应力测试装置及测试方法: CN103900751B[P].2016-02-24. (YIN Jian-min, WU Ai-qing, LI Hui-zhong, et al. In-Situ Stress Test Device and Test Method of Double Loop Hydraulic Fracturing Method for Wireline Coring Drill Pipe: CN103900751B[P]. 2016-02-24. (in Chinese))

[22] 黄 华, 李汉桥, 谢实宇, 等. 一种深孔压水试验装置: CN109162695A[P]. 2019-01-08. (HUANG Hua, LI Han-qiao, XIE Shi-yu, et al. A Water Pump-in Test Device in the Deep Hole: CN209308673U[P]. 2016-02-24. (in Chinese))

[23] 周 云, 石华国, 王家祥, 等. 一种钻孔压水试验多通道转换快速卸压装置: CN209115072U[P]. 2019-07-16. (ZHOU Yun, SHI Guo-hua, WANG Jia-xiang, et al. A Fast Pressure Relief Device with the Multi-Channel Switching for Borehole Water Pressure Test: CN209115072U[P]. 2019-07-16. (in Chinese))

[24] 戴云峰, 周志芳, 赵燕容. 确定倾斜填充裂隙水文地质参数的测试装置及其测试方法：CN106869909A[P]. (DAI Yun-feng, ZHOU Zhi-fang, ZHAO Yan-rong. A Testing Device and Method for Determining Hydrogeological Parameters of Inclined Filling Fractures: CN106869909B[P]. 2019-12-10. (in Chinese))

[25] 曹瑞琅, 王玉杰, 赵宇飞, 等. 基于钻进过程指数定量评价岩体完整性原位试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(4): 679－687. (CAO Rui-lang, WANG Yu-jie, ZHAO Yu-fei, et al. In-situ tests on quantitative evaluation of rock mass integrity based on drilling process index[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(4): 679－687. (in Chinese))

[26] 丁秀丽, 张雨霆, 黄书岭. 隧洞围岩大变形机制、挤压大变形预测及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 录用待刊. (DING Xiu-li, ZHANG Yu-ting, HUANG Shu-ling, et al. Mechanism of large deformation of surrounding rock masses of tunnels, prediction method of squeezing large deformation and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, in press. (in Chinese))

[27] NIE L C, ZHOU W, XU X J, et al. TBM-mounted seismic ahead-prospecting for fast detecting anomalous geology ahead of tunnel face[J]. IEEE Access, 2020, **9**: 359－369.

[28] LIU B, CHEN L, LI S C, et al. Three-dimensional seismic ahead-prospecting method and application in TBM tunneling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, **143**(12): 04017090.

[29] LIU B, CHEN L, LI S C, et al. A new 3D observation system designed for a seismic ahead prospecting method in tunneling[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, **77**(4): 1547－1565.

[30] LI S C, REN Y X, LIU L B, et al. Reverse time migration of seismic forward-prospecting data in tunnels based on beamforming methods[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, **52**(9): 3261－3278.

[31] 邢占清, 李金霖, 符　平, 等. 可灌性差、较难自稳地层隧洞开挖前快速灌浆成拱加固方法：CN111441775B[P]. 2019-07-16. (XING Zhan-qing, LI Jin-lin, FU Ping, et al. Rapid Grouting and Arch Forming Reinforcement Method Before Tunnel Excavation in Poor Groutability and Difficult Self-Stable Strata: CN111441775B[P]. 2019-07-16. (in Chinese))

[32] 王丽娟, 李　凯, 张金接, 等. 膏浆平面裂隙动水注浆扩散模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(增刊 2): 3404－3411. (WANG Li-juan, LI Kai, ZHANG Jin-jie, et al. Paste slurry planar fracture dynamic water grouting diffusion model research[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(S2): 3404－3411. (in Chinese))

[33] FU P, HUANG L W, XING Z Q. Development and experimental research of a low-thermal asphalt material for grouting leakage blocking[J]. High Temperature Materials and Processes, 2020, **39**(1): 433－446.

[34] HUANG L W, XING Z Q, FU P. Test and analysis of grouting in the water-tight reconstruction project of a power station in Linhai City[J]. Journal of Coastal Research, 2020, **108**(sp1): 301－307.

[35] 周光新, 崔　臻, 盛　谦, 等. 活动断裂错动位移模式对隧洞变形与内力的影响研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, **41**(6): 1323－1330, 1349. (ZHOU Guang-xin, CUI Zhen, SHENG Qian, et al. Study on the deformation and internal force of the tunnel under the displacement pattern of the active fault zone[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, **41**(6): 1323－1330, 1349. (in Chinese))

[36] 马亚丽娜, 崔　臻, 盛　谦, 等. 正断层错动对围岩－衬砌体系响应影响的离散－连续耦合模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(11): 2088－2097. (MA Ya-li-na, CUI Zhen, SHENG Qian, et al. Influences of normal fault dislocation on response of surrounding rock and lining system based on discrete-continuous coupling simulation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(11): 2088－2097. (in Chinese))

[37] CUI Z, SHENG Q, ZHANG G M, et al. Response and mechanism of a tunnel subjected to combined fault rupture deformation and subsequent seismic excitation[J]. Transportation Geotechnics, 2022, **34**: 100749.

[38] 周光新, 盛　谦, 崔　臻, 等. 走滑断层错动影响下跨活断层铰接隧洞破坏机制模型试验[J]. 岩土力学, 2022, **43**(1): 37－50. (ZHOU Guang-xin, SHENG Qian, CUI Zhen, et al. Model test of failure mechanism of tunnel with flexible joint crossing active fault under strike-slip fault dislocation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(1): 37－50. (in Chinese))

[39] 周光新, 盛　谦, 张传健, 等. 穿越走滑断层铰接隧洞抗错断设计参数作用机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, **41**(5): 941－953. (ZHOU Guang-xin, SHENG Qian, ZHANG Chuan-jian, et al. Study on the mechanism of design parameters of a tunnel with flexible joint crossing strike-slip faults[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

Engineering, 2022, **41**(5): 941 – 953. (in Chinese))

[40] 张 肃, 丁秀丽, 黄书岭. 基于均匀设计 – 响应面 – 有限元法的软岩隧洞围岩与衬砌结构协同承载可靠性分析[J]. 长江科学院院报, 2021, **38**(6): 79 – 85. (ZHANG Su, DING Xiu-li, HUANG Shu-ling. Reliability analysis of collaborative bearing capacity of surrounding rock and lining structure in soft rock tunnel based on uniform design, response surface, and finite element method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, **38**(6): 79 – 85. (in Chinese))

[41] 王 芳, 何勇军, 李宏恩. 基于系统动力学的引调水工程风险分析: 以倒虹吸工程为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, **18**(3): 184 – 191. (WANG Fang, HE Yong-jun, LI Hong-en. Risk analysis of the water diversion project based on system dynamics: a case study of inverted siphon project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, **18**(3): 184 – 191. (in Chinese))

[42] 牛广利, 李端有, 李天旸, 等. 基于云平台的大坝安全监测数据管理及分析系统研发与应用[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(6): 161 – 165. (NIU Guang-li, LI Duan-you, LI Tian-yang, et al. Management and analysis system for dam safety monitoring data based on cloud platform: development and application[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(6): 161 – 165. (in Chinese))

[43] 钟登华, 林瀚文, 吴斌平, 等. 基于M5P-SVR故障预测的地下洞室施工仿真[J]. 水力发电学报, 2019, **38**(4): 199 – 212. (ZHONG Deng-hua, LIN Han-wen, WU Bin-ping, et al. Simulations of underground cavern construction based on M5P-SVR failure prediction[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, **38**(4): 199 – 212. (in Chinese))

[44] 余 佳. 考虑风险影响的复杂长距离引水隧洞施工仿真与优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2019. (YU Jia. Research on Construction Simulation and Optimization of Complex Long Distance Diversion Tunnel Considering the Impacts of Risks[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese))

[45] 王晓玲, 禹 旺, 刘长欣, 等. 考虑围岩传热的深埋引水隧洞TBM施工通风模拟[J]. 水力发电学报, 2019, **38**(10): 1 – 13. (WANG Xiao-ling, YU Wang, LIU Chang-xin, et al. TBM construction ventilation simulation for deep buried headrace tunnels considering heat transfer in surrounding rock[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, **38**(10): 1 – 13. (in Chinese))

[46] WANG H B, LI C L, ZHAO L J. Experimental study on dynamic interaction between large U-shape aqueduct and water[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, **26**(3): 1203 – 1213.

[47] 王海波, 李春雷, 张昆航. U 形渡槽内水体液面晃动对流作用试验研究[J]. 水利学报, 2020, **51**(12): 1453 – 1461. (WANG Hai-bo, LI Chun-lei, ZHANG Kun-hang. Experimental study on the convective mass of sloshing liquid in a U-shaped aqueduct[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, **51**(12): 1453 – 1461. (in Chinese))

[48] 王海波, 李春雷, 朱 璨, 等. 大型薄壁输水渡槽流固耦合振动台试验研究[J]. 水利学报, 2020, **51**(6): 653 – 663. (WANG Hai-bo, LI Chun-lei, ZHU Can, et al. Experimental study of dynamic interaction between large thin wall aqueduct and water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, **51**(6): 653 – 663. (in Chinese))

[49] 徐瑞祥, 李 炯, 尤 岭, 等. 斜面导向式减隔震自复位支座: CN207110109U[P]. 2018-03-16. (XU Rui-xiang, LI Jiong, YOU Ling, et al. Inclined Plane Guided Vibration Reduction and Isolation Self Resetting Bearing: CN207110109U[P]. 2018-03-16. (in Chinese))

[50] 刘 琪, 张传健, 颜天佑, 等. 敞开式TBM穿越断层破碎带时岩 – 机作用分析: 以滇中引水工程香炉山隧洞为例[J]. 人民长江, 2021, **52**(10): 165 – 175. (LIU Qi, ZHANG Chuan-jian, YAN Tian-you, et al. Analysis on interaction between rock and opened TBM during excavation in fault fracture zone: case of Xianglushan Tunnel in Central Yunnan Water Diversion Project[J]. Yangtze River, 2021, **52**(10): 165 – 175. (in Chinese))

[51] 张茂础, 崔 臻, 盛 谦, 等. 一种岩体结构面简易循环剪切仪: CN210571795U[P]. 2020-05-19. (ZHANG Mao-chu, CUI Zheng, SHENG Qian, et al. A Simple Cyclic Shear Apparatus for Rock Structural Plane: CN210571795U[P]. 2020-05-19. (in Chinese))

[52] 池建军, 刘登学, 丁秀丽, 等. 第三系泥岩隧洞围岩大变形成因及应对措施研究[J/OL]. 长江科学院院报: 1-11.[2022-05-25]. http://kns.cnki.net/detail/42.1171.TV.22020429.1836.029.html. (CHI Jian-jun, LIU Deng-xue, DING Xiu-li, et al. Study on causes and countermeasures of large deformation in a tunnel with tertiary mudstone[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute: 1-11.[2022-05-25]. http://kns.cnki.net/detail/42.1171.TV.22020429.1836.029.html. (in Chinese))

DOI：10.11779/CJGE202207003 “十三五”国家重点研发计划项目

高土石坝变形破坏过程预测理论和防控技术创新

陈生水

（1. 南京水利科学研究院，江苏 南京 210029；2. 水利部水库大坝安全重点实验室，江苏 南京 210029）



摘 要：中国是世界上高土石坝数量最多的国家，复杂建坝条件和恶劣服役环境下高土石坝建设和长期安全保障面临严峻技术挑战。介绍了“十三五”国家重点研发计划项目“复杂条件下特高土石坝建设与长期安全保障关键技术”的主要成果：揭示了粗粒土颗粒破碎对高土石坝变形的影响机制、粗粒土加载变形和流变变形服从不同流动准则的规律，以及坝基深厚覆盖层原位结构损伤演化规律，建立了精准预测高土石坝坝体和坝基变形发展过程和分布规律的本构理论；基于计算接触力学理论建立了模拟高土石坝不同材料界面复杂接触问题的非线性数值计算方法和模拟高土石坝三维裂缝萌生—扩展全过程的数值计算方法；发展了实用的非饱和土固结理论，实现了高心墙坝全生命期变形与渗流耦合过程的精细模拟；建立了高面板坝面板太阳热辐射温度应力场和结构破损过程模拟计算方法；研发了适用于高土石坝填筑、蓄水、运行等全过程模拟的高性能软件平台；针对特高土石坝建设和运行过程中常见病害，提出了相应的特高土石坝变形破坏防控技术。

关键词：高土石坝；变形破坏；计算理论方法；防控技术

中图分类号：TV641 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2022)07－1211－09

作者简介：陈生水(1962—)，男，博士，正高级工程师（二级教授），博士生导师，现任南京水利科学研究院院长，兼任中国水利学会副理事长、中国大坝工程学会副理事长、《岩土工程学报》编委会主任。长期从事水库大坝建设和安全保障理论和技术研究，主持国家重点研发计划项目“复杂条件下特高土石坝建设与长期安全保障关键技术”、亚洲合作基金重大项目“东盟国家大坝安全保障体系建设与示范”、国家973项目课题“土石坝-水库耦合系统动力学机理”、国家自然科学基金重点项目“高土石坝地震灾变模拟与安全控制方法研究”、水利重大问题研究“新形势下水工程安全管理标准及对策研究”等重大科技项目。先后获国家科技进步二等奖4项，省部级科技进步一等奖4项。出版学术专著6部，主编和参编国家、行业标准12部，公开发表学术论文200余篇，获国家发明专利33项、软件著作权16项。入选国家“万人计划”首批百千万工程领军人才、第十二届“光华工程科技奖”、首届中国杰出大坝工程师、全国优秀科技工作者、新世纪百千万人才工程国家级人选、全国水利系统先进工作者，享受国务院政府特殊津贴。E-mail: sschen@nhri.cn。

Innovations in prediction theories and prevention technologies for deformation-induced failure process of high earth and rockfill dams

CHEN Sheng-shui

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Key Laboratory of Reservoir Dam Safety of the Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: China is the country with the largest amounts of high earth and rockfill dams in the world. Complex construction conditions and severe operation environment lead to great technical challenges in their construction and long-term safety guarantee. The main research results of the National Research and Development Program of China during the 13th Five-Year Plan period “Key technologies for construction and long-term safety protection of extra-high earth-rock dams under complex conditions” are introduced as follows: the mechanism of particle breakage on deformation of dams, flow rules during loading and creeping of rockfill materials as well as the damage process of in-situ structures of overburden soils are revealed, and the constitutive theories that can be used to predict the deformation developing process and distribution of dam body and foundation are established accordingly. The numerical methods

基金项目：国家重点研发计划“水资源高效开发利用”重点专项项目（2017YFC0404800）

收稿日期：2022－03－05

for complex contacting problems and initiation and development of 3D cracks in high earth and rockfill dams are developed based on the computational contact mechanics. The practical consolidation theory of unsaturated soils is developed to simulate the deformation-seepage coupling effects during the whole life spans of high earth and rockfill dams. A new thermo-mechanical coupled method is proposed to account for the temperature-induced stress and damage of concrete slabs in concrete-faced rockfill dams. A high performance software platform is established to simulate the whole process including dam filling, impoundment and operation of high earth and rockfill dams. A series of techniques and measures preventing and controlling the deformation-induced damage processes are suggested for extra high earth and rockfill dams under complex conditions.

Key words: high earth and rockfill dam; deformation and damage; computational theory and method; prevention technology

0 引 言

20 世纪 70 年代以来，中国高土石坝建设技术取得了长足进步，建成了一批高土石坝工程，为提升流域防洪能力、保障供水安全、开发利用水能资源发挥了重要作用。然而，已建成的不少高土石坝出现了坝体裂缝、面板脱空、止水破坏、渗流量过大等病害，危及大坝安全。调查研究表明，高土石坝出现上述病害，除了坝高增加使其变形和渗流安全控制难度增大这一客观因素外，最主要的是高土石坝变形破坏相关基础理论研究落后于工程建设实践的问题长期未得到很好解决，导致其变形破坏机理认识不清，变形破坏过程预测预报不准，影响了变形和渗流安全控制措施的针对性和有效性。随着国家水网重大工程的推进，一批高土石坝工程正在或即将开工建设，如新疆大石峡面板砂砾石坝最大坝高 247 m，西藏 RM 心墙堆石坝最大坝高 315 m，坝高均居同类坝型世界之首；雅鲁藏布江下游的 ML 水电站坝基覆盖层深度超过 500 m，这些高坝大库建设条件和运行环境更为复杂，面临的安全挑战将更为严峻，亟需在复杂条件下高土石坝变形破坏机理、变形破坏过程计算理论、变形破坏防控技术上取得突破。“十三五”国家重点研发计划项目“复杂条件下特高土石坝建设与长期安全保障关键技术”聚焦“大幅提升高土石坝变形破坏过程预测预报精度，增强高土石坝变形和渗流安全控制措施的针对性和有效性，为避免或降低其病害风险提供理论和技术支撑”这一目标，在坝体和坝基材料本构理论、复杂接触问题非连续变形计算方法、多相多场耦合计算方法、超大规模数值模拟技术、变形破坏防控技术等方面开展了深入系统研究，取得了系列创新成果。

1 高土石坝坝体和坝基材料本构理论

1.1 高土石坝筑坝粗粒土本构模型

高土石坝主要由粗粒土碾压填筑而成，其力学性质及其演化规律对高土石坝安全具有重要影响。目前常用粗粒土本构模型尚不能合理反映高应力与变化环境下粗粒土颗粒破碎对高土石坝变形的影响机制，导致其低估高土石坝沉降和指向坝体内的水平位移，高估指向坝体外的水平位移，造成应对措施不当，增大了高土石坝发生病害的风险。围绕上述问题，重点针对粗粒土的颗粒破碎规律和劣化流变规律及其本构模拟等开展了研究工作。

（1）粗粒土的峰值与临胀摩擦角

分析 300 余种粗粒土的大型三轴试验结果发现：颗粒破碎使粗粒土峰值摩擦角和临胀摩擦角均随围压或平均有效应力的增加而非线性降低，两者之间服从对数线性变化规律[1-2]，即

$$\left.\begin{aligned}\varphi=\varphi_0-\Delta\varphi\lg\left(\frac{p}{p_{\mathrm{a}}}\right),\\ \psi=\psi_0-\Delta\psi\lg\left(\frac{p}{p_{\mathrm{a}}}\right)。\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

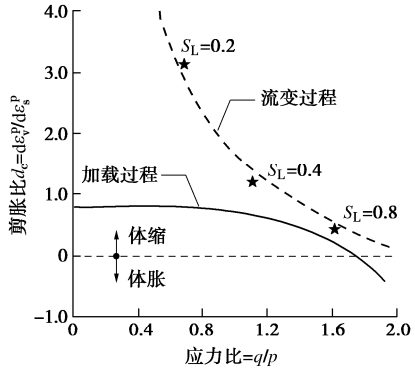
式中 p_{a} 为标准大气压，$p_{\mathrm{a}}=101.325$ kPa；φ_0 和 ψ_0 分别为平均应力 $p=p_{\mathrm{a}}$ 时的峰值摩擦角和临胀摩擦角；$\Delta\varphi$ 和 $\Delta\psi$ 分别为平均应力 p 增加一个数量级时峰值摩擦角和剪胀摩擦角降低的幅度。

（2）加载与流变的流动准则

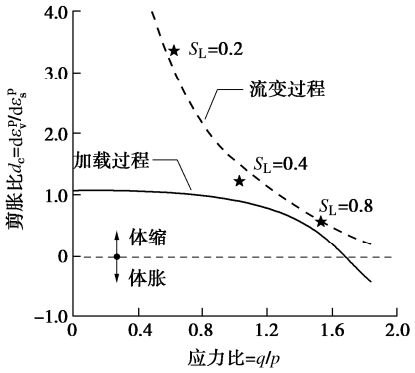
通过粗粒土大型三轴压缩试验和三轴流变试验[3]，分别研究了加载和流变过程中剪胀比与应力比之间的关系，发现在三轴压缩和三轴流变过程中，粗粒土的剪胀比均随着应力比的增加而减小，且相同三轴压缩应力状态下，粗粒土的流变剪胀比明显大于加载剪胀比，即流变过程中粗粒土的剪缩性比三轴压缩过程中的剪缩性更为强烈，粗粒土的流变全部表现为体积收缩，加载变形和流变变形服从不同流动准则（图 1）。

$$\left.\begin{aligned}d_{\mathrm{L}}=d_0\left[1-\left(\frac{\eta}{M_{\mathrm{d}}}\right)^4\right],\\ d_{\mathrm{C}}=\frac{M_{\mathrm{d}}'^2-\eta^2}{2\eta}。\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

式中　d_L 为加载剪胀比；d_0 为初始剪胀比；M_d 加载临胀应力比；d_C 为流变剪胀比；M'_d 为流变临胀应力比，一般情况下 $M'_d \approx (1.1 \sim 1.3)M_d$。



（a）σ_3=0.6 MPa



（b）σ_3=1.2 MPa

图 1　粗粒土加载与流变过程中剪胀比与应力比的关系[3]

Fig. 1 Relationships between dilatancy ratio and stress ratio during loading and creeping[3]

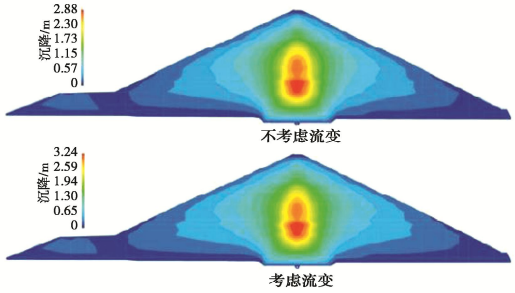
（3）统一模拟加载变形与流变的粗粒土本构模型

提出了“一个屈服面，两个流动准则”的建模新思路，在屈服方程中引入时间变量，通过时间变化引起屈服面扩张，解决流变的启动机制问题；分别采用不同的流动准则描述加载塑性应变方向和流变塑性应变方向，建立了统一模拟粗粒土加载变形与流变的本构方程的一般形式[4]，即

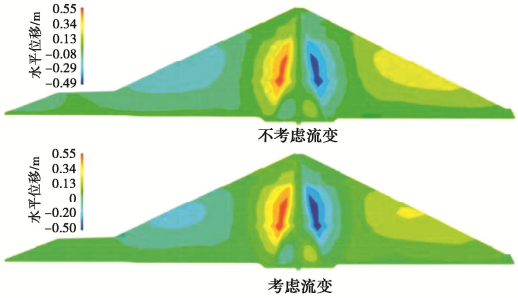
$$\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma}=\left[\boldsymbol{D}_{\mathrm{e}}-\frac{\left(\boldsymbol{D}_{\mathrm{e}}:\frac{\partial G_{\mathrm{L}}}{\partial \boldsymbol{\sigma}}\right)\otimes\left(\frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}}:\boldsymbol{D}_{\mathrm{e}}\right)}{\frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}}:\boldsymbol{D}_{\mathrm{e}}:\frac{\partial G_{\mathrm{L}}}{\partial \boldsymbol{\sigma}}-\frac{\partial F}{\partial h}\frac{\partial h}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{p}}}:\frac{\partial G_{\mathrm{L}}}{\partial \boldsymbol{\sigma}}}\right]:\left(\mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}-\mathrm{d}\lambda_{\mathrm{C}}\frac{\partial G_{\mathrm{C}}}{\partial \boldsymbol{\sigma}}\right)。\tag{3}$$

式中　$\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量；$\boldsymbol{\varepsilon}$ 为应变张量；$\boldsymbol{D}_{\mathrm{e}}$ 和 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{e}}$ 分别为弹性劲度张量和柔度张量；G_{L} 和 G_{C} 为描述加载变形与流变的塑性势函数；h 为硬化参数，是塑性应变 $\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{p}}$ 的函数；t 为时间。

基于三轴剪切和流变试验以及原位变形观测资料，构建了加载塑性模量（H_{L}）、流变塑性模量（H_{C}）等表达式，实现了粗粒土加载变形与流变的统一模拟（图 2），克服了目前常用本构模型未能合理反映粗粒土颗粒破碎对高土石坝变形的影响机制和无法考虑高土石坝施工期流变的不足。



（a）最大剖面沉降分布云图



（b）最大剖面水平位移分布云图

图 2　某特高心墙堆石坝填筑施工过程模拟[4]

Fig. 2 Deformation behaviors of a high rockfill dam by proposed model[4]

1.2　高土石坝坝基覆盖层本构模型

随着中国水利水电开发进程的持续推进，地形地质条件优良的基岩坝址日益减少，深厚覆盖层上建设土石坝和闸坝工程已成为这些地区水利水电开发难以规避的重大技术挑战。坝基深厚覆盖层由于经历了漫长的沉积历史，具有明显的结构性特点，但实践中往往忽视覆盖层土体的原位结构性，套用堆石料等重塑散粒体材料的模型和计算方法，得出的结论具有很大的不确定性，亟需发展适用于原位覆盖层土体的本构理论和计算方法，科学认识坝基深厚覆盖层材料的力学特性和结构损伤演化规律，为深厚覆盖层上高土石坝设计和地基处理提供科学依据。

（1）原位胶结覆盖层的特征孔隙比

通过分析某无扰动土体和扰动土体的单向压缩试验结果和人工胶结砂砾石料的三轴压缩试验结果，揭示了原位胶结结构对深厚覆盖层粗粒土强度特性和剪胀（缩）规律的影响，提出了粒间胶结使粗粒土孔隙处于锁定状态（图 3），胶结结构损伤使“锁定孔隙”逐步释放的原创思路；通过引入胶结破坏比参量 $r_{\mathrm{d}}=N_{\mathrm{d}}/N_{\mathrm{i}}$，构建了胶结覆盖层粗粒土特征孔隙比随平均应力变化和胶结结构损伤的演化方程[5]：

$$\left.\begin{aligned} e_{\mathrm{i}} &= e_{\mathrm{i0}} \cdot \exp\left[-\left(\frac{3p}{h_{\mathrm{s}}}\right)^{n}\right] + \Delta e(r_{\mathrm{d}}) \\ e_{\mathrm{d}} &= e_{\mathrm{d0}} \cdot \exp\left[-\left(\frac{3p}{h_{\mathrm{s}}}\right)^{n}\right] + \Delta e(r_{\mathrm{d}}) \\ e_{\mathrm{c}} &= e_{\mathrm{c0}} \cdot \exp\left[-\left(\frac{3p}{h_{\mathrm{s}}}\right)^{n}\right] + \Delta e(r_{\mathrm{d}}) \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

式中 e_{i}，e_{d}，e_{c} 分别为最大最小和临界孔隙比；Δe 为附加孔隙比，取决于胶结破坏比 r_{d}，$r_{\mathrm{d}}=0$ 时，$\Delta e=\Delta e_0$，$r_{\mathrm{d}}=1$ 时，$\Delta e=0$。

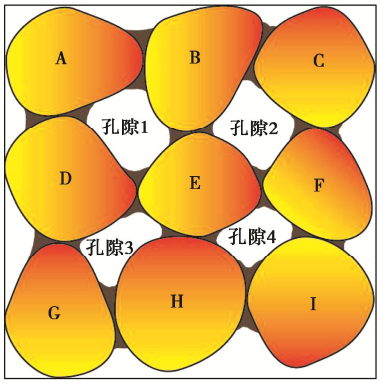


图 3 覆盖层胶结结构示意图[5]

Fig. 3 Schematic illustration of locked voids[5]

由于引入了独立的胶结破坏比变量 r_{d}，颗粒材料在(p, e_{c})平面上的临界状态线扩展成为(p, r_{d}, e_{c})空间的临界状态面（图 4）。在加载过程中，胶结结构性土的临界状态沿着胶结破坏比 r_{d} 增长的方向演化，如图 4 中的粗虚线所示。

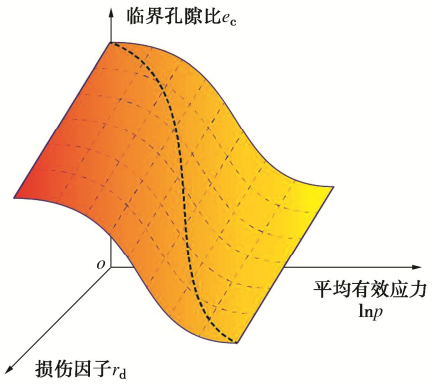


图 4 胶结覆盖层临界状态面示意图[5]

Fig. 4 Critical state surface plotted in e_{c}~ln(p)~r_{d} space for cemented granular materials[5]

（2）胶结覆盖层结构性土本构模型

基于亚塑性理论，提出了考虑坝基深厚覆盖层原位结构及其损伤演化规律的亚塑性本构模型（式 5）[5]，实现了覆盖层结构性土由胶结体向散粒体过渡的模拟，提升了高土石坝坝基覆盖层变形预测精度。

$$\overset{\circ}{\boldsymbol{\sigma}} = f_{\mathrm{s}}\left[a^2\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + (\bar{\boldsymbol{\sigma}}:\dot{\boldsymbol{\varepsilon}})\bar{\boldsymbol{\sigma}} - af_{\mathrm{v}}\left(\frac{1}{f_{\mathrm{d}}}\bar{\boldsymbol{\sigma}} + f_{\mathrm{d}}\bar{\boldsymbol{\sigma}}^{*}\right)\|\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}\|\right], \quad (5)$$

式中 $\overset{\circ}{\boldsymbol{\sigma}}$ 为客观应力率张量；$\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ 为单位化应力张量，$\bar{\boldsymbol{\sigma}}^{*}$ 为其偏斜分量，即 $\bar{\boldsymbol{\sigma}}=\boldsymbol{\sigma}/\mathrm{tr}(\boldsymbol{\sigma})$，$\bar{\boldsymbol{\sigma}}^{*}=\bar{\boldsymbol{\sigma}}-\boldsymbol{I}/3$；标量 f_{s} 称为劲度因子；标量 f_{v} 称为孔隙比因子；标量 f_{d} 称为损伤因子；标量 a 是与一个与临界状态摩擦角 φ_{c} 相关的变量。本构方程中各因子表达式详见文献[5]。

2 高土石坝非连续变形模拟理论与计算方法

2.1 高土石坝接触问题变形破坏过程模拟方法

高土石坝存在坝体与河谷、心墙与坝壳混凝土面板与垫层、坝基覆盖层与防渗墙等接触问题，这些接触界面变形破坏机制复杂，是高土石坝常出现病害的部位，有必要研究提出正确反映其变形破坏机理的模拟计算方法。当前针对土－结构接触特性的研究，多采用接触单元法，该方法对于材料界面上位移不连续现象的描述较为简单，导致接触面大规模滑移和脱开等问题的计算结果发生震荡、不易收敛等。为此，基于非线性接触力学的模拟方法，本项目破解了高土石坝多体接触特性描述、非协调网格处理、接触界面流固耦合模拟等难题，建立了模拟高土石坝不同材料界面复杂接触问题的非线性数值计算方法，实现了高土石坝各类接触界面变形破坏过程的精准模拟。

（1）高土石坝多体接触数值算法

基于面对面的接触界面离散形式，发展了基于非线性接触力学的数值算法，并自主编制了三维有限元计算程序系统，可用于进行土石坝多体接触问题应力变形的分析计算。计算接触力学方法在有限元框架内处理接触问题，将相互接触的不同物体处理为独立的变形体，分别划分有限元计算网格，建立有限元方程，然后通过引入接触物体之间的接触条件，集成整体的有限元方程进行求解。计算接触力学所涉及的内容较多，可将其归纳为接触条件和多体接触问题的变分原理（式 6）、接触界面的空间离散（式 7）和接触问题的非线性迭代求解方法（式 8）等内容[6-7]。

$$\delta\Pi_{\mathrm{C}} = \int_{\Gamma_{\mathrm{C}}} \boldsymbol{\lambda}(\delta\boldsymbol{u}^{\mathrm{s}} - \delta\boldsymbol{u}^{\mathrm{m}})\,\mathrm{d}\Gamma$$

$$\int_{\Gamma_{\mathrm{C}}} g_n(\delta\lambda_n - \lambda_n)\,\mathrm{d}\Gamma \geqslant 0, \int_{\Gamma_{\mathrm{C}}} \boldsymbol{v}_\tau \cdot (\delta\boldsymbol{\lambda}_\tau - \boldsymbol{\lambda}_\tau)\,\mathrm{d}\Gamma \leqslant 0 \quad , \quad (6)$$

$$\delta\Pi_u^{\mathrm{C}} \approx \int_{\Gamma_{\mathrm{C}}} \left[\sum_{j=1}^{n_{\mathrm{s}}} \psi_j \boldsymbol{z}_j \cdot \left(\sum_{k=1}^{n_{\mathrm{s}}} N_k \delta\boldsymbol{u}_k^{\mathrm{s}} - \sum_{l=1}^{n_{\mathrm{m}}} N_l \delta\boldsymbol{u}_l^{\mathrm{m}}\right)\right] \mathrm{d}\Gamma$$

$$= (\delta \boldsymbol{u}^{\mathrm{s}})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{D}\boldsymbol{z} - (\delta \boldsymbol{u}^{\mathrm{m}})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{M}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{z} \quad , \tag{7}$$

$$\left[\begin{array}{c|c} \boldsymbol{K} & \begin{matrix} 0 \\ -\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}} \\ 0 \\ \boldsymbol{D}^{\mathrm{T}} \end{matrix} \\ \hline 0 \quad * \quad 0 \quad * & 0 \end{array}\right] \left[\begin{matrix} \Delta \boldsymbol{u}_{\mathrm{N}} \\ \Delta \boldsymbol{u}_{\mathrm{M}} \\ \Delta \boldsymbol{u}_{\mathrm{I}} \\ \Delta \boldsymbol{u}_{\mathrm{A}} \\ \boldsymbol{z} \end{matrix}\right] = \left[\begin{matrix} \boldsymbol{F}_{\mathrm{N}}^{\mathrm{ext,int}} \\ \boldsymbol{F}_{\mathrm{M}}^{\mathrm{ext,int}} \\ \boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{ext,int}} \\ \boldsymbol{F}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{ext,int}} \\ 0 \end{matrix}\right] , \tag{8}$$

式中　$\boldsymbol{K}$ 为不考虑接触的传统有限元方法计算格式刚度矩阵；下标 N、M、I 和 A 分别表示各类接触状态的节点集合；Δu 为位移增量；$\boldsymbol{F}^{\mathrm{ext,int}}$ 为内外力荷载；用*表示的矩阵子块具体形式和节点的接触状态有关，需根据物体处于黏结状态或滑移状态选用对应的约束条件。

（2）高土石坝多体接触问题流固耦合计算方法

基于计算接触力学理论，通过 Lagrange 乘子法引入接触界面孔压连续条件，构造了将高土石坝各类接触面不可贯入条件、法向压力条件和切向摩擦力条件的不等式约束转换为等式约束的势能泛函（式 9），建立了流固耦合接触问题的变分方程（式 10）；开发了适合大规模计算的隐式多体接触算法和基于对偶 Mortar 元的高精度界面离散形式（式 11）；基于接触力学和虚拟单元法（图 5），引入接触界面孔压传导条件（图 6），创建了高土石坝多体接触问题流固耦合计算方法，克服了传统接触单元出现震荡型法向应力以及无法考虑接触部位流固耦合等不足，实现了高土石坝各类接触问题变形破坏过程的精准模拟[7]。

$$\Pi^{*}(\boldsymbol{u}, p) = \Pi_{\mathrm{int,ext}}(\boldsymbol{u}, p) + \Pi_{\mathrm{Cs}}^{u}(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{\lambda}_u) + \Pi_{\mathrm{Cf}}^{p}(p, \boldsymbol{\lambda}_p) , \tag{9}$$

式中，Π^{*} 为修正后的泛函，Π_{Cs}^{u} 为接触界面上应力位移接触条件的附加泛函，Π_{Cf}^{p} 为接触界面上渗流接触条件的附加泛函，$\boldsymbol{\lambda}_u$ 和 $\boldsymbol{\lambda}_p$ 分别为对应的 Lagrange 乘子。

$$\left.\begin{aligned} &\delta \Pi^{*} = \delta \Pi_{\mathrm{int,ext}} + \delta \Pi_{\mathrm{Cs}} + \delta \Pi_{\mathrm{Cf}} = 0 , \\ &\int_{{}^{t}\Gamma_{\mathrm{C}}^{s}} g_n (\delta \lambda_u^{n} - \lambda_u^{n}) \mathrm{d}\Gamma \geqslant 0 , \\ &\int_{{}^{t}\Gamma_{\mathrm{C}}^{s}} \overline{\boldsymbol{v}}_{\tau} \cdot (\delta \boldsymbol{\lambda}_u^{\tau} - \boldsymbol{\lambda}_u^{\tau}) \mathrm{d}\Gamma \leqslant 0 , \\ &\int_{{}^{t}\Gamma_{\mathrm{C}}^{s}} \overline{\boldsymbol{v}}_{\tau} \cdot (\delta \boldsymbol{\lambda}_u^{\tau} - \boldsymbol{\lambda}_u^{\tau}) \mathrm{d}\Gamma \leqslant 0 。 \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

式中　$\delta \Pi^{*}$ 为修正泛函的变分；$\delta \Pi_{\mathrm{Cs}}$ 和 $\delta \Pi_{\mathrm{Cf}}$ 分别为接触界面上应力位移附加泛函的变分和接触界面上渗流附加泛函的变分。

$$\boldsymbol{\lambda} \approx \sum_{j=1}^{n^{s}} \phi_j \boldsymbol{z}_j \cdots, \cdots \phi_j = \sum_{k=1}^{n_e^{s}} a_{e,jk} N_k \quad , \tag{11}$$

式中　ϕ_j 为从面节点上的 Lagrange 乘子的形函数，也称对偶基函数；$\boldsymbol{z}_j$ 为从面节点的 Lagrange 乘子；$a_{e,jk}$ 为待定系数矩阵，可根据 dual mortar 元应满足的双正交条件确定。

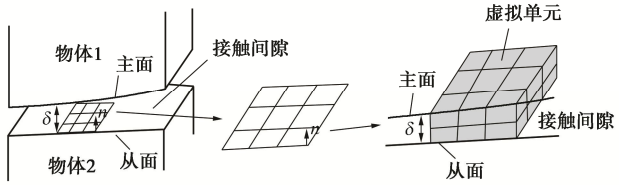


图 5 接触力学和虚拟单元法示意图

Fig. 5 Schematic illustration of contact mechanics and virtual-element method

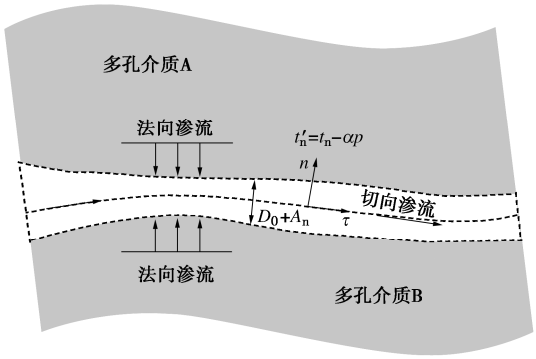


图 6 流固耦合接触问题孔压传导模型示意图

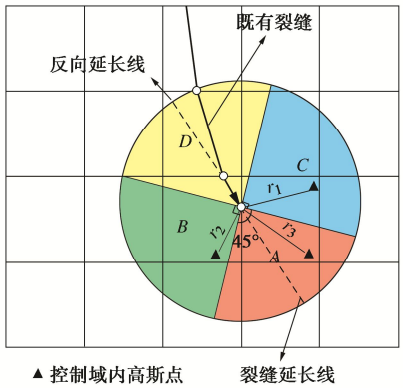
Fig. 6 Schematic illustration of pore pressure transmission model

2.2　高土石坝坝体裂缝萌生扩展过程模拟方法

高土石坝坝体裂缝是目前高土石坝建设及运行中常遇到的病险，其发生和发展大大增加了工程的安全风险。通过对某心墙堆石坝典型监测点监测数据进行反演计算，深入分析了坝体和坝顶裂缝的产生原因及演化过程，揭示了高土石坝坝体裂缝尖端应力集中和扩展过程应力重分布特征，提出了土体张拉－剪切联合破坏准则（式 12）以及区域控制法判定裂缝扩展方向的方法，建立了基于径向基点插值无网格法、扩展有限元与传统有限元直接耦合的高土石坝三维裂缝萌生－扩展过程的数值计算方法，实现了高土石坝坝体三维裂缝萌生扩展全过程的精准模拟和自动追踪（图 7）[8]。

$$T_{\mathrm{L}} = \left|\frac{\sigma_3}{f_{\mathrm{t}}}\right| (\sigma_3 < 0) \cdots S_{\mathrm{L}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sin\varphi(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c/\tan\varphi)} 。 \tag{12}$$

计算过程中，若目标区域的 $T_{\mathrm{L}} > 1$ 且 $\sigma_3 < 0$，则该区域处于张拉破坏状态；若目标区域的 $S_{\mathrm{L}} > 0$，则该区域处于剪切破坏状态。



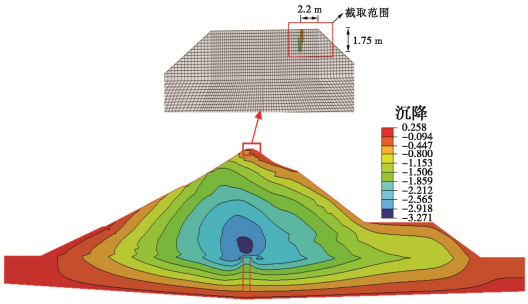


图 7 高土石坝坝顶裂缝模拟方法与案例[8]

Fig. 7 Modeling of crest crack in a high rockfill dam[8]

3 复杂条件下高土石坝变形破坏机制与计算理论

3.1 非饱和土渗流固结理论及计算方法

高土石坝在填筑、蓄水和运行过程中常涉及非饱和土问题。通过定义土体孔隙含气率和孔隙气排气率，导出了非饱和土固结过程孔隙气压力演化方程，构建了实用的非饱和土固结理论；提出了考虑黏土心墙应力应变状态的指数型渗透系数模型（图 8），以及模拟土质防渗体吸水过程和失水过程土水特征曲线的边界面模型（图 9），实现了土质防渗心墙由非饱和状态向饱和状态循环演化、应力应变与渗流固结过程完全耦合的精细模拟，大幅提升了高心墙坝填筑和运行期黏性心墙孔隙水压力发展和分布规律计算精度。

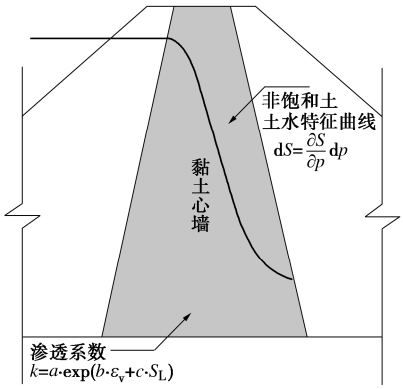


图 8 黏土心墙指数型渗透系数模型

Fig. 8 Exponential permeability model for clay core

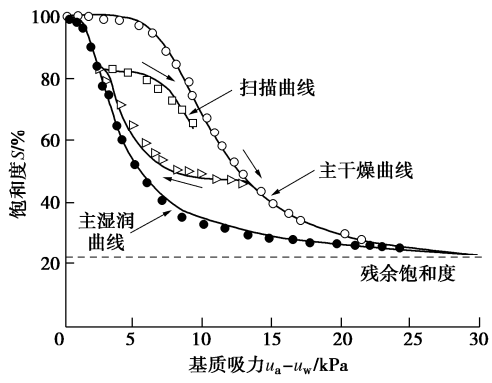


图 9 非饱和黏土土水特征曲线模型

Fig. 9 Soil-water characteristic curves for unsaturated soils

3.2 高面板坝面板挤压破损机理与过程模拟计算方法

在面板堆石坝工程中，混凝土面板是大坝防渗的主体结构。基于计算接触力学方法，嵌入了钢筋混凝土弹塑性本构模型，发展了大变形和大刚度差异条件下面板结构应力、脱空和破坏现象的模拟计算方法。基于已建工程中面板发生挤压破损现象的分析，阐明了高面板坝面板挤压破损机理和特征；基于对偶 mortar 元提出了非稳定温度场计算方法（式 13）和热－力耦合计算方法（式 14），结合提出的面板局部计算网格加密技术（图 10），建立了高面板坝面板太阳热辐射温度应力场和结构破损过程模拟计算方法，对 200 m 级理想面板堆石坝运行期太阳热辐射温度应力进行计算分析（图 11），精准再现了面板在轴向挤压变形和温度应力共同作用下的破损现象[9-11]。

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{H}_{\mathrm{RR}} & \tilde{\boldsymbol{H}}_{\mathrm{RM}} \\ \tilde{\boldsymbol{H}}_{\mathrm{RM}}^{\mathrm{T}} & \tilde{\boldsymbol{H}}_{\mathrm{MM}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{R}} \\ \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{M}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \boldsymbol{Q}_{\mathrm{R}} \\ \boldsymbol{Q}_{\mathrm{M}} + \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Q}_{\mathrm{S}} \end{Bmatrix} , \tag{13}$$

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma} &\approx \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} \Delta \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{his}} , \\ \Delta \boldsymbol{\varepsilon} &= \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial \boldsymbol{u}} \Delta \boldsymbol{u} - \alpha_\theta \Delta \theta \boldsymbol{I}_{3\times 3} 。 \end{aligned}\right\} \tag{14}$$

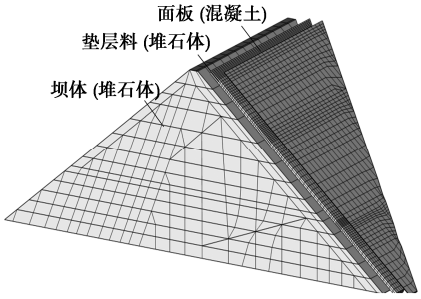


图 10 面板局部计算网格加密示意图

Fig. 10 Schematic illustration of mesh encryption for part of concrete face

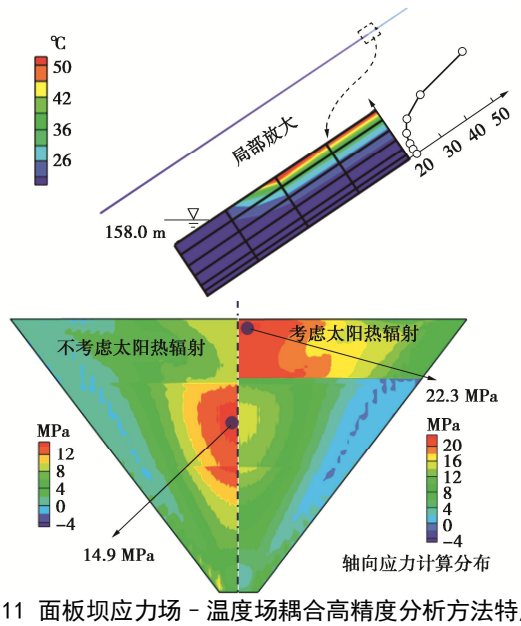


图 11 面板坝应力场－温度场耦合高精度分析方法特点

Fig. 11 Coupling analysis of temperature and stress fields for concrete-faced dam

4　高土石坝超大规模数值模拟技术

大型高土石坝工程规模宏大，结构形式复杂，运行环境多变。为了保证工程的安全性，需要对坝体结构的性态进行各种工况条件下的应力变形有限元计算，评价工程的安全性。针对材料强非线性、复杂接触界面模拟、多场耦合计算等对超大规模科学计算的需求，突破大型劣态稀疏线性方程组高效迭代算法、大型非线性系统快速求解方法等关键算法瓶颈，集成上述本构理论和计算方法，自主研发了适用于高土石坝填筑、蓄水、运行等全过程模拟的高性能软件平台，计算规模突破 1 亿自由度，计算精度和效率大幅提升（表 1），实现了高土石坝变形破坏过程计算理论和方法从知识到技术的跨越。

表 1　西藏 RM 水电站心墙堆石坝超大规模计算耗时统计

Table 1 Spent time of calculation for core-wall rockfill dam of RM

计算方案	单元数 /10^4	节点数 /10^4	自由度 /10^4	单元尺寸/m	并行核心/核	计算耗时/h
1	8.5	6.7	26.9	7.899	48	0.23
2	67.7	51.6	206.4	3.950	192	1.06
3	541.5	404.0	1615.9	1.975	1280	2.95
4	4331.7	3196.8	12787.4	0.987	2400	19.14

5　高土石坝变形破坏防控技术

基于对高土石坝变形破坏机理的认识，研发了特高面板坝新型坝体结构和陡峻岸坡面板台阶型趾板、特高心墙坝岸坡和心墙接触部位采用高塑性黏土层的变形协调和防渗技术、高面板坝面板脱空报警和自动应急保护技术、面板材料和新型止水、土石坝抗冰冻技术等多种高土石坝变形破坏防控技术措施。

（1）特高面板坝新型坝体结构和陡峻岸坡台阶型趾板技术。针对大石峡面板砂砾石坝工程，提出了一种新型坝体结构形式（混凝土重力坝和面板砂砾石坝复式结构）[12-13]，如图 12 所示，并对其安全性进行了全面论证。该复合式坝体结构具有减小面板长度，改善其应力应变条件，明显减小面板周边缝变位，提升高面板坝安全性的优点。研发了在面板坝陡峻岸坡部位采用台阶型趾板技术，如图 13 所示，模型试验和计算分析表明，该技术不仅可大幅减小面板周边缝变形、改善趾板与面板连接部位的应力状态，还便利了面板起始板的滑膜施工。

（2）特高心墙坝岸坡和心墙接触部位采用高塑性黏土层的变形协调和防渗技术。针对 RM 特高心墙堆石坝工程，开展了不同工况下岸坡－高塑性黏土层－掺砾心墙相互作用机制的大型离心模型试验，重点研究了高塑性黏土层的变形和防渗性能演化规律。试验结果表明，静动力荷载作用下，厚度 3～4 m 的高塑性黏土层始终处于“压剪”状态，防渗性能几乎没有发生变化，岸坡－高塑性黏土层－掺砾心墙三者之间变形协调。证实了在特高心墙坝岸坡和心墙接触部位采用 3～4 m 厚度的高塑性黏土层，是一种有效的变形协调和防渗措施。

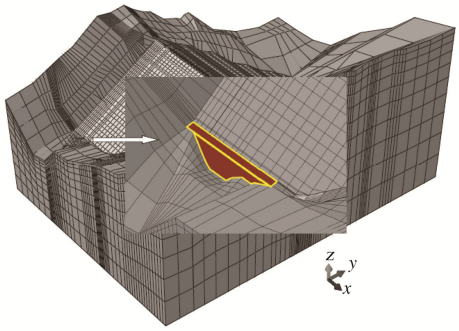


图 12　混凝土重力坝-面板砂砾石坝复式结构示意图

Fig. 12 Schematic illustration of a compound structure of concrete gravity dam and concrete face sand-gravel dam

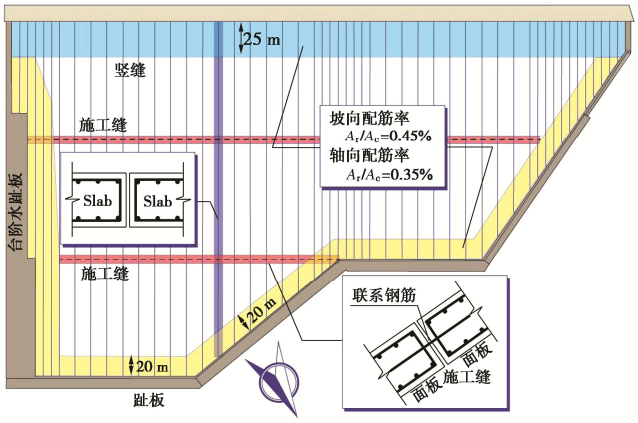


图 13　台阶式趾板结构示意图

Fig. 13 Schematic illustration of stepwise toe plinth

（3）高面板坝面板脱空报警和自动应急保护技术。针对面板堆石坝由于堆石料流变或遭受地震时，坝体断面将发生收缩，导致面板脱空问题，研发了一种混凝土面板堆石坝面板脱空的气囊式自动保护装置（图 14）。该装置在面板与垫层料之间发生脱空，且脱空量达到危害混凝土面板安全的量值时，能自动报警并启动气囊式保护装置，充气气囊将临时支撑面板，防止面板因脱空而受力状态恶化，造成面板及其止水结构发生破坏。显然，该装置不仅能及时发现面板脱空险情，也为面板脱空险情处置赢得了时间，从而有效防止面板及其止水结构破坏的发生。

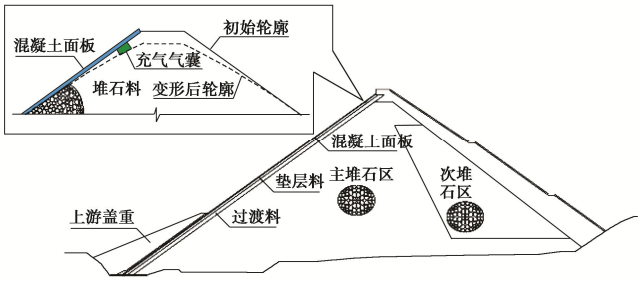


图 14 充气气囊保护混凝土面板的基本工作原理

Fig. 14 Operation principle of inflatable air bag to protect concrete face

（4）高面板坝防渗面板与新型止水。研发了面板下部迎水面设置辅助防渗层技术，即利用 SK 单组分聚脲涂层作为面板下部的辅助防渗层。通过室内试验，深入研究了 SK 单组分聚脲的物理力学特性，提出了满足防渗要求的主要技术指标，并建立了施工工艺和质控方法（图 15）。研发了适用于严寒地区的集锚固密封为一体的面板接缝表层平覆型柔性止水结构，通过小样试验模型试验，确定了合适的肋槽方案以及锚固封边剂。

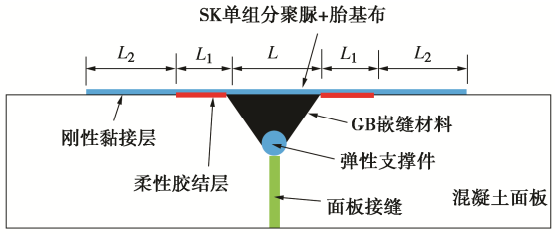


图 15 面板接缝表层平覆型柔性止水结构

Fig. 15 Flexible waterstop on surface of slab joint

6 结 语

本文扼要介绍了“十三五”国家重点研发计划项目“复杂条件下特高土石坝建设与长期安全保障关键技术”的主要成果，特别是笔者研究团队近年来在高土石坝变形破坏过程计算理论与方法等方面的研究成果，总结如下。

（1）揭示了粗粒土颗粒破碎对高土石坝变形的影响机制，提出了“一个屈服面，两个流动准则”的建模新思路，建立了统一模拟加载变形与流变的粗粒土本构模型，克服了目前常用本构模型未能合理反映粗粒土颗粒破碎对高土石坝变形的影响机制和无法考虑高土石坝施工期流变的不足，大幅提升了高土石坝变形及其发展分布规律预测精度。

（2）揭示了坝基深厚覆盖层原位结构损伤演化规律，基于亚塑性理论，提出了考虑坝基深厚覆盖层原位结构及其损伤演化规律的亚塑性本构模型，实现了覆盖层结构性土由胶结体向散粒体过渡的模拟，提升了高土石坝坝基覆盖层变形预测精度。

（3）破解了高土石坝多体接触强非线性特性描述、非协调网格处理、接触界面流固耦合模拟等难题，建立了模拟高土石坝不同材料界面复杂接触问题的非线性数值计算方法；破解了高土石坝裂缝萌生条件判别、裂缝扩展方向和扩展过程追踪等难题，建立了模拟高土石坝三维复杂裂缝萌生—扩展全过程的数值计算方法。首次实现了高土石坝各类接触界面变形破坏过程以及坝体裂缝萌生扩展过程的精细模拟。

（4）提出了黏土心墙渗透特性与应力变形状态耦合的数学模型，以及模拟心墙干湿循环过程的土水特征曲线模型，发展了实用的非饱和土固结理论，实现了高心墙坝全生命期变形与渗流耦合过程的精细模拟；建立了高面板坝面板太阳热辐射温度应力场和结构破损过程模拟计算方法，揭示了面板在轴向挤压变形和温度应力共同作用下的破损机理。

（5）突破大型劣态稀疏线性方程组高效迭代算法、大型非线性系统快速求解方法等关键算法瓶颈，自主研发了适用于高土石坝填筑、蓄水、运行等全过程模拟的高性能软件平台，计算规模突破 1 亿自由度，计算精度和效率大幅提升，实现了理论和方法从知识到技术的跨越。

（6）研发了特高面板坝新型坝体结构和陡峻岸坡面板台阶型趾板、特高心墙坝岸坡和心墙接触部位采用高塑性黏土层的变形协调和防渗技术、高面板坝面板脱空报警和自动应急保护技术、适用于严寒地区的集锚固密封为一体的面板接缝表层平覆型柔性止水结构，为高土石坝变形破坏防控提供了先进手段。

上述研究成果已成功应用于新疆阿尔塔什面板砂砾石坝、大石峡面板砂砾石坝、西藏 RM 心墙堆石坝等一批标志性高土石坝工程，为坝型比选、坝料选择、坝体结构设计优化等提供了重要的科学技术支撑，取得了显著的经济社会效益，推广应用前景广阔。

致 谢：本项目由南京水利科学研究院牵头，联合武汉大学、清华大学、中国水利水电科学研究院、水利水电规划设计总院、长江勘测规划设计研究有限责任公司等单位共同完成，文中部分研究成果由课题承担单位提供，谨向课题负责人周伟、张丙印、邓刚、关志诚、熊泽斌等致以深切谢意。

参考文献：

[1] 陈生水. 土石坝试验新技术研究与应用[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(1): 1－28. (CHEN Sheng-shui. Experimental techniques for earth and rockfill dams and their applications[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(1): 1－28. (in Chinese))

[2] 陈生水, 傅中志, 韩华强, 等. 一个考虑颗粒破碎的堆石料弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(10): 1489－1496. (CHEN Sheng-shui, FU Zhong-zhi, HAN Hua-qiang, et al. An elastoplastic model for rockfill materials considering particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(10): 1489－1496. (in Chinese))

[3] 傅中志, 陈生水, 张意江, 等. 堆石料加载与流变过程中的塑性应变方向研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(8): 1405－1414. (FU Zhong-zhi, CHEN Sheng-shui, ZHANG Yi-jiang, et al. Plastic strain directions of rockfill materials during loading and creeping[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(8): 1405－1414. (in Chinese))

[4] 陈生水, 傅中志, 石北啸, 等. 统一考虑加载变形与流变的粗粒土弹塑性本构模型及应用[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(4): 601－609. (CHEN Sheng-shui, FU Zhong-zhi, SHI Bei-xiao, et al. Elastoplasticity constitutive model considering loading-induced deformation and creep behavior of coarse granular soils and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(4): 601－609. (in Chinese))

[5] FU Z Z, CHEN S S, ZHONG Q M, et al. A damage hypoplasticity constitutive model for cemented sand and gravel materials[J]. Acta Geotechnica, 2021, **17**: 1－18.

[6] ZHANG B Y, LI Q M, YUAN H N, et al. Tensile fracture characteristics of compacted soils under uniaxial tension[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2014, 04014274.

[7] WANG W, ZHOU M Z, ZHANG B Y, et al. A dual motor contact method for porous media and its application to clay-core rockfill dams[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2019, **43**: 1744－1769.

[8] 吉恩跃, 陈生水, 傅中志, 等. 高土质心墙坝坝顶裂缝模拟方法及应用[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(6): 997－1004. (JI En-yue, CHEN Sheng-shui, FU Zhong-zhi, et al. Simulation method for crest cracks in high earth core rockfill dams and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(6): 997－1004. (in Chinese))

[9] 周墨臻, 张丙印, 张宗亮, 等. 超高面板堆石坝面板挤压破坏机理及数值模拟方法研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(8): 1426－1432. (ZHOU Mo-zhen, ZHANG Bing-yin, ZHANG Zong-liang, et al. Mechanisms and simulation methods for extrusion damage of concrete faces of high concrete-faced rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(8): 1426－1432. (in Chinese))

[10] ZHOU M Z, ZHANG B Y, PENG C. Numerical evaluation of soft inter-slab joint in concrete-faced rockfill dam with dual mortar finite element method[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2018, **42**(5): 781－805.

[11] 张宗亮, 张丙印, 周墨臻, 等. 混凝土面板堆石坝面板太阳热辐射温度应力计算分析[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(11): 1957－1965. (ZHANG Zong-liang, ZHANG Bing-yin, ZHOU Mo-zhen, et al. Numerical analysis of thermal stress induced by solar radiation in concrete-faced rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(11): 1957－1965. (in Chinese))

[12] 陈生水, 阎志坤, 傅中志, 等. 特高面板砂砾石坝结构安全性论证[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(11): 1949－1958. (CHEN Sheng-shui, YAN Zhi-kun, FU Zhong-zhi, et al. Evaluation of safety performance of extremely high slab-faced gravel dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(11): 194－1958. (in Chinese))

[13] CHEN S S, FU Z Z, MI Z K. Technical challenges and design features of the 247-m DaShiXia concrete-faced sand-gravel dam[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, ASCE, 2022, **27**(1): 04021073.

DOI：10.11779/CJGE202207004 “十三五”国家重点研发计划项目

枢纽工程重要构筑物（群）与地质环境互馈作用机制与控制技术

汪小刚[1]，陈益峰[2]，卢 波[3]，王玉杰*[1]，徐卫亚[4]，杨 强[5]，张希巍[6]

（1. 中国水利水电科学研究院，北京 100048；2. 武汉大学，湖北 武汉 430072；3. 长江水利委员会长江科学院，湖北 武汉 430010；4. 河海大学，江苏 南京 210024；5. 清华大学，北京 100084；6. 东北大学，辽宁 沈阳 110819）

摘 要：紧密结合中国重大水利水电工程长期安全调控的迫切需求，深入研究开挖卸荷、水库蓄水、水位交变、泄洪雨雾及库区气候变化条件下，库区及枢纽区渗流场、应力场和参数场（岩土力学性能参数、加固系统功能指标）的动态演化和耦合作用机理，建立并形成了地质环境变化趋势预测的理论和方法；系统研究不同构筑物（库岸边坡、高坝岩基和大型地下洞室群）与地质环境的互馈作用机制，完善并发展了基于地质环境演化的构筑物工作性状动态分析方法和调控技术，研发了与变化环境相适应的加固系统（特别是锚固体系）长效延寿成套装备与工法，并在实际工程中得到示范应用。



关键词：枢纽工程重要构筑物；参数场；地质环境；互馈作用；安全控制技术

中图分类号：TU43 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2022)07－1220－19

作者简介：汪小刚(1965—)男，工学博士，正高级工程师（二级），博士生导师，全国水利系统十大青年科技英才，百千万人才工程国家级人选，国家有突出贡献的中青年专家，享受政府特殊津贴专家，现任中国水利水电科学研究院副院长，兼任中国大坝学会副理事长、中国水力发电工程学会副理事长及《岩土工程学报》副主编。工作35年以来，主持或参与了国家“八五”至“十三五”科技攻关、国家“973”、国家自然科学基金、水利部重点科研、水利部948项目等50余项科研项目；负责或参与完成了三峡、小浪底、龙滩、李家峡、锦屏和小湾等几十个国家重大水电工程关键技术问题的技术咨询工作。紧密结合水利水电工程建设重大需求，围绕岩体工程力学参数取值方法、高边坡稳定极限分析理论、预应力锚固机理及新型锚固结构型式、复杂条件下高土石坝筑坝技术、大型输水隧洞新型衬砌结构型式、水利水电工程安全预警预报方法和技术等方面进行了深入系统的研究，取得的多项创新性成果已在工程建设中得到了广泛应用，取得了显著的社会经济效益，为我国水利水电工程发展做出了突出贡献。获国家科技进步一等奖、二等奖各1项、省部级科技进步特等奖2项、一等奖6项、二等奖8项，国家发明专利30余项，发表论文130余篇，主编和参编学术专著10余部。E-mail：wangxg@iwhr.com。

Control technology and interaction mechanism between important structures of multi-purpose projects and geological environment

WANG Xiao-gang[1], CHEN Yi-feng[2], LU Bo[3], WANG Yu-jie[1], XU Wei-ya[4], YANG Qiang[5], ZHANG Xi-wei[6]

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 4. Hohai University, Nanjing 210024, China; 5. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 6. Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Closely inline with the urgent needs of long-term safety regulation of major water conservancy and hydropower projects in China, the dynamic evolution and coupling mechanism of seepage field, stress field and parameter field (geotechnical mechanical performance parameters and functional indexes of reinforcement system) in the reservoir area and project area are deeply studied under the conditions of excavation and unloading, reservoir water storage, water level alternation, flood discharge rain and fog and climate change in the reservoir area, and the theory and method for predicting the change trend of geological environment are established and formed. The mutual feeding mechanism between different structures (reservoir bank slope, high dam rock foundation and large

基金项目：“十三五”国家重点研发计划项目（2018YFC0407000）
收稿日期：2022－03－05
*通信作者（E-mail: wangyj@iwhr.com）

underground cavern group) and the geological environment is systematically studied, the dynamic analysis method and regulation technology of working properties of structures are improved and developed based on the evolution of geological environment, and the complete set of long-term life extension equipment and construction method of reinforcement system (especially anchorage system) adapted to the changing environment is developed, and it is demonstrated and applied in practical engineering.

Key words: key structure of pivotal project; parameter field; geological environment; mutual feedback; safety control technology

0　引　　言

截止目前，中国水库大坝的数量已达 9 万 8 千多座，作为水资源配置调控的重要基础设施，水库大坝在充分发挥社会、经济和生态效益的同时，它的长期运行安全一直是各界高度关注的问题。

从国内外工程建设实践看，在工程建设高峰期，对水库大坝关注的焦点更多是现状地质条件、特定荷载组合下枢纽构筑物的安全性状，很少考虑水库蓄水等外部条件变化后，库区及枢纽区渗流场、应力场，特别是参数场多场耦合作用下，工程赋存地质环境的动态演变趋势，以及这种演变与枢纽构筑物的互馈作用及其对工程长期安全性的影响。

目前，传统的基于“静态或准静态”的设计理念和分析方法，不仅会直接影响到工程设计和安全评价结果的科学合理性，甚至还可能带来极大的工程安全风险。例如，溪洛渡、锦屏一级等特高拱坝工程，水库蓄水后谷幅变形量值远超设计预期，这一现象就与蓄水引起的渗流场、应力场改变，特别是岩体参数场的劣化有关。另外，水利水电工程中广泛采用的预应力锚索和排水等加固措施，其功能必然会随着工程运行时间的增加，因腐蚀或淤堵而逐渐衰减，这些措施的失效对工程安全的影响目前还认识不足。

为解决上述难题，2018 年 7 月，“十三五”重点研发计划项目“枢纽工程重要构筑物（群）与地质环境互馈作用机制与控制技术”（编号：2018YFC0407000）正式获批立项，完成时间为 2021 年 12 月 31 日。该项目由中国水利水电科学研究院牵头，武汉大学、长江水利委员会长江科学院、清华大学、河海大学、东北大学、天津大学、华能澜沧江水电股份有限公司、长江勘测规划设计研究有限责任公司、中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司共 10 家单位共同参与。项目围绕中国重大水资源配置工程建设和安全运行需求，通过三年半时间联合攻关，破解了枢纽构筑物赋存地质环境的动态演化机理重大难题，在水库蓄水、水位交变等复杂多变条件下岩土力学性能劣化和加固系统功能衰变机理及时效模型、枢纽区渗流场、应力场和参数场耦合作用机制及地质环境演化规律、以及基于地质环境演化的构筑物工作性状动态分析方法和安全调控技术等方面取得多项突破。本文就项目的研究内容、主要创新成果，以及成果的应用情况等作简要介绍。

1　关键科学技术问题及主要研究内容

本项目重点解决以下 3 大关键科学问题：①变化环境下，岩土力学性能劣化和加固系统功能衰变机理及时效模型；②复杂运行条件下，渗流场、应力场和参数场耦合作用机制及地质环境演化规律；③重要构筑物与地质环境互馈作用机制及安全控制技术。

围绕上述 3 大科学问题，从演化机理和分析模型、互馈机制和理论方法、控制标准和控制技术 3 个层次，项目共设置 6 个课题，分别为：课题 1 变化环境下岩土介质力学性能劣化机理与时效模型；课题 2 变化环境下加固系统功能衰变机理及健康延寿技术；课题 3 库区与枢纽区地质环境演化规律及预测方法；课题 4 库岸边坡与地质环境互馈作用机制与安全控制技术；课题 5 高坝岩基与地质环境互馈作用机制与安全控制技术；课题 6 大型地下洞室群与地质环境互馈作用机制与安全控制技术。6 个课题与关键科学问题以及相互之间的逻辑关系如图 1 所示。

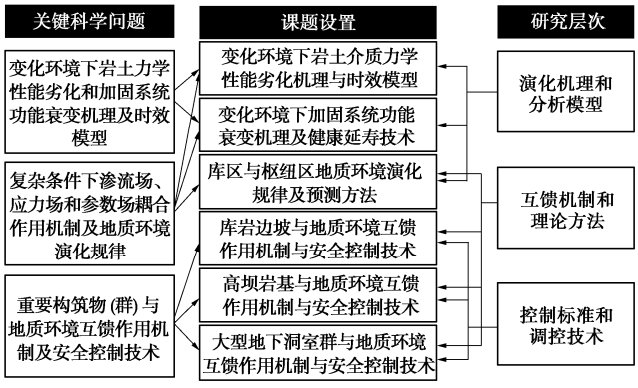


图 1　课题与科学问题及课题之间的逻辑关系

Fig. 1 Corresponding relationship between research subjects and scientific problems

2　主要创新成果

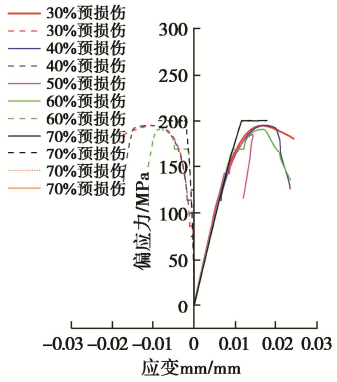
2.1　变化环境下岩体力学性能劣化规律及时效模型

研制了系列专用试验设备，系统开展了岩体性能

劣化机理的水力耦合试验研究，揭示了不同应力、渗压条件下完整岩块、结构面和裂隙岩体工程力学特性演化规律及破坏特征，提出了考虑水岩耦合效应的岩体力学性能劣化模型。

（1）岩石性能劣化规律及时效模型

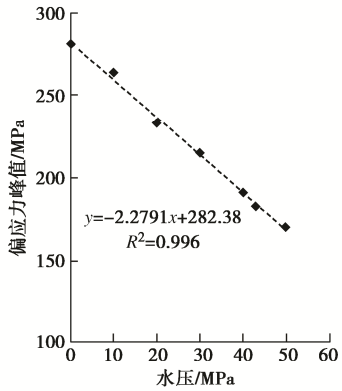
完成了 58 组砂岩和 54 组玄武岩在不同围压、水压、预加载及稳压时间的水力耦合试验，揭示了完整岩石在高渗压水作用下力学性能劣化机理和细观破坏特征（图 2）。



（a）不同初始损伤40 MPa水压砂岩三轴应力 - 应变曲线 (围压80 MPa)



（b）40 MPa水压砂岩典型破坏形态 (围压80 MPa)



（c）不同水压条件下偏应力峰值强度曲线 (围压80 MPa)

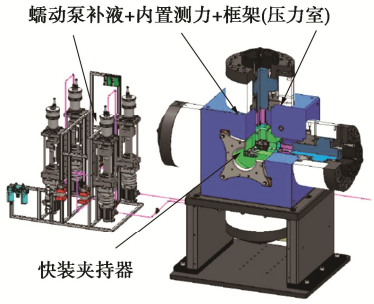
图 2 岩石水岩耦合试验

Fig. 2 Water-rock interaction test of rock samples

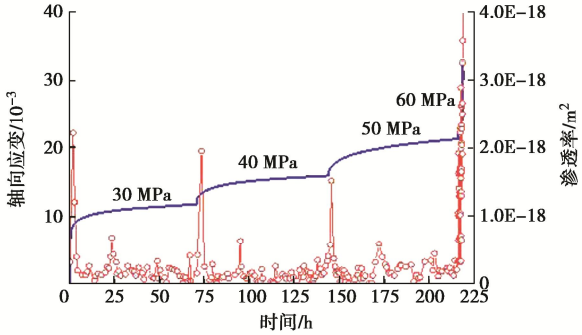
基于试验研究成果并通过理论分析，建立了完整岩块在周期性水−岩循环作用 Weibull 分布损伤时效模型：

$$\sigma_1 = E_N\varepsilon_1 \exp\left\{-\left[\frac{E_N\varepsilon_1[\sigma_1-\tan^2(45+\varphi_N/2)\sigma_3]}{F_0(\sigma_1-2\nu_N)\sigma_3}\right]^m\right\}+2\nu_N\sigma_3 \text{ 。} \quad (1)$$

同时，研制了国际上首台硬岩真三轴流变试验装置[1]，研究了高渗压条件下岩石的三轴流变特性（图 3）。



（a）真三轴流变试验装置



（b）试验结果

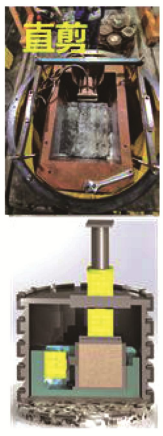
图 3 高渗压条件下岩石三轴蠕变试验

Fig. 3 Triaxial creep test of rock under high water pressure

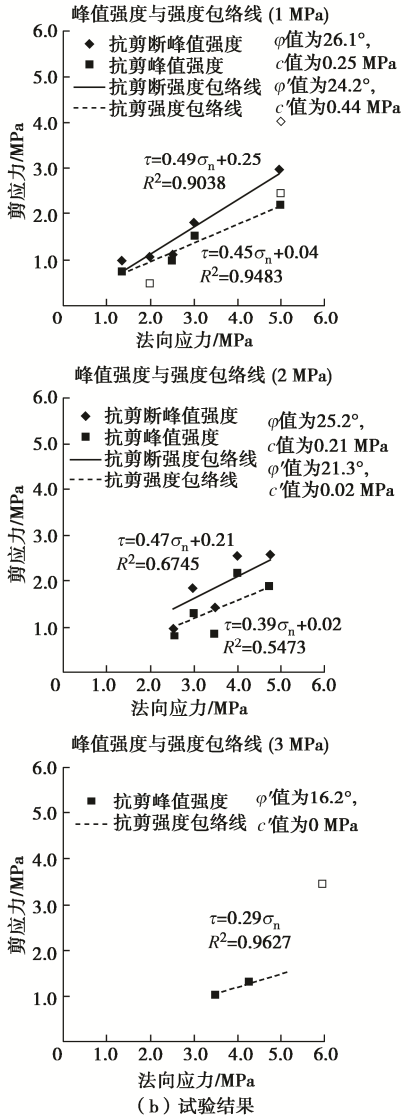
（2）结构面性能劣化及时效模型

在对完整岩块研究的基础上，利用研制的 HMSS-300 型结构面水力耦合剪切试验系统[2]（图 4（a）），在溪洛渡水电站进行了现场大型结构面水力耦合直剪试验，研究了不同条件下结构面性能劣化特征。结构面水力耦合直剪试验试样尺寸为 500 mm×500 mm×500 mm，试验结果表明随着水压的增加，结构面抗剪强度参数不断降低，φ 值由 24.2° 降至 16.2°，c 值变化较大，随着水压增加而接近于 0，高压水会加速结构面性能劣化[2]（图 3（b））。

设备名称	技术功能	技术指标
结构面水力耦合直剪试验设备	试样尺寸	长×宽×高 500 mm×500 mm×500 mm
	试验荷载	① 铅直向荷载: 1500 kN ② 水平向荷载: 1500 kN
	水压力	① 最大水压力3 MPa
	耐水压变形传感器	① 位移测量范围: ±30 mm ② 测试分辨率: 0.001 mm ③耐水压力: 3 MPa



（a）试验设备



（b）试验结果

图 4 结构面水岩耦合试验

Fig. 4 Water-rock interaction tests on rock discontinuities

图 5 为逐级增加水压结构面剪切位移随时间变化曲线。

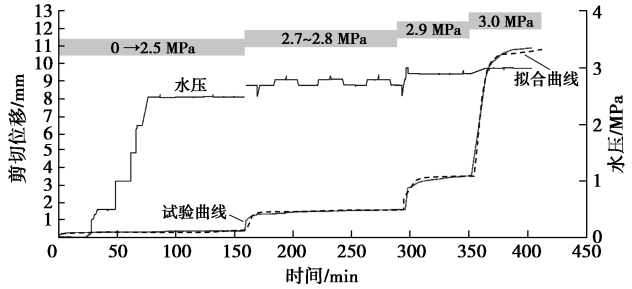


图 5 逐级增加水压结构面剪切位移时间曲线

Fig. 5 Variation of shear displacement with time by increasing the water pressure step by step

根据试验结果，以 Burgers 蠕变模型为基础，考虑孔隙水压力对剪切模量、黏性系数等参数的影响，建立了结构面剪切时效模型：

$$\varepsilon=\frac{\tau}{A-B\ln(p+1)}+\frac{\tau}{C-Dp}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{C+Dp}{\eta_1}t}\right)+\frac{\tau}{\varepsilon\mathrm{e}^{\beta p}}t\text{。}\quad(2)$$

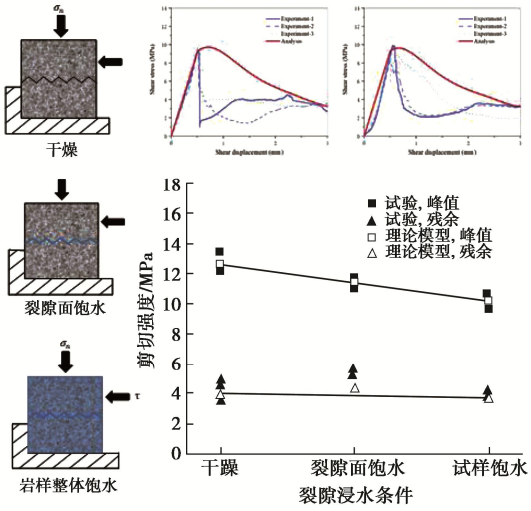
模型计算结果与试验结果吻合较好。

（3）结构面水理化劣化特性

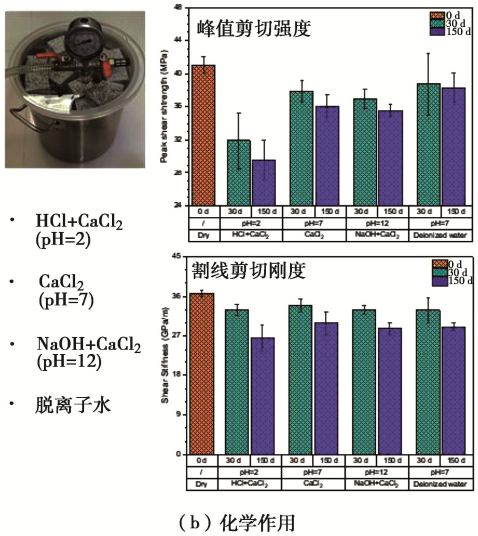
针对目前岩体结构面水理化特性试验相对较少的现状，研发了软弱夹层水理化特征试验装置和方法[3-4]，系统开展了干燥、不同程度饱水条件下岩体结构面水理化的变化规律及其对岩土体性能劣化影响试验研究，试验结果表明水岩物理作用表现为结构面基本摩擦角降低、凸起体强度降低[5-6]；化学作用表现为酸性溶液中矿物溶解为主、碱性溶液中矿物溶解与沉淀竞争性共存[5]；通过临界状态下注水诱发软弱夹层滑移试验提出了结构面临界状态评价指标[5]（图 6）。

（4）裂隙岩体性能劣化机理及时效模型

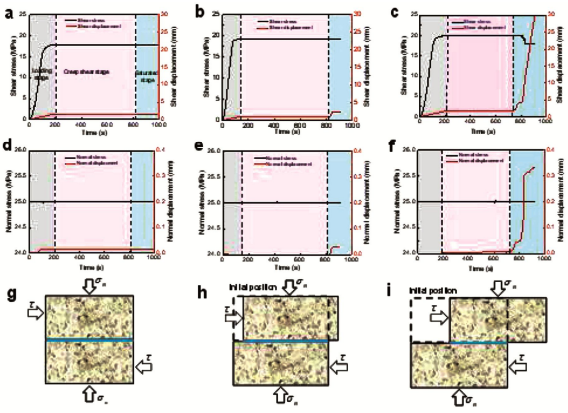
针对裂隙岩体，研制了 HMTS-1200 型裂隙岩体水力耦合真三轴试验系统[2]（图 7（a）），试样尺寸可以达到 300 mm×300 mm×600 mm，应用这一设备在溪洛渡水电站开展了不同围压、水压、预加载及稳压时间的大型水力耦合真三轴试验，揭示了裂隙岩体含水状态、孔隙水压力变化条件下裂隙岩体力学响应和变形特性变化规律[7-8]（图 7（b）、（c））。



（a）物理作用



（b）化学作用



$t_s/\tau_p \geqslant 0.9$ $t_s/\tau_p \geqslant \dfrac{7.62Z_2+0.8}{119.1Z_2-6.2}$

平滑试样 粗糙试样

（c）临界状态下注水诱发裂隙滑移

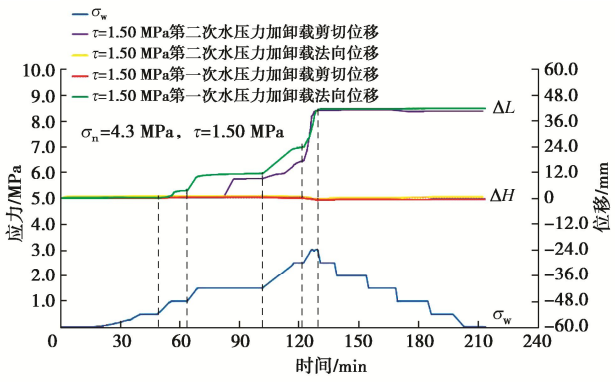
图 6 结构面水理化特性试验装置和结果

Fig. 6 Test devices and results for hydrophysicochemical properties of rock discontinuities

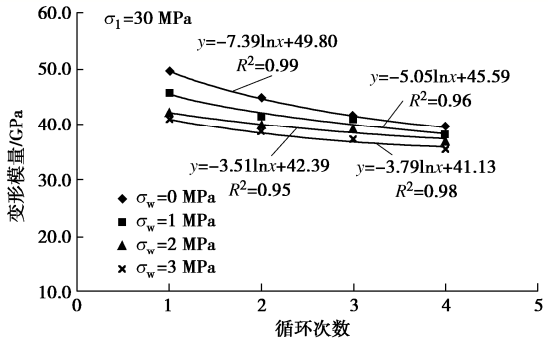


设备名称	技术功能	技术指标
岩体真三轴水力耦合试验设备	试样尺寸	岩体 (长×宽×高) 300×300×600 mm
	试验荷载	① 铅直向荷载: 12000kN ② 水平向荷载: 3000 kN ③ 铅直向刚性加载 ④ 水平向柔性加载 ⑤ 三向独立伺服控制
	水压力	① 最大水压力3 MPa
	耐水压变形传感器	① 位移测量范围: ±5 mm ② 测试分辨率: 0.001 mm ③ 耐水压力: 3 MPa

（a）试验设备



（b）试验荷载－水压力－位移－时间试验曲线



（c）变形模量随水压力循环加卸载次数的变化规律

图 7 裂隙岩体现场水岩耦合试验

Fig. 7 Water-rock interaction tests on joint rock in field

根据试验结果，建立了同时考虑水压力、循环加卸载作用效应的变形模量复合函数模型：

$$E = E_0 - ap_w - b\ln(N) \quad 。 \tag{3}$$

对建立变化水压下的裂隙岩体强度准则和本构关系具有重要借鉴意义。

2.2 预应力锚索腐蚀机理与寿命预测模型及延寿技术

（1）预应力锚索腐蚀机理

a）现场开挖检测及外锚头外观检测评价分类标准

通过丰满水电站老坝拆除、沙坪二级水电站等 6 个重大工程预应力锚索的原位全长度开挖调查和多学科多方法系统测试[9-11]，揭示了长期运行条件下锚索腐蚀主要发生在外锚头附近、滑面及锚索集中受力等部位的规律（图 8）。结合现场检测和腐蚀外观评价分析，提出了预应力锚索外锚头结构的外观检测评价分类标准（表 1，2），并在西南某水电站高边坡和地下厂房预应力锚索外观检测评价中得到了应用[12]。



（a）丰满水电站老坝拆除 （b）旗山煤矿

（c）沙坪二级水电站 （d）运行10年公路边坡

图 8 锚索现场开挖检测

Fig. 8 Anchor excavation at several projects

表 1 锚头结构暴露分级标准

Table 1 Exposure classification of anchor head

等级	分级标准
A	包裹层完整
B	保护帽外露
C	锚具和垫板有 1 项外露
D	锚具和垫板有 2 项外露

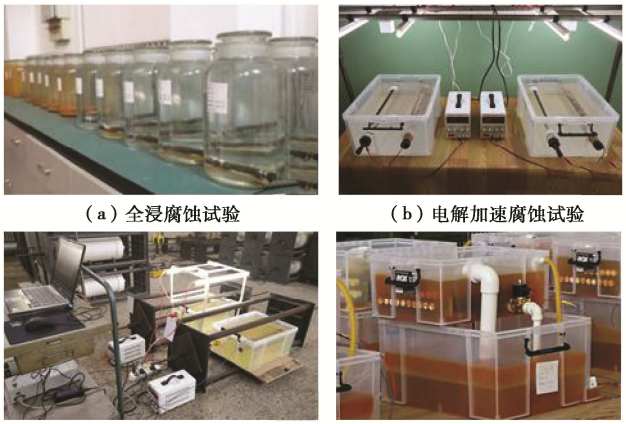
表 2 锚头结构腐蚀分级标准

Table 2 Classification of corrosion degree of anchor head

等级	分级标准
0	没有锈蚀，或锈蚀情况未知
1	轻微锈蚀，锈斑部分覆盖表面
2	明显锈蚀，锈斑全面覆盖表面
3	严重锈蚀，有锈斑，表面因锈蚀不平整
4	严重锈蚀，锈蚀深入基体，呈层状或有剥落现象

b）全浸泡、电解加速和干湿循环条件下锚索腐蚀试验

研制了预应力锚索全浸泡、电解加速和干湿循环条件下的室内拟环境腐蚀试验装置（图 9），系统开展了锚索在不同环境下的近 2000 余组的腐蚀试验[13-14]。



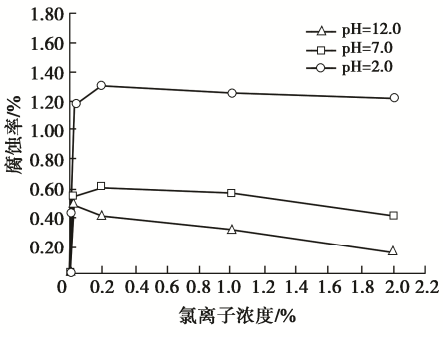
（a）全浸腐蚀试验　（b）电解加速腐蚀试验

（c）预应力条件电解加速腐蚀试验　（d）干湿循环腐蚀试验

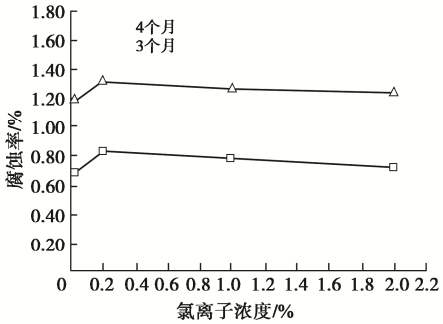
图 9 室内拟环境加速腐蚀试验装置

Fig. 9 Simulated environment accelerated corrosion test devices in laboratory

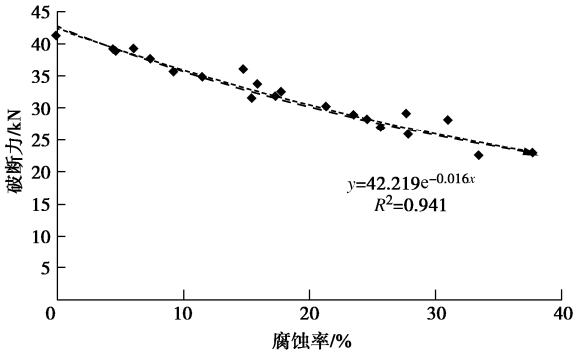
基于不同介质全浸泡腐蚀试验，获得不同离子类型和离子浓度下锚索腐蚀规律（图 10（a），（b））。为解决浸泡腐蚀试验时间过长的问题，进一步采用电解加速腐蚀试验，基于法拉第定律建立了不同腐蚀环境、应力水平下的腐蚀时间与锚索腐蚀量之间的对应关系，获得腐蚀全过程曲线，为预应力锚索功能衰变研究提供了基础（图 10（c））。通过与预应力锚索现场腐蚀过程更相近的干湿循环腐蚀试验，研究了不同 Cl^{-1} 浓度、干湿比（5∶1）以及循环周期条件下的钢绞线腐蚀规律，试验结果表明：①锚索腐蚀率随着氯盐浓度的增加，其敏感性逐步下降，且存在上限值。从目前的试验结果来看，该浓度上限值应≤1%。②随着腐蚀率的增大，锚索性能会明显衰减。③干湿循环是实际工程中导致锚索腐蚀主要因素之一，随着循环次数的增多，或者说随着运行时间的增长，腐蚀量会显著增加。



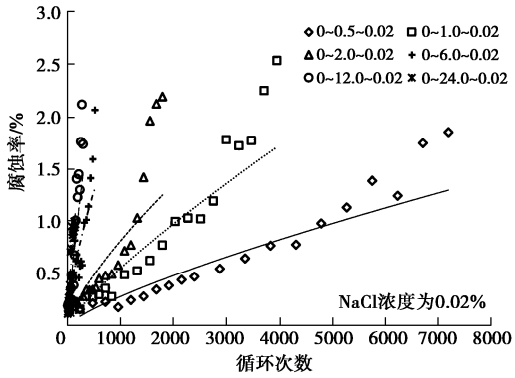
（a）全浸腐蚀试验pH值影响



（b）全浸腐蚀试验腐蚀时间影响



（c）腐蚀条件下破断力衰减规律



（d）干湿循环腐蚀试验结果

图 10 锚索加速腐蚀试验结果

Fig. 10 Accelerated corrosion test results for anchor samples

（2）预应力锚索寿命预测模型

在试验成果的基础上，结合现场环境因素，建立了以锚索服役年限、年腐蚀率、等效氯离子含量、干湿循环周期、锚索预应力、杂散电流为变量的锚索寿命预测模型：

$$t_{\text{service}} = \frac{w_{\text{a}}}{w_{\text{t}}(\omega_{\text{Cl}}, T_{\text{p}}, \sigma_{\text{s}}, \cdots, A_{\text{st}})} \quad 。 \tag{4}$$

式中　t_{service} 为服役年限；w_{a} 为允许腐蚀率；w_{t} 为年腐蚀率；ω_{Cl} 为氯离子含量；T_{p} 为干湿循环周期；σ_{s} 为应力；A_{st} 为杂散电流。

寿命预测模型中年腐蚀率是基于赋存环境氯离子浓度和干湿循环周期，根据干湿循环试验结果确定；允许腐蚀率则根据锚索实际功能要求结合试验获得的锚索性能随腐蚀率增大而衰减的关系确定。采用寿命预测模型对台湾北部 3 号高速路七堵段滑坡中锚索腐

蚀进行了计算（表 3），结果表明模型具有较高的准确性。

表 3 预应力锚索寿命预测模型计算结果

Table 3 Calculated results by life prediction model for prestressed anchor

实际调研情况和计算结果	失效年限/a
边坡加固工程的锚索失效年限	12.0
模型计算结果	12.0（L=8 m） 11.3（L=24 m）

（3）新型预应力锚索结构与健康延寿关键技术

针对预应力锚索寿命达不到同等工程等级设计寿命的问题，开展了薄弱部位强化防护、超限应力动态调控、全程变形实时监测关键技术研究，形成了从结构措施、专用设施到监测技术的预应力锚索成套体系，有效解决了“如何有效延长服役年限”的关键技术难题。

a）薄弱部位强化防护结构

现场调研结果表明预应力锚索腐蚀和破坏最严重的位置位于内外锚头等防护薄弱、应力集中的区域。根据这种特点，研制了内外锚头防腐结构（图 11）、楔形压胀式内锚头等薄弱部位强化防护结构措施，能有效提高内外锚头防腐能力、改善内锚头应力状态、延长薄弱部位使用寿命，实现预应力锚索的健康延寿。

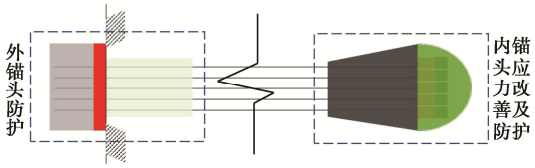


图 11 内外锚头防腐结构

Fig. 11 Corrosion preventation structures for inner and outer anchor heads

研发的压胀式楔形内锚头能使内锚固段受力状态由压剪转化为压胀应力状态，充分发挥砂浆、围岩抗压强度远远大于抗剪强度的材料特性，极大改善了内锚固段的应力状态，在增强防腐能力的同时，提高了抗拔力（图 12）。采用专门研制的室内抗拔试验设备，在单根钢绞线条件下，这一新型的内锚头的抗拔力为 256 kN，较压缩型内锚头（174 kN）和压缩摩擦型内锚头（153 kN），抗拔力分别提高了 47%和 67%[15]。

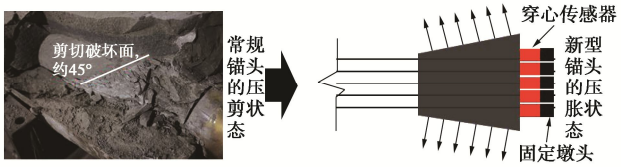
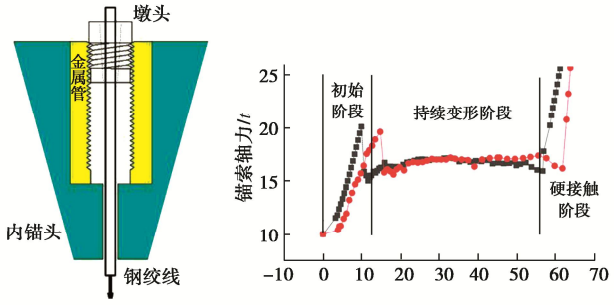


图 12 压胀式楔形内锚头结构及受力特征

Fig. 12 Structure and mechanical characteristics of wedge anchor head

b）超限应力动态调控专用装置

针对锚索预应力超出应力腐蚀门槛值时会导致腐蚀加速的问题，并保证锚索长期运行过程中不出现超限应力，研发了安置于内锚头内的超限荷载变形调整专用装置，通过调整锚索内锚头附近应力过大部位的变形避免锚索出现超限应力，从一定程度上实现预应力锚索的健康延寿（图 13）。



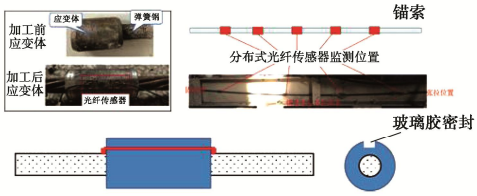
（a）应力调控专用装置　　（b）试验结果

图 13 新型超限荷载变形调整预应力锚索内锚头

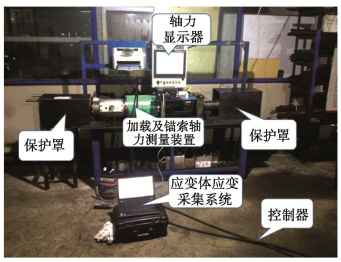
Fig. 13 New type of anchor head for deformation adjustment under excessive load

c）分布式应力变形实时监测及缺陷检测设备

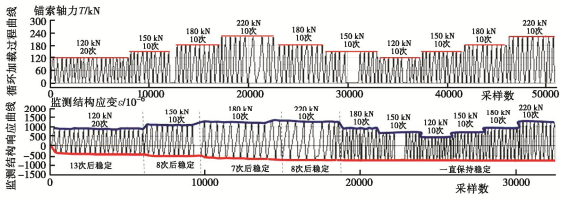
针对锚索内部应力监测的难题，提出了一种基于应变体的新型锚索全程分布式应力监测方法[16]。该监测设备与方法既能保持锚索本身的索体结构特征，又能实现锚索内部应力监测，同时还可以为锚索缺陷检测提供基础条件。室内反复张拉试验结果表明：监测结构与锚索耦合部位强度大于锚索本身强度，锚索轴力超过屈服荷载前能够保持很好的协调一致性；根据反复张拉试验响应曲线建立了监测结构应变与锚索轴力计算公式（图14），利用该装置相邻应变体的异常响应特征，可实时捕捉到锚索存在或产生的缺陷。该装置在阿尔塔什右岸高边坡工程中得到了应用和验证。



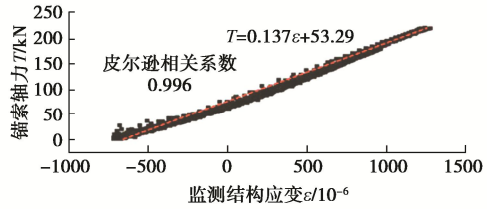
（a）分布式内部应力监测结构示意图



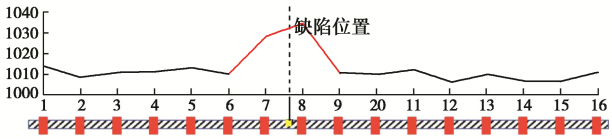
（b）反复张拉试验设备



（c）反复张拉试验响应曲线



（d）实测应变与锚索轴力的关系式



（e）缺陷位置检测示意图

图 14 新型应力监测结构设计及试验验证

Fig. 14 Design and test verification of new stress monitoring structure

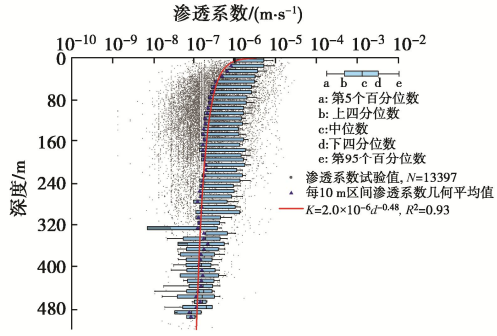
2.3 复杂条件下渗流场、应力场和参数场耦合作用机制及地质环境演化规律

采用室内物理试验、典型工程资料分析、大型有限元建模等研究手段，研究了水库蓄水、水位交变、高强度泄洪雨雾及库区气候变化等因素作用下，库区与枢纽区水文地质条件的演化规律，研究成果揭示了峡谷区岩体渗透系数的空间分布与演化规律，提出了枢纽区水文地质环境的演化模式与分析方法，建立了反映复杂地质环境下岩体变形与损伤破坏机制的渗流－应力耦合力学模型，初步构建了考虑三场耦合（渗流、应力、参数）的库区与枢纽区地质环境演化趋势预测方法。

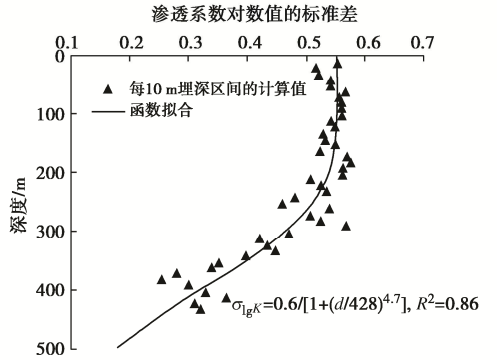
（1）枢纽区水文地质环境的演化特征与分析方法

a）峡谷区岩体渗透系数的空间分布与演化规律

岩体的渗透系数是地质环境和参数场中的重要参数之一，受岩性、构造等因素的影响，具有复杂的空间分布规律和时间演化特征。通过收集西南地区金沙江、雅砻江和大渡河上 12 座大型水利水电工程坝址区 600 m 埋深范围内 614 个钻孔 13397 段压水试验数据，构建了西南深切峡谷区岩体渗透参数数据库，并通过大量的统计分析，揭示了峡谷区岩体渗透性随埋深、岩性、构造和风化卸荷等因素的分布规律[17]（图 15）。该成果不仅为水文地质环境演变规律研究提供了初始参数，而且为工程详勘范围之外区域以及资料匮乏地区提供了基础参数。



（a）岩体渗透系数随埋深的分布规律



（b）岩体渗透系数对数标准差随埋深的分布规律

图 15 西南深切峡谷区岩体渗透系数随埋深分布规律

Fig. 15 Variation of hydraulic conductivity of rock masses with depth in deep-incised valleys, Southwest China

为了研究枢纽区岩体在运行过程中渗透参数的演变规律，依托溪洛渡水电站渗流场监测数据，开展了渗流场逐年动态反馈分析，发现枢纽区岩体渗透系数随时间呈负指数衰减规律，其原因与枢纽区岩体在蓄水运行过程中的水力耦合作用和泥沙（包括悬浮质和胶体沉淀）作用有关[18-19]。该成果揭示了枢纽区岩体渗透性演化的一种重要模式，表明就防渗而言，水文地质演化并非总是朝着不利方向发展（因为岩体渗透性的降低减小了防渗系统的压力），如式（5）和图 16 所示。

$$\frac{K_t}{K_0}=\frac{e^{-\alpha t}+\beta}{1+\beta} \quad 。 \tag{5}$$

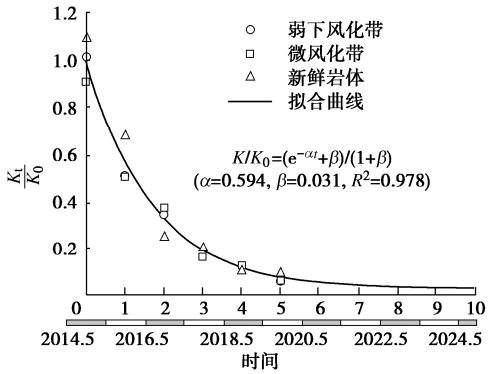


图 16 溪洛渡水电站近坝区玄武岩渗透系数的演化规律

Fig. 16 Variation of hydraulic conductivity for near-bank basaltic rocks at Xiluodu Hydropower Station

b)基于连续介质模型的枢纽区水文地质环境演变分析方法

在高坝工程建设及运行过程中，水文地质环境将发生深刻变化，且影响范围可达几公里到几十公里。本项目发展了一种基于连续介质模型的枢纽区水文地质环境演变分析方法：

$$\left.\begin{aligned}&(c_{\mathrm{w}},\omega S_{\mathrm{s}})\frac{\partial h}{\partial t}+\nabla\cdot v=0\ ,\\&v=-k_{\mathrm{r}}\boldsymbol{K}\cdot\nabla(h+z)\ ,\\&S_{\mathrm{e}}=\frac{\theta-\theta_{\mathrm{s}}}{\theta_{\mathrm{s}}-\theta_{\mathrm{r}}}=[1+(\alpha|h|)^{n}]^{-m}\ ,\\&K_{\mathrm{r}}=[1-(1-S_{\mathrm{e}}^{1/m})^{m}]^{2+\beta}\ 。\end{aligned}\right\}\tag{6}$$

该方法以水文地质单元为研究对象，从而简化水文地质边界条件的确定；以长期降雨—蒸发循环模拟为前提，由此获得地下水的动态平衡，并作为水文地质初始条件；以地质勘察，现场水位、流量及平洞地下水观测为依据，以反馈分析和数值模拟为手段，确定岩体的非饱和渗流参数，进而模拟水文地质环境的演变规律（如图 17）。

该方法直接应用于白鹤滩水电站坝址区水文地质环境演化特征分析，研究并揭示了白鹤滩水电站坝址区水文地质环境在工程勘察、施工及蓄水运行过程中的演化规律（图 18），为白鹤滩防渗排水设计及防渗排水措施长期安全性评价起到了很好的支撑作用。

（2）库区与枢纽区地质环境演化趋势预测方法

a）考虑孔隙水压力的损伤和蠕变的耦合模型

为了实现渗流场、参数场、应力场三场耦合，建立库区和枢纽区地质环境演化趋势预测方法，首先考

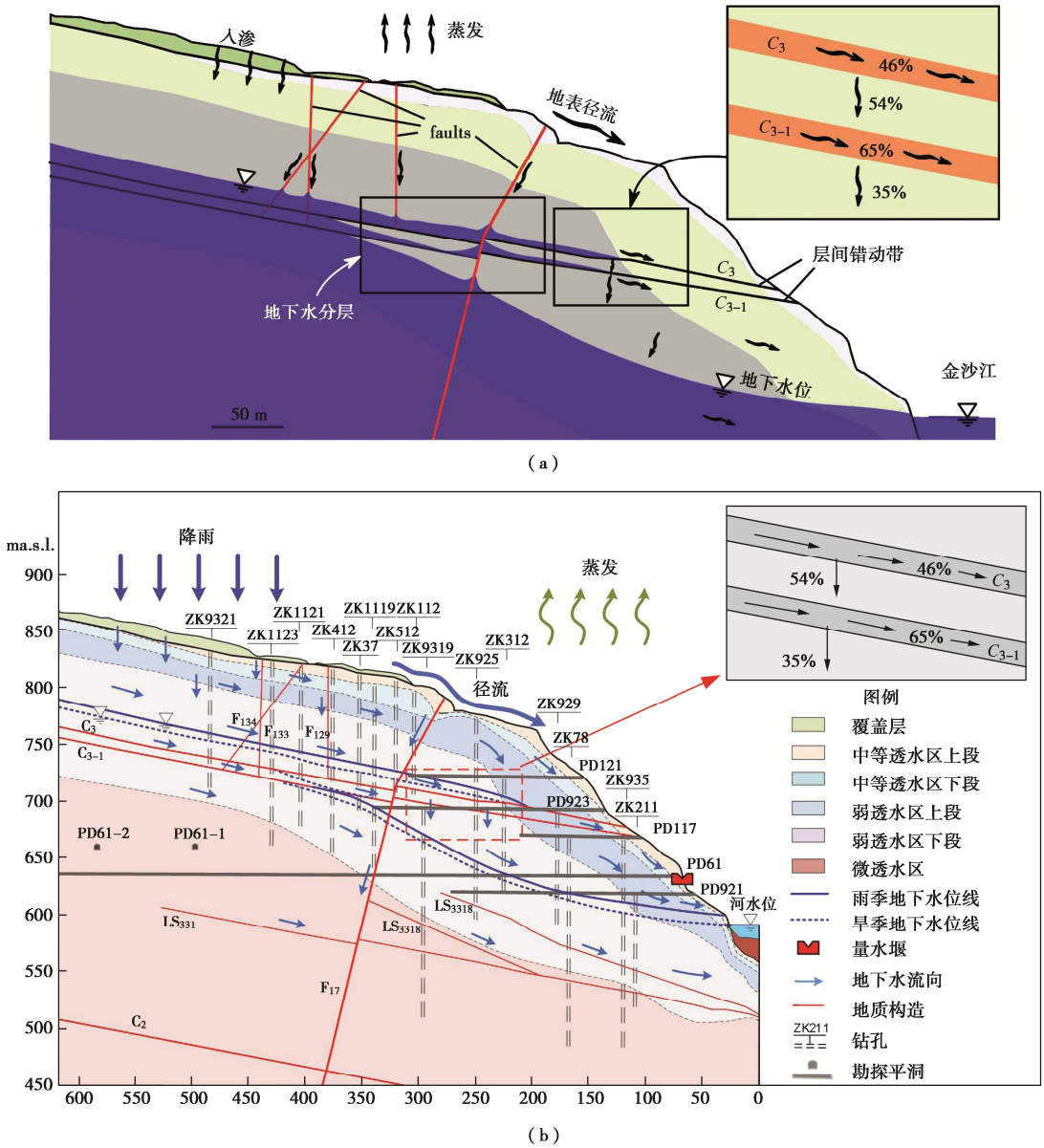


图 17 地下水分层现象与脉状地下水运动特征

Fig. 17 Multiple water tables and groundwater flow behavior along backbone structures

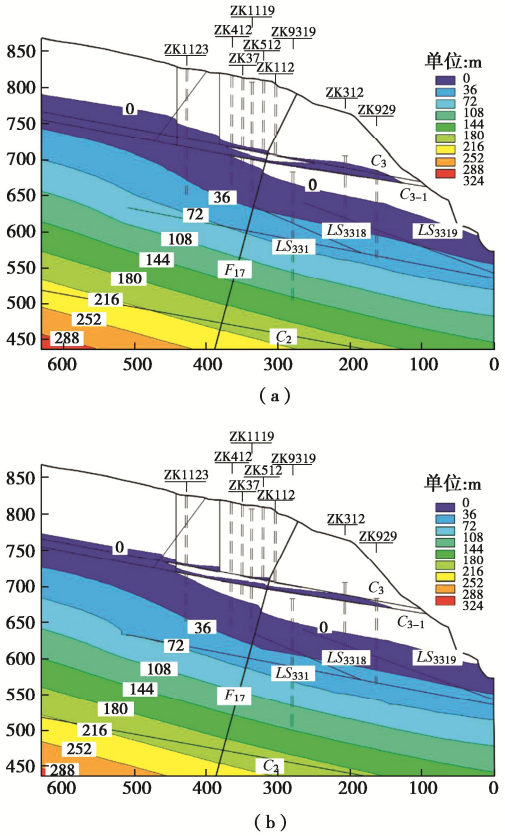


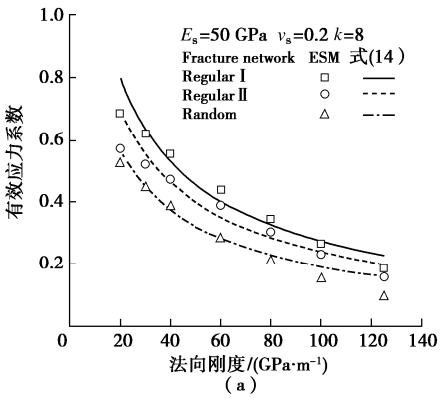
图 18　白鹤滩水电站坝址区水文地质环境演化特征

Fig. 18 Variation of hydrogeological environment at the site of Baihetan Hydropower Station

虑水文地质环境演化后，岩体中孔隙水压力变化对岩体变形破坏的影响，建立了考虑水岩耦合作用的力学分析模型。该模型基于经典的 Terzaghi 或 Biot 有效应力原理，结合离散裂隙网络模型和离散元方法，提出了裂隙岩体有效应力系数的计算方法：

$$\alpha=\frac{S}{1-\dfrac{d}{k}}\cdot\lg\left(1+\frac{E_s}{w\cdot jkn}\right)\cdot e^{V_s}\quad 。\qquad (7)$$

通过大量数值模拟试验，揭示了有效应力系数与岩体结构特征、节理力学指标以及岩石变形参数之间的相关规律，提出了预测饱和裂隙岩体有效应力系数的经验模型（图 19）。



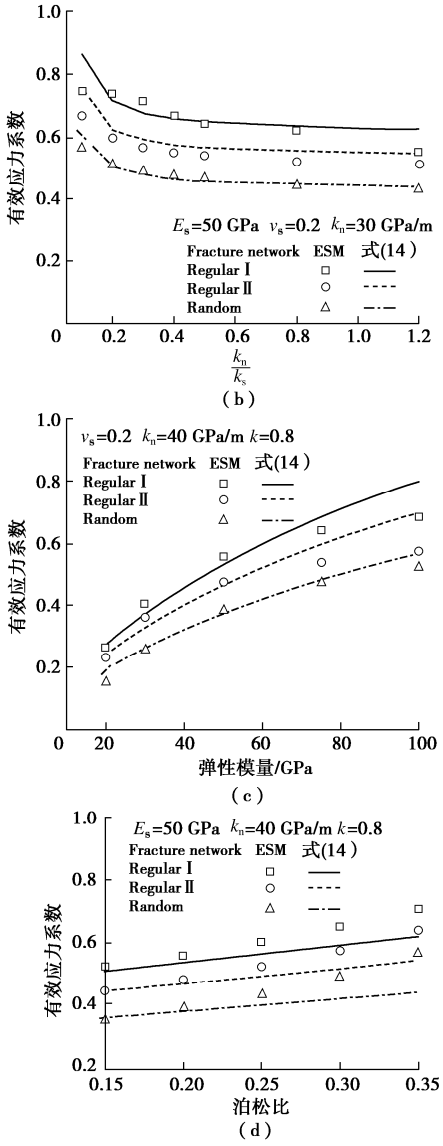


图 19　预测饱和裂隙岩体有效应力系数的经验模型

Fig. 19 Empirical model for predicting effective stress coefficient of saturated fractured rock mass

b）岩体损伤变形破坏过程的渗流应力耦合损伤力学模型

同时在热力学框架下，基于细观力学损伤时效演化方程，建立了高渗压下渗流－应力－损伤－流变耦合力学模型，并进行了验证，如图 20 所示[20]。

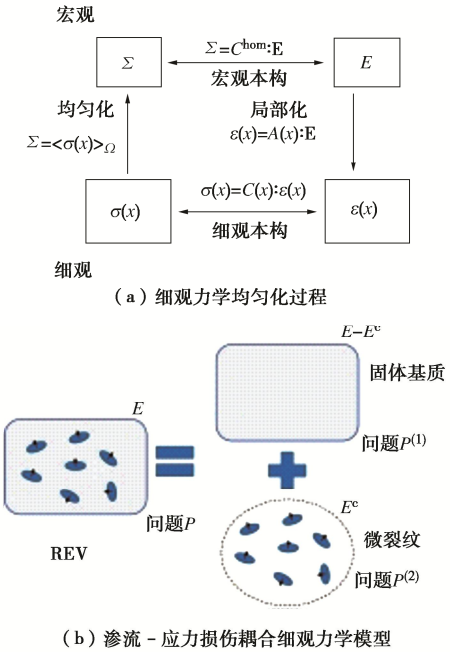
c）岩体渗流－应力－参数耦合数值模拟方法

发展了以参数场为纽带的岩体水力耦合模型，构建了岩体渗流－应力－参数多场耦合数值模拟方法，为渗流－应力－参数耦合分析以及参数场反馈分析提供了模拟平台（图 21）。

（3）基于多源监测信息的参数场反馈分析技术及工程应用

根据水利水电工程特点，发展了基于多源监测信息的多目标动态反馈分析方法。该方法充分利用渗压、

流量、变形、应力等物理量的监测时间序列数据，改善了反演结果的可靠性；将正交设计、耦合分析、神经网络、遗传算法有机结合，极大减小了反馈分析的计算量，确保了反馈分析的可操作性；并通过采用分阶段递进反馈分析策略，可反映参数随时间的演化规律。以本项目的依托工程溪洛渡水电站为例，进行了枢纽区三维渗流场动态反馈分析研究，成果揭示了枢纽区岩体渗透特性的演化规律及枢纽区整体和局部渗流场的动态特征，表明溪洛渡水电站防渗排水系统设计方案和运行性能良好，渗透压力和渗漏量得到有效控制，如图 22 所示。



（a）细观力学均匀化过程

（b）渗流－应力损伤耦合细观力学模型

图 20 渗流－应力耦合损伤力学模型

Fig. 20 Micromechanical damage model for hydro-mechanical coupling

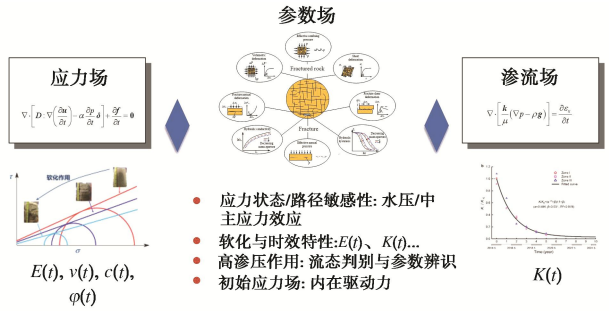


图 21 岩体渗流－应力－参数耦合数值模拟方法框图

Fig. 21 Diagram of seepage-stress-parameter coupled numerical simulation method for rock mass

2.4 重要构筑物（群）与地质环境互馈作用机制及安全控制技术

基于第 2.3 节提出的渗流场、应力场和参数场耦合作用机制及地质环境演化规律，本项目应用物理和数值模型试验深入研究了变化地质环境下大型水利水电工程边坡、高坝岩基和大型地下洞室群与地质环境互馈作用机制，提出了工程边坡、高坝岩基和大型地下洞室群安全控制技术。

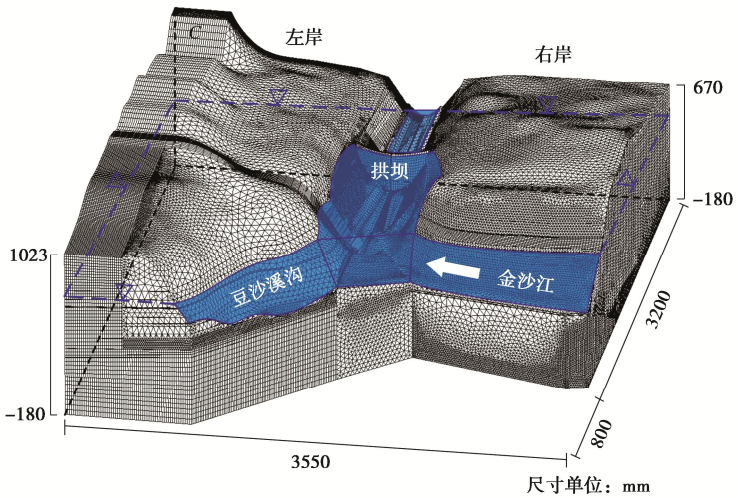
（1）工程边坡与地质环境互馈作用机制及安全控制技术

a）库岸边坡渗流应力耦合损伤力学模型

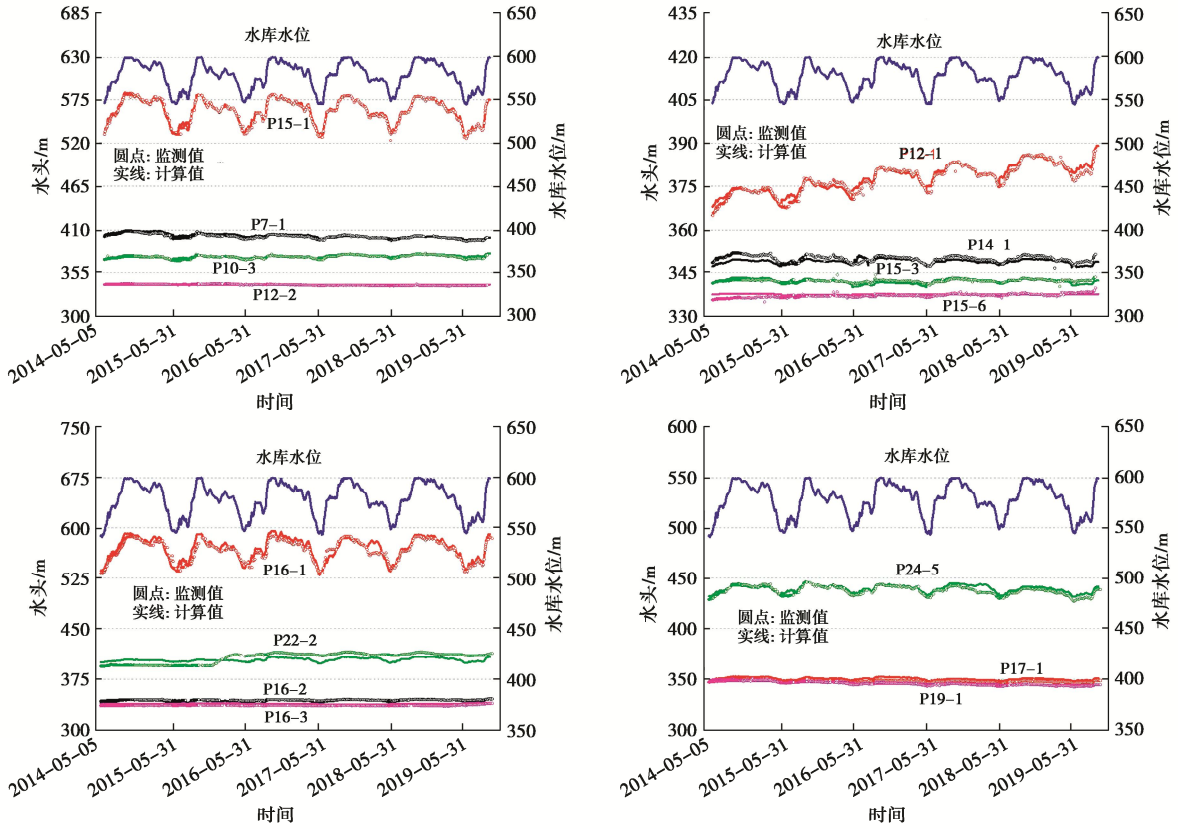
围绕库岸边坡与地质环境互馈作用机制问题，基于细观力学均匀化理论提出了反映复杂地质环境下库岸边坡岩体损伤变形破坏过程的渗流应力耦合损伤力学模型[21]，并进行了验证（图 23）。

b）库岸边坡与地质环境互馈作用多尺度数值模拟方法

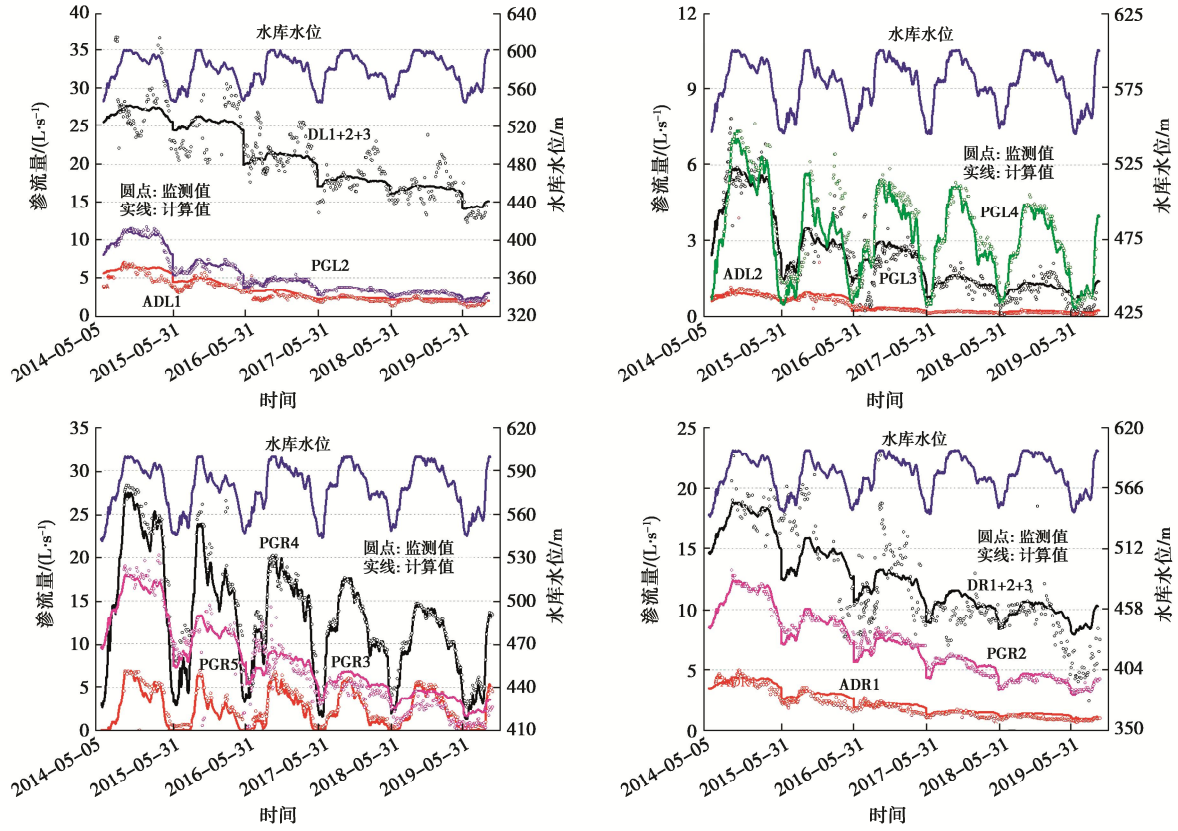
基于数值均匀化理论和内聚力单元分析原理，提出了库岸边坡与地质环境互馈作用多尺度数值模拟方法，在严格数学力学框架下实现了库岸边坡岩体从细观尺度到岩土工程尺度之间的转换，开发了相应的多



（a）溪洛渡水电站枢纽区模型和三维渗流场动态反馈分析



（b）渗压过程曲线对比



（c）流量过程曲线对比

图 22　溪洛渡水电站三维渗流场动态反馈分析

Fig. 22 Dynamic feedback analysis of 3D seepage field of Xiluodu Hydropower Station

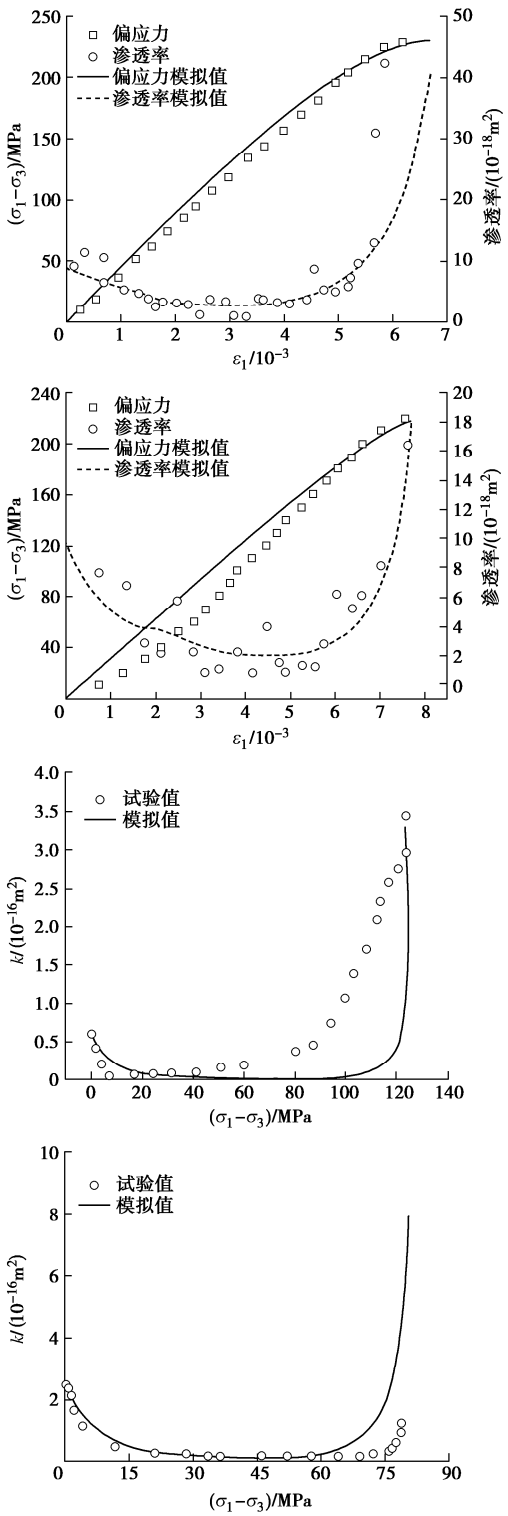


图 23 库岸边坡渗流应力耦合损伤力学模型

Fig. 23 Micromechanical damage model for hydro-mechanical coupling of reservoir bank

尺度仿真系统[22]（如图 24 所示）。为了验证所开发仿真系统的正确性，对比了采用岩土分析程序 FLAC^{3D} 的模拟结果，如图 25 所示。采用 FLAC^{3D} 结合现场原位参数计算得到的安全系数为 1.61，采用多尺度强度折减法结合室内参数标定的结果为 1.58。

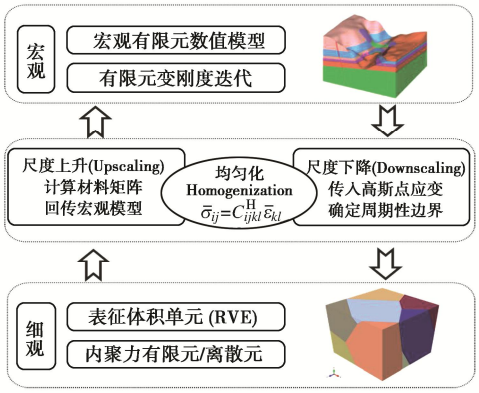


图 24 多尺度分析计算流程

Fig. 24 Flow chart of multiscale analysis

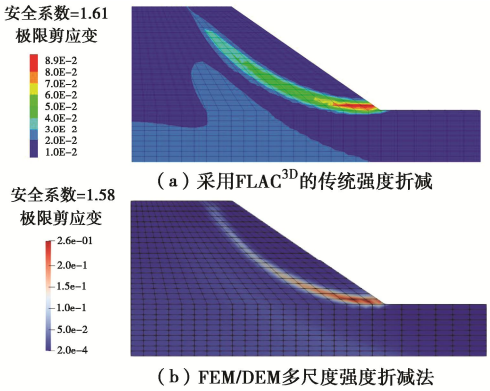


图 25 基于多尺度和传统强度折减方法结果对比

Fig. 25 Comparison of results by multi-scale and traditional strength reduction methods

c）坝肩边坡变形机制

基于溪洛渡坝肩边坡变形观测资料和序列数据，并结合数值分析，分别从影响因素[23]、变形预测[24]和成因机理[25]（图 26）研究了水库蓄水调度、水位交变环境下枢纽工程库岸边坡变形问题，揭示了溪洛渡坝肩边坡变形的形成机理。溪洛渡工程坝肩边坡变形主要受控于玄武岩层间错动带等地质结构和水文地质结构、水库蓄水渗流场再造引起的水动力条件作用、水库水库运行导致的库水位变化等。两岸坝肩变形引起的谷幅变形会直接影响工程安全。

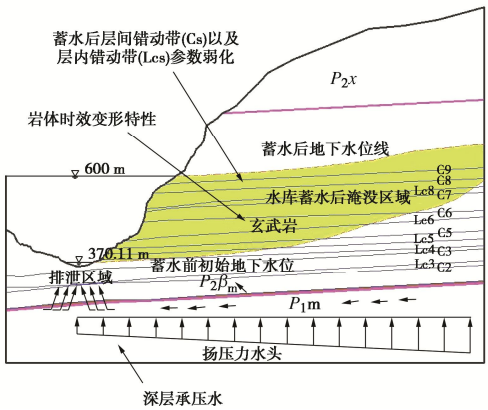


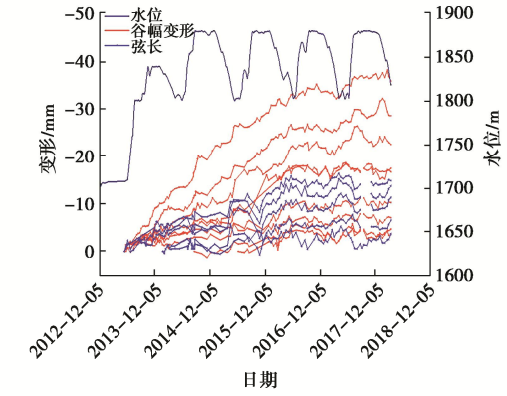
图 26 溪洛渡坝肩边坡变形机理分析

Fig. 26 Analysis of deformation mechanism of valley amplitude of Xiluodu

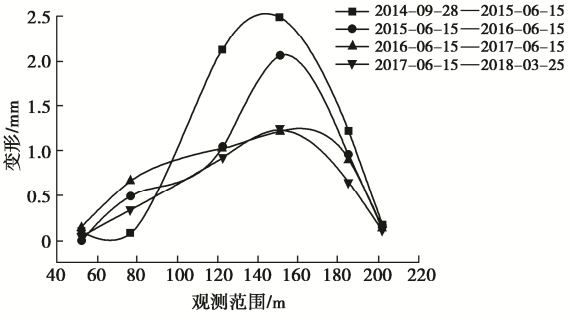
（2）高坝岩基与地质环境互馈作用机制与安全控制技术

a）高拱坝坝基的变形模式

针对高拱坝工程蓄水后两岸坝肩边坡变形导致的谷幅变形问题，收集和深入分析了锦屏一级水电站和溪洛渡水电站谷幅变形实际监测资料，提出了两个完全不同的谷幅变形模式[26-27]。锦屏一级谷幅变形表现为岸坡变形模式（图 27），具有上游谷幅变形值显著大于下游谷幅，坡体内部岩体变形表现为拉伸的特点，最大变形值近 40 mm；溪洛渡水电站谷幅变形表现为大范围平动的整体变形模式，具有上下游谷幅变形相差不大，坡体内部岩体相对变形很小或表现为压缩的特点，最大变形值近 100 mm（图 28）。两个工程的谷幅变形都表现出典型的不可逆塑性变形特点，是坝肩边坡中结构面错动变形的宏观体现。



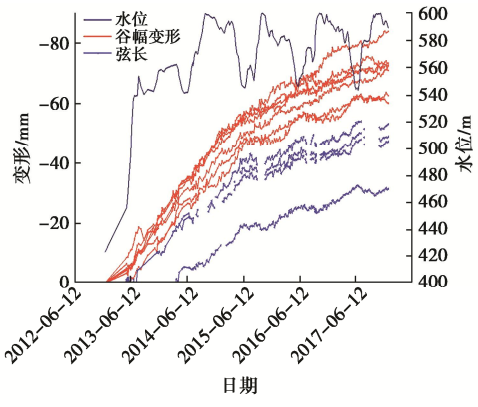
（a）谷幅与弦长变形



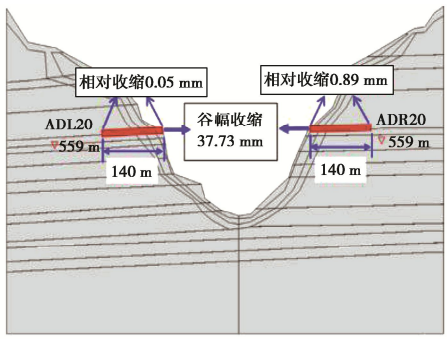
（b）左岩边坡深部变形

图 27　锦屏一级坝基变形

Fig. 27 Deformations of dam foundation of Jinping No.1



（a）谷幅与弦长变形



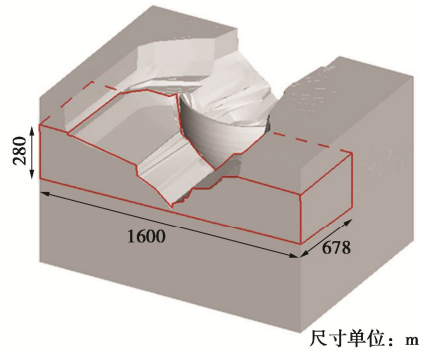
（b）排水洞内变形

图 28　溪洛渡坝基变形

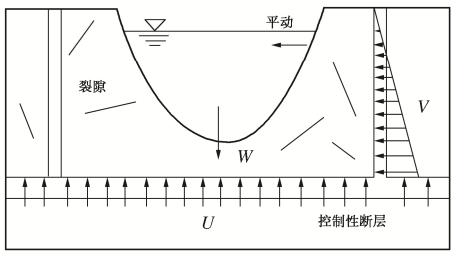
Fig. 28 Deformations of dam foundation of Xiluodu

b）坝基变形模式与坝体互馈作用机制

为深入研究地质环境演化所引起的较大谷幅变形对拱坝安全的影响，以白鹤滩拱坝工程为例，采用孔隙塑性和岩体材料弱化（岸坡变形模式）以及边界施加位移（整体变形模式）两种方法（图 29）研究了坝基变形对大坝受力形态和破坏的影响[27]。可以看到：基于孔隙塑性和材料弱化法会使坝体产生新的应力集中区；而基于边界施加位移的变形模式对大坝的影响并不显著（图 30）。



（a）孔隙塑性和岩体材料弱化



（b）边界施加位移

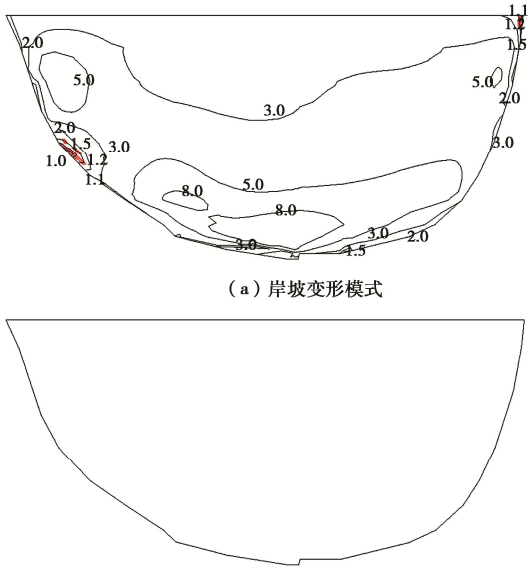
图 29　两种变形模式的模拟方法

Fig. 29 Simulation methods for two deformation modes

c）坝体变形破坏演化规律和安全控制指标

基于地质力学模型试验、声发射技术以及非线性数值仿真对多个高拱坝模型试验的破坏演化过程进行了对比研究，提出了坝体破坏演化过程的分析方法，并建立了数值不平衡力和拱坝开裂破坏之间的关系[28-30]（图 31）。结果表明：①坝趾是超载过程中下游最先破坏的

区域；②当超载倍数达到 K_2 时，结构出现非线性变形，拱坝－基础系统整体进入非线性状态，之后继续加载，拱坝开始了加速破坏，裂缝迅速扩展；③非线性安全度 K_2 可作为拱坝演化过程中的控制性指标；④设置贴角、锚固坝趾等措施可以有效提高 K_2。

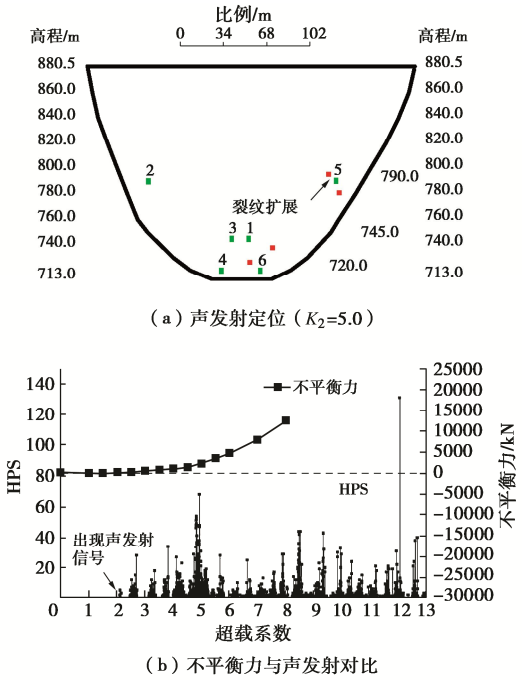


（a）岸坡变形模式

（b）整体变形模式

图 30 白鹤滩拱坝上游坝面屈服区图

Fig. 30 Yield zone map of upstream of Baihetan Arch Dam



（a）声发射定位（K_2=5.0）

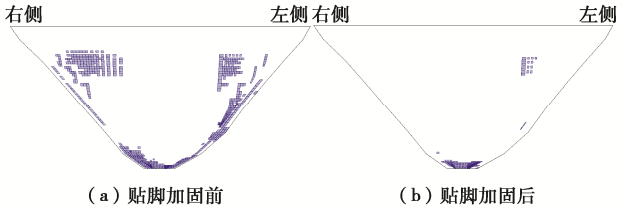
（b）不平衡力与声发射对比

图 31 不平衡力与声发射和拱坝开裂破坏的关系

Fig. 31 Relationship among unbalanced force, acoustic emission and cracking failure of arch dam

d）适应坝基变形的安全控制技术

高拱坝实践中，下游坝趾区设置贴角、锚固坝趾等措施可以有效提高 K_2。孟底沟拱坝除坝趾底部外，下游两岸所有高程均增设了加固体。对比贴脚加固前后下游坝面的屈服区扩展情况，以超载 3.0 倍时的屈服区分布为例（图 32），贴脚加固后，孟底沟拱坝下游坝面屈服区减小明显，右岸高高程屈服区完全消失，左岸仅剩小范围屈服，底部屈服区域收缩明显。由此说明，坝趾贴脚加固可以一定程度抑制坝体屈服区的发展，改善了拱坝的受力状态。白鹤滩拱坝也设置了扩大基础等加固处理措施，以超载 30 倍边界位移时的下游坝面屈服区分布为例（图 33），与有加固方案相比，无加固方案屈服区有所增加，扩大基础等加固处理措施对应对谷幅变形起到一定有利的作用。

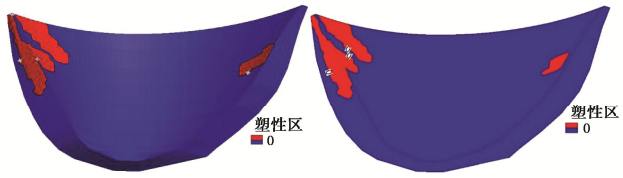


（a）贴脚加固前

（b）贴脚加固后

图 32 孟底沟拱坝下游坝面屈服区图

Fig. 32 Yield zone map of downstream of Mengdigou Arch Dam



（a）无加固措施

（b）有加固措施

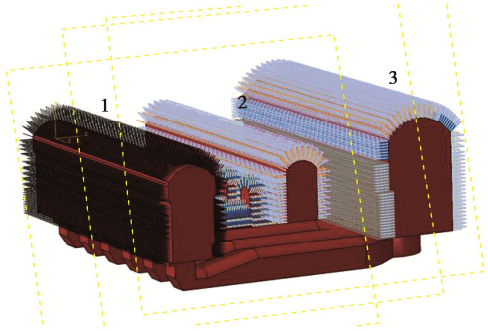
图 33 白鹤滩拱坝下游坝面屈服区图

Fig. 33 Yield zone map of downstream of Baihetan Arch Dam

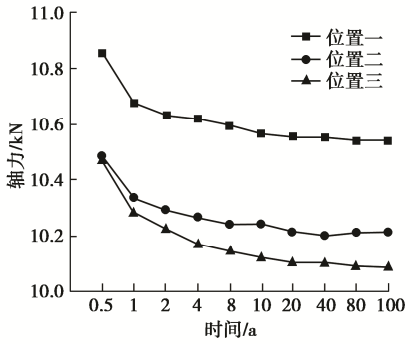
（3）大型地下洞室群与地质环境互馈作用机制及安全控制技术

a）大型地下厂房与地质环境互馈作用机制

针对水电工程大型地下洞室群长期安全问题，应用数值模拟，研究了岩体时效特性对锚杆受力的影响，揭示了运行期岩体时效特性与加固系统受力的演化规律（如图 34），为地下洞室群锚杆系统长期加固效果评估提供了借鉴和参考。



（a）锚杆加固系统



（b）锚杆受力随时间变化关系

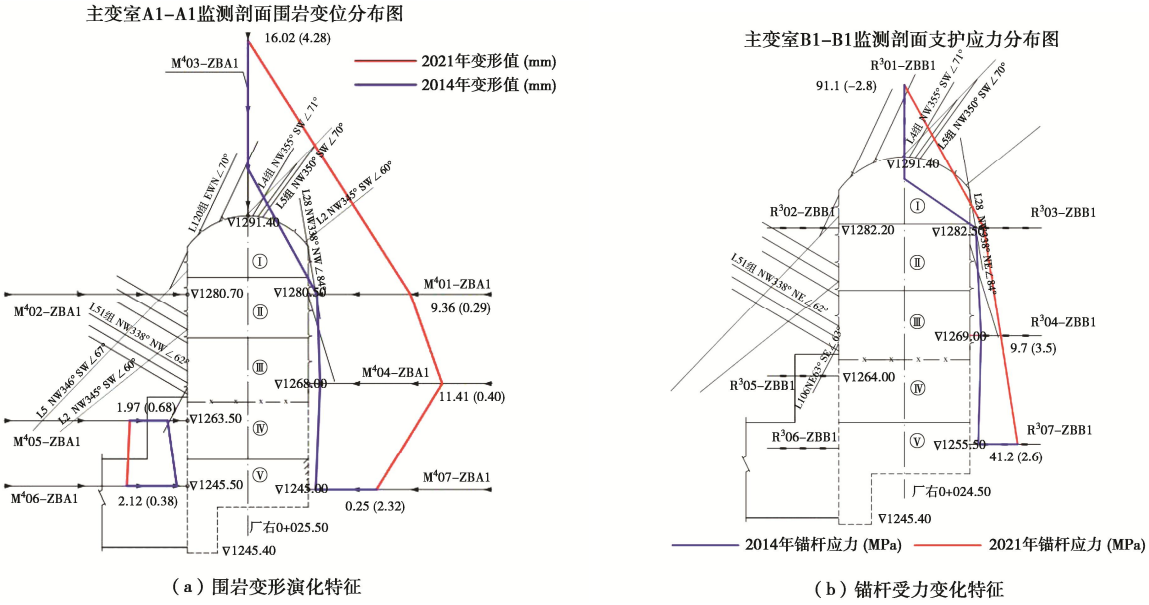
图 34 地下洞室群锚杆受力随时间的变化过程

Fig. 34 Variation of bolt stress with time in underground caverns

另外，依托某水电站运行了近 10 年的监测资料，分析了水库蓄水后由于地质环境演化引起的地下洞室群变形演化特征及加固系统受力变化规律（如图 35），厘清了大型地下洞室群与地质环境互馈作用机制。

b）引水隧洞衬砌与围岩水力耦合作用机理

基于孔隙－裂隙双重介质应力渗流耦合理论，应用数值手段分析了高压引水隧洞衬砌内外侧水压力渗透演化规律及衬砌与围岩接触状态的演化特征，揭示了高水头作用下引水隧洞衬砌与围岩水力耦合作用机理（如图 36）。



（a）围岩变形演化特征　　（b）锚杆受力变化特征

图 35 地下洞室群围岩变形与锚杆受力变化规律

Fig. 35 Variation of bolt stress and rock deformation in underground caverns

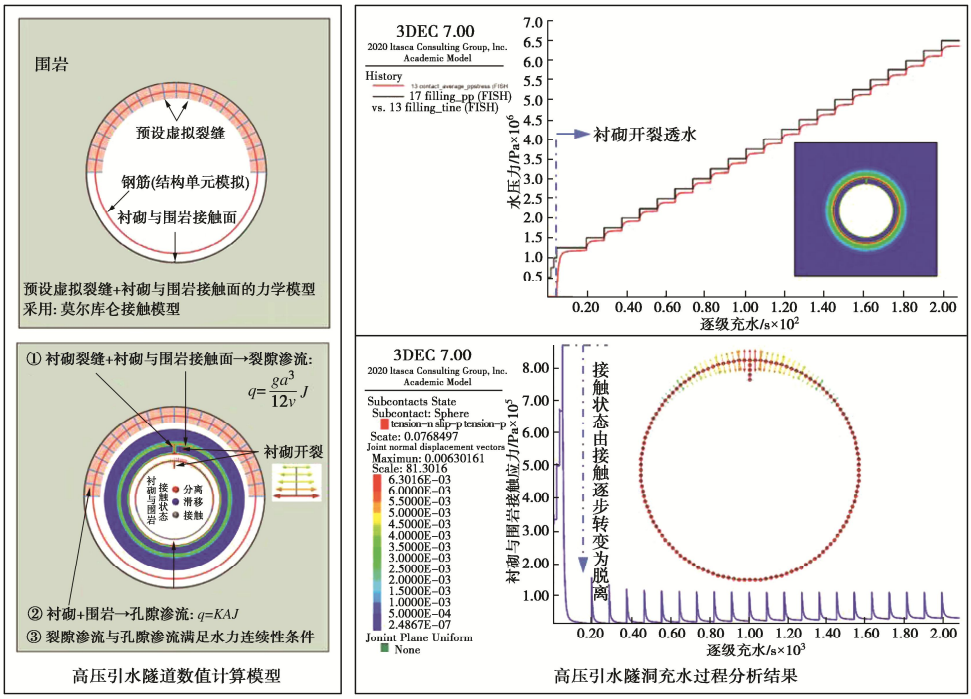


图 36 高压引水隧洞工程实际运行工作性状模拟分析

Fig. 36 Simulation analysis of actual operation and working characteristics of high-pressure diversion tunnel

c）应对高内外水压力的自适应衬砌调控技术

针对引水隧洞运行期高内外水压力问题，提出了一种能够自动适应内外水压力平衡的新型衬砌结构型式（图 37），并自主研制了高内外水压力下水工模型试验平台（图 38），通过试验验证了该衬砌的有效性和可靠性[31-32]，为解决高内外水压力下衬砌结构安全设计难题提供了一种有效的调控技术。

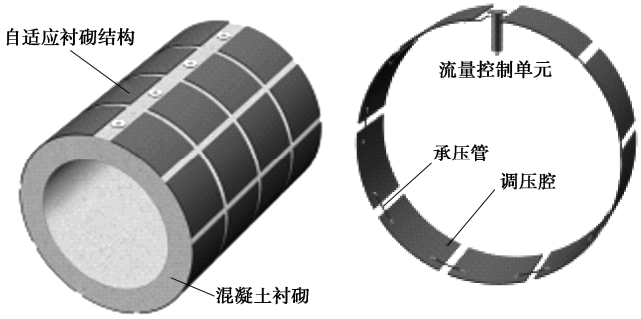


图 37 高内外水作用下自适应衬砌结构图

Fig. 37 Diagram of an adaptive lining structure under high internal and external water pressures

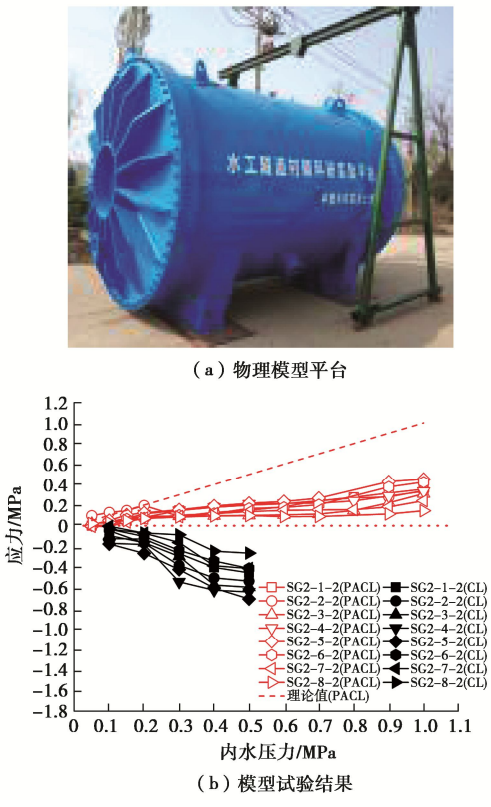


图 38 高内外水自适应衬砌模型试验

Fig. 38 Model tests on adaptive lining structure under high internal and external water pressures

3 结 论

经过项目组近三年半的努力，“十三五”重点研发计划项目“枢纽工程重要构筑物（群）与地质环境互馈作用机制与控制技术”顺利完成了任务书规定的各项任务，并取得以下创新成果。

（1）揭示了变化环境下岩土介质性能劣化和加固系统功能衰变的物理力学机理，建立反映这种机理和变化规律的时效分析模型，为地质环境演化预测和构筑物性状动态评价提供理论依据。

（2）提出了复杂运行条件下库区和枢纽区地质环境演化发展的动力条件；建立了综合反映渗流场、应力场和参数场耦合作用效应的数学力学模型，形成了库区和枢纽区地质环境变化趋势预测的理论方法。

（3）深化了对枢纽区不同构筑物与地质环境互馈作用机制的认识，建立了基于地质环境演化的构筑物工作性状的动态分析评价方法，提炼总结了重要构筑物变形形态、破坏模式长期演化发展的共性规律。

（4）形成了与不同构筑物工作特点及其变形破坏演变特征相适应的动态调控技术，研发了改善构筑物工作性态、抑制其破坏范围的工程调控措施及其健康延寿的相关技术、设备和工艺。

研究成果在溪洛渡、白鹤滩等工程中得以应用，取得了显著的经济社会效益，具有良好的推广应用前景。

参考文献：

[1] FENG X T, ZHAO J, ZHANG X W, et al. A novel true triaxial apparatus for studying the time-dependent behaviour of hard rocks under high stress[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, **51**(9): 2653 – 2667.

[2] WU A Q, FAN L, FU X, et al. Design and application of hydro-mechanical coupling test system for simulating rock masses in high dam reservoir operations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, **140**: 104638.

[3] 赵志宏. 岩石裂隙水－岩作用机制与力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(增刊 2): 3063 – 3073. (ZHAO Zhi-hong. Study on water-rock interaction mechanisms and mechanical behaviors of single rock fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(S2): 3063 – 3073. (in Chinese))

[4] DOU Z H, GAO T Y, ZHAO Z H, et al. Effect of immersion duration on shear behavior of granite fractures[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, **54**(9): 4809 – 4823.

[5] DOU Z H, GAO T Y, ZHAO Z H, et al. The role of water lubrication in critical state fault slip[J]. Engineering Geology, 2020, **271**: 105606.

[6] SHANG D L, ZHAO Z H, DOU Z H, et al. Shear behaviors of

granite fractures immersed in chemical solutions[J]. Engineering Geology, 2020, **279**: 105869.

[7] FAN L, YU M W, WU A Q, et al. Study on the deformation characteristics of fractured basalt under coupling of three-dimensional stress and water pressure cycling[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, **861**(2): 022039.

[8] FAN L, YU M W, WU A Q, et al. Developing an in situ, hydromechanical coupling, true triaxial rock compression tester and investigating the deformation patterns of reservoir bank slopes[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2021: qjegh2021-43.

[9] WANG Y J, SUN X S, REN A W. Investigations of rock anchor corrosion and its influence factors by exhumations in four typical field sites[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, **101**: 357–382.

[10] SUN X S, WANG Y J, YIN T, et al. New system for investigating the corrosion of existing rock anchors[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, **861**(7): 072117.

[11] 王玉杰, 尹　韬, 孙兴松, 等. 丰满老坝加固预应力锚索服役近 30 年后性能评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, **41**(1): 62–69. (WANG Yu-jie, YIN Tao, SUN Xing-song, et al. Performance evaluation of prestressed anchors embedded in old Fengman Dam after nearly 30 years service[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, **41**(1): 62–69. (in Chinese))

[12] YIN T, SUN X S, WANG Y J, et al. Corrosion investigation of rock anchors served over 10 years in underground powerhouse of a hydropower station[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022: 4905010.

[13] WANG Y J, YIN T, SUN X S, et al. Review of corrosion test methods of prestressed anchor[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, **861**(2): 022060.

[14] YIN T, SUN X S, WANG Y J, et al. Corrosion characteristics of anchor cables in electrolytic corrosion test and the applicability of the test method in study of anchor cable corrosion[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, **2021**: 6695288.

[15] 孙彦鹏. 楔形压胀式内锚头作用机理及应用研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020. (SUN Yan-peng. Study on the Action Mechanism and Application of Wedge-Shaped Expansion Type Internal Anchor Head[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020. (in Chinese))

[16] 孙彦鹏, 凌永玉, 林兴超, 等. 新型预应力锚索内部监测结构试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊 2): 226–230. (SUN Yan-peng, LING Yong-yu, LIN Xing-chao, et al. Experimental study on internal monitoring structure of a new prestressed anchor cable[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S2): 226–230. (in Chinese))

[17] CHEN Y F, LING X M, LIU M M, et al. Statistical distribution of hydraulic conductivity of rocks in deep-incised valleys, Southwest China[J]. Journal of Hydrology, 2018, **566**: 216–226.

[18] 陈益峰. 水利工程渗流分析理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2022. (CHEN Yi-feng. Seepage Analysis in Hydraulic Engineering: Theory and Practice[M]. Beijing: Science Press, 2022 (in Chinese))

[19] CHEN Y F, ZENG J, SHI H T, et al. Variation in hydraulic conductivity of fractured rocks at a dam foundation during operation[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, **13**(2): 351–367.

[20] JIA C J, XU W Y, WANG S S, et al. Experimental analysis and modeling of the mechanical behavior of breccia lava in the dam foundation of the Baihetan Hydropower Project[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, **78**(4): 2681–2695.

[21] WANG H L, XU W Y, JIA C J, et al. Experimental research on permeability evolution with microcrack development in sandstone under different fluid pressures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, **142**(6): 04016014.

[22] MENG Q X, WANG H L, XU W Y, et al. Multiscale strength reduction method for heterogeneous slope using hierarchical FEM/DEM modeling[J]. Computers and Geotechnics, 2019, **115**: 103164.

[23] SHI H J, XU W Y, YANG L L, et al. Investigation of influencing factors for valley deformation of high arch dam using machine learning[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020: 1–12.

[24] SUN M C, XU W Y, WANG H L, et al. A novel hybrid intelligent prediction model for valley deformation: a case study in Xiluodu Reservoir region, China[J]. Computers, Materials & Continua, 2020, **66**(1): 1057–1074.

[25] LI B, XU J R, XU W Y, et al. Mechanism of valley narrowing deformation during reservoir filling of a high arch dam[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering,

2020: 1－11.

[26] WANG X W, XU J R, XUE L J, et al. Study on deformation of abutment and the influence on high arch dam during impoundment[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, **861**(7): 072068.

[27] 钟大宁. 高拱坝谷幅变形机制及谷幅变形对大坝的影响研究[D]. 北京: 清华大学, 2019. (ZHONG Da-ning. Study on the Mechanism of Valley Width Deformation and Its Effects on the Arch Dam[D]. Beijing: Tsinghua University, 2019 (in Chinese))

[28] 杨 强, 王守光, 李超毅, 等. 岩体结构变形破坏的内在驱动力－不平衡力[J]. 工程地质学报, 2020, **28**(2): 202－210. (YANG Qiang, WANG Shou-guang, LI Chao-yi, et al. Internal driving force of deformation and failure of rock mass structure-unbalanced force[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, **28**(2): 202－210. (in Chinese))

[29] WANG S G, LIU Y R, ZHOU H W, et al. Experimental study on failure process of arch dam based on acoustic emission technique[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, **97**: 128－144.

[30] TAO Z F, LIU Y R, YANG Q, et al. Study on the nonlinear deformation and failure mechanism of a high arch dam and foundation based on geomechanical model test[J]. Engineering Structures, 2020, **207**: 110287.

[31] WANG X G, LIU L P, FU R Z, et al. Newly developed pressure adaptable concrete lining for high pressure hydraulic tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **105**: 103570.

[32] 刘立鹏, 汪小刚, 段庆伟, 等. 高压富水地层水工隧洞衬砌外水压力确定与应对措施[J/OL]. 岩土工程学报: 1-9[2022-03-05]. http:// kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.Tu.20211228.1528.011.html, 2022. (LIU Li-peng, WANG Xiao-gang, DUAN Qing-wei, et al. Methods to cope with external water pressure of hydraulic tunnel lining in high-pressure groundwater-rich stratum[J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering: 1-9[2022-03-05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.Tu.20211228.1528.011.html, 2022. (in Chinese))

中国土木工程学会第十四届全国土力学及岩土工程学术大会
（第一号通知）

主办单位：中国土木工程学会土力学及岩土工程分会

承办单位：中国科学院武汉岩土力学研究所；岩土力学与工程国家重点实验室

征文内容：会议主要研讨双碳战略下岩土工程理论与实践、新技术和新方法等。组委会接受全文投稿，大会学术委员会将组织专家成立论文评审委员会。征文内容主要包括以下14个方面。①岩土基本性质与本构关系；②岩土工程勘察、测试与评价；③地基处理与基础工程；④特殊土力学与工程；⑤边坡工程与地质灾害；⑥地下工程及能源储备；⑦土动力学与岩土地震工程；⑧海洋岩土力学与岛礁工程；⑨环境岩土工程与固废处置；⑩二氧化碳地质利用与封存；⑪数值仿真与岩土工程大数据；⑫岩土工程新材料、新装备与智能建造；⑬岩土力学与工程前沿交叉；⑭重大岩土工程实录。

投稿要求：大会组委会于2022年7月1日开始接收论文投稿。应征论文须符合上述征文内容要求且未公开发表。投稿时须向会务组提交全文电子文件（投稿邮箱附后），论文请按《岩土力学》期刊格式撰写，论文模板请登录《岩土力学》网站下载中心下载，来稿务请注明作者的详细通讯地址、E-mail及联系电话。

根据被录用论文的研究内容与学术水平，分别推荐论文由《Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering》、《岩土力学》、《岩石力学与工程学报》、《土木工程学报》、《岩土工程学报》、《力学与实践》、《土工基础》等近10个国内高水平期刊以正刊、专刊或增刊形式发表，其中多本期刊的专刊或增刊可被SCI或EI检索。热忱欢迎国内外从事岩土工程勘察、设计、检测监测、科研教学、设备和施工领域的科技工作者踊跃投稿。

联系方式：郭 妍（13871535559），卢 正（13469993948），刘 磊（15871497846），孙冠华（18672321892）；湖北省武汉市武昌八一路小洪山2号，中国科学院武汉岩土力学研究所（430071）；E-mail：cismge2023@whrsm.ac.cn；电 话：027-87198413。

（大会组委会 供稿）

DOI：10.11779/CJGE202207005 “十三五”国家重点研发计划项目

高寒区长距离供水工程能力提升与安全保障技术

蔡正银[1]，张 晨[2]，朱 洵[2]，黄英豪[2]，王 羿[2]
（1. 南京水利科学研究院，江苏 南京 210029；2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所，江苏 南京 210024）



摘 要：长距离引调水是解决水资源时空分布不均，保障国家水资源重大战略布局的重要措施，属于名副其实的“生命线”工程。位于中国西北地区的供水渠道大多面对极端寒冷、异常干旱、复杂地质环境等恶劣自然条件，冻胀、水胀、盐胀等灾害频发，极大影响渠道供水效率，严重威胁渠道运行安全，成为制约地方社会经济可持续发展的巨大障碍。“十三五”国家重点研发计划项目“高寒区长距离供水工程能力提升与安全保障技术”以北疆大型供水渠道工程为依托，以水资源高效利用为目标，以确保供水安全为宗旨，以工程防灾减灾为突破点，通过近四年联合攻关，在高寒区输水渠道劣化机理、抗冻升级改造技术、低温运行控制技术以及安全保障与风险防控技术等方面取得一系列创新成果，社会、经济和环境效益显著，应用前景广阔，意义重大。

关键词：高寒区；供水渠道；冻胀；劣化机理；低温运行
中图分类号：TV672 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2022)07－1239－16

作者简介：蔡正银(1965—)，正高级工程师（二级教授），博士，博士生导师，现任南京水利科学研究院副总工程师，兼任《岩土工程学报》主编，中国水利学会岩土力学专业委员会主任，水文水资源与水利工程国家重点实验室副主任。长期从事水利、交通行业岩土工程关键科学技术问题研究，先后主持完成了 120 多项科研项目，是“十四五”国家重点研发计划项目“沿海水工建筑物韧性提升关键技术”和“十三五”国家重点研发计划项目“高寒区长距离供水工程能力提升与安全保障技术”首席科学家，“十二五”国家863计划“现代交通基础设施建设和养护技术”召集人和“20万吨级深水板桩码头关键技术”课题负责人，国家自然科学重点基金“堰塞体状态相关剪胀理论与坝体溃决演化规律研究”负责人。获国家和省部级科技奖23项，其中国家科技进步二等奖1项（排名第一），省部级科技特等奖5项、一等奖9项（7项排名第一）；授权国家发明专利36项，实用新型专利16项；发表学术论文216篇，主编著作6部；主编国家、行业和团体标准 8 部。先后获得全国优秀科技工作者，全国水利系统先进工作者，中国航海学会首届科技贡献突出人物，享受国务院政府特殊津贴。E-mail: zycai@nhri.cn。

Improvement of capacity and safety protection technology for long-distance water delivery projects in cold regions

CAI Zheng-yin[1], ZHANG Chen[2], ZHU Xun[2], HUANG Yin-hao[2], WANG Yi[2]
(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The long-distance water delivery is the important measure to solve the uneven spatial and temporal distribution of water resources and to ensure the major strategic layout of the national water resources in China, and it is worthy of the name lifeline project Water delivery canals in Northwest China face the Most harsh natural conditions such as extreme cold, abnormal drought and complex geological environment, which may result in frequent disasters such as frost heave, water swelling and salt swelling. Accordingly, the watersupply efficiency of the canals is affected and their operational safety is threatened, which greatly hinders the sustainable development of the local society and economy. The National Key Research and Development Program of China during the 13th Five-Year Plan period "Long-distance water supply engineering capacity improvement and safety assurance technology in alpine regions" was implemented. Based on the large water supply canal inNorthern Xinjiang, the program aims at the efficient utilization of water resources to ensure the safety of water supply and to realize the disaster prevention and Mitigation. After the joint researches for nearly four years, a series of innovations were achieved in the

基金项目：“十三五”国家重点研发计划项目（2017YFC0405100）
收稿日期：2022－03－05

deterioration mechanism of water delivery canals in cold regions, the upgrading and transformation technology of canal anti-freezing, the control technology of low-temperature operation of canals, and the safety guarantee and risk prevention and control technology of canals cold in alpine regions. The relevant achievements have been widely used in large-scale water supply projects in Northern Xinjiang, and have achieved significant social, economic and environmental benefits, with broad application prospects and great significance.

Key words: cold region; water delivery canal; frost heave; deterioration mechanism; low-temperature operation

0 引 言

为解决中国水资源突出问题，提升水资源利用效率，“十三五”期间，由国家科技部、水利部等 21 家中央部门和地方科技主管部门共同设计了“水资源高效开发利用”重点专项。2017 年 6 月，“高寒区长距离供水工程能力提升与安全保障技术”（2017YFC0405100）项目正式获批立项，对应指南“重大水资源配置工程建设与安全运行”方向。该项目由南京水利科学研究院牵头，中国科学院西北生态环境资源研究院、新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局、西北农林科技大学、新疆水利水电科学研究院、中国水利水电科学研究院、天津大学、黄河水利科学研究院、黄河勘测规划设计有限公司、山东中博重工机械有限公司 10 家单位共同参与。项目围绕中国西北高寒区水资源配置工程运行能力提升及安全保障需求，通过近三年半时间联合攻关，破解了复杂环境作用下高寒区长距离供水渠道劣化演变规律重大技术难题，在高寒区长距离供水渠道抗冻升级改造技术与装备、渠道低温运行控制技术、渠道安全监测与健康诊断技术等方面取得多项创新突破，有力推动了长距离供水工程高效运行与安全保障领域的科技进步。本文就项目的研究背景、研究内容、主要创新成果，以及成果的应用情况等作简要介绍。

1 背景及国内外研究现状

中国西北地区水资源十分短缺，时空分布不均，严重阻碍了地方国民经济发展，影响了当地人民的生产生活水平。为此，国家先后修建了一大批长距离供水工程，以缓解水资源供需矛盾。如本世纪初开始修建的近 1000 km 的北疆供水一期工程，自建成以来，持续为乌鲁木齐、克拉玛依等区域中心城市供水，成为名副其实的“生命线”工程。然而，这些以输水明渠为主要建筑物的供水工程，往往穿越茫茫荒漠、戈壁等无人区，在发挥巨大效益的同时，大多面对极端寒冷、异常干旱、不良地质环境等恶劣条件，导致渠道发生各种灾害。以北疆供水工程为例，工程所在地整体属高纬度、高寒地区，冬季极端低温可达−40℃，造成严重的渠道冻害。此外，渠道沿线不良地质土分布广泛，据统计膨胀性渠基占供水总干渠全长的 31.6%，边坡失稳现象时有发生。经多年运行后，渠道防渗膜破损和老化现象严重，致其发生大面积冻胀、水胀、渗透等破坏，局部发生滑坡与坍塌，如图 1 所示。为此，国家每年都要投入大量人力、物力对其进行维修，严重影响了渠道的供水效率，极大威胁了渠道的供水安全，成为亟待解决的重大工程问题。



图 1 北疆大型渠道破坏实例

Fig. 1 Damage of large canal in Northern Xinjiang

总之，高寒区长距离供水渠道由于其线路长、气候条件恶劣、地质环境复杂、运行调度困难，容易发生冻融、渗漏、滑坡、垮塌等灾害，使得其供水能力和安全保障受到极大威胁。对此国内外已开展了大量的研究工作，取得了许多重要的研究成果，但仍然面临巨大的挑战。

挑战 1：高寒区供水渠道的性能演化与灾变触发机制。揭示极端寒冷和其它复杂环境下渠道的性能演化与灾变机理是提高其供水能力和安全保障的基础。影响高寒区供水渠道运行的因素很多，包括气候条件、地质条件、地下水补给条件等，但最主要的还是“冻融循环”和“干湿交替”，特别是冻融－干湿耦合效应，对此国内外研究很少涉及。在冻融循环和干湿交替的耦合作用下，渠道的性能演变越发复杂，涉及水－热－力多场耦合分析理论和方法的研究，也涉及复杂环境下渠道灾变机理与安全评价方法的研究，这些研究在国内外还处于起步阶段。

挑战 2：高寒区长距离供水渠道能力提升的理论与方法。中国高寒区一些长距离供水渠道已经运行多年，各种灾害、老化、设计条件等严重制约了供水效率，亟需进行渠道升级改造。目前对于高寒区渠道升级改造的理论和技术还很不成熟，基本上都是参照一

般的渠道工程，没有深入考虑极端低温的影响。高寒区渠道的抗冻结构、新旧防渗体的搭接、新旧渠道边坡的变形协调控制、渠道渗漏水速排等都是必须解决难题。

冬季安全输水及控制是保障高寒区渠道供水能力提升的关键途径。引黄济青、京密引水、引黄济津、南水北调以及国外一些大型调水工程的冬季运行实践积累了不少成功控制冰情与冬季冰盖运行的经验，但面对高寒区多变的气候环境、更加复杂的渠系结构，以上技术和经验都难以直接应用，需要深入研究。

挑战 3：高寒区长距离供水渠道安全保障。现场监测是掌握高寒区渠道安全运行状况的重要手段，目前国内外尚无能精准测量高寒区渠道冻胀量和冻胀力的传感元器件，缺乏精确定位渠道渗漏异常发展和变形突变区段的成熟测试技术，亟需探索和研发适应高寒区渠道运行的监测技术及预警预报体系。另外，高寒无人区供水渠道存在人工巡检困难、定点监控维护难等问题，亟待研发查险快速、准确、适应恶劣环境要求的渠道健康智能化诊断技术和设备。此外高寒区长距离供水渠道突发险情应急调度与抢险也是国内外研究十分薄弱的课题。

2　研究目标、内容及关键科学技术问题

2.1　研究目标及内容

作为“水资源高效开发利用”专项支撑重大水资源配置工程建设与安全运行任务板块，“高寒区长距离供水工程能力提升与安全保障技术”项目旨在通过研究揭示高寒区渠道灾害发生、发展规律，建立渠道水－热－力耦合分析理论与方法，提出高寒区渠道升级改造新旧渠坡变形协调控制技术、新老防渗体一体化连接技术和渠道渗漏水速排技术，研发渠道冬季供水冰盖运行控制技术、地热循环融冰技术、太阳能光热集蓄融冰技术以及渠道导电混凝土衬砌板加热融冰技术，开发高寒区长距离供水渠道多时空尺度监测预警与移动式健康诊断技术、渠道“点－线－面”损毁快速维护与抢险成套技术、突发险情快速识别与应急调度技术等，构建集风险识别、健康诊断、监测预警三位一体的高寒区长距离供水渠道安全评价体系和平台。在此基础上，依托北疆大型供水渠道完成示范工程建设，达到年输水时间延长 30 d，输水能力提升 20% 的目标。

项目下设六大任务目标，即对应六大课题，课题名称及承担单位、负责人情况如表 1 所示。课题间逻辑关系如图 2 所示。

表 1　课题设置情况

Table 1 Arrangement of tasks

课题序号	课题名称	承担单位	课题负责人
1	高寒区供水渠道性能演化与灾变机理	中国科学院西北生态环境资源研究院	马　巍
2	高寒区渠道供水效率提升及结构优化理论与技术	新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局	石　泉
3	高寒区供水渠道低温响应与冬季运行控制技术	西北农林科技大学	王正中
4	高寒区长距离供水渠道监测预警与健康诊断技术	新疆水利水电科学研究院	何建村
5	高寒区供水渠道突发险情应急调度与抢险技术	中国水利水电科学研究院	甘治国
6	高寒区供水渠道能力提升与安全保障集成示范	南京水利科学研究院	蔡正银

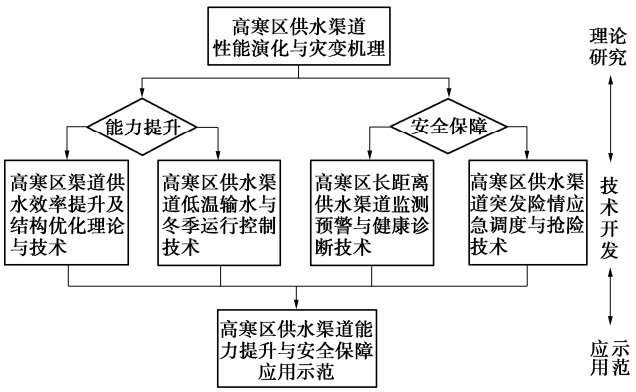


图 2　课题间逻辑关系

Fig. 2 Logical relation of tasks

2.2　关键科学技术问题

围绕任务目标，“高寒区长距离供水工程能力提升与安全保障技术”项目着重解决 3 个关键科学问题。

（1）高寒区供水渠道的性能演化与灾变触发机制

高寒区供水渠道从建设期即开始经历极端低温、瞬变温差、短时强降雨等恶劣环境影响，渠道的衬砌结构、防渗系统和渠基土在冻融循环、干湿交替等因素作用下，会逐渐劣化，揭示供水渠道的全寿性能演化进程及其孕灾、致灾机制，是本项目研究的基础性科学问题。

（2）高寒区长距离渠道供水能力提升理论与方法

已建的高寒区供水工程，受当时设计水平、经济条件和建设技术的限制，加上各种灾害的影响，渠道的运行效率和供水能力已经日益不能与当地社会经济

快速发展对水资源的需求相匹配。针对已建和规划待建的高寒区渠道工程，从科学发展的高度提出渠道能力提升的理论与方法，是第二个关键科学问题。

（3）高寒区长距离供水渠道的健康运行与安全保障体系

高寒区渠道工程在建设和运行过程中受到不利气候和环境条件的影响，冻胀、滑坡、渗漏等各种破坏时有发生，严重威胁渠道的健康运行和供水安全。提出渠道健康状况的科学诊断方法和保障体系，是本项目需要解决的第三个关键科学问题。

本项目重点解决以下四大关键技术问题。

（1）高寒区渠道升级改造关键技术

传统渠道一般采用梯形断面，在输水能力与抗冻方面都存在先天不足，因此必须根据渠道灾变机理，研究提出 “水力最佳”与“抗冻最优”断面，以此作为渠道升级改造的基础。另一方面，渠道加高改造是提高现有渠道供水能力的重要手段，目前一般采用的办法主要为贴坡加高和复式加高方法。由于新老渠道边坡的冻融、干湿特性差异较大，容易造成新老渠坡发生不均匀变形，影响渠道的正常运行。因此，研究渠道升级改造渠坡变形协调问题，并采用有效措施进行控制，是渠道升级改造的关键。此外，防渗系统是渠道高效运行的核心，目前渠道的防渗体主要采用塑膜或复合土工膜，渠道升级改造过程中必然存在新老防渗膜搭接的问题，开发出新旧防渗体一体化连接技术是高寒区渠道升级改造的另一项关键技术。

（2）渠道低温运行控制技术

高寒区的许多渠道由于抗冻要求，冬季一般不输水，因此研发低温输水技术是提高渠道输水能力的重要举措。由于高寒区气温极低，且作用时间长，只依靠传统冰盖下输水运行可能会产生严重的冰塞、冰坝，从对渠道衬砌结构造成破坏。突破冰盖运行控制理论，开发地热循环、太阳能光热集蓄与导电混凝土加热等新型辅热、融冰技术，是实现高寒区渠道延长低温输水期的关键。

（3）高寒区渠道智能监测预警与移动式健康诊断技术

高寒区长距离供水渠道穿越线路长，很多地方荒无人烟，冬季气候极端寒冷，日夜温差非常大，传统的渠道安全监测和人工健康巡检方法遇到很大的挑战。如何针对线路长、气温低的特点，开发出集致灾因子识别、灾变过程模拟、灾变触发即时预警的安全监测技术和移动式智能健康诊断技术，是保障高寒区渠道运行安全的关键。

（4）突发条件下高寒区长距离供水渠道风险追踪与应急调度技术

高寒区长距离供水渠道可能出现的隐患很多，包括水质污染、暴雨洪灾、渗透破坏、边坡失稳、冰凌灾害等，给渠道的风险追踪和应急调度带来了难以克服的困难。如何采用无人机技术实现渠道风险追踪，结合渠道BIM技术开发多源数据融合的应急巡检系统，提出突发事件应急调度方案，是高寒区渠道供水安全的一大关键。

3 主要创新成果

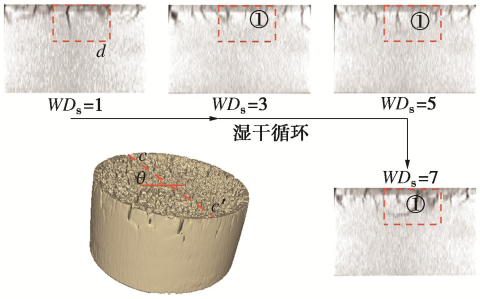
3.1 高寒区渠道劣化机理与抗冻升级改造设计理论

（1）湿干－冻融循环下渠基土强度衰减与结构损伤破坏机制

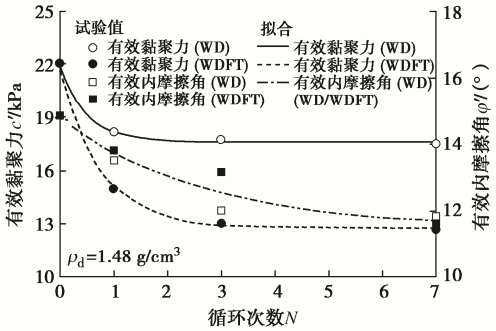
湿干－冻融循环是渠道劣化的主要外在因素，渠道现场经历的干湿交替、冻融循环过程本身较为复杂，室内试验中难以完全模拟。为此，以渠道现场全年平均地温分布为基础，结合渠道通、停水日期及渠水冻结－融化分界温度（0℃），将渠道所受环境边界简化为湿干－冻融的连续状态变化过程，具体简化过程可参考文献[1]。基于此，开展了湿干－冻融循环下渠基膨胀土三维裂隙演化试验[2-4]及三轴固结不排水剪切试验[5-6]，首次揭示了高寒区渠基土湿干－冻融循环作用下的强度衰减与结构损伤双重互馈破坏机制，建立了土体微细观损伤模型，如图3所示，具体如下：采用计算机断层扫描（CT扫描）及三维重建技术对湿干及湿干－冻融循环作用下膨胀土内部裂隙的演化特征进行定量化描述，提出了采用裂隙体积分数和三维分形维数的方法对裂隙的三维网络结构进行定量描述及评价裂隙空间发育特征的评价指标；探讨了膨胀土在经历不同湿干及湿干－冻融循环作用下应力－应变关系、弹性模量、有效抗剪强度的演化规律；结合损伤力学基础理论，提出评价湿干与冻融过程耦合作用的损伤变量，为合理分析膨胀土的强度及损伤过程提供了依据。

（2）超重力场渠道冻融破坏过程模拟技术与设备

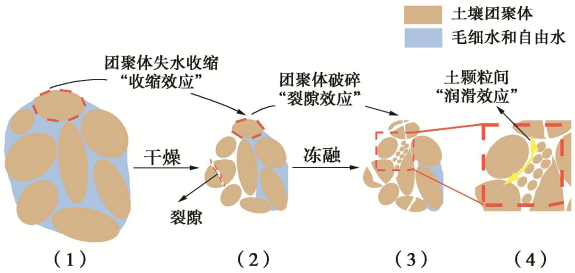
项目团队前期围绕高寒区渠道冻害特征，研发了一套渠道冻融离心模拟设备，并形成了相应的渠道冻融过程模拟技术[7-9]。考虑到现场实际渠道经历干湿和冻融循环作用的特点，采用电子温控技术研制了一套可以在超重力场下模拟渠道湿干－冻融循环作用的离心模型试验系统[10-12]。该系统主要由干湿系统、热交换系统、保温模型箱、地面冷却水装置和数据采集控制系统等组成，如图4（a）所示。该套系统可以实现在100g超重力场下寒区工程的模拟，模型温度在−40℃～



（a）裂隙发育规律



（b）强度演化规律



（c）微细观损伤概化模型

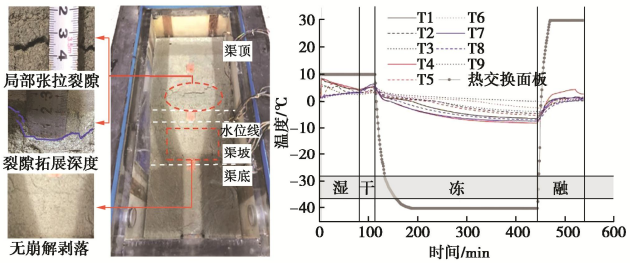
图 3 高寒区渠基土劣化过程及机制

Fig. 3 Deterioration process and mechanism of canal foundation soil in high and cold region

30℃可控可调，同时能实现渠基土体从干燥—饱和状态的准确控制。在此基础上，利用该设备开展了多组渠道“湿—干—冻—融”循环作用离心模型试验，如图4（b），（c）所示。揭示了渠道湿干—冻融耦合作用下的渐进劣化演变规律，为高寒区渠道的渐进破坏过程和机理研究提供新的重要手段。



（a）渠道湿干冻融离心模型试验



（b）坡面裂隙发育　　（c）渠基土温度响应

图 4 高寒区渠道湿干冻融离心模拟

Fig. 4 Centrifuge modelling of wetting-drying and freeze-thaw in high and cold regions

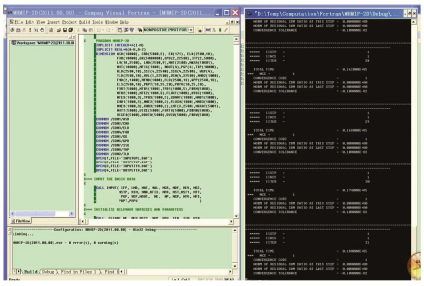
（3）高寒区渠道水－热－力多场耦合分析模型与平台

为进一步探究高寒区渠道的劣化机理，综合考虑冻土的本构特性、土与衬砌结构接触特性，团队自主开发了渠道水－热－力多场耦合模拟分析平台[13-15]，通过数值分析完成了复杂边界条件下高寒区渠道水－热－力过程的模拟，得到了渠道结构中易受低温影响的薄弱环节，计算结果与离心模型试验具有较好的一致性（见图 5）。

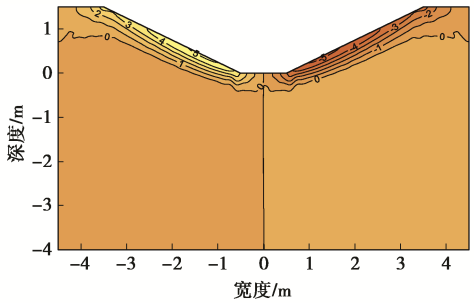
该软件基于 Visual Fortran 2011 平台，包括 1 个主程序，36 个子程序，共计 27850 行 Fortran 代码。该程序具有以下特点：①计算问题可以是平面应力、平面应变或轴对称；②计算单元包括 3 节点、4 节点、8 节点、9 节点平面单元及衬砌－岩土接触单元；③材料本构模型包括弹性、Duncan-Chang、弹塑性、弹黏塑性、自定义本构；④采用 Mohr-Coulomb 和 Drucker-Prager 准则等，提供自定义屈服准则接口；⑤可以包含与冻融－干湿相关的热力学参数；⑥可模拟渠道多阶段施工建造过程；⑦可以进行单物理场或者耦合场分析；⑧采用基于二分法步长缩减促收敛技术。

（4）高寒区渠道抗冻胀+水力最优断面设计方法

传统的长距离宽浅式输水渠道虽然具有一定的抗冻胀能力，但开挖面积大，占地多，输水阻力大；而窄深式渠道虽接近水力最优断面，但不便施工、渠坡结构稳定性及抗冻胀能力较差。为此，充分考虑渠道开挖面积、输水条件及衬砌抗冻胀破坏等因素，依靠开发的渠道水－热－力多场耦合模拟分析平台，以水力最优为目标，提出了衬砌结构整体刚度指标，开发出“抗冻胀+水力最优”设计方法[16-18]（见图 6）。与原设计相比衬砌最大冻胀应力减小 36.4%～52.7%，结构整体刚度减小 30%～48%，提高了其适应冻胀破坏的能力，为高寒区输水工程设计提供理论依据，同时也为梯型渠道升级改造奠定了理论基础。



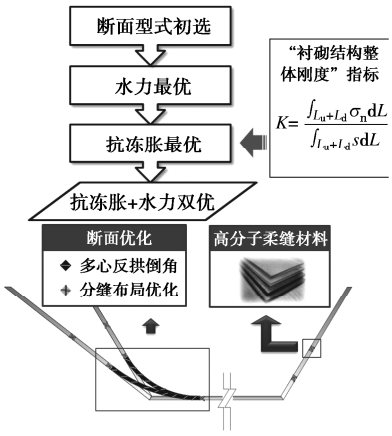
（a）平台代码



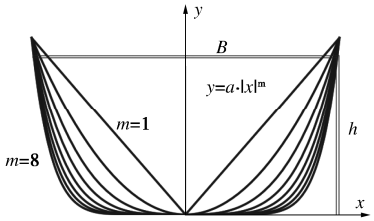
（b）模拟结果

图 5 高寒区渠道水－热－力多场耦合模拟平台及典型结果

Fig. 5 Simulated and typical results of multi-field coupling of water, heat and force in canals in high and cold regions



（a）“抗冻胀+水力最优”设计方法



（b）水力+抗冻胀双优设计最佳断面示意图

图 6 高寒区渠道抗冻胀+水力最优断面设计方法

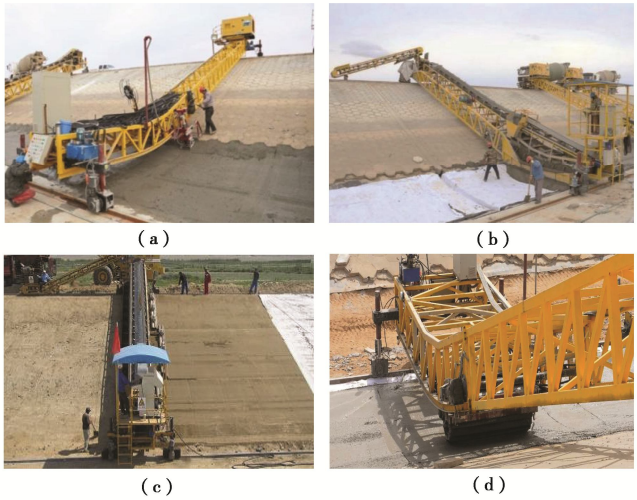
Fig. 6 Design method for anti-frost heave and hydraulic optimal section of canals in high and cold regions

3.2 高寒区渠道升级改造关键技术

高寒区供水渠道大多为梯形断面，抗冻能力不强。经过研究，提出了弧底+梯形断面的改造方案，可以大大改善渠道的抗冻与供水能力。为此研发了一整套渠道升级改造的技术与装备，解决了渠道升级改造施工关键技术问题。

（1）高寒区供水渠道弧底+梯形断面升级改造成套设备及施工工艺

针对高寒区供水渠道升级改造涉及的关键技术，通过自主创新与集成创新，基于渠道抗冻胀+水力最优断面设计理论，研发形成了高寒区渠道升级改造成套关键装备，包括多功能渠道滑膜衬砌机(图 7（a）)、混凝土嵌入式制缝机（图 7（b））、斜坡整体式胶结砂摊铺机（图 7（c）），以及多功能表面成型机（图 7（d））等。



（a） （b）

（c） （d）

图 7 高寒区渠道升级改造一体化施工成套设备

Fig. 7 Equipments of canal construction in high and cold regions

多功能渠道滑膜衬砌机实现了渠底混凝土的自动摊铺，施工过程中可按渠底不同弧度要求自动控制，既适应标准断面，又能适应发生变形的断面。混凝土嵌入式制缝机实现了渠道升级改造过程中混凝土塑性阶段的分格制缝，使衬砌混凝土自身具备了抗裂缝能力。多功能表面成型机实现了混凝土表面的提浆密实、整形和收光等工序全部自动一体化完成，解决了传统收光设备对混凝土塑性阶段制缝材料的扰动移位影响。斜坡整体式胶结砂摊铺机解决了在渠道边坡上机械化整体摊铺胶结砂砾料、改性土等干硬性垫层材料的施工难题。

该成套装备广泛适用于平面、曲面等各种混凝土衬砌表面的成型施工，使劳动密集、高强度的渠道人工升级改造走向了机械化施工，填补了国内该类设备的空白。上述设备的使用要点详见文献[19～21]。在此基础上，建立了大型渠道升级改造主要工序机械化施工管理程序和质量控制标准，编制了《大平面混凝土机械一体化施工工法》[22]，为高寒区长距离供水渠道高效优质施工提供了解决方案。

（2）渠道升级改造新旧防渗膜一体化连接技术

渠道升级改造中涉及的另一项关键技术是新老防渗膜的有效黏接，关键指标是黏接强度和耐久性。通过对新旧连接的土工膜开展拉伸、浸水、低温弯折、耐静水压等一系列试验（数百次试验），提出采用“区间作业”方式，即户外温度＞5℃时采用黏接工艺，户外温度＜5℃采用黏接+焊接工艺，如图 8 所示。在此基础上，研发了自行式塑膜低温黏接加固装置，形成了新旧防渗膜 KS 热熔胶黏接+焊接的一体化连接技术。该技术克服了常规热熔机焊接当膜厚度较小或环境温度变化时，易产生烧洞或黏结强度偏低的缺点[23]。经现场测试，新旧防渗膜接头/接缝抗拉强度达 10 kN 以上，且经冷温弯折后无裂纹。

另一方面，位于北方地区盐碱环境的供水工程，水工建筑物易受硫酸盐等易溶盐侵蚀。为此开展了冻融、干湿交替与硫酸盐侵蚀共同作用下的混凝土损伤劣化机理和性能退化规律研究，研制了耐寒耐盐碱的新型渠道抗冻耐盐混凝土衬砌材料，以及具有优良抗渗性能的渠道新型复合改性弹性砂浆[24]。有效降低了高寒区极端低温、咸水对渠道衬砌混凝土耐久性的不利影响，提升了衬砌混凝土的长期服役性能。

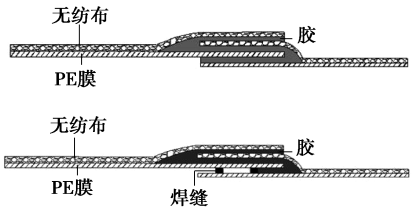


图 8 渠道新旧防渗膜黏接工艺

Fig. 8 Technology of bonding geomembranes

（3）渠道纵横排水体系

寒区输水明渠多为季节性通水渠道，即冬季不供水，因此每年渠道都将经历通水—停水过程。这一过程中渠道不可避免地会发生渗漏，渗漏水与土体的相互作用是产生渠堤边坡劣化的根本原因。为此，按照“防排结合”的思想，设计了一种渠道渗漏水高效速排体系（包括纵向排水体、横向排水体、渠底集水箱以及渠顶抽水井）[25]，如图 9 所示。在渠道底部每隔一段距离设置 1 只集水箱，渠顶部设置大口径抽水井，集水箱和抽水井之间采用斜坡通道连接，以便快速排出渠堤渗漏水。通过研究确定了纵向坡比、横向排水的间距等参数，同时就渠底集水箱容积、斜坡通道尺寸等关键技术指标进行了探讨，给出渠底集水箱最优容积及斜坡通道最佳尺寸。

（4）高寒区渠道改造渠坡变形协调理论与控制技术

围绕渠道贴坡加高产生的变形不协调问题，建立了“水－热－力”三场耦合计算模型。分析结果表明，

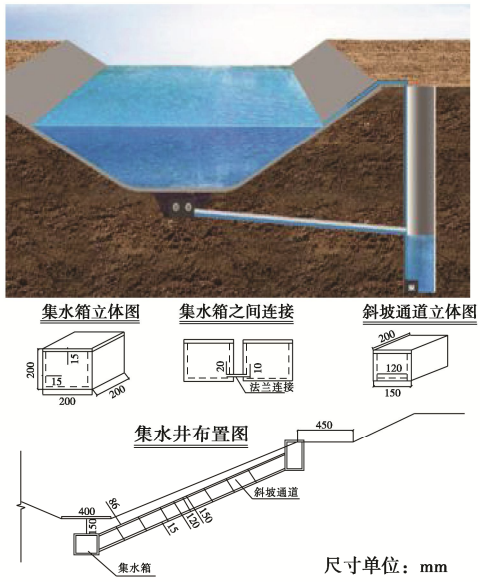


图 9 渠道渗漏排水体系示意

Fig. 9 Sketch of bottom drainage system of canal

高寒区加高渠道的不协调变形主要在于“冻”和“融”过程中新旧渠坡产生的冻胀和融沉变形不协调，随着“湿干—冻融”循环次数的增加，渠坡渗漏点以下的饱和区域逐渐加深、扩大，渠顶土体饱和度降低，导致渠顶与渠坡间的冻胀不协调加剧，同时渠坡的不协调变形使得渠道土体与衬砌之间产生了漏空区域，如图 10 所示。研究表明加高渠道不协调变形存在 3 种形态，即加高层漏空、结合面漏空和老渠道鼓胀，据此提出了高寒区加高渠道协调变形评价指标与方法[26]。

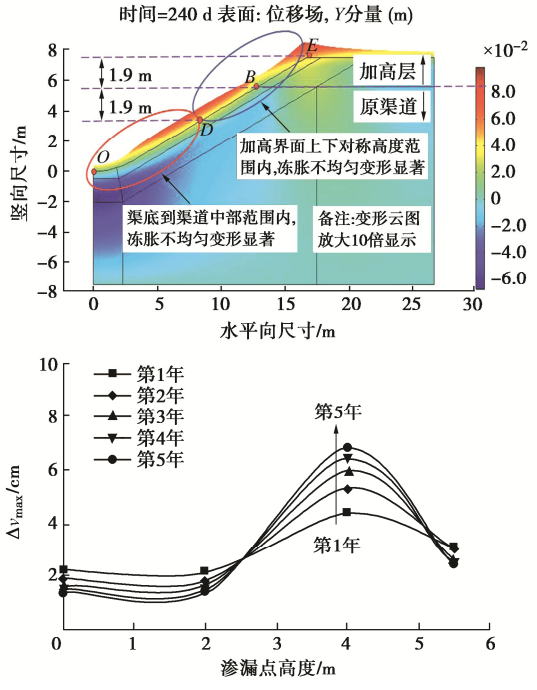


图 10 加高渠道变形不协调数值分析结果

Fig. 10 Sketch of uncoordinated deformation of heightening canals

3.3 渠道低温运行控制关键技术

由于高寒区极端温度低，负温持续时间长，常规输水工程冬季冰盖运行的技术难以应用，使得寒区绝大多数渠道冬季停止供水，严重限制了渠道的低温供水能力。为此，针对高寒区长距离输水渠道低温运行的冰害问题[27]，基于冰盖输水理论，辅以渠道局部融冰技术，探索保障高寒区输水渠道低温期安全输水的技术措施，为提高高寒区渠道供水效率，延长供水时长提供技术支撑。

（1）渠道冰盖安全运行调控理论

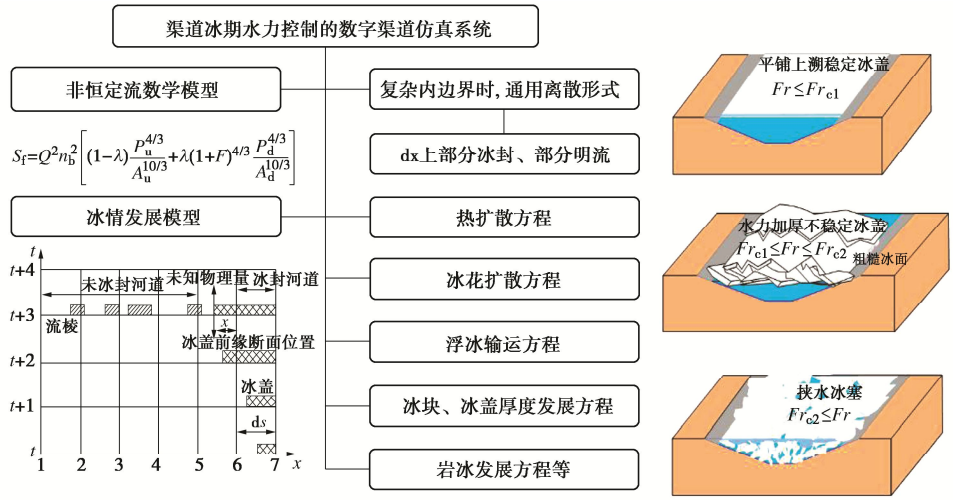
针对渠水结冰盖时剧烈的水位变动而导致的水力加厚不稳定冰盖和挟水冰塞，建立了渠道结冰期非恒定流模型[28]，并将冰情发展模型与明渠系统复杂内边界条件下的非恒定流模型进行集成耦合，开发了高寒区供水渠道冰期水力控制数字仿真系统，如图 11 所示，实现了复杂边界条件下高寒区供水渠道冰期水力控制和运行调度的自动化管理。此外，为便于冰期运行水力控制，提出了相应的多种输水断面设计理论[29]。

（2）渠道新型保温盖板结构及设计理论

针对极端低温输水条件下渠水冰盖厚度过大，导致衬砌结构破坏的难题，研发了 FRP-PC 渠道保温盖板结构[30]，如图 12 所示。该新型结构采用模块化拼接安装方式，施工快速并对渠道结构无破坏。同时抗腐蚀、抗疲劳性好，可以在酸、碱、氯盐和潮湿的环境中使用 10～15 a。经现场试验，渠道保温盖板能提高环境与渠道温差 5℃～20℃，可承受 800 Pa 雪荷载及 12 级风荷载，可用于渠道关键部位的局部保温。

（3）渠道局部辅热融冰技术

对于一些容易产生冰塞的渠道关键部位，如闸门、虹吸和渡槽进出口等，充分利用太阳光热、地温和电热等热源，研发了集渠水漂浮太阳毯增温保温、渠基碎石桩辅热、渠道衬砌板集肤加热一体的渠道局部融



（a）渠道冰期水力控制数字仿真系统　　（b）输水断面设计理论

图 11 渠道结冰期安全运行调控理论

Fig. 11 Dispatch theory of canals in freezing period

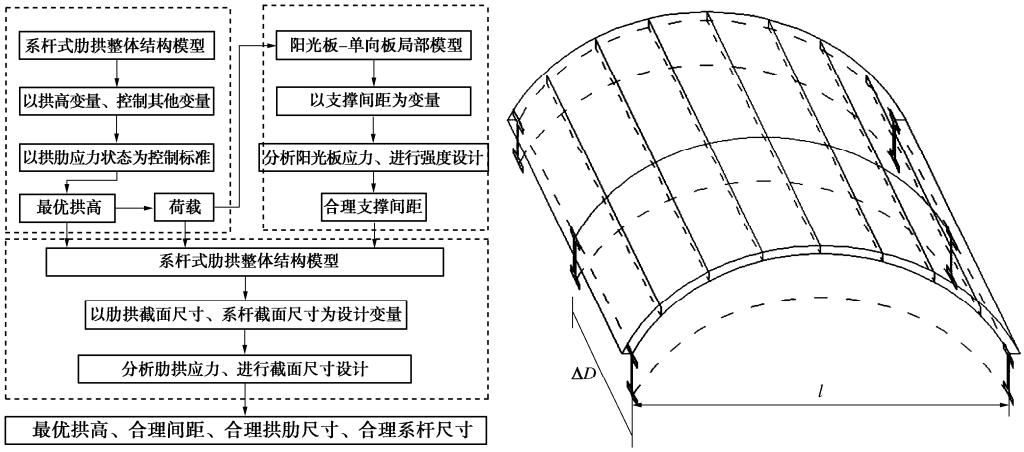
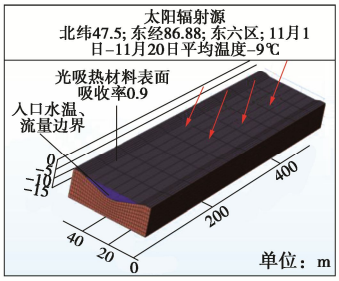


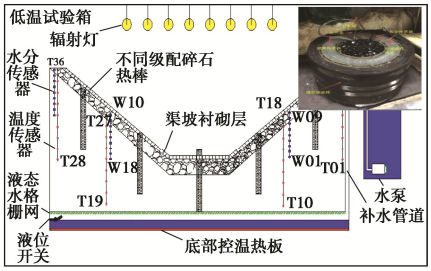
图 12 轻质高强河盖结构形式

Fig. 12 Light and high strength insulation flange of canals

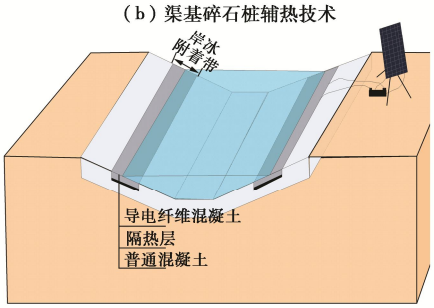
冰技术[31-33]。漂浮太阳毯增温保温技术，优选高吸热辐射黑色鱼鳞表面 PVC 材料作为漂浮太阳毯吸热表面，通过渠岸卷扬机进行太阳毯在渠水表面的收放，使渠水升温并阻隔热量散失，经数值计算分析后表明该技术可推迟渠水结冰时间 230 h，如图 13（a）所示。渠基碎石桩辅热技术，采用渠道岸边太阳集光罩、集热管加热空气，通过渠基内散热管将热空气传入土体进行蓄热，如图 13（b）所示。现场足尺试验表明，在冬季气温−10℃范围内，可保证渠基土温维持正温而不冻结。渠道衬砌板集肤加热技术，通过在渠道衬砌板上埋设长线集肤伴热电缆，利用电热对渠道进行局部融冰，如图 13（c）所示。北疆大型供水渠道现场试验表明当环境温度降至−10℃，流速大于 0.1 m/s 时，只要保证加热功率大于 0.357 kW/m^2，即可保证渠道不结冰。



（a）渠水漂浮太阳毯增温保温技术



（b）渠基碎石桩辅热技术



（c）渠道衬砌板集肤加热技术

图 13　渠道局部辅热融冰技术

Fig. 13 Technology series of auxiliary heat in canals

3.4　高寒区渠道安全保障与风险防控技术

高寒区长距离供水渠道线路长、沿线与生产生活区交汇点多、气候条件恶劣、土质与地下水赋存特性多变，因此渠道病害、水质污染及人畜落水等风险种类多且具有突发性和难以预测性，为渠道运维和风险防控带来了诸多难题。针对此，项目从渠道关键断面安全监测、渠道全线健康快速检测、突发风险预警和应急处置 3 个方面进行了创新研究，形成了成套高寒区渠道安全保障和风险防控技术。

（1）渠道全天候无人值守安全监测系统和预警预报平台

针对高寒区长距离供水渠道破坏类型及演化机理，研发了渠道全断面冻胀变形和三维冻胀力监测仪器[34]，如图 14 所示，实现了渠道断面二维连续变形监测和三向冻胀应力监测；研发了渠道渗漏分布式光纤测试技术[35]，实现了渠道沿线大范围面积的渗漏监测；基于互联网、大数据计算、数据融合技术、人工智能技术等，研发了高寒区供水渠道多时空预警预报系统和私有云平台，实现了高寒区渠道全天候无人值守安全监测和预警预报。



图 14　渠道全断面冻胀破坏监测设备

Fig. 14 Monitoring instruments for frost heave of canals

（2）渠道车载智能无损检测系统

集成了包含高密度电法仪、探地雷达、地震面波等无损探测方法与设备，研发了车载式移动智能渠道健康巡检装备，如图 15 所示。通过反复的数值模拟、数据正演和模型试验，形成了适用于高寒区渠道健康诊断成套技术。该技术解决了长距离渠道沿线人工巡检耗时长、精度差且多方巡检信息整合难等问题。



图 15　渠道车载智能无损检测装备

Fig. 15 Nondestructive testing vehicle for canals

（3）渠道险情无人机+BIM 应急巡检与调度系统

综合采用无人机、建筑信息模型（BIM）和物联网等先进技术，进行了多源数据融合下高寒区供水渠道突发事件风险因素的连续在线追踪研究[36-37]，如图 16 所示。针对流凌、坠物、边坡破坏等典型渠道风险类型，提出了相应的风险图像智能识别方法；开发了基于无人机+BIM 实时耦联的渠道险情应急巡检系统[38-39]。基于 B/S 架构，采用面向对象建模技术及 GIS 技术，以可视化编程及多线程技术为手段，集成无人机应急诊断、现场监测、水量水质数值仿真和应急调度模型，开发了高寒区渠道应急调度平台，为渠道应对突发险情提供了决策支撑。



图 16 渠道无人机+BIM 应急巡检系统

Fig.16 System of BIM inspection of canals

4 成果示范应用情况

围绕高寒区长距离供水工程运行能力提升与安全保障的实际需求，集成项目主要研究成果，依托北疆大型供水工程，建立了高寒区渠道全断面升级改造与维护示范工程、高寒区渠道低温输水综合示范工程、高寒区渠道冻害监测与抢险示范工程，以及高寒区渠道安全运行与管理决策平台。

示范工程地点位于北疆阿勒泰地区，如图 17 所示。该区地处北纬 48°，冬季极端低温超过-40℃，最大冻深达 2.0 m，是中国典型的高纬度寒冷地区。北疆供水工程主要建筑物为输水明渠，渠道沿线地质条件复杂，膨胀性泥岩、砂质泥岩等不良地质体分布广泛。该工程于本世纪初建成，为季节性供水渠道，每年大约 4 月份开始供水，9 月停水，目前该渠道已累计运行近 20 a，为缓解北疆地区的水资源供需矛盾做出了重大贡献，是名副其实的生命线工程。由于极端气候和不良地质条件的影响，渠坡滑塌、渗漏、水胀、冻胀等灾害时有发生，每年春秋两季都需要投入大量的人力和物力对渠道进行集中维修。此外，为了进一步提高渠道的供水效率，作为国家 172 项重大水利工程项目，正在进行渠道二期升级改造，对整个渠道边坡进行加高，加高后的渠道设计流量比原有渠道流量增加一倍。示范工程正好结合了渠道维修与二期升级改造工程。

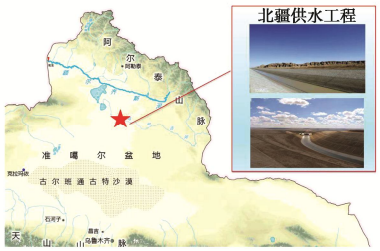


图 17 现场示范地点

Fig. 17 Demonstration place

（1）高寒区供水渠道全断面升级改造与维护示范工程

主要包括：①基于项目提出的渠道抗冻胀+水力最优断面设计理论，提出了将渠道“梯型断面”改造成“梯型+弧底断面”的设计方案，并综合运用研发的弧形渠底混凝土滑模衬砌机、多功能渠道衬砌混凝土制缝机、多功能渠道衬砌混凝土表面成型机等自主研发的设备，按照项目提出的“大型渠道混凝土机械一体化施工工法”，完成近134 km梯形渠道的抗冻弧底改造工作，如图18（a）所示。②基于研发的KS热熔胶黏接+焊接一体化连接技术，完成超过20 km长的渠道新旧防渗膜连接，如图18（b）所示。③通过研发的渗漏水高效速排技术对北疆大型供水渠道沿线71座集水井（约50 km）进行改造，如图18（c）、18（d）所示。

示范工程表明利用本项目研究提出的渠道升级改造技术可以大幅度减少高寒区渠道的冻害，极大提高渠道的供水效率与运行安全。具体体现在：①渠道冻害破坏程度显著降低。基于“冻融适变+水力最优”设计理论改造后的高寒区渠道，未见大面积冻害破坏发生，以往春秋两季“衬砌大面积维修”现象得到了根本好转。②渠堤渗漏明显缓解。运行实践表明，通过2 a的连续抽排作业，渠道“膜后水位”下降明显，其中效果显著的断面约占调查总数的70%，如图19所示，证明研究提出的渠道纵横防排体系有效保证了渠堤稳定。③通过新旧防渗膜一体化连接技术的推广应用，有效克服了常规热熔机焊接易受膜厚及环境温度影响的缺陷。经现场测试，焊接后的防渗膜接头/接缝抗拉强度可达10 kN/m以上，且经受冷温弯折后无裂纹，有效提升了新旧防渗膜结合部的防渗能力。

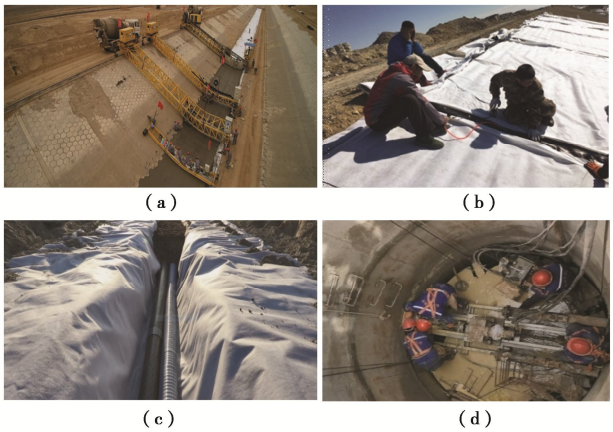


图 18 渠道全断面升级改造与维护示范工程建设

Fig. 18 Demonstration construction of canal upgrading and maintaining

（2）高寒区渠道低温输水综合示范工程

基于本项目研究提出的渠水漂浮太阳毯增温保温技术、渠基碎石桩辅热技术、渠基碎石桩辅热融冰技术，以及满足高寒环境与承载要求的渠道复合盖板保温技术，依托北疆供水工程干渠上的退水渠，建立了高寒区渠道低温输水综合示范工程，如图 20 所示。

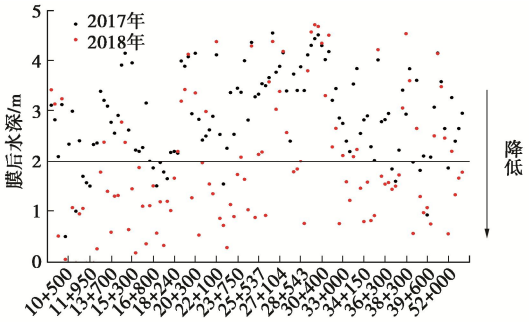


图 19　渠道沿线渠身水位变化规律

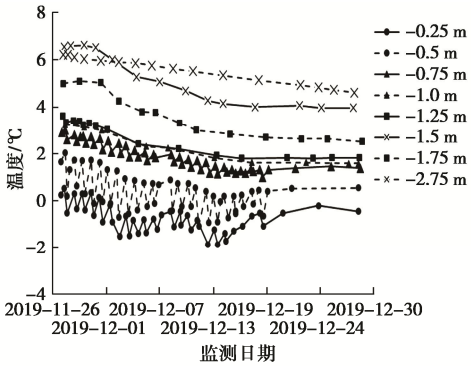
Fig. 19 Variation of water lever inside canal slope

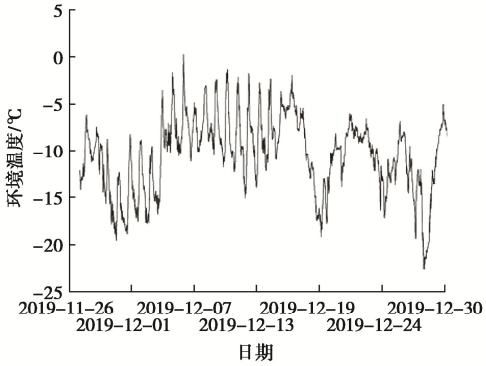


图 20　渠道低温输水综合示范工程建设

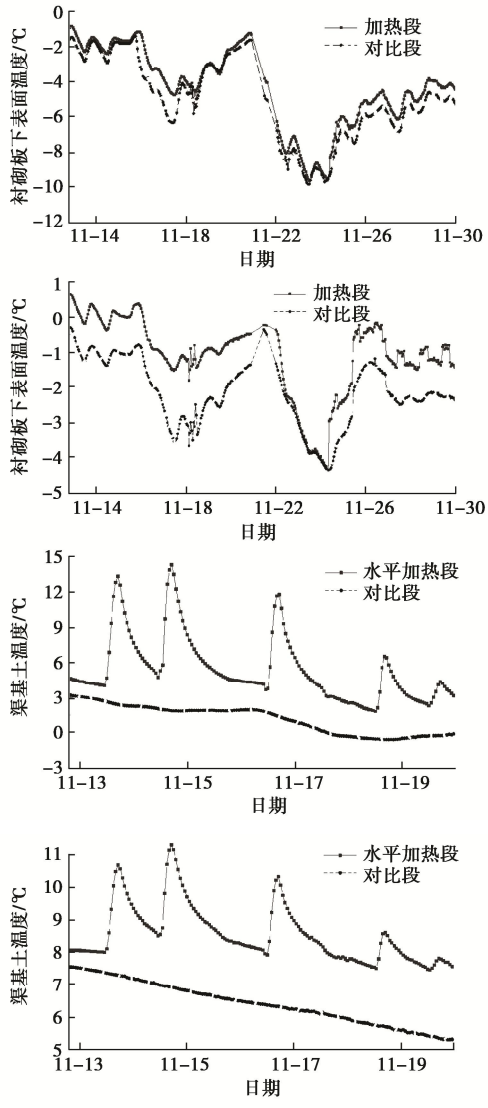
Fig. 20 Demonstration construction of dispatching technology of canals in freezing period

示范工程表明经碎石桩辅热技术处理后的渠段最大冻深为 0.75 m，较无处理渠段冻深线降低了约 25%，渠基土表层气温最大提升为 4.2℃，该示范段渠基温度监测结果如图 21（a）所示；经渠基光热蓄集技术处理后的渠段，当外部环境温度降至−23℃时，可使衬砌下渠基土表面温度维持在−5℃以上，该示范段渠基温度监测结果如图 21（b）所示；经加盖保温新结构处理后的渠段外部环境温度降至−16℃时，渠道内温度为−2.3℃，达到了加热、保温、延迟河道结冰的效果，该示范段渠道温度监测结果如图 21（c）所示；设置集肤加热融冰技术的渠道断面，可在 7 h 内将渠内结冰完全融化，该示范段渠道温度监测结果如图 21（d）所示。经长期观测，综合使用项目研发的渠道局部融冰保温技术，可确保外部环境温度在−10℃时渠水不结冰，为高寒区渠道低温输水提供了良好的技术储备。

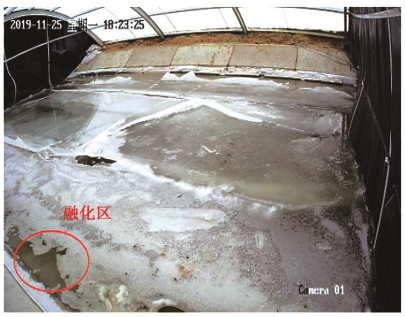


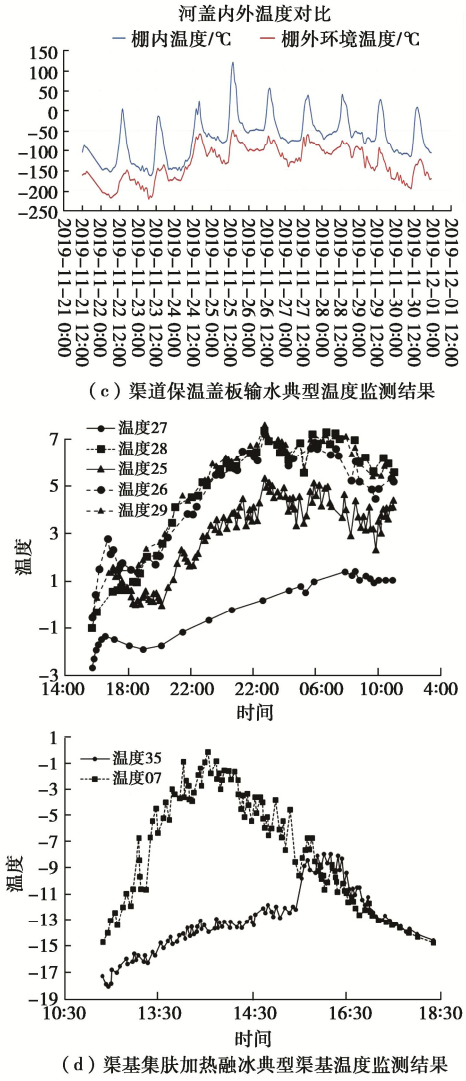


（a）渠道碎石桩辅热典型渠基温度监测结果



（b）渠基光热蓄集辅热融冰典型渠基温度监测结果





（c）渠道保温盖板输水典型温度监测结果

（d）渠基集肤加热融冰典型渠基温度监测结果

图 21 渠道低温输水示范效果

Fig. 21 Demonstration effectiveness of dispatching water in frozen period of canals

（3）高寒区渠道冻害监测与应急抢险示范工程

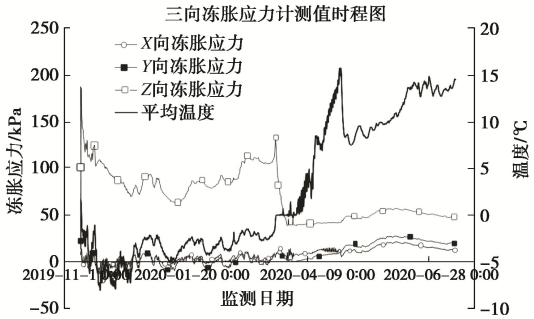
基于自主研发的渠道全断面冻胀变形和三维冻胀力监测设备，结合渠道渗漏分布式光纤测试技术，建立了总长约 1 km 的高寒区渠道安全监测预警示范断面；应用自主研发的、具有渠道隐患探测和险情检测等功能的车载式移动智能渠道健康巡检装备，对北疆大型供水渠道总干渠四个渠道断面进行了车载式移动智能健康诊断装备现场巡检示范，建立了总长约 1 km 的高寒区渠道断面健康状况数据库。运用无人机+BIM 实时藕联技术，完成了总干渠 22 km 渠道突发险情无人机应急巡检技术示范，构建了北疆渠道动态 BIM 模型，开展了渠道险情图像智能识别。在此基础上，运用多目标融合技术，集成了包括渠道风险识别、健康诊断、监测预警、应急调度与抢险技术在内的渠道三维可视化决策系统。高寒区渠道冻害监测与应急抢险示范工程如图 22 所示。



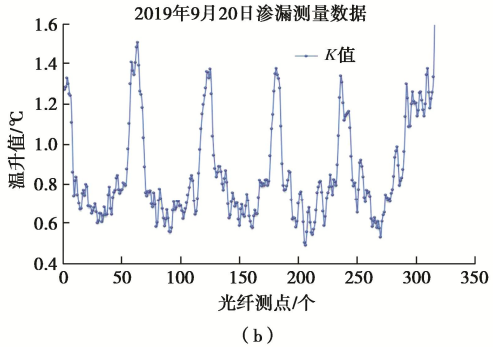
图 22 渠道冻害监测与应急抢险示范建设

Fig. 22 Demonstration construction of monitoring and emergency management of canals

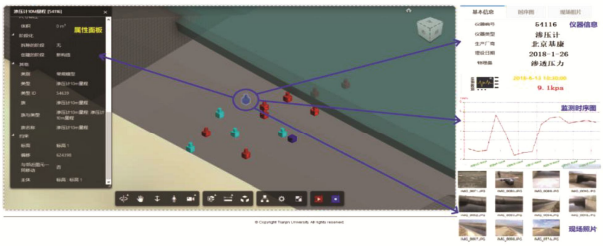
高寒区渠道安全监测预警示范表明，所研发的有关冻胀量、冻胀力量测设备能真实反映渠道的冻害特点，实现了渠道断面的二维连续变形和三向冻胀应力监测，示范段渠道冻胀力监测结果如图 23（a）所示；采用新型光纤渗漏监测技术监测现场渗漏水位，测值准确，实现了长距离渠道渗漏的连续测量，能适应高寒区现场测量条件，示范段渠道冻渗漏监测结果如图 23（b）所示。综合现场监测、车载式移动智能渠道健康巡检和突发险情无人机应急巡检，将采集的数据纳入高寒区渠道安全运行与管理决策平台，如图 23（c）所示，实现了高寒区渠道工程高效、可视、精准化管理，为复杂条件下高寒区渠道的运管决策提供了有力地科技支撑，可为工程长期运行管理提供数字化技术支持。



（a）



（b）



（c）

图 23 渠道冻害监测与应急抢险示范效果

Fig. 23 Demonstration effectiveness of monitoring and emergency management of canals

（4）高寒区渠道安全运行与管理决策平台

在上述示范工程的基础上，基于 SOA 架构进行模块化封装，集成高寒区供水渠道多源风险因素追踪和多源数据融合监测系统，研发了渠道安全运行管理决策平台，如图 24 所示。该平台涵盖了具体工程预案编号、名称、部门管辖范围等管理任务模块，同时囊括了无人机应急巡检及 BIM 藕联图像数据，以及水位、孔隙水压力、温度、冻胀变形、冻胀力等监测数据，具备多格式输出预案文档支持。该示范平台为渠道安全运行与管理决策提供了可视化集成方案。

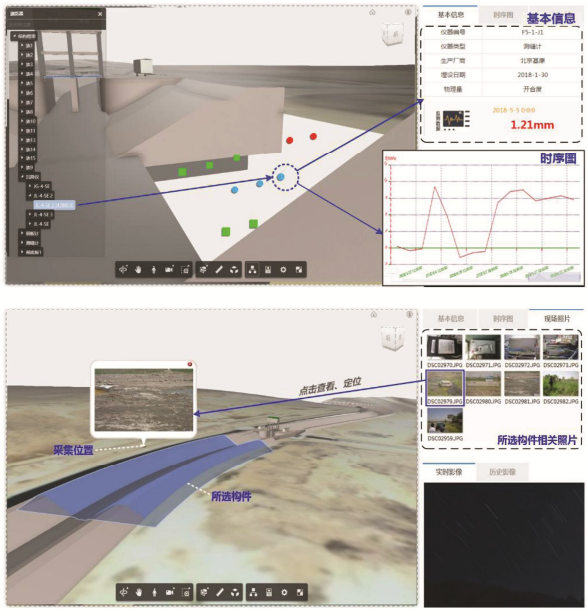


图 24 渠道安全运行与管理决策集成平台界面示意

Fig. 24 Interface of safe operation and execution of canals

寒冷地区输水工程往往肩负着沿线及区域“唯一水源”的重任，对地区社会经济的发展至关重要，是典型的“生命线”工程。本课题有关成果在北疆长距离供水渠道得到示范应用以来，升级改造后的渠道供水时间每年延长了 15～30 d 以上，关键渠段过水流量提升 4～7 m^3/s，每年增加引水量 0.84～1.3 亿 m^3，供水效率提升 25%以上，为北疆地区水资源高效利用做出了重要贡献，社会效益显著。

5　结　　语

本项目围绕高寒区长距离供水渠道能力提升与安全保障需求，以水资源高效利用为目标，以确保供水安全为宗旨，以工程防灾减灾为突破点，创建了高寒区长距离供水渠道高效运行的理论体系、技术装备和保障系统，极大提升了寒冷地区渠道的供水效率与安全管理水平，具体体现在以下 4 点。

（1）寒区渠道抗冻设计理论创新。自主研发了渠系水－热－力多场耦合数值分析模型与软件平台，研制了国内外首台能模拟渠道冻融－干湿耦合过程的超重力场试验系统，揭示了“湿—干—冻—融”循环作用下的渠基土强度衰减与结构损伤双重互馈破坏机制，创建了“水力最优+冻融适变”的渠道抗冻设计理论与方法。

（2）寒区渠道抗冻改造与冻害快速修复技术创新。提出了高寒区大型渠道抗冻改造“梯形弧底”新结构，研制了多功能衬砌混凝土制缝机、表面成型机等渠道抗冻改造与冻害快速修复成套施工装备，研发了抗冻耐盐混凝土衬砌材料和新型接缝止水材料，发明了渠道升级改造新旧防渗膜热熔胶黏接+焊接新技术。

（3）渠道低温供水冰盖运行控制理论与局部保温融冰技术创新。首次建立了渠冰生消二维模拟模型，创建了冰期水力控制数字渠道仿真系统，研发了集渠水漂浮太阳毯增温、渠基碎石桩辅热、渠道衬砌板集肤加热一体的渠道局部融冰技术，开发了渠道轻型高效复合保温盖板。

（4）寒区渠道安全监测与冻害评价理论创新。研发了渠道全断面冻胀变形和三维冻胀力监测设备，创建了分布式光纤渠道渗漏测试技术，集成创新了渠道车载智能无损健康诊断系统，开发了基于无人机+BIM 实时耦联的渠道险情应急巡检平台，首次建立了寒区渠道冻害评价模型与方法。

长距离输水工程多为 2 级以上工程。在本项目实施前，除 SL725，GB/T50600、GB50288、SL599 等标准对供水渠道安全监测工作提出了总体要求和部分专项监测要求以外，未见专门服务于寒区渠道建设与运行管理的相关技术标准。项目团队基于项目相关研究成果，充分吸纳技术应用过程中的成功经验，形成了两部团体标准:《寒冷地区渠道安全监测技术规程》《寒冷地区渠道冻害评价导则》[40-41]，为进一步适应当代高寒区渠道工程建设、管理提供了标准化方案。此外，理论研究部分涉及的关于膨胀土的自由膨胀率试验、收缩试验、膨胀力试验等试验方法纳入了《土工试验方法标准：GB/T50123—2019》。项目研究成果推动了

相关领域的标准化进程，对今后相关技术的验证、试行和推广具有重要意义。

本项目相关研究发表论文 123 篇，其中 SCI/EI 收录 64 篇；出版专著 6 部；申请国家专利 41 件，获授权专利 19 件，获得软件著作权 11 项，形成水利团体标准《寒冷地区渠道安全监测技术规程》[40]和《寒冷地区渠道冻害评价导则》[41]，部分成果编入国家标准。项目整体成果荣获 2019 年度新疆维吾尔自治区科技进步一等奖、2020 年度中国大坝工程学会科技进步特等奖、2021 年度大禹水利发明一等奖和中国农业节水科技一等奖。相关技术依托北疆大型供水渠道工程取得了良好的应用，可推广到其它寒冷地区水利、交通等重大工程建设，具有良好的应用前景。

致 谢：在此谨对参加本项目的有关单位及科研人员表示感谢。

参考文献：

[1] 蔡正银, 朱 洵, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环作用下膨胀土裂隙演化规律[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(8): 1381－1389. (CAI Zheng-yin, ZHU Xun, HUANG Ying-hao, et al. Evolution rules of fissures in expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(8): 1381－1389. (in Chinese))

[2] 蔡正银, 朱 洵, 黄英豪, 等. 冻融过程对膨胀土裂隙演化特征的影响[J]. 岩土力学, 2019, **40**(12): 4555－4563. (CAI Zheng-yin, ZHU Xun, HUANG Ying-hao, et al. Influences of freeze-thaw process on evolution characteristics of fissures in expensive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(12): 4555－4563. (in Chinese))

[3] 蔡正银, 朱 洵, 张 晨, 等. 高寒区膨胀土渠道边坡性能演变规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, **53**(1): 21－50. (CAI Zheng-yin, ZHU Xun, ZHANG Chen, et al. Performance evolution of expansive soil canal slope in high cold region[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, **53**(1): 21－50. (in Chinese))

[4] 张 晨, 朱 洵, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合作用下膨胀土裂隙发育方向性研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊 1): 234－238. (ZHANG Chen, ZHU Xun, HUANG Ying-hao, et al. Directionality of fissures in expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S1): 234－238. (in Chinese))

[5] 朱 洵, 蔡正银, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环作用下膨胀土力学特性及损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(6): 1233－1241. (ZHU Xun, CAI Zheng-yin, HUANG Ying-hao, et al. Research on mechanical properties and damage evolution law of expensive soils under the cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(6): 1233－1241. (in Chinese))

[6] 朱 洵, 蔡正银, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环及干密度对膨胀土力学特性影响的试验研究[J]. 水利学报, 2020, **51**(3): 286－294. (ZHU Xun, CAI Zheng-yin, HUANG Ying-hao, et al. Research on mechanical properties of expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw and density[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, **51**(3): 286－294. (in Chinese))

[7] 张 晨, 蔡正银, 黄英豪, 等. 输水渠道冻胀离心模拟试验[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(1): 109－117. (ZHANG Chen, CAI Zheng-yin, HUANG Ying-hao, et al. Centrifuge modelling of frost-heave of canals[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(1): 109－117. (in Chinese))

[8] 蔡正银, 张 晨, 黄英豪. 冻土离心模拟技术研究进展[J]. 水利学报, 2017, **48**(4): 398－407. (CAI Zheng-yin, ZHANG Chen, HUANG Ying-hao. A review on the development of geotechnical centrifuge modeling technique on frozen ground engineering[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, **48**(4): 398－407. (in Chinese))

[9] 张 晨, 蔡正银, 徐光明, 等. 冻土离心模型试验相似准则分析[J]. 岩土力学, 2018, **39**(4): 1236－1244. (ZHANG Chen, CAI Zheng-yin, XU Guang-ming, et al. Dimensional analysis of centrifugal modeling of frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(4): 1236－1244. (in Chinese))

[10] 黄英豪, 蔡正银, 朱 锐, 等. 季冻区渠道湿干冻融离心模拟试验设备的研制[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(7): 1181－1188. (HUANG Ying-hao, CAI Zheng-yin, ZHU Rui, et al. Development of centrifuge model test equipment for canals in seasonal frozen areas under cyclic action of wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(7): 1181－1188. (in Chinese))

[11] 蔡正银, 朱 锐, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环作用下渠道劣化过程离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(10): 1773－1782. (CAI Zheng-yin, ZHU Rui, HUANG Ying-hao, et al. Centrifugal model tests on deterioration process of canal under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(10): 1773－1782. (in

Chinese))

[12] 蔡正银, 朱　锐, 黄英豪, 等. 冻融过程对膨胀土渠道边坡劣化模式的影响[J]. 水利学报, 2020, **51**(8): 915－923. (CAI Zheng-yin, ZHU Rui, HUANG Ying-hao, et al. Influences of freeze-thaw process on the deterioration mode of expansive soil canal slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, **51**(8): 915－923. (in Chinese))

[13] LI S Y, LAI Y M, ZHANG M Y, et al. Centrifuge and numerical modeling of the frost heave mechanism of a cold-region canal[J]. Acta Geotechnica, 2019, **14**(4): 1113－1128.

[14] CAI C, MA W, ZHOU Z W, et al. Laboratory investigation on strengthening behavior of frozen China standard sand[J]. Acta Geotechnica, 2019, **14**(1): 179－192.

[15] 何鹏飞, 马　巍, 穆彦虎, 等. 冻融循环对冻土－混凝土界面冻结强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(2): 299－307. (HE Peng-fei, MA Wei, MU Yan-hu, et al. Experiment study on effects of freeze-thaw cycles on adfreezing strength at frozen soil-concrete interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(2): 299－307. (in Chinese))

[16] 江浩源, 王正中, 王　羿, 等. 大型弧底梯形渠道“适缝”防冻胀机理及应用研究[J]. 水利学报, 2019, **50**(8): 947－959. (JIANG Hao-yuan, WANG Zheng-zhong, WANG Yi, et al. Study on anti-frost heave mechanism and application of “reasonable joints” for large-size trapezoidal canal with arc-bottom[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, **50**(8): 947－959. (in Chinese))

[17] 王　羿, 王正中, 刘铨鸿, 等. 寒区输水渠道衬砌与冻土相互作用的冻胀破坏试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(10): 1799－1808. (WANG Yi, WANG Zheng-zhong, LIU Quan-hong, et al. Experimental investigations on frost damage of canals caused by interaction between frozen soils and linings in cold regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(10): 1799－1808. (in Chinese))

[18] 王　羿, 刘瑾程, 刘铨鸿, 等. 温－水－土－结构耦合作用下寒区梯形衬砌渠道结构形体优化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, **59**(8): 645－654. (WANG Yi, LIU Jin-cheng, LIU Quan-hong, et al. Shape optimization of a trapezoidal canal structure for coupled temperature-water-soil conditions in cold regions[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2019, **59**(8): 645－654. (in Chinese))

[19] 罗文灵. 浅谈北疆供水工程老旧干渠改造快速一体化施工工法[J]. 中国标准化, 2019(24): 94－95, 97. (LUO Wen-ling. Rapid integrated construction method for reconstruction of old trunk canal in North Xinjiang Water Supply Project[J]. China Standardization, 2019(24): 94－95, 97. (in Chinese))

[20] 牛尚峰, 唐世球, 陈勃文. 渠底改造机械一体化施工质量控制技术探讨[J]. 中国标准化, 2018(24): 179－180. (NIU Shang-feng, TANG Shi-qiu, CHEN Bo-wen. Quality control technology for mechanical integration construction of canal bottom reconstruction[J]. China Standardization, 2018(24): 179－180. (in Chinese))

[21] 陈勃文. 渠道混凝土嵌入式置缝机的研究与应用[J]. 水利建设与管理, 2018, **38**(2): 1－5. (CHEN Bo-wen. Research and application of channel concrete embedded sewing machine[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2018, **38**(2): 1－5. (in Chinese))

[22] 石　泉, 罗伟林. 北疆供水工程渠道排水体系升级改造一体化设备施工工法[R]. 乌鲁木齐: 新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局. (SHI Quan, LUO Wei-lin. Construction method of integrated equipment for upgrading and reconstructing channel drainage system of North Xinjiang Water Supply Project[R]. Urumqi: Xinjiang Irtysh River Basin Development Project Construction and Management Bureau. (in Chinese))

[23] 杨桂权, 贺传卿, 王怀义, 等. 土工膜黏接压膜装置: CN109940900A[P]. 2019-06-28. (YANG Gui-quan, HE Chuan-qing, WANG Huai-yi, et al. Bonding and pressing device for Geomembrance:CN109940900A [P].2019-06-28. (in Chinese))

[24] 王　羿, 王正中, 刘铨鸿, 等. 基于弹性薄层接触模型研究衬砌渠道双膜防冻胀布设[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(12): 133－141. (WANG Yi, WANG Zheng-zhong, LIU Quan-hong, et al. Double membranes cushion layout for preventing frost heave damage based on elastic thin contact model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, **35**(12): 133－141. (in Chinese))

[25] 牛尚峰, 郑贵亮, 章再兴. 渠底改造机械一体化施工机械优化及施工技术研究[J]. 工程建设与设计, 2018(23): 231－234. (NIU Shang-feng, ZHENG Gui-liang, ZHANG Zai-xing. Research on mechanic optimization and construction technology of machinery integrated construction of canal bottom reconstruction[J]. Construction & Design for Engineering, 2018(23): 231－234. (in Chinese))

[26] 郭万里, 蔡正银, 王　羿, 等. 渗漏点高度对寒区加高渠道不协调变形的影响[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊 2): 100－105. (GUO Wan-li, CAI Zheng-yin, WANG Yi, et al. Influences of height of leakage point on uncoordinated deformation of heightening canals in cold areas[J]. Chinese

Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S2): 100－105. (in Chinese))

[27] 葛建锐, 王正中, 牛永红, 等. 冰盖输水衬砌渠道冰冻破坏统一力学模型[J]. 农业工程学报, 2020, **36**(1): 90-98. －GE Jian-rui, WANG Zheng-zhong, NIU Yong-hong, et al. Elastic foundation beam unified model for ice and frost damage concrete canal of water delivery under ice cover[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, **36**(1): 90－98. (in Chinese))

[28] GUO X L, WANG T, FU H, et al. Ice-jam forecasting during river breakup based on neural network theory[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2018, **32**(3): 04018010.

[29] 王正中, 陈柏儒, 王 羿, 等. 平底抛物线形复合渠道水力最佳断面及实用经济断面统一设计方法[J]. 水利学报, 2018, **49**(12): 1460－1470. (WANG Zheng-zhong, CHEN Bai-ru, WANG Yi, et al. Design method for optimal hydraulic cross-section and practically economic cross-section of horizontal-bottomed power-law shaped canals with general exponent parameter[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, **49**(12): 1460－1470. (in Chinese))

[30] YAN X Q, ZHAO Q L, ZHAO D, et al. Experimental investigation of bending stiffness of a novel 54 m FRP space truss string bridge[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, **452**: 022103.

[31] 王正中, 王 羿, 张雪才. 一种防止寒区输水渠道冻结和蒸发的新方法: CN106544990A[P]. 2017-03-29. (WANG Zheng-zhong, WANG Yi, ZHANG Xue-cai. A new method to prevent freezing and evaporation of water conveyance channels in cold regions. CN106544990A[P]. 2017-03-29. (in Chinese))

[32] 王正中, 王 羿. 一种旱寒区防蒸发抗冻胀易结冰盖的坛形渠道断面: CN108360462B[P]. 2019-12-24. (WANG Zheng-zhong, WANG Yi. An Altar Shaped Channel Section with Anti-Evaporation, Anti-Freezing and Anti-Swelling Cover in Arid and Cold Regions. CN108360462B[P]. 2019-12-24. (in Chinese))

[33] 葛建锐, 王正中, 王 羿, 等. 一种研究渠基天热辅热热棒室内模型试验装置: CN110108861A[P]. 2019-08-09. (GE Jian-rui, WANG Zheng-zhong, WANG Yi. An indoor model test device for studying the auxiliary heating rod of channel foundation, CN110108861A[P]. 2019-08-09. (in Chinese))

[34] 许滨华, 何 宁, 何 斌, 等. 基于分布式光纤传感器的管道受弯变形监测试验研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, **40**(8): 20－30. (XU Bin-hua, HE Ning, HE Bin, et al. Experiment study on pipeline bending deformation monitoring based on distributed optical fiber sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, **40**(8): 20－30. (in Chinese))

[35] 李登华, 张桂荣, 丁 勇, 等. 高寒区长距离输水渠道光纤渗漏监测新技术研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊2): 83－87. (LI Deng-hua, ZHANG Gui-rong, DING Yong, et al. New technology of fiber leakage monitoring in long-distance water transfer channels in alpine and cold regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S2): 83－87. (in Chinese))

[36] LIU D H, CHEN J J, LI S. Collaborative operation and real-time control of roller fleet for asphalt pavement compaction[J]. Automation in Construction, 2019, **98**: 16－29.

[37] LIU D H, CHEN J J, HU D J, et al. Dynamic BIM-augmented UAV safety inspection for water diversion project[J]. Computers in Industry, 2019, **108**: 163－177.

[38] 刘东海, 胡东婕, 陈俊杰. 基于 BIM 的输水工程安全监测信息集成与可视化分析[J].河海大学学报(自然科学版), 2019, **47**(4): 337－344. (LIU Dong-hai, HU Dong-jie, CHEN Jun-jie. BIM-based integration and visualization for dynamic safety monitoring information of water diversion project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, **47**(4): 337－344. (in Chinese))

[39] 张亚琳, 刘东海, 胡东婕. 基于 D-S 理论的输水建筑物安全多准则模糊综合评价[J]. 水利水电技术, 2019, **50**(10): 104－109. (ZHANG Ya-lin, LIU Dong-hai, HU Dong-jie. D-S evidence theory-based multi-criteria fuzzy comprehensive evaluation of safety of water conveyance structure[J]. 2019, **50**(10): 104－109. (in Chinese))

[40] 寒冷地区渠道安全监测技术规程: T/CHES 40—2020[S]. 2021. (Technical Code for Monitoring Canal Safety in Cold Regions: T/CHES40—2020[S]. 2021. (in Chinese))

[41] 寒冷地区渠道冻害评价导则: T/CHES 41—2020[S]. 2021. (Guidelines for Frost Damage Evaluation of Canal in Cold Regions: T/CHES41—2020[S]. 2021. (in Chinese))

DOI：10.11779/CJGE202207006 “十三五”国家重点研发计划项目

季节冻土区非饱和膨胀土水－热－变形耦合冻胀模型

凌贤长[1]，罗 军*[2]，耿 琳[3]，唐 亮[1]

（1. 哈尔滨工业大学，黑龙江 哈尔滨 150090；2. 中国科学院力学研究所，北京 100190；3. 中国铁道科学研究院集团有限公司高速铁路轨道技术国家重点实验室，北京 100081）

摘 要：中国季节冻土区发育大面积深厚残坡积膨胀土，其特有的“冻胀融沉”“膨胀收缩”特性诱发诸多工程病害问题。针对季节冻土区非饱和膨胀土的冻胀变形机制问题，以延吉膨胀土为研究对象，开展了膨胀土冻胀特性试验研究，证明了膨胀土吸水膨胀特性对其冻胀特性有显著影响，据此提出了考虑相变动力区的非饱和膨胀土冻结－胀缩牵连机制。基于冻土多场耦合分析方法、结晶动力学理论，建立了非饱和膨胀土水－热－变形耦合冻胀模型 FH_ex_Model，并予以验证。该模型能够反演出非饱和膨胀土冻胀过程中的冻胀变形分量和膨胀变形分量。此外，根据上述研究，建议在膨胀土工程场地中应当重视初冻期冻结作用诱发的高膨胀变形，同时稳定冻深以下区域的场地变形不容忽视。



关键词：季节冻土区；非饱和膨胀土；冻胀试验；冻结－胀缩机制；多场耦合；冻胀模型

中图分类号：TU445 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2022)07－1255－11

作者简介：凌贤长(1963—)，男，博士，哈尔滨工业大学教授、博士生导师，岩土与地下工程学科带头人，黑龙江省寒区轨道工程技术研究中心主任，青岛理工大学教授、博士生导师，青岛盘垚材料工程研究院、安徽省融工博大环保技术材料研究院首席专家，俄罗斯自然科学院外籍院士。从事高铁岩土工程、岩土地震工程、寒区特殊土与冻土工程、岩土与地质灾害防控、岩土工程新材料技术等方面研究，开辟了寒区轨道交通路基动力学、矿物基类胶凝材料技术两个新的研究方向。主持国家重点研发计划、国家重大科研仪器研制项目、国家自然科学基金重点项目、应急管理部防汛抢险急需技术装备揭榜攻关项目等研究工作。出版著作 9 部，发表论文 273 篇，获得国家发明专利 83 项、软件著作权 15 项与国际发明专利 4 项，主编技术标准 5 部（完成 1 部、在编 4 部）。获得国家技术发明二等奖 1 项、省部级科技进步奖一等奖 5 项，荣获“庆祝中华人民共和国成立 70 周年”纪念章。部分成果在工程中获得较多应用并已实施产业化。E-mail: xianzhang_ling@263.net。

Coupled hydro-thermo-deformation frost heave model for unsaturated expansive soils in seasonally frozen soil regions

LING Xian-zhang[1], LUO Jun[2], GENG Lin[3], TANG Liang[1]

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China; 3. State Key Laboratory for Track Technology of High-Speed Railway, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: A large area of deep residual deluvial expansive soils is distributed in seasonally frozen soil regions in China. Its unique ‘frost heave-thaw settlement’ and ‘expansion-shrinkage’ characteristics induce many engineering diseases. Aiming at the problem of frost heave mechanism of unsaturated expansive soils in seasonally frozen soil regions, taking Yanji expansive soil as the object, the experimental studies on the frost heave characteristics of expansive soils are carried out, and it is proved that the expansion characteristics of the expansive soils due to water absorption have a significant influence on its frost heave characteristics. Then the freezing-swelling/shrinkage mechanism of unsaturated expansive soils considering the phase change kinetic area is put forward. Based on the multi-field coupling analysis method of frozen soils and the theory of crystallization kinetics, the coupled hydro-thermo-deformation frost heave model for unsaturated expansive soils, named FH_ ex_ Model,

基金项目：国家自然科学基金重点项目（41430634）；国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目（41627801）；国家重点研发计划项目（2018YFC1505305）

收稿日期：2022－03－05

*通信作者（E-mail: luojun@imech.ac.cn）

is established and verified. The proposed model can inverse the frost-heave deformation component and the expansion deformation component in the frost heave process of unsaturated expansive soils. In addition, according to the above researches, it is suggested that attention should be paid to the high freezing-induced expansion deformation in the initial freezing period in the expansive soil engineering site, and the deformation in the area below the stable freezing depth should not be ignored.

Key words: seasonally frozen soil region; unsaturated expansive soil; frost heave test; freezing-induced swelling and shrinkage mechanism; multi-physical field coupling; frost heave model

0 引 言

中国是世界第三冻土大国，季节冻土的分布面积达 5.14×10^6 km^2，冻深超过 1.5 m 且对工程有严重影响的深季节冻土面积达 3.67×10^6 km^2，中国又是膨胀土分布最为广泛的国家之一，以南方膨胀土居多，涵盖 20 多个省、市、自治区。自从 2014 年以来，随着东北地区高速铁路工程建设的快速发展及西北高寒区供水工程的建设，大量工程实践和病害调查表明，在中国季节冻土区发育大面积深厚残坡积膨胀土，致使一些重大工程在施工和运行期间受到不同程度病害问题的影响，譬如长珲高铁沿线膨胀土路堑边坡出现浅层滑坡和抗滑桩倾斜，黑龙江省北部引嫩总干渠乌北段发生冻融滑坡，北疆膨胀土区域渠坡发生严重破坏等[1-3]。上述病害的发生与季节冻土区膨胀土的“冻胀－融沉”及“膨胀－收缩”特性密切相关，是季节冻融环境多因素耦合作用下膨胀土性能劣化与变形的必然结果。由于季节冻土区气候特点显著，降水和地下水较丰富，部分地区极端气温可达到−40℃，使得该区域膨胀土的冻融、胀缩特性十分突出。因此，有必要建立季节冻土区非饱和膨胀土的冻胀模型，以描述季冻区膨胀土的冻胀变形机制，为灾害分析和控制提供必要的理论依据。

徐丽丽等[4]研制了适用于膨胀土的土体膨胀冻胀联合测试装置，对膨胀土在常温下充分补水达最大变形后，开展冻胀测试。程旭东[5]研究了饱和延吉膨胀土的冻胀特性与冻胀模型，试验中限制了饱和阶段膨胀土的变形。Luo 等[6]研究了非饱和中等膨胀性膨胀土的冻胀特性。朱杰等[7]研究了淮南膨胀土的冻胀融沉特性。景鑫[8]研究了非饱和膨润土改性黏土的一维冻融效应。上述研究对膨胀土冻胀变形机制的揭示有一定的指导作用。

过去，国内外学者针对非饱和土冻胀模型开展了部分研究工作。Li 等[9]构建了非饱和冻土的理论模型框架。Guymon 等[10]开发了可以模拟非饱和冻融土水热运移和冻胀融沉现象的模型 FROSTB。Liu 等[11]建立了考虑基质吸力效应的能够描述非饱和多孔材料冻结行为的多场耦合模型。Yin 等[12]研究了非饱和冻土中水、汽、应力和热的耦合传输问题，考虑基质吸力的作用效应，对饱和土压缩模量进行修正，以描述非饱和冻土的应力应变特性。上述模型多用于黏土或粗粒土冻胀变形的模拟，不适用于模拟非饱和膨胀土的冻胀变形，尤其是不能反映“湿胀－干缩”特性的对膨胀土冻胀特性的影响。

因此，本文以长珲高铁沿线延吉膨胀土为研究对象，开展不同土体类型、初始含水率条件下的冻胀试验，揭示典型膨胀土的冻胀特性。据此，提出非饱和膨胀土的“冻结－胀缩牵连机制”。基于冻土多场耦合分析方法，建立非饱和膨胀土水－热－变形耦合冻胀模型 FH_ex_Model 并予以验证，解耦出非饱和膨胀土冻结过程中的冻胀分量与膨胀分量。

1 典型膨胀土冻胀特性试验

1.1 试验设计

以延吉膨胀土为研究对象，哈尔滨粉质黏土为参照，开展无荷载单向冻胀试验，试样的物理性质见图 1 和表 1。准样时，将膨胀土与一定量的蒸馏水充分混合，恒温密封 24 h。冻胀试验试样高度 100 mm，直径 102 mm，分 5 层压实。试验中采用蒸馏水进行开放系统补水，马氏瓶控制无压水位于试样底部以上 3 mm 处，膨胀土冻胀试验系统详见图 2[6]。表 2 所示是冻胀试验工况，E1、E2 为不同初始含水率，E1、S1 为不同类型土样，冻结时间大于 72 h。

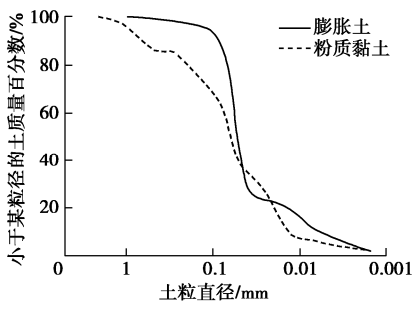


图 1 膨胀土和粉质黏土级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curves of expansive soil and silty clay soil

表 1 土样物理性质指标

Table 1 Physical properties of test soils

指标	最大干密度 $\rho_{d,max}$ /(kg·m^{-3})	相对质量密度 G_s	液限 w_L /%	塑限 w_P /%	自由膨胀率 F_S /%
膨胀土	1660	2.63	53.4	38.4	60
粉质黏土	1910	2.75	29.8	18.2	0

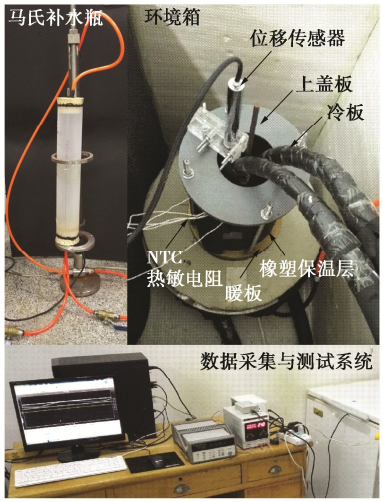


图 2 膨胀土冻胀试验系统

Fig. 2 Frost-heave test system of expansive soils

表 2 单向冻胀试验工况

Table 2 One-dimensional frost-heave test conditions of soils

工况	初始质量含水率/%	暖端温度/℃	冷端温度/℃
E1	21	1.8	−5
E2	27	1.8	−5
S1	21	1.8	−5

1.2 试验结果分析

由工况 E1 和工况 S1 可知，膨胀土和粉质黏土的初始质量含水率相同，对应的土体饱和度分别为 64% 和 83%，这表明试验初期膨胀土试样的原位冻胀量应当小于粉质黏土。然而在冻结开始的前 3.4 h 内，膨胀土的冻胀量达到 2.8 mm（图 3 中 *A* 点），而粉质黏土出现了 0.36 mm 的收缩变形（图 3 中 *B* 点）。该现象表明，冻结初期非饱和膨胀土的主要变形来源于冻结效应引起水分迁移所带来的未冻区吸水膨胀。

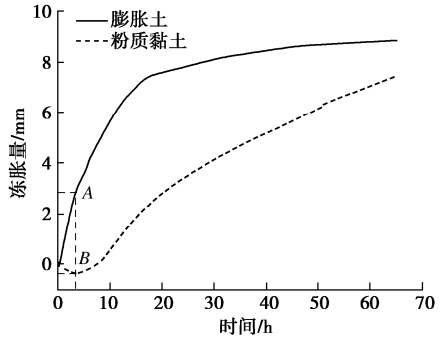


图 3 膨胀土和粉质黏土试样冻胀量时程

Fig. 3 Time histories of frost heave amount of expansive clay and silty clay samples

由图 4 可知，在冻结开始的前 5 h 内，初始含水率较低的试样冻胀变形量较大，且工况 E2 与 E1 的差距不断增大。这是由于冻结初期试样的初始含水率较低，黏土矿物具有较高的水分吸附能力，这一阶段黏土矿物引起的膨胀变形占主导。在 5～25 h 间，工况 E2 与 E1 的差距不断减小，是因为随着水分迁移作用的持续发生，未冻结区域的含水率显著增加，黏土矿物的膨胀效应弱化。在 25 h 后（图 4 中 *C* 点），高初始含水率试样的冻胀量超过低含水率试样，冰分凝作用引起的冻胀变形占主导地位。

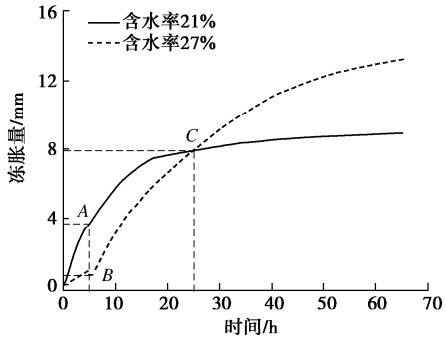


图 4 不同初始含水率膨胀土试样冻胀量时程

Fig. 4 Time histories of frost-heave amount of expansive clay samples with different initial mass water contents

由图 5 可知，根据第二冻胀理论，膨胀土的冷生构造包括 4 个区域，即原位冻结区、冰分凝区、冻结缘和未冻结区。与粉质黏土相比，膨胀土的冰分凝区较大，层状冰透镜体并不发育。由此可知，膨胀土的冻胀变形来源于较大冰分凝区域内的迁移冻胀和黏土矿物膨胀。冰透镜体生长带来的体积变化相对较小。

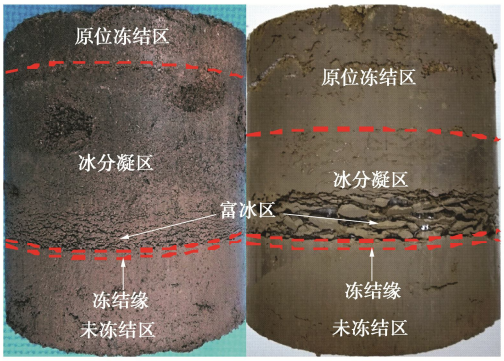


图 5 非饱和膨胀土(左)和粉质黏土(右)的冷生构造(Luo 等，2018)[6]

Fig. 5 Cryostructures of unsaturated expansive clay (left) and silty clay (right) (Luo et al., 2018)[6]

2 膨胀土冻结－胀缩牵连机制

根据 1.2 节的试验分析，在非饱和膨胀土的冻结过程中，土体孔隙的变化过程可归纳为 4 个阶段，即

未冻结阶段（阶段Ⅰ）、孔隙冰少量出现和黏土矿物大量膨胀阶段（阶段Ⅱ）、孔隙冰大量生长和黏土矿物少量膨胀阶段（阶段Ⅲ），及并不显著的冰透镜体持续生长阶段（阶段Ⅳ），见图 6。在阶段Ⅱ、Ⅲ中，黏土矿物的膨胀由冻结引起的水分迁移导致，而黏土矿物的收缩则源于冻结区未冻含水量的减少。

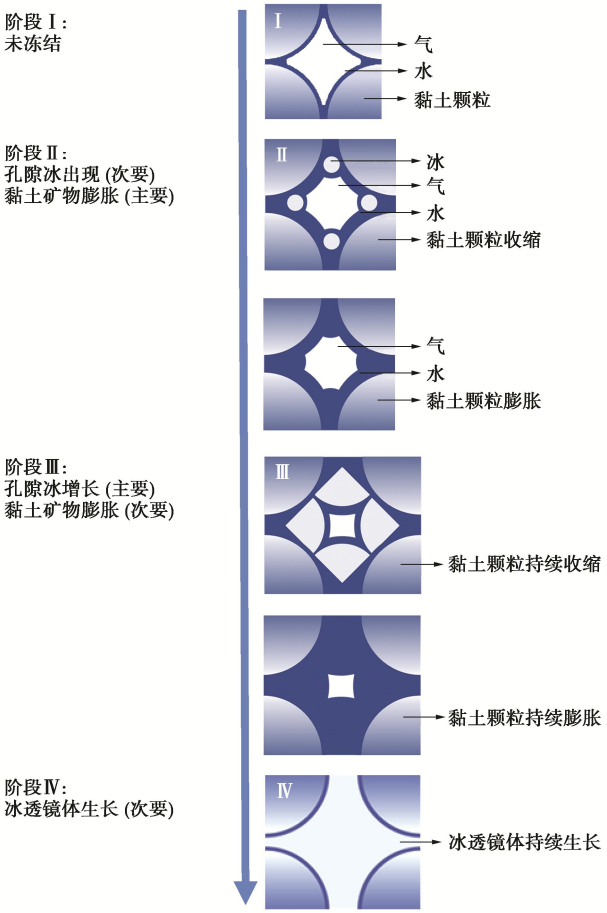


图 6 膨胀土不同冻胀阶段的孔隙环境

Fig. 6 Pore environment of expansive soils at different stages of frost heave

在第二冻胀理论中，普遍认为冰透镜体暖端和冻结锋面之间存在冻结缘，对于孔隙冰的分凝和抑制水分迁移进入上层已冻土具有重要影响。但是，从非饱和膨胀土冷生构造情况可知，由于层状冰透镜体的构造特征并于显著，冻结缘的准确位置很难确定，并且非饱和状态下膨胀土中冻结缘存在与否尚不明确。因此，冻结锋面以上一定区域内孔隙冰的生长如何考虑是一个问题。在此，借鉴 Bronfenbrener[13]提出了“相变动力区”的概念，假定土体中冻结锋面之上存在一个孔隙冰生长相对活跃的相变动力区，根据晶体生长理论，采用非平衡相变一级动力学模型描述该区域发生的结晶过程。因此，可以假定在非饱和膨胀土的冻结锋面之上同样存在一个孔隙冰生长活跃的“相变动力区”，该区域对非饱和膨胀土的水－热－变形耦合效应具有重要影响。

根据非饱和膨胀土孔隙变化过程和“相变动力区”的概念，提出非饱和膨胀土的“冻结－胀缩牵连机制”，见图 7。图中所示是非饱和膨胀土在开放系统冻结条件下不同时刻试样断面的温度、孔压、变形变化过程，①、②、③代表非饱和冻结过程中的 3 个主要阶段，红色区域为相变动力区所在位置。

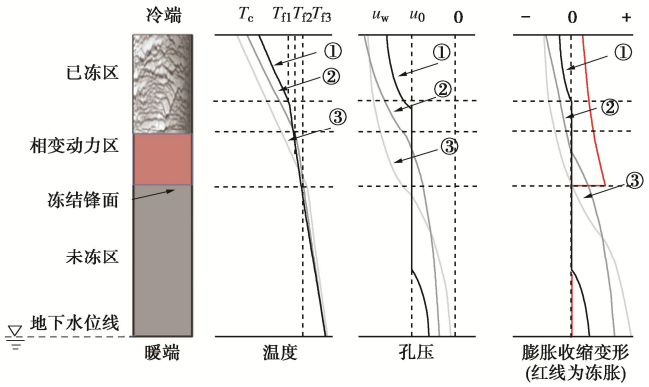


图 7 开放系统非饱和膨胀土冻胀与膨胀收缩机制[19]

Fig. 7 Frost heave and swelling-shrinkage mechanism of unsaturated expansive clay in open system[19]

在温度方面，孔隙水的冻结点，即 T_{f1}，T_{f2}，T_{f3}，随非饱和膨胀土冻结过程的发展逐渐升高且趋于饱和膨胀土的冻结点。在孔隙水压力方面，冻结锋面以上已冻区的孔压逐渐减小且趋于一稳定的负值，试样暖端的孔压趋于 0，未冻结区域的孔压逐渐增大。基于温度场和水分场的变化情况，在开放系统条件下，冻结区内未冻水含量迅速减少，孔隙冰不断生产，膨胀土体产生少量的收缩变形。在未冻结区内，随含水率的增加，膨胀土吸水膨胀，且膨胀作用逐渐减弱。当冻结锋面发展至已吸水膨胀的未冻结区域时，新冻结土体会同时发生较大的冻胀和微弱的收缩。因此，在非饱和膨胀土的冻结过程中，土体各个区域不断经历着膨胀、冻胀、收缩等多个作用效应。

3 控制方程

3.1 基本假定

本文针对季节冻土区气候环境作用下近地表范围内的中、弱膨胀土冻胀问题，建立能够考虑膨胀土“冻结－胀缩牵连机制”的水－热－变形耦合冻胀模型，基本假定如下：①孔隙气相连续且与大气连通；②忽略冻胀过程中未冻结区全区域的固结效应；③不考虑温度变化引起的膨胀土骨架变形；④不考虑冻结缘的存在与否和冰透镜体的判别与生长，通过结晶动力学模型对相变动力区的晶体生长进行计算，当含水率超

过 85%时发生起始冻胀；⑤冻结非饱和膨胀土的渗透系数为其非饱和渗透系数与冰阻碍因子的乘积；⑥未冻区的水分迁移遵守达西定律，不考虑已冻土区的水分迁移和孔隙中的气态水的运移；⑦忽略非饱和膨胀土孔隙水滞回效应对土水特征曲线和体积变形的影响；⑧假定冻结土体中同一位置不会同时发生冻胀和膨胀收缩效应；⑨膨胀土体是各向同性的非线性弹性体。

3.2　质量守恒方程

将非饱和膨胀土考虑为由土颗粒、未冻水、孔隙冰、孔隙气构成的四相介质，见图 8。基于体积分数混合物理论，不计入孔隙气的质量，各相密度如下：

$$\left.\begin{aligned}&\rho_{\mathrm{s}}(x,t)=(1-n)\rho^{\mathrm{s}}\ ,\\&\rho_{\mathrm{w}}(x,t)=(\theta-\theta_{\mathrm{i}})\rho^{\mathrm{w}}\ ,\\&\rho_{\mathrm{i}}(x,t)=\theta_{\mathrm{i}}\rho^{\mathrm{i}}\ ,\\&\rho_{\mathrm{a}}(x,t)=0\ 。\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

式中，ρ_{s}，ρ_{w}，ρ_{i}，ρ_{a} 分别为非饱和膨胀土各相的体积密度，ρ^{s}，ρ^{w}，ρ^{i}，ρ^{a} 分别为非饱和膨胀土各相的真实密度，n 为孔隙率，θ 为孔隙冰和未冻水的总体积分数，θ_{i} 为体积含冰率。

因此，非饱和膨胀土的总体积密度如下：

$$\begin{aligned}\rho&=\rho_{\mathrm{s}}+\rho_{\mathrm{w}}+\rho_{\mathrm{i}}+\rho_{\mathrm{a}}\\&=(1-n)\rho^{\mathrm{s}}+(\theta-\theta_{\mathrm{i}})\rho^{\mathrm{w}}+\theta_{\mathrm{i}}\rho^{\mathrm{i}}\quad 。\end{aligned}\tag{2}$$

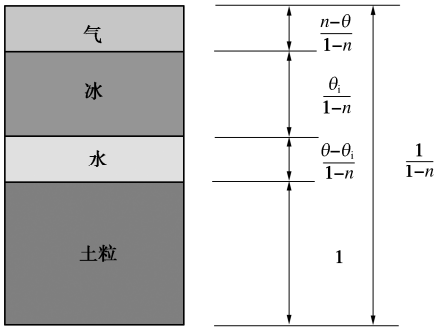


图 8 四相多孔介质的平均体积单元(AVE)与各相的体积分数

Fig. 8 Average volume element (AVE) $\mathrm{d}\Omega$ of a porous medium consisting of four constituents and their volume fraction

对于相对于 α 相的运动质点，任一可微函数 $f_\alpha(x,t)$ 时间导数的空间描述为

$$\frac{\mathrm{d}^{\alpha}f_{\alpha}}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial f_{\alpha}}{\partial t}+V_j^{\alpha}\frac{\partial f_{\alpha}}{\partial x_j}\quad ,\tag{3}$$

式中，f_α 为与 α 相有关的函数，V_j^{α} 为土粒和 α 相的速度。

对于任意量的体积积分而言，有如下关系：

$$\frac{\mathrm{d}^{\alpha}}{\mathrm{d}t}\left(\int_{\Omega_t}f_{\alpha}\mathrm{d}\Omega_t\right)=\int_{\Omega_t}\left[\frac{\partial f_{\alpha}}{\partial t}+\frac{\partial(f_{\alpha}V_j^{\alpha})}{\partial x_j}\right]\mathrm{d}\Omega_t\quad 。\tag{4}$$

根据质量守恒定律，在 Δt 时间内，平均体积单元内存在两种作用，一是由于冰水相变作用引起的密度变化，二是冰水迁移作用对平均体积单元的影响。因此，在不考虑土骨架变形的情况下，平均体积单元中冰相和未冻水相分别满足如下关系：

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\mathrm{d}^{\mathrm{w}}}{\mathrm{d}t}\left(\int_{\Omega_t}\rho_{\mathrm{w}}\mathrm{d}\Omega_t\right)=-\dot{m}_{\mathrm{w}\to\mathrm{i}}\ ,\\&\frac{\mathrm{d}^{\mathrm{i}}}{\mathrm{d}t}\left(\int_{\Omega_t}\rho_{\mathrm{i}}\mathrm{d}\Omega_t\right)=\dot{m}_{\mathrm{w}\to\mathrm{i}}\ ,\end{aligned}\right\}\tag{5}$$

式中，Ω_t 为平均体积单元计算域，$\dot{m}_{\mathrm{w}\to\mathrm{i}}$ 为水相变成冰的质量转化率。

将式（5）中两项求和并根据式（4），得到质量守恒方程的局部形式如下：

$$\frac{\partial\rho_{\mathrm{w}}}{\partial t}+\frac{\partial\rho_{\mathrm{i}}}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_{\mathrm{w}}V_j^{\mathrm{w}})}{\partial x_j}+\frac{\partial(\rho_{\mathrm{i}}V_j^{\mathrm{i}})}{\partial x_j}=0\quad 。\tag{6}$$

通常，在饱和冻土的刚性冰模型中会考虑冰的迁移速率 V_j^{i}，而在非饱和膨胀土冻胀模型中，由于冰与土颗粒的相对速度比未冻水与土颗粒的相对速度小很多且不在一个数量级上。因此，本文假定 V_j^{i}=0。记 $\theta_{\mathrm{u}}=\theta-\theta_{\mathrm{i}}$，$\rho_{\mathrm{w}}V_j^{\mathrm{w}}=\rho^{\mathrm{w}}v_j^{\mathrm{w}}$，将式（1）代入式（6）改写为

$$\frac{\partial\theta_{\mathrm{u}}}{\partial t}+\frac{\rho^{\mathrm{i}}}{\rho^{\mathrm{w}}}\frac{\partial\theta_{\mathrm{i}}}{\partial t}+\frac{\partial v_j^{\mathrm{w}}}{\partial x_j}=0\quad ,\tag{7}$$

式中，v_j^{w} 为 Euler 坐标系下孔隙水的渗流速率。

孔隙水运移符合达西定律且满足各向同性：

$$v^{\mathrm{w}}=-K_{\mathrm{H}}(\theta_{\mathrm{u}})\frac{\partial h}{\partial x}\quad ,\tag{8}$$

式中，$K_{\mathrm{H}}(\theta_{\mathrm{u}})$ 为非饱和膨胀土渗透系数，h 为孔隙水压力水头，在非饱和土中，当仅考虑基质吸力势时，取 $h=u_{\mathrm{a}}-u_{\mathrm{w}}$，当孔隙气压力等于大气压力时，$h=-u_{\mathrm{w}}$。

式（8）代入式（7）即为

$$\frac{\partial\theta_{\mathrm{u}}}{\partial t}+\frac{\rho^{\mathrm{i}}}{\rho^{\mathrm{w}}}\frac{\partial\theta_{\mathrm{i}}}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(K_{\mathrm{H}}(\theta_{\mathrm{u}})\frac{\partial h}{\partial x_j}\right)\quad 。\tag{9}$$

为模拟渗透系数随孔隙冰增长而急剧降低的现象，将冻结非饱和膨胀土的渗透系数定义为与其未冻水含量相同的未冻结非饱和土渗透系数与阻抗因子的乘积。本文采用的阻抗因子形式如下[10]：

$$I=10^{-E\theta_{\mathrm{i}}}=10^{-\left[\frac{5}{4}(K_{\mathrm{s}}-3)^2+6\right]\theta_{\mathrm{i}}}\quad ,\tag{10}$$

式中，K_{s} 为饱和渗透系数。

因此，式（9）即为

$$\frac{\partial\theta_{\mathrm{u}}}{\partial t}+\frac{\rho^{\mathrm{i}}}{\rho^{\mathrm{w}}}\frac{\partial\theta_{\mathrm{i}}}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(10^{-E\theta_{\mathrm{i}}}\cdot K_{\mathrm{H}}(\theta_{\mathrm{u}})\frac{\partial h}{\partial x_j}\right)\quad 。\tag{11}$$

3.3 能量守恒方程

在非饱和膨胀土冻结过程中，热传导是其主要热量传递形式，本文不考虑气相对流热和源汇相等因素的影响。由于土颗粒、孔隙冰、未冻水相的动能相对于系统的其他能量而言十分微小，在此不作考虑。同时，由于质量守恒方程中未考虑孔隙冰的迁移，因此在能量守恒方程中不考虑与孔隙冰迁移相关的热通量。此外，不考虑土骨架改变引起的能量变化。基于上述，对于土颗粒－未冻水－孔隙冰相系统而言，能量守恒关系如下：

$$\frac{\mathrm{d}^{\mathrm{s}}}{\mathrm{d}t}\left(\int_{\Omega_t}\rho_{\mathrm{s}}e_{\mathrm{s}}\mathrm{d}\Omega_t\right)+\frac{\mathrm{d}^{\mathrm{w}}}{\mathrm{d}t}\left(\int_{\Omega_t}\rho_{\mathrm{w}}e_{\mathrm{w}}\mathrm{d}\Omega_t\right)+\frac{\mathrm{d}^{\mathrm{i}}}{\mathrm{d}t}\left(\int_{\Omega_t}\rho_{\mathrm{i}}e_{\mathrm{i}}\mathrm{d}\Omega_t\right)=\int_{\Omega_t}\left(\Delta e_{\mathrm{w}\to\mathrm{i}}+\frac{\partial q_j^{\mathrm{w}}}{\partial x_j}\right)\mathrm{d}\Omega_t \quad 。 \tag{12}$$

式中 e_{s}，e_{w}，e_{i} 分别为土颗粒、未冻水、孔隙冰的比内能，$\Delta e_{\mathrm{w}\to\mathrm{i}}$ 为水相变成冰产生的相变热。q_j^{w} 为孔隙水的热通量。

根据式（3），且 V_j^{s} 和 V_j^{i} 为 0，则能量守恒方程的局部形式如下：

$$\frac{\partial\rho_{\mathrm{s}}e_{\mathrm{s}}}{\partial t}+\frac{\partial\rho_{\mathrm{w}}e_{\mathrm{w}}}{\partial t}+\frac{\partial\rho_{\mathrm{i}}e_{\mathrm{i}}}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_{\mathrm{w}}e_{\mathrm{w}}V_j^{\mathrm{w}})}{\partial x_j}=\Delta e^{\mathrm{w}\to\mathrm{i}}+\frac{\partial q_j^{\mathrm{w}}}{\partial x_j}。 \tag{13}$$

土颗粒、未冻水、孔隙冰的比内能计算如下：

$$\left.\begin{aligned}e_{\mathrm{s}}&=C^{\mathrm{s}}T\ ,\\ e_{\mathrm{w}}&=C^{\mathrm{w}}T\ ,\\ e_{\mathrm{i}}&=C^{\mathrm{i}}T\ ,\end{aligned}\right\} \tag{14}$$

式中，C^{s}，C^{w}，C^{i} 分别为土颗粒、未冻水、孔隙冰的质量比热容。体积比热容与质量比热容的关系和冻结土体平均热容如下：

$$\left.\begin{aligned}C^{\mathrm{vs}}&=\rho^{\mathrm{s}}C^{\mathrm{s}}\ ,\\ C^{\mathrm{vw}}&=\rho^{\mathrm{w}}C^{\mathrm{w}}\ ,\\ C^{\mathrm{vi}}&=\rho^{\mathrm{i}}C^{\mathrm{i}}\ ,\\ C_{\mathrm{m}}^{\mathrm{v}}&=(1-n)C^{\mathrm{vs}}+\theta_{\mathrm{u}}C^{\mathrm{vw}}+\theta_{\mathrm{i}}C^{\mathrm{vi}}\ ,\end{aligned}\right\} \tag{15}$$

式中，C^{vs}，C^{vw}，C^{vi} 分别为土颗粒、未冻水、孔隙冰的体积比热容。

水相变成冰产生的相变热 $\Delta e_{\mathrm{w}\to\mathrm{i}}$ 定义如下：

$$\Delta e_{\mathrm{w}\to\mathrm{i}}=H_{\mathrm{f}}\frac{\partial\theta_{\mathrm{i}}}{\partial t} \tag{16}$$

式中，H_{f} 为单位体积相变热。

未冻结孔隙水的热传导作用遵守傅里叶定律，因此 q^{w} 定义如下：

$$q^{\mathrm{w}}=\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\quad , \tag{17}$$

式中，λ 为土体的热传导系数（J/m³）。

热传导系数依据各相的体积分数计算如下：

$$\lambda=\lambda^{\mathrm{s}}\theta_{\mathrm{s}}+\lambda^{\mathrm{w}}\theta_{\mathrm{u}}+\lambda^{\mathrm{i}}\theta_{\mathrm{i}}\quad 。 \tag{18}$$

将式（14）～（18）代入式（13），能量守恒方程如下：

$$C_{\mathrm{m}}^{\mathrm{v}}\frac{\partial T}{\partial t}+C^{\mathrm{vw}}\frac{\partial(Tv_j^{\mathrm{w}})}{\partial x_j}=H_{\mathrm{f}}\frac{\partial\theta_{\mathrm{i}}}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x_j}\right)。 \tag{19}$$

3.4 静力平衡方程

对于非饱和膨胀土的平均体积单元，在域 Ω_{t} 内，各相间满足力矩平衡：

$$\frac{\mathrm{d}^{\mathrm{s}}}{\mathrm{d}t}\left(\int_{\Omega_t}\rho_{\mathrm{s}}V_j^{\mathrm{s}}\mathrm{d}\Omega_t\right)+\frac{\mathrm{d}^{\mathrm{w}}}{\mathrm{d}t}\left(\int_{\Omega_t}\rho_{\mathrm{w}}V_j^{\mathrm{w}}\mathrm{d}\Omega_t\right)+\frac{\mathrm{d}^{\mathrm{i}}}{\mathrm{d}t}\left(\int_{\Omega_t}\rho_{\mathrm{i}}V_j^{\mathrm{i}}\mathrm{d}\Omega_t\right)=\int_{\Omega_t}\rho f_j(x_j,t)\mathrm{d}\Omega_t+\int_{\partial\Omega_t}T_j(x_j,t,n_j)\mathrm{d}a\quad , \tag{20}$$

式中，f_j 为体力密度，T_j 为面力密度。

根据式（3）可知：

$$a_j^{\alpha}=\frac{\partial V_j^{\alpha}}{\partial t}+V_k^{\alpha}\frac{\partial V_j^{\alpha}}{\partial x_k}\quad , \tag{21}$$

式中，a_j^{α} 为 α 相的加速度。

根据四面体引理和 Cauchy 应力张量，面力密度 T_j 为

$$T_j(x_j,t,n_j)=\sigma_{ij}n_j\quad , \tag{22}$$

根据式（21）和式（22），式（20）即

$$\int_{\Omega_t}(\rho_{\mathrm{s}}a_j^{\mathrm{s}}+\rho_{\mathrm{w}}a_j^{\mathrm{w}}+\rho_{\mathrm{i}}a_j^{\mathrm{i}})\mathrm{d}\Omega_t=\int_{\Omega_t}\rho f_j(x_j,t)\mathrm{d}\Omega_t+\int_{\partial\Omega_t}\sigma_{ij}n_j\mathrm{d}a\quad 。 \tag{23}$$

根据散度定理，由式（23）得到静力平衡方程的局部形式如下：

$$\frac{\partial\sigma_{ij}}{\partial x_j}+\rho f_j(x_j,t)=\rho_{\mathrm{s}}a_j^{\mathrm{s}}+\rho_{\mathrm{w}}a_j^{\mathrm{w}}+\rho_i a_j^{\mathrm{i}}\quad 。 \tag{24}$$

不考虑土颗粒、未冻水、孔隙冰的惯性力作用，式（24）可写为

$$\frac{\partial\sigma_{ij}}{\partial x_j}+\rho f_j=0\quad 。 \tag{25}$$

对于一维重力作用下的冻结非饱和膨胀土的静力平衡问题，式（25）可简化为

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}z}-\gamma(n,\theta,\theta_{\mathrm{i}})=0\quad , \tag{26}$$

式中，σ 为土体的总应力，γ 为土体的单位重度，按照下式计算：

$$\gamma(n,\theta,\theta_{\mathrm{i}})=\rho g=\left[(1-n)\rho^{\mathrm{s}}+\theta_{\mathrm{u}}\rho^{\mathrm{w}}+\theta_{\mathrm{i}}\rho^{\mathrm{i}}\right]g\quad 。 \tag{27}$$

根据非饱和土 Bishop 有效应力原理[14]，得到非饱和膨胀土总应力、有效应力、基质吸力的关系如下：

$$\sigma=\sigma'-\chi h\quad , \tag{28}$$

式中，σ 为总应力，σ' 为有效应力，h 为孔隙水压力水头，χ 为孔隙水压力作用的面积分数。

在小应变范围下，采用 Yin 等[12]提出的非饱和土有效应力－应变关系：

$$\mathrm{d}\sigma' = -\chi E_{\mathrm{sf}} \mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{e}} \quad , \tag{29}$$

式中，E_{sf} 为考虑了负温影响的压缩模量。

非饱和膨胀土土体结构的应变－位移方程如下：

$$\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{n - n_0}{1 - n} \quad , \tag{30}$$

式中，ε_z 为 z 方向的土体总应变，u_z 为土体在 z 方向的位移。

在 z 方向上，膨胀土的总应变 ε_z 由加卸载引起的土骨架弹性应变 ε_{e}，冻胀、融沉引起的应变 $\varepsilon_{\mathrm{FT}}$，黏土矿物吸水膨胀、失水胀缩引起的应变 $\varepsilon_{\mathrm{swelling/shrinkage}}$ 三部分组成：

$$\mathrm{d}\varepsilon_z = \mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{e}} + \mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{FT}} + \mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{swelling/shrinkage}} \quad 。 \tag{31}$$

冻胀融沉引起的应变 $\varepsilon_{\mathrm{FT}}$ 定义如下：

$$\varepsilon_{\mathrm{FT}} = \theta_{\mathrm{i}} - (n - \theta_{\mathrm{u}}) \quad 。 \tag{32}$$

根据 Briaud 实用模型[15]，计算黏土矿物吸水膨胀、失水胀缩引起的应变 $\varepsilon_{\mathrm{swelling/shrinkage}}$，定义如下：

$$\left.\begin{aligned} &\varepsilon_{\mathrm{swelling/shrinkage}} = f\frac{\Delta w}{E_{\mathrm{w}}} = f\frac{\theta_{\mathrm{u}} - \theta_0}{E_{\mathrm{w}}\rho_{\mathrm{s}}} \ , \\ &E_{\mathrm{w}} = \Delta w / (\Delta V / V_0) \ , \\ &f = (\Delta H / H_0) / (\Delta V / V_0) \ , \end{aligned}\right\} \tag{33}$$

式中　θ_0 为初始体积含水率；ΔH 为 t 时刻土样的高度变化量，ΔV 为 t 时刻土样的体积变化量，Δw 为含水率的变化量，f 为收缩比，E_{w} 为收缩－膨胀模量。

根据式（27）～（33），得到静力平衡方程如下：

$$-\chi(h)E_{\mathrm{sf}}(T)\left[\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{n - n_0}{1 - n}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\theta_{\mathrm{i}} - n + \theta_{\mathrm{u}}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(f\frac{\theta_{\mathrm{u}} - \theta_0}{E_{\mathrm{w}}\rho_{\mathrm{s}}}\right)\right]$$
$$= \frac{\partial\left[\chi(h)h\right]}{\partial z} + \left[(1 - n)\rho^{\mathrm{s}} + \theta_{\mathrm{u}}\rho^{\mathrm{w}} + \theta_{\mathrm{i}}\rho^{\mathrm{i}}\right]g \quad 。 \tag{34}$$

对于地表非饱和膨胀土而言，当无上覆荷载作用时，式（34）右侧由吸力和重度改变引起的非线性弹性变形量与膨胀土冻胀变形量和黏土矿物膨胀量相比很小，可根据模型处理的具体问题予以忽略。因此，式（34）可整理为如下简单形式：

$$\varepsilon_z = \left[\theta_{\mathrm{i}} - (n - \theta_{\mathrm{u}})\right] + f\frac{\theta_{\mathrm{u}} - \theta_0}{E_{\mathrm{w}}\rho_{\mathrm{s}}} \quad 。 \tag{35}$$

3.5　冻结非饱和膨胀土中的未冻水与孔隙冰

上述模型中以孔隙水压力水头 h、温度 T 为因变量，控制方程中剩余的另两个未知变量未冻体积含水率 θ_{u}、体积含冰率 θ_{i} 需进一步定义，以使得方程体系封闭。Miller[16]认为在非饱和冻土的土体孔隙中同时存在气－水界面、冰－水界面、气－冰界面，且 3 种界面间保持平衡状态，界面形状遵从 Kelvin 方程，界面交汇处保持表面张力平衡状态，气水界面张力 δ_{aw} 和冰水界面张力 δ_{iw} 的比例关系在无黏性土情况下为 δ_{aw}：δ_{iw}=2.2：1，在黏性土中为 1。冻结非饱和膨胀土中的这两种界面张力比例与黏性土类似，因此可考虑用非饱和土土水特征曲线中的土水势去替代冰水界面的冰水势。与此同时，Caicedo[17]通过物理模型试验研究发现，基于 Clausius–Clapeyron 方程得到的未冻孔隙水压力与其饱和度间的函数关系符合 Gardner 土水特征曲线的基本形式。这进一步证明了采用土水特征曲线方程描述非饱和冻土中未冻水含率的可行性。本文采用 van Genuchten 土水特征曲线模型[18]，对式（11）左侧第 1 项做如下变换：

$$\frac{\partial\theta_{\mathrm{u}}}{\partial t} = \frac{\partial\theta_{\mathrm{u}}}{\partial h}\frac{\partial h}{\partial t}$$
$$= (\theta_{\mathrm{s}} - \theta_{\mathrm{r}})\left[\frac{\alpha m}{1 - m}\Theta_{\mathrm{VG}}^{\ 1/m+1}(\Theta_{\mathrm{VG}}^{\ -1/m} - 1)^m\right]\frac{\partial h}{\partial t} \quad 。 \tag{36}$$

对于 θ_i 的补充方程，本文基于非饱和膨胀土孔隙冰的结晶动力学方程予以计算，定义如下：

$$\theta_i = \alpha(T)\cdot(\theta_{\mathrm{u}} - \theta_{\mathrm{r}}) \quad 。 \tag{37}$$

式中，$\alpha(T)$ 为相对结晶度，定义如下[19]：

$$\alpha(T) \approx 1 - \exp\left\{-\left[\frac{A}{n\beta}\cdot\left(\frac{RT_0^{\ 2}}{E}\mathrm{e}^{(-E/RT_0)} - \frac{RT^2}{E}\mathrm{e}^{(-E/RT)}\right)\right]^n\right\}。 \tag{38}$$

式中，A 为指前因子，β 为降温速率，E 为活化能，R 为普适气体常数，T 为热力学温度，T_0 为结晶发生的起始温度，n 为 Avrami 指数。

4　求解方法与方程离散

4.1　非耦合计算方法

非饱和膨胀土水－热－变形模型的耦合度高，变量 h，T，θ_{u}，θ_{i} 等对各物理场均有影响，为降低模型计算复杂度，宜采用非耦合算法。对于相变项 $H_{\mathrm{f}}\partial\theta_i/\partial t$ 多采用固相法或等效热容法进行处理，这类方法在仅处理温度场问题，或者较为简单的水热耦合问题时具有较好的适用性。Hromadka 等[20]研究表明当考虑冻融土的水热耦合迁移问题时，等效热容法中显热容参数会受到一定约束，在接近冻结点 T_{f} 的一定温度范围内不易收敛，模型收敛所需的时间步长非常小，将大大降低耦合模型的计算效率。

本文基于 FROSTB 模型框架，编写了名为 FH_ex_Model 的一维非饱和膨胀土水－热－变形耦合冻胀模型有限差分计算程序，沿袭了 FROSTB 模型的非耦合计算方法思路，并针对膨胀土的冻胀特性进行必要的修正，具体步骤如下。

（1）对于水分场和温度场控制方程，在不考虑孔隙冰项 $\partial\theta_i/\partial t$ 的情况下进行求解，水分场、温度场控制方程均为抛物线型偏微分方程，抽象为

$$D_1\frac{\partial U}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(D_2\frac{\partial U}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial x}(D_3U) \quad 。 \tag{39}$$

系数和变量汇总于表 3。

表 3 水热控制方程系数和变量

Table 3 Coefficients and variables of hydraulic and thermal control equations

系数	U	D_1	D_2	D_3
水分场	h	$\dfrac{\partial\theta_u}{\partial h}$	$I\cdot K_H$	0
温度场	T	C_m^v	λ	$-C^{vw}v^w$

根据计算域内孔隙压力和温度在 t 时刻的值 h^t 和 T^t，确定 D_1，D_2，D_3 在 t 时刻的数值，进而分别计算水分场和温度场控制方程，得到 $t+\Delta t$ 时刻的值 $h^{t+\Delta t}$ 和 $T^{t+\Delta t}$。注意，此时计算得到的 $h^{t+\Delta t}$ 和 $T^{t+\Delta t}$ 未考虑相变项的影响。

（2）进行相变计算，修正温度场。首先将当前温度 $T^{t+\Delta t}$ 与冻结点 T_f^t 进行比较，若小于冻结温度，则已发生冻结，需根据 Δt 时间步内计算的两个热量 ΔQ_1 和 ΔQ_2 进行冻结程度的判断。热量 ΔQ_1 和 ΔQ_2 的计算方法如下：

$$\left.\begin{aligned}\Delta Q_1&=C_m^{v(t)}(T_f^t-T^{t+\Delta t})\ ,\\ \Delta Q_2&=\alpha(T^{t+\Delta t})\cdot\frac{H_f}{\rho_w}(\theta_u^t-\theta_r)\ ,\end{aligned}\right\} \tag{40}$$

式中，$C_m^{v(t)}$ 为 t 时刻土体的总热容，θ_u^t 为 t 时刻土体的未冻体积含水率，θ_r 为残余含水率，也是冻结土体中难以被冻结的那部分体积含水率。

若 $\Delta Q_1>\Delta Q_2$，说明在判断已冻结的情况下，内能变化已大于孔隙水相变引起的最大相变热，因此按照下式对温度进行修正：

$$T_{\text{modify}}^{t+\Delta t}=T_f^t-\frac{\Delta Q_1-\Delta Q_2}{C_m^{v(t)}} \quad , \tag{41}$$

式中，$T_{\text{modify}}^{t+\Delta t}$ 为 $t+\Delta t$ 时刻土体温度 $T^{t+\Delta t}$ 的修正值。

若 $\Delta Q_1<\Delta Q_2$，说明土体单元已发生冻结但还处于相变发生阶段，FROSTB 模型中将处于这一温度范围内的单元温度统一定义为冻结点，本文中则考虑为 $T^{t+\Delta t}$ 时刻的节点温度。

（3）考虑相变项对水分场的影响，进行水分场修正。根据 $h^{t+\Delta t}$ 对应的体积含水率 $\theta^{t+\Delta t}$，按下式修正：

$$\theta_{u(\text{modify})}^{t+\Delta t}=\theta_u^{t+\Delta t}-\frac{\min\left(\Delta Q_1,\ \Delta Q_2\right)}{H_f} \quad , \tag{42}$$

式中，$\theta_{u(\text{modify})}^{t+\Delta t}$ 为 t 时刻土体未冻体积含水率 $\theta^{t+\Delta t}$ 的修正值。

（4）基于一种两阶段分析模型[21-22]，计算非饱和膨胀土的变形场。根据修正后的 $\theta_{u(\text{modify})}^{t+\Delta t}$ 和式（37）计算得到的 $\theta_i^{t+\Delta t}$，根据式（35）计算冻胀应变与膨胀应变的大小，具体如下：

$$\varepsilon_z^{t+\Delta t}=\left[\theta_i^{t+\Delta t}-\left(n_0-\theta_{u(\text{modify})}^{t+\Delta t}\right)\right]+f\frac{\theta_{u(\text{modify})}^{t+\Delta t}-\theta_0}{E_w\rho_s} \quad 。 \tag{43}$$

在非饱和土冻胀计算中，需考虑起始冻胀的判别条件。Guymon 等[23]假定当冻结孔隙水的体积含量超过 90%的孔隙率时冻胀发生，且冻胀变形量等于冻结土体单元中分凝冰量的总和，Dirksen 等[24]和 Taylor 等[25]在其研究中采用 85%这一阈值。本模型中，这一变量可根据试验与计算结果的比较进行调整，默认值为 0.85。

4.2 空间域和和时间域离散

采用 C-N 隐式有限差分格式，式（39）离散如下：

$$\begin{aligned}&D_1(U_i^{j+1}-U_i^j)\\&=r_1D_2\left[\left(\frac{U_{i+1}^{j+1}+U_{i+1}^j}{2}\right)-2\left(\frac{U_i^{j+1}+U_i^j}{2}\right)+\left(\frac{U_{i-1}^{j+1}+U_{i-1}^j}{2}\right)\right]+\\&\quad r_2D_3\left[\left(\frac{U_{i+1}^{j+1}+U_{i+1}^j}{2}\right)-\left(\frac{U_{i-1}^{j+1}+U_{i-1}^{j+1}}{2}\right)\right] \quad ,\end{aligned} \tag{44}$$

式中，$r_1=\Delta t/(\Delta z)^2$，$r_2=\Delta t/2\Delta z$，$D_1$，$D_2$，$D_3$ 需根据 j 时刻不同空间位置节点处的水分场 h 和温度场 T 数值进行计算。

$$\left.\begin{aligned}&(E_1)_{i-1}^jU_{i-1}^{j+1}+(E_2)_i^jU_i^{j+1}+(E_3)_{i+1}^jU_{i+1}^{j+1}\\&\quad=(F_1)_{i-1}^jU_{i-1}^j+(F_2)_i^jU_i^j+(F_3)_{i+1}^jU_{i+1}^j\ ,\\&(E_1)_{i-1}^j=-\left[r_1(D_2)_{i-1}^j-r_2(D_3)_{i-1}^j\right]\ ,\\&(E_2)_i^j=2(D_1)_i^j+2r_1(D_2)_i^j\ ,\\&(E_3)_{i+1}^j=-\left[r_1(D_2)_{i+1}^j+r_2(D_3)_{i+1}^j\right]\ ,\\&(F_1)_{i-1}^j=r_1(D_2)_{i-1}^j-r_2(D_3)_{i-1}^j\ ,\\&(F_2)_i^j=2(D_1)_i^j-2r_1(D_2)_i^j\ ,\\&(F_3)_{i+1}^j=r_1(D_2)_{i+1}^j+r_2(D_3)_{i+1}^j\ 。\end{aligned}\right\} \tag{45}$$

式中，i 为空间坐标节点，i=2, 3, 4,…, N−1 为计算域内的坐标节点，i=1 和 N 为边界处的坐标节点，j 为时间坐标节点。

式（45）所示方程体系的矩阵形式如下：

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{U}^{j+1}=\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}^j+\boldsymbol{b}^j \quad , \tag{46}$$

其中，

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}(E_2)_2^j&(E_3)_3^j&0&\cdots&0\\(E_1)_2^j&(E_2)_3^j&(E_3)_4^j&\vdots&\vdots\\0&0&\ddots&0&0\\\vdots&\vdots&(E_1)_{N-3}^j&(E_2)_{N-2}^j&(E_3)_{N-1}^j\\0&\cdots&0&(E_1)_{N-2}^j&(E_2)_{N-1}^j\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}(F_2)_2^j & (F_3)_3^j & 0 & \cdots & 0\\ (F_1)_2^j & (F_2)_3^j & (F_3)_4^j & \vdots & \vdots\\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0\\ \vdots & \vdots & (F_1)_{N-3}^j & (F_2)_{N-2}^j & (F_3)_{N-1}^j\\ 0 & \cdots & 0 & (F_1)_{N-2}^j & (F_2)_{N-1}^j\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{b}_j=\begin{bmatrix}(F_1)_1^j U_1^j-(E_1)_1^j U_1^{j+1}\\ 0\\ \vdots\\ 0\\ (F_3)_N^j U_N^j-(E_3)_N^j U_N^{j+1}\end{bmatrix},\ \boldsymbol{U}_{j+1}=\begin{pmatrix}U_2^{j+1}\\ U_3^{j+1}\\ \vdots\\ U_{N-2}^{j+1}\\ U_{N-1}^{j+1}\end{pmatrix},\boldsymbol{U}_j=\begin{pmatrix}U_2^j\\ U_3^j\\ \vdots\\ U_{N-2}^j\\ U_{N-1}^j\end{pmatrix}。\tag{47}$$

由 Crank-Nicolson 差分格式得到的离散方程是隐式的，需对全场联立求解。本文中针对一维问题，采用高斯消去法进行求解。给定模型的初始值和边界条件即可，包括土体上下边界的孔隙水压力、温度，以及计算域内的初始孔隙水压力和初始温度。

5　算　　例

根据试验工况 E1 建立验证模型。上边界温度为 −5℃，下边界温度为 1.8℃。假定初始温度在试样断面内分布均匀，均为 1.8℃。由于土体表面在试验开始时迅速冻结，可认为上孔隙水压力边界处的流量为 0，而下孔隙水压力边界处于饱和状态，其吸力值 h 取为 0 cm。试样的初始体积含水率为 0.2961，上覆荷载为 0 kPa。图 9 所示是差分网格，共有 11 个空间网格点，其中 Δt 取值为 0.05 h，Δz 取值为 1.0 cm。模型物理参数见表 4。

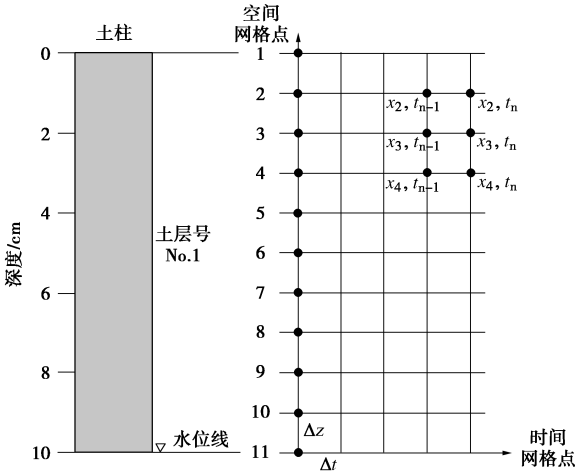


图 9　一维有限差分计算模型的时空网格点

Fig. 9 Spatial and temporal grid points of one-dimensional finite difference model

针对该非饱和膨胀土水－热－变形耦合冻胀模型的试算表明，水分、温度、变形物理场的计算结果对初始含水率 θ_0、饱和渗透系数 K_s 的敏感性较大。水分场计算结果的准确性对节点温度、孔隙含冰率、冻胀和膨胀变形计算结果的准确性影响很大，也直接影响着模型的收敛性。图 10 是工况 E1 膨胀土冻结后试样断面总质量含水率计算值和试验值的比较（冻胀时间 90 h）。计算结果表明，稳定冻结阶段的总含水率与试验结果基本一致。

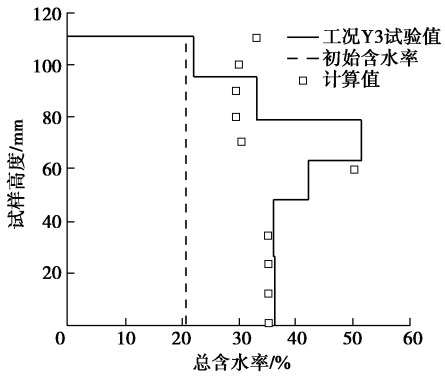


图 10　延吉膨胀土试样断面总质量含水率

Fig. 10 Total mass water contents of Yanji expansive soil sample profile

图 11 是非饱和膨胀土冻胀和膨胀变形的解耦，通过数值计算方法，在总变形量基本一致的情况下，反演出膨胀土中冻胀分量、膨胀分量随冻胀发展的变化情况。由图可知，当膨胀土初始含水率仅为 21%的较小情况时，冻结开始后前 4.25 h 内，试样以膨胀量为主，累计达到 6.09 mm（图中 *A* 点），主要来源于未冻结区。由于采用 Brauid 模型对膨胀量进行预测，其结果比实际值偏大。而冻胀变形量几乎为 0.0 mm，这是因为孔隙水虽已发生冻结，但由于土体处于非饱和状态，孔隙冰的累积量尚未达到起始冻胀条件。在 7.5 h 以后，膨胀量几乎不发生变化，而冻胀量开始逐步累积（图中 *B* 点），这表明在开放系统下，未冻结区域内膨胀土的饱和度已达到较高水平。以 65 h 时刻的变形量为例，此时的冻胀分量为 3.9 mm，占总变形量 39%左右，而膨胀分量的比例则高达 61%。因此，实际工程场地中，初冻期冻结作用引起的膨胀变形量对总体变形量的贡献需予以重视，并且膨胀土场地冻深以下区域引起的变形量不容忽视。

表 4　膨胀土冻胀数值计算的物理参数

Table 4 Physical parameters of frost heave of expansive clay

ρ^s /(g·cm^{-3})	ρ^w /(g·cm^{-3})	ρ^i /(g·cm^{-3})	λ^s /(cal·cm·h·°C^{-1})	λ^w /(cal·cm·h·°C^{-1})	λ^i /(cal·cm·h·°C^{-1})	C^{vs} /(cal·cm·h·°C^{-1})	C^{vw} /(cal·cm^3·°C^{-1})	C^{vi} /(cal·cm^3·°C^{-1})	L_f /(cal·g^{-1})	a
2.63	1	0.917	13.26	4.82	19.26	0.1	1	0.55	80	7.598
m	n	θ_r	θ_s	K_s/(cm·h^{-1})	n_0	T_f/℃	A	E/(kJ·mol^{-1})	n	G/(m·s^{-2})
3.016	0.2542	0.247	0.495	0.3	0.495	−0.8	1.21012	59.0	3.0	9.8

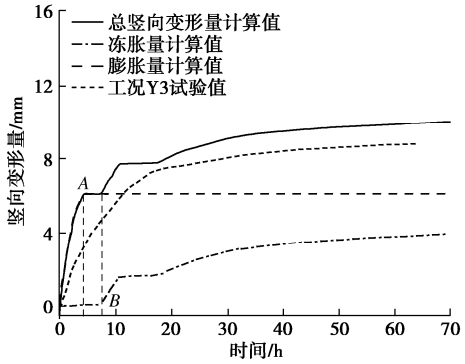


图 11 延吉膨胀土冻胀和膨胀变形的解耦

Fig. 11 Decoupled frost heave and swelling deformation of Yanji expansive soil

6 结 论

本文针对季冻区膨胀土的冻胀变形机制问题，开展了非饱和膨胀土水－热－变形耦合冻胀模型研究工作，得到以下 4 点结论。

（1）通过非饱和膨胀土冻胀特性试验证明了膨胀土吸水膨胀特性对其冻胀特性影响的存在性。

（2）提出了考虑相变动力区的非饱和膨胀土冻结－胀缩牵连机制。

（3）建立并验证了非饱和膨胀土水－热－变形耦合冻胀模型 FH_ex_Model，解耦出非饱和膨胀土冻胀过程中的冻胀变形分量和膨胀变形分量。

（4）在实际工程中，初冻期引发的膨胀变形量在总体变形量中占比较大，冻深以下区域引起的变形量不容忽视。

参考文献：

[1] 何满潮, 刘成禹, 武 雄. 延吉盆地强膨胀性软岩边坡加固对策研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, **35**(4): 496－500. (HE Man-chao, LIU Cheng-yu, WU Xiong. A case study on the reinforcement countermeasures for strongly swelling soft-rock slope in Yanji Basin[J]. Journal of Jiling University (Earth Science Edition), 2005, **35**(4): 496－500. (in Chinese))

[2] 徐丽丽, 刘丽佳, 徐昭巍, 等. 季节冻土区膨胀土边坡冻害防护综合技术[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(增刊 1): 216－220. (XU Li-li, LIU Li-jia, XU Zhao-wei, et al. Integrated protection technology for expansive soil slopes in seasonally frozen zones[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(S1): 216－220. (in Chinese))

[3] 蔡正银, 朱 洵, 张 晨, 等. 高寒区膨胀土渠道边坡性能演变规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, **53**(1): 21－50. (CAI Zheng-yin, ZHU Xun, ZHANG Chen, et al. Performance evolution of expansive soil canal slope in high cold region[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, **53**(1): 21－50. (in Chinese))

[4] 徐丽丽, 张 滨, 刘丽佳. 土体膨胀冻胀联合测试装置及测试方法的应用[J]. 人民珠江, 2017, **38**(6): 16－19. (XU Li-li, ZHANG Bin, LIU Li-jia. Study on joint test device and test method of soil expansion and frost heave[J]. Pearl River, 2017, **38**(6): 16－19. (in Chinese))

[5] 程旭东. 饱和膨胀土冻胀特性及冻胀模型[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016. (CHENG Xu-dong. Frost Heave Characteristics and Model for Saturated Expansive Clay[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese))

[6] LUO J, TANG L, LING X Z, et al. Experimental and analytical investigation on frost heave characteristics of an unsaturated moderately expansive clay[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, **155**: 343－353.

[7] 朱 杰, 王 蒙. 淮南弱膨胀土冻胀融沉特性[J]. 科学技术与工程, 2020, **20**(14): 5757－5763. (ZHU Jie, WANG Meng. Frost heaving and haw settlement characteristics of weak expansive soil in Huainan area[J]. Science Technology and Engineering, 2020, **20**(14): 5757－5763. (in Chinese))

[8] 景 鑫. 非饱和膨润土改性黏土有限补水条件下的一维冻融效应[D]. 银川: 宁夏大学, 2021. (JING Xin. One-Dimensional Freeze-Thaw Effects of Unsaturated Clay Modified by Bentonite under Limited Water Replenishing[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021. (in Chinese))

[9] LI N, CHEN F X, XU B, et al. Theoretical modeling framework for an unsaturated freezing soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, **54**(1): 19－35.

[10] GUYMON G L, HROMADKA T V II, BERG R L. A one dimensional frost heave model based upon simulation of simultaneous heat and water flux[J]. Cold Regions Science and Technology, 1980, **3**(2/3): 253－262.

[11] LIU Z, YU X. Coupled thermo-hydro-mechanical model for porous materials under frost action: theory and implementation[J]. Acta Geotechnica, 2011, **6**(2): 51－65.

[12] YIN X, LIU E L, SONG B T, et al. Numerical analysis of coupled liquid water, vapor, stress and heat transport in unsaturated freezing soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, **155**: 20－28.

[13] BRONFENBRENER L. Non-equilibrium crystallization in freezing porous media: numerical solution[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, **85**: 137－149.

[14] 蔡国庆. 基于多孔介质理论的土体多场耦合模型及其在非饱和土本构建模中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2012. (CAI Guo-qing. Multi-Field Coupled Model for Soils Based on Porous Media Theory and its Application in Modelling the Constitutive Behaviour of Unsaturated Soils[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese))

[15] BRIAUD J L, ZHANG X, MOON S. Shrink test-water content method for shrink and swell predictions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(7): 590－600.

[16] MILLER R. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils[J]. Highway Research Record, 1972, **393**: 1－11.

[17] CAICEDO B. Physical modelling of freezing and thawing of unsaturated soils[J]. Géotechnique, 2017, **67**(2): 106－126.

[18] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(5): 892－898.

[19] 罗　军. 膨胀土冻胀过程水－热－变形耦合模型[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021. (LUO Jun. Coupled Hydro-Thermo-Deformation Model of Expansive Soil During Frost Heave[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese))

[20] HROMADKA T V II, GUYMON G L, BERG R L. Some approaches to modeling phase change in freezing solis[J]. Cold Regions Science and Technology, 1981, **4**(2): 137－145.

[21] ITO M, AZAM S, HU Y F. A two stage model for moisture-induced deformations in expansive soils[J]. Environmental Systems Research, 2014, **3**: 19.

[22] VU H Q, FREDLUND D G. The prediction of one-, two-, and three-dimensional heave in expansive soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, **41**(4): 713－737.

[23] GUYMON G L, HARR M E, BERG R L, et al. A probabilistic-deterministic analysis of one-dimensional ice segregation in a freezing soil column[J]. Cold Regions Science and Technology, 1981, **5**(2): 127－140.

[24] DIRKSEN C, MILLER R D. Closed-system freezing of unsaturated soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1966, **30**(2): 168－173.

[25] TAYLOR G S, LUTHIN J N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, **15**(4): 548－555.

The 13th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development

Nanjing, China　7th – 9th December　2022

Organised by: Nanjing University, China

Supported by: National Natural Science Foundation of China; Nanjing University High-Tech Institute at Suzhou; CSRME Subsociety for Intelligent Monitoring in Geoengineering; Suzhou NanZee Sensing Technology.

Introduction: The “International Symposium” series, founded in 1986 and with a history of 36 years, is a signature event for the International society of Environmental Geotechnology (ISEG). ISEG seeks to promote scientific cooperation among countries, organizations and individuals on geoenvironmental issues for global sustainable development. The theme of the 13th symposium is “Environmental Geotechnology for A Low-carbon World”. We will invite prominent scholars and experts to give keynote speeches, sharing their latest achievements in environmental geotechnology and sustainable development.

Sessions: Geological carbon capture, utilization and storage; Pollution and remediation of mining site, soil and groundwater; Microplastics and other emerging contaminants; Soil-plant-atmosphere interaction; Sustainable energy utilization; Waste disposal and utilization; Sustainable infrastructure; Sustainable and high-efficient geohazard prevention; Interdisciplinary and emerging technologies; Geoenvironmental protection.

Important dates: First announcement: July 5; Second announcement: August 1; Open registration/abstract submission: August 1; Early-bird registration deadline: October 20; Regular registration deadline: December 7; Abstract submission deadline: October 30; Symposium Date: December 7-9.

The conference access: Online platform Website; Zoom www.iseg.info.

Contact us: Prof. Chao-Sheng Tang, Email: iseg@nju.edu.cn; Zheng-Tao Shen, Email: ztshen@nju.edu.cn.

DOI：10.11779/CJGE202207007 “十三五”国家重点研发计划项目

堰塞湖风险评估快速检测与应急抢险技术和装备研发

蔡耀军[1,2]，周 招[2]，杨兴国[3]，魏迎奇[4]，郑东健[5]，彭文祥[1,6]，钟启明[7]，王 衡[8]

（1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司，湖北 武汉 430010；2. 长江设计集团有限公司，湖北 武汉 430010；3. 四川大学，四川 成都 610065；4. 中国水利水电科学研究院，北京 100048；5. 河海大学，江苏 南京 210024；6. 国家大坝安全工程技术研究中心，湖北 武汉 430010；7. 南京水利科学研究院，江苏 南京 210029；8. 中国葛洲坝集团勘测设计有限公司，湖北 武汉 430073）

摘 要：中国西南高山峡谷地区极易因降雨或地震造成山体滑坡、泥石流堵塞天然河道形成堰塞湖，堰塞湖漫顶溃决极易形成超过历史最大天然洪水的溃决洪峰，严重威胁沿岸人民群众生命财产安全并破坏生态环境。鉴于当前堰塞湖风险处置技术水平尚难以满足堰塞湖高效应急处置需求，“十三五”国家重点研发计划项目“堰塞湖风险评估快速检测与应急抢险技术和装备研发”以“高效快速、科学减灾”为目标，通过3年联合攻关，在揭示堰塞湖形成及溃决机理、堰塞湖多源信息快速获取、堰塞湖险情监控预警、堰塞湖风险评估以及堰塞湖应急处置和抢险装备研发等方面取得一系列创新成果，为堰塞湖高效处置提供了理论方法和科学手段，社会和经济效益显著，具有广阔的应用前景。



关键词：堰塞湖；溃决机理；多源信息；风险评估；应急处置

中图分类号：TV62 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2022)07－1266－15

作者简介：蔡耀军(1963—)，男，博士，正高级工程师，现任长江设计集团有限公司副总工程师，兼任水利部长江勘测技术研究所所长，中国水利学会勘测专业委员会常务副主任，湖北省地质学会副理事长。长期从事水利水电工程勘察、特殊岩土、地质灾害防治与抢险技术研究和应用，先后主持南水北调中线、丹江口大坝加高、汉江兴隆水利枢纽、湖南皂市水利枢纽、金沙江旭龙水电站、阳江中-低放废料地下岩洞处置等二十余项大中型工程勘察研究，主持完成十余项科研项目，是“十三五”国家重点研发计划项目“堰塞湖风险评估快速检测与应急抢险技术和装备研发”首席科学家，“十二五”国家科技支撑计划项目“南水北调中线工程膨胀土和高填方渠道建设关键技术研究与示范”及“十一五” “南水北调工程若干关键技术研究与应用”课题负责人，国家863计划“南水北调中线工程生态环境效应遥感监测技术”负责人。金沙江白格堰塞湖应急抢险国家防总专家组组长，西藏波密县冰湖险情处置水利部专家组组长。获国家及省部级科技奖15项；授权国家发明专利5项，实用新型专利14项；发表学术论文52篇，出版著作9部；主编国家、行业标准 3 部。先后获得全国水利系统先进青年科技工作者、全国水利水电勘测系统先进生产者、湖北省有突出贡献中青年专家、湖北省优秀留学回国人员等称号。E-mail：1761939361@qq.com。

Rapid detection for risk assessment, emergency disposal technology and equipment development of barrier lakes

CAI Yao-jun[1, 2], ZHOU Zhao[2], YANG Xing-guo[3], WEI Ying-qi[4], ZHENG Dong-jian[5], PENG Wen-xiang[1, 6], ZHONG Qi-ming[7], WANG Heng[8]

(1. Changjiang Inst. of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China; 2. Changjiang Design Group Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 3. Sichuan University, Chengdu 610065, China; 4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 5. Hohai University, Nanjing 210024, China; 6 National Dam Safety Engineering Technology Research Center, Wuhan 430010,China; 7. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 8. CGGC Survey and Design Ltd., Wuhan 430073, China)

Abstract: Influenced by the severe rainfalls or earthquakes, landslides and debris flows are easy to occur in the mountainous and canyon areas of Southwest China, leading to blockage of rivers and formation of barrier lakes. Once overtopping breach occurs, the barrier lake is very easy to form a flood peak exceeding the largest natural flood in history, which severely threatens the lives and properties of the people along the river and destroys the ecological environment. During the 13th Five-Year Plan Period, the National Key Research and

基金项目：国家重点研发计划项目（2018YFC1508600）；自主创新项目（BSH2021G03，BSH2021G01）；博士后科学基金项目（2022M710490）

收稿日期：2022－03－05

Development program “Rapid detection for risk assessment, emergency disposal technology and equipment development of barrier lakes” was Approved to solve the shortage problem of efficient emergency disposal technology of barrier lakes. After three years of joint researches, some innovations were made in the aspects of formation and breach mechanism, rapid acquisition of multi-source information, danger monitoring and early warning, risk evaluation, emergency disposal, emergency equipments of barrier lakes. The researches have provided a theoretical method and scientific means for the efficient disposal of barrier lakes with remarkable social and economic benefits and broad application prospects.

Keyword: barrier lake; breach mechanism; multi-source information; risk assessment; emergency disposal

0　引　　言

堰塞湖作为一种重大频发自然灾害，主要由山体滑坡、崩塌以及泥石流等动力地质作用堵塞河道、沟谷而形成，拦堵天然河道的固体堆积物则称为堰塞体。随着上游持续来水，堰塞湖水位不断雍高极易造成堰塞体漫顶溃决，形成灾害链长远、破坏力巨大的非常态溃决洪峰，严重威胁下游沿岸人民群众生命财产安全。为缓解堰塞湖溃决洪水次生灾害，提升堰塞湖应急处置水平，“十三五”期间，科技部设立“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项，2018 年 12 月“堰塞湖风险评估快速检测与应急抢险技术和装备研发”（2018YFC1508600）项目正式获批立项，该项目由长江勘测规划设计研究有限责任公司牵头，四川大学、中国水利水电科学研究院、河海大学、水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院、中国葛洲坝集团勘测设计有限公司、中国船舶重工集团应急预警与救援装备股份有限公司、香港科技大学深圳研究院、长江水利委员会长江科学院、长江水利委员会长江水文局共 10 家单位共同参与。

项目围绕堰塞湖灾害防治、减灾以及救灾能力提升，通过三年时间联合攻关，解决了基于岸坡地质运动堰塞体形成机理及不同结构及环境作用下堰塞湖溃决机理等两项科学问题，突破堰塞湖多源信息快速感知、携砂水流堰塞体溃决过程模拟、考虑结构形态要素堰塞湖致灾风险评估以及堰塞湖高效疏通排水和堰塞体控溃削峰等关键技术，有力提升中国堰塞湖应急处置技术水平，为保障人民生命财产安全提供科学技术保障。

1　研究背景

近些年受地震活动、极端气候及人类活动影响，堰塞湖呈现高发频发态势，尤其是在中国西南高山峡谷地区，地震及强降雨极易诱发山体滑坡或泥石流事件，堵塞天然河道，形成堰塞湖[1-2]。2008 年汶川地震在沱江、嘉陵江、岷江以及大渡河等流域诱发形成 256 座不同规模的堰塞湖，其中唐家山堰塞湖最大可蓄水量达到 3.2 亿 m^3，严重威胁下游绵阳、遂宁地区 130 万人民群众生命安全[3-4]。2018 年金沙江上游右岸白格村短时间内连续发生两次滑坡堵江事件（图 1），其中“11·03”白格堰塞湖溃决洪峰达到 31000 m^3/s，造成下游迪庆、丽江、大理等 4 州市共计 5.4 万人受灾[5-7]。



图 1　白格堰塞湖淹没波罗乡

Fig. 1 Boluo township flooded by Baige barrier lake

堰塞湖所处地理环境复杂，潜在破坏力大、影响范围广，而且自然存活时间较短，堰塞湖应急处置极具难度和挑战性。Costa 等[8]根据众多堰塞湖案例统计，堰塞湖在一天、一周、一月、半年及一年之内溃决比例分别高达 27%，41%，56%，80%，85%。石振明等[9]收集国内外 276 座堰塞湖案例，揭示堰塞湖自然寿命低于一天、一周、一月及一年的比例依次高达 34%，50%，67%，86%。但由于中国对堰塞湖研究起步较晚、认知水平较低，现阶段对其关键技术问题尚处于起步和探索阶段，尤其是堰塞湖溃决机理、风险评估及应急处置缺乏有效的理论指导和科学支撑，不能满足当前堰塞湖风险快速评估及高效应急处置要求。总体而言，针对堰塞湖险情，当前主要面临如下挑战。

（1）挑战 1：堰塞湖形成及溃决机理揭示

研究堰塞体物质来源和运动堆积过程与堰塞体物质组成和结构形态内在关系，揭示堰塞湖形成机理；研究不同结构及变化环境作用下堰塞湖溃决发展过程，揭示堰塞湖溃决机理，为堰塞湖溃决洪水预测提供技术支撑[10-11]。目前主要根据堰塞湖溃决案例的地貌参数特征统计分析堰塞湖形成过程，而实际堰塞湖形成与滑坡体积、滑坡运动机制、岩体完整性以及河道水流条件和河谷地貌等密切相关，不同类型的滑体性质、运动特征等存在较大差异，直接造成堰塞体具有不同的几何形态和物质组成等特征[12-16]。此外堰塞

湖漫顶溃决会经历多个阶段的发展演变，涉及均匀冲刷及陡坎溯源侵蚀引起的纵向下切、坡脚侧向冲刷与边坡坍塌引起的横向展宽，以及不同阶段纵向与横向冲刷交替发展，但当前对堰塞湖溃口发展机理缺乏深入了解，对溃口携砂水流作用机制和模拟研究甚少，堰塞湖模型尺度普遍偏小，难以对堰塞湖漫顶溃决过程影响因素做系统性试验分析[17-19]。

（2）挑战 2：堰塞湖多源信息获取

堰塞湖发生位置通常位于交通险阻、人迹罕至之地，堰塞体物质结构组成及水文信息普遍难以在短时间内获取，在分秒必争的堰塞湖应急处置现场极易因对堰塞湖信息缺乏足够了解，造成应急决策偏差或处置不当而引发严重次生灾害[20-21]。过去获取堰塞湖信息以卫星遥感为主，现时无人机技术得到广泛应用，卫星遥感获取地形时序数据精度有限、实时性较差，无人机测量数据后期处理量大，而且高山峡谷地区难以控制高分辨率的固定航线[22-23]。堰塞湖多源信息获取普遍存在数据匮乏、孤立、滞后等问题，难以实现信息互通及三维动态可视化，急需开发研究堰塞湖多源数据快速融合与智能识别平台，为堰塞湖抢险救灾提供全方位的数据服务支撑。

（3）挑战 3：堰塞湖应急监测与风险评估

现有的堰塞湖应急监测主要局限于堰塞湖水位及湖区岸坡稳定性监测，方法单一、制约因素多，而针对堰塞体变形、渗透破坏及溃口发展并无可靠技术手段实现有效监测预警，急需创新监测技术建立多源、多维信息监控方法，实现堰塞湖险情应急监测预警。尽管在处置 2008 年汶川地震引发的系列堰塞湖之后，中国颁布实施了《堰塞湖风险等级划分标准》[24]，提出了查表法和数值分析法进行堰塞湖风险评估，但经过近些年深入研究，发现该标准的评价指标体系尚不够完善，生态环境损失缺乏有效科学评估方法[25]。

（4）挑战 4：堰塞湖应急处置技术水平提升

2008 年汶川地震之后，中国颁布了《堰塞湖应急处置技术导则》[26]，明确了堰塞湖应急处置工程措施及非工程措施方法选用和主要技术要求，为堰塞湖应急处置提供了技术指导。开挖引流槽是当前应用最广泛、最有效的工程除险措施[27-29]，但引流槽结构如何设计、如何更高效地实施引流槽，不但缺乏理论指导，也缺乏科学数据支撑。引流槽只是实现提前过流、减小堰塞湖蓄水量，并不能彻底消除堰塞湖风险，堰塞湖漫顶水流在经历相对缓慢的冲刷下切后，会进入不可控的快速发展阶段，并往往引发超标准洪水，给下游造成难以承受的损失。尽管自 2000 年易贡堰塞湖抢险便对堰塞湖控溃进行了尝试，但一直未能取得实质性突破。当前，引流槽疏通开挖主要依靠大型挖掘及输运机械单点开挖、分散运输，效率不高，而且大型机械设备普遍存在吨位大、难以运抵现场等问题，急需研发高效的专用抢险装备及可供选择的其他施工方法。

2 研究目标、内容及关键科学问题

2.1 研究目标及内容

堰塞湖风险评估快速检测与应急抢险技术和装备研发旨在通过研究堰塞湖形成及溃决规律，揭示堰塞湖形成演变机制及其与溃决机理内在联系，提升堰塞湖信息快速获取、堰塞体结构快速探测和险情快速监控预警能力、堰塞湖致灾风险快速评价技术，开发应急抢险成套关键技术和装备，提升堰塞湖应急抢险决策水平和能力。

项目下设 6 个课题，各课题名称及承担单位、负责人如表 1 所示，项目技术路线如图 2 所示。

表 1 课题设置

Table 1 Arrangement of tasks

课题序号	课题名称	承担单位	课题负责人
1	堰塞体形成与溃决机理及溃决过程研究	四川大学	杨兴国
2	堰塞湖多源信息快速感知与探测技术研究	中国水利水电科学研究院	魏迎奇
3	堰塞湖险情应急监测与预警技术研究	河海大学	郑东健
4	堰塞湖致灾风险评估技术研究	南京水利科学研究院	钟启明
5	高风险堰塞湖应急处置技术研究	长江勘测规划设计研究有限责任公司	蔡耀军
6	堰塞湖应急抢险关键装备研发	中国葛洲坝集团勘测设计有限公司	王衡

2.2 关键科学问题和技术问题

围绕“堰塞湖风险评估快速检测与应急抢险技术和装备研发”，主要解决两大关键科学问题和 4 大关键技术问题。

（1）项目解决两大关键科学问题

a）基于岸坡地质和运动过程分析的堰塞体形成机理

堰塞体突发性强、事前位置不确定、基础资料匮乏，堰塞体组成物质颗粒级配宽泛、几何形态不规则。研究堰塞体形态结构与滑源区岩土结构及滑坡运动特征内在关系，分析岩土启动、运动及堆积过程能量耗散机制，提出堰塞体物质组成和结构快速识别方法，揭示基于滑坡堆积体生成关系的堰塞体形成演化机制。

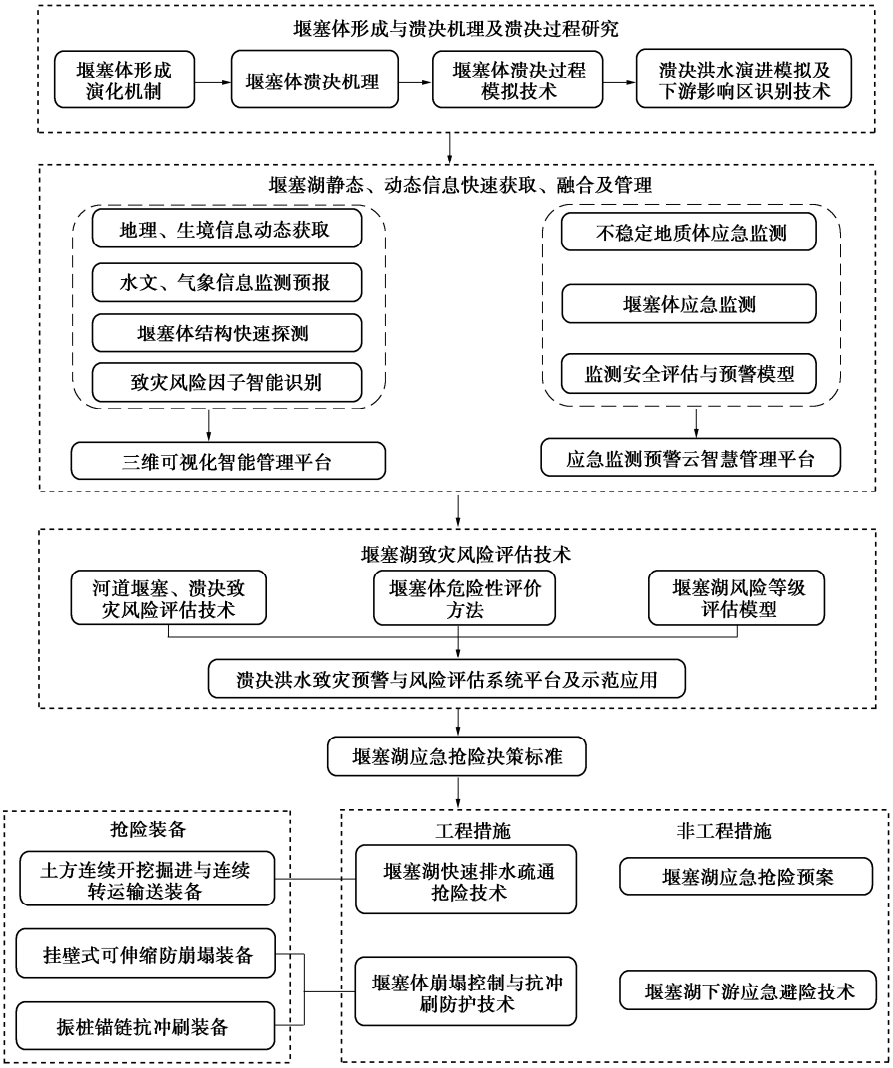


图 2 项目技术路线

Fig. 2 Technical route of program

b）不同结构及变化环境下的堰塞体溃决机理

堰塞湖溃决过程表现出强烈的非线性特点，溃口断面宽度、水头、携砂浓度以及溃决流量呈现典型非恒定特征。开展不同颗粒级配、堰塞体几何形态及携砂水流流变和冲蚀特性试验，建立适用于堰塞湖溃决分析携砂水流流固耦合本构方程，揭示多因素对堰塞体溃决影响规律，提升堰塞湖溃决洪水预测精度。

（2）项目解决 4 大关键技术问题

a）堰塞湖多源信息快速感知、动态识别与结构探测技术

堰塞湖通常地处偏远、水陆交通及通讯困乏之地，短时间内难以全方面获取水文地理数据及堰塞体物质结构等信息，传统方法数据采集时效性不强、巨量数据处理缓慢。构建空天地水下一体化的动态立体信息感知体系，获取水文、气象、生境等相关地理空间数据和堰塞体结构等工程数据，研究基于三维模型重构技术的堰塞湖三维智慧应用平台，实现堰塞湖多源信息的快速感知、更新、识别、融合、共享与应用。

b）堰塞湖险情应急监控与预警技术

传统的险情监测方法以接触式为主，针对堰塞湖区难以到达、地形险峻、安全风险极高的特殊环境，以及堰塞体渗透破坏、溃口高速水流冲刷下的形态变化等，急需研究适应环境能力强、分辨率高的多尺度一体化监测技术体系，研发堰塞湖应急监测安全评估及预警模型，搭建监测信息云智慧管理平台。

c）堰塞湖致灾风险评估技术研究

准确识别堰塞湖风险是应急处置决策的前提。研究涵盖堰塞湖规模、入库流量、堰塞体物质组成、堰塞体几何形态等要素的堰塞体危险性评估技术，建立堰塞湖链生的生命损失、经济损失、生态损失评估模型及综合灾损评估模型，开发堰塞湖溃决洪水致灾预警与风险评估系统平台，实现堰塞湖灾害快速分析预

测、预警和风险快速评估。

d）堰塞湖疏通排水及控溃削峰技术

针对高风险堰塞湖，开发快速疏通排水成套技术，针对常规挖掘机及输运设备吨位大以及工作效率相对低下等问题，研发装配组合式土方连续开挖及输运一体化装备，提升堰塞湖疏通排水作用效率。开发堰塞湖溃口柔性防护技术及配套设备，约束溃口快速发展，坦化洪水下泄进程。

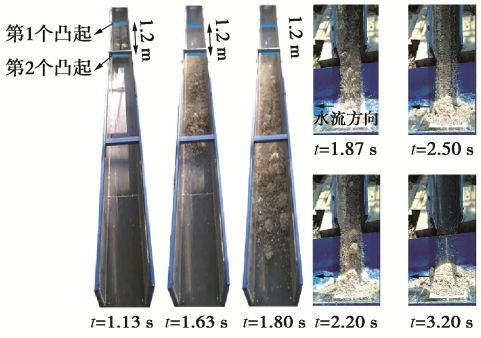
3 主要创新成果

3.1 堰塞湖形成及溃决机理

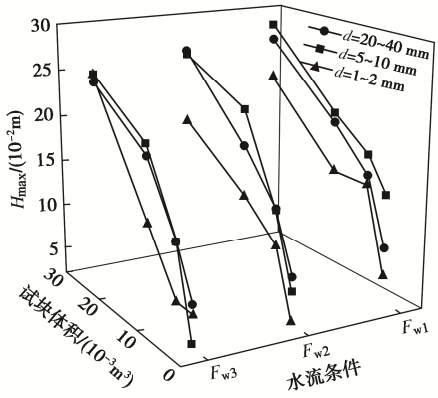
（1）堰塞体形成演化机制

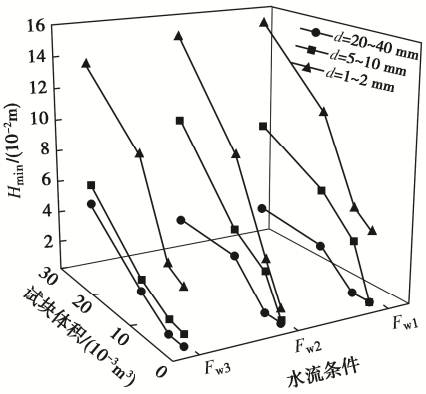
入江堰塞体物质组成与堆积形态很大程度上取决于物源区岩土性质（岩性、完整性、岩体结构、滑面形态）与岩土失稳运动属性（失稳机制、剪出口相对高差、运动速度）及河道形态，并可概括为失稳岩土体积、变形机制、物源区高度、岩性、岩体完整性、河道宽度、失稳流通宽度等 6 个指标[30]。

项目团队选用不同粒径骨料，以及不同水、水泥及石灰配比，拌制不同抗压强度和破碎程度方形试块，开展滑坡堵江物理模型试验，如图 3 所示，研究岩体在滑坡堵江过程中运动特征和破碎机制，揭示了滑坡运动特征与堆积体形态结构的内在关联，并提出堵塞指数（BI）评估滑坡的堵江能力，建立了滑坡堵江类型的判别方法。

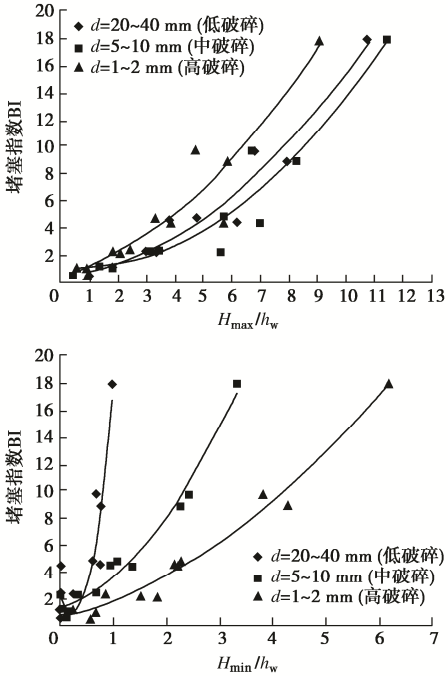


（a）岩体运动堵江动态过程





（b）堰塞体堆积特性



（c）滑坡堵江判别方法

图 3 堰塞湖形成机理模拟

Fig. 3 Simulation of formation mechanism of barrier lake

（2）堰塞体溃决机理

堰塞湖溃决过程极为复杂，漫顶水流冲刷堰塞体坡面、形成初始溃口，随着溃口尾部下切和上游水位抬升，溃口流量逐渐增大，加剧初始溃口冲刷，引发溃口侧向坍塌，该溃决过程涉及到非恒定高速急变流动态冲刷堰塞坝体，涵盖水力学、泥沙动力学及土力学耦合过程。针对不同结构形态及环境下的堰塞体溃决破坏，开展国内外最大比尺的堰塞湖溃决模型试验，揭示逐层均匀冲蚀、多级跌坎冲蚀和陡坎溯源冲蚀形成内在机制以及高速水流剪切冲刷、陡坎涡流溯源冲蚀的底蚀机制和坡脚冲刷、边坡坍塌溃口横向拓展机制，提出堰塞体溃决参数模型，量化溃决洪峰与坝高、物质组成等因素量化关系表达式，提高了图 4 所示溃决洪峰流量、溃口深度、底宽、顶宽、历时等关键参数的预测精度，提升复杂物质结构条件下堰塞体溃决预测的精度和可靠性。

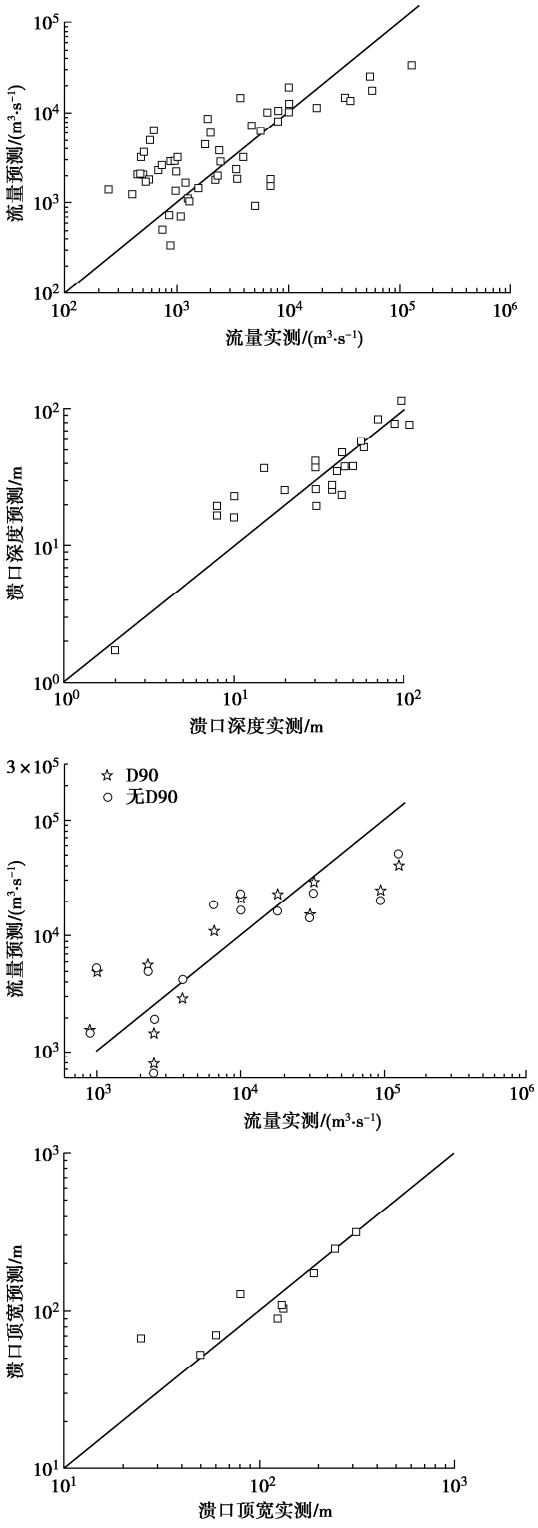


图 4　参数模型预测结果

Fig. 4 Predicted results by parametric model

堰塞湖漫顶溃决如图 5 所示依次可划分为初始阶段、溯源冲刷阶段、快速发展阶段和恢复稳定等四阶段，溃口发展包括纵向下切及横向展宽两过程，其中纵向下切贯穿整个溃决发展过程，在溃决初始阶段及恢复稳定阶段下切速率相对甚小，而在溯源冲刷和快速发展阶段下切速率随溃决流量增大而急剧增大，溃口底板自下游向上游不断下降。而横向展宽主要集中在溃决快速发展和恢复稳定阶段，主要由高速水流不断侵蚀溃口边坡坡脚、底板下切致使溃口边坡变得陡峭，而造成溃口侧向边坡产生坍塌破坏；溯源侵蚀推进至龙口后，流道内水头差快速下降，水流下切能力急剧减弱，侧向侵蚀加强。溃口洪峰出现时，溃口切深大致占总溃深的 1/3，溃口宽度约占溃后总宽度的 1/2。

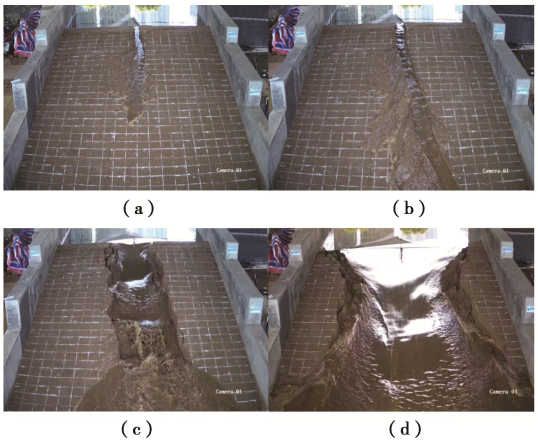


图 5　堰塞湖溃决发展过程

Fig. 5 Breach development process of barrier lake

溃口发展具有自下游向上游推进的显著特点，初始小流量阶段，下切主要发生在尾部，并使流道内水头差和流速逐渐增大，进而使水流侵蚀能力得到提升；溯源陡坎也在尾部首先形成，继而多个小陡坎逐步演变为一个大陡坎向龙口推进。因此，堰塞体下游坡坡度对堰塞湖溃决洪水发展过程具有重要影响，如图 6 所示。溃决洪水流量普遍呈现缓慢增长、快速增长、快速消落、逐步趋稳的单峰曲线变化规律，说明溃决洪水过程呈现典型非恒定变化特征。堰塞湖溃决洪水过程随堰塞体下游坡坡度降低而逐渐延长、滞后，溃决洪峰亦相应显著降低，溃决洪水过程曲线由“尖瘦”型向“矮胖”型转变。造成该现象的主要原因是流道内砂石料不断对溃决水流冲刷掏蚀作出适应性调整，即流道底坡抗冲蚀能力与水流冲刷掏蚀能力相互作用，堰塞体下游坡越缓，坡面砂石料临界启动切应力越大、侵蚀率越小，从而造成堰塞体坍塌滞后[19]。堰塞体下游坡度越大，溃口水流越容易由初始小流量阶段过渡到溯源侵蚀阶段。

（3）堰塞湖携砂水流溃决过程模拟

天然河道水流携带着大量砂石，不同携砂量的水流具有不同的冲蚀特性，携砂水流对溃口发展影响显著。通过开展携砂水流流变和冲蚀特性试验，建立适用于堰塞湖溃决分析的携砂水流的流固耦合本构，揭示携砂水流的携砂量对堰塞坝溃决的影响规律（如图

7 所示，C_V 为携砂量）；基于典型堰塞体非线性冲刷机理，开发了如图 8 所示堰塞体三维漫顶溃决数值分析模型（DABA），实现溃决过程水土耦合作用下堰塞体冲刷数值模拟，为携砂水流作用下的堰塞体漫顶溃决预测提供了高效、可靠的分析工具。

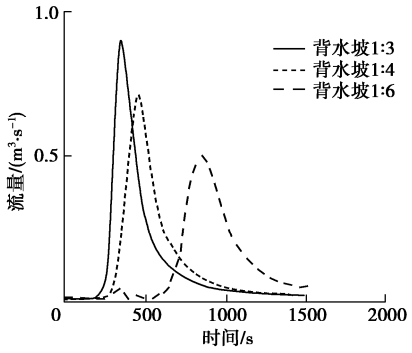
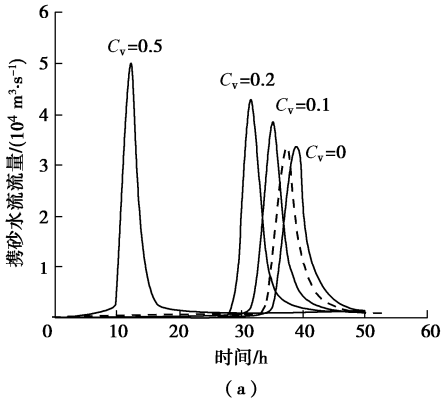
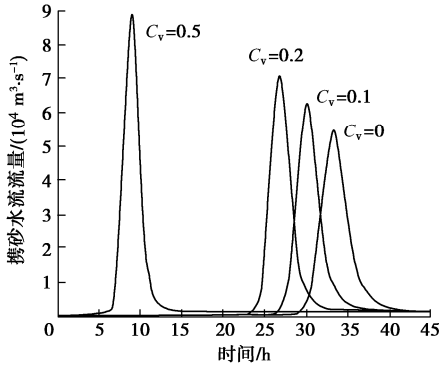


图 6 不同结构形态堰塞体溃决洪水过程

Fig. 6 Breach flood process with different forms of barrier body



（a）



（b）

图 7 不同水流携砂量的溃决过程

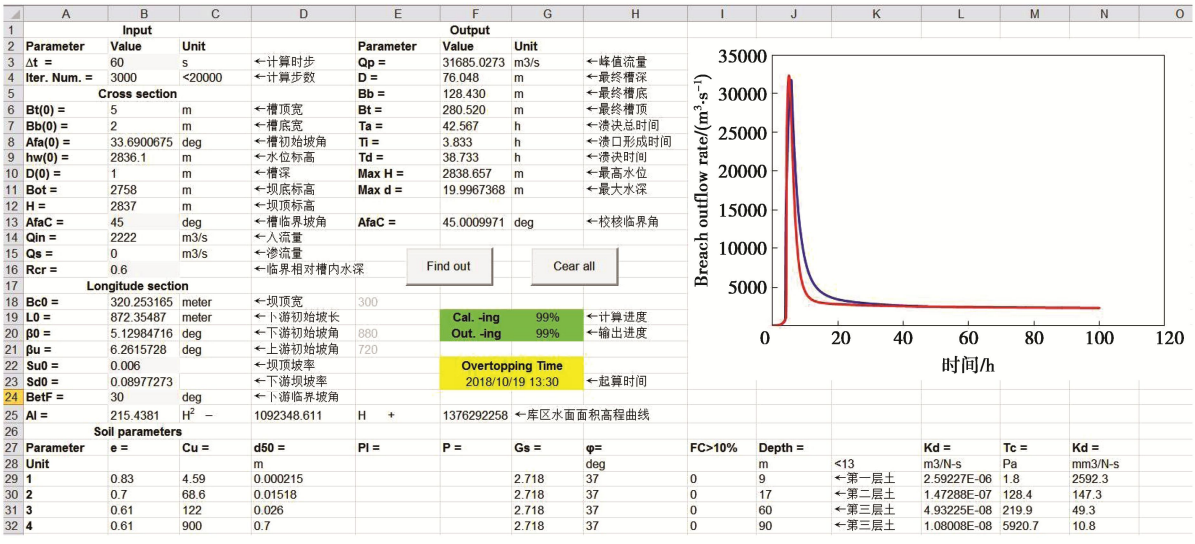
Fig. 7 Breach process with different sand carrying amounts

3.2 堰塞湖信息快速获取技术

堰塞湖信息普遍存在数据量大、类型复杂、来源广泛以及地理参考坐标不统一等问题，在时间急迫的堰塞湖应急处置现场，亟需建立堰塞湖信息快速获取技术体系，为堰塞湖应急处置提供技术支撑[20, 23]。

（1）多源信息感知及识别技术体系

结合堰塞湖案例、现场抢险、应急监测和测量等工程实践，以现行规程规范为依据，考虑感知信息类别、感知技术方式以及信息识别、融合重构等诸多因素，建立了图 9 所示空—天—地—水三维空间的堰塞湖多源信息感知技术体系，提出了堰塞湖信息感知时间响应等级划分标准以及不同响应等级条件下感知信息精度标准；为今后堰塞湖信息感知的快速准确获取提供了技术指导。



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		Input				Output									
2	Parameter	Value	Unit		Parameter	Value	Unit								
3	Δt =	60	s	←计算时步	Qp =	31685.0273	m3/s	←峰值流量							
4	Iter. Num. =	3000	<20000	←计算步数	D =	76.048	m	←最终槽深							
5		Cross section			Bb =	128.430	m	←最终槽底							
6	Bt(0) =	5	m	←槽顶宽	Bt =	280.520	m	←最终槽顶							
7	Bb(0) =	2	m	←槽底宽	Ta =	42.567	h	←溃决总时间							
8	Afa(0) =	33.6900675	deg	←槽初始坡角	Ti =	3.833	h	←溃口形成时间							
9	hw(0) =	2836.1	m	←水位标高	Td =	38.733	h	←溃决时间							
10	D(0) =	1	m	←槽深	Max H =	2838.657	m	←最高水位							
11	Bot =	2758	m	←坝底标高	Max d =	19.9967368	m	←最大水深							
12	H =	2837	m	←坝顶标高											
13	AfaC =	45	deg	←槽临界坡角	AfaC =	45.0009971	deg	←校核临界角							
14	Qin =	2222	m3/s	←入流量											
15	Qs =	0	m3/s	←渗流量											
16	Rcr =	0.6		←临界相对槽内水深											
17		Longitude section													
18	Bc0 =	320.253165	meter	←坝顶宽	300										
19	L0 =	872.35487	meter	←卜游初始坡长											
20	β0 =	5.12984716	deg	←下游初始坡角	880										
21	βu =	6.2615728	deg	←上游初始坡角	720										
22	Su0 =	0.006		←坝顶坡率											
23	Sd0 =	0.08977273		←下游坝坡率											
24	BetF =	30	deg	←卜游临界坡角											
25	Al =	215.4381	H^2 −	1092348.611	H +	1376292258		←库区水面面积高程曲线							
26		Soil parameters													
27	Parameter	e =	Cu =	d50 =	Pl =	P =	Gs =	φ=	FC>10%	Depth =		Kd =	Tc =	Kd =	
28	Unit			m				deg		m	<13	m3/N-s	Pa	mm3/N-s	
29	1	0.83	4.59	0.000215			2.718	37	0	9	←第一层土	2.59227E-06	1.8	2592.3	
30	2	0.7	68.6	0.01518			2.718	37	0	17	←第二层土	1.47288E-07	128.4	147.3	
31	3	0.61	122	0.026			2.718	37	0	60	←第三层土	4.93225E-08	219.9	49.3	
32	4	0.61	900	0.7			2.718	37	0	90	←第三层土	1.08008E-08	5920.7	10.8	

图 8 堰塞体三维漫顶溃决数值分析模型

Fig. 8 3D numerical analysis model for overtopping breach

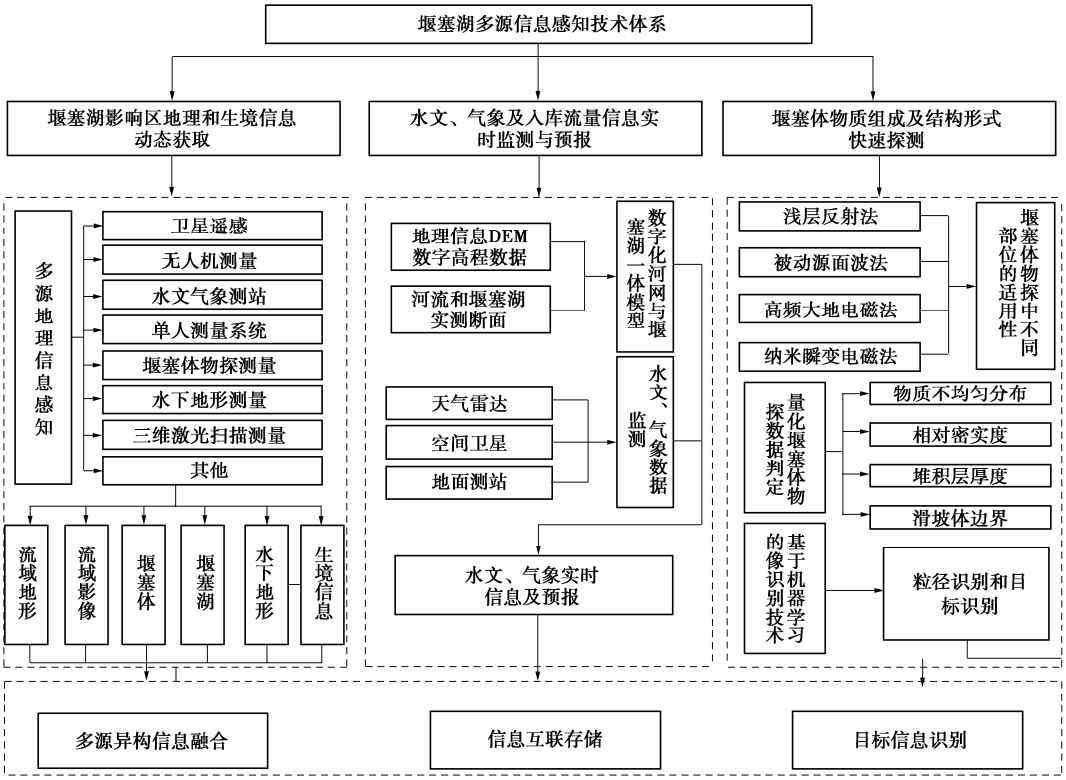
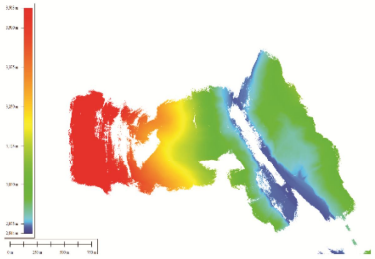


图 9　堰塞湖多源信息感知技术体系

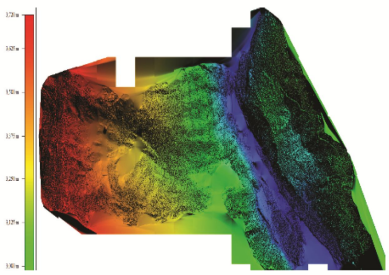
Fig. 9 Multi-source information perception technology system of barrier lakes

（2）多源空间数据结构快速转换技术

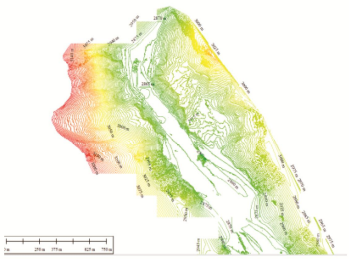
针对不同分辨率、多源异构地理信息数据，考虑高山峡谷各向数据特征，研发了高山峡谷地区光学无人机贴地航测方法、无人机倾斜摄影图像集群快速处理方法及水下地形快速构建技术，构建基于多方向克里金方法的 DEM 与 LiDAR 点云融合技术，建立多源空间数据结构快速转换及不同分辨率栅格转换方法，实现图 10 所示光学成像和 LiDAR 数据互补、高低精度搭配的堰塞湖地理信息快速获取和数据处理。



（a）点云数据



（b）DEM数据



（c）地形数据

图 10　多源空间数据结构快速转换

Fig. 10 Fast conversion of multi-source spatial data structures

（3）堰塞湖致灾风险因子智能识别技术

针对不同水文情势，建立了无监测站点的入库流量快速推算方法、快速布站技术和上游来水实时监测技术，开发了堰塞湖数字化河网智能提取和雨水情联动的水文快速预报技术，建立了堰塞湖三维可视化与智能管理平台；研发针对堰塞体大深度、高能耗材料特性的无线天然源面波探测技术及装备，开发堰塞体材料粒径智能识别系统，实现堰塞体结构快速探测。

3.3　堰塞湖险情监控及预警技术

当前堰塞湖险情应急监控仍主要采用传统的地质灾害监测方法，同时 InSAR 技术和 GNSS 监测技术开始用于堰塞湖相关的不稳定岸坡监测中。但针对堰塞湖诱发的险情、堰塞湖物源区后续险情、堰塞体险情演变、溃口发展动态等仍未形成专门的监测技术体系和专门的方法，专用监控预警设备研发进展缓慢，亟需系统研究堰塞湖险情应急监测预警技术及设备、安

全评估及预警模型等方面的理论方法与技术[31-32]。

（1）堰塞湖不同区域地质灾害识别技术

研发堰塞湖区基于无人机平台的 MiniSAR 监测技术，通过两次或多次干涉测量获取地表相位信息，引入外部数字高程模型，运用二轨法去除地形相位，大规模获取观测时段内形变信息，分析岸坡稳定性，如图 11 所示结合实地核查，确定重点监控对象。

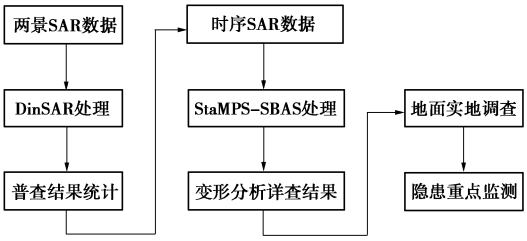


图 11 堰塞湖不稳定地质体灾害识别技术流程

Fig. 11 Technical process of identifying unstable geological body in barrier lakes

针对堰塞体物源区后续风险，研发了三维激光扫描变形监测及计算机双目变形监测技术。提出复合正态分布变换 NDT 与最近点迭代 ICP 算法的二重点云配准方法，引入渐进形态学滤波方法，实现三维激光扫描边坡变形高精度监测。研发了如图 12 所示双目视觉边坡变形监测装备，实现堰塞湖恶劣环境下非接触、高可靠性、低成本连续跟踪监测。

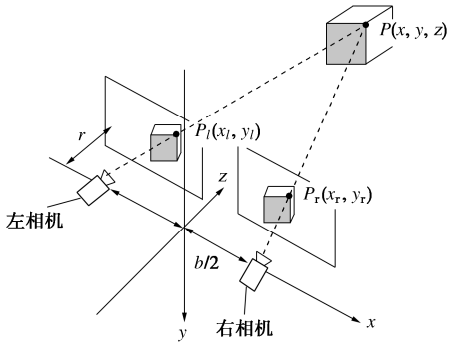


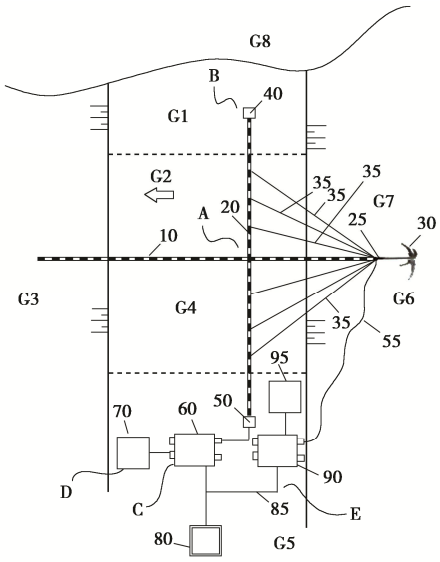
图 12 计算机双目视觉边坡变形监测基本原理

Fig. 12 Principle of slope deformation monitoring based on computer binocular vision

针对堰塞体变形及渗透破坏风险，研发了无人机倾斜摄影变形监测、随机布置分布式光纤变形监测及基于水流浊度的渗透变形光纤监测技术。

（2）堰塞湖溃口形态实时自动监控技术

堰塞湖溃决过程中，现场环境危险复杂，人员及设备均需提前撤离，堰塞湖溃口动态难以实时监测，溃口监控长期以来处于空白状态。针对高速水流及溃口形态瞬息万变的特点，首创锚拉式空间自主定位的阵列位移监测技术和设备（图 13），实现堰塞湖溃口三维形态实时监控，并在野外模型试验中实测溃口纵向下切及横向展宽冲刷变形，取得如图 14 所示良好效果，监控揭示堰塞体坡面最大冲刷宽度达到 4.5 m，堰塞体溃口最大下切深度达到 1.76 m，与无人机实测结果基本一致。



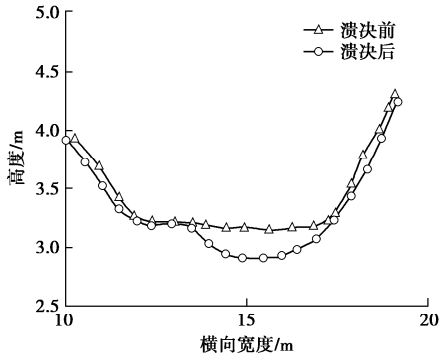
（a）溃口冲刷变形测量示意图



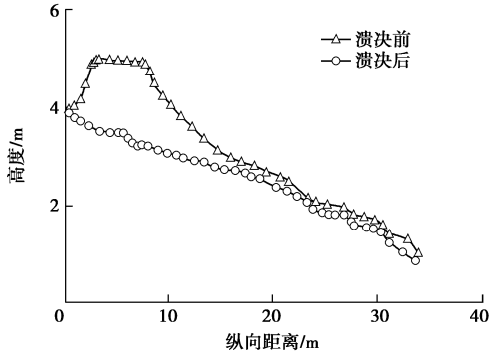
（b）野外试验实测溃口形态发展

图 13 堰塞体溃口应急监测

Fig. 13 Emergency monitoring of barrier body breach



（a）横向展宽变形



（b）纵向下切变形

图 14 堰塞体横向展宽及纵向下切实时监测

Fig. 14 Real-time monitoring of breach broadening and undercutting

（3）监测信息安全评估及预警技术

通过分析各信息的样本概率密度函数，运用信息熵聚类算法，提出了各测点的多源信息融合方法。运用灰色关联分析提取监测数据的空间关系规律，建立了灰色关联与时序模型组合插补模型。运用神经网络非线性映射能力，分析堰塞体和堰塞湖边坡测点位移与其整体变形的关系，提出了堰塞体和堰塞湖边坡局部和整体变形性态递推预测方法。针对堰塞湖应急监测资料不足特点，提出了小样本数据的迁移学习建模方法，基于矩问题理论创建了小样本监测数据警戒值确定技术，并从堰塞湖水漫顶、湖区岩土失稳、堰塞体溃决等 3 个层面提出了堰塞湖险情预警方法。

3.4　堰塞湖致灾风险评估技术

（1）堰塞湖灾损评估技术

从生命损失、经济损失、生态损失等 3 个层面，分别构建了堰塞湖淹没区及下游溃决洪水影响区的灾损评价指标体系及单类损失评估模型和综合评估模型，建立了灾损评价等级划分标准。

（2）堰塞体危险性评价技术

基于堰塞湖大数据，构建了由堰塞体形态 I（高度/长度）、堰塞体体积 V_d、堰塞湖流域面积 A_b 和堰塞体颗粒特征 S_d（由 d_{90}，d_{60}，d_{30} 和 d_5 表征）或 M_i（定性表征）等指标组成的堰塞体危险性精细化评估模型 $L_s(\mathrm{IVAS}) = -0.264\lg I + 1.166\lg V_d - 1.551\lg A_b - 0.168\cdot\lg S_d - 4.847$ 和简化评估模型 $L_s(\mathrm{IVAM}) = -0.198\cdot\lg I + 1.387\lg V_d - 1.432\lg A_b + 4.169M_i - 8.674$，简化评价方法针对只有定性描述堰塞体颗粒组成的情形[32]。L_s 为堰塞体危险性评价指标，当 $L_s>0$ 时，表示堰塞体不危险，当 $L_s<0$ 时，表示堰塞体危险[33]。

基于堰塞湖溃决机理及堰塞体危险性特指的溃决可能性与溃决可能引发的洪峰水平两层含义，构建了由堰塞湖来水量 Q、库容 V_b、堰塞体平均粒径 d_{50}、堰塞体形态（由高度 H 和长度与高度比值 L_H 表征）等组成的评价指标体系，提出了各指标划分等级标准，建立了查表法和模糊数学评判两种评价方法[30]。

（3）堰塞湖风险评估技术

在堰塞湖信息相对完整情形下，建立了基于堰塞体溃决概率和堰塞湖灾损的堰塞湖风险评估模型 $R=P_f F$，其中溃决概率 P_f 由堰塞体危险性 L_s 确定，

$$P_f = \frac{e^{-L_s}}{1+e^{-L_s}} \quad , \tag{1}$$

灾损 F 由生命损失、经济损失、生态损失综合确定。

在难以获取堰塞湖详细信息、决策时间十分紧迫情形下，构建了由堰塞体危险性 4 个指标和堰塞湖灾损 4 个指标组成的评价指标体系和风险等级划分标准，提出了查表法（表 2，3）和模糊数学评判两种快速评价方法。

表 2 堰塞湖风险等级划分

Table 2 Division of risk grade of barrier lakes

灾损	危险性			
	极高	高	中	低
极严重	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ
严重	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ
较严重	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
一般	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ

表 3 堰塞体单因素危险性级别

Table 3 Danger levels of single factor of barrier body

级别	分级指标			
	V_b /(10^6 m^3)	Q /($m^3\cdot s^{-1}$)	d_{50} /mm	H(m)，L_H
极高	≥100	≥150	<2	H≥70，L_H<20 或H [30,70)，L_H≤5
高	10～100	50～150	2～20	H≥70，L_H≥20 或H [30,70), L_H (5,20) 或 H [15,30), L_H≤5
中	1～10	10～50	20～200	H [30,70)，L_H≥20 或H [15,30), L_H(5,20) 或 H<15, L_H≤5
低	<1	<10	≥200	H [15,30), L_H≥20 或 H<15, L_H>5

（4）溃决洪水演进与风险评估平台

采用地理信息系统和数字高程模型相结合的快速空间信息处理技术，结合鹰眼大视野展示和显示范围设置，开发了堰塞湖溃决洪水致灾预警与风险评估系统平台，实现堰塞湖风险快速评估、溃决过程三维展示和洪水演进过程动态展示，实现下游河道断面实时水位和流量预测、受灾区域（以乡镇为单位）水情预警信息及洪水损失评估结果实时发布，见图 15。

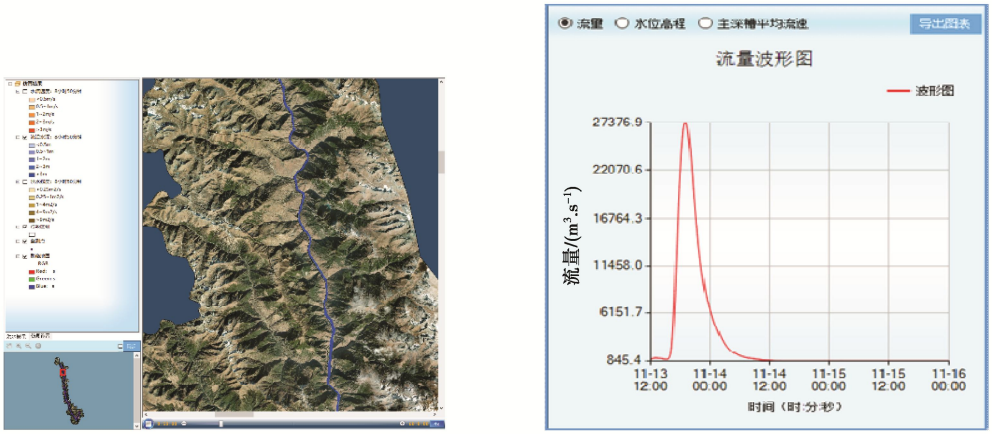
3.5　堰塞湖应急处置技术

（1）堰塞湖应急抢险预案及应急处置决策

针对堰塞湖灾情发生的不确定性、风险等级不确定性、灾害模式不确定性及信息获取不及时性等特征，研究考虑多风险等级、堰塞体特征、乏信息状态的堰塞湖应急抢险预案的制定方法，提出了如图 16 所示堰塞湖应急预案编制方法。从应急处置必要性、可行性及技术方案优选 3 个层次，构建了堰塞湖应急处置决策模型，从适用条件、方案可控性、处置效果、技术难度、资源需求、实施周期、次生风险、风险可控性等方面提出工程措施方案优选评价指标，基于堰塞湖应急处置情景推演，建立了不同方案的量化评价方法，为险情科学应对、精准施策提供了技术保障。

（2）堰塞湖快速疏通排水技术

开展国内外规模最大的堰塞湖引流槽体型优化大型物理试验、大功率虹吸排水冲刷及堰塞体定向钻进成洞排水试验（图 17），实现溃口发展及溃决洪水全过程模拟，揭示了溃口演化机制及引流槽横断面型式、纵坡降、尾部陡坎对溃前水位、溃决过程及洪峰



（a）溃决洪水演进 （b）断面洪水流量过程

图 15 溃决洪水演进与风险评估平台

Fig. 15 Breach flood evolution and risk assessment platform

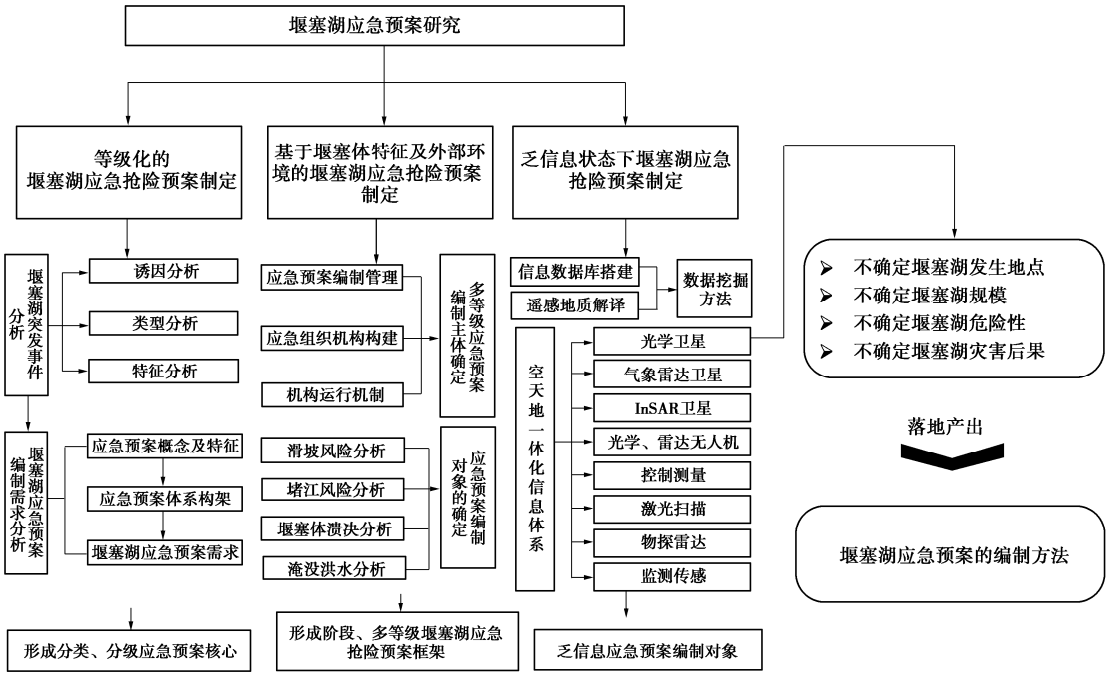


图 16 堰塞湖应急抢险预案研究框架

Fig. 16 Research framework of emergency plan for barrier lakes



（a）堰塞湖引流槽模型搭建 （b）虹吸排水冲刷试验

图 17 引流槽快速成槽技术

Fig. 17 Rapid formation technology of flow-conducted trough

流量影响规律，建立了堰塞湖应急疏通排水技术体系并纳入中国堰塞湖应急抢险规范，提出了以引流槽开挖为主、真空整流虹吸排水及大功率冲刷为辅的快速排水技术及设计方法，较传统方法实现溃前水位和溃口洪峰双降显著效果。

（3）堰塞湖控溃削峰技术

堰塞湖溃口演变涉及非线性发展的纵向下切和横向展宽。结合模型试验及堰塞湖案例数据分析，提出堰塞湖水位－溃决流量典型过程线，如图 18 所示，将溃口洪峰出现之前溃决过程依次划分为溃决过流孕育阶段（ΔT_1）、溃决发展阶段（ΔT_2）及溃决形成阶段（ΔT_3）。溃决过流孕育阶段持续时间长、溃口发展缓慢、上游水位持续上升，从减灾角度应通过工程措施加速本阶段溃口发展、缩短该阶段持续时间，降低堰塞湖最大雍高水位（H_{max}），避免更大范围淹没和形成更大的蓄水量。溃决发展阶段是溯源陡坎形成阶段，也是溃口流量由缓慢增长向快速增长转变的过渡期，一旦多级陡坎整合为单一的大陡坎并快速向上游推进，便会进入溃决阶段，溃口尺寸及流量将急剧增大。为了降低堰塞湖溃决洪峰（Q_{max}），控制溃口发展速度成为关键，但溃口附近安全风险极高，不具备实时控溃施工条件。针对上述特殊条件，项目团队提出了“控后不控早、柔性自适应”的堰塞湖控溃理念，研发了挂壁式石笼串护坡及柔性网链护底的引流槽控溃防护技术，通过典型案例研究，揭示溃口下切与展宽随溃口流量发展演变规律，提出了最优防护时机和防护设施超前布设空间位置参数。

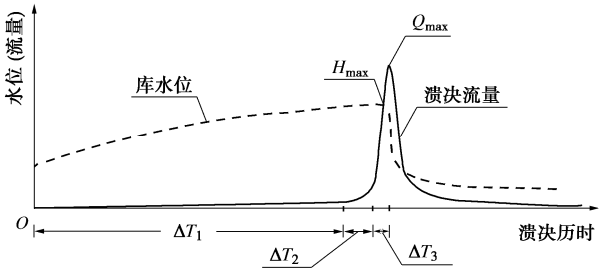


图 18 堰塞湖库水位–溃决流量变化过程

Fig. 18 Variation process of water level and breach flood of barrier lakes

为验证柔性自适应防护措施的有效性和防护结构与溃决洪水的互馈机制，在汶川地震堰塞湖重灾区开展了以白格堰塞湖为参照、1∶20 比尺的野外模型试验（堰塞体长×宽×高为 33 m×5 m×4 m），溃前防护设施布置如图 19 所示，引流槽上游 1/3 范围边墙布置石笼串，上游坡面布置柔性网链。共开展 5 组试验，工况 1 为常规的梯形槽，工况 2 为复式断面引流槽，工况 3 在工况 2 基础上增设尾部陡坎，工况 4 在工况 3 基础上增设石笼串，工况 5 在工况 4 基础上增设柔性网链。堰塞湖溃口流量过程线如图 20 所示，各工况溃前最大雍高水位依次为 2.607，2.568，2.565，2.563，2.616 m，最大溃决洪峰依次为 4.821，3.964，4.297，4.025，3.848 m^3/s。试验表明复式断面引流槽能有效加快初期过流孕育阶段发展进程、降低堰塞湖最大雍高水位，尾部陡坎能加速溯源陡坎形成、加快溃口冲刷发展和溃决进程，通过引流槽体型优化明显减小堰塞湖蓄水量，削峰比例达到 17.8%。采取石笼串防护后，溃口最终宽度减小、下切深度有所增大，削峰比例 6.3%。同时布设石笼串和柔性网链后，溃决时间明显延后，溃决过程明显拉长，溃口洪水呈现坦化现象，削峰比例达到 10.4%。引流槽体型优化与柔性防护联合运用，削峰比例达到 20.2%，对减轻堰塞湖溃决洪水次生灾害具有重要意义[30]。相比于河道堤防工程常用的铅丝笼护坡结构，柔性防护措施能随溃口形态变化不断调整自身结构形式，持续保护溃口边坡及底坡，并且能在溃决过程中择机发挥作用，实现溃决初期不干扰引流槽正常泄流、溃决后期延缓溃口发展。



图 19 柔性防护措施

Fig. 19 Flexible protective measures

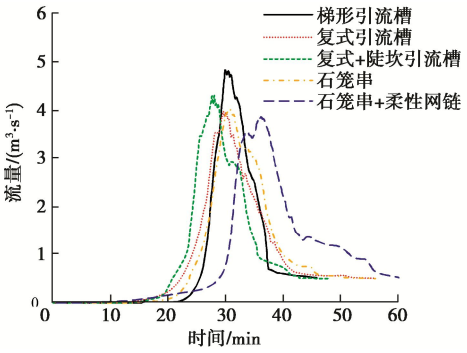


图 20 溃决洪水流量变化过程

Fig. 20 Process of breach flood rate

溃口柔性防护效果除了与防护时机有关外，还与防护范围、网链网眼大小等有关，通过结构设计和施工组织优化，可望取得更好的削峰效果。

（4）引流槽快速开挖成槽技术装备

针对堰塞湖引流槽开挖抢险作业时间紧、工程量大、施工场地狭窄、批量施工机械难以进场等问题，项目团队根据堰塞湖抢险救援的环境特点和险情特

征，成功研制如图 21 所示高效开挖、输送一体化装备，实现堰塞湖重大抢险装备零的突破，破除了常规机械设备单点开挖、分散运输的局限性，单台套装备开挖运输效率大于 1000 m^3/h，显著提升堰塞湖抢险救援能力。



图 21 连续开挖输送一体化装备

Fig. 21 Continuously excavating and conveying integrated equipments

该装备由模块化连续开挖掘进机和履带式可伸缩输运机组合而成，其中单个模块最大重量为 140 kN，在陆路通行条件不具备时，可借助直升机吊运进退场。设备自主移动性强，输运机具有远程操控、自动调平等功能，可大幅减少抢险现场设备和人员数量，显著提升堰塞湖复杂环境下的施工安全。设备设计通过粒径为 40 cm，对于超径块石，可借助其他设备提前破碎或即时破碎后挖运。

4 结 论

本项目以堰塞湖风险评估快速检测和应急处置为背景，围绕“堰塞体形成与溃决机理—多源信息快速感知与探测—险情应急监控与预警—致灾风险评估—应急处置技术—应急抢险关键设备”等开展系统研究。研究内容涵盖工程地质学、水文地质学、灾害学、力学、数学、信息科学等多学科，堰塞湖应急处置技术研究将促进多学科的交叉融合，有效推动堰塞湖风险处置技术领域科技进步。

（1）促进理论学科发展。项目团队首次建立堰塞体形态结构与滑源区岩土结构及滑坡运动特征内在关联模型，揭示基于岸坡地质和运动过程分析的堰塞体形成机理；通过物理模型试验揭示堰塞湖溃口下切及展宽变化规律，提出了不同致灾因子作用下的堰塞体溃决机理。

（2）提升堰塞湖应急处置技术水平。项目团队构建了基于空—天—地—水的堰塞湖信息感知体系，研发了堰塞体结构高效探测及堰塞湖监测预警技术专用设备，实现堰塞湖多源数据快速融合与智能识别，建立了堰塞湖应急监测技术体系和安全预警模型；构建基于溃决机理和灾变机制的堰塞湖风险评价指标体系，建立了堰塞体危险性、堰塞湖灾损及风险等级评估模型；构建了堰塞湖应急处置决策模型和应急排水疏通技术体系，首创堰塞湖柔性自适应控溃技术，开发了高危堰塞湖应急处置成套技术及高效疏通装备，实现延缓堰塞体溃决、人工控制溃口洪峰流量零的突破。

（3）推动技术应用标准化。在本项目实施前，仅有 SL450—2009 和 SL451—2009 等两项标准对堰塞湖风险等级划分和应急处置提出总体要求和技术性指导，随着近些年对堰塞湖开展深入研究，部分条文已经不能满足堰塞湖高效应急处置的需求。项目团队基于项目研究成果，充分吸纳技术应用过程中的成功经验，形成了《堰塞湖风险等级划分与应急处置技术规范》SL/T450—2021 标准 1 部，为中国堰塞湖高效、科学应急处置提供了标准化方案。

本项目相关研究发表论文 119 篇，其中 SCI/EI 收录 65 篇；出版专著 5 部；申请国家专利 56 项，已授权专利 23 项，获得软件著作权 20 项，形成行业标准 1 部。项目团队 1 人次入选国家级人才称号，1 人次入选省部级人才称号。项目成果荣获省部级特等奖 2 项，为金沙江白格、雅江加拉、恩施屯堡、西藏定日、波密等堰塞湖（冰湖）抢险救灾工作发挥科技支撑作用，取得显著社会效益。

参考文献：

[1] 柴贺军, 刘汉超, 张倬元. 中国滑坡堵江的类型及其特点[J]. 成都理工学院学报, 1998, **25**(3): 411－416. (CHAI He-jun, LIU Han-chao, ZHANG Zhuo-yuan. Study on the categories of landslide damming of rivers and their characteristics[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1998, **25**(3): 411－416. (in Chinese))

[2] 聂高众, 高建国, 邓 砚. 地震诱发的堰塞湖初步研究[J]. 第四纪研究, 2004, **24**(3): 293－301. (NIE Gao-zhong, GAO Jian-guo, DENG Yan. Preliminary study on earthquake-induced dammed lake[J]. Quaternary Sciences, 2004, **24**(3): 293－301. (in Chinese))

[3] 王光谦, 王永强, 刘 磊, 等. 堰塞坝及其溃决模拟研究评述[J]. 人民黄河, 2015, **37**(9): 1－7. (WANG Guang-qian, WANG Yong-qiang, LIU Lei, et al. Reviewed on barrier dam and simulation on dam breach[J]. Yellow River, 2015, **37**(9): 1－7. (in Chinese))

[4] 胡卸文, 罗 刚, 王军桥, 等. 唐家山堰塞体渗流稳定及溃决模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(7):

1409－1417. (HU Xie-wen, LUO Gang, WANG Jun-qiao, et al. Seepage stability analysis and dam-breaking mode of Tangjiashan barrier dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(7): 1409－1417. (in Chinese))

[5] 陈祖煜, 陈生水, 王　琳, 等. 金沙江上游“11·03”白格堰塞湖溃决洪水反演分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, **50**(6): 763－774. (CHEN Zu-yu, CHEN Sheng-shui, WANG Lin, et al. Back analysis of the breach flood of the “11·03” Baige barrier lake at the Upper Jinsha River[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2020, **50**(6): 763－774. (in Chinese))

[6] 蔡耀军, 栾约生, 杨启贵, 等. 金沙江白格堰塞体结构形态与溃决特征研究[J]. 人民长江, 2019, **50**(3): 15－22. (CAI Yao-jun, LUAN Yue-sheng, YANG Qi-gui, et al. Study on structural morphology and dam-break characteristics of Baige barrier dam on Jinsha River[J]. Yangtze River, 2019, **50**(3): 15－22. (in Chinese))

[7] CAI Y J, CHENG H Y, WU S F, et al. Breaches of the Baige Barrier Lake: emergency response and dam breach flood[J]. Science China Technological Sciences, 2020, **63**(7): 1164－1176.

[8] COSTA J E, SCHUSTER R L. The formation and failure of natural dams[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, **100**(7): 1054－1068.

[9] 石振明, 马小龙, 彭　铭, 等. 基于大型数据库的堰塞坝特征统计分析与溃决参数快速评估模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(9): 1780－1790. (SHI Zhen-ming, MA Xiao-long, PENG Ming, et al. Statistical analysis and efficient dam burst modelling of landslide dams based on a large-scale database[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(9): 1780－1790. (in Chinese))

[10] YANG F G, ZHOU X Q, LIU X N, et al. Experimental study of breach growth processes in sand dams of quake lakes[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2012, **5**(5): 445－459.

[11] SCHMOCKER L, HAGER W H. Modelling dike breaching due to overtopping[J]. Journal of Hydraulic Research, 2009, **47**(5): 585－597.

[12] YAN J, CAO Z X, LIU H H, et al. Experimental study of landslide dam-break flood over erodible bed in open channels[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser B, 2009, **21**(1): 124－130.

[13] 张　婧, 曹叔尤, 杨奉广, 等. 堰塞坝泄流冲刷试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, **42**(5): 191－196. (ZHANG Jing, CAO Shu-you, YANG Feng-guang, et al. Experimental study on outlet and scour of blocked dam[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, **42**(5): 191－196. (in Chinese))

[14] 蒋先刚, 吴　雷. 不同底床坡度下的堰塞坝溃决过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(增刊 1): 3008－3014. (JIANG Xian-gang, WU Lei. Influence of bed slope on breaching process of natural dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(S1): 3008－3014. (in Chinese))

[15] 钟启明, 陈生水, 邓　曌. 堰塞坝漫顶溃决机理与溃坝过程模拟[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, **48**(9): 959－968. (ZHONG Qi-ming, CHEN Sheng-shui, DENG Zhao. Breach mechanism and numerical modeling of barrier dam due to overtopping failure[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2018, **48**(9): 959－968. (in Chinese))

[16] 钟启明, 陈生水, 梅世昂. 均质黏性土坝漫顶溃决机理及溃坝过程模拟[J]. 工程科学与技术, 2019, **51**(5): 25－32. (ZHONG Qi-ming, CHEN Sheng-shui, MEI Shi-ang. Breach mechanism and breach process simulation of homogeneous cohesive earthen dam due to overtopping[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, **51**(5): 25－32. (in Chinese))

[17] WANG G Q, LIU F, FU X D, et al. Simulation of dam breach development for emergency treatment of the Tangjiashan Quake Lake in China[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, **51**(2): 82－94.

[18] CAO Z X, YUE Z Y, PENDER G. Landslide Dam failure and flood hydraulics. Part II: coupled mathematical modelling[J]. Natural Hazards, 2011, **59**(2): 1021－1045.

[19] 谢　忱, 李从江, 杨兴国, 等. 基于物理模型试验的堰塞坝冲刷溃决过程研究[J]. 工程科学与技术, 2021, **53**(6): 43－53. (XIE Chen, LI Cong-jiang, YANG Xing-guo, et al. Erosion and breach of landslide dam based on physical model tests[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, **53**(6): 43－53. (in Chinese))

[20] 魏迎奇, 孙黎明, 傅中志, 等. 堰塞湖多源信息及其感知技术[J]. 人民长江, 2019, **50**(4): 1－7. (WEI Ying-qi, SUN Li-ming, FU Zhong-zhi, et al. Multi-source information and perception technology of barrier lakes[J]. Yangtze River, 2019, **50**(4): 1－7. (in Chinese))

[21] 何秉顺, 赵进勇, 王　力, 等. 三维激光扫描技术在堰塞湖地形快速测量中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, **28**(3): 394－398. (HE Bing-shun, ZHAO Jin-yong, WANG Li, et al. The application of landslide lake topographic measurement by LiDAR[J]. Journal of Disaster Prevention

and Mitigation Engineering, 2008, **28**(3): 394－398. (in Chinese))

[22] 吕杰堂, 王治华, 周成虎. 西藏易贡滑坡堰塞湖的卫星遥感监测方法初探[J]. 地球学报, 2002, **23**(4): 363－368. (LÜ Jie-tang, WANG Zhi-hua ZHOU Cheng-hu. A tentative discussion on the monitoring of the yigong landslide-blocked lake with satellite remote sensing technique[J]. Acta Geosicientia Sinica, 2002, **23**(4): 363－368. (in Chinese))

[23] 孙黎明. 高山峡谷区滑坡堰塞体快速感知与模拟计算方法研究: 以白格堰塞湖为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, **52**(7): 44－52. (SUN Li-ming. Study on quick information perception and simulative calculation method of landslide dammed-body in alpine and gorge region: taking Baige Landslide-Dammed Lake as study case[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, **52**(7): 44－52. (in Chinese))

[24] 堰塞湖风险等级划分标准: SL 450—2009[S]. 2009. (Standard for Classification of Risk Grade of Landslide Lake: SL 450—2009[S]. 2009. http://kns.cnki.net/detail/32.1117.TV20211D15.1934.006.html. (in Chinese))

[25] 杜镇瀚, 钟启明, 董海洲, 等. 堰塞湖风险评估研究综述[J/OL].河海大学学报(自然科学版):1-19[2022-01-21]. (DU Zhen-han, ZHONG Qi-ming, DONG Hai-zhou, et al. A review of demmed lake risk assessment sludies[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences): 1-19[2022-01-21]. http://kns.cnki.net/detail/OI/32.1117.TV202/1015.1934.006.html. (in Chinese))

[26] 堰塞湖应急处置技术导则: SL 451—2009[S]. 2009. (Technique Guideline for Emergency Disposal of Landslide Lake: SL 451—2009[S]. 2009. (in Chinese))

[27] 杨启贵, 姚晓敏, 申邵洪, 等. 基于应急与常态统合管理的堰塞湖风险处置实践: 以 2020 年清江屯堡堰塞湖处置为例[J]. 人民长江, 2020, **51**(12): 25－30. (YANG Qi-gui, YAO Xiao-min, SHEN Shao-hong, et al. Risk disposal of barrier lake based on routine and emergency coordinated management theory: case of Tunbao barrier lake on Qingjiang River in 2020[J]. Yangtze River, 2020, **51**(12): 25－30. (in Chinese))

[28] 刘 宁, 杨启贵. 唐家山堰塞湖应急除险技术实践[J]. 中国工程科学, 2009, **11**(6): 74－81. (LIU Ning, YANG Qi-gui. The emergency handling technique and practice of Tangjiashan barrier lake[J]. Engineering Sciences, 2009, **11**(6): 74－81. (in Chinese))

[29] 刘 宁, 杨启贵, 陈祖煜. 堰塞湖风险处置[M]. 武汉: 长江出版社, 2016. (LIU Ning, YANG Qi-gui, CHEN Zu-yu. Hazard mitigation for barrier lakes[M]. Wuhan: Changjiang Press, 2016. (in Chinese))

[30] 蔡耀军, 李建清, 彭文祥. 堰塞湖应急处置技术[M]. 武汉: 长江出版社, 2021. (CAI Yao-jun, LI Jian-qing, PENG Wen-xiang. Emergence disposal technology of high-risk barrier lakes[M]. Wuhan: Changjiang Press, 2021. (in Chinese))

[31] 余晓露, 郑东健. 基于人工神经网络的边坡新多点监控模型[J]. 人民黄河, 2020, **42**(6): 117－119, 129. (YU Xiao-lu, ZHENG Dong-jian. A new multi-point monitoring model of slope based on artificial neural network[J]. Yellow River, 2020, **42**(6): 117－119, 129. (in Chinese))

[32] 武 鑫, 郑东健, 刘永涛, 等. 滑坡失稳时间预测方法研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2021, **41**(4): 89－94. (WU Xin, ZHENG Dong-jian, LIU Yong-tao, et al. A review of temporal prediction methods for landslide failure[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, **41**(4): 89－94. (in Chinese))

[33] SHAN Y B, CHEN S S, ZHONG Q M. Rapid prediction of landslide dam stability using the logistic regression method[J]. Landslides, 2020, **17**(12): 2931－2956.

DOI：10.11779/CJGE202207008 “十三五”国家重点研发计划项目

膨胀土滑坡和工程边坡新型防治技术研究

徐永福[1]，程 岩[1]，肖 杰[2]，林宇亮[3]，戚顺超[4]

（1. 上海交通大学土木工程系，上海 200240；2. 长沙理工大学，湖南 长沙 410114；3. 中南大学，湖南 长沙 410083；4. 四川大学，四川 成都 610065）



摘 要：国家重点研发计划项目“膨胀土滑坡和工程边坡新型防治技术研究（2019YFC1509800）”基于蒙脱石表面的分形模型，根据等温吸附理论，揭示膨胀土的水力作用机理，建立了膨胀变形理论和广义有效应力理论，提出了裂隙性膨胀土的剪切强度理论；根据膨胀土边坡失稳特征，将膨胀土边坡失稳滑动分为浅层裂隙控制滑坡和深层结构面控制滑坡，针对两种膨胀土滑坡类型，提出了膨胀土边坡安全性评价方法；将膨胀土边坡防治技术分为三类：分“隔”技术、支“挡”技术和加“固”技术（简称“隔”、“挡”、“固”）。分“隔”技术包括非膨胀性黏土盖层、土工编织袋、加筋反包和防排水结构层，支“挡”技术主要为各类挡土墙，如桩板墙、土工编织袋挡墙等，加“固”技术主要包括抗滑桩、锚杆等；提出了土工编织袋、加筋反包和桩板墙防治技术的标准化设计方法，完成了土工编织袋、加筋反包、防排水结构层和桩板墙的应用示范工程，采用现场全自动实时监测技术，验证了膨胀土边坡防护效果。

关键词：膨胀土；工程边坡；滑坡；防治；标准化

中图分类号：TU43 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2022)07－1281－14

作者简介：徐永福(1967—)，男，江苏泰兴人，工学博士，上海交通大学土木工程系教授（长聘）、博士生导师，开拓分形介质土力学新学科方向。入选教育部新世纪优秀人才支持计划和全球前2%顶尖科学家榜单。中国土木工程学会非饱和土与特殊土专委会副主任、中国水利学会岩土工程专业委员会常务理事等，《岩土工程学报》《工程地质学报》和《金属矿山》编委。主持包括国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重点项目等在内的各类项目100余项，发表论文200余篇，出版专著8部，主编各类标准6部，获省部自然科学奖3项、科技进步奖3项。E-mail: yongfuxu@sjtu.edu.cn。

New prevention and control technology for expansive soil slopes

XU Yong-fu[1], CHENG Yan[1], XIAO Jie[2], LIN Yu-liang[3], QI Shun-chao[4]

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Central South University, Changsha 410083, China; 4. Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: For the National Key Research and Development Program of China “Research on new prevention and control technology of expansive soil slopes (No. 2019YFC1509800)”, the following achievements are obtained: (1) Based on the fractal model for montmorillonite surface and the isothermal adsorption theory, the water-mineral interaction mechanism of expansive soils is revealed, the swelling deformation theory and generalized effective stress theory are established, and the shear strength theory of fractured expansive soils is put forward. (2) The failure mechanism of expansive soil slopes is divided into two types which are controlled by shallow cracks and deep weak planes. The methods to evaluate the stability factor of expansive soil slopes are proposed for two slope failure types. (3) The prevention technology of expansive soil slopes is divided into three types as "separation" technology, "retaining" technology and "stabilization" technology (hereinafter written as SRS for short). The separation technology contains non-expansive clay-covered layer, soil bags, reinforced package and waterproof & drainage layers. The retaining technology contains pile-sheet walls and soilbag retaining walls. The stabilization technology contains anti-slide piles and anchor rods. (4) The standardized design of soilbag, reinforced packages and pile-sheet walls is realized. The application of soil bags, reinforced packages, waterproof & drainage layers and pile-sheet walls are completed for the prevention of expansive soil slopes. The validity of the applied prevention and control technology is checked by the real-time automatic monitoring results in site.

基金项目：国家重点研发计划项目（2019YFC1509800）

收稿日期：2022－01－17

Key words: expansive soil; engineering slope; slopeslide; prevention and control; standardization

0 引 言

中国膨胀土特别发育，分布于 20 多个省市区，总面积在 10 万 km^2 以上，超过 3 亿人生活在膨胀土分布地区（图 1）[1-3]。膨胀土分布地区地质环境脆弱，人类工程活动活跃，水力作用频繁，导致膨胀土边坡“逢堑必崩、无堤不塌”，每年的直接经济损失超过数百亿元[4-7]。膨胀土滑坡灾害严重限制了膨胀土分布地区的城镇化建设发展，威胁着膨胀土分布地区人居安全和社会稳定，危及着大型设施的安全运营，成为地质灾害防治工作的难题[8-10]。为此，国家重点研发计划项目“膨胀土滑坡和工程边坡新型防治技术研究（2019YFC1509800）”从多学科交叉的视角，凝炼两个关键科学问题：①膨胀土滑坡和工程边坡非线性多场多相耦合作用的结果响应和致灾机制；②膨胀土滑坡和工程边坡多层次异性异构协同机制的工作机理与性能劣化。共设置 5 个课题：①膨胀土边坡的水力作用机理与安全性评价方法；②膨胀土边坡的实时监测方法和早期预警技术；③膨胀土滑坡和工程边坡防治的新材料和新技术；④膨胀土边坡防护工程健康诊断与快速修复技术；⑤膨胀土边坡生态防护技术与应用示范。按照“理论创新→技术突破→标准制定→应用示范”的技术路线开展研究（图 2）。本文重点介绍项目的主要创新成果和应用示范。

1 膨胀土的水力作用机理与强度理论

建立了膨胀土孔隙表面的分形模型，提出表面分维的测试方法，导出膨胀土孔隙水体积的吸附方程，揭示膨胀土的水力作用机理，构建膨胀土的胀缩变形理论、广义有效应力原理和裂隙性膨胀土的剪切强度理论。

1.1 水力作用机理

膨胀土含有亲水矿物蒙脱石、伊利石等黏土矿物，吸水膨胀、失水收缩。膨胀土吸水体积与黏土矿物表面的分形特征和上覆压应力有关[11-13]：

$$e_{\mathrm{m}}=\frac{V_{\mathrm{w}}}{V_{\mathrm{m}}}=Kp^{D_{\mathrm{s}}-3} \quad 。 \tag{1}$$

式中 e_{m} 为蒙脱石孔隙比，与膨胀土孔隙比 e 的关系为 $e_{\mathrm{m}}=m\cdot e$，m 为蒙脱石含量；V_{w} 为膨胀土吸水体积；V_{m} 为膨胀土中蒙脱石体积；K 为常数；p 为上覆压应力；D_{s} 为膨胀土的表面分维。膨胀土边坡在开挖卸荷过程中，上覆压应力减小，吸附水体积增加，吸水后膨胀土的孔隙比 e 增加，强度降低。从这个角度讲，放缓边坡引起大幅度的开挖卸荷，不利于边坡稳定性。式（1）中的上覆压应力换成膨胀力，同样成立[13]。

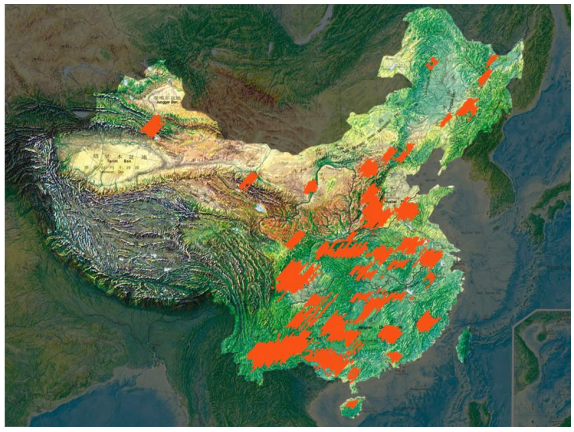


图 1 中国膨胀土分布[1-2]

Fig. 1 Distribution of expansive soils in China[1-2]

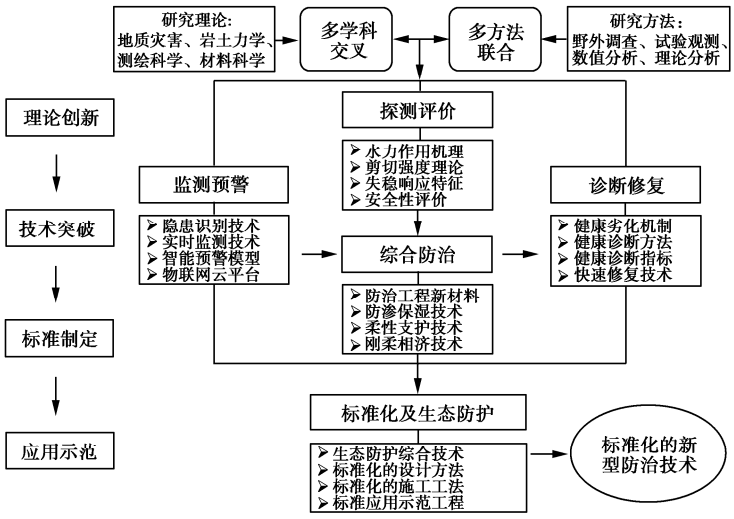


图 2 技术路线

Fig. 2 Technology roadmap

膨胀土孔隙的表面分维有许多测试方法，普遍使用的方法是压汞试验和氮（N_2）等温吸附试验[13-14]。根据 N_2 等温吸附试验计算膨胀土表面分维的方法为[15]

$$V_{ads}=k\left[\ln\left(\frac{P_0}{P}\right)\right]^{D_s-3}\quad , \tag{2}$$

式中，V_{ads} 为 N_2 吸附体积，P 为平衡蒸汽压，P_0 为纯水的平衡水蒸汽压，k 为比例常数。用于压汞试验计算膨胀土孔隙表面分维的方法为[13-14]

$$M=KN^{D_s}\quad , \tag{3}$$

式中，$M=\sum(P_i\Delta V_i)/r_n^2$，$N=V_n^{1/3}/r_n$，$K$ 为比例常数。

南宁崇爱高速公路路基膨胀土的氮等温吸附试验曲线和压汞试验曲线如图 3 所示，#1，#2 为土样编号。图 3（a）给出了南宁膨胀土的氮等温吸附曲线，V 为 N_2 吸附体积，P/P_0 为相对湿度，吸附曲线与脱附曲线之间存在滞回环。低于常压条件下，N_2 在毛细凝聚作用下冷凝填充孔隙，吸附时，毛细凝结发生在孔壁的环状吸附膜上；脱附作用是从孔隙的球形弯液面开始，导致吸附和脱附等温线不重合，形成一个滞回环。图 3（a）中滞回环等温线没有明显的饱和吸附平台，表明膨胀土的孔结构很不规整。图 3（b）给出了南宁膨胀土的压汞曲线，V 为压汞体积，d 为孔径，加压曲线与卸压曲线之间存在滞回环。膨胀土孔隙中有部分毛细管孔隙，汞在毛细管孔隙中受到毛细阻力，不能自由流动。在卸压排汞时，孔隙中均为非润湿相的汞，毛细阻力比注汞时大，在同样大的外界压力下，加压汞能注入毛细管中，但卸压汞却不能排出。压汞曲线的滞回环可以形象地用孔隙率和有效孔隙率类比，加压注汞时所有的孔隙都是有效的，卸压退汞时只有有效孔隙对排汞才是有效的。从图 3（b）中的 $dV/d(\lg d)$ 分布看，南宁膨胀土的孔隙分布是单峰分布，即只有一个主要孔径。

膨胀土孔隙表面特性可以定量地用表面分维表示，孔隙表面分维根据式（2），（3）由 N_2 等温吸附试验和压汞试验结果计算。如图 4 所示，根据式（2）由 N_2 等温吸附试验计算的孔隙表面分维。无论是吸附曲线还是脱附曲线都符合式（2）所表示的表面分形模型，吸附曲线和脱附曲线在 $\lg[\lg(P_0/P)]-\lg V_{ads}$ 坐标上的斜率分别为 0.27 和 0.23，对应的孔隙表面分维分别为 2.73 和 2.77。由吸附曲线和脱附曲线计算的南宁膨胀土表面分维不同，与吸附曲线和脱附曲线之间的滞回环一样，反映了孔隙表面特性，吸附曲线是反映孔壁结构特性，即孔隙表面特性，常被用来计算孔隙表面分维；脱附曲线反映球形弯液面特性，与孔隙表面结构差别大。在根据孔隙表面分形模型解释膨胀土的水力作用机理时，采用由吸附曲线计算的孔隙表面分维。

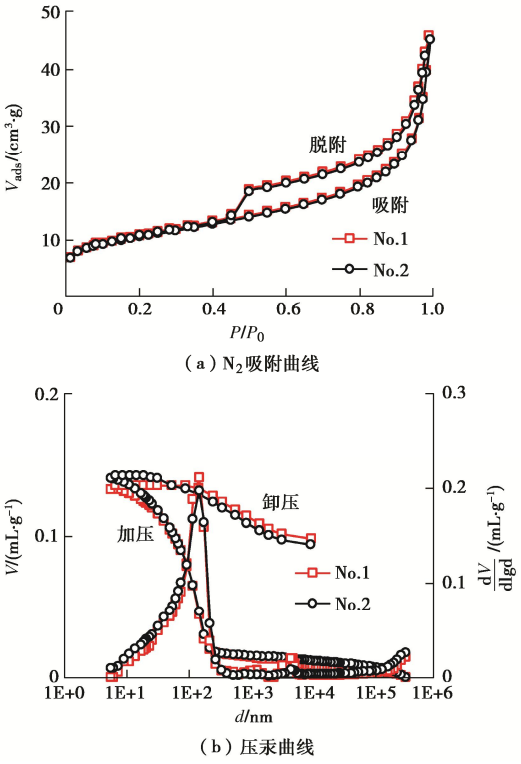


图 3　南宁膨胀土的 N_2 等温吸附和压汞曲线

Fig. 3 Nitrogen isotherm adsorption and mercury intrusion curves of Nanning expansive soil

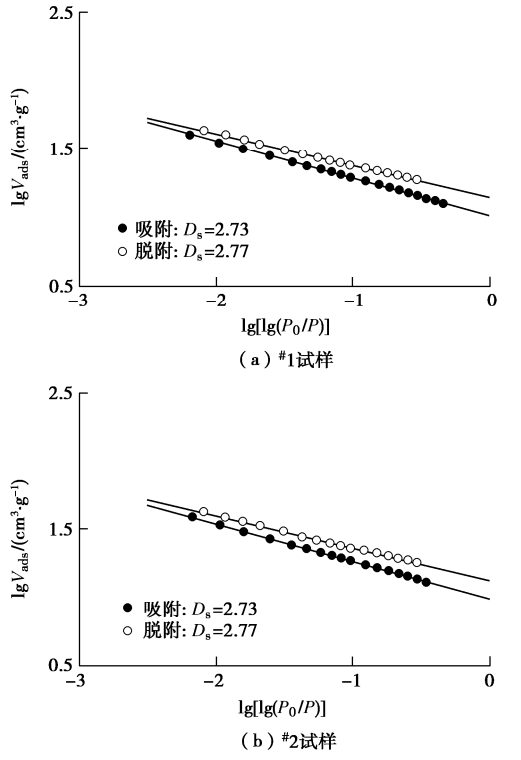
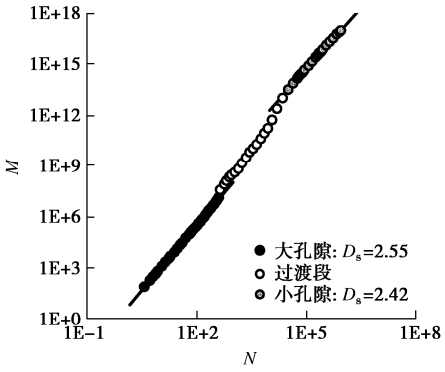


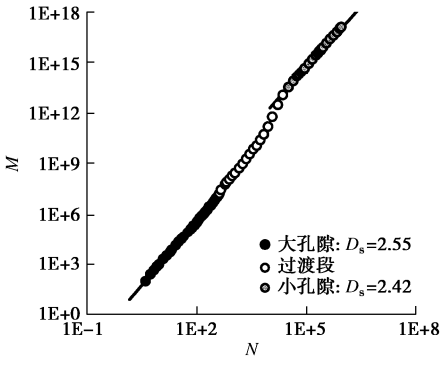
图 4　氮吸附试验测试的南宁膨胀土表面分维

Fig. 4 Surface fractal dimension of Nanning expansive soil from Nitrogen isotherm adsorption

根据式（3）由膨胀土的压汞曲线计算孔隙表面分维表示在图 5 中，根据压汞曲线计算南宁膨胀土孔隙表面分维分为 3 段：大孔隙（d＞6000 nm）、过渡段（120～6000 nm）和小孔隙（d＜120 nm），南宁膨胀土大孔隙的表面分维为 2.55，小孔隙的表面分维为 2.42。从膨胀土压汞曲线 dV/d(lg$d$)分布看出，大孔隙（d＞6000 nm）和小孔隙（d＜120 nm）分别对应图 3（b）中的两个孔隙分布峰值，说明南宁膨胀土跟其他黏土和水泥改良土一样，孔隙具有双峰分布[16-17]。由压汞曲线计算的大孔隙表面分维可以用于建立非饱和土力学理论，包括非饱和土的土水特征曲线、渗透系数、扩散系数、有效应力和剪切强度理论[18-20]。



（a）#1试样



（b）#2试样

图 5 根据压汞试验计算的南宁膨胀土表面分维

Fig. 5 Surface fractal dimension of Nanning expansive soil from mercury intrusion tests

南宁膨胀土的含水率与膨胀力的相关关系如图 6 所示。含水率与吸附水体积的关系为 $w=(m\cdot V_w/V_m)/G_s$，m为蒙脱石含量，G_s为土粒相对质量密度。因此，式（1）同样适用于含水率与膨胀力的相关关系，孔隙表面分维根据 N_2 吸附曲线计算。

1.2 膨胀土的剪切强度理论

（1）盐溶液饱和的膨胀土剪切强度

Xu[21]、郑新江等[22]基于膨胀土孔隙表面的分形模型，建立了饱和状态下膨胀土的广义有效应力理论：

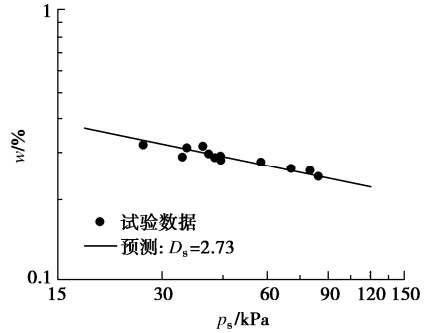


图 6 南宁膨胀土的膨胀力与含水率的相关关系

Fig. 6 Correlation between swelling pressure and water content of Nanning expansive soil

$$p^e=(p-u_w)+\sum_i[\pi_i(p/\pi_i)^{D_s-2}] \quad , \tag{4}$$

式中，p^e为广义有效应力，p 为正应力，u_w为孔隙水压，π_i为盐溶液中组分 i 的渗透吸力。渗透吸力 π 与溶液离子总浓度 c 温度 T 的关系满足 Van's Hoff 公式：$\pi=cRT$，广义气体常数 R=8.31 J/mol/K。渗透吸力系数 ϕ 为

$$\phi=\sum F_{ca}+\sum F_c+\sum F_a+1 \quad , \tag{5}$$

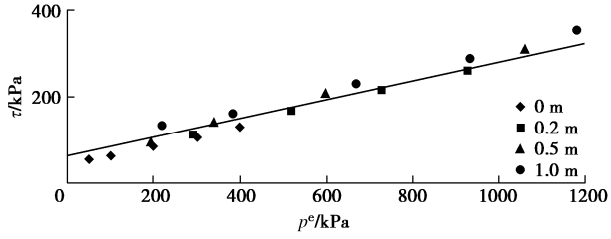
式中，F_{ca}表征纯电解质对渗透吸力系数的影响，与各单种电解质的渗透吸力系数相关，F_c表征阳离子间相互作用对渗透吸系数的影响，F_a表征阴离子间相互作用对渗透吸系数的影响。

根据 Mohr-Coulomb 准则，饱和状态下膨胀土的剪切强度表示为

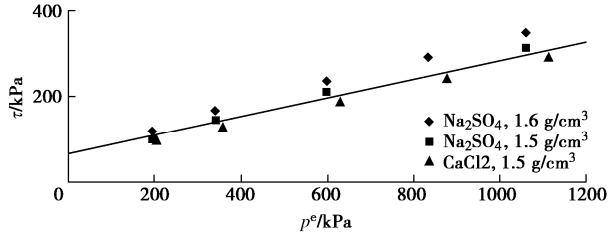
$$\tau_f=c'+p^e\tan\varphi' \quad , \tag{6}$$

式中，c'和φ'分别为有效黏聚力和有效内摩擦角。

根据式（6）计算的饱和盐溶液膨胀土的剪切强度如图 7 所示，图 7 中的广义有效应力按照式（4）计算。图 7（a）中膨胀土为不同浓度 Na_2SO_4 溶液所饱和，图 7（b）中膨胀土为相同浓度不同盐溶液（Na_2SO_4、$CaCl_2$）所饱和。由图 7 可得到两个结论：①不同浓度、不同盐溶液饱和的膨胀土剪切强度用广义有效应力表示，满足 Mohr-Coulomb 准则，盐溶液饱和膨胀土的强度指标为：图 7（a）中，c'=65.9 kPa，φ'=12.16°；图 7（b）中，c'=66.3 kPa，φ'=12.12°。②膨胀土的黏聚力随干密度增大而增加，但内摩擦角（斜率）保持不变。



（a）Na_2SO_4, 1.5 g/cm^3



（b）0.5 mol/L

图 7 饱和盐溶液膨胀土的剪切强度

Fig. 7 Shear strengths of expansive soils saturated in salt solution

（2）非饱和膨胀土的剪切强度

非饱和土的剪切强度受大孔隙表面弯液面形状影响，Xu[18]基于非饱和膨胀土大孔隙的表面分形模型，提出非饱和土的有效应力公式：

$$\sigma' = \sigma - u_a + (\psi / \psi_e)^{D_s-3}\psi \quad , \tag{7}$$

式中，σ'为有效应力，σ 为总应力，u_a为孔隙气压，ψ 和 ψ_e 分别为基质吸力和进气值，D_s是孔隙表面分维。

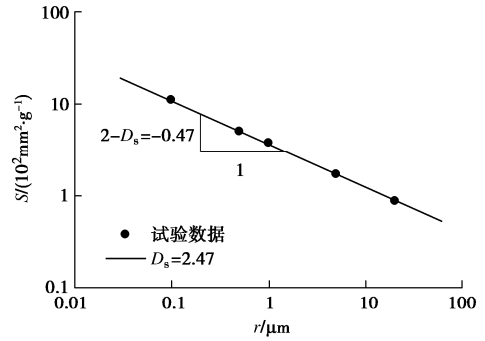
非饱和膨胀土的剪切强度为

$$\tau_f = c' + [\sigma - u_a]\cdot\tan\varphi' + \tau_s \quad , \tag{8}$$

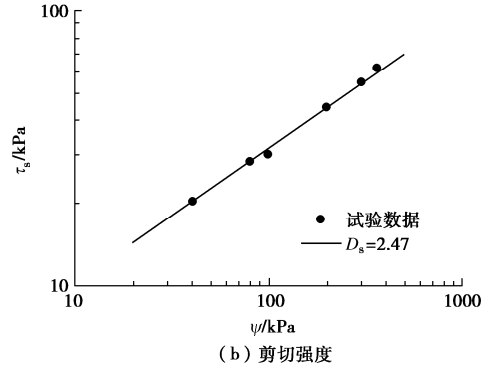
式中，φ'为有效内摩擦角，$\tau_s = [(\psi/\psi_e)^{D_s-3}\cdot\tan\varphi']\psi$。根据压汞试验测量宁夏膨胀土大孔隙的表面分维，如图 8（a）所示。膨胀土的孔隙表面积与孔隙半径的关系为[23]

$$S: r^{2-D_s} \quad 。 \tag{9}$$

根据式（9）计算宁夏膨胀土孔隙的表面分维，D_s=2.47。宁夏膨胀土的剪切强度计算结果与试验数据对比于图 8（b）中，ψ_e=40 kPa，φ'=25.5°。剪切强度根据式（8）计算，D_s=2.47，计算结果与试验数据一致。



（a）孔隙表面分维



（b）剪切强度

图 8 宁夏膨胀土的剪切强度

Fig. 8 Shear strengths of Ningxia expansive soil

（3）裂隙性膨胀土的剪切强度

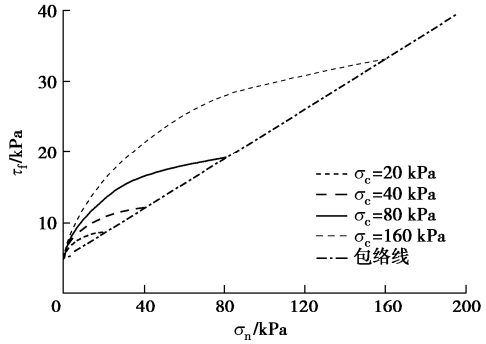
膨胀土原生裂隙面完全软化后，凝聚力很小，原生裂隙面的剪切强度主要由内摩擦角组成[9]。类似于 Barton[24]提出的裂隙性岩体剪切强度公式，裂隙性膨胀土的剪切强度为

$$\tau_f = c_r + \sigma_n \tan(\varphi_r + \varphi_n) \quad , \tag{10}$$

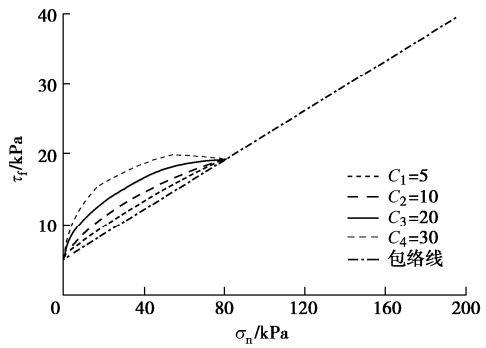
式中，c_r和 φ_r分别为裂隙面的黏聚力和内摩擦角，等于膨胀土黏聚力和内摩擦角的残余值，σ_n 为正应力，φ_n为与无侧限抗压强度有关的内摩擦角：

$$\varphi_n = C_1 \lg(\sigma_c / \sigma_n) \quad , \tag{11}$$

式中，C_1为裂隙面的粗糙系数，σ_c为无侧限抗压强度。根据式（10）计算的裂隙性膨胀土的剪切强度如图 9 所示，在结构面完全软化后，裂隙性膨胀土的破坏包络线就是残余强度包络线。如图 9（a）所示，裂隙性膨胀土的无侧限抗压强度对剪切强度影响最明显，随着无侧限抗压强度增加，裂隙性膨胀土的剪切强度增大；如图 9（b）所示，裂隙性膨胀土的剪切强度随裂隙面粗糙系数增加而增大。但如果原生结构面完全软化后，土体具有相同的破坏强度，即为裂隙面的剪切强度。一般膨胀土裂隙面都是非常粗糙的，粗糙系数 C_1 一般取为 20。对于裂隙性膨胀土边坡而言，由于沿裂隙面的剪切强度很小，当裂隙贯通后，膨胀土边坡就会沿裂隙产生失稳滑动。根据式（10）计算的南阳裂隙性膨胀土剪切强度包络线如图 10 所示，计算参数为：C_1=20，σ_c=300 kPa，c_r=5 kPa，φ_r=16°，式（10）的计算结果与文献[25]的试验数据一致。



（a）c_r=5 kPa, φ_r=10°, C_1=20



（b）c_r=5 kPa, φ_r=10°, σ_c=80 kPa

图 9 裂隙性膨胀土的剪切强度

Fig. 9 Shear strengths of fissured expansive soils

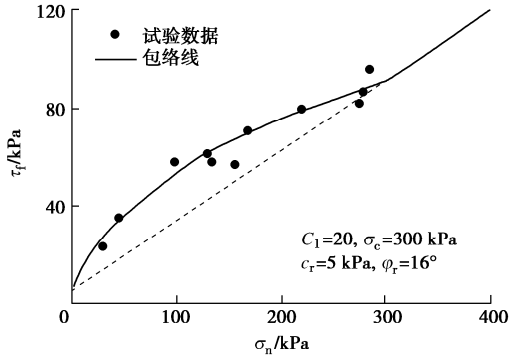


图 10 南阳裂隙性膨胀土的剪切强度

Fig. 10 Shear strengths of fissured expansive soil in Nanyang

2 膨胀土边坡失稳特征和安全性评价

模拟了膨胀土原生结构面的水平位移和剪切应力分布规律，基于强度折减法揭示膨胀土原生结构面的失稳特征，提出膨胀土边坡安全性评价方法。

2.1 边坡失稳特征

通过建立含有水平膨胀土软弱夹层的边坡开挖数值分析模型，采用改进的巴塞罗那基本模型（BBM）和水力全耦合算法模拟膨胀土夹层的力学行为，揭示膨胀土边坡失稳特征。含有水平膨胀土夹层的边坡开挖数值分析模型如图 11 所示，模型长 200 m，高 20 m，分 3 层。浅层土刚度较小，厚 11.5 m；深层土刚度较大，厚 8 m；中间夹层为厚 0.5 m 的强膨胀性软土。边坡坡率以 1∶2.5 为例，开挖分为 5 层，间隔时间为 10 d，每层开挖 2 m，开挖边坡坡高为 10 m。假定模型两侧边界无水平位移，底部边界固定；两侧边界不透水，底部边界设恒定压力水头，上部边界透水。

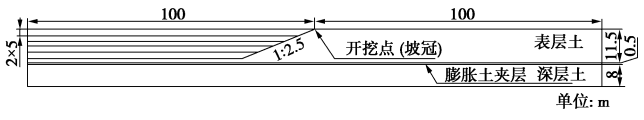


图 11 计算模型尺寸

Fig. 11 Model sizes

图 12 给出了膨胀土原始结构面的位移和剪应力变化趋势。图 12（a）显示竖向位移主要集中在坡冠以左、斜坡面下的区域内，竖向位移由坡冠到当前开挖坡脚逐渐增加。开挖引起的竖直变形主要由膨胀土夹层膨胀所致。图 12（b）表明膨胀土夹层中水平位移主要集中在坡冠正下方；膨胀土夹层中剪应力分布及其峰值位置与水平位移一致（图 12（c））。

边坡坡率从 1∶1.5 减小到 1∶3.5，膨胀土夹层的膨胀量呈现先减小后增加趋势，坡率为 1∶2.0 的夹层内竖向位移最小（图 13（a））；膨胀土夹层内剪应力随坡率减小而减小（图 13（b））。

考虑膨胀土夹层软化，采用强度折减公式为

$$c''=\begin{cases}Ac'-B(\eta-\eta_{\mathrm{b}}) & (\eta\leqslant 0.43)\\ 5 & (\eta\leqslant 0.43)\end{cases}, \quad (12a)$$

$$\varphi''=\begin{cases}\varphi'-C(\eta-\eta_{\mathrm{b}})+D & (\eta\leqslant 0.40)\\ 12 & (\eta\leqslant 0.40)\end{cases}。 \quad (12b)$$

式中 η 为孔隙率；η_{b} 为平衡后孔隙率；A，B，C，D 为系数。图 14 给出了边坡开挖后剪切强度与剪应力比值。不考虑强度折减，原生结构面都没有失稳破坏；开挖坡率越大，边坡越不稳定；考虑强度折减，开挖坡率为 1∶3 的边坡没有破坏，其他坡率的原始结构面都出现失稳滑动。坡率缓的边坡坡内剪应力虽然小，但膨胀位移大，强度折减显著，原始结构面出现失稳破坏。

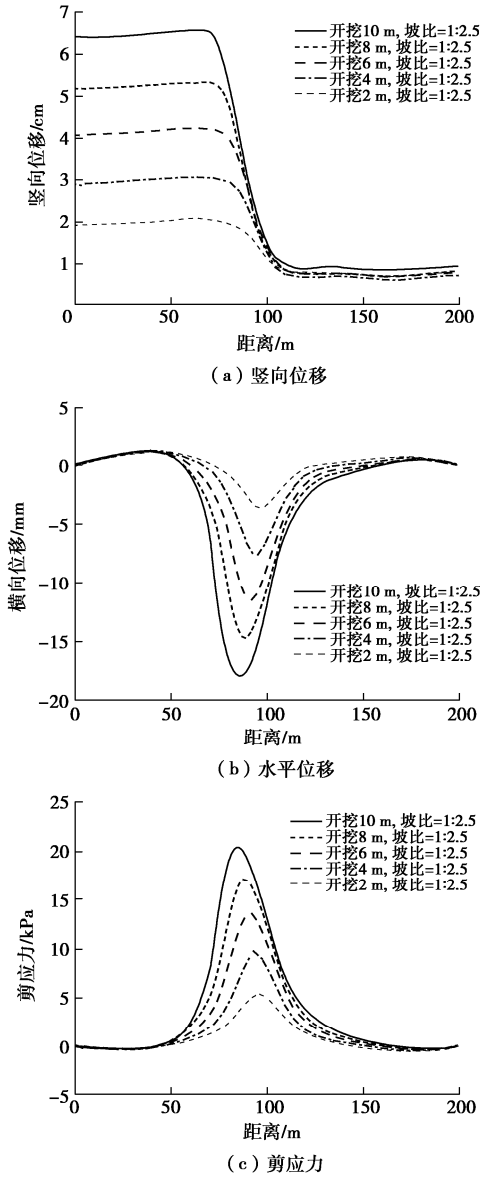
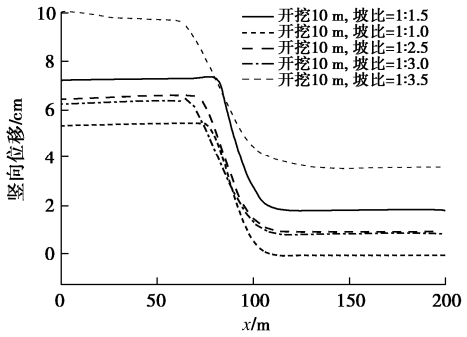
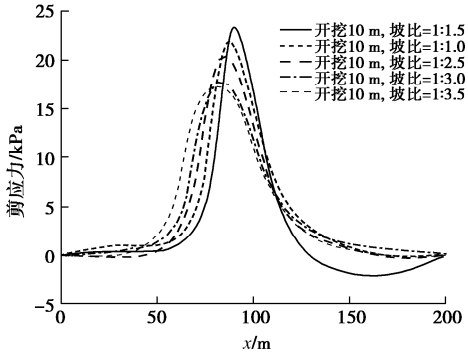


图 12 边坡开挖产生的应力和变形

Fig. 12 Stresses and deformations induced by slope excavation



（a）竖向位移



（b）剪应力

图 13 不同开挖坡率引起的位移和剪应力

Fig. 13 Maximum shear stresses and displacements

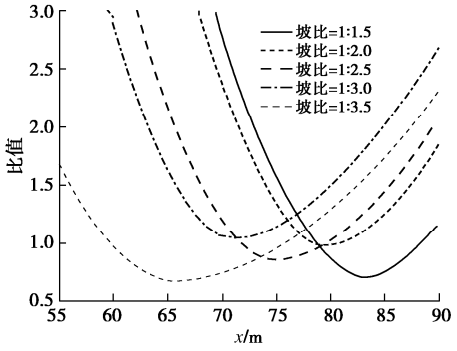


图 14 膨胀土夹层中的剪切强度与剪应力之比

Fig. 14 Ratios of shear strength to shear stress

2.2 安全性评价方法

膨胀土边坡失稳滑动主要有两种类型[25-27]：①由干湿循环裂隙控制的浅层滑坡；②深层软弱结构层控制的深层滑坡。两类滑坡的安全性评价方法不同，第①类滑坡开始的标志是浅层裂隙发育，第②类滑坡发生的前提是结构面上的剪切强度小于由开挖卸荷和膨胀力产生的水平向剪切应力。下面分别介绍两类滑坡的评价方法。

（1）浅层裂隙控制的滑坡

膨胀土受到的拉应力超过拉伸强度，裂隙开始发育。随着水分蒸发，表层土颗粒间的弯液面曲率增大，吸力增加，土体收缩。当收缩变形受到限制时，形成拉应力，拉应力与基质吸力等价。基质吸力超过土体的拉伸强度时，裂隙开始发育，发生浅层滑坡。浅层滑坡的安全性评价方法的判据为

$$\psi \geqslant \beta\sigma_{\mathrm{t}} \quad , \tag{13}$$

式中，σ_{t} 为拉伸强度，β 为系数。

（2）深层结构面控制的滑坡

对于膨胀土结构面倾角为α，结构面土体的摩擦角为φ_{r}，结构面控制的深层滑坡安全性评价方法为

$$\alpha \geqslant \varphi_{\mathrm{r}} \quad , \tag{14}$$

对于$\alpha < \varphi_{\mathrm{r}}$的膨胀土边坡，安全性评价方法为

$$\tau \geqslant \tau_{\mathrm{f}} \quad , \tag{15}$$

式中，τ 为边坡开挖引起结构层的剪切应力，τ_{f} 为结构面的剪切强度。

3 膨胀土边坡的防治技术

提出考虑膨胀力影响的膨胀土的土压力计算方法，将膨胀土边坡防治技术分为三类：分“隔”技术、支“挡”技术和加“固”技术。

3.1 膨胀土的土压力

徐永福等[27-28]将膨胀力等价于自重应力，基于朗肯土压力公式，给出膨胀土的土压力公式：

$$\sigma_{\mathrm{a}} = (\gamma h + p_0 + \sigma_{\mathrm{s}})K_{\mathrm{a}} - 2c\sqrt{K_{\mathrm{a}}} \quad , \tag{16}$$

式中，σ_{a}为土压力，γ为土的重度，h为高度，σ_{s}为膨胀应力，p_0为均布荷载，K_{a}为土压力系数。膨胀应力分布如图15所示，大气影响深度处的膨胀应力等于膨胀力。

$$\sigma_{\mathrm{s}} = \begin{cases} p_{\mathrm{s}}(z/z_{\mathrm{a}}) & (z < z_{\mathrm{a}}) \\ p_{\mathrm{s}} & (z \geqslant z_{\mathrm{a}}) \end{cases} \quad 。 \tag{17}$$

式中 σ_{s}为膨胀应力；p_{s}为膨胀压力；z为计算深度；z_{a}为大气影响深度。膨胀土的土压力公式得到了广泛的现场试验验证[29-30]。

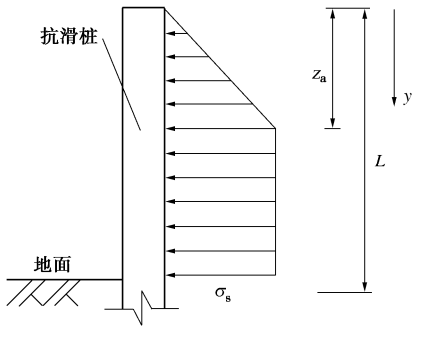


图 15 膨胀应力分布

Fig. 15 Distribution of swelling stress

3.2 分“隔”技术

分“隔”技术就是将膨胀土边坡与大气环境分隔开来，阻止水分变化、减小开挖卸荷影响，阻止裂隙发育。常见的分隔技术主要有非膨胀性黏土覆盖技术、改良土覆盖技术、土工编织袋技术、加筋反包技术、

复合防排水结构覆盖技术等。

（1）土工编织袋覆盖技术

土工编织袋防护膨胀土边坡的抗滑稳定性满足

$$T / p_a \geqslant K_s \quad , \tag{18}$$

式中，T 为摩擦力，p_a 为主动土压力，K_s 为抗滑稳定性系数，一般要求 $K_s \geqslant 1.3$。如图 16 所示，整列土工编织袋顶、底面上的摩擦力总和为

$$T = b^2\gamma \tan\varphi_s / n + \gamma bH \tan\varphi_s + \gamma nH^2 / 2\tan\varphi_s \quad , \tag{19}$$

式中，b 为一列土工袋的宽度，H 为单个土工袋的厚度。

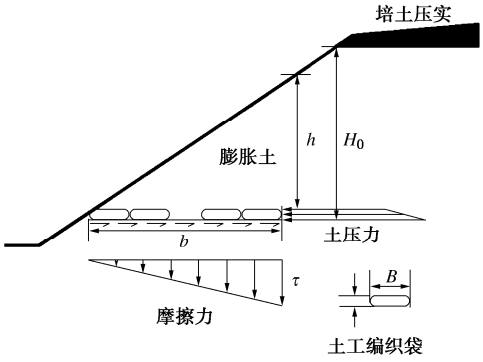


图 16 土工编织袋覆盖技术示意图

Fig. 16 Design of soil bag for protection of expansive soil slopes

作用在土工编织袋的主动土压力为

$$p_a = \{[\gamma(H_0 - H/2) + p_s]K - 2c\sqrt{K_a}\}H \quad , \tag{20}$$

式中，H_0 为膨胀土边坡高度。

（2）加筋反包覆盖技术

加筋反包处治技术是将边坡超挖一定宽度后，采用单向土工格栅等土工合成材料加筋反包回填膨胀土形成加筋体，结合加筋体后碎石排水层与坡脚盲沟导排坡面或坡后土体的渗流水，同时坡顶采用两布一膜实施封水，实现膨胀土边坡防护（图 17）。主要技术原理为：①加筋作用，格栅与填土界面间的摩擦力，增强加筋土体的抗剪强度；②压重作用，给坡体施加压重，减小开挖卸荷影响，增强膨胀土边坡稳定性；③分隔作用，阻隔干湿循环作用对水分变化的影响，防止膨胀土边坡开裂。土工格栅摊铺宽度的计算方法如图 18 所示，根据土工格栅受力平衡，由

$$K_s \cdot (\tau \cdot l) = d \cdot \sigma_a \quad 。 \tag{21}$$

计算土工格栅的摊铺宽度 l 与间距 d 的关系。式中，τ 为土与土工格栅之间的摩擦力，$\tau = \gamma h \cdot \tan(2\varphi/3)$，$\varphi$ 为内摩擦角，K_s 为安全系数，一般取 2，σ 为土压力。对于弱－中膨胀性土，一般每层填土加 1 层土工格栅，即 d=20 cm，填土的内摩擦角为 20°，不同膨胀力的膨胀土中的加筋长度与填土高度 h 的关系如图 19 所示，加筋宽度一般为 1.5 m 左右。

（3）复合防排水结构覆盖技术

复合防排水结构层防护技术是以“毛细阻滞”理论为基础，采用细、粗两种水力传导性能相差较大的材料层覆盖于膨胀土边坡之上。土体含水率较低时，细粒土渗透系数大于粗粒土，当降雨产生的水分由上部细粒土层渗流至细－粗交界面时，由于毛细张力的作用被“阻隔”在毛细隔离带之上，细粒土层便成为储水层；随着降雨持续发生，当细－粗交界面处的基质吸力降至粗粒土的进水值时，毛细阻滞效应将失效，高含水率时粗粒土渗透系数远大于细粒土，水分由粗粒土侧向排出，粗粒土层便成为导排层；毛细阻滞覆盖层如图 20 所示。在高温、干燥条件下，细粗土层较低的热传导系数能阻止坡体内水分蒸腾蒸发而造成收缩，达到保湿防渗效果。

3.3 支“挡”技术

支“挡”技术主要指挡土墙，包括加筋挡墙、土工编织的挡墙、桩板墙等。

（1）土工编织袋挡墙

如图 21 所示，挡墙顶和底层的摩擦力总和为

$$T = \frac{b_r^2\gamma \tan\varphi_s}{n} + \gamma b_r h_r \tan\varphi_s \quad 。 \tag{22}$$

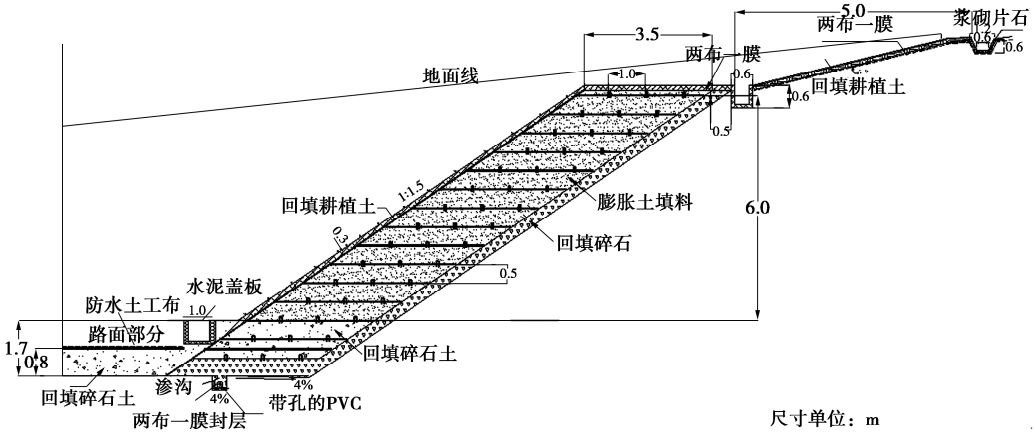


图 17 土工格栅加筋覆盖示意图[32]

Fig. 17 Design of reinforced soil for protection of expansive soil slopes [32]

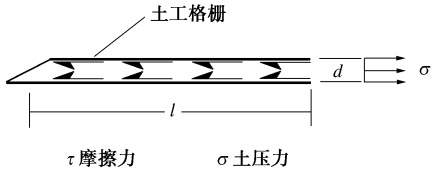


图 18 加筋宽度的计算模型

Fig. 18 Model for calculation of geogrid width

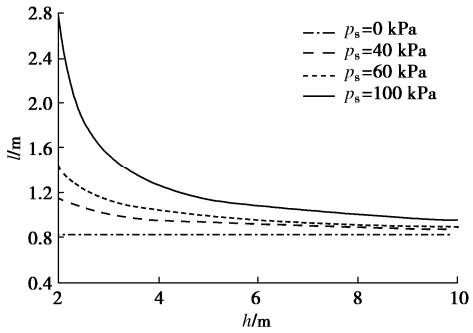


图 19 加筋宽度与填土高度的关系

Fig. 19 Relationship between geogrid width and slope height

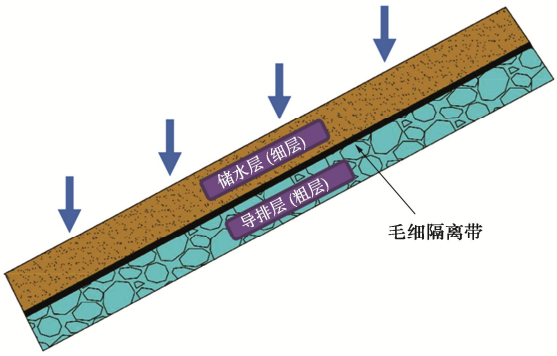


图 20 毛细阻滞覆盖层示意图[33]

Fig. 20 Design of waterproof and drainage structure[33]

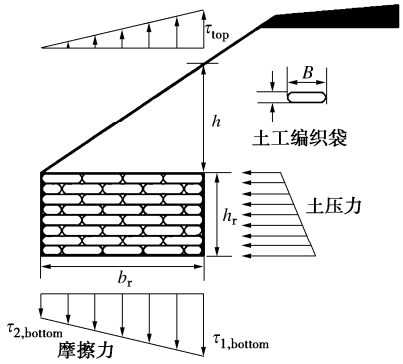


图 21 土工编织袋挡墙设计示意图

Fig. 21 Design of soil bag for retaining wall[33]

土工编织袋挡墙顶和底部的主动土压力总和为

$$p_a=\left[\left(\gamma\frac{b_r}{n}+p_0+p_s\right)K_a-2c\sqrt{K_a}\right]h_r+\frac{\gamma}{2}h_r^2\text{。}\quad(23)$$

膨胀土的土力学参数：γ =20 kN/m^3，c=20 kPa，φ=20°，φ_s=2φ/3。土工编织袋挡墙宽度 b_r 与挡墙高度 h_r 的关系如图 22 所示。随膨胀力增加，挡墙宽度增加；随挡墙高度增加，挡墙宽度增加，挡墙宽度近似为挡墙高度的 1.2 倍。

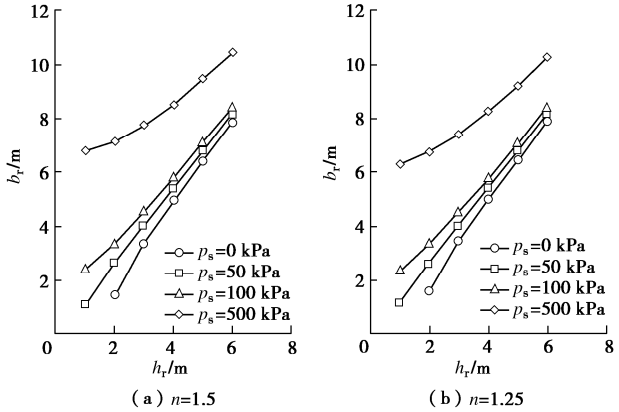


图 22 土工编织袋挡墙的宽度与高度的关系

Fig. 22 Relationship between width and height of soil bag retaining wall

（2）桩板墙

桩板墙结构采用规范中的荷载传递法来确定滑坡推力。抗滑桩体长度包括悬臂段和嵌固段长度。悬臂段长度主要由桩身弯矩来控制。悬臂段长度以滑坡推力和桩后填土主动土压力中大值作为主要设计荷载。针对膨胀土边坡悬臂段荷载分布形式，抗滑桩桩身嵌固端的内力为（图 23）

$$\left.\begin{aligned}&M_0=E_xZ_x\text{，}\\&Q_0=E_x\text{，}\\&T_1=(6M_0-2E_xL)/L^2\text{，}\\&T_2=(6E_xL-12M_0)/L^2\text{。}\end{aligned}\right\}\quad(24)$$

式中　M_0 为嵌固点弯矩（kN·m）；Q_0 为嵌固点剪力（kN）；T_1 和 T_2 为滑坡推力。桩身内力的计算公式如下：

$$\left.\begin{aligned}&M_y=T_1y^2/2+T_2y^3/(6L)\text{，}\\&Q_y=T_1y+(T_2-T_1)y^2/(2L)\text{，}\\&\omega_y=\omega_0-T_1(L^3-y^3)/(6EI)-T_2(L^4-y^4)/(24EIL)\text{，}\\&x_y=x_0-\omega_0(L-y)+T_1(L^4/8-L^3y/6+y^4/24)/(EI)+\\&\quad T_2(L^5/30-L^4y/24+y^5/120)/(EIL)\text{。}\end{aligned}\right\}\quad(25)$$

式中　D 为桩间距；M_y 为滑坡推力作用下计算点弯矩；Q_y 为滑坡推力作用下计算点剪力；x_y 和 ω_y 为计算点的变位和转角；L 为抗滑桩悬臂段长度；E 为桩身弹性模量；I 为桩截面惯性矩；Z_x 为滑坡推力合力作用点距锚固点的距离；y 为计算点截面位置。

水平膨胀应力分布形式如图 15 所示，设 y 为桩身计算截面所在的深度（自桩顶算起），桩身截面剪力 Q_p 和截面弯矩 M_p 为

$$\left.\begin{aligned} Q_{\mathrm{p}} &= \sigma_{\mathrm{s}} y^2/(2z_{\mathrm{a}}), \\ M_{\mathrm{p}} &= \sigma_{\mathrm{s}} y^3/(6z_{\mathrm{a}}) \quad (0 \leqslant y \leqslant z_{\mathrm{a}}), \end{aligned}\right\} \tag{26}$$

$$\left.\begin{aligned} Q_{\mathrm{p}} &= \sigma_{\mathrm{s}} z_{\mathrm{a}}/2 + \sigma_{\mathrm{s}}(y - z_{\mathrm{a}}), \\ M_{\mathrm{p}} &= \sigma_{\mathrm{s}} z_{\mathrm{a}}(y - 2z_{\mathrm{a}}/3)/2 + \sigma_{\mathrm{s}}(y - z_{\mathrm{a}})^2/2 \quad (z_{\mathrm{a}} \leqslant y \leqslant H), \end{aligned}\right\} \tag{27}$$

$$\left.\begin{aligned} Q_{\mathrm{p}} &= \sigma_{\mathrm{s}} z_{\mathrm{a}}/2 + \sigma_{\mathrm{s}}(H - z_{\mathrm{a}}), \\ M_{\mathrm{p}} &= \sigma_{\mathrm{s}} h(y - 2z_{\mathrm{a}}/3)/2 + \sigma_{\mathrm{s}}(H - z_{\mathrm{a}})[y - (z_{\mathrm{a}} + H)/2] \\ &\quad (H < y \leqslant L) \text{ 。} \end{aligned}\right\} \tag{28}$$

抗滑桩的嵌固段长度采用地基系数法进行桩体内力和变形计算，直接采用抗滑桩嵌固端长度的计算方法设计。将桩间板视为两端简支梁，根据水平应力和膨胀应力分布确定挡土板内弯矩，跨中最大弯矩为

$$M_{\max} = (\sigma_{\mathrm{k}} + \sigma_{\mathrm{s}}) z_{\mathrm{a}} L^2/8 \quad , \tag{29}$$

式中 L 为挡土板长度；σ_{k} 为土应力；$M_{\max}$ 为挡土板最大弯矩；σ_{s} 为膨胀应力。基于桩间板弯矩分布按照《混凝土设计规范：BG 50010—2010》[31]验算挡土板配筋。

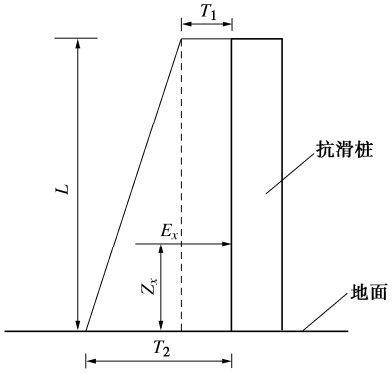


图 23 滑坡推力分布图形[34]

Fig. 23 Distribution of landslide thrust stress[34]

3.4 加“固”技术

加“固”技术是对滑坡体进行加固稳定，主要为抗滑桩和锚固技术。

（1）抗滑桩

抗滑桩的设计方法与桩板墙中的桩的设计一样，与普通抗滑桩不同的是膨胀土的土压力采用式（16）计算，膨胀应力分布如图 15 所示。

（2）锚杆

锚杆加固边坡的示意图如图 24 所示，锚杆加固边坡的稳定性系数计算公式为

$$F_{\mathrm{s}} = \frac{(W\cos\beta + T\cos\theta - \sigma_{\mathrm{s}})}{W\sin\beta - T\sin\theta} \quad , \tag{30}$$

式中，锚杆的最优倾角为[79-80]

$$\theta_{\mathrm{opt}} = \arctan\left[\frac{(\zeta - \cos\beta)\sin\beta + \xi\sqrt{1 + \zeta^2 - 2\zeta\cos\beta - \xi^2}}{\xi^2 - \sin^2\beta}\right] \text{。} \tag{31}$$

要满足膨胀土边坡的稳定性要求，每根锚杆所承担的边坡表面面积满足

$$T\cos\theta + W\cos\beta \geqslant A \cdot \sigma_{\mathrm{s}} \quad , \tag{32}$$

式中，$\zeta = \sigma_{\mathrm{s}}/W$，$\xi = T/W$，$\sigma_{\mathrm{s}}$ 为膨胀应力，T 为锚杆拉力，W 为混凝土框架梁和混凝土板的重量，$W = A \cdot h$，h 为混凝土的厚度，A 为单根锚杆支护的边坡面积。

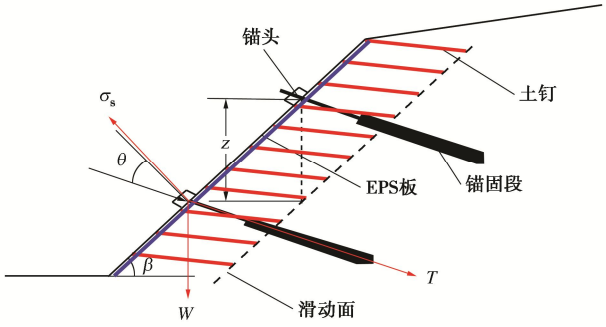


图 24 锚杆支护技术

Fig. 24 Support technology by anchor rod

4 膨胀土边坡防治应用示范

4.1 土工编织袋防护技术

江苏某高速公路沿线土质为弱－中膨胀性黏土，黏土矿物以斜绿泥石、多硅锂云母、蒙脱石为主，小于 0.075 mm 粒径的颗粒质量百分数大于 50%，I_{p}=23～29，自由膨胀率为 42%，膨胀力为 53 kPa。

对于弱膨胀土，高度小于 4 m 的膨胀土边坡，土工编织袋防护宽度为 1.2 m。选用尺寸为 40 cm×40 cm×10 cm 的土工编织袋进行防护，每层土工编织袋的个数不小于 3 个。为了便于现场施工，将膨胀土坡面开挖成 30 cm 高度台阶，3 层土工编织袋作为一个基本单元，可以节省土工编织袋数量，节省土工编织袋的施工工作量。在江苏某高速公路路基膨胀土边坡防护施工中，根据土工编织袋的防护形式，施工过程如图 23 所示。具体施工步骤：①采用挖掘机开挖膨胀土边坡，现场开挖成台阶状，台阶高度为 30 cm，坡度为 1∶1.5，如图 25（a）所示；②用现场开挖的膨胀土直接装填编织袋，编织袋的充填率一般为 80%，如图 25（b）所示；③土工编织袋按设计图纸摊铺在开挖好的台阶上，折叠土工编织袋袋口，使得土工编织袋折成 40 cm×40 cm 方块，如图 25（c）所示；④在土工编织袋之间适当补填少量砂、石灰改性土等理想的路基填料；用平板振动夯机压实土工编织袋，同时将土工编织袋之间的填料振实，如图 25（d）所示；⑤在土工编织袋顶部填筑石灰土或水泥土，厚度为

40～60 cm，坡顶做好防水措施，如图 25（e）所示；⑥在土工编织袋外侧摊铺草皮，如图 25（f）所示。



（a）开挖　　（b）装袋



（c）摊铺　　（d）压实



（e）培土　　（f）绿化

图 25　土工编织袋防护膨胀土路堑边坡现场施工

Fig. 25 Construction of soil bag

4.2　加筋反包防护技术

土工格栅反包加固膨胀土边坡示范应用工程选取在崇左—爱店高速公路宁明县境内的 K16+500 处，该处设计为二级路堑边坡，边坡土体为膨胀土。边坡开挖后，由于受到夏、秋季频繁的降雨和日晒，在干湿循环作用下，坡体产生了大量裂隙，局部已发生小型滑坡，滑坡处裂隙延展深度目测达 50 cm 以上，采用土工格栅反包膨胀土对边坡进行加固的方法。

首先在坡底铺设 60 cm 厚的砂砾垫层，然后逐层铺设并反包土工格栅。每一层土工格栅的施工流程主要包括：格栅铺设、填土、碾压、反包。简述如下：铺设格栅，平铺后用 U 型钉将格栅固定，格栅竖肋的方向与边坡走向垂直，见图 26（a）。①土工格栅采用行业标准（JT/T925.1—2014）钢塑格栅 CSCS50-5-型，纵横向极限抗拉强度不小于 50 kN/m，极限抗拉强度下的伸长率不大于 3%，连接点极限分离力大于 300 N，幅宽不小于 3 m。②填土，用挖掘机将碎石和膨胀土分别铺填在边坡的里外侧，碎石层宽 50 cm，膨胀土含水率接近最优含水率，施工作业如图 26（b）。③碾压，待挖掘机将填土初步整平后，用碾压机械来回碾压，按最大干密度控制，施工作业见图 26（c）。反包。碾压后将底下一层土工格栅反包，并用 U 型钉固定。之后铺设第二层土工格栅，并用连接条将上下两层格栅穿插连接，如图 24（d）。



（a）土工格栅　　（b）填土



（c）填土碾压　　（d）反包

图 26　加筋土施工

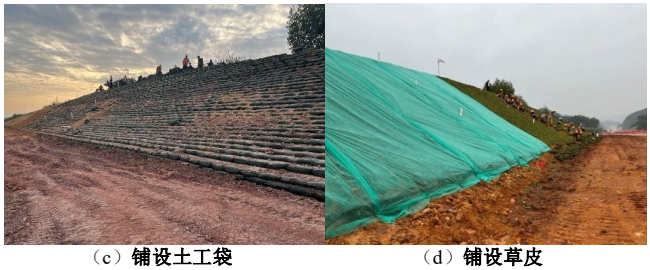
Fig. 26 Construction of reinforced soil

4.3　复合隔排水结构防护技术

在崇左—爱店高速公路 K16+087—K16+220 处采用复合隔排水结构进行防护。地表被第四系地层覆盖，覆盖层较厚，植被弱发育。根据现场实际情况和施工便利性，采用施工方案：客土铺草皮+单层土工袋（内填开挖膨胀土）+土工布+土工格室（内填#13 碎石）+两布一膜。隔排水结构防护技术的施工流程：①利用挖掘机开挖边坡并修出坡底横坡，由坡顶至渗沟铺设两布一膜，然后在渗沟两布一膜之上铺设碎石层和护坡土工袋，如图 27（a）所示；②坡脚处铺设完成后再由坡顶至坡脚铺设土工格室和三维复合排水网，坡顶格室内填耕植土，坡面格室内填#13 碎石，如图 27（b）所示；③在导排层结构上铺设单层和双层土工袋并碾压，如图 27（c）所示；④然后挂网并铺设客土，铺草皮，覆盖透气膜，如图 27（d）所示。



（a）铺设土工膜　　（b）填筑#13 碎石和三维排水网



（c）铺设土工袋　　（d）铺设草皮

图 27　复合隔排水结构施工

Fig. 27 Construction of waterproof and drainage structure

4.4 桩板墙防护技术

桩板墙防护技术示范工程选取在湖北当阳岩屋庙4970专用线K2+035—K2+120处，既有膨胀土边坡分2级布置，上部为某化工企业矿石堆场，坡高约为10～12 m，边坡在上部堆载和雨水作用下发生了整体滑移。根据现场实际情况和工程适用性确定支护方案为桩板墙防护技术。

桩板墙防护技术的施工流程：首先是利用挖掘机清除滑动岩土体，然后依据设计图纸确定施工桩位，并浇筑锁口，如图28（a），（b）所示；根据设计桩位，采用人工施工方法开挖桩孔到设计深度，随后在桩孔内部布置钢筋笼结构，如图28（c），（d）所示；在设计桩位上布置自由段模具，随后浇筑桩体结构，等待混凝土强度达标后，拆除模具，如图28（e），（f）所示；在抗滑桩后放置预制挡土板，在板后布置EPS减胀层，最后分层回填碾压墙后土体，如图28（g），（h）所示。



（a）滑坡体清除 （b）锁口施工



（c）桩孔开挖 （d）钢筋笼绑扎



（e）支模浇筑 （f）拆模



（g）挂板及EPS板布置 （h）墙后土回填

图28 桩板墙施工

Fig. 28 Construction of pile-sheet wall

EPS板应用到膨胀土边坡桩板墙防护技术中，能够起到消能减胀的作用，对桩板墙结构长期服役稳定性具有显著积极作用。结合桩板墙防护技术示范工程的现场监测结果，对EPS的减胀效果进行量化评价，如图29所示。根据图29的监测结果，#4，#5桩间挡土板未设EPS减胀层，板后最大土压力约为200 kPa，而在相同工况下，布置了EPS减胀层的#8，#9挡土板的板后最大土压力约为75 kPa，土压力消解效果十分明显，证明了EPS板良好的消能减胀作用。

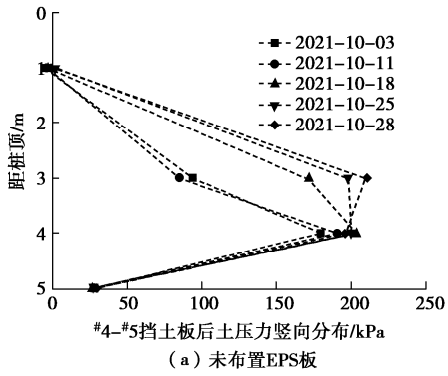


图29 EPS挡墙的减载效果

Fig. 29 Effects of EPS on earth pressure

5 结 论

经过近半个世纪的研究，中国膨胀土边坡防治技术取得了世界领先水平的研究成果。由于膨胀土本身的复杂性，当前膨胀土边坡防治技术远远跟不上膨胀土边坡防治实践的步伐，导致许多膨胀土边坡的防治措施失效。因此，膨胀土边坡防治技术研究任重道远，本项目经过两年的研究，得到4点结论。

（1）膨胀土边坡的水力作用机理至今没有取得成熟理论成果，一直都是运用扩散双电层描述，膨胀土矿物不能满足扩散双电层理论成立的假设，更麻烦的是双电层理论参数很难测试。相对于扩散双电层理论，等温吸附理论更适合描述膨胀土边坡的水力作用机理。本项目基于膨胀土孔隙表面的分形模型，导出了膨胀土孔隙水体积的吸附方程，建立了膨胀土的膨胀变形理论和盐溶液中的统一有效应力理论，构建了膨

胀土的非饱和土剪切强度理论和饱和盐溶液的剪切强度理论。

（2）膨胀土边坡安全性评价结果一直备受质疑，许多设计计算安全的膨胀土边坡建成不久就发生滑坡。本项目提出膨胀土边坡安全性分析的全新思路，将膨胀土边坡滑坡分为两类：浅层裂隙控制的滑坡和深层结构面控制的滑坡，将浅层裂隙发育判据作为浅层滑坡安全性评价方法；深层结构面控制的滑坡的安全性评价方法是通过比较结构面的剪应力与剪切强度的大小实现。

（3）在膨胀土边坡防治技术研究方面，非膨胀性黏土覆盖法、加筋反包、土工编织袋等“防渗保湿”技术被公认为是有效措施，并形成了成熟的施工工艺。由于“以柔治胀”和“刚柔相济”容易引起误解，本项目就膨胀土边坡防治技术分为分隔技术、支挡技术和加固技术三类。分隔技术主要功能是“防渗保湿”和反压减胀；支挡技术主要是各类挡墙，如桩板墙、土工编织袋挡墙等；加固技术包括抗滑桩和锚固技术。

（4）成功实施了土工编织袋、加筋反包、复合隔排水结构和桩板墙防治技术的应用示范，形成了标准化的设计方法和施工工艺。

参考文献：

[1] 徐永福, 刘松玉. 非饱和土强度理论及其工程应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 1999. (XU Yong-fu, LIU Song-yu. Strength Theory of Unsaturated Soil and Its Engineering Application[M]. Nanjing: Sountheast University Press, 1999. (in Chinese))

[2] 李生林, 施　斌. 中国膨胀土工程地质研究[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. (LI Sheng-lin, SHI Bin. Engineering Geology of Expansive Soil in China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992.(in Chinese))

[3] 郑健龙, 杨和平. 公路膨胀土工程[M]. 北京: 人民交通出版社，2009.(ZHENG Jian-long, YANG He-ping. Expansive Soil Engineering in Highway[M]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese))

[4] 殷宗泽, 袁俊平. 膨胀土特性与边坡稳定[M]. 北京: 科学出版社, 2018. (YIN Zong-ze, YUAN Jun-ping. Characteristics of Expansive Soil and Slope Stability[M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese))

[5] XU Y F. Bearing capacity of unsaturated expansive soils[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2004, **22**(4): 611－625.

[6] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 1－15. (BAO Cheng-gang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 1－15. (in Chinese))

[7] 陈正汉, 郭　楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学, 2019, **40**(1): 1－54. (CHEN Zheng-han, GUO Nan. New developments of mechanics and application for unsaturated soils and special soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(1): 1－54. (in Chinese))

[8] 詹良通, 吴宏伟, 包承纲, 等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J]. 岩土力学, 2003, **24**(2): 151－158. (ZHAN Liang-tong, NG W C, BAO Cheng-gang, et al. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(2): 151－158. (in Chinese))

[9] 张坤勇, 徐　娜, 陈　恕, 等. 膨胀土完全软化强度指标试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(11): 1988－1995. (ZHANG Kun-yong, XU Na, CHEN Shu, et al. Experimental study on fully softened shear strength of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(11): 1988－1995. (in Chinese))

[10] 徐永福. 膨胀土的水力作用机理及膨胀变形理论[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(11): 1979－1987. (XU Yong-fu. Hydraulic mechanism and swelling deformation theory of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(11): 1979－1987. (in Chinese))

[11] 徐永福. 考虑渗透吸力影响膨润土的修正有效应力及其验证[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(4): 631－638. (XU Yong-fu. Modified effective stress induced by osmotic suction and its validation in volume change and shear strength of bentonite in saline solutions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(4): 631－638. (in Chinese))

[12] XU Y F, XIANG G S, JIANG H, et al. Role of osmotic suction in volume change of clays in salt solution[J]. Applied Clay Science, 2014, **101**: 354－361.

[13] XU Y F, MATSUOKA H, SUN D A. Swelling characteristics of fractal-textured bentonite and its mixtures[J]. Applied Clay Science, 2003, **22**(4): 197－209.

[14] XU Y F. Surface fractal dimension of swelling clay minerals[J]. Fractals, 2003, **11**(4): 353－362.

[15] AVNIR D, JARONIEC M. An isotherm equation for adsorption on fractal surfaces of heterogeneous porous materials[J]. Langmuir, 1989, **5**(6): 1431－1433.

[16] ZHANG B Q, LI S F. Determination of the surface fractal dimension for porous media by mercury porosimetry[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1995, **34**(4):

1383 – 1386.

[17] 徐永福, 孙婉莹, 吴正根. 我国膨胀土的分形结构的研究[J]. 河海大学学报, 1997, **25**(1): 18 – 23. (XU Yong-fu, SUN Wan-yin, WU Zheng-gen. On fractal structure of expansive soils in China[J]. Journal of Hohai University, 1997, **25**(1): 18 – 23. (in Chinese))

[18] XU Y F. Fractal approach to unsaturated shear strength[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(3): 264 – 273.

[19] XU Y F. Calculation of unsaturated hydraulic conductivity using a fractal model for the pore-size distribution[J]. Computers and Geotechnics, 2004, **31**(7): 549 – 557.

[20] XU Y F, DONG P. Fractal approach to hydraulic properties in unsaturated porous media[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2004, **19**(2): 327 – 337.

[21] XU Y F. Peak shear strength of compacted GMZ bentonites in saline solution[J]. Engineering Geology, 2019, **251**: 93 – 99.

[22] 郑新江, 徐永福. 盐溶液饱和高庙子膨润土的强度特性[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(4): 783 – 788. (ZHENG Xin-jiang, XU Yong-fu. Strength characteristics of GMZ bentonite saturated with salt solutions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(4): 783 – 788. (in Chinese))

[23] MANDELBROT B B. The fractal geometry of nature, Freeman, San Francisco, 1982.

[24] BARTON N. Review of a new shear-strength criterion for rock joints[J]. Engineering Geology, 1973, **7**(4): 287 – 332.

[25] 龚壁卫, 程展林, 胡 波, 等. 膨胀土裂隙的工程特性研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(7): 1825 – 1830, 1836. (GONG Bi-wei, CHENG Zhan-lin, HU Bo, et al. Research on engineering properties of fissures in expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(7): 1825 – 1830, 1836. (in Chinese))

[26] 蔡正银, 陈 皓, 黄英豪, 等. 考虑干湿循环作用的膨胀土渠道边坡破坏机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(11): 1977 – 1982. (CAI Zheng-yin, CHEN Hao, HUANG Ying-hao, et al. Failure mechanism of canal slopes of expansive soils considering action of wetting-drying cycles. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(11): 1977 – 1982. (in Chinese))

[27] 徐永福, 程 岩, 唐宏华. 膨胀土边坡失稳特征及其防治技术标准化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, **53**(1): 1 – 20. (XU Yong-fu, CHENG Yan, TANG Hong-hua. Failure characteristics of expansive soil slope and standardization of slope slide prevention by geotextile bag[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, **53**(1): 1 – 20. (in Chinese))

[28] XU Y F, ZHANG H R. Design of soilbag-protected slopes in expansive soils[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, **49**(4): 1036 – 1045.

[29] KATTI R K, BHANGALE E S, MOZA K K. Lateral pressure in expansive soil with and without a cohesive non-swelling soil layer-application to earth pressures on cross drainage structures in canals and key walls in dams (Studies on K_0 Condition), Technical Report 32. Central Board of Irrigation and Power, New Delhi, India, 1983.

[30] 蒋世庭, 喻明灯, 雷云佩. 膨胀土边坡双排抗滑桩土压力监测与分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, **8**(6): 70 – 74. (JIANG Shi-ting, YU Ming-deng, LEI Yun-pei. Monitoring and analysis of earth pressure on double-row anti-slide piles in expansive soil landslide[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, **8**(6): 70 – 74. (in Chinese))

[31] 混凝土结构设计规范: GB50010—2010[S]. 2010. (Technical Code for Design of Concrete Structures: GB50010—2010[S]. 2010. (in Chinese))

[32] 肖 杰, 杨和平, 符 浩, 等. 膨胀土边坡加筋作用的对比模型试验[J]. 中国公路学报, 2014, **27**(7): 24 – 31. (XIAO Jie, YANG He-ping, FU Hao, et al. Comparison model test on effect of geogrid reinforcement for expansive soil slope[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, **27**(7): 24 – 31. (in Chinese))

[33] 陈冠一, 肖 杰, 陈 强, 等. 不同毛细阻滞覆盖层处治膨胀土边坡的渗流及稳定性研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, **53**(1): 199 – 213. (CHEN Guan-yi, XIAO Jie, CHEN Qiang, et al. Study on seepage and stability of expansive soil slope treated by different capillary barrier cover layers[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, **53**(1): 199 – 213. (in Chinese))

[34] 林宇亮, 张 震, 罗桂军, 等. 膨胀土边坡的水平膨胀力及桩板结构内力分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, **53**(1): 140 – 149. (LIN Yu-liang, ZHANG Zhen, LUO Gui-jun, et al. Analysis of lateral swelling pressure of expansive soil slope and internal force of pile-sheet structure[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, **53**(1): 140 – 149. (in Chinese))

[35] HRYCIW R D. Anchor design for slope stabilization by surface loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, **117**(8): 1260 – 1274.

[36] HRYCIW R D, IRSYAM M. Pullout stiffness of elastic anchors in slope stabilization systems[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, **118**(6): 902 – 919.

DOI：10.11779/CJGE202207009 “十三五”国家重点研发计划项目

膨胀土滑坡与工程边坡新型防治技术与工程示范研究

叶为民[1]，孔令伟[2]，胡瑞林[3]，查甫生[4]，石胜伟[5]，刘樟荣*[1]

(1. 同济大学地下建筑与工程系，上海 200092；2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室，湖北 武汉 430071；3. 中国科学院地质与地球物理研究所页岩气与地质工程重点实验室，北京 100029；4. 合肥工业大学资源与环境工程学院，安徽 合肥 230009；5. 中国地质科学院探矿工艺研究所，四川 成都 611734)

摘 要：中国膨胀土分布十分广泛且与人类活动密集区高度重叠。由于其胀缩性、裂隙性与超固结性（“三性”）特征，膨胀土极易受气候变化和工程活动影响而诱发滑坡灾害。然而，传统的防治技术无法适应具有“三性”特征的膨胀土滑坡与工程边坡治理要求，导致滑坡屡治不止，成为工程“癌症”。“十三五”国家重点研发计划项目“膨胀土滑坡与工程边坡新型防治技术与工程示范研究”紧扣膨胀土的“三性”及其互馈作用，揭示了膨胀土滑坡和工程边坡的失稳机理与关键致灾因子，突破了膨胀土边坡多场信息监测与滑坡灾害早期预警技术，研发了“表-浅-深”一体化的膨胀土边坡韧性生态防护技术，形成了膨胀土边坡防护工程健康诊断方法与快速修复技术，初步集成了膨胀土边坡生态防护综合技术体系并实施工程示范三处。项目研究成果为膨胀土滑坡与工程边坡防治提供了新理论、新技术和新工法，社会、经济和环境效益显著，应用前景广阔。



关键词：膨胀土；安全评价；监测预警；防治技术；诊断修复；工程示范

中图分类号：TU41 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2022)07－1295－15

作者简介：叶为民(1963—)，男，工学博士，同济大学特聘教授，博士生导师，地质工程上海市重点学科带头人，宝钢优秀教师。兼任国际工程地质与环境协会废物处置专业委员会（C36）主席。长期从事环境地质、非饱和土工程地质与膨胀性特殊土研究。主持国家自然基金项目8项（含重点基金项目2项、重大仪器项目1项），国家重点研发计划项目1项，国家“863”课题1项，“973”项目子课题1项，国防科工局（委）“十二五”、”“十三五”计划项目各1项等省部级以上项目40余项；发表论文300余篇，其中SCI核心合集论文170余篇，被SCI引用2900余次，H指数30；获教育部自然科学一等奖（排名1）等省部级奖6项。主（参）编著作（教材）12部（本）；主（参）编国家、行业和团体标准3部。入选“全球前2%顶尖科学家榜单”和“2020爱思唯尔‘中国高被引学者’榜单”。主持国家双语示范课程、上海市全英语示范课程各一门，指导上海市优秀博士论文2篇，获国家级教学成果二等奖1项，上海市特等、一等和二等奖各1项。兼任2006—2010、2013—2017和2018—2022年教育部高等学校教学指导委员会委员。E-mail: ye_tju@tongji.edu.cn。

New prevention and treatment techniques and their applications to landslides and engineering slopes of expansive soils

YE Wei-min[1], KONG Ling-wei[2], HU Rui-lin[3], ZHA Fu-sheng[4], SHI Sheng-wei[5], LIU Zhang-rong[1]

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Key Laboratory of Shale Gas and Geoengineering，Institute of Geology and Geophysics，Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 5. Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 611734, China)

Abstract: Expansive soils are widely distributed in China, especially in the regions with high population density. Characterized by the well-known ‘three properties’, i.e., swelling-shrinkage, cracking and over-consolidation, the expansive soils are highly susceptible to climate change and engineering activities, and thus can easily cause landslides. Due to the lack of consideration to the interactive ‘three properties’ of the

基金项目：国家重点研发计划项目（2019YFC1509900）
收稿日期：2022－03－05
*通信作者（E-mail: liuzr@tongji.edu.cn）

expansive soils, the traditional techniques can hardly be effective for the treatment of expansive soil landslides and engineering slopes, leaving the latter known as ‘cancer’ that imperils the safety of engineering projects. During the 13th Five-Year Plan period, the National Key Research and Development Program of China “New prevention and treatment techniques and their applications to landslides and engineering slopes of expansive soils” was approved. With special attention to the interactive ‘three properties’ of the expansive soils, the program has made series of innovations including the instability mechanism and the key disaster factors of expansive soil landslides, multi-field information monitoring and early warning techniques, ‘surface-shallow-deep’ integrated and ecological reinforcement technique, health diagnosis and rapid restoration techniques for slope protection structures. These techniques are integrated as a technical system and have been implemented in three engineering demonstrations. The relevant achievements have provided new theories, techniques and construction methods for treating the landslides and engineering slopes of the expansive soils. Meanwhile, they have achieved significant social, economic and environmental benefits, with broad application prospects.

Key words: expansive soil; safety assessment; monitoring and warning; prevention technique; health diagnosis and repair; engineering demonstration

0 引 言

为贯彻落实党中央、国务院防灾减灾救灾工作重大部署，“十三五”期间，科技部会同相关部门，共同设计了国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项，以期为提升国家防灾减灾救灾能力，保障人民生命财产安全和国家社会经济安全可持续发展提供科技支撑。2020 年 5 月，“膨胀土滑坡与工程边坡新型防治技术与工程示范研究”（编号：2019YFC1509900）项目正式获批立项，对应指南“膨胀土滑坡和工程边坡新型防治技术研究”方向。该项目由同济大学牵头，中国科学院武汉岩土力学研究所、中国科学院地质与地球物理研究所、合肥工业大学、中国地质科学院探矿工艺研究所、南京大学、航天科工惯性技术有限公司、黄河勘测规划设计研究院有限公司、安徽省淠史杭灌区管理总局、广西华蓝岩土工程有限公司等 10 家单位共同参与。项目自 2020 年 6 月启动以来，针对膨胀土滑坡和工程边坡的重大地质灾害问题，以膨胀土水敏性和裂隙性为主线，通过联合攻关，揭示了膨胀土滑坡和工程边坡的失稳机理与关键致灾因子，突破了膨胀土边坡多场信息监测与滑坡灾害早期预警技术，研发了“表—浅—深”一体化的膨胀土边坡韧性生态防护技术，形成了膨胀土边坡防护工程健康诊断方法与快速修复技术，初步集成了膨胀土边坡生态防护综合技术体系并实施工程示范三处，为膨胀土滑坡与工程边坡防治提供了新理论、新技术和新工法。本文就项目的研究背景、研究内容、主要创新成果、成果的应用情况及社会经济效益等作简要介绍。

1 背景及国内外研究现状

膨胀土是世界上分布最为广泛的特殊土之一，在中国河南、安徽、广西等地更是广为发育，且与人口居住和经济活动密集区高度重叠[1-2]。由于富含蒙脱石、伊利石等亲水性矿物，膨胀土具有显著的胀缩性、裂隙性和超固结性（简称“三性”），对气候变化、人类活动等外部因素极为敏感，导致膨胀土边坡灾害频发[3]。尤其是近些年来，随着中国城镇化、交通及水利等工程建设的不断深入，膨胀土滑坡与工程边坡灾害问题日益凸显，严重威胁人民生命财产安全和经济社会可持续发展[4]。然而，由于膨胀土地质成因、类型与环境因素的差异，其边坡灾害类型、成灾模式和孕育条件极其复杂，且具有渐进性、反复性和长期潜伏性等特点，传统的削坡减载、挡墙、抗滑桩和弃土换填等刚性支护技术，无法适应膨胀土的“三性”及其互馈作用要求，导致边坡防治效果不够理想，不耐久甚至短时间内即完全失效，花费巨大但屡治不止，成为工程“癌症”[5]。因此，开展膨胀土滑坡和工程边坡新型防治技术与工程示范研究，对革新膨胀土滑坡与工程边坡防治技术和工法、保障膨胀土地区经济社会可持续发展具有重要意义。

国内外关于膨胀土滑坡与工程边坡地质灾害防治的研究已有近百年历史，针对边坡失稳机理与安全性评价、监测预警、防治材料与技术，以及防护工程健康诊断与修复等问题开展了大量的研究和工程实践；膨润土滑坡和工程边坡的防治技术已经从弃土换填、化学改良、刚性支护等传统防治方法，发展到保湿防渗、以柔治胀、生态护坡等柔性防治技术[6]，但仍然面临巨大的挑战。

（1）挑战 1：膨胀土滑坡与工程边坡水力作用失稳机理与安全性评价理论。近年来，国内外学者通过对降雨入渗/蒸发作用下、膨胀土边坡稳定性的模型试验和理论计算分析，认识到胀缩性、裂隙性和干湿循环作用是诱发膨胀土边坡失稳的主要因素[7-8]；但由于

不同类型膨胀土、不同工程地质条件和环境因素下膨胀土边坡的响应不同，亟需对其灾害类型、成灾模式、孕育环境及失稳机理等展开系统性研究。同时，稳定性分析方法也由仅考虑降雨入渗、水分迁移、强度衰减等，发展到基于裂隙动态描述、水－力耦合及复杂边界条件等因素[9]；但多场耦合条件下，反复胀缩过程中膨胀土的含水率、裂隙和强度等指标的时空演化难以定量描述，亟需开展基于膨胀土土性特征的安全性动态评价研究。

（2）挑战 2：膨胀土滑坡与工程边坡多场信息监测与滑坡灾害早期预警技术。目前，针对滑坡灾害监测与预警的研究涉及坡体的演变过程、监测指标体系、预警阈值、监测技术等方面，建立了不少基于 GIS、BIM 等技术的自动监测预警系统[10]。然而，由于膨胀土的胀缩性及裂隙性，加之外部环境作用的复合叠加，基于位移或降雨量的传统监测预警方法，难以实现滑坡演变过程中水分、温度、裂隙等多场多参数特征的获取与表征。尤其是膨胀土中裂隙网络几何形态结构非常复杂，形成和发育过程具有不确定性，传统的技术手段难以准确获取裂隙的时空发育状态，导致现阶段还无法形成有效的膨胀土滑坡灾害的早期预警方法[11]。因此亟需在把握膨胀土滑坡致灾机理基础上，建立基于坡体及其防护结构关键状态参量实时监测的早期预警模型与技术方法体系。同时，由于膨胀土边坡所处环境复杂，影响因素多，且具有动态演化的特征，实现多场多参数的三维空间一体化监测，并对多源异构数据进行实时传输和信息挖掘，进而开展滑坡灾害早期识别和预警，目前仍存在很大的挑战。

（3）挑战 3：膨胀土滑坡与工程边坡韧性生态防治材料与技术。随着对膨胀土特殊工程特性认识的加深，“宜挡不宜清，宜排不宜堵”的整治原则已成为共识，且“保湿防渗、以柔治胀、生态护坡”等柔性防治理念正逐渐成为主要趋势[12]。近年来，随着人们环保意识和可持续发展观念的增强，用于土质改良的高性能纳米材料、环保型精细化工材料等引起广泛关注；同时，生态护坡已成为国内外边坡防护工程的热点[13]。但用于抑制膨胀土水敏性和裂隙性、增强坡体疏排水功能的新型防治材料及其施工技术鲜有报道，针对膨胀土边坡的生态防护机制研究也有待深入。基于膨胀土边坡失稳机制，研发经济、快速、长效、环保型膨胀土边坡防治新材料和“表-浅-深”一体化防治新技术，建立坡面防护、裂隙治愈和稳定性加固一体化材料与技术体系，是亟待解决的“卡脖子”科学与技术难题。

（4）挑战 4：膨胀土滑坡与工程边坡防护工程健康诊断与快速修复技术。膨胀土滑坡和边坡防护工程在长期服役过程中因疲劳、环境腐蚀、材料老化等因素产生累积损伤；此外，膨胀土的反复胀缩对防护结构产生循环应力作用，加剧其累积变形，并可能导致突发性损伤。目前国内外针对结构损伤识别、健康诊断及快速修复的研究多集中在桥梁、隧道、建筑等领域，常用的损伤诊断技术有振动、声发射、超声波、射线等，并基于检测数据提出了分项评价、综合评价、模糊评价等多种诊断方法。但如何基于防护结构性能劣化机理，采用多尺度相结合的检测手段和分析方法，快速判别损伤位置和程度，并考虑多指标权重动态变化特征，评价防护结构的健康状态，进而提出基于健康分级的快速加固和修复方法，目前仍是膨胀土滑坡和工程边坡防护工程技术研发的难点[14]。

2　研究目标、内容及关键科学技术问题

2.1　研究目标及内容

针对膨胀土滑坡和工程边坡的重大地质灾害问题，开展膨胀土滑坡和工程边坡的失稳机理与关键致灾因子研究，构建膨胀土边坡实时监测预警与防护工程健康诊断系统，研发“表-浅-深”一体化的边坡加固与防护工程快速修复成套技术，制定标准化设计方法与施工工法，进而开展工程示范，形成膨胀土边坡生态防护综合技术体系。

项目下设五大任务目标，对应设置 5 个课题，课题名称及承担单位、负责人情况如表 1 所示。课题间逻辑关系如图 1 所示。

表 1　课题设置

Table 1 Arrangement of tasks

课题序号	课题名称	牵头单位	课题负责人
1	膨胀土滑坡与工程边坡水力作用失稳特征与安全性评价方法	中国科学院武汉岩土力学研究所	孔令伟
2	膨胀土滑坡和工程边坡实时监测与早期预警技术	中国科学院地质与地球物理研究所	胡瑞林
3	膨胀土滑坡和工程边坡防治工程新型材料与新型技术	合肥工业大学	查甫生
4	膨胀土滑坡和工程边坡防护工程健康诊断和快速修复技术	中国地质科学院探矿工艺研究所	石胜伟
5	膨胀土滑坡和工程边坡生态防护综合技术体系及应用示范	同济大学	叶为民

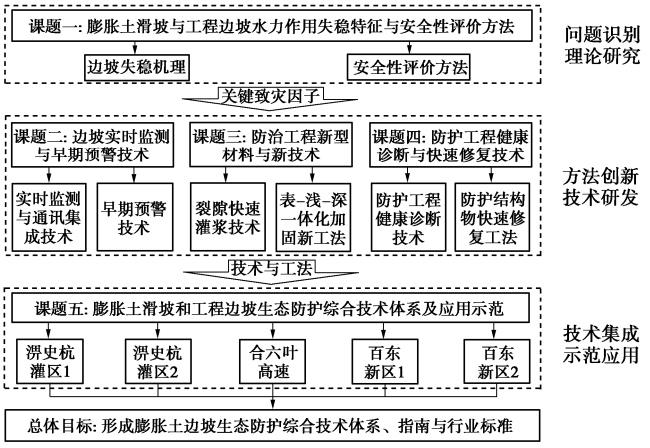


图 1 课题间逻辑关系

Fig. 1 Relationship among tasks

2.2 关键科学技术问题

围绕任务目标,项目着重解决两个关键科学问题。

(1)考虑膨胀土“三性”互馈作用的边坡失稳机理与安全性评价理论。外部环境作用下，膨胀土常呈现出超固结性、胀缩性与裂隙性“三性”互馈特征，从而引起具有浅层性、牵引性、反复性等“六性”特征的渐进式滑坡。尤其是，上述行为还受到渗透及温度等影响。因此，膨胀土滑坡实质上是一个以水分迁移为主线的热-渗-力多场耦合问题，且各因素对滑坡稳定性影响程度随时间不断变化。为此，考虑膨胀土“三性”互馈作用的边坡失稳机理与安全性评价理论是本项目拟解决的关键科学问题之一。

(2)基于渐进演化的膨胀土滑坡灾害早期预警模型与韧性生态防治理论。膨胀土滑坡具有渐进性的特征，传统监测预警方法，难以实现滑坡演变过程中水分、温度、裂隙等多场多参数特征的获取与表征，无法形成有效的膨胀土滑坡灾害的早期预警方法；传统的刚性支护技术无法适应具有“三性”特征的膨胀土滑坡的治理要求，难以形成有效耐久的防治效果。基于渐进演化的膨胀土滑坡灾害早期预警模型与韧性生态防治理论是本项目拟解决的第二个关键科学问题。

本项目重点解决以下 4 大关键技术问题。

(1)基于分布式光纤感测的膨胀土变形及裂隙精细化动态监测技术。常规监测方法无法获得土体内部的变形特征，无法满足龟裂研究的精细要求。分布式光纤监测技术具有高精度、长距离和抗干扰等优点，适合监测大尺度的对象和对变形异常进行精准定位，但如何将传感光纤直接应用于土体变形和裂隙监测仍然是一个值得研究的课题。

(2)基于智能分析及视景交互的膨胀土边坡早期预警技术。监测过程将产生海量多场信息（热、水、力、变形等），且这些信息数据来源和格式不尽相同，如何实现多场信息自动采集—无线传输—云端存储，通过多源异构数据自动采集、三维动态信息处理、人工智能与大数据综合分析，构建具有早期识别功能的膨胀土边坡三维视景智能交互平台并实现高效可靠的早期预警功能，是亟待解决的一项关键技术。

(3)膨胀土边坡“表-浅-深”一体化生态加固技术。基于“保湿防渗，以柔治胀，生态护坡”理念，如何在保障膨胀土边坡防护效果的同时，增强防护结构的韧性和生态环保性，尚需要突破用于抑制膨胀土水敏性和裂隙性、增强坡体疏排水功能的新型防治材料及其施工技术，进而突破膨胀土边坡“表-浅-深”一体化生态加固技术瓶颈。

(4)基于健康分级的防护工程健康诊断与快速修复技术。目前国内外针对产生健康缺陷的膨胀土滑坡和工程边坡防护工程，缺乏科学有效的检测手段、评价体系和仪器设备，且相关修复加固技术仍处于起步探索阶段，如何开展防护工程健康诊断和快速修复仍是亟待解决的关键技术问题。

3 主要创新成果

3.1 膨胀土滑坡与工程边坡水力作用失稳特征与安全性评价方法

(1)膨胀土边坡灾害类型、成灾模式与关键致灾因子

通过开展全国膨胀土广泛发育地区的实地踏勘和对于已有的膨胀土失稳案例的相关文献（学术论文、专著、报告、新闻报道等）的追踪，统计了过去 30 年间共计 473 起膨胀土边坡失稳案例（图 2），开展了典型膨胀土区域的地质、气象、水文和工程背景调研统计，建立了膨胀土边坡失稳案例数据库，归纳总结了膨胀土边坡的灾害类型、成灾模式与关键致灾因子。

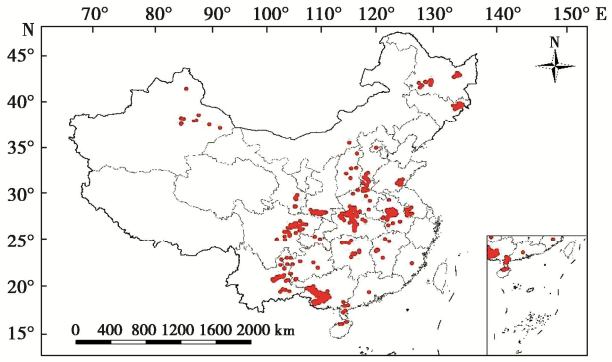


图 2 中国膨胀（岩）土边坡灾害点分布（473 处）

Fig. 2 Expansive soils-related disasters in China (473 cases)

从区域上分布来看，膨胀岩土边坡破坏现象集中分布在从云贵高原到东北平原之间的平原、盆地、河谷阶地、河间地块和丘陵地带，在塔里木盆地、东南沿海和黄土高原地带零星分布（图 2）。西南、华南地

区夏季高温多雨，冬季低温少雨，形成了良好的干湿循环系统。膨胀土在半干旱或强烈干湿交替作用下反复不均匀胀缩，主要诱发坡面冲蚀、坍塌和滑坡灾害（表 2）。东北、华北地区受冻融作用强烈，膨胀土边坡灾害类型主要包括剥落、胀裂和滑坡。中部地区属暖湿气候，交通运输和水利工程繁密，膨胀土边坡灾害主要为裂隙面控制的整体滑动和胀缩裂隙带浅层滑动。不同区域的膨胀土边坡破坏均存在牵引性、浅层性和渐进性等共性特征，也表现出季节性和灾害类型等差异性。

表 2 膨胀土边坡灾害类型

Table 2 Disaster types of expansive soil slope

区域	典型地区	灾害类型	代表性案例
西南、华南	四川盆地、昆明盆地、南宁盆地、百色盆地	冲蚀、坍塌、滑坡	百东新区百贤路、广西南友高速公路
东北、华北	延吉盆地、图晖盆地	剥落、胀裂、滑坡	吉林至珲春 GDK275 边坡
中部	南襄盆地、江淮丘陵区	整体滑动、浅层滑动	南水北调、淠史杭灌区、引江济汉

通过归纳总结发现，膨胀土边坡灾害可分为坡面冲蚀（24.9%）、局部坍塌（42.1%）和滑坡（33.0%）三大类，关键致灾因子包括地质构造、边坡结构性、胀缩等级、超固结性等内在条件，以及降雨（36.6%）、干湿循环（29.5%）和开挖卸荷（33.9%）等外部诱因（图 3）。膨胀土边坡成灾模式包括胀缩作用下的浅层破坏、沿风化结构面滑动、沿裂隙结构面滑动和沿层间结构面滑动 4 种。

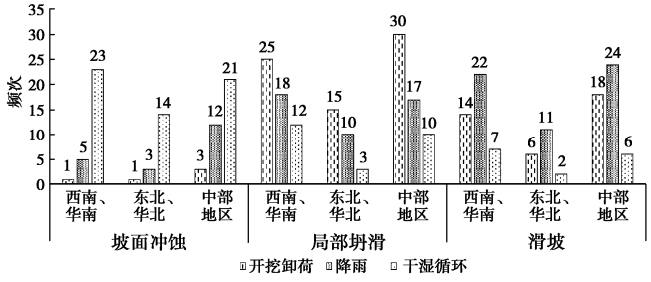


图 3 不同区域膨胀土边坡灾害类型与关键致灾因子

Fig. 3 Types and causes of expansive soils-related disasters in different regions of China

（2）膨胀土原位力学特性与微观结构演化规律

开展现场原位试验对于克服室内试验取样过程扰动及试样尺寸限制等影响，认识膨胀土的工程特性尤其重要。为此，开展了原位膨胀土 CBR、扁铲侧胀、孔内剪切、回弹模量和旁压试验，获得了膨胀土的原位力学特性[15-16]。发现含水率相同时，膨胀土最大动剪切模量 G_{max} 和参考剪应变 γ_r 具有良好线性关系（图 4）。采用了核磁共振与扫描电镜，分析了季冻区膨胀土的孔隙结构演化特征及其孔隙结构与宏观力学特性之间的联系，发现孔隙结构的变化与力学特性具有较好的线性关系，并影响其体变特性（图 4）[17-18]。开发了膨胀土土水特征曲线预测软件[19]和 CT 数据分析软件[20]。基于膨胀土的水–力学特性，提出采用改性剂超疏水纳米 SiO_2 和生物炭改良膨胀土[21-22]。

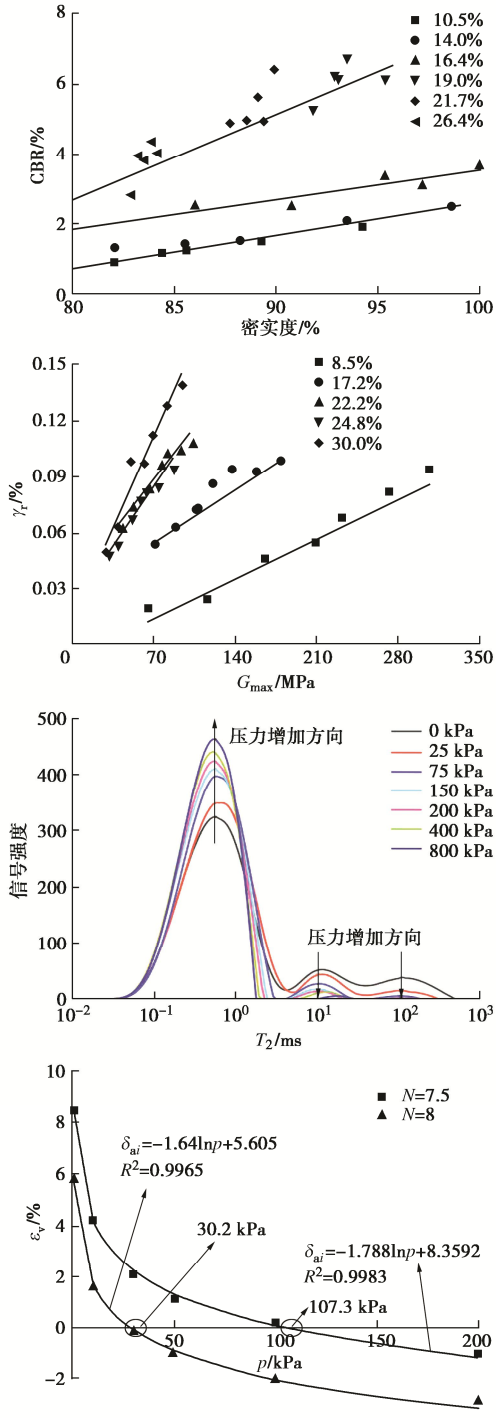


图 4 膨胀土原位力学特性

Fig. 4 In-situ mechanical behaviors of expansive soils

（3）膨胀土边坡成灾模式 T-S 模糊故障树判别方法与安全性动态评价方法

膨胀土边坡失稳破坏可看作边坡正常运行中的一种故障。然而，由于膨胀土失稳破坏的复杂性和模糊性，使得边坡失稳破坏发生的概率难以用精确值来表示，系统的故障机理并不清楚，事件间的联系往往具有不确定性。为此，在地质评价系统的基础上，采用模糊化分析的方法，建立了膨胀土边坡成灾模式 T-S 模糊故障树判别方法[23]。相比传统的故障树分析方法，该方法能够更加准确反映事件间的关系假设。采用该模型成功判别了渭史杭灌区瓦东干渠刘岗电灌站#2 滑坡为沿裂隙结构面滑动，百色市百东新区经一路高速公路滑坡为浅层和沿风化结构面共同破坏。

膨胀土边坡的影响因素多且各因素权重随气候和地质环境变化而动态变化，传统的常权重边坡安全性评价方法不再适用。为此，结合膨胀土“三性”及边坡关键致灾因子，选取边坡形态、气象水文和土体性质等方面的 11 个影响因素，组成膨胀土边坡安全动态评价指标体系，分别建立了强膨胀土和中—低膨胀土的影响因素权重变化模型，采用岭形隶属度函数开展安全性模糊综合评判，形成了膨胀土边坡安全性动态评价方法，并开发软件 1 套[24]（图 5）。采用该方法对安徽渭史杭灌区瓦东干渠#1、#2 滑坡和广西百色星湖路膨胀土边坡进行了安全评价，验证了该方法的可靠性。



图 5 基于变权重模糊综合评判与层次分析法的膨胀土边坡动态安全评价软件

Fig. 5 Software running with fuzzy-AHP-based variable weight safety evaluation model for safety of expansive soil slopes

3.2 膨胀土滑坡和工程边坡实时监测与早期预警技术

膨胀土具有显著的裂隙性。特别是气候长期干旱和地下水位持续下降时，膨胀土体表层和内部将产生纵横交错、宽大深长的裂隙网络，使得膨胀土的强度、渗透、变形等性质发生显著改变，进而诱发膨胀土边坡灾害[25-26]。为此，项目研发了膨胀土裂隙捕获、识别与监测技术，并基于裂隙性提出了膨胀土滑坡早期预警技术。

（1）膨胀土裂隙快速捕获与智能识别技术

传统的裂隙捕获与识别多依赖于图像采集并手工标记，工作负荷大且效率低，且极易受到自然条件（降雨、陡坎、草木遮蔽）的影响，随机和系统误差大。项目以渭史杭灌区瓦东干渠#2 滑坡试坑为依托，借助三维激光扫描仪，实现了膨胀土裂隙的现场捕获；借助大数据与机器学习技术，构建了基于点云的膨胀土裂隙模型，并利用基于大数据和卷积神经网络的 U-Net 模型开展了裂隙智能识别分析，形成了膨胀土裂隙快速捕获与智能识别技术，并开发了相应软件 1 套[27-31]（图 6）。

相比人工相机采集，三维激光扫描仪能够同时获取点云数据与图像数据，采集效率大大提高。此外，三维重建后的曲面模型表面纹理细致，可以精细反映坡体的表面情况并实现三维可视化。卷积神经网络的图像识别方法相比传统方法拥有强大的泛化能力，可有效排除植被和阴影干扰[32]。

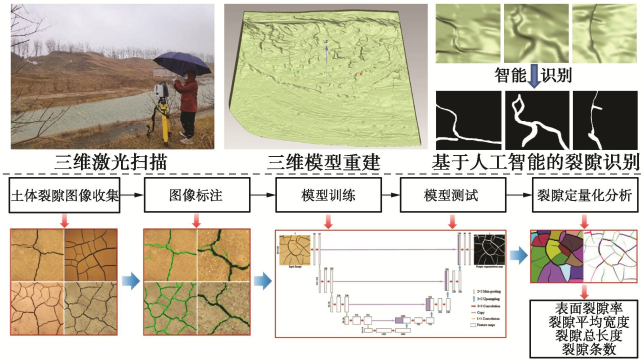


图 6 膨胀土裂隙快速捕获与智能识别技术

Fig. 6 Fast-capture and intelligent-identification techniques for cracks of expansive soils

（2）基于分布式光纤感测的膨胀土边坡水分-裂隙监测技术

针对膨胀土内部水分、温度、变形和裂隙等多场信息的多维度、长距离、大面积原位监测技术瓶颈，研发了基于分布式光纤的膨胀土边坡水分-裂隙监测技术。针对水分监测问题，将铜网加热光纤测管埋入土体内，利用直流电源每隔一定时间加热测管，利用其升温过程中的温度特征值与含水率之间的关系进行土体含水率实时测定（图 7）。

针对裂隙监测问题，将应变光缆埋入土体内部，通过监测膨胀土干燥收缩过程中的应变分布的时空演化，将应变峰值点判别为裂隙位置。结果表明，应变峰值点与裂隙位置吻合度高，且应变峰值越大，裂隙越宽（图 8）。分布式光纤感测为膨胀土裂隙发育过程精细动态监测和提前预测提供了新的技术手段[33]。

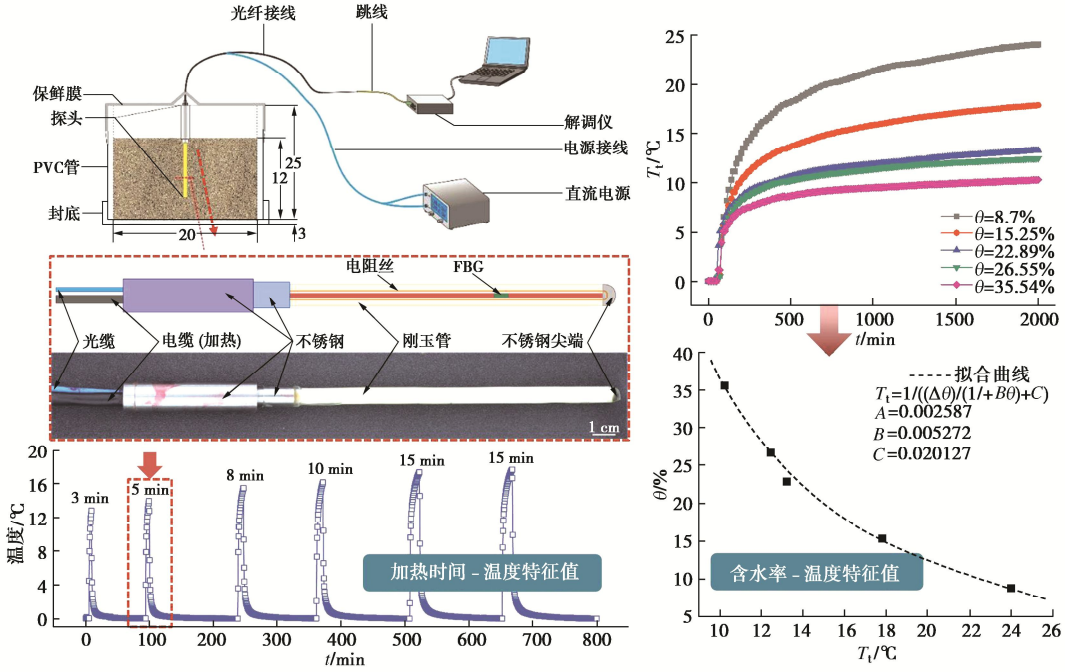


图 7　基于分布式光纤测温系统的膨胀土水分监测技术

Fig. 7 Distributed temperature sensor (DTS)-based moisture monitoring technique

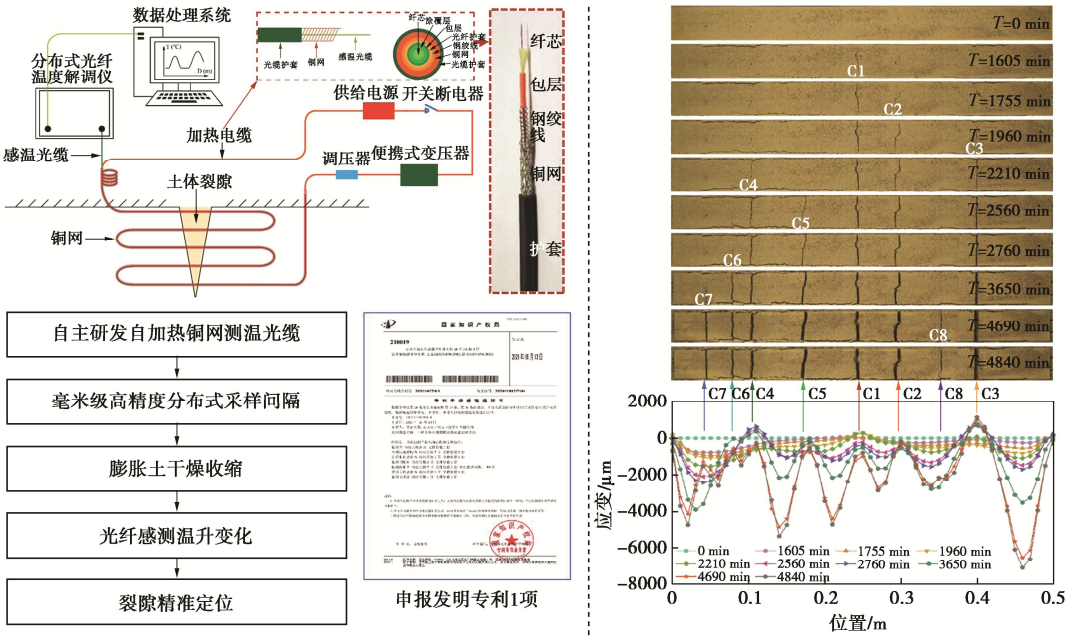


图 8　基于分布式光纤测温系统的膨胀土裂隙监测技术

Fig. 8 Distributed fiber optic sensing (DFOS)-based crack monitoring technique

（3）基于裂隙度演化的膨胀土滑坡早期预警技术

膨胀土滑坡变形过程中，滑体裂隙演化发展会影响滑坡变形的进一步发展。针对该问题，在安徽泗史杭灌区瓦东干渠#2 滑坡体上开展了三处原位大型坑试，采用数字图像相关技术，监测获得了不同雨况（小雨、大雨、暴雨）入渗作用下、膨胀土体的变形与裂隙演化过程，揭示了降雨作用下膨胀土滑坡的“缓慢变形—加速变形—稳定变形—加速变形—失稳破坏”阶段式变形破坏模式，发现优势裂隙是控制坡体稳定性的关键因素，提出了基于裂隙度演化的膨胀土滑坡早期预警技术（图 9）。建立了膨胀土滑坡智能化监控平台数据库，初步开发了膨胀土滑坡早期预警平台[34-35]。

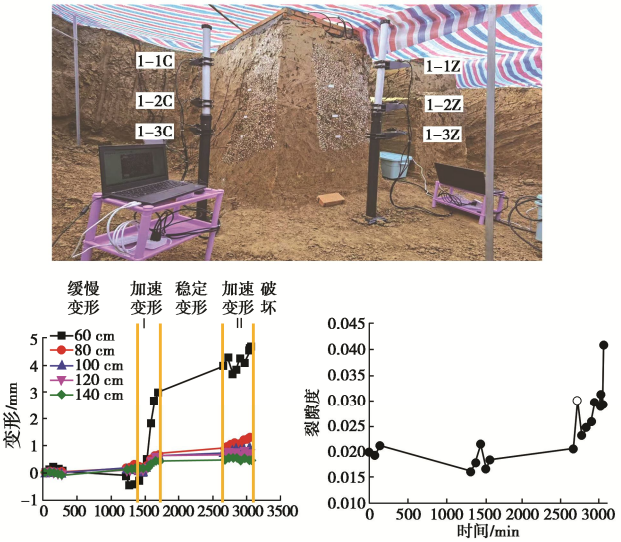


图 9 降雨入渗作用下膨胀土变形与裂隙度演化特征

Fig. 9 Temporal evolution of deformation and crack density of expansive soils subjected to rainfall

3.3 膨胀土滑坡和工程边坡防治工程新型材料与新型技术

（1）膨胀土边坡“表-浅-深”一体化韧性生态防护技术

裂隙与水分变化是诱发膨胀土滑坡的关键因素，通过控制裂隙发育与水分变化是防治膨胀土滑坡的有效途径。基于非饱和土力学和毛细水运移理论，结合常规边坡加固方法，提出了膨胀土边坡“表-浅-深”一体化生态防治技术[36-37]。该技术包含韧性生态防护单元（由粗粒层、细粒层和生态层构成）和锚固型排水格构单元两个部分，通过对降雨条件下水分的“阻-储-排”协同作用和蒸发条件下坡体内水分的阻隔效应，实现对坡体水分的“防渗保湿”调控，抑制裂隙的产生与扩展；通过锚固型排水格构维持韧性生态防护单元和土体结构稳定性，同时疏排坡面降水；从而防治膨胀土边坡滑坡灾害（图 10）。同时开展了大量室内试验和数值模拟研究，验证了该技术的可行性和有效性，探明了三层结构厚度、粒径和压实度等对加固效果的影响规律，编制相关技术规程 1 部，为工程示范边坡“表-浅-深”一体化生态防治设计与施工奠定了基础。

（2）膨胀土原位改良技术与工法

工程实践中对膨胀土原位改良和就地利用存在迫切需求。对此，在传统膨胀土路基边坡石灰改性包边工艺的基础上，利用纳米二氧化硅颗粒小、活性高的优点，研发了基于钙基纳米二氧化硅改性的膨胀土路基包边技术[38]。选取合肥地区膨胀土为研究对象，探究了不同配比、不同掺量、不同养护龄期的纳米二氧化硅-石灰复合改性土在强度、变形、渗透三方面工程性质指标的变化，得到复合改性剂的最优掺量，建立基于性价比的最优掺量计算公式，并结合微观试验，揭示了复合改性剂改性膨胀土的微观作用机理（图 11，图中 UCS 为无侧限抗压强，NS-C 表示纳米二氧化硅-石灰，C 表示石灰）。在此基础上，进一步开展钙基纳米二氧化硅改性土在干湿循环、冻融循环碳化作用及有机酸作用下工程性质的试验，对改性土耐久性进行了评价。

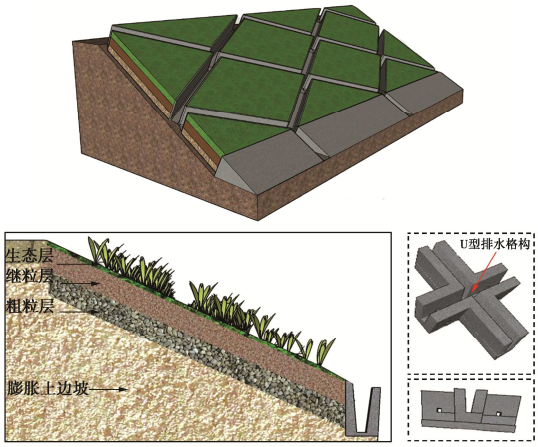
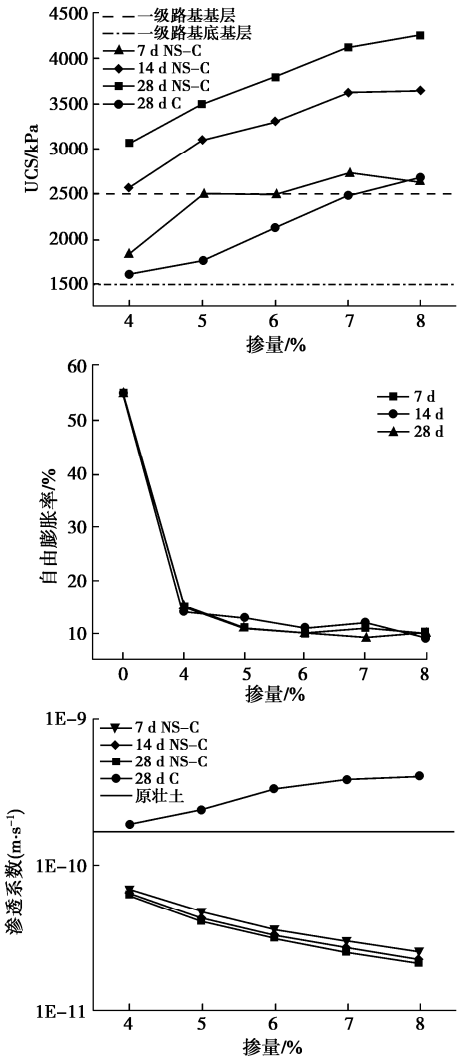


图 10 膨胀土边坡“表-浅-深”一体化韧性生态防护技术

Fig. 10 ‘Surface-shallow-deep’ integrated and ecological reinforcement technology for expansive soil slopes



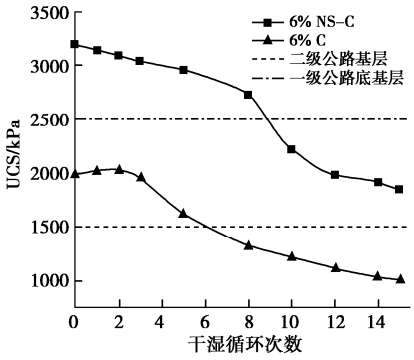


图 11　钙基纳米二氧化硅改性膨胀土的水−力特性

Fig. 11 Hydro-mechanical behaviors of expansive soils modified with Ca-SiO_2 powder

土壤中含有大量微生物群，选取具有一定功能的微生物，经过培养可用于胶结土壤颗粒以固化土体。提出了一种使用磷石膏与微生物改良膨胀土路堤的设计施工方法，该方法可有效降低膨胀土的胀缩性和裂隙性，提高膨胀土路堤的承载力，同时实现磷石膏废物再利用[39-41]。

（3）膨胀土裂隙柔性生态胶黏治愈剂

基于膨胀土裂隙发育特征及修复需求，考虑表浅部大裂隙与深部中小裂隙共生的现状，研发了 PSS（粉体）和 LSA（液体）两种柔性生态高分子材料，分别用于修复表浅部大裂隙与深部中小裂隙。粉末状亲水性生态高分子材料（PSS）能够与土均匀拌和，遇水发生反应与土颗粒相互作用形成紧密胶结，作为修复膨胀土大裂隙的填料（图 12）；液体高分子材料（LSA）通过灌浆技术修复深部细小裂隙[42]。以合肥地区膨胀土为研究对象，探究了不同掺量的 PSS 复合土体在强度、渗透性、变形三方面工程性质指标的变化规律，提出了最优掺比；在此基础上，结合裂隙图像捕获与处理技术[43]，探究了干湿循环条件下复合土体的裂隙发育特征；并结合微观结构观测，分析了柔性生态高分子材料对膨胀土胀缩变形及裂隙发育抑制作用的微观机理。

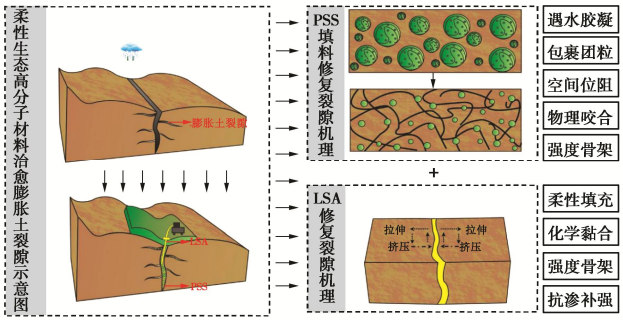


图 12　PSS 和 LSA 治愈膨胀土裂隙示意图

Fig. 12 Cracks curing using PSS and LSA

3.4　膨胀土滑坡和工程边坡防护工程健康诊断和快速修复技术

（1）防护工程健康分级方法与诊断系统

调研了膨胀土滑坡和工程边坡防护工程 50 余处，总结分析了排水与支挡结构（挡墙、抗滑桩和格构）变形破坏特征和成因，揭示了膨胀土反复胀缩作用对坡体与防护工程稳定性的影响[44]，建立了各种防护结构的健康分级指标体系，将防护工程健康状态由轻微到失效划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ级。基于模糊综合评判理论，建立了防护工程健康诊断方法，开发了一套防护工程健康诊断系统[45]（图 13）。该系统通过输入防护结构的各项健康指标并分析权重，准确诊断了百色公安监管中心挡土墙等防护结构的健康状态。

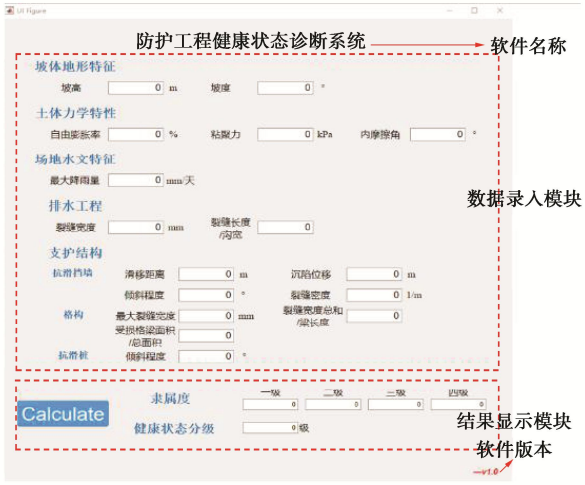


图 13　防护工程健康状态诊断系统

Fig. 13 Diagnostic system for health status of protection structures

（2）抗滑挡墙多段扩孔式锚杆修复技术

针对膨胀土边坡挡墙变形失稳问题，结合普通土质边坡挡墙的锚杆修复技术和膨胀土特性，研发了多段扩孔式锚杆（MUAs）修复技术（图 14）。室内大型三维模型试验结果表明，增加扩孔段数量可显著提高多段扩孔式锚杆的极限承载力，两段扩孔锚杆是非扩孔锚杆极限承载力的 1.56 倍，三段扩孔锚杆是非扩孔锚杆极限承载力的 2.06 倍[46-47]。揭示了基于拱形破坏和柱形破坏的多段扩孔式锚杆承载机理，建立了多段扩孔式锚杆承载力计算模型，提出了基于 MUAs 的变形挡墙快速修复设计方法。

（3）排水工程聚合物快速修复技术

受膨胀土反复胀缩作用，排水结构常发生拉张破裂、剪切错位和挤压闭合等破坏，导致排水功能局部甚至大面积失效，成为膨胀土滑坡的重大隐患。为维持排水结构既定的功能性，相应地研发适于裂缝修复的聚合物防渗材料技术及适于大面积、成段损毁的土工织物软体置换技术，具有重要的现实意义。PTB 乳

液（氯乙烯-乙烯-乙烯醚乳液）具有优良的柔韧性、防水性、防腐性，适宜作为聚合物掺料。将水、水泥、砂、减水剂和 PTB 乳液以不同配比混合，试制了 255 个聚合物试块并开展了抗渗、抗折、抗压、黏结和稠度正交试验（图 15），优选了修复材料的适宜配比（175∶500∶750∶1∶24.04 或 120∶500∶500∶1∶60）[48]；结合现场试验，提出了采用表面处理法、重力填充法和弹性补缝器注浆法相结合的排水工程聚合物修复工法。

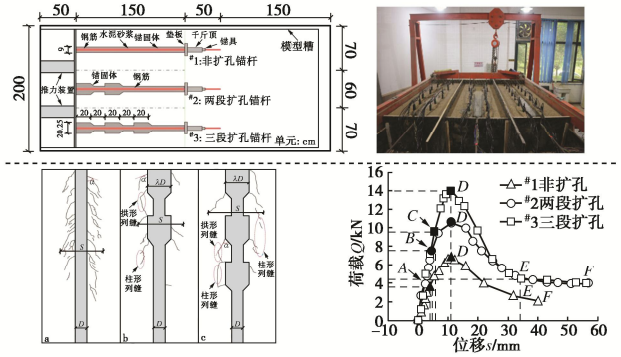


图 14 多段扩孔式锚杆

Fig. 14 Multi-underreamed anchors (MUAs)



试验	数量
抗渗试验	48
抗折试验	69
抗压试验	69
黏结试验	138

编号	PTB	水	减水剂	水泥	砂	黏结强度/MPa
A1	24.04	225	1	500	750	0.657
A2	24.04	200	1	500	750	1.050
A3	24.04	175	1	500	750	2.630
O1	70	140	1	500	500	1.279
O2	60	120	1	500	500	1.680
O3	55	110	1	500	500	1.102
O4	50	100	1	500	500	1.584



图 15 排水工程聚合物改性水泥砂浆修复材料

Fig. 15 Polymer-modified cement mortar for ditch repairment

4 成果应用情况及社会经济效益

围绕膨胀土滑坡和工程边坡防治的实际需求，集成项目主要研发成果，实施了淠史杭灌区瓦东干渠刘岗电灌站#1、#2 滑坡和合六叶高速公路 K707+900 工程边坡工程防治示范。其中，瓦东干渠刘岗电灌站#1 滑坡与#2 滑坡毗邻，地质条件基本一致，示范内容存在差异，但限于篇幅本文仅介绍#2 滑坡防治情况。

4.1 淠史杭灌区瓦东干渠刘岗电灌站#2 滑坡治理示范工程

（1）工程概况

安徽省淠史杭灌区瓦东干渠是寿县瓦东灌区的主要输水工程，自建成以来灌溉、水利、航运等效益显著。2020 年汛期，位于瓦东干渠刘岗电灌站左岸桩号约 25+050 处发生滑坡（#2 滑坡）。2020 年 5 月 15 日现场量测滑坡长度 75 m，顺坡长 26 m，滑坎高 1.3 m；5 月 24 日渠道通水后出现明显的滑塌现象；6 月 4 日测量长度 96 m，斜坡长 42 m，滑坎高度 3.2 m，滑舌伸入水中 4.5 m（图 16）。

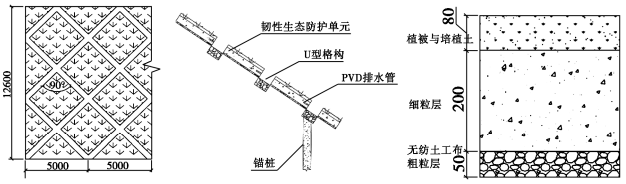


图 16 瓦东干渠刘岗电灌站#2 滑坡(治理前)

Fig. 16 Landslide No. 2 (before treatment) near Liugang electric irrigation station of Wadong main canal

（2）示范方案与示范效益

针对该滑坡体致灾成因与渠道功能需求，采用抗滑桩、韧性生态防护单元、锚固型排水格构单元为主，削坡减载、混凝土预制锁块护坡、设置地表及地下排水等为辅的方案进行综合治理（图 17）。其中，该方案中的韧性生态防护单元和锚固型排水格构单元为本项目研发的“表-浅-深”一体化生态防护技术体系的核心技术。



材料参数	种类	粒径/mm	压实度/%	厚度/cm
植被壤土	营养土	/	/	6
细粒层	粉土－粉质黏土	<2	70~85	20~35
粗粒层	砾石	10~20	70~85	5~10

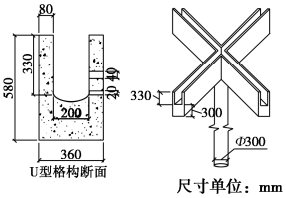


图 17 瓦东干渠刘岗电灌站#2 滑坡治理方案

Fig. 17 Design of landslide No. 2 near Liugang electric irrigation station of Wadong main canal

坡面韧性生态防护单元（图 17）：一级平台以上各坡面布设韧性生态防护层，由下至上分别为粗粒层、土工织物、细粒层、植被层。粗粒层厚度为 50 mm，

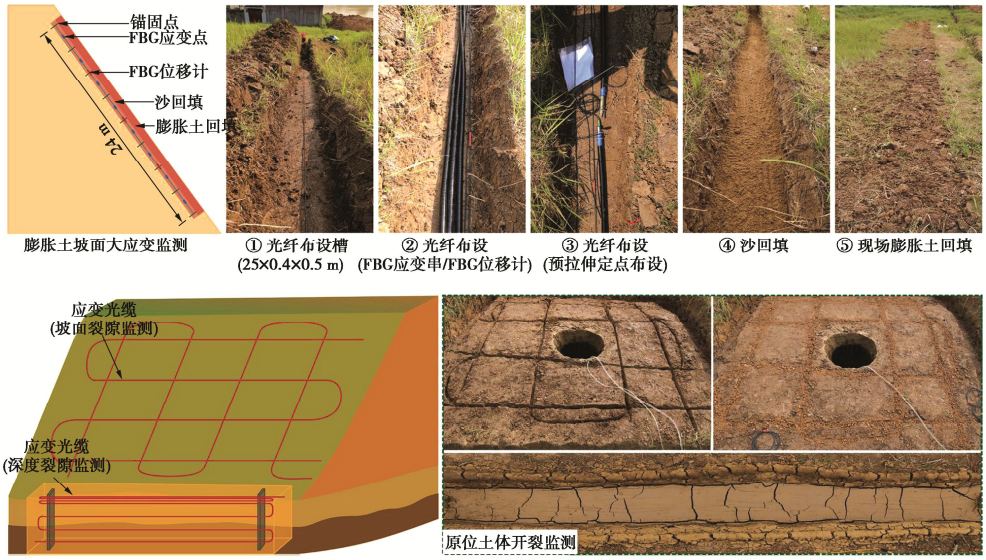


图 18　瓦东干渠刘岗电灌站#2 滑坡监测方案

Fig. 18 Monitoring program of landslide No. 2 near Liugang electric irrigation station of Wadong main canal

采用碎石作为覆盖层材料，碎石的粒径为 2～10 mm，进气值不大于 1.5 kPa，其饱和渗透系数不小于 1×10^{-2} m/s；选用滤水型土工织物布设于粗粒层表面，需在重合处进行连接；细粒层厚度为 200 mm，采用粉质黏土作为覆盖层材料，粉质黏土的粒径不大于 2 mm，其饱和渗透系数为 1×10^{-8}～1×10^{-5} m/s；植被层厚度为 80 mm，采用适合于植被生长的营养土，植物种类选取紫苜蓿、猫尾草或三叶草。

锚固型排水格构单元（图 17）：一级平台以上各坡面布设 U 型排水格构，呈菱形布设，U 型格构单边长 2.5 m，宽度 260 mm，高度 630 mm，入土深度 300 mm。U 型格构侧板宽度 80 mm，高度 330 mm，底部和中部开排水口，中部排水口直径 40 mm，由中部排水口向细粒土中插入长度 40 cm PVC 排水管，底部排水口直径 10 mm，由中部排水口向粗粒层中插入长度 40 cm PVC 排水管，PVC 排水管管口用土工布包裹，防止土粒堵塞；一级平台与二级平台间坡面、滑面平缓段布置一排微型锚桩，锚桩布设于 U 型排水格构菱形边交点处，隔点布设，间距 5 m。锚桩采用 PHC 预制管桩，直径 300 mm，桩底伸入滑动面下 3.0 m。锚桩位于一级台阶以上坡面距排水沟斜距 2.0 m 位置，预制管桩中心间距 5.0 m，锚桩施工时预留 20 cm 出露坡面，浇筑 U 型格构时将锚桩预留部分浇筑于 U 型格构底板内。

监测方案（图 18）：坡面大应变监测主要是使用 5 个定点式 FBG 应变串，3 个大量程光纤微力传感器和两个 FBG 位移计。定点式 FBG 应变串是沿着坡面固定，FBG 监测点位间隔为 5 m。随机选择 3 处具有代表性的部位布设大量程微力传感器。在第一和第三 FBG 应变监测点位置布设 FBG 位移计。坡面裂隙监测在清理后的坡面（3 m×3 m）进行人工开槽，然后在槽中进行应变光缆（型号 NZS-DSS-C07）的布设，并在槽的底部放置一层级配良好的细粒土，防止应变光缆在铺设时的弯折。坡体深度裂隙监测在提前开挖的槽（2.5 m×0.3 m×0.5 m）中逐层布设应变光缆（型号 NZS-DSS-C07）和测温光缆（温度补偿，型号 NZS-DTS-C08），同时逐层填入级配良好的细粒土并压实，最后注水饱和。

截至目前，#2 滑坡防治示范工程已基本完成，各项功能状态良好（图 19），有效保障了瓦东干渠的正常运行。

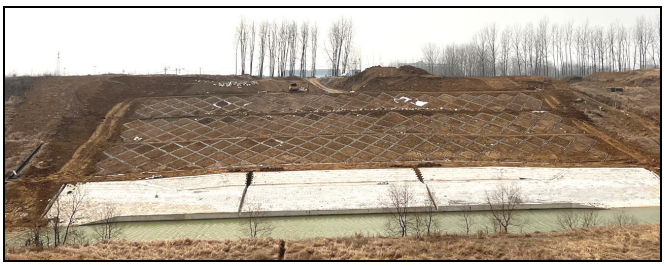


图 19　瓦东干渠刘岗电灌站#2 滑坡（治理后）

Fig. 19 Landslide No. 2 (after treatment) near Liugang electric irrigation station of Wadong main canal

4.2　合六叶高速公路 K707+900 边坡防治示范工程

（1）工程概况

示范应用场地位于安徽省六安市裕安区新安镇合六叶高速公路，桩号 K707+900。该试验段坡高 6.08 m，长度 20 m，试验段坡度为 1∶1.5。采用“表-浅-深”

一体化膨胀土边坡生态防治技术对该场地的路基边坡进行防治。

（2）示范方案与示范效益

坡面韧性生态防护单元：坡面覆盖层由下至上分别为粗粒层、土工织物、细粒层、植被层（图 20）。粗粒层厚度为 5 cm，采用粒径为 10～50 mm 碎石作为材料；细粒层厚度为 25 cm，采用粒径不大于 2 mm 的粉土作为材料；粉土上方覆盖植被。

锚固型排水格构单元由均匀分布单元体组成，每个单元体包含提供强度支撑的预制土工格构（C30）和提供坡向排水的排水孔。格构单元边长 2.5 m，嵌入土体部分尺寸为 260 mm×300 mm，露出土体外部分采用排水沟渠设计（图 20）。

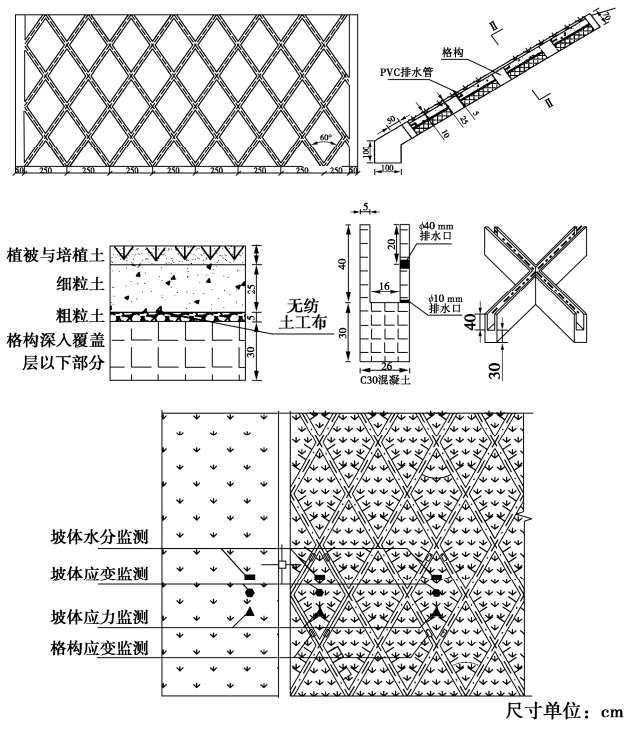


图 20 合六叶高速公路 K707+900 边坡防治方案

Fig. 20 Design of K707+900 slope of Hefei-Lu'an-Yeji high-speed way

监测方案（图 20）：在设计坡面边界处的格构单元及与其间隔一个格构单元的另一个格构单元内布设土壤湿度传感器、内埋式应变计及土压力盒，各监测设备组成一组监测单元，监测单元的深度分别为 150，250，500 mm，即在粉质黏土层布设两组监测单元，膨胀土坡体内布设一组监测单元。同时，在相邻的原生坡面相同深度布设相同的监测单元用以对比边坡防治效果。在混凝土浇筑时将内埋式应变计埋设于选取的格构单元的格构边界处，四条边界各埋设一个，以监测 U 型格构的应变。

目前，合六叶高速公路边坡已按照设计完成施工，坡体和防护结构状态正常（图 21）。



图 21 合六叶高速公路 K707+900 边坡防治效果

Fig. 21 K707+900 slope of Hefei-Lu'an-Yeji high-speed way before and after treatment

5 结 语

本项目针对膨胀土滑坡与工程边坡防治问题，在膨胀土滑坡与工程边坡安全评价、监测预警、防护治理和诊断修复等方面形成了一批具有特色的科研成果，具体体现在以下几个方面。

从膨胀土的“三性”及其互馈作用出发，以“水分−裂隙”为主线，开展了膨胀土滑坡和工程边坡的失稳机理与关键致灾因子研究，提出了膨胀土边坡成灾模式 T-S 模糊故障树判别方法和安全性动态评价方法；基于卷积神经网络 U-Net 模型，形成了膨胀土裂隙智能识别方法；基于非饱和土力学和毛细水运移理论，构建了膨胀土边坡“表−浅−深”一体化韧性生态防护理论；基于模糊综合评判理论，建立了防护工程健康诊断方法，开发了防护工程健康诊断系统。相关成果有助于完善有关学科的理论，丰富相关研究方法。

针对膨胀土的“三性”特征，形成了膨胀土裂隙快速捕获与智能识别技术，基于分布式光纤的膨胀土边坡水分−裂隙监测技术，基于裂隙度演化的膨胀土滑坡早期预警技术，膨胀土边坡“表−浅−深”一体化韧性生态防护技术，膨胀土边坡钙基纳米二氧化硅改性包边技术，抗滑挡墙多段扩孔式锚杆修复技术和排水工程聚合物快速修复技术。相关技术成功应用于淠史杭灌区瓦东干渠刘岗电灌站#1、#2 滑坡治理示范工程和合六叶高速公路 K707+900 边坡防治示范工程。

基于项目相关研究成果，充分吸纳技术应用过程中的成功经验，形成了《膨胀土边坡“表−浅−深”一体化综合防护技术规程》（申报团标）和《地质灾害防治工程健康诊断与修复加固技术要求》（申报行标）等标准 2 部。

截至 2021 年底，项目发表论文 29 篇，其中 SCI/EI 收录 23 篇；申报国家专利 20 件，获得软件著作权 8 项，申报团体/行业标准 2 部。团队 2 人次入选国家级人才称号，2 人次入选省部级人才称号，获省部级一

等奖 1 项。淠史杭灌区、合六叶高速公路等示范工程取得了良好应用效果，有力保障了膨胀土地区水利和交通设施的运行安全，并具有良好的应用前景。

致　谢：本文采用了项目骨干柏巍、顾凯、唐朝生、刘尊言、许龙、康博、王琼、苏薇、李志清、张冬梅、蔡强、贺伟明及其团队的部分研究成果，一并表示感谢。感谢参加本项目的有关单位和科研人员的辛勤付出！

参考文献：

[1] 李生林. 中国膨胀土工程地质研究[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. (LI Sheng-lin. Studies on the engineering geology of expansive soils in China[M]. Nanjing: Phoenix Science Press, 1992. (in Chinese))

[2] SHI B, JIANG H T, LIU Z B, et al. Engineering geological characteristics of expansive soils in China[J]. Engineering Geology, 2002, **67**(1/2): 63–71.

[3] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 1–15. (BAO Cheng-gang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 1–15. (in Chinese))

[4] 蔡正银, 陈　皓, 黄英豪, 等. 考虑干湿循环作用的膨胀土渠道边坡破坏机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(11): 1977–1982. (CAI Zheng-yin, CHEN Hao, HUANG Ying-hao, et al. Failure mechanism of canal slopes of expansive soils considering action of wetting-drying cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(11): 1977–1982. (in Chinese))

[5] 殷宗泽, 袁俊平. 膨胀土特性与边坡稳定[M]. 北京: 科学出版社, 2018. (YIN Zong-ze, YUAN Jun-ping. Characteristics of Expansive Soil and Slope Stability[M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese))

[6] 郑健龙, 杨和平. 公路膨胀土工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009. (ZHENG Jian-long, YANG He-ping. Expansive soil engineering in highway[M]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese))

[7] LIANG C, WU Z J, LIU X F, et al. Analysis of shallow landslide mechanism of expansive soil slope under rainfall: a case study[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, **14**(7): 1–11.

[8] 杨果林, 陈子昂, 张红日, 等. 干湿循环作用下平缓型膨胀土边坡失稳破坏机制研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, **53**(1): 95–103. (YANG Guo-lin, CHEN Zi-ang, ZHANG Hong-ri, et al. Collapse mechanism of gentle expansive soil slope in drying and wetting cycles[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, **53**(1): 95–103. (in Chinese))

[9] QI Y Z, WANG Z Z, XU H Q, et al. Instability analysis of a low-angle low-expansive soil slope under seasonal wet-dry cycles and river-level variations[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, **2020**: 3479575.

[10] 王淳謹, 黄治峯, 赖世屏, 等. 边坡生命周期防灾监测信息整合及可视化云平台数据库建置研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(1): 188–194. (WANG Chwen-huan, HUANG Chih-fong, LAI Shih-ping, et al. et al. Cloud database platform of integrated visualization for life-cycle prevention and safety monitoring of slope hazards[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(1): 188–194. (in Chinese))

[11] 杨济铭, 张红日, 陈　林, 等. 基于数字图像相关技术的膨胀土边坡裂隙形态演化规律分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, **53**(1): 225–238. (YANG Ji-ming, ZHANG Hong-ri, CHEN Lin, et al. Analysis of crack morphology evolution law of expansive soil slope based on digital image correlation technology[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, **53**(1): 225–238. (in Chinese))

[12] 杨和平, 章高峰, 郑健龙, 等. 膨胀土填筑公路路堤的物理处治技术[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(4): 491–500. (YANG He-ping, ZHANG Gao-feng, ZHENG Jian-long, et al. Physical treating techniques of highway embankments filled with expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(4): 491–500. (in Chinese))

[13] XIE C R, NI P P, XU M J, et al. Combined measure of geometry optimization and vegetation for expansive soil slopes[J]. Computers and Geotechnics, 2020, **123**: 103588.

[14] 谢彦初, 汪　磊, 孙德安, 等. 基于组合赋权和聚类方法的膨胀土边坡防护工程健康诊断模型与应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, **53**(1): 258–268. (XIE Yan-chu, WANG Lei, SUN De-an, et al. Health diagnosis model with combination weight and clustering method for protection works of expansive soil slope and its application[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, **53**(1): 258–268. (in Chinese))

[15] LI T G, KONG L W, LIU B H. The California bearing ratio and pore structure characteristics of weakly expansive soil in frozen areas[J]. Applied Sciences, 2020, **10**(21): 7576.

[16] 李甜果, 孔令伟, 舒荣军. 不同含水率膨胀土动剪切模量

特征与原位 G-γ 衰减曲线确定方法[J]. 振动与冲击, 2021, **40**(23): 91－99. (LI Tian-guo, KONG Ling-wei, SHU Rong-jun. Dynamic shear modulus characteristics of expansive soil with different moisture contents and determination method of in situ G-γ decay curve[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, **40**(23): 91－99. (in Chinese))

[17] 李甜果, 孔令伟, 王俊涛, 等. 基于核磁共振的季冻区膨胀土三峰孔隙结构演化特征及其力学效应[J]. 岩土力学, 2021, **42**(10): 2741－2754. (LI Tian-guo, KONG Ling-wei, WANG Jun-tao, et al. Trimodal pore structure evolution characteristics and mechanical effects of expansive soil in seasonally frozen areas based on NMR test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(10): 2741－2754. (in Chinese))

[18] LI T G, KONG L W, GUO A G. The deformation and microstructure characteristics of expansive soil under freeze-thaw cycles with loads[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, **192**: 103393.

[19] LU Y, GU K, ZHANG Y P, et al. Impact of biochar on the desiccation cracking behavior of silty clay and its mechanisms[J]. Science of the Total Environment, 2021, **794**: 148608.

[20] 黎澄生, 孔令伟, 柏 巍, 等. 吸湿路径 SWCC 曲线预测软件[简称: SWCCHys]1.0[CP]. 登记号: 2020SR1831946, 2020-12-16. (LI Cheng-sheng, KONG Ling-wei, BAI Wei, et al. Prediction software of SWCC curve of hygroscopic path [Abbreviation: SWCCHys] 1.0[CP]. Registration number: 2020SR1831946, 2020-12-16. (in Chinese))

[21] 黎澄生, 孔令伟, 柏 巍, 等. CT 数据分析软件[简称: CT Aya]1.0[CP]. 登记号: 2020SR1843548, 2020-12-17. (LI Cheng-sheng, KONG Ling-wei, BAI Wei, et al. CT data analysis software [Abbreviation: CTAya]1.0[CP]. Registration number: 2020SR1843548, 2020-12-17. (in Chinese))

[22] LUO X Q, KONG L W, BAI W. Application of environmental friendly modifier-super hydrophobic Nano-SiO2 in enhancing the stability of expansive soil [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2022, in press.

[23] LU J F, KONG L W, LIU X Y, et al. Multihazard risk model for reliability analysis of expansive soil landslide based on T–S fuzzy logic[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 2022, **8**(2): 04022008.

[24] 叶为民. 膨胀土边坡动态模糊综合评价系统 V1.0[CP]. 登记号: 2021SR1461127, 2021-7-15. (YE Wei-min. Variable Fuzzy-AHP evaluation system for expansive soil slopes V1.0[CP]. Registration number: 2021SR1461127, 2021-7-15. (in Chinese))

[25] CHENG Q, TANG C S, XU D, et al. Water infiltration in a cracked soil considering effect of drying-wetting cycles[J]. Journal of Hydrology, 2021, **593**: 125640.

[26] LI Z Q, KONG Y X, FU L, et al. Model test study on deformation characteristics of a fissured expansive soil slope subjected to loading and irrigation[J]. Applied Sciences, 2021, **11**(22): 10891.

[27] 彭晟赟. 基于地质大数据的膨胀土裂隙分析[D]. 上海: 同济大学, 2020. (PEN Sheng-yun. Expansion Soil Crack Analysis Based on Geological Big Data[D]. Shanghai: Tongji University, 2020. (in Chinese))

[28] 潘伟健. 基于点云数据的膨胀土边坡裂隙模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021. (PAN Wei-jian. Research on Model for Describing Cracks on Expansive Soil Slope Using Point Cloud Data[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese))

[29] 胡启成, 叶为民, 王 琼, 等. 基于地质图像大数据的岩性识别研究[J]. 工程地质学报, 2020, **28**(6): 1433－1440. (HU Qi-cheng, YE Wei-min, WANG Qiong, et al. Recognition of lithology with big data of geological images[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, **28**(6): 1433－1440. (in Chinese))

[30] 胡启成, 叶为民. 基于深度学习模型的岩性识别软件[简称:岩性识别软件] 1.0[CP]. 登记号: 2021SR1139780, 2021-08-03. (HU Qi-cheng, YE Wei-min. Deep Learning Model Based Lithology Recognition Software 1.0[CP]. Resgistration Number: 2021SR1139780, 2021-08-03. (in Chinese))

[31] XU J J, ZHANG H, TANG C S, et al. Automatic soil desiccation crack recognition using deep learning[J]. Géotechnique, 2022, **72**(4): 337－349.

[32] XU J J, ZHANG H, TANG C S, et al. Automatic soil crack recognition under uneven illumination condition with the application of artificial intelligence[J]. Engineering Geology, 2022, **296**: 106495.

[33] CHENG Q, TANG C S, ZHU C, et al. Drying-induced soil shrinkage and desiccation cracking monitoring with distributed optical fiber sensing technique[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, **79**(8): 3959-3970.

[34] 张 硕, 刘尊言, 任金象. 安全监测平台通用数据接口软

件[简称：通用数据接口软件]V1.0[CP]. 登记号：2020SR1779665, 2020-12-10. (ZHANG Shuo, LIU Zun-yan, REN Jin-xiang. Safety Monitoring Platform Application Programming Interface Software [Abbreviation: APIS] V1.0[CP]. Registration number: 2020SR1779665, 2020-12-10. (in Chinese))

[35] 刘尊言, 夏顺盈, 张　硕. 安全监测平台综合通信软件[简称：综合通信软件]V1.0[CP]. 登记号：2020SR1779662, 2020-12-10. (LIU Zun-yan, XIA Shun-Ying, ZHANG Shuo. Safety Monitoring Platform Communication Software [Abbreviation: COMMS] V1.0[CP]. Registration number: 2020SR1779662, 2020-12-10. (in Chinese))

[36] 查甫生, 陈宗涵, 许　龙, 等. 基于毛细阻滞机理的导吸式膨胀土边坡浅层控水覆盖系统：CN111636443B[P]. 2021-12-07. (ZHA Fu-sheng, CHEN Zong-han, XU Long, et al. Shallow Water Control Covering System Based on Capillary Barrier Methods for Expansive Soil Slopes: CN111636443B[P]. 2021-12-07. (in Chinese))

[37] 查甫生, 胡盛涛, 孙献国, 等. 带毛细抽吸结构的膨胀土边坡浅-表层控水防护覆盖系统：CN112663630A[P]. 2021-04-16. (ZHA Fu-sheng, HU Sheng-tao, SUN Xian-guo, et al. Shallow-Surface Water Control Covering System with Capillary Suction Conformation for Expansive Soil Slopes: CN112663630A[P]. 2021-04-16. (in Chinese))

[38] 查甫生, 潘　俊, 康　博, 等. 一种柔性钙基材料改性包边修复膨胀土边坡的方法: CN112663590B[P]. 2021-11-23. (ZHA Fu-sheng, PAN Jun, KANG Bo, et al. A Method for Repairing Expansive Soil Slope with Modified Edge Wrapping of Flexible Calcium Based Materials: CN112663590B[P]. 2021-11-23. (in Chinese))

[39] TIAN Y F, LI Z Q, WANG S J, et al. Application of MICP in water stability and hydraulic erosion control of phosphogypsum material in slope[J]. Applied Sciences, 2022, **12**(4): 1783.

[40] 李志清, 周应新, 侯建伟, 等. 一种使用磷石膏与微生物改良膨胀土路堤的设计施工方法：CN111424485B[P]. 2021-03-02. (LI Zhi-qing, ZHOU Ying-xin, HOU Wei-jian, et al. Design and Construction Method for Expansive Soil Embankment Modified by Phosphogypsum and Microorganism: CN111424485B[P]. 2021-03-02. (in Chinese))

[41] LI Z Q. Construction Method for Ecologically Protecting Expansive Soil Slope by Combining Phosphogypsum with Microbial Mineralization[P]. USA Patent. US10913894B1. 授权日：2021-02-09. ((in Chinese))

[42] 王　琼, 李　丹, 叶为民, 等. 一种新型压密注浆土钉及其拉拔试验装置：CN111794293A[P]. 20201020. (WANG Qiong, LI Dan, YE Wei-min, et al. A New Compaction Grouting Soil Nail and Its Pull-Out Test Device: CN111794293A[P]. 2020-10-20. (in Chinese))

[43] 许　辉, 王　琼, 王　楠, 等. 膨胀土裂隙图像数值化信息提取系统 V1.0[CP]. 登记号：2022SR0206121, 2021-11-30. (XU Hui, WANG Qiong, WANG Nan, et al. Digital information extraction system of expansive soil crack image[CP]. Registration number: 2022SR0206121, 2021-11-30. (in Chinese))

[44] 贺伟明, 石胜伟, 蔡　强, 等. 考虑膨胀作用对抗剪强度影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报.（录用待刊）(HE　Wei-ming, SHI Sheng-wei, CAI Qiang,et al. Stability analysis of expansive soil slope considering the influence of swelling on shear strength [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. (in Chinese))

[45] 张冬梅. 防护工程健康状态诊断系统软件 1.0[CP]. 登记号：2022SR0100998, 2022-01-08. (ZHANG Dong-mei. Protection engineering health status diagnosis software 1.0[CP]. Registration number: 2022SR0100998, 2022-01-08. (in Chinese))

[46] ZHOU Y T, SHI S W, CAI Q. A model test and the ultimate capacity analysis of multi-underreamed anchors in silty clay.[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2022. (in press)

[47] 杨　栋, 石胜伟, 蔡　强, 等.一种膨胀土边坡防护的压力型氮气锚杆结构及适用方法：中国专利，202011516483.2[P]. 2021-12-07. (YANG Dong, SHI Sheng-wei, CAI Qiang, et al. A Pressure Nitrogen Bolt Structure for Expansive Soil Slope Protection and Its Applicable Method: CN202011516483.2[P]. 2021-12-07. (in Chinese))

[48] 贺伟明, 石胜伟, 蔡　强, 等. 双掺氯乙烯-乙烯-乙烯醚乳液与橡胶颗粒改性水泥砂浆的性能研究[J]. 混凝土.（录用待刊）(HE Wei-ming, SHI Sheng-wei, CAI Qiang, et al. Study on properties of cement mortar modified by vinyl chloride-ethylene-vinyl ether emulsion and rubber particles[J]. Concrete. (in press) (in Chinese))

DOI：10.11779/CJGE202207010 “十三五”国家重点研发计划项目

堤防险情演化机制与隐患快速探测及应急抢险技术装备

邬爱清，吴庆华
（长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室，湖北 武汉 430010）



摘 要：中国洪涝灾害问题突出，防洪减灾关系人民生命财产安全和社会稳定。堤防工程是中国防洪体系的重要基础，具有线路长、隐患多、险情频发等特点。目前，对堤防抢险仍然以人海战术为主，抢险效率低，其主要原因是对堤防险情演化机理认识不够系统，缺乏高精度的堤防隐患探测抢险技术与装备，抢险技术装备化程度不高，难以应用抢险实际。“十三五”国家重点研发计划项目“堤防险情演化机制与隐患快速探测及应急抢险技术装备”以长江、黄河、松花江等流域典型堤防工程为依托，以提高堤防工程防御能力为目标，以提高堤防隐患探测精度和应急抢险效率为关键突破点，在堤防工程安全分类、典型堤防险情演化机理、堤防工程安全运行风险评价理论、智能化监测与信息化预警、堤防隐患快速探测和应急抢险技术装备等方面取得一系列创新成果，社会和经济效益显著，应用前景广阔，为中国堤防防灾能力提升提供系统技术支撑，具有重要意义。

关键词：堤防工程；险情；隐患；抢险；装备

中图分类号：TV64；S26 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2022)07－1310－19

作者简介：邬爱清(1963—)，工学博士，正高级工程师（二级），博士生导师，享受国务院政府特殊津贴，兼任国际大坝委员会堤防专业委员会委员，中国岩石力学与工程学会副理事长，长江水利委员会科技委委员，《岩石力学与工程学报》副主编等职。长期从事水工岩土力学理论及工程应用研究。承担了三峡、隔河岩、水布垭、构皮滩、彭水、乌东德、锦屏、白鹤滩、溪洛渡、QBT、长江堤防隐蔽工程等 30 余个国家重点工程中的岩土力学相关理论与技术研究。主持国家十三五重点专项项目“堤防险情演化机制与隐患快速探测及应急抢险技术装备”和国家自然科学基金重大仪器研制项目“高坝水库运行岩体水力耦合模拟试验装置”各 1 项，国家自然科学基金重点项目 1 项、面上项目 3 项及部级研究项目多项。主持编写国标《工程岩体分级标准》（GB/T50218—2014）、行业标准《水利水电工程岩石试验规程》（SL264/T—2020）、行业标准《核电厂工程岩土试验规程》（NB/T10664—2021）及团标《岩体真三轴现场试验规程》等标准 5 项，主持编制《水工设计手册》（第 2 版）基础理论卷岩石力学章，撰写专著 3 部，发表学术论文 160 余篇，授权国家发明专利 20 余项。获国家科技进步二等奖 3 项（1 项排名第一），省部级一等（特等）奖 9 项（5 项排名第 1）。E-mail: wuaq@mail.crsri.cn。

Evolution mechanism of dike risks, quick detection of hidden dangers, and technical equipments of emergency rescues

WU Ai-qing, WU Qing-hua
(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The flood disasters are severe and frequent in China, and affect the safety of people's lives and property and social stability. The dike engineering is an important foundation of China's flood control system, which is characterized by long lines, many hidden dangers and frequent dangerous situations. At present, the dike rescue is still dominated by the huge-crowd strategy, and the rescue efficiency is low due to the fact that the evolution mechanism of the dike risks isn’t yet understood systematically, the high-precision detection and rescue technology of hidden dangers in the dike and the equipments are insufficient, and the degree of technical equmipments for emergency rescues isn’t high. Therefore, the National Key R & D Program of China “Evolution mechanism of dike risks, quick detection of hidden dangers, and technical

基金项目：“十三五”国家重点研发计划项目（2017YFC1502600）
收稿日期：2022－03－05

equipments of emergency rescues” was carried out in the Yangtze River basin, the Yellow River basin, and the Songhua River basin etc., in order to improve the detection precision for hidden dangers in the dike and the efficiency of emergency rescues, aiming to promote the defense capability of the dike engineering. Many innovative results have been achieved in the fields of safety classification of dike engineering, evolution mechanism of dangers of typical dikes, risk assessment of safe operation of dike engineering, intelligent monitoring and early warning, quike detection of hidden dangers and technical equipments of emergency rescus, and so on, with remarkable social and economic benefits, broad application prospects and great significance.

Key words: dike engineering; dike risk; dike hidden danger; rescue; equipment

0 引　　言

为提升国家防灾减灾救灾能力，落实国家对防灾减灾救灾工作重大部署，“十三五”期间，由科技部等部门研究设立了国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项计划。2018 年 3 月，“堤防险情演化机制与隐患快速探测及应急抢险技术装备”（2017YFC1502600）项目立项，为“重大水旱灾害监测预警与防范”方向。该项目由长江水利委员会长江科学院牵头承担，水利部水利水电规划设计总院、长江勘测规划设计研究有限责任公司、中国水利水电科学研究院、郑州大学、河海大学、黄河水利委员会河南黄河河务局、黑龙江省水利水电勘测设计研究院、长江水利委员会水文局和中国水电基础局有限公司共 10 家单位参与。项目围绕堤防险情演化与致溃机理，堤防工程信息化安全管理、隐患探测和险情应急抢险修复等问题，从 2018 年 1 月至 2021 年 6 月，通过近 3 年半联合研究，在堤防险情演化机理、堤防工程安全风险评价方法、堤防隐患探测与应急抢险技术装备研发等方面取得突破，系统提升了中国堤防工程抵御洪涝灾害的科技进步。本文就项目的研究背景、研究内容、主要创新成果，以及成果的应用情况等作简要介绍。

1　背景及研究现状

中国洪涝灾害问题突出，防灾减灾关系人民生面财产安全、社会稳定与可持续发展。堤防工程是中国防洪减灾体系的重要组成部分，是抵御洪水的重要安全屏障。据 2010—2012 年第一次全国水利普查，中国堤防总长度 41.3679 万 km，其中 5 级及以上堤防 27.5495 万 km，5 级以下堤防 13.8184 万 km[1]。截至 2019 年，全国已建成 5 级及以上江河堤防 32.0 万 km[2]。中国的堤防多数是经历代培修加固而成，年代久远，地质条件复杂，受人类和动植物活动影响频繁，服役过程中不可避免会产生隐患和险情，致灾影响重大[3]。

堤防险情多与渗透破坏有关，目前还未完全掌握各类管涌险情发生发展至溃堤的演化机制，对险情危害工程安全的条件和程度认识不清，已有成果尚缺代表性和系统性。在崩岸方面，主要集中在崩岸影响因素研究，对发生崩岸险情的内在机制和演化规律未能很好揭示。在接触冲刷方面，主要围绕土层结合面的接触冲刷问题，很少涉及穿堤建筑物的接触冲刷破坏。漫顶溃决与超标准洪水控制直接相关，其机理有待深入。鉴于此，亟需加强对堤防工程险情发生发展机制的研究，特别是有关险情致溃条件和致溃机制，为堤防险情识别、判断、评估及应急处置提供理论依据。

在堤防工程安全评估方面，国外围绕堤防失效模式、水文水力条件、后果评估等多个维度开展了相关研究，研究手段由确定性方法向随机分析和复杂性系统理论转变。国内针对堤防工程这种高度不确定性系统的工程安全评估和致灾风险分析方法还很欠缺，导致对险情的判断仍以经验和定性为主。随着各类监测设备与遥感等新技术的发展，为获取堤防安全运行实时数据提供了新的技术手段，研究基于实时监测数据的堤防动态安全评估和安全控制标准已成为发展趋势[4]。

中国防洪保障体系方面的研究有待进一步发展和完善。近年来，中国在水雨情数据的自动测报、远程传输和洪水预报等方面已取得重大进步，已成为水情预报和防洪会商的重要平台。如何在此基础上，进一步实现基于堤防工程全寿命周期数据库构建条件下的集监测、评估、识别与预警于一体的堤防工程综合安全管理系统，是提高堤防服役保障能力的重要发展方向。

堤防工程线路长，隐患多，且具有低可探特点。现有探测手段针对性不强，精度不足。为突破堤防隐患探测的发展瓶颈，需从探测理论、装备及探测策略等方面进一步开展攻关研究，提高堤防隐患探测的精度和探测效率。

在堤防险情处置和抢险技术方面，自“98”洪水后，中国在堤防险情处置及抢险技术方面已积累了重要经验[5-9]。针对当今堤防的抢险仍主要依赖传统技术和人海战术影响抢险时效问题，研发新型组装便携式、

成套式快速应急抢险及精准修复技术与装备，提高应急抢险效率，是堤防应急抢险面临的突出瓶颈。

为破解中国堤防工程安全运行与应急抢险中的系列关键问题，“十三五”国家重点研发计划在重大自然灾害监测预警与防范”专项中设立了本研究项目，以集中全国重要力量开展系统研究和示范，本文简要介绍项目研究成果。

2 研究目标、关键问题及主要研究内容

2.1 研究目标

针对中国堤防工程建设特点和防洪减灾战略要求，以长江、黄河、松花江等重点流域堤防工程为依托，在系统梳理各类堤防险情特征基础上，揭示堤防管涌、崩岸、接触冲刷及溃决等典型险情演化过程与作用机制，提出堤防风险识别和安全评估理论；研究堤防全寿命周期基础数据库构建标准，建立重点堤防全寿命周期数据库，研发险情查—评—定一体化安全管理系统；提出堤防运行安全监测、隐患探测关键技术解决方案，研发快速高效应急抢险及修复技术和装备，提高隐患探测精度和应急抢险效率，提升防汛决策能力和水平，增强堤防工程防洪安全保障能力，充实完善“重大水旱灾害监测预警与防范”体系。

2.2 关键科学与技术问题

针对中国堤防工程建设现状特点和国家防洪减灾重大战略需求，基于相关科学技术前沿以及国内外研究现状，围绕堤防险情演化与致溃机理、堤防工程安全评价与信息化管理、隐患探测和险情应急抢险修复等问题，从多学科交叉的视角，凝练出“复杂条件堤防险情演化规律和致溃机理”及“堤防工程风险识别与安全评估”两大关键科学问题，“低可探物理背景下堤防工程隐患探测与识别”“成套装备化堤防应急抢险与修复”和“堤防工程信息化安全管理集成”三项关键技术，综合运用岩土力学、材料力学、水文学、河流动力学、水力学、安全科学、信息科学及管理学等多学科交叉前沿理论，采用资料调研、多源信息采集、大数据分析、理论分析、监测反馈分析、数值仿真、室内外物理模型试验、现场试验、设备研发制造、系统平台集成等多种手段开展研究。

2.3 主要研究内容

针对堤防工程安全运行和险情应急抢险修复领域的重大科学问题和关键技术，项目拟在以下方面重点开展相关研究工作：从堤防工程的历史发展过程着眼，构建其全寿命周期水雨工情基础数据库；在此基础上，研究堤防在复杂水文气象、地质、水力边界条件下的险情演化致溃机理；研发堤防安全评估与风险评价、监测预警信息化、隐患探测及应急避险等非工程措施新技术新方法；研发堤防险情的快速高效应急抢险处置技术和装备。

按照研究内容的系统性和关联性，项目设置 6 个课题分别开展有针对性的研究工作。课题设置及相关承担单位列于表 1。根据项目参与单位各自的技术优势和特点，相应在上述 6 个课题中交叉协作开展，分别承担了总计 26 个专题的研究任务。

针对部分单位参与骨干和参与承担多个课题相关内容研究的实际，项目层面还在按课题要求确定课题负责人外，对部分单位还设置了单位负责人，并在项目实施方案中报备项目业务主管部门。这些措施有力保障了本项目的顺利实施。项目在规定的 3 年半时间内全面完成（部分超过）项目任务书预定指标。

表 1 课题设置情况

Table 1 Arrangement of tasks

课题序号	课题名称	承担单位
1	堤防工程分类、信息构建与信息化管理技术研究	水利部水利水电规划设计总院
2	堤防险情演化机制与致溃机理研究	中国水利水电科学研究院
3	堤防工程安全运行风险评价理论与管理研究	河海大学
4	堤防工程风险识别和监测预警技术研究	郑州大学
5	堤防工程隐患快速探测技术与装备研发	长江勘测规划设计研究有限责任公司
6	堤防险情应急抢险修复技术及装备研发	长江水利委员会长江科学院

3 主要创新成果

3.1 堤防险情出险特征与基于工程安全的分类方法

（1）堤防险情出险特征

建立了堤防历史险情全要素统计方法，收集与整理了长江、黄河、松花江、淮河及北江 5 个流域 3664 组堤防险情资料，揭示了上述流域堤防险情特征与出险规律。图 1 为课题 1 整理的堤防历史险情全要素统计信息内容结构。典型段堤防工程历史险情数据的统计应主要包括堤防基本信息、出险点险情描述、水文信息、堤身形态、堤身地质条件、堤基地质条件、岸坡特征、微地貌和其他相关材料。图 2 给出了长江流域 1998—1999 年长江中下游干堤 3107 个历史险情统计资料。统计结果表明，长江流域堤防险情以管涌、散浸、脱坡、条崩、跌窝和漏洞为主，都超过 80 例。

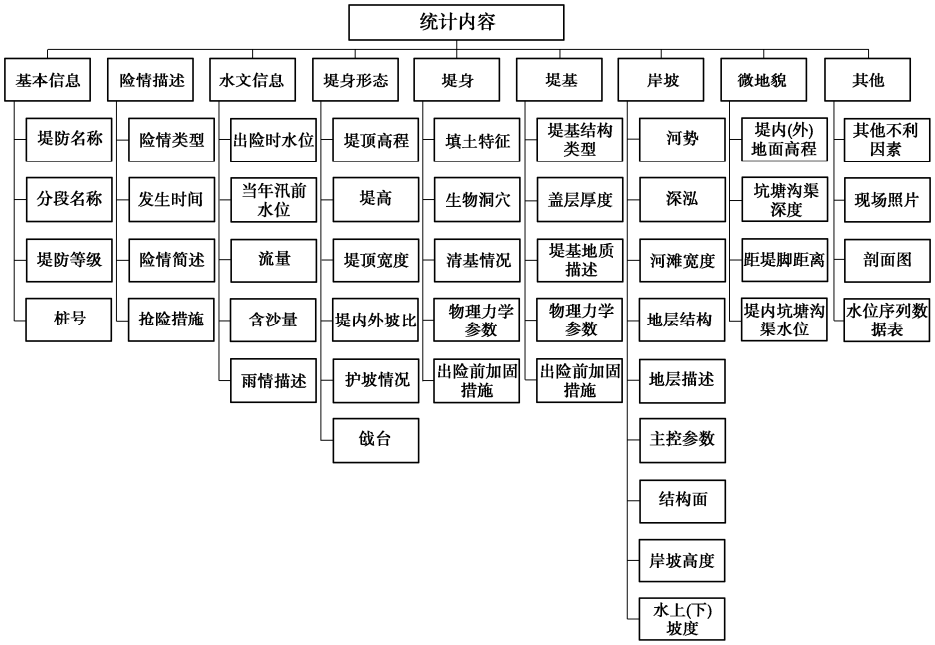


图 1 堤防工程信息统计内容

Fig. 1 Statistical content of information of dike engineering

另外，出险位置统计，堤身、堤基险情各占 46%，岸坡 5%，穿堤建筑物 3%[10]。

对流域堤防险情特征统计分析表明，因不同流域堤基地层结构、堤身土特征和堤防形成历史等方面的差异，险情出险特征也表现出相应的差异性。如长江和松花江的堤身险情，在长江流域以管涌、散浸、脱坡及崩岸等险情为主，松花江则以管涌、堤身变形与脱坡等险情为主[11-14]。

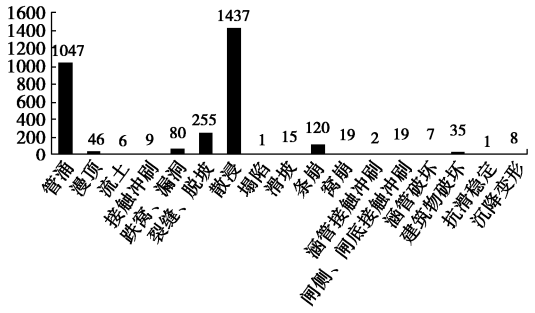


图 2 长江流域堤防险情类型分布直方图

Fig. 2 Histogram of distribution of dike risk types in Yangtze River basin

（2）基于工程安全性的堤防工程分类方法

以长江流域险情为研究对象，根据不同险情类型及形成原因，识别其主要影响因素，并采用层次分析法确定了各因素的影响权重[10,15]。分别研究了堤基管涌和散浸险情、堤身散浸与漏洞险情、脱坡险情及接触冲刷等典型险情。如对 944 个堤基管涌和散浸历史险情研究，识别出堤基地质结构等 7 种影响因素。相应影响因素及权重如图 3 所示。

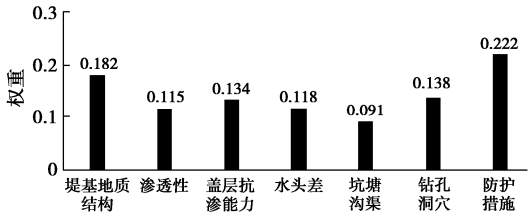


图 3 堤基管涌和散浸险情主控因素及权重

Fig. 3 Main factors and weights of dike piping and seepage risk

在上述成果基础上，建立堤防工程安全分类定量指标。该指标以安全主控因素的影响程度（权重）以及其导致险情的易发性综合确定：

$$P=\sum_{i=1}^{n}\omega_i a_i \quad 。 \tag{1}$$

式中　ω_i 为第 i 项安全主控因素权重；a_i 为第 i 项主控因素的致险特征值。如果该项安全主控因素致险性存在，则 a_i 取 1；如导致险情的几率很低，则 a_i 取 0。

通过 32 个堤防不同类型历史险情反演，确定 P 值分类区间。综合反演结果，确定指标 P 值范围为：当 $P<0.3$ 则为安全（A 类）；当 $0.3\leqslant P<0.6$ 则为基本安全（B 类）；当 $P\geqslant 0.6$ 则为不安全（C 类）。

3.2　管涌等四类险情演化规律及影响机制

采用不同尺度物理模型试验，并结合数值模拟等手段，对管涌、崩岸、接触冲刷及堤防溃决等 4 种主要险情的演化规律及致灾影响机制展开研究，在新的试验技术及机制揭示方面取得重要进展。

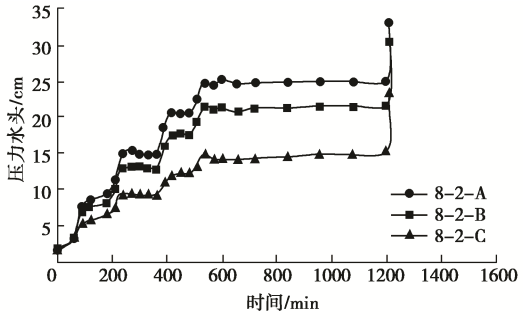
（1）堤防管涌险情演化机制研究

在细观尺度的管涌险情研究机理方面，以细颗粒

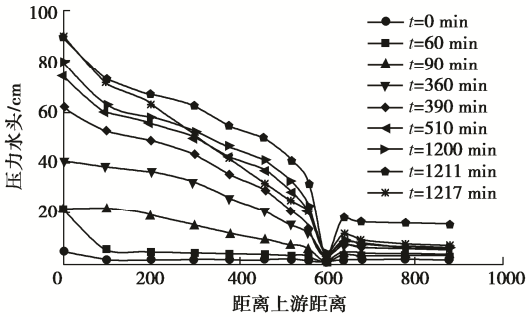
0.25～3 mm，骨架颗粒 14～15 mm 的多色模拟砂为材料，创新融合透明模型箱（15 cm×15 cm×20 cm）、激光发射器、CCD 影像、水晶珠及含荧光孔隙流体等技术，构建了细观尺度可视化管涌模型试验装置，研究基于可视化透明土技术与 PFC 颗粒流方法的颗粒渗流精细三维重构及离散介质渗流数值模拟技术，从颗粒-孔隙尺度揭示了增加颗粒之间摩擦系数、细粒含量和上覆荷载有利于土体内部稳定的规律[16-19]。

针对长江流域典型二元结构堤基，以河流粉细砂和湖底淤泥质黏土为试验模拟材料，构建中尺度（模型尺寸 0.6 m×0.3 m×0.3 m）堤防管涌演化机理研究试验模型，研究黏土与砂土界面接触关系、管涌口尺寸、距离位置等对管涌发展的影响机制。试验结果表明，上覆土层密实度和厚度越大、上覆土层与砂层接触越粗糙、距离上游越大时，管涌险情不易发展；管涌口径较小，孔口局部比降较大，一定条件下更易发生破坏[20]。

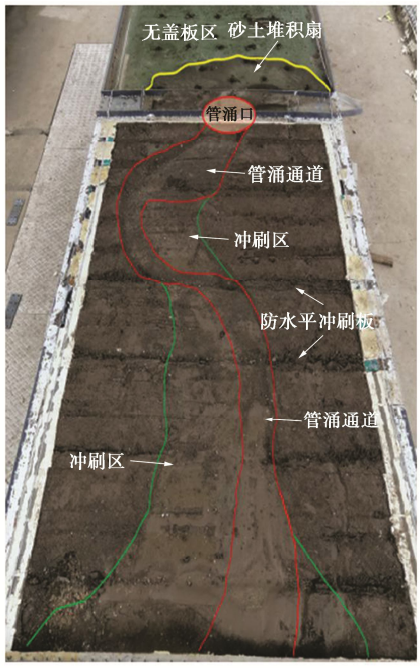
为克服管涌险情发展的边界效应问题，长江科学院团队在 10 m 级大尺度堤防管涌险情机理试验研究方面取得重要进展[10]。在长江科学院沌口试验基地构建了试验尺寸为 12.0 m×3.0 m×2.5 m 的盖板可拆换式堤防管涌物理模拟系统，并成功进行了堤防二元结构地层管涌险情演化机制全过程模拟试验，首次在大尺度范围研究和再现了堤防工程管涌险情快速逆向侵蚀—砂层掏空—上覆黏土层或堤基塌陷—致溃过程。试验系统最大试验水头 6 m，试验渗透水量抽水能力不低于 10 m^3/h。图 4 为大尺度模型试验测点压力－时间过程及管涌路径展示图。



（a）管涌口测点压力－时间过程线



（b）模型中心断面近表层压力－时间过程线



（c）管涌通道路径图

图 4 大尺度模型测点压力－时间及管涌路径展示图

Fig. 4 Water pressure vs. time of monitoring points and piping path by large-scale physical model

以 2020 年长江干堤岳阳瓦湾段管涌险情为例，利用历史资料和现场调查为基础，建立三维渗流有限元模型，对堤内减压井失效和正常运行条件下的堤内薄层覆盖砂壤土地层水力梯度变化特征进行了数值模拟研究，讨论了减压井的水力影响范围[21]。

（2）堤防崩岸机理研究

在长江多个典型历史崩岸特征与形成机制分析研究基础上，借助长江防洪大模型水沙系统，构建了静水条件下的水槽式崩岸试验模型和动水条件下的水槽式崩岸试验模型，研究静水条件单因素及二元结构弯曲河流动水作用对河流崩岸形成影响机制[22-23]。

静水条件模型试验尺寸 12.0 m（长）×1.4 m（宽）×0.54 m（深）。主要研究静水条件下河岸坡度、河岸组成、二元结构上下层厚度等单因素变化对河岸崩岸的影响。动水条件弯道型河道试验尺寸为 50 m（长）×9 m（宽）×0.87 m（深）。主要针对二元结构弯曲河岸，模拟一个水文周期内不同涨、落过程对典型河岸稳定性的影响。经对长江中游典型河段崩岸段近岸表层和下层泥沙取样分析，基于相似准则，设计二元结构河岸模型。这里，上层模型砂 d_{50} 取 0.058 mm，下层模型砂 d_{50} 取 0.2 mm。为模拟黏性土性质，部分工况上层模型砂掺 1%的环氧树脂。

研究结果表明，河岸坡比越大，上覆黏土与下层砂土的厚度比值越小，上层土砂性强时，坡体越不稳定；崩岸强度在一个水文年周期内呈现一定的规律性，枯水期崩岸最弱，涨水期较弱，洪水期最强，水位陡降期次强，水位缓降比陡降期强度明显减弱。弯道型

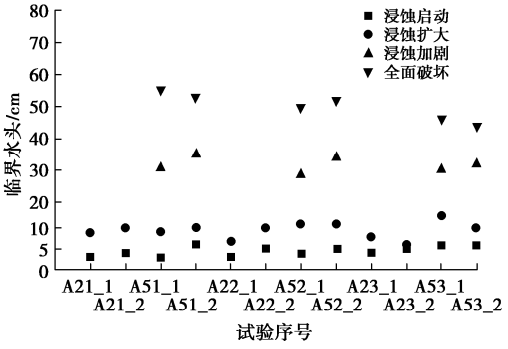
动水条件的不同模型堤内孔隙压力监测结果表明，水位陡降导致指向河道的渗透坡降显著增加；岸坡孔隙水压力随河流水位下降速率不同，表现出明显的孔隙压力消散滞后性和差异性特点[10]。

（3）堤防接触冲刷险情形成机制

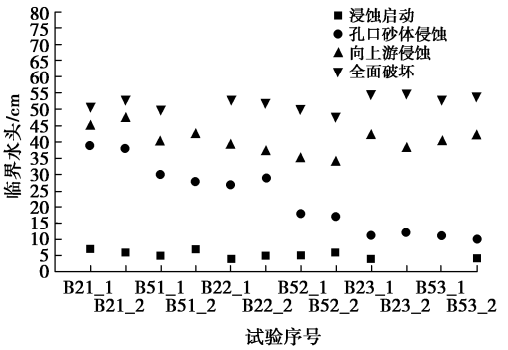
针对穿堤无压管道和穿堤有压管道两种管道水力条件，自行设计可视化接触冲刷模拟设备，以粉细砂作为主要试验材料，分别采用两种模型试验尺寸条件开展对比性试验，并结合物质点法数值模拟，研究不同的管道水流条件、管道破损尺寸及位置对土体的侵蚀过程及接触冲刷作用机制。模型试验尺寸分别为 50 cm×30 cm×20 cm 和 80 cm×60 cm×40 cm[10,24]。

在穿堤无压涵管接触冲刷机制方面，提出了险情过程可划分为无明显渗透侵蚀、渗透侵蚀启动及发展、侵蚀加剧和整体破坏等 4 个阶段，如图 5（a）。穿堤无压涵管破损位置对接触冲刷启动和发展的影响不明显，但越靠近下游，越容易引起整体冲刷破坏；在临界水头前，揭示了管内堆积砂土的反滤作用可使接触冲刷险情逐渐停止的过程机制。

在穿堤有压涵管接触冲刷机制方面，提出了险情扩展过程可划分无明显渗透侵蚀、下游出口至孔口逆向侵蚀、孔口周边砂体侵蚀、沿管底向上游逆向侵蚀和整体破坏等 5 个阶段，如图 5（b）。渗漏孔口尺寸越大越容易引起局部侵蚀破坏，但渗漏孔口位置则影响较小。



（a）无压涵管



（b）有压涵管

图 5 不同阶段临界水头分布图

Fig. 5 Distribution of critical head in different periods

（3）堤防溃决机理

中国水科院团队首次建成了室内最大尺度的大型堤防瞬时溃堤和漫顶溃决模型试验与综合监测系统。试验模型河道长 50 m，宽 5 m，泛洪区面积 208 m^2。模型监测系统包括流量监测、水位计监测、流速监测、表面流场、溃口流场及水面形态测量及溃口地形测量等内容。基于建设的模型试验系统，开展了堤防瞬时溃堤和漫顶溃决条件下的模型试验。试验最大流量为 1.6 m^3/s[10, 25]。

基于模型试验，揭示了瞬时溃决溃口段河道及洪泛区水流运动规律以及土堤漫顶溃决溃口演化过程特征。图 6，7 分别为漫顶溃决试验中某试验组次溃口流量过程特征曲线与不同组次溃口展宽过程特征曲线。

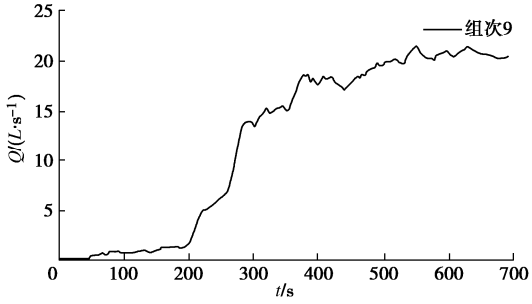


图 6 溃口流量过程曲线

Fig. 6 Curve of flux vs. time of dike breach

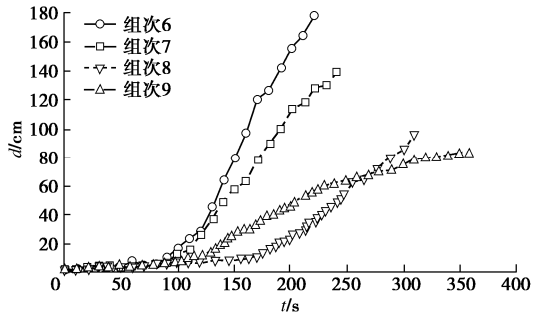


图 7 溃口平均展宽过程曲线

Fig. 7 Curves of average width vs. time of dike breach

3.3 堤防工程安全运行风险评价理论

（1）堤防工程典型失效模式下的概率分析

以随机力学理论为基础，针对堤身与地基土黏结力 c、内摩擦角 φ、土体弹性模量 E、堤身与地基土渗透系数 k、洪水水位 H 等参数的变异性，研究边坡失稳、渗透破坏、堤身漫溢破坏等典型失效模式下的概率计算方法，并取得相关理论研究成果[10, 26-29]。

a）提出了基于正交试验−神经网络的堤防边坡失效概率计算方法[26]。针对堤防失稳非确定性问题，以土体黏结力 c、摩擦系数 f 和弹性模量为随机变量，以 BP 神经网络训练模型代替边坡抗滑稳定的功能函数，

结合正交试验和非线性数值模拟获取试验样本点和样本点试验值，利用蒙特卡洛法对随机变量抽样计算，获得边坡抗滑稳定失效概率。

b）提出了基于 MBHDE（黑洞与差分优化的混合优化算法）最危险滑面概率计算方法[28]。在堤防边坡失效概率计算方法方面,最危险滑面搜索是堤防边坡安全分析的关键，可转化为计算边坡某个给定滑面可靠度及寻找所有滑面可靠度最小值的组合优化问题。提出了改进的黑洞与差分进化的混合优化算法。

c）提出了堤防工程渗透稳定性概率评价计算方法[10, 29]。考虑堤身、堤基土体渗透系数变异性或空间变异性，以渗透系数作为随机场变量，采用转动带法和蒙特卡洛方法研究了典型堤防断面的渗流场分布及渗透稳定可靠性及堤防渗透破坏概率。

d）堤身漫溢水位风险概率计算[10]。当河流水位高于堤防堤顶时认为发生漫溢，堤防必然发生漫溢破坏，此时水文下的水文风险概率为 1.0。当水位低于堤顶高程时，认为一定不会发生漫溢破坏，即认为次风险下的水文风险概率为 0。假设水位频率曲线函数为 f(h)，则堤防发生漫溢失事的水文风险概率为

$$P_{\text{f水文}} = \int_{h_1}^{\infty} f(h)\,\mathrm{d}h \quad , \tag{2}$$

式中，$P_{\text{f水文}}$ 为堤防漫溢风险概率，h_1 为堤顶高程。

（2）堤防工程失效综合分析概率计算

影响堤防安全运行的因素众多，这些因素往往存在很强的不确定性和随机性。在进行堤防风险概率求解时，应综合考虑各种失效概率模式对整个系统的风险贡献，这里用系统综合风险概率来描述。河海大学团队提出了利用故障树分析法实现对各失效模式及其失效后对系统的影响进行辨识的研究思想，如图 8[10]。故障树中的“逻辑或”运算符的功能相当于多个事件的串联系统。如果系统中任何一个事件的出现，则整个系统会失效。根据串联系统的失效概率计算公式，可获得堤防系统的综合失效概率计算公式。

（3）堤防工程运行风险评价与控制标准

根据风险的定义，堤防的风险可视为堤防失事的概率与堤防失事造成后果的乘积。根据失事概率和失事后果的综合影响程度，利用风险评价矩阵分析法，提出了基于风险的堤防安全等级划分标准。如表 2，可将堤防安全等级划分为 4 个不同等级，1～4 为蓝色等级，安全风险小，可按日常管理方式进行；5～9 为黄色等级，有一定的安全风险，可在一定的管理和控制条件下运行；10～12 为橙色风险，安全风险较大，需加强管理，详细评价，减少风险；15～20 为红色等级，安全风险大，需采取加固措施或防范风险的措施[10, 30]。

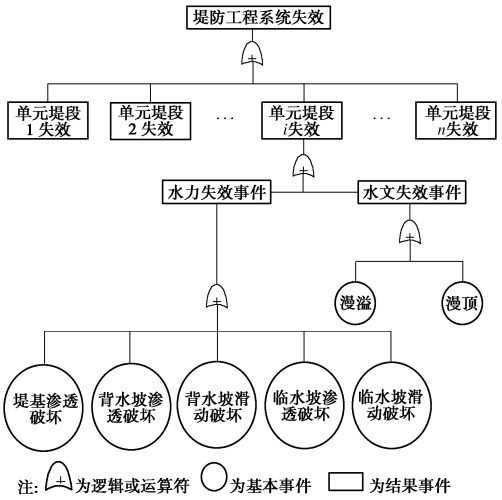


图 8 堤防系统失效的故障树模型

Fig. 8 Fault tree model for failed dike system

项目还提出了基于 ALARP 原则的堤防运行安全风险评价标准。基于 ALARP（最低合理可行性原则）原则，采用历史统计法和横向对比法，并结合归一化方法和各损失类型的权重建立了考虑堤防失事生命损伤、经济损失、社会与环境损失的堤防工程各级综合风险评价标准，如图 9[10]。

表 2 基于风险的堤防安全等级标准

Table 2 Safety grade standards for dikes based on risk

失事概率		失事后果				
概率	定性描述	轻微	一般	轻严重	严重	极其严重
0.001	不可能	1	2	3	4	5
0.010	极少	2	4	6	8	10
0.500	有时	3	6	9	12	15
0.990	非常可能	4	8	12	16	20

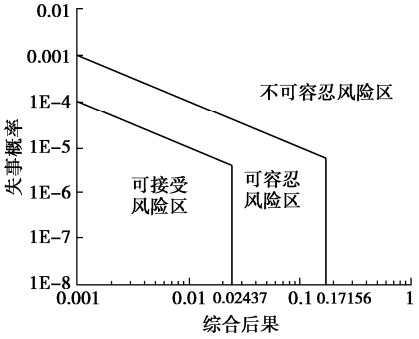


图 9 堤防失事综合损失可接受标准风险曲线

Fig. 9 Acceptable standard risk curve of general loss of dike

（4）堤防工程风险管理方法研究

建立堤防工程保护区评估指标和灾害损失预测模型。提出一种基于数据场 K-means 聚类的洪涝灾情分级方法，建立了基于场景感知的洪涝灾害应急情景模型，提出了基于多方参与式的堤防风险防控与应急管理体系的建议[30-33]。

3.4　堤防工程智能化监测技术

堤防工程线路长，对其安全性影响涉及方面与因素多。与水利水电枢纽等区域集成性较高的工程相比，监测技术难度相对较大。很难依据传统的监测思想，通过沿线埋设各种监测传感器等技术思路实现。构建堤防工程大范围整体信息采集与重点区域精细化采集相结合的“天-空-地-水”一体化监测与分析体系，是解决堤防工程安全监测瓶颈问题的重要方向。项目以堤防工程地表特征要素等基础工情、水文信息、崩岸险情及工程安全巡检等智能化监测需求，开展有针对性研究工作，取得多项应用性较强的科研成果。

（1）堤防基础工情多源信息快速采集与分析技术

基于卫星遥感技术、无人机航拍技术、激光雷达技术、GPS 高精度测绘技术等现代信息采集技术的研究，提出了依据不同的采集手段从不同采集尺度（高空、低空、近地表）和采集范围实现堤防基础工情多源信息的快速综合采集技术策略，研究了相关智能化信息处理技术[10]。

以长江荆江河段堤防大尺度监测为例，研究了基于雷达卫星影像的堤防工程监测与信息提取技术。基于永久散射体合成孔径雷达干涉测量（PS-InSar）技术的研究及 Sentine1-1A 雷达卫星多时序数据分析，获取了示范河段堤防一个水文年度的相关地表变形规律[34]。

将机载激光测量系统（机载 LiDAR）技术应用于堤防低空及近地表测量。依据 LiDAR 点云数据，形成 1 m 高分辨率 DTM 数值地面模型。提出了基于机载 LiDAR 提取堤防工程特征信息圆环探测法，实现了堤防中心线及断面形态等特征信息的智能提取与检测[35]。

（2）基于水雨工情的堤防综合监测体系构建

研发了适用于堤防高危河段的流速、水位及降雨等多要素感知与控制终端设备，突破汛期复杂环境下水雨工情 24 h 实时监测难题，实现堤防险工险段水位、流速、雨量等关键要素的自动实时采集、传输、储存及远程维护[10]。

集成三维激光扫描仪、水下多波束测深系统、雷达、GNSS、惯性导航系统、全景相机、测量平台及配套的数据采集软件，形成了堤防水陆一体化的堤防崩岸船载立体测量系统，实现了复杂环境河流崩岸等险情边界探测的高效率和高精度测量，且测试不受气候天气和时间的限制。采集空间分辨率由常规的 1∶2000 比例尺 400 m^2/点提高至 1 m^2/点以上，观测速度提高达 1 倍以上[36-38]。

构建了基于“互联网+”的智能移动终端堤防工程安全巡检快速采取系统，实现堤防异常情况及运行状态评判的快速采集与反馈[10]。

3.5　堤防工程险情信息构建、识别及预警平台

（1）堤防工程全寿命周期数据库构建

自 20 世纪 90 年代以来，中国堤防工程数据库的研究与开发有了很大的发展。迄今为止，国内各大流域均已建成堤防数据库或基础数据库管理系统。传统的堤防数据库多以关联数据库为主，不能处理非结构化的数据，扩展性能差。云计算技术的发展和社会对大数据的需求为非关联性数据库带来了新的机遇。云计算所处理的海量数据使传统的 RDBMS（关系型数据库）的性能瓶颈日益突出。海量的多格式、多类型、多尺度、跨地域的堤防工程基础数据，形成了一个分布式的、异构的、跨部门的资源类型多样的数据库群。如何将堤防基础大数据与现代网络、云计算、物联网及人工智能等新技术相结合，对其进行科学的挖掘与利用，提高数据服务水平，具有重要的研究价值。

针对堤防工程运行过程中的险情识别与监测预警需求，项目提出了堤防工程全寿命周期基础数据库的构建思想，研究了堤防工程泛结构化大数据特征、堤防工程数据标准化、堤防工程各类结构化数据和非结构化数据动态管理过程中的数据清洗技术以及堤防工程泛结构化数据信息集成与管理技术等内容，并选择长江荆南干堤进行了示范应用研究[10]。

在数据标准化研究方面，从堤防工程涉及的工程、水文气象、人文经济、地理、地质、物探、险情及监测数据 8 个方面开展了堤防数据标准化研究。提出了堤防数据标准化包含的 3 部分内容：结构化数据标准化；非结构化数据标准化；数据入库与清洗。通过数据分类、数据编码及表设计 3 个步骤，可对结构化数据进行标准化；利用 JSON 描述文档的关键信息，将带有文档属性的 JSON 连同文档一起存入数据库，可实现非结构化数据标准化；通过统一接入和动态配置的数据接入和清洗方法，提高数据清洗的兼容性。图 10 为堤防工程数据结构分类图[39]。

在数据清洗技术研究方面，提出了相似重复数据检测的优化算法及基于流式计算的数据清洗框架[40-41]。

（2）堤防工程管涌险情辨识方法

针对堤防工程最典型的管涌险情识别问题，项目承担单位河海大学团队、郑州大学团队及长江科学院团队等研究力量对管涌险情识别分别从不同视角开展了研究工作，并取得了重要进展，分别提出了堤防工程管涌破坏主客观权重安全评价方法，堤防管涌险情深度置信神经网络（DBN）预测模型及基于致溃程度的管涌分类等方法[10]。

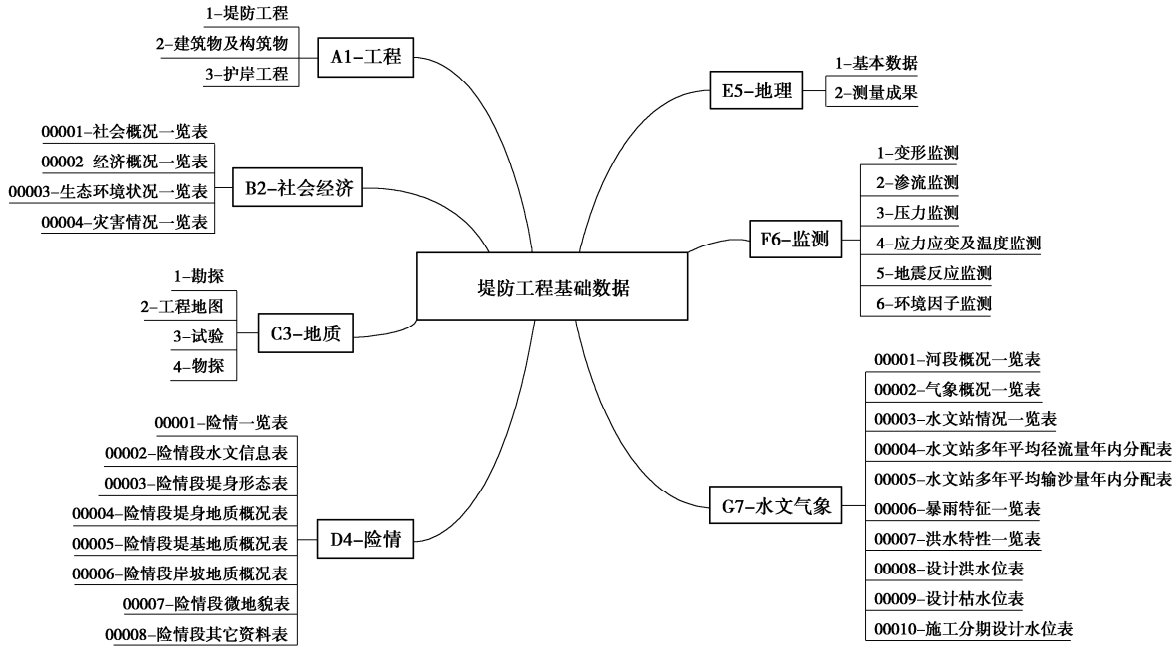


图 10 堤防工程数据结构分类图

Fig. 10 Classification of data structure of dike engineering

表 3 管涌致溃型评价指标及赋值

Table 3 Evaluation indexes and values of piping danger

因素		指标及赋值		指标取值			
管涌距堤身距离/m	参数值	0	0～50	50～100	100～200	200～500	>500
	赋值	10	9	7	5	3	1
管涌规模	参数值	直径大于 1 m 或管涌超过 10 个	直径大于 1.0～0.5 m 或管涌 5～10 个	直径 0.5～0.2 m 或管涌 3～5 个	直径 0.02～0.5 m 或管涌 2～3 个	直径小于 0.05 m	
	赋值	10	7	5	3	1	
管涌含沙量	参数值	含沙量大，有增加趋	含沙量大，平稳	含沙量较小变弱趋势	含沙量减小至清水	一直清水	
	赋值	10	7	5	3	1	
堤外水头	参数值	持续快速上涨	持续缓慢上涨	平稳	缓慢下降	快速下降	
	赋值	10	7	5	3	1	
堤内水头	参数值	持续快速下降	持续缓慢下降	平稳	缓慢上升	快速上升	
	赋值	10	7	5	3	1	
堤身质量	参数值	无等级堤防；堤身为砂性土，缺陷明显	5 级堤防；堤身为砂性土，缺陷明显	4 级堤防	3 级堤防	1～2 级堤防	
	赋值	10	7	5	2	1	
堤基条件	参数值	砂性堤基	黏土厚度小于 5 m，下层为砂性土	黏土厚度大于 5 m，下层为砂性土	黏土堤基	基岩堤基	
	赋值	10	7	5	2	1	
已有工程措施	参数值	无工程措施	局部除险加固或工程措施失效	堤身或堤基除险或减压井施工	全面除险加固		
	赋值	10	7	5	1		

a）堤防工程管涌破坏主客观权重安全评价方法。针对堤防工程管涌破坏模式的识别，首先从地质、水文、加固措施和历史险情等方面提出 4 个方面 9 个指标体系，经评价指标的归一化处理，分别从渗透稳定力学分析及专家评判等途径研究各类指标的敏感性及影响权重，最后建立主客观融合模型，并对堤防管涌破坏的安全性进行分级与评价[10, 42-43]。

b）堤防管涌险情深度置信神经网络预测模型。依据 193 组长江等堤防历年管涌险情数据，选取水位高度、弱透水覆盖层厚度、允许比降、渗透系数及孔隙比 5 个主要因素，以神经网络非线性分析为手段，提出了管涌险情的深度神经网络（DBN）非线性智能化识别方法[10]。

c）从堤防管涌险情对堤防工程危急程度角度出发，提出了致溃型管涌概念和基于致溃程度的管涌分类评价方法，避免无害管涌等类似简单定性概念可能

造成的偏差。表 3 为管涌致溃性评价指标体系及赋值。根据管涌致溃性赋值分值，可将管涌致溃性程度分为非致溃型管涌（1～3）、弱致溃型管涌（4～5）、致溃型管涌（6～7）和强致溃型管涌（8～10）等 4 种类型[10]。

（3）堤防工程综合信息化管理与预警系统

基于自主知识产权的三维 GIS 平台，设计和开发了堤防工程信息管理系统，实现了与堤防工程全寿命周期数据库、堤防工程智能化采集信息的集成，并通过流场图、等值线、体渲染、时间轴控制等技术，实现了三维表达和集成管理。

形成了集安全分析、评估和预警等子系统于一体的堤防工程综合安全管理系统的总体架构设计方法，建立了堤防工程稳定性分析、险情评估及预警等各功能模块与总系统之间的链接与嵌入技术，提出了接口标准，并进行了各模块的开发和整合[10, 44-45]。

3.6　堤防工程隐患快速探测技术与装备

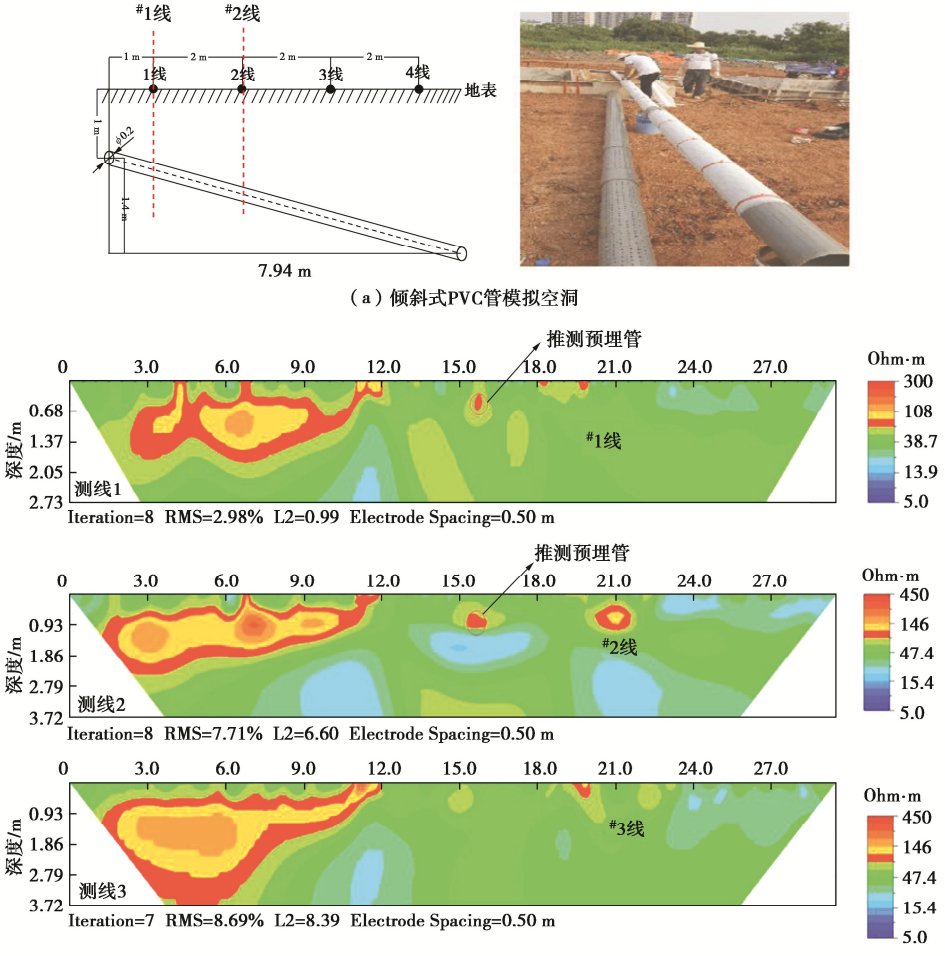
（1）MD-12 型大阵列时移电法堤防隐患远程智能探测设备研制

为解决低可探物理背景下的堤防隐患探测难题，从时移电法测试理论出发，基于时间和空间的探测策略，设计与研发出大阵列固定式电法时移远程智能探测设备（MD-12），可并行采集 12 通道数据，集高密度多装置交换（15 种装置排列类型）、远程通信与物联网智能控制于一体[46-48]。

基于研制的 MD-12 设备在预埋的倾斜式 PVC 管空洞模型上进行了验证性测试，并与传统的 WDJD-4 高密度电法仪测试结果进行了比较。预埋的 PVC 管管径 20 cm，下倾 10°，#1 测线和#2 测线埋深分别为 0.8，1.1 m。高密度电法测试点距均为 0.5 m。对比测试结果表明，传统高密度电法仪能识别#1 测线（径深比 1∶4），而新研制的 MD-12 型电法装备可以识别至#2 测线（径深比 1∶5.5）下的空洞（图 11），表明 MD-12 型装备相对传统测试方法，测试精度显著提高。

（2）堤防渗漏通道 MMS-1 型弱磁探测仪研制

磁电阻率法（magnetomatric resistivity，MMR）是基于地质异常体与环境介质电阻率的差异性，通过测量人工源非感应电流激发的弱磁场（一般小于 5nT）的分布规律，以实现地质异常体勘查目标的一种地磁勘探法。Edwards 等[49]首次从理论和现场测试介绍了



（a）倾斜式PVC管模拟空洞

（b）相应剖面电阻率二维影像图

图 11　MD-12 研制设备测试结果

Fig. 11 Test results of MD-12 equipment

利用 MMR 法开展地质断层异常体探测的研究结果。Kofoed 等[50]介绍了应用 MMR 技术开展堤坝渗漏通道探测研究成果。项目针对堤防渗透通道的有效探测问题，长江科学院团队自主研制出基于 MMR 的堤防渗漏通道 MMS-1 型弱磁探测仪，如图 12。基于物理模型试验和现场测试等途径，对该探测仪的探测效果进行了测试验证。



图 12 MMS-1 型弱磁探测仪

Fig. 12 Weak magnetic detector MMS-1

该装备在堤防表面通过非接触方式探测由人工源构建的渗漏通道内电流引起的磁场异常分布，实现对渗漏通道位置的识别。设备由激励信号发射机、磁场测量系统及供电电极等构件组成。采用相位锁定等方法实现强干扰环境中的弱磁信号检测。系统测试分辨率可达 0.01 nT。设备具备三分量磁场自动测试、存储和无线传输等测试功能[10]。

（3）堤防专用移动式瞬变电磁探测仪

为实现堤防隐患快速探测目标，基于瞬变电磁法探测技术原理，长江科学院团队设计和研发出快速移动式堤防隐患瞬变电磁连续采集探测系统，通过采集 x，y，z 3 个方向的磁场信号，实现堤防隐患的快速探测。该系统包括免磁感应移动载具及设置在移动载具上的瞬变电磁仪、发射天线、接受天线及移动端采集控制软件等，电磁数据采样频率为每 1.2～1.6 μs 一次，设备移动速度可根据沿堤线探测的密度和精度要求确定[10, 51]。

3.7 堤防险情应急抢险技术与装备

（1）管涌险情抢险技术与装备

针对减压井淤堵引起的管涌险情，研制了可快速安全清洗的应急洗井装备，实现了汛期减压井快速安全疏通[52-53]。

针对管涌抢险传统沙袋围井式抢险技术中物料短缺及时效性低的问题，发明了一种一体式及组装式充水围井（图 13），大幅减少了物料需求，提高了管涌抢险效率。针对汛期减压井淤堵减效或降低地层渗透水压应急抢险需求，提出了非钻植入式减压管思想（图 15），联合组装式充水围井等便携式水压力平衡装备，有望实现汛期采用减压井对管涌险情进行快速抢险[54-55]。



图 13 组装式充水围井

Fig. 13 Assemble water impounding well structure

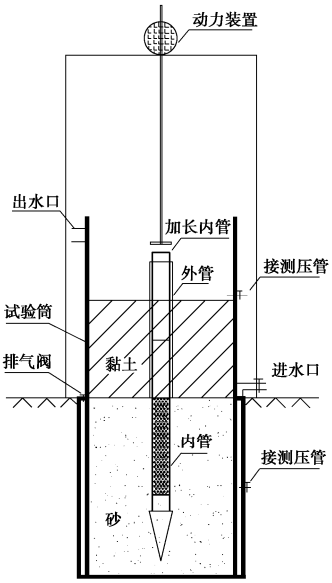


图 14 植入式减压管结构

Fig. 14 Structure of inserted relief pipe

（2）堤防溃口处置技术与装备

针对堤防溃口等险情快速植桩需求，研发了适用于堤防综合抢险的便携式液压激振锤植桩装置。该液压激振锤主要参数：质量为 1.2 t，可配套小型挖机动力使用；高度为 1.5 m；振动频率为 2000 r/min；桩直径 100～200 mm[10]。

针对溃口冲击力大，抛投料流失率高，堵口物料的储备与运输等对险情位置环境依赖性强的特点，提出了在溃口前沿用主动式桩轮混合消能装置消能降速、以构件储存成品化形成的组装式透水消能四面体为堵口基本材料构件的堤防联合堵口技术思想，设计与研制了样品构件，并进行了水槽验证试验，如图 15，16[10, 56]。



图 15 主动式桩轮耦合装置

Fig.15 Active devices of coupling pile and runner



图 16 组合式透水四面体构件

Fig. 16 Formulation of combined pervious tetrahedron

（3）重力和水力展布式崩岸大布快速抢险技术与装备

针对黄河崩岸抢险中大布铺设贴合性较低问题，河南黄河河务局团队利用长管袋重力或泥浆水头压力推展铺设土工大布，研究了泥成分与浓度对泥浆流动性影响，以及大布压重和水下滚动展铺同步控制技术，形成崩岸快速抢险成套技术和装备，如图 17[10]。

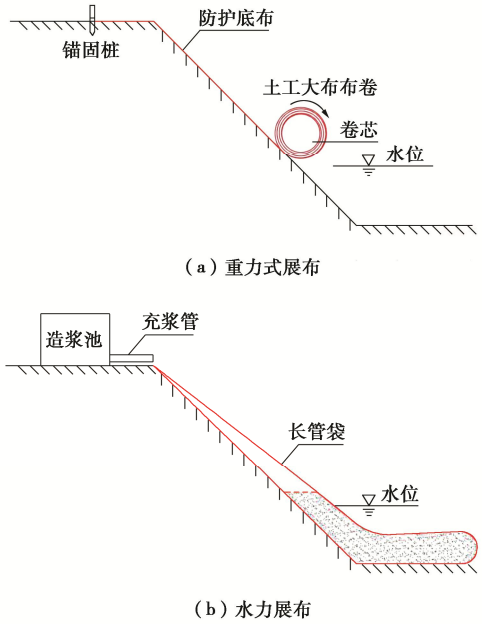


图 17 崩岸大布快速展布护岸技术

Fig. 17 Quick revetment technology by large-sized geotechnical cloth for rescue of bank collapse risk

（4）堤防隐患快速修复技术与装备

针对堤防隐患快速精准修复技术问题，郑州大学团队围绕堤防高聚物注浆工艺与技术重点在以下 3 个方面展开攻关，形成了堤防微创修复高聚物注浆成套技术与装备[10,56]。

a）将 DPM(drilling processing monitoring)技术应用于堤防土体质量的随钻监测，实现堤身与地基土体性能潜在隐患空间位置的快速随钻评价。

b）研发了钻孔大深度高聚物导管注浆技术与装备。针对高聚物易堵塞注浆管的难题，研发了可快速组装的长距离高聚物保压混合装置，搭接了冲放式保压水囊，形成了钻孔大深度高聚物导管注浆与反压复合技术。

c）研发了锁结式高聚物薄防渗墙建造技术与装备。针对传统高聚物超薄防渗墙受地质影响大、防渗搭接效果不好的问题，研究利用成墙板锁结耳保证高聚物孔模的搭接，形成锁结式高聚物超薄防渗墙快速成墙装置与技术，如图 18。

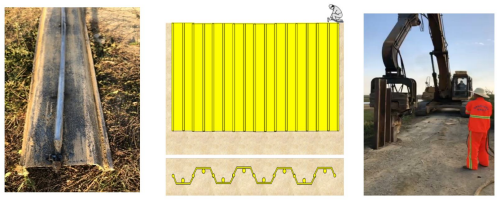


图 18 锁结式高聚物超薄防渗墙技术与装备

Fig. 18 Technology and equipments of locked polymer anti-seepage wall

4　成果示范应用情况

4.1　堤防渗漏通道弱磁法探测现场应用

（1）基本情况

2020 年 7 月，江西鄱阳湖发生特大洪水，多个圩堤出现管涌、散浸及脱坡等险情，局部圩堤甚至出现漫堤溃决。7 月下旬，在江西鄱阳湖余干、鄱阳县等县防汛应急相应在 I 级状态条件，本项目团队深入防汛现场进行调研，并开展现场测试工作。应用研制的 MMS-1 型渗漏通道弱磁探测仪进行余干县古埠联圩堤段管涌险情测试就是其中一例。

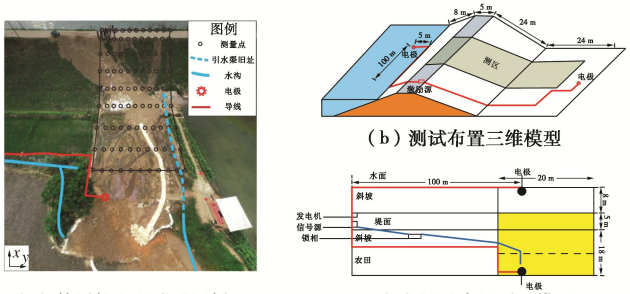
古埠联圩堤段管涌是当年余干防汛期间发生的比较严重的险情。现场勘察发现，管涌口出口在堤内坡脚以外 20 余米部位，且有多处渗水。据当地防汛人员介绍，该部位堤段曾经是一个引水闸门旧址所在地。查明该管涌部位的主要渗漏通道的分布特征,对管涌的处置具有重要作用。

（2）技术应用效果

研究人员按照弱磁探测仪的测试技术原理，在现场进行了相应的测试。图 19（a）为该堤段管涌现场航空照片及弱磁法测量激励线和电极布置方案。根据堤防实际情况，在图 19（b）的测区范围内平行于堤防方向设置了 9 条测线，每条测线 11 个测点，测点与测点之间的间隔为 2 m，测线与测线之间的间隔为 6 m。另外，有 2 条测线实际设置了 15 个测点。因此，本次试验共设置了 107 个测点。

图 20（a）为消除了局部激励导线干扰和堤防地形正常场电极效应影响后的地面磁场异常比率响应图。从图中可以看出，有两个数值较低的区域 a 和 b，代表电流密度的分布在这两个区域较小，即这两个区域的电导率较小，且实际中这两个区域无管涌或

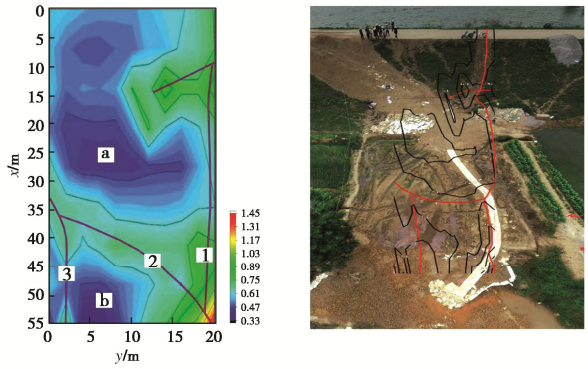
排水沟。相比于这两个低电导率的区域，图中数值较高的区域代表了高电导率的区域，连接这些高电导率的区域，得到了 3 个主要的电流路径，图中标注 1，2，3 为推断的管涌通道。



（a）管涌航空照片及图例 （b）测试布置三维模型 （c）测试布置平面模型

图 19 管涌位置及弱磁法测试布置

Fig. 19 Location of piping risk and test arrangement by weak magnetic detection



（a）磁场异常比率响应图 （b）弱磁探测结果解译图

图 20 管涌弱磁法探测结果图

Fig. 20 Detected results of piping path by weak magnetic method

将推断的管涌路径绘至对应航拍影像图，得到管涌解译推断图，见图 20（b）。如图 20（b）所示，路径 1 与引水渠旧址一致，并且水流汇入图中右下角的排水沟，这也对应于图 20（a）右下角的高数值区域。图 19（b）中电极放置在渗漏出水口。在图 20（a）中也反映出渗漏出水口周围的一个高数值区域，渗出的水来源于路径 2 和路径 3。

该应用实例表明，项目研制出的基于 MMR 的弱磁探测仪在堤防等岩土工程渗漏通道探测方面具有较好的推广应用前景。

4.2 减压井淤堵综合应急洗井技术应用示范

以湖北阳新长江干堤为例，介绍减压井清洗技术的应用效果。

（1）基本情况

阳新长江干堤由海口江堤和富池江堤组成，堤线长 31.5 km。1998 年洪水后，对阳新长江干堤进行了除现加固，加固后海口江堤达二级堤防标准，堤线长 24.33 km。针对长江二元地层结构特点，减压井技术因在汛期可实时消杀地层承压水头、占地面积小、具有自流特性等优势，是长江堤防除险加固的重要措施。在 1995 年至 2001 年间，在该长江干堤堤内共建 164 口减压井，其中，2001 年国家关于长江隐蔽工程专项治理中在桩号 K18+740 至 K27+210 的 8.47 km 内建设了 118 口减压井，减压井结构如图 21 所示。

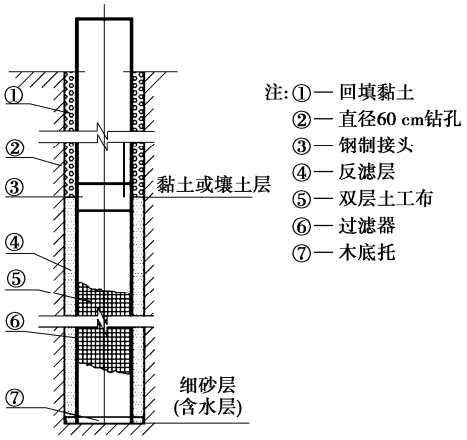


图 21 减压井结构示意图

Fig. 21 Structure of relief well

减压井工程运行经验表明，在减压井建成初期，减压井排水减压效果很明显，但随着时间的推移，减压井运行受到机械淤堵、化学淤堵等多方面因素影响，井管过滤器段产生淤积，汛期减压井出水量逐渐减小，降低了减压井的渗控效果，甚至失效。

根据对阳新长江干堤已运行 20 余年的 107 口减压井现场调研统计结果表明，对设计井深 18.0～30.0 m 的减压井，被填土覆盖或实测井深在 10 m 深以内的减压井共计 33 口，占比 31%。多数减压井测井深度明显小于设计井深，大部分保护井井池内壁留有的洪水痕迹明显高于管口高程，表明汛期或雨季减压井曾发生过倒灌现象。

（2）技术应用与效果

项目在该段选取 9 口减压井开展洗井示范研究。选取的示范减压井均为 2001 年组织实施，井间距 20～30 m，井管直径 300 mm。

首先针对井内淤积情况进行清淤处理。针对井内淤积的大量细砂及小石渣，采用空压机清淤技术将细颗粒砂土随井水抽出。针对人为抛掷井内的砖块、石头等块状物体，采用机井抓锥技术掏取。

减压井清淤后，利用轻型活塞洗井、高速射流循环喷射洗井及抽水大降深洗井等技术及其组合实施对减压井的洗井。轻型活塞洗井可在兼顾管壁强度条件下，基于活塞的运动形成的真空负压和水力冲击，清洗管壁，可选择低负压、多频次方式。高速射流循环

喷射洗井是在高水压作用下形成冲刷管壁的射流，通过破坏管壁上的泥皮、扰动管外虑料，达到清洗目的，采用短时长、小流速和大流量方式。抽水大降深清洗是通过井内抽水，形成漏斗，增大含水层水力梯度，达到疏通含水层目的。

联合采用轻型活塞洗井、高速射流洗井及抽水大降深洗井 3 项技术对现场 9 口减压井依次进行洗井试验。根据洗井前后的抽水试验结果，以单位降深流量 q 和导水系数 T 的试验值进行对比。表 4 为上述减压井抽水试验结果。

根据表 4，洗井后单位降深流量和导水系数有不同程度提高，较洗井前 q 提升 1.2～5.4 倍，T 提升 1.1～5.0 倍，表明应急综合洗井技术的应用成效显著。

表 4 减压井洗井前后渗透性对比表

Table 4 Permeabilities of relief well before and after well flushing

井编号	洗井前		洗井后	
	q /($m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$)	T/($m^2 \cdot d^{-1}$)	q /($m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$)	T/($m^2 \cdot d^{-1}$)
J#57	0.92	3.46	5.00	17.28
J#59	0.89	6.05	2.68	12.10
J#60	1.60	12.96	3.61	25.06
J#61	3.74	25.92	4.32	28.51
J#63	2.27	13.82	3.76	29.38
J#64	6.22	27.65	8.51	45.79
J#65	3.42	25.92	8.39	45.79
J#66	1.23	13.82	4.71	44.06
J#67	3.53	21.60	6.20	33.70

如果按照减压井清洗前单位降深流量大小分别进行分类效果分析，进一步可说明上述技术对于淤积严重的减压井效果更好。按洗井前减压井单位降深大小将减压井划分四类：大于 4 $m^3/(h \cdot m)$、2～4 $m^3/(h \cdot m)$、1～2 $m^3/(h \cdot m)$和小于 1$m^3/(h \cdot m)$。按上述 4 类减压井效果分别统计，第一类，主要有 J#64 井，洗井后出水效率略有提升，单位降深流量增大 36.82%；第二类，主要有 J#61、J#63、J#65、J#67 四口井，洗井后平均单位降深流量增大 75.53%；第三类，主要有 J#60 和 J#66，洗井后平均单位降深流量提升 3 倍，单位降深流量分别恢复至 3.61，4.71 $m^3/(h \cdot m)$，这类减压井清洗有效性很大；第四类，主要有 J57#和 J#59，清洗前淤堵严重，排水减压效果差，经过洗井之后单位降深流量明显提升，增加 3～5 倍，对这类减压井进行针对性清洗，可迅速提高减压井排水能力。

在 2020 年 7 月长江发生高水位洪水期间，上述洗井后的减压井出水状态良好。

4.3　高聚物精准修复技术应用

以新型锁结式高聚物超薄防渗墙建造技术在江西东风联圩中的应用为例介绍该技术的应用示范情况。

（1）基本情况

东风联圩工程位于都昌县东南部土塘水北岸，赣江入湖尾闾地区，滨临鄱阳湖。该圩堤建设于 20 世纪 60 年代。堤顶高程 21.33～23.28 m，主坝堤顶宽度为 5.0～6.0 m，迎水坡坡比一般 1∶2.5～1∶3.0，背水坡坡比一般 1∶2.0～1∶2.5。现状防洪能力 5 a 一遇。

该堤段主要问题是，堤身单薄，部分堤段的堤顶高程、堤顶宽度、堤身坡度达不到设计要求。因历史原因，该类堤防工程堤身填筑质量总体不好，部分堤段在汛期高水位阶段时堤身堤基渗漏严重。为此，针对某试验段开展了新型锁结式高聚物防渗墙加固试验性研究。

试验选点为珠光联圩的一段险情段，该段在 2019 年 7 月汛期发生过管涌险情，桩号为 0+416—0+450。

试验前为查明该堤段险情特征，采用高密度法对该处进行了检测，以确定疑似的渗流通道位置。共在迎水坡面和背水坡面布置了 2−d 测线进行测试。测试结果表明，该堤坝整体电阻率偏低，整体电阻率值在 80～160 Ω·m。在水平位置 3～9 m 的范围，地面之下 0.5～2.5 m 的区域内，整体电阻率偏高，电阻率值在 300 Ω·m 左右，在水平位置 9～28 m 的范围，地面之下 0～3 m，整体电阻率偏低，整体电阻率值在 60～150 Ω·m，判断低阻区为疑似渗漏通道。

（2）技术应用与效果

根据高密度电探测结果选择在水平位置 6～24 m 进行防渗加固，沿堤坝轴向使用高频振动方式压入成槽板。第一块成槽板压入之后，再接着压入第二块成槽板，两成槽板间锁扣连接，第三块成槽板压入后，对第一块成槽板进行提升注注浆，这样沿需加固堤坝轴线依次交替连续进行施工，如图 18。依此工艺建设的高聚物防渗墙厚度为 2 cm，防渗墙成墙深度为 8 m。

防渗墙施工完成 2 d 后，同样采用高密度电法在加固断面部位对高聚物防渗墙加固效果进行了检测。结果表明，在注浆加固后，堤坝加固部位电阻率明显提高。与注浆加固之前的探测结果相比，堤坝电阻率值从 150 Ω·m 左右提升到 200 Ω·m 左右，在水平位置 0～12 m 处，深度 0.5～5 m 的范围内，电阻率值提升至 500 Ω·m 左右，整体注浆加固效果明显。

4.4　其他技术的应用示范情况

项目提出的堤防工程全寿命周期基础数据库构建方法及堤防工程信息管理与安全评价预警系统，以荆南长江干堤为例进行了示范应用。

土工大布快速抢险崩岸险情技术在黄河下游左岸濮阳县境内焦集段—寨河段进行了示范应用，如图 22。



（a）试验段河势条件 （b）岸坡压护效果

图 22 黄河河岸土工大布快速抢险

Fig. 22 Quick rescue by large-sized geotechnical cloth in dike of Yellow River

5 结 语

针对中国堤防工程建设特点和国家防洪减灾战略需求，十三五期间国家在重大自然灾害监测预警与防范专项研究中提出了开展“堤防险情演化机制与隐患快速探测及应急抢险技术装备”研究的项目立项指南。以长江、黄河、松花江等中国代表性大江大河堤防背景为依托，经过近 4 年总计达 230 余骨干人员的全力研究，项目围绕堤防典型险情演化过程与致溃机理、堤防风险识别与安全评价理论两个科学问题，以及低可探物理背景条件堤防工程隐患探测与识别新技术、成套装备化堤防应急抢险与修复新技术和堤防工程信息化综合安全管理技术等关键技术开展系统攻关，并取得重要研究成果。本文简要介绍了该项目的立项研究思想及 7 个方面的主要研究成果和相关应用示范效果情况。

由于堤防工程的复杂性，研究成果只是阶段性的或初步的，很多研究问题仍面临巨大挑战，如堤防溃口抢险技术等，只是在调研和研究过程中提出了一些新的抢险措施，要取得溃口等抢险技术的实战性突破，还有待全体科研和工程技术人员的持续努力。

另一方面，关于堤防工程系统性的研究项目，在国家层面仍偏少，希望本文就该重点项目的研究工作和研究进展介绍，能鼓励更多同行参与和致力于我国堤防工程的防汛抢险及技术进步研究行列。

致 谢：特别感谢对项目完成作出重要贡献的课题单位负责人、课题负责人、专题负责人以及参加本项目研究的全体科研与工程技术人员；特别感谢司富安教高、孙东亚教高、王媛教授、章青教授、王宗敏教授、郭成超教授、马贵生教高、张家发教高等相关负责人的全力支持和努力。

参考文献：

[1] 中华人民共和国水利部、中华人民共和国国家统计局. 第一次全国水利普查公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. (Ministry of Water Resources, P.R.China, National Bureau of Statistics, P.R.China. Bulletin of First National Census for Water[M]. Beijing: China Water Power Press, 2013. (in Chinese))

[2] 中华人民共和国水利部. 2019 年全国水利发展统计公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. (Ministry of Water Resources, P.R.China. 2019 Statistic Bulletin on China Water Activities[M]. Beijing: China Water Power Press, 2020. (in Chinese))

[3] 包承纲, 吴昌瑜, 丁金华. 中国堤防建设技术综述[J]. 人民长江, 1999, **30**(10): 15－16, 50. (BAO Cheng-gang, WU Chang-yu, DING Jin-hua. Dike construction technology and development in China[J]. Yangtze River, 1999, **30**(10): 15－16, 50. (in Chinese))

[4] 邬爱清, 周华敏, 吴庆华. 欧美国家堤防防洪若干特点及与我国的比较[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 11－18. (WU Ai-qing, ZHOU Hua-min, WU Qing-hua. Levees in Europe and United States: characteristics and comparison with China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 11－18. (in Chinese))

[5] 张家发, 吴昌瑜, 李胜常, 等. 堤防加固工程中防渗墙的防渗效果及应用条件研究[J]. 长江科学院院报, 2001, **18**(5): 56－60. (ZHANG Jia-fa, WU Chang-yu, LI Sheng-chang, et al. Seepage control efficiency and application conditions of cut-off wall used for dyke reinforcement[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2001, **18**(5): 56－60. (in Chinese))

[6] 邬爱清, 吴志广, 尹健民, 等. 钻孔压浆成墙法用于鄱阳湖区圩堤防渗墙施工[J]. 人民长江, 2001, **32**(5): 15－16, 36. (WU Ai-qing, WU Zhi-guang, YIN Jian-min, et al. Construction of the cut off wall with drilling grouting method applied in the dike of Poyang lake region[J]. Yangtze River, 2001, **32**(5): 15－16, 36. (in Chinese))

[7] 张家发, 吴志广, 许季军, 等. 安庆江堤现有减压井运行效果初步分析[J]. 长江科学院院报, 2000, **17**(4): 38－40, 44. (ZHANG Jia-fa, WU Zhi-guang, XU Ji-jun, et al. Analyses on effectiveness of relief wells for Anqing Dyke[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000, **17**(4): 38－40, 44. (in Chinese))

[8] 杨光煦. 九江长江江堤堵口实录及经验[J]. 人民长江, 1998, **29**(11): 4－7, 49. (YANG Cuang-xu. Emergency closure of dike breach at Jiujiang reach of Yangtze River[J]. Yangtze River, 1998, **29**(11): 4－7, 49. (in Chinese))

[9] 张利荣, 严匡柠, 张海英. 唱凯堤决口封堵抢险方案及关键技术措施[J]. 施工技术, 2014, **43**(12): 26－28, 83.

(ZHANG Li-rong, YAN Kuang-ning, ZHANG Hai-ying. Emergency rescue scheme and key technology measures of Changkai dike crevasse sealing[J]. Construction Technology, 2014, **43**(12): 26－28, 83. (in Chinese))

[10] 邬爱清. 国家重点研发计划项目“堤防险情演化机制与隐患快速探测及应急抢险技术装备”综合绩效自评价报告[R]. 北京: 中国 21 世纪议程管理中心, 2022. (WU Ai-qing. Self-Evaluation Report of the National Key R&D Program of China of “Dike Risks Evolution Mechanism, Hidden Danger Rapid Detection and Emergency Rescue Technology Equipment”[R]. Beijing: The Administrative Center for China’s Agenda 21, 2022. (in Chinese))

[11] 任增平, 潘光宜. 淮北大堤饶荆段险情类型及成因分析[J]. 水利规划与设计, 2019(9): 41－44, 156. (REN Zeng-ping, PAN Guang-yi. Analysis on type and formation cause of dangerous conditions in Raojing section of Huaibei Dam[J]. Water Resources Planning and Design, 2019(9): 41－44, 156. (in Chinese))

[12] 任增平, 金习武, 李　坤. 淮北大堤涡下段险情类型分析及成因研究[J]. 水利水电工程设计, 2020, **39**(3): 27－30. (REN Zeng-ping, JIN Xi-wu, LI Kun. Type analysis and cause study of risks at lower part of Wo river of Huaibei levee[J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2020, **39**(3): 27－30. (in Chinese))

[13] 司富安, 李　坤, 段世委, 等. 第二松花江堤防险情类型及成因分析[J]. 水利规划与设计, 2020(11): 117－119. (SI Fu-an, LI Kun, DUAN Shi-wei, et al. Analysis on the types and causes of danger prevention of the second Songhua River dyke[J]. Water Resources Planning and Design, 2020(11): 117－119. (in Chinese))

[14] 海　震, 李会中, 梁　梁. 枞阳江堤险情工程地质分析与评价[J]. 人民长江, 2019, **50**(增刊 2): 76－79. (HAI Zhen, LI Hui-zhong, LIANG Liang. Analysis and assessment on engineering geology of dangerous situation in Zongyang Yangtze River Embankment[J]. Yangtze River, 2019, **50**(S2): 76－79. (in Chinese))

[15] 赵　鑫, 马贵生, 万永良, 等. 堤防工程堤基渗流安全评价方法[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 79－84. (ZHAO Xin, MA Gui-sheng, WAN Yong-liang, et al. A safety assessment method for seepage flow in dyke foundation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 79－84. (in Chinese))

[16] 倪小东, 寇恒绮, 左翔宇, 等. 基于透明土技术与颗粒流方法联合开展管涌细观机理研究[J]. 水利学报, 2021, **52**(12): 1482－1497. (NI Xiao-dong, KOU Heng-qi, ZUO Xiang-yu, et al. Research on meso mechanism of piping based on transparent soil technology and particle flow method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, **52**(12): 1482－1497. (in Chinese))

[17] 谷敬云, 罗玉龙, 张兴杰, 等. 基于平面激光诱导荧光的潜蚀可视化试验装置及其初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(6): 1287－1296. (GU Jing-yun, LUO Yu-long, ZHANG Xing-jie, et al. A suffusion visualization apparatus based on planar laser induced fluorescence and the preliminary application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(6): 1287－1296. (in Chinese))

[18] 樊茹玉, 罗玉龙, 张兴杰, 等. 基于 DEM-CFD 耦合的潜蚀细观数值模型研究[J]. 水电能源科学, 2021, **39**(2): 64－68. (FAN Ru-yu, LUO Yu-long, ZHANG Xing-jie, et al. Study on suffusion mesoscopic numerical model based on DEM-CFD method[J]. Water Resources and Power, 2021, **39**(2): 64－68. (in Chinese))

[19] LUO Y L, LUO B, XIAO M. Effect of deviator stress on the initiation of suffusion[J]. Acta Geotechnica, 2020, **15**(6): 1607－1617.

[20] 刘洪辰, 吴庆华, 苏怀智, 等. 覆盖层及其与砂层接触面特性对堤基管涌影响试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, **18**(4): 165－170. (LIU Hong-chen, WU Qing-hua, SU Huai-zhi, et al. Experimental study on piping considering cover layer and its contact surface with sand layer characteristics[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, **18**(4): 165－170. (in Chinese))

[21] 崔皓东, 陆　齐, 陈劲松, 等. 长江干堤典型管涌险情成因分析及对策研究[J]. 水利水电快报, 2021, **42**(1): 54－58. (CUI Hao-dong, LU Qi, CHEN Jin-song, et al. Causes analysis of typical piping dangers of main levees of Yangtze River and countermeasures[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2021, **42**(1): 54－58. (in Chinese))

[22] 岳红艳, 吕庆标, 朱勇辉, 等. 河道岸坡水位涨落变化对崩岸影响试验研究[J]. 人民长江, 2021, **52**(增刊 2): 15－20. (YUE Hong-yan, LÜ Qing-biao, ZHU Yong-hui, et al. Experimental study on influence of river bank slope water level fluctuation on bank collapse[J]. Yangtze River, 2021, **52**(S2): 15－20. (in Chinese))

[23] 吕庆标, 岳红艳, 朱勇辉, 等. 水位变化速率对河道崩岸的影响[J]. 长江科学院院报, 2021, **38**(5): 11－16. (LÜ

Qing-biao YUE Hong-yan, ZHU Yong-hui, et al. Influence of water level change rate on riverbank collapse[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, **38**(5): 11 – 16. (in Chinese))

[23] 吕庆标, 岳红艳, 朱勇辉, 等. 水位变化速率对河道崩岸的影响[J]. 长江科学院院报, 2021(5): 11 – 16. (LÜ Qing-biao, YUE Hong-yan, ZHU Yong-hui, et al. Influence of water level change rate on riverbank collapse[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021(5): 11 – 16. (in Chinese))

[24] 孙东亚, 姚秋玲, 赵雪莹. 堤坝涵管接触冲刷破坏模式分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, **19**(2): 276 – 280. (SUN Dong-ya, YAO Qiu-ling, ZHAO Xue-ying. Analysis of failure modes of conduits through embankment dams due to contact erosion[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, **19**(2): 276 – 280. (in Chinese))

[25] 陈启刚, 张大伟, 王忠祥, 等. 堤防溃口水流特性与封堵技术研究进展[J]. 中国防汛抗旱, 2021, **31**(8): 1 – 6. (CHEN Qi-gang, ZHANG Da-wei, WANG Zhong-xiang, et al. Progress in flow characteristics and closure technology of dike breaches[J]. China Flood & Drought Management, 2021, **31**(8): 1 – 6. (in Chinese))

[26] 丁家怡, 蔡 伟, 周建方. 基于随机力学理论的堤防安全分析方法综述[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 66 – 72, 78. (DING Jia-yi, CAI Wei, ZHOU Jian-fang. Safety analysis methods for levees based on stochastic mechanics: a review[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 66 – 72, 78. (in Chinese))

[27] 王小兵, 夏晓舟, 章 青. 基于正交试验和神经网络的堤防边坡抗滑稳定可靠度研究[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 89 – 93. (WANG Xiao-bing, XIA Xiao-zhou, ZHANG Qing. Reliability analysis on anti-sliding stability of levee slope based on orthogonal test and neural network[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 89 – 93. (in Chinese))

[28] DING J Y, ZHOU J F, CAI W, et al. A modified hybrid algorithm based on black hole and differential evolution algorithms to search for the critical probabilistic slip surface of slopes[J]. Computers and Geotechnics, 2021, **129**: 103902.

[29] 李少龙, 崔皓东. 渗透系数空间变异性对堤基渗透稳定影响的数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 49 – 52, 58. (LI Shao-long, CUI Hao-dong. Numerical simulation on effect of spatial variability of soil permeability on seepage stability of levee foundation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 49 – 52, 58. (in Chinese))

[30] 刘高峰, 龚艳冰, 王慧敏, 等. 国外堤防风险管理现状及对我国的启示[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 53 – 58. (LIU Gao-feng, GONG Yan-bing, WANG Hui-min, et al. Current situation of levee risk management abroad and its implications to China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 53 – 58. (in Chinese))

[31] 龚艳冰, 杨舒馨, 戴靓靓, 等. 基于数据场 K-means 聚类的洪涝灾害突发事件分级方法[J]. 统计与决策, 2018, **34**(20): 47 – 49. (GONG Yan-bing, YANG Shu-xin, DAI liang-liang, et al. Stage division of flood disaster based on data field K-means clustering method[J]. Statistics & Decision, 2018, **34**(20): 47 – 49. (in Chinese))

[32] 刘高峰, 龚艳冰, 黄 晶. 基于流域系统视角的城市洪水风险综合管理弹性策略研究[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2020, **22**(3): 66 – 73, 107. (LIU Gao-feng, GONG Yan-bing, HUANG Jing. Research on resilient strategies of urban flood risk comprehensive management from the perspective of river basin system[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2020, **22**(3): 66 – 73, 107. (in Chinese))

[33] CAO W W, YANG Y, HUANG J, et al. Influential factors affecting protective coping behaviors of flood disaster: a case study in Shenzhen, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, **17**(16): 5945.

[34] 张 健, 潘 斌, 陈文龙, 等. 基于雷达卫星时序分析技术的荆江沿岸堤防形变研究[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 23 – 27. (ZHANG Jian, PAN Bin, CHEN Wen-long, et al. Detection of deformation along Jingjiang segment of Yangtze River dyke based on radar satellite time series analysis technique[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 23 – 27. (in Chinese))

[35] 沈定涛, 钱天陆, 夏 煜, 等. 机载 LiDAR 数据提取堤防工程特征信息圆环探测法[J]. 测绘学报, 2021, **50**(2): 203 – 214. (SHEN Ding-tao, QIAN Tian-lu, XIA Yu, et al. A ring detection method for levee features extraction based on airborne LiDAR data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, **50**(2): 203 – 214. (in Chinese))

[36] 冯国正, 刘世振, 李 艳, 等. 基于 GNSS/INS 紧耦合的水陆地形三维一体化崩岸监测技术[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 94 – 99. (FENG Guo-zheng, LIU Shi-zhen, LI

Yan, et al. A bank collapse monitoring technology integrating 3D land and water based on GNSS/INS tight coupling[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 94 – 99. (in Chinese))

[37] 马耀昌, 刘世振, 樊小涛, 等. 基于崩岸监测的多波束系统参数设计[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 100 – 103. (MA Yao-chang, LIU Shi-zhen, FAN Xiao-tao, et al. Design of detection parameters of multi-beam sounding system for bank collapse survey[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 100 – 103. (in Chinese))

[38] 刘世振, 樊小涛, 冯国正, 等. 现代高时空分辨率崩岸应急监测技术研究进展与展望[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 85 – 88, 93. (LIU Shi-zhen, FAN Xiao-tao, FENG Guo-zheng, et al. Modern emergency monitoring technology for bank collapse with high spatio-temporal resolution: review and prospect[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 85 – 88, 93. (in Chinese))

[39] 罗登昌, 韩　旭, 于起超, 等. 堤防工程数据标准化研究[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 34 – 38. (LUO Deng-chang, HAN Xu, YU Qi-chao, et al. Standardization of dyke engineering data[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 34 – 38. (in Chinese))

[40] 蒋　园, 韩　旭, 马丹璇, 等. 相似重复数据检测的数据清洗算法优化[J]. 计算机技术与发展, 2019, **29**(10): 79 – 82. (JIANG Yuan, HAN Xu, MA Dan-xuan, et al. Optimization of data cleaning algorithm for similar duplicate data detection[J]. Computer Technology and Development, 2019, **29**(10): 79 – 82. (in Chinese))

[41] 于起超, 韩　旭, 马丹璇, 等. 流式大数据数据清洗系统设计与实现[J]. 计算机时代, 2021(9): 1 – 5. (YU Qi-chao, HAN Xu, MA Dan-xuan, et al. Design and implementation of streaming big data ETL System[J]. Computer Era, 2021(9): 1 – 5. (in Chinese))

[42] 宁丹麦, 罗玉龙, 詹美礼, 等. 堤防管涌险情主要影响因素的敏感性分析[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 45 – 48, 58. (NING Dan-mai, LUO Yu-long, ZHAN Mei-li, et al. Sensitivity analysis on weights of main influence factors of piping failure of dyke[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 45 – 48, 58. (in Chinese))

[43] 冯　迪, 王　媛, 高　山, 等. 分淮入沂整治工程典型堤段垂直防渗体防渗效果分析与评价[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 180 – 184. (FENG Di, WANG Yuan, GAO Shan, et al. Effectiveness of vertical anti-seepage body in typical levee segment of Huaihe River drainage project: analysis and evaluation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 180 – 184. (in Chinese))

[44] 饶小康, 马　瑞, 张　力, 等. 基于 GIS+BIM+IoT 数字孪生的堤防工程安全管理平台研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(1): 1 – 7. (RAO Xiao-kang, MA Rui, ZHANG Li, et al. Study and design of dike engineering safety management system based on GIS+BIM+IoT digital twin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(1): 1 – 7. (in Chinese))

[45] 张　力, 马　瑞, 徐志敏. 堤防工程三维可视化管理技术[M]. 武汉: 长江出版社, 2021. (ZHANG Li, MA Rui, XU Zhi-min. 3D Visualization Management Technology of Dike Engineering[M]. Wuhan: Yangtze River Press, 2021. (in Chinese))

[46] 李文忠, 肖国强, 孙卫民, 等. 长江堤防土电阻率测试及其与含水率和密实度的相关性研究[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 131 – 134. (LI Wen-zhong, XIAO Guo-qiang, SUN Wei-min, et al. Measurement of water content and its correlation with compactness and resistivity of Yangtze River embankment soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 131 – 134. (in Chinese))

[47] 孙大利, 李　貅, 齐彦福, 等. 基于非结构网格三维有限元堤坝隐患时移特征分析[J]. 物探与化探, 2019, **43**(4): 804 – 814. (SUN Da-li, LI Xiu, QI Yan-fu, et al. Time-lapse characteristics analysis of hidden dangers of three-dimensional finite element levees based on unstructured grids[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, **43**(4): 804 – 814. (in Chinese))

[48] 孙卫民, 孙大利, 李文忠, 等. 基于时移高密度电法的堤防隐患探测技术[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 157 – 160, 184. (SUN Wei-min, SUN Da-li, LI Wen-zhong, et al. Technology of detecting dyke's hidden danger using time-lapse high-density resistivity method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 157 – 160, 184. (in Chinese))

[49] EDWARDS R N. The magnetometric resistivity method and its application to the mapping of a fault[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1974, **11**(8): 1136 – 1156.

[50] KOFOED V O, JESSOP M L, WALLACE M J, et al. Unique applications of MMR to track preferential groundwater flow paths in dams, mines, environmental sites, and leach fields[J]. The Leading Edge, 2011, **30**(2): 192 – 204.

[51] 周黎明, 陈志学, 周华敏, 等. 堤防隐患瞬变电磁三维正

演模拟及分析[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(10): 146－150, 156. (ZHOU Li-ming, CHEN Zhi-xue, ZHOU Hua-min, et al. Three-dimensional forward modeling and analysis of transient electromagnetic for detecting embankment's hidden danger[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(10): 146－150, 156. (in Chinese))

[52] 盛小涛, 张 伟, 李少龙, 等. 阳新长江干堤减压井清淤洗井技术研究[J]. 人民长江, 2020, **51**(11): 209－213. (SHENG Xiao-tao, ZHANG Wei, LI Shao-long, et al. Study on dredging and washing technique of relief well in Yangxin reach of Yangtze River main dyke[J]. Yangtze River, 2020, **51**(11): 209－213. (in Chinese))

[53] 田 密, 盛小涛. 减压井超声波解堵试验初步研究[J]. 长江科学院院报, 2021, **38**(6): 102－107. (TIAN Mi, SHENG Xiao-tao. Plugging removal test of dike relief well based on ultrasonic technology[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, **38**(6): 102－107. (in Chinese))

[54] 邬爱清, 吴庆华, 包承纲, 等. 一种自稳性防汛构筑物及其快速搭建方法: CN109881625B[P]. 2020-07-10. (WU Ai-qing, WU Qing-hua, BAO Chen-gang, et al. A Self-Stabilizing Equipment and Quick Build Method for Flood Prevention and Rescue China: CN109881625B[P]. 2020-07-10. (in Chinese))

[55] 邬爱清, 盛小涛, 吴庆华, 等. 一种新型植入式减压井降压排水系统及方法: CN110130378B[P]. 2019-12-27. (WU Ai-qing, SHENG Xiao-tao, WU Qing-hua, et al. A Novel Drop Pressure-Drainage System and Method Based on the Implantable Decompression Well China: CN110130378B[P]. 2019-12-27. (in Chinese))

[56] 程永辉, 陈 航, 熊 勇, 等. 一种用于溃口抢险的旋转式快速消能系统及应用方法. 中国：ZL202010491729.9[P]. 2019.8.6. (CHENG Yong-hui, CHEN Hang, XIONG Yong, et al. A Rotary Rapid Energy Dissipation System and Application Method for Closure of Breach. China: ZL202010491729.9[P]. 2019.8.6. (in Chinese))

[57] 郭成超, 杨建超, 石明生, 等. 高聚物超薄防渗墙施工设备及工艺改进[J]. 水利水电科技进展, 2020, **40**(3): 68－71, 77. (GUO Cheng-chao, YANG Jian-chao, SHI Ming-sheng, et al. Improvement of construction equipment and technology of super-thin cut-off walls with polymer[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, **40**(3): 68－71, 77. (in Chinese))

彩色插图索引

DOI：10.11779/CJGE202207001 一文彩色插图 ……（后插 1）
DOI：10.11779/CJGE202207002 一文彩色插图 ……（后插 1）
DOI：10.11779/CJGE202207003 一文彩色插图 ……（后插 2）
DOI：10.11779/CJGE202207004 一文彩色插图 ……（后插 3）
DOI：10.11779/CJGE202207005 一文彩色插图 ……（后插 6）
DOI：10.11779/CJGE202207010 一文彩色插图 ……（封 3）
DOI：10.11779/CJGE202207011 一文彩色插图 ……（封 3）
DOI：10.11779/CJGE202207012 一文彩色插图 ……（封 4）
DOI：10.11779/CJGE202207013 一文彩色插图 ……（封 4）

DOI：10.11779/CJGE202207011 “十三五”国家重点研发计划项目

强震作用下特高土石坝多耦合体系损伤演化机理及安全评价准则

邹德高[1,2]，刘京茂*[1,2]，孔宪京[1,2]，陈 楷[1,2]，屈永倩[1,2]，宁凡伟[1,2]，龚 瑾[1,2]

（1. 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室，辽宁 大连 116024；2. 大连理工大学水利工程学院工程抗震研究所，辽宁 大连 116024）

摘 要：中国西部拟建多座坝高250～300 m级别的特高土石坝工程，但西部地区地震频度高、强度大，地震的突发性和不确定性对这些特高土石坝的抗震安全构成了巨大威胁。高土石坝抗震安全评价是多系统、真三维、非线性、非连续的复杂问题。然而，传统高土石坝动力分析方法仍在弱非线性范围内，各种相互作用的影响大多被简化并孤立进行，难以对强震作用下特高土石坝动力破坏过程、耦合效应及其影响进行深入研究和科学认识。面向中国300 m级特高土石坝建设需求，依托RM、拉哇等特高土石坝，重点突破了筑坝材料强非线性、大坝-地基-库水动力相互作用、精细化建模和分析方法、自主高性能计算软件以及极限抗震能力评价方法和标准等方面的一系列科学问题和技术难题。研究成果为特高土石坝抗震安全设计提供了先进的评价方法和标准。



关键词：高土石坝；地震；结构与地基相互作用；精细化分析；极限抗震能力

中图分类号：TU435 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2022)07－1329－12

作者简介：邹德高(1973—)，男，教授、博士生导师，现任大连理工大学水利工程学院院长。入选教育部长江学者特聘教授、国家“百千万人才工程”、国家有突出贡献中青年专家、“新世纪优秀人才支持计划”。兼任海岸和近海工程国家重点实验室副主任、辽宁省工程防灾减灾重点实验室副主任、大坝工程学会大坝数值模拟专委员会副主任、核学会核设施建构筑物安全专委员会副理事长、中国水力发电工程学会理事、辽宁省水利学会理事、水利学会岩土力学专委员会副秘书长、《岩土工程学报》和《土木建筑与环境工程》编委等。长期从事高土石坝和核电工程抗震安全评价、计算土力学和数值分析方法、粗粒土测试技术和本构理论等方面研究，自主研发了高性能岩土工程多数值耦合分析软件GEODYNA7.0，获著作权和专利23项，成果应用于60多个水利水电、核电等大型工程。获国家科技进步二等奖2项，省部级特等奖1项、创新团队奖1项、一等奖8项。负责国家重点研发计划课题、国家自然科学基金重大和重点课题以及工程咨询项目50余项。出版专著3部，发表论文200余篇。E-mail: zoudegao@dlut.edu.cn。

Damage evolution mechanism and safety evaluation criterion of ultra-high rockfill dam system under strong earthquakes

ZOU De-gao[1,2], LIU Jing-mao[1,2], KONG Xian-jing[1,2], CHEN Kai[1,2], QU Yong-qian[1,2], NING Fan-wei[1,2], GONG Jin[1,2]

(1. State Key Laboratory of Coastal & Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Several ultra-high earth and rockfill dams up to 250 to 300 m in height are to be built in the intensive earthquake regions of West China. The strong outburst and high uncertainty of strong earthquakes pose a great threat to the safety of ultra-high earth and rockfill dams. The seismic safety evaluation of the ultra-high earth and rockfill dams is a multi-system, three-dimensional, nonlinear and discontinuous problem. However, the traditional dynamic analysis of high earth and rockfill dams is still within the range of weak nonlinearity, and the effects of multi-system interaction are mostly simplified and carried out in isolation, which is difficult to reveal the dynamic failure process and coupling effects of the ultra-high earth and rockfill dams under strong earthquakes. The project is oriented to the construction needs of 300 m-ultra-high earth and rockfill dams. Relying on the ultra-high earth and rockfill dams such as Lava and RM, the strong nonlinearity of the rockfill materials, dam-foundation-reservoir interactions, refined

基金项目：国家重点研发计划项目（2017YFC0404904）；国家自然科学基金项目（U1965206）

收稿日期：2022－03－05

*通信作者（E-mail: liujm@dlut.edu.cn）

modelling methods, high-performance software and the assessment methods and criteria for the ultimate seismic capacity of the ultra-high earth and rockfill dams are studied. The results can provide advanced assessment methods and criteria for the aseismic design of ultra-high earth and rockfill dams.

Key words: high earth and rockfill dam; earthquake; soil-structure interaction; refined analysis; ultimate seismic capacity

0 引 言

近年来中国西部水电开发进程加快，如金沙江、澜沧江、怒江、雅砻江、大渡河和黄河上游以及西藏的雅鲁藏布江等流域均规划了多个梯级电站，许多工程的坝型确定为高土石坝。其中，云南澜沧江古水、西藏澜沧江 RM 水电站和川藏交界金沙江拉哇水电站等拟建坝高均在 250～300 m 级别。中国西部地震频度高、强度大，且地震具有不确定性和突发性，这对特高土石坝的抗震安全构成了巨大威胁。例如，2008 年 5 月 12 日，紫坪铺大坝（高 156 m）遭遇汶川特大地震[1-3]，除大坝发生一定沉降、下游坝坡块石滚落外，还出现了面板脱空和错台现象，河床中央面板中上部也出现挤压破坏等震害现象，这在以往的面板堆石坝设计和抗震复核时均没有充分考虑。再如印度 Koyna 坝实际遭遇的地震加速度峰值远超设计值，发生了严重的震害。这些都是地震具有不确定性的典型例子。地震会引发坝体的突发变形（坝体沉降、接缝和周边缝张开、施工缝错台、面板挤压破坏等），由于时间短其抗震安全是难以控制的，因此在大坝设计时必须保证其具有较高的抗震安全裕度。

为解决强震作用下特高土石坝抗震安全评价和抗震裕度分析的难题，2017 年 7 月，“300 m 级特高坝抗震安全评价与控制关键技术”项目正式获批立项，本课题“强震作用下特高土石坝多耦合体系损伤演化机理及安全评价准则研究（2017YFC0404904）”是该项目的重要组成部分，课题由大连理工大学牵头，中国水利水电科学研究院、南京水利科学研究院参与。本文就课题的研究背景、研究内容、主要创新成果，以及成果的应用情况等作简要介绍。

1 课题的研究现状

高土石坝抗震安全评价是多系统、真三维、非线性、非连续的复杂问题。然而，传统高土石坝动力分析方法仍在弱非线性范围内，各种相互作用的影响大多被简化并孤立进行，难以对强震作用下高土石坝动力破坏过程、耦合效应及其影响进行深入研究和科学认识[4-6]。因此，面向中国 300 m 级特高土石坝建设需求，开展特高土石坝抗震安全评价与抗震措施研究，需重点突破材料强非线性、大坝－地基－库水动力相互作用、精细化建模和分析方法、高性能计算软件以及极限抗震能力评价方法和标准等方面的一系列科学问题和技术难题。

在材料强非线性试验研究方面，由于堆石料的颗粒尺寸大，难以对原型堆石料进行试验，只能进行大比例缩尺后试验研究。缩尺前后堆石料力学特性的差异即堆石料的缩尺效应，堆石料的缩尺效应一直是困扰工程界而又亟待解决的难题之一。目前为止，已有研究大都是通过直径 300 mm（颗粒最大尺寸为 60 mm）的常规三轴试样向更小尺寸方向发展，导致堆石料缩尺效应的研究仍基本处于定性分析阶段。大比例缩尺后会导致细颗粒的增加，颗粒的填充关系与原型可能有较大差别。采用最大粒径 60 mm 的试验参数，不可避免地会有较大的偏差。鉴于此，墨西哥和美国在 20 世纪 60—70 年代，日本在 70 年代和 90 年代末以及法国在 21 世纪初，相继研发了超大型三轴仪。但由于超大型三轴试验涉及到的问题非常复杂，且相比于常规大型三轴试验要耗费大量的人力及物力。目前仅日本及法国新研制的超大型三轴仪在使用，但这两台设备可进行试验的围压较小，不能满足进行高围压下堆石料试验的条件。此外，目前尚未见堆石料的超大型动力三轴试验成果，对于堆石料动力特性的缩尺效应研究基本空白。普遍认为土石坝应力变形计算结果与原型观测实测结果有较大差别的原因之一是没有考虑缩尺效应，准确测定与考虑缩尺效应是采用土石坝应力变形计算预测大坝性状的关键技术问题。

在材料强非线性模拟研究方面，强震条件下筑坝材料会呈现显著的非线性变形特性，合理地描述强震时筑坝材料的变形特性对评价大坝的抗震性态、极限抗震能力和量化抗震措施效果是十分重要的。一直以来，筑坝材料动力本构模型研究都是高土石坝抗震研究中的一个薄弱环节，虽然历经多年发展国内外学者取得了诸多进展但筑坝材料强非线性本构仍然存在很多问题。2008 年—2014 年期间，大连理工大学已对堆石料、接触面、混凝土防渗体的静动力弹塑性本构模型进行了初步的理论研究和工程应用。发展的弹塑性本构模型可以反映剪胀、软化及循环变形累积特性等特性，但仍难以较好反映实际地震动不规则循环加载历史对堆石料后续变形的影响，导致无法较好地统一描述筑坝堆石料的模量衰减和残余变形特性。发展的接触面本构模型已能反映常法向应力条件下接触面的

变形特性和三维单调剪切耦合效应，但难以较好反映法向应力变化明显时接触面的变形特性和接触面三维循环剪切耦合效应。此外，目前高土石坝动力有限元分析程序一般均采用隐式求解，难以模拟强震时坝体局部软化失稳发展过程，在一定程度上限制了先进弹塑性本构模型应用于大坝渐进破坏过程的模拟和极限抗震能力研究。

在大坝－地基－库水动力相互作用研究方面，对于 250～300 m 级高土石坝，其尺寸和质量巨大，坝–基交界覆盖区域（建基面）沿顺河向长近千米，河床与两岸高差数百米，波动效应变得更加显著。此外，坝高增加会使坝体底部的模量与基岩的模量的差异缩小，在地震中，由坝体产生的散射波会有更多的能量透射至无限域，致使坝－基动力相互作用对高土石坝地震反应的影响增大。而传统的振动分析方法由于没有考虑地震的波动效应和无限地基的辐射阻尼影响，会导致计算得出的大坝地震反应失真。因此，须采用波动分析方法开展土石坝－地基动力相互作用研究，探明地基截取范围及坝－基动力相互作用对大坝地震反应的影响幅度，为更加合理地评价高土石坝抗震性能提供依据。同时，动水压力是影响面板应力的一个关键因素，相关研究尚不多见，且主要针对 100 m 级的面板堆石坝。目前在动力分析中广泛采用的 Westergaard 简化方法（集中附加质量模型）难以考虑竖向地震、倾斜坝面、复杂河谷等实际情况，其计算误差尚不明确；有限元流固耦合分析又存在前处理繁琐、计算量大等不足。因此，亟待发展一种可准确反映坝面动水压力对大坝作用的流－固耦合分析方法，揭示动水压力的影响程度和规律，这一研究对评价混凝土面板抗震安全具有重要的工程意义。

在精细化建模和分析方法研究方面，精细化分析要求模型能高保真反映实际工程的几何特征，是工程仿真领域研究热点和发展趋势。但高土石坝多处高山峡谷区，河谷复杂不规则、地质多变非均匀等问题十分突出，同时还存在坝料分区、接缝以及接触界面空间交错等几何约束，对精细化的建模和分析方法提出了很高的要求。目前广泛应用的分析方法以等参单元为主，其单元形状局限于六面体及其退化型式，难以适应复杂河谷地形的高土石坝–地基体系建模，需进行大量的几何简化，造成了模型一定程度的失真，且由于关键防渗结构尺度与坝体及地基相差悬殊（例如，大石峡面板坝坝高及坝底长宽均达数百米，而关键防渗面板厚度最小为 0.5 m），使得网格加密过渡十分困难，难以真实地再现三维高土石坝动力响应和防渗体空间破坏模式及演化规律。实现网格尺寸跨越，可满足局部关键结构细尺度离散，同时可兼顾整体单元量较少，但其面临的最大困难是不同尺寸单元在交界面处的节点衔接处理。因此，发展适用于高土石坝的精细化建模和分析方法，对准确把握和科学认识其地震性态，提升高土石坝抗震安全评价研究水平具有重要的推动作用。

在高性能计算软件研发方面，计算机数值模拟作为一种重要的科学研究手段，在结构抗震防灾方面得到日益广泛的应用。但已有的土石坝抗震分析软件在材料强非线性、复杂地震动输入、多场耦合方面进行了大量的简化，且计算规模小、分析效率低，难以对强震作用下 300 m 级特高土石坝动力破坏过程、耦合效应及其影响进行深入研究和科学认识。进一步集成多场耦合体系弹塑性和损伤/开裂方法，发展高性能求解分析技术，研发大规模、高效的高土石坝地震破坏全过程模拟分析软件具有十分重要的工程应用价值。

土石坝的极限抗震能力和不溃坝量化指标是目前学术界和工程界最为关心的热点问题。汶川地震后，我国对大坝的地震设防要求除设计工况下满足“可修复”外，对特别重要的挡水建筑物，还需要开展极限抗震能力研究。《水电工程水工建筑物抗震设计规范》[7]中也建议，针对高土石坝，应该从坝体变形、坝坡稳定和防渗体安全 3 个方面综合评价其抗震安全性能。然而，目前国内外尚无规范或导则明确规定土石坝极限抗震能力的评价方法和标准。

因此，需要发展适合强震条件下大坝损伤和变形演化的分析理论，克服等效线性分析方法难以评价特高土石坝极限抗震能力的瓶颈，系统调研、分析震害资料、工程案例和数值模拟结果，建立基于坝体地震沉降、坝坡稳定和防渗体系变形等多指标的高土石坝极限抗震能力和不溃坝量化指标，为特高土石坝强震安全评价提供重要的方法和标准依据。

2　研究目标、内容及关键科学技术问题

2.1　研究目标

以 300 m 级的特高土石坝为依托，发展大坝－河谷/地基－库水体系非线性动力耦合分析方法，研究强震作用下特高土石坝损伤演化过程，揭示坝体和防渗结构渐进破坏机理，建立特高土石坝极限抗震能力评价方法及不溃坝量化指标体系，为构建抗震安全风险评估体系与震灾防御技术提供支撑。

2.2　主要研究内容

如图 1 所示，本课题主要研究内容如下：

（1）特高土石坝－河谷/地基－库水体系非线性动力耦合分析方法。发展基于黏弹性人工边界的非一

致性地震动输入方法，建立高精度、高效的库水与混凝土面板动力耦合作用的比例边界有限元分析模型，考虑无限地基的辐射阻尼、筑坝材料强非线性和库水转弯河谷效应，集成大坝－河谷/地基－库水体系的非线性动力耦合分析方法。建立多边形/多面体比例边界有限元分析方法、土与结构接触面跨尺度分析方法，发展筑坝堆石料非连续和大变形模拟的离散元计算技术，实现复杂几何和材料分区的精细化分析过程，提高特高土石坝坝体和防渗结构应力与变形分析的精度和效率。研究非均匀地震动输入、复杂河谷地形特性等对坝体和防渗结构地震响应的影响，阐明大坝－河谷/地基－库水体系非线性动力耦合作用机制。

（2）大规模、高性能非线性有限元分析软件系统研发。集成大坝－河谷/地基－库水体系非线性动力耦合分析方法、考虑尺寸效应的堆石料静动力弹塑性本构模型、混凝土防渗体塑性损伤和开裂分析方法，研发大规模、高性能非线性有限元分析软件系统，实现强震作用下特高土石坝损伤演化、渐进破坏全过程模拟。基于 GPU 并行加速技术和多核 CPU 并行计算技术，对动力非线性显式和隐式计算进行优化，提高计算规模和计算效率，使 300 m 级特高土石坝－河谷/地基－库水体系非线性动力耦合分析的求解时间降低 70%以上。

（3）特高土石坝损伤演化规律和不溃坝量化指标体系。基于提出和发展的理论模型和分析方法，开展系统的精细化数值模拟，并结合物理模型试验与震害资料分析，研究强震作用下坝顶震陷量、坝坡失稳滑动范围等耦合影响机制，揭示强震作用下特高土石坝损伤演化和渐进破坏机理。完善和建立局部与整体稳定相结合、稳定与变形分析相结合的安全评价准则，建立特高土石坝极限抗震能力评价方法和不溃坝量化指标体系。为制定特高坝抗震设计规范提供理论依据和技术支撑。

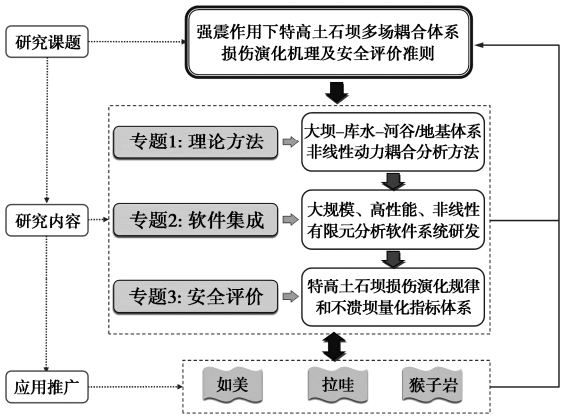


图 1 课题内容概况

Fig. 1 Overall contents of tasks

2.3 拟解决的关键技术问题

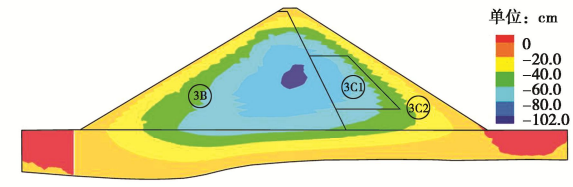
（1）大坝－河谷/地基－库水体系的非线性动力耦合分析方法，研发大规模、功能强大、高效精细化的非线性有限元分析软件系统。

（2）强震作用下特高土石坝损伤演化、渐进破坏机理，特高土石坝极限抗震能力评价方法和不溃坝量化指标体系。

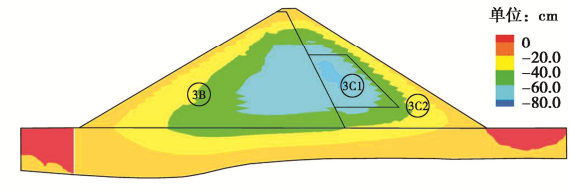
3 主要理论和方法创新

3.1 筑坝堆石料关键力学特性指标的缩尺效应规律

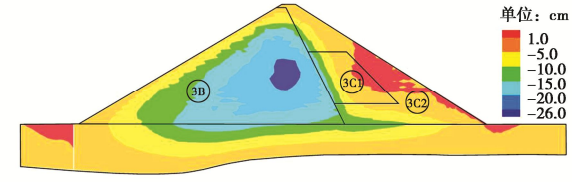
研发了平面接触式扭压一体的三轴试样波速测量系统[8]，解决了压电陶瓷弯曲元装置在制样及加载过程中插入端易破坏、局限于细粒土的难题；阐明了颗粒级配特性对粗粒土最大剪切模量的影响规律[9-11]，提出了反映颗粒级配特性的最大剪切模量经验公式，拓展了已有经验公式的适用范围，提高了粗粒土最大剪切模量的预测精度。研制了国内首台超大型三轴测试系统，建立了缩尺效应研究试验平台[12]，形成了超大三轴试验规程（粗粒土试验规程），弥补了中国在此方面的空白，大幅提升了粗粒土力学特性的测试水平。依托 RM、阿尔塔什工程，揭示了筑坝堆石料静力强度、模量、颗粒破碎以及动模量和阻尼比等关键力学指标的缩尺效应规律[13-15]，成功预测了阿尔塔什砂砾石-堆石面板坝填筑变形规律，验证了缩尺效应规律的合理性（图 2），阐明了缩尺效应对砂砾石-堆石面板坝有限元计算分析的影响，提升了粗粒土缩尺效应机理的认识水平，为高土石坝变形预测提供了可靠的理论模型。



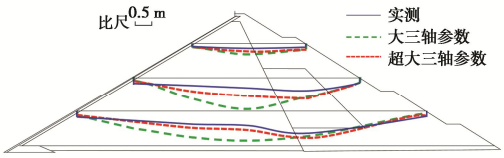
（a）大三轴参数



（b）超大型三轴参数



（c）大型、超大型三轴参数沉降计算差值



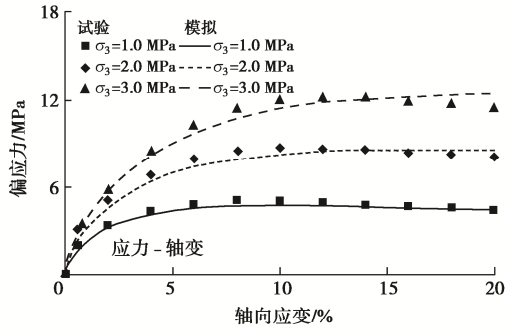
（d）实测与计算值对比

图 2 筑坝料缩尺效应对阿尔塔什面板坝计算变形的影响

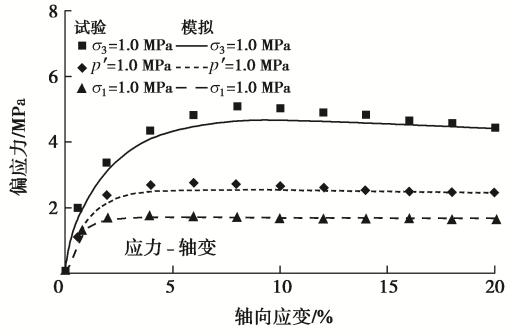
Fig. 2 Influences of scale effect on deformation analysis of Aertashi CFRD

3.2 高土石坝筑坝堆石料－界面－防渗体强非线性本构理论

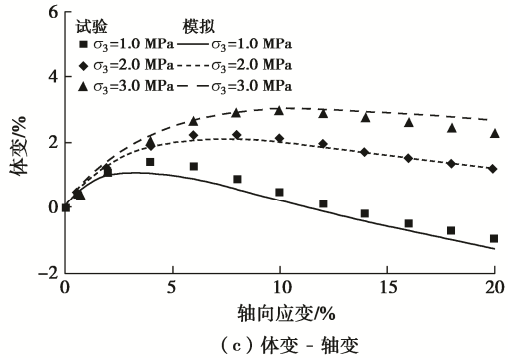
在国内率先开展三维广义塑性本构模型及其应用研究基础上，大连理工大学基于广义塑性理论和比例记忆理论，聚焦颗粒破碎、剪胀等关键力学特性，建立了反映有效加载历史的记忆参量，重构了弹塑性本构理论三要素，提出了反映颗粒破碎、剪胀和加载历史动态演化的堆石料广义塑性本构模型[16]，通过一套参数即可统一模拟堆石料颗粒破碎、剪胀、软化、模量衰减、残余变形等特性（图 3），解决了传统模型不适用于强非线性，难以静动统一分析的问题。



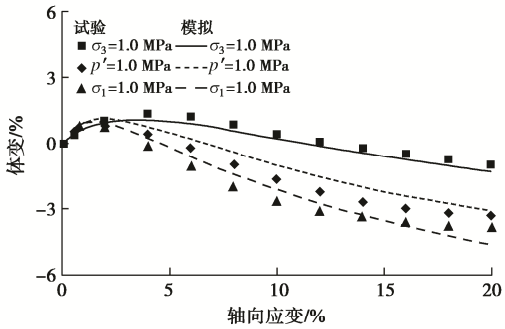
（a）常规静力试验



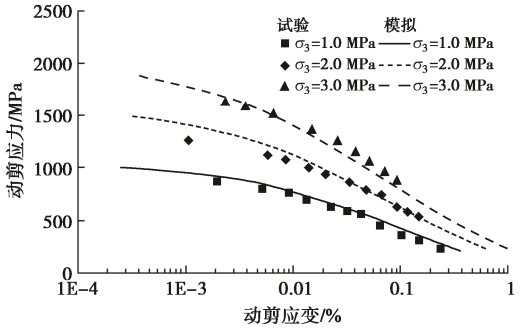
（b）等σ_1、p、k_c试验



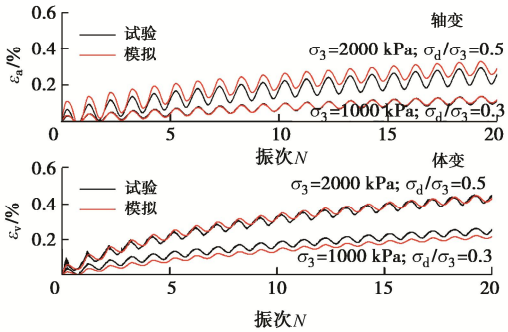
（c）体变－轴变



（d）体变－轴变



（e）动模量试验



（f）永久变形试验

图 3 复杂加载条件 RM 堆石料试验结果和模型模拟对比

Fig. 3 Comparison between test results and model simulations for RM rockfill materials under complex loading conditions

拓展堆石料本构理论框架，建立了适用于筑坝堆石料和防渗体接触面的三维状态相关边界面理论及其应力映射算法，提出可反映两个剪切方向和法向三者耦合变形的接触面弹塑性本构模型[17]，阐明了传统理想弹塑性模型导致防渗面板轴向应力偏大的机制，更加真实地反映了筑坝堆石料与防渗体之间的荷载传递机制。

引入混凝土塑性损伤模型，发展了考虑纤维含量影响的混凝土塑性损伤模型[18]，解决了混凝土防渗体渐进破坏模拟难题；引入内聚力模型模拟混凝土开裂的力学特性，发展了土石坝的动力显式求解算法，可直接计算裂缝宽度，直观定量评价破坏程度[19-20]。

研究成果实现了筑坝堆石料－界面－防渗体全弹塑性模拟，为高土石坝强震抗震安全评价提供了先进的本构模型。

3.3 高土石坝－河谷/地基－库水体系非线性动力耦合分析方法

基于波动理论，研发了黏弹性边界单元自动生成和参数识别以及等效荷载计算等实用化技术，率先实现了高效的三维高土石坝－地基动力相互作用波动分析方法[21-22]。系统地研究了地基截取范围及坝－基动力相互作用对大坝地震反应的影响幅度：建议地基截取范围取坝－基交界面顺河向长度的 30%～50%（面板坝时约 1.0H～1.5H，心墙坝时约 1.2H～1.8H，H 为坝高）；与振动分析方法相比，波动分析方法获得的坝体加速度极值降幅约为 10%～40%，动位移极值降幅约为 10%～50%，面板动应力极值降幅：拉应力约为 20%～40%，压应力约为 15%～30%。振动分析方法明显高估大坝地震反应，将可能低估大坝的极限抗震能力，不利于评价大坝在极端地震条件下的真实性态[23]。

基于比例边界有限元理论，考虑有限域库水、无限域库水、复杂河谷形状、三向地震作用、倾斜坝面等因素，发展了高精度的三维坝－库水流固耦合分析方法[24-26]（图 4），提高了动水压力的模拟精度，并提出了矩阵稀疏化处理的高效动水压力计算方法[27]，建议了有限域坝－库动力耦合 SBFEM 分析中库水区的截断长度取 2 倍水深[28]，评价了广泛采用的 Westergaard 简化方法的误差幅度：顺河向地震作用时，高估面板顺坡向压应力 41.3%，并低估坝轴向拉应力 10.6%；竖向地震作用时，将低估面板顺坡向拉应力 45.7%。评价了棱柱形河谷假定对拐弯库区面板动水压力的计算误差，并建议采用基于有限域库水的 SBFEM 进行复杂河谷条件的大坝－库水动力相互作用分析。

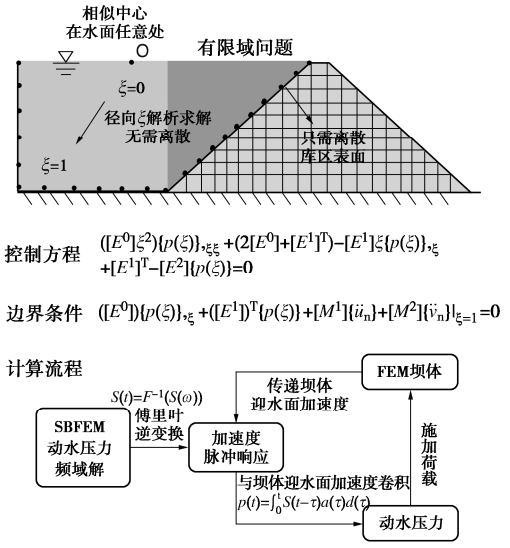


图 4 高精度的坝－库水流固耦合分析方法

Fig. 4 High-precision dam-reservoir interaction analysis method

3.4 高土石坝跨尺度精细化建模和分析方法

引入计算机图形和信息学科的八分树离散算法，解决了常规建模方法难以高效、高质量建立基岩－坝体－防渗体庞杂体系精细网格模型的问题（图 5）。基于比例边界有限元理论（SBFEM），提出了适应复杂几何的多面体单元构造新方法（图 6），建立了基于 FEM-SBFEM 无缝耦合的高效跨尺度单元分析算法，解决了有限元分析方法难以求解复杂多面体单元的问题[29-38]。

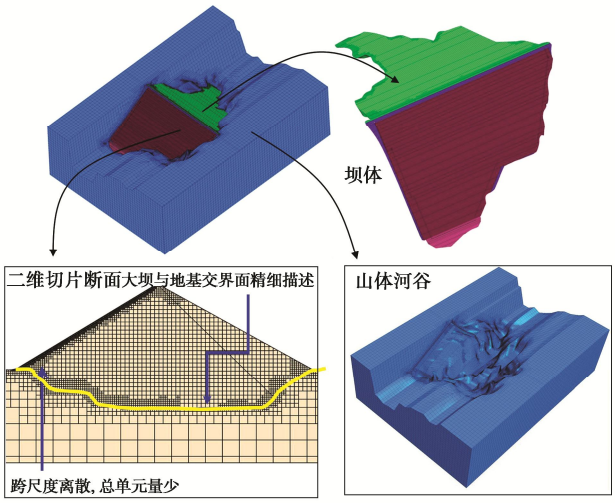


图 5 大石峡大坝的高保真跨尺度建模

Fig. 5 High-fidelity cross-scale modeling of Dashixia CFRD

引入界面背景网格及径向插值函数（RPIM）[39-40]，提出了二维和三维无网格界面模拟方法，实现了界面两侧节点自由分布，克服了传统接触面单元点对点的限制，解决了土与结构接触界面影响的精细化分析难题[41-45]。

研发了高效的 DEM-FEM 耦合的高土石坝动力破坏分析方法[46]，解决了基于连续介质力学的面板坝有限元动力分析方法难以很好描述强震下坝体局部破坏的大变形、非连续的问题。

3.5 高性能、大规模精细化分析软件集成

基于面向对象的程序设计思想，在作者研发的 GEODYNA 软件系统[6]框架中，重载了 SBFEM 和 MFM-I（无网格界面）超单元类[41-44]，构造了复杂形状单元面数、节点数和节点编号的超单元编码格式及动态数据结构，统一了 FEM、SBFEM 和 MFM-I 计算方法。将提出的多边形离散元分析算法抽象为离散元类[46]，并基于界面耦合的思路，制定了程序调用规则和信息传递接口，率先在同一框架内统一了 FEM、SBFEM、MESHLESS、DEM 等分析方法，使得各数值方法优势互补的效益得到充分发挥。

基于此，进一步集成了堆石料广义塑性模型、广

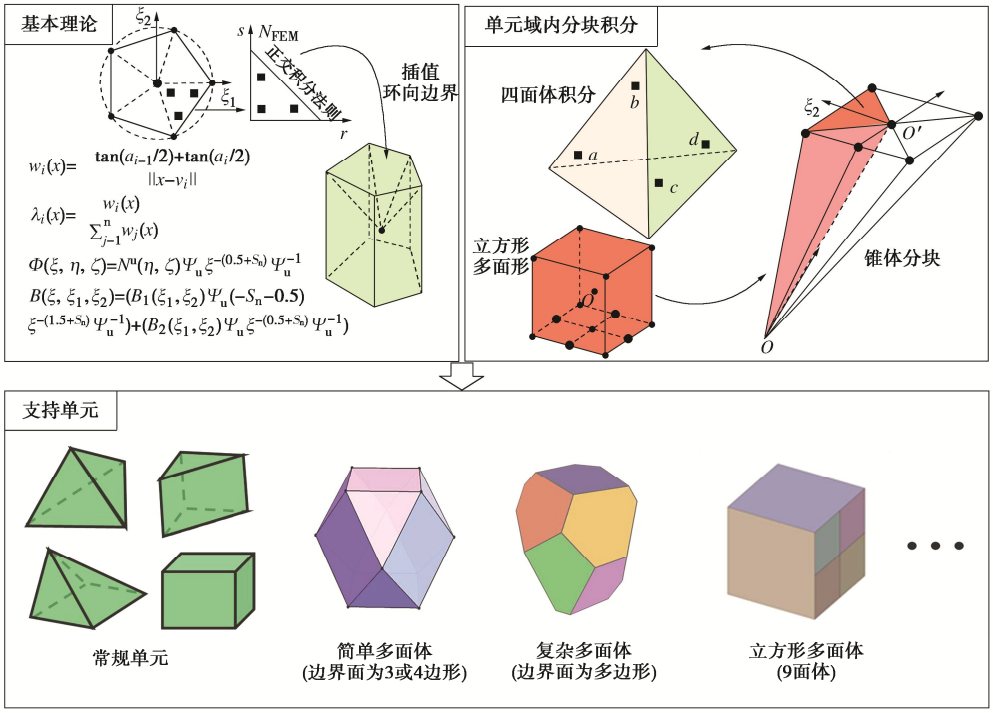


图 6　复杂几何的多面体单元构造方法

Fig. 6 Method for constructing polyhedral cells with complex geometry

义塑性接触面模型、混凝土防渗体损伤/开裂等非线性分析模型[47-48]、大坝－地基－库水动力相互作用分析方法等多项研究成果。

进一步优化发展了 CPU+GPU 并行、多任务输出、自适应本构积分、求解时步优化和相似单元加速等多项高性能求解分析技术，使得高土石坝大规模、非线性动力分析计算时间降低了 87%，在个人电脑上突破了千万自由度的强非线性分析瓶颈，有效解决了高土石坝地震损伤演化全过程的高效精细化数值模拟难题。图 7 给出了 GEODYNA 最新版的可视化界面。

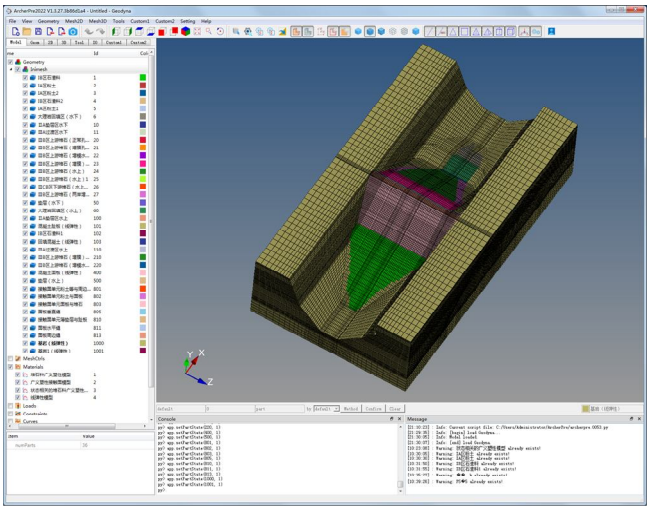


图 7 GEODYNA 计算软件可视化界面

Fig. 7 Visual interface of GEODYNA

3.6　特高土石坝极限抗震能力评价方法和不溃坝指标体系

联合本项目提出的筑坝材料强非线性本构、大坝－地基－库水相互作用分析方法、精细化建模和分析方法，形成了适用于强震条件的高土石坝抗震安全计算方法，克服了传统等效线性方法难以评价特高土石坝极限抗震能力的瓶颈。

基于大量系统的数值分析（包括不同坝型、不同坝高、不同坝坡、不同坝顶宽度、不同地震动的弹塑性和滑移量分析）和工程资料调研（包括已有遭遇地震大坝的震陷率、振动台试验、坝顶高程与正常蓄水位高差、止水材料及其性能等）对比，首先论证了坝顶震陷率与滑移量的正相关性，然后综合考虑实测震陷率对应的震害状态和库水漫顶最大震陷率的相对关系，建议了 300 m 级高土石坝坝体变形的不溃坝指标（表 1）：①面板坝震陷率不溃坝指标为 1.1%、心墙坝震陷率不溃坝指标为 1.3%。②面板坝坝坡滑移量不溃坝指标为 1.2 m（滑弧穿过坝顶中点）、心墙坝坝坡滑移量不溃坝指标为 1.4 m（滑弧穿过过渡和反滤交界区域）。同时提出采用实际工程止水的最大变形量作为接缝不溃坝控制指标（目前止水可承受张拉 10 cm，剪切和错动 8 cm）。最终从坝体震陷率、滑移量、缝位移三方面建立了 300 m 级高土石坝不溃坝指标体系[49]。研究成果可为高土石坝极限抗震能力评价提供重要的

方法和标准依据。

表 1 高土石坝极限抗震能力指标

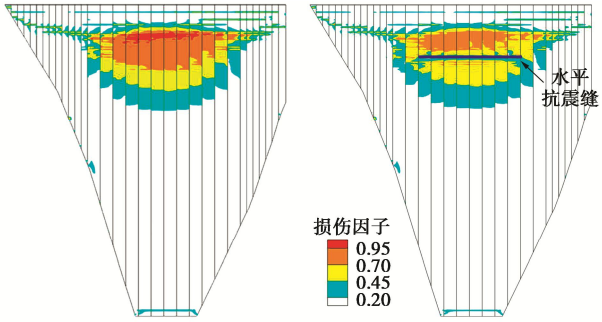
Table 1 Criteria for ultimate seismic capacity of high earth and rockfill dams

坝型	震陷率/%	滑移量/m	接缝位移
面板坝	1.1	1.2（滑弧穿过坝顶中点）	止水的最大变形量：沉降 100 mm，张开 100 mm，剪切 80 mm
心墙坝	1.3	1.4（滑弧穿过过渡和反滤交界区域）	——

4 典型成果应用情况

运用本课题发展的高性能软件系统 GEODYNA7.0，联合土体广义塑性模型、混凝土塑性损伤模型/内聚力模型和地震波动输入方法等，开展高面板坝的静、动力全过程精细化分析，重现大坝变形和防渗体局部损伤演化过程，揭示破坏模式和机理，定位薄弱区位置，量化抗震措施效果，为强震时高面板坝安全评估和抗震设计提供依据。

数值分析结果[19, 46, 50-51]表明：①地震作用下，顺坡向拉伸变形使中部面板在 60%～80%坝高范围内发生水平向贯通性裂缝；堆石体的塑性变形导致两岸面板在 85%坝高左右出现非贯通性裂缝。增大配筋率、减少岸坡面板宽度、中上部设置永久水平缝可改善面板的受力状态，裂缝宽度分别降低 42.8%，14.3%，49.1%。将该方法应用于 250 m 级拉哇和猴子岩面板堆石坝混凝土面板地震安全评价，结果表明，猴子岩大坝的面板在河谷中部附近范围为地震易损区，宜考虑重点加固；采用局部置换钢纤维混凝土的面板抗震措施后，损伤因子降低 0.25，损伤面积减少 43.5%，且没有出现严重损伤的区域；在猴子岩大坝的面板中上部设置水平抗震缝也同样明显改善面板的破损情况，损伤因子大于 0.7 区域面积减小约 56%，损伤极值降低约 20%（图 8）。②强震作用下，面板的挤压高应力区位于河谷中部竖缝两侧附近的表层局部区域，面板竖缝填充材料的力学特性对面板应力性态影响很大，软缝材料计算的面板最大压应力较硬缝材料（沥青木板）分别降低了 19.0%（桦木）和 26.0%（橡胶）；③地震作用下面板坝的初始破坏发生在坝顶区（坝顶及下游坡上部），表现为下游坡上部浅层堆石体的松动、滑移甚至滚落，坝顶沉降，混凝土面板与堆石间脱空，防浪墙向下游的滑移、并与面板脱开；采用钉结护面板的抗震措施后，坝体沉降降低 44%，防浪墙水平位移降低 40%（图 9）。研究成果直观再现了面板坝的地震破坏演化规律，精准定位了薄弱区域，量化了抗震措施效果，对 250 m 级高面板堆石坝有十分重要的指导作用。



（a）无措施时面板损伤分布 （b）有措施时面板损伤分布

图 8 猴子岩工程应用效果举例

Fig. 8 Application examples of Houziyan CFRD

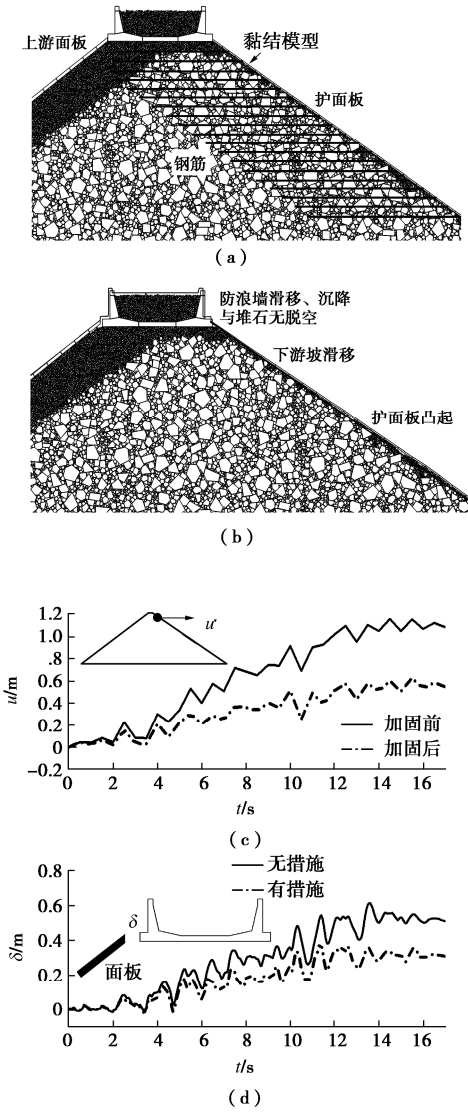


图 9 高土石坝钉结护面板抗震措施效果评价

Fig. 9 Evaluation of nail-tied panel for seismic deformation of high earth and rockfill dams

此外，课题建议的特高土石坝极限抗震能力评价标准已经应用于 RM（高 315 m）、大石峡（高 247 m）、

拉哇（高 239 m）、两河口（高 295 m）共 4 座已建和在建的特高土石坝，为特高土石坝抗震安全裕度分析提供了支撑。

5 结　论

本课题围绕强震作用下特高土石坝多耦合体系损伤演化机理及安全评价准则开展了系统深入的研究，取得了以下5项创新成果。

（1）研制了国内首台超大型静动三轴仪（试样尺寸：1000 mm×2050 mm）以及大颗粒材料三轴试样波速测量系统，显著提升了堆石料力学特性测试水平；揭示了筑坝堆石料（或粗粒土）静力强度、模量、颗粒破碎以及动模量和阻尼比等关键力学指标的缩尺效应规律，阐明了缩尺效应对面板坝有限元计算分析的影响，提升了粗粒土缩尺效应的认识水平。

（2）提出了大坝－河谷/地基－库水全体系相互作用的跨尺度精细化动力分析方法，突破了传统弱非线性、弱耦合分析方法难以评价特高土石坝极限抗震能力的瓶颈。

（3）自主研发了高性能有限元分析软件系统，解决了特高土石坝地震损伤演化、渐进破坏全过程的分析难题，显著提高了大规模三维弹塑性动力分析效率。

（4）重现了强震作用下特高土石坝损伤演化和渐进破坏全过程，精准定位了堆石体和防渗体的抗震薄弱区域，揭示了特高土石坝堆石体和防渗体破坏模式及机理，量化并验证了多项抗震措施的有效性，为强震区特高土石坝抗震设计优化提供了依据。

（5）提出了震陷率、坝坡滑移量等特高土石坝不溃坝量化评价指标，为特高土石坝极限抗震能力评价提供了可操作依据。

本课题成果在RM（在建世界最高心墙坝）、大石峡（在建世界最高面板坝）、两河口（已建国内最高心墙坝）、猴子岩、阿尔塔什（已建深厚覆盖层上世界最高面板坝）、拉哇、去学（已建世界最高沥青心墙坝）等重要水利水电工程上得到应用，社会经济效益显著，具有广泛推广应用的前景。

参考文献：

[1] 陈厚群. 汶川地震后对大坝抗震安全的思考[J]. 中国工程科学, 2009, **11**(6): 44－53. (CHEN Hou-qun. Consideration on seismic safety of dams in China after the Wenchuan Earthquake[J]. Engineering Sciences, 2009, **11**(6): 44－53. (in Chinese))

[2] 陈生水, 霍家平, 章为民. “5.12”汶川地震对紫坪铺混凝土面板坝的影响及原因分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(6): 795－801. (CHEN Sheng-shui, HUO Jia-ping, ZHANG Wei-min. Analysis of effects of “5.12” Wenchuan earthquake on zipingpu concrete face rock-fill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(6): 795－801. (in Chinese))

[3] ZOU D G, XU B, KONG X J, et al. Numerical simulation of the seismic response of the Zipingpu concrete face rockfill dam during the Wenchuan earthquake based on a generalized plasticity model[J]. Computers and Geotechnics, 2013, **49**: 111－122.

[4] 孔宪京, 邹德高. 紫坪铺面板堆石坝震害分析与数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (KONG Xian-jing, ZOU De-gao. The Seismic Damage Analysis and Numerical Simulation of Zi Pingpu CFRD[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))

[5] 孔宪京. 混凝土面板堆石坝抗震性能[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (KONG Xian-jing. Seismic Performance of Concrete-Faced Rockfill Dam[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))

[6] 孔宪京, 邹德高. 高土石坝地震灾变模拟与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016. (KONG Xian-jing, ZOU De-gao. The Seismic Disaster Simulation and Engineering Application of High Rockfill Dams[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))

[7] 水电工程水工建筑物抗震设计规范: NB 35047—2015[S]. 2015. (Code for Seismic Design of Hydraulic Structures of Hydropower Project: NB 35047—2015[S]. 2015. (in Chinese))

[8] ZOU D G, LIU X Y, LIU J M, et al. A torsional vibration device for shear wave velocity measurement of coarse grained soils[J]. Measurement, 2019, **148**: 106972.

[9] LIU X Y, ZOU D G, LIU J M, et al. Experimental study to evaluate the effect of particle size on the small strain shear modulus of coarse-grained soils[J]. Measurement, 2020, **163**: 107954.

[10] LIU X Y, ZOU D G, LIU J M, et al. A gradation-dependent particle shape factor for characterizing small-strain shear modulus of sand-gravel mixtures[J]. Transportation Geotechnics, 2021, **28**: 100548.

[11] LIU X Y, ZOU D G, LIU J M, et al. Predicting the small strain shear modulus of coarse-grained soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, **141**: 106468.

[12] 孔宪京, 刘京茂, 邹德高. 堆石料尺寸效应研究面临的问题及多尺度三轴试验平台[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(11):

1941－1947. (KONG Xian-jing, LIU Jing-mao, ZOU De-gao. Scale effect of rockfill and multiple-scale triaxial test platform[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(11): 1941－1947. (in Chinese))

[13] 孔宪京, 宁凡伟, 刘京茂, 等. 基于超大型三轴仪的堆石料缩尺效应研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(2): 255－261. (KONG Xian-jing, NING Fan-wei, LIU Jing-mao, et al. Scale effect of rockfill materials using super-large triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(2): 255－261. (in Chinese))

[14] 宁凡伟. 基于超大型三轴仪的筑坝粗粒料缩尺效应研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020. (NING Fan-wei. Research on the Scale Effect of Coarse Grained Materials Based on Super Large Triaxial Apparatus[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese))

[15] 宁凡伟, 孔宪京, 邹德高, 等. 筑坝材料缩尺效应及其对阿尔塔什面板坝变形及应力计算的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(2): 263－270. (NING Fan-wei, KONG Xian-jing, ZOU De-gao, et al. Scale effect of rockfill materials and its influences on deformation and stress analysis of Aertashi CFRD[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(2): 263－270. (in Chinese))

[16] LIU J M, ZOU D G, KONG X J. Three-dimensional scaled memory model for gravelly soils subject to cyclic loading[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2018, **144**(3): 04018001.

[17] LIU J M, ZOU D G, KONG X J. A two-mechanism soil-structure interface model for three-dimensional cyclic loading[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2020, **44**(15): 2042－2069.

[18] QU Y Q, ZOU D G, KONG X J, et al. Seismic Damage performance of the steel fiber reinforced face slab in the concrete-faced rockfill dam[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, **119**: 320－330.

[19] QU Y Q, ZOU D G, CHEN K, et al. Three-dimensional refined analysis of seismic cracking and anti-seismic measures performance of concrete face slab in CFRDs[J]. Computers and Geotechnics, 2021, **139**: 104376.

[20] QU Y Q, ZOU D G, KONG X J, et al. Seismic cracking evolution for anti-seepage face slabs in concrete faced rockfill dams based on cohesive zone model in explicit SBFEM-FEM frame[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, **133**: 106106.

[21] 余 翔, 孔宪京, 邹德高, 等. 覆盖层上土石坝非线性动力响应分析的地震波动输入方法[J]. 岩土力学, 2018, **39**(5): 1858－1866, 1876. (YU Xiang, KONG Xian-jing, ZOU De-gao, et al. Seismic wave input method for nonlinear dynamic analysis of earth dam built on overburden[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(5): 1858－1866, 1876. (in Chinese))

[22] 余 翔, 孔宪京, 邹德高, 等. 土石坝－覆盖层－基岩体系动力相互作用研究[J]. 水利学报, 2018, **49**(11): 1378－1385, 1395. (YU Xiang, KONG Xian-jing, ZOU De-gao, et al. Study on the dynamic interaction of earth dam-overburden-bedrock system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, **49**(11): 1378－1385, 1395. (in Chinese))

[23] 孔宪京, 周晨光, 邹德高, 等. 高土石坝-地基动力相互作用的影响研究[J]. 水利学报, 2019, **50**(12): 1417－1432. (KONG Xian-jing, ZHOU Chen-guang, ZOU De-gao, et al. Influence of the dynamic interaction between high rockfill dam and foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, **50**(12): 1417－1432. (in Chinese))

[24] XU H, ZOU D G, KONG X J, et al. Error study of Westergaard's approximation in seismic analysis of high concrete-faced rockfill dams based on SBFEM[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, **94**: 88－91.

[25] 许 贺, 邹德高, 孔宪京, 等. 基于SBFEM的面板坝与可压缩库水动力耦合弹塑性分析方法[J]. 水利学报, 2018, **49**(11): 1369－1377. (XU He, ZOU De-gao, KONG Xian-jing, et al. Dynamic coupling elasto-plastic analysis method for CFRD and compressible reservoir water based on SBFEM[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, **49**(11): 1369－1377. (in Chinese))

[26] XU H, ZOU D G, KONG X J, et al. A nonlinear analysis of dynamic interactions of CFRD-compressible reservoir system based on FEM-SBFEM[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, **112**: 24－34.

[27] 许 贺, 邹德高, 孔宪京. 基于FEM-SBFEM的坝-库水动力耦合简化分析方法[J]. 工程力学, 2019, **36**(12): 37－43. (XU He, ZOU De-gao, KONG Xian-jing. A simplified dam-reservoir dynamic coupling analysis method based on fem-sbfem[J]. Engineering Mechanics, 2019, **36**(12): 37－43. (in Chinese))

[28] 许 贺. 高面板堆石坝与库水系统动力流固耦合分析方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019. (XU He. Study on Dynamic Coupling Analysis Method of High CFRD and Reservior System[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese))

[29] CHEN K, ZOU D G, KONG X J, et al. A novel nonlinear

solution for the polygon scaled boundary finite element method and its application to geotechnical structures[J]. Computers and Geotechnics, 2017, **82**: 201－210.

[30] CHEN K, ZOU D G, KONG X J. A nonlinear approach for the three-dimensional polyhedron scaled boundary finite element method and its verification using Koyna gravity dam[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, **96**: 1－12.

[31] 陈　楷, 邹德高, 孔宪京, 等. 多边形比例边界有限单元非线性化方法及应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, **51**(10): 1996－2004, 2018. (CHEN Kai, ZOU De-gao, KONG Xian-jing, et al. Novel nonlinear polygon scaled boundary finite element method and its application[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, **51**(10): 1996－2004, 2018. (in Chinese))

[32] ZOU D G, CHEN K, KONG X J, et al. An enhanced octree polyhedral scaled boundary finite element method and its applications in structure analysis[J]. Engineering Analysis With Boundary Elements, 2017, **84**: 87－107.

[33] CHEN K, ZOU D G, KONG X J, et al. An efficient nonlinear octree SBFEM and its application to complicated geotechnical structures[J]. Computers and Geotechnics, 2018, **96**: 226－245.

[34] CHEN K, ZOU D G, KONG X J, et al. Global concurrent cross-scale nonlinear analysis approach of complex CFRD systems considering dynamic impervious panel-rockfill material-foundation interactions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, **114**: 51－68.

[35] 孔宪京, 陈　楷, 邹德高, 等. 一种高效的 FE-PSBFE 耦合方法及在岩土工程弹塑性分析中的应用[J]. 工程力学, 2018, **35**(6): 6－14. (KONG Xian-jing, CHEN Kai, ZOU De-gao, et al. An efficient fe-psbfe coupled method and its application to the elasto-plastic analysis of geotechnical engineering structures[J]. Engineering Mechanics, 2018, **35**(6): 6－14. (in Chinese))

[36] 陈　楷. 基于比例边界有限元的岩土工程精细化分析方法及应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2019. (CHEN Kai. Research on Technique and Application in Refined Analysis of Complicated Geotechnical Engineering Structures Based on Scaled Boundary Finite Element Method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese))

[37] 邹德高, 陈　楷, 刘　锁, 等. 非线性比例边界有限元在面板坝分析中的应用[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, **41**(3): 11－18. (ZOU De-gao, CHEN Kai, LIU Suo, et al. Application of nonlinear scaled boundary polygon element method in analysis of concrete face rockfill dam[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, **41**(3): 11－18. (in Chinese))

[38] 邹德高, 陈　楷, 余　翔, 等. 基于跨尺度精细方法的面板坝面板损伤演化尺寸效应分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, **41**(6): 36－42. (ZOU De-gao, CHEN Kai, YU Xiang, et al. Size effect analysis of face slab damage evolution for high concrete face dam under earthquakes based on cross-scale fine method[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, **41**(6): 36－42. (in Chinese))

[39] LIU G R, GU Y T. A point interpolation method for two-dimensional solids[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001, **50**(4): 937－951.

[40] LIU G R, GU Y T. Comparisons of two meshfree local point interpolation methods for structural analyses[J]. Computational Mechanics, 2002, **29**(2): 107－121.

[41] 邹德高, 龚　瑾, 孔宪京, 等. 基于无网格界面模拟方法的面板坝防渗体跨尺度分析[J]. 水利学报, 2019, **50**(12): 1446－1453, 1466. (ZOU De-gao, GONG Jin, KONG Xian-jing, et al. The cross-scale analysis of concrete-face rock-fill dam anti-seepage structure based on the simulation of meshfree interface[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, **50**(12): 1446－1453, 1466. (in Chinese))

[42] GONG J, ZOU D G, KONG X J, et al. An extended meshless method for 3D interface simulating soil-structure interaction with flexibly distributed nodes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, **125**: 105688.

[43] GONG J, ZOU D G, KONG X J, et al. A non-matching nodes interface model with radial interpolation function for simulating 2D soil–structure interface behaviors[J]. International Journal of Computational Methods, 2021, **18**(1): 2050023.

[44] GONG J, ZOU D G, KONG X J, et al. A coupled meshless-SBFEM-FEM approach in simulating soil-structure interaction with cross-scale model[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, **136**: 106214.

[45] GONG J, ZOU D G, KONG X J, et al. An approach for simulating the interaction between soil and discontinuous structure with mixed interpolation interface[J]. Engineering Structures, 2021, **237**: 112035.

[46] 屈永倩. 面板堆石坝地震损伤演化−破坏分析方法与应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020. (QU Yong-qian.

Research on Method and Application of Seismic Damage Evolution-Failure on Concrete Faced Rockfill Dam[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese))

[47] HILLERBORG A, MODÉER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. Cement and Concrete Research, 1976, **6**(6): 773 – 781.

[48] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, **124**(8): 892 – 900.

[49] 邹德高, 孔宪京, 刘京茂, 等. 高土石坝极限抗震能力评价量化指标研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2022. (ZOU De-gao, KONG Xian-jing, LIU Jing-mao, et al. Criteria for ultimate aseismic capacity of high rockfill dam[J]. Science China Technological Science, 2022. (in Chinese))

[50] GONG J, ZOU D G, KONG X J, et al. The simulation of high compressive stress and extrusion phenomenon for concrete face slabs in CFRDs under strong seismic loads[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, **147**: 106792.

[51] 孔宪京, 邹德高, 陈 楷. 比例边界有限元在岩土工程中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2022. (KONG Xian-jing, ZOU De-gao, CHEN Kai. Research on Technique and Application in Refined Analysis of Complicated Geotechnical Engineering Structures Based on Scaled Boundary Finite Element Method[M]. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese))

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年，是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办，国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿，倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿，并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊，并在建筑类核心期刊中位于前列；本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”（中国科技核心期刊）及“中国科技论文与引文数据库”收录；本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录；本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录；本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址（www.cgejournal.com）全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金和油气资源等行业中从事岩土力学与岩土工程专业的科研、设计、施工、监理和学习人员。

本刊为月刊，A4 开本，双栏排版，192 页，每月中旬出版，每期定价 40 元，全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 – 4548，国内统一刊号 CN 32 – 1124/TU，国内发行代号 28 – 62，国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购，也可在编辑部订购（不另收邮费）。编辑部订购地址：南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部；邮编：210024；联系电话：025-85829534，85829543，85829553，85829556；传真：025-85829555；E-mail: ge@nhri.cn。

（本刊编辑部）

DOI：10.11779/CJGE202207012 “十三五”国家重点研发计划项目

特大滑坡实时监测预警与技术装备研发

朱 武[1]，张 勤*[1]，朱建军[2]，黄观文[1]，王彦平[3]，朱鸿鹄[4]，胡 伟[5]，胡 俊[2]

(1. 长安大学地质工程与测绘学院，陕西 西安 710054；2. 中南大学地球科学与信息物理学院，湖南 长沙 410083；3. 北方工业大学信息学院，北京 100144；4. 南京大学地球科学与工程学院，江苏 南京 210023；5. 成都理工大学环境与土木工程学院，四川 成都 610059)



摘 要：特大滑坡灾害具有体量大、隐蔽性强、突发性强、破坏性强的明显特点，一旦发生将带来严重的人民生命财产损失。实施特大滑坡监测预警对防灾减灾至关重要。与不断创新发展的国际先进技术相比，中国在特大滑坡监测预警领域存在监测装备精度低、成本高等问题，难以实现实时动态跟踪和精准监测预警。基于此，为提升我国特大滑坡灾害防灾减灾水平，在“十三五”国家重点研发计划“特大滑坡实时监测预警与技术装备研发”专项的支持下，项目组突破了滑坡动态跟踪、实时监测、精准预警等关键核心技术，研发了低成本、大视场、智能化、高精度的滑坡实时监测装备，构建了多传感集成的滑坡实时监测预警系统，成功预警多起滑坡事件，实现人员零伤亡和财产零损失，显著提升了中国滑坡灾害防灾减灾水平。

关键词：特大滑坡；动态跟踪；实时监测；精准预警

中图分类号：TU42 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2022)07－1341－10

作者简介：朱 武(1982—)，男，教授，博士生导师，现任长安大学地学与卫星大数据中心副主任，科技部国家遥感中心-地质灾害研究部副主任，中国岩石力学与工程学会分会理事。长期从事地质灾害识别和监测研究，主持包括国家自然科学基金、国家重点研发计划子课题等国家级项目 7 项，作为项目核心骨干参与“黄土高原重大工程灾变机理与防控”和“川藏铁路重大灾害风险识别与预测”国家自然科学基金重大项目。获省部级奖励 2 项，发表学术论文 80 余篇，其中 SCI 检索论文 50 余篇，授权发明专利 15 项。E-mail: zhuwu@chd.edu.cn。

Real-time monitoring and early warning technology for huge landslides

ZHU Wu[1], ZHANG Qin[1], ZHU Jian-jun[2], HUANG Guan-wen[1], WANG Yan-ping[3], ZHU Hong-hu[4], HU Wei[5], HU Jun[2]

(1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China; 3. School of Information Science and Technology, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 4. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 5. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The huge landslide will bring severe losses of people's lives and properties due to its characteristics of large volume, strong concealment, strong abruptness and strong destructiveness. The real-time monitoring and early warning of the huge landslide is critical for disaster prevention and mitigation. Comparisons with the international technologies suggest that the current monitoring equipments for landslides are difficult to realize the tracing and real-time monitoring. In order to improve the level of disaster prevention and mitigation, the National Key Research and Development program “Real-time monitoring and early warning technology for huge landslides” was approved during the 13th Five-Year Plan period. The monitoring equipments for landslides with low-cost, large field of view, intelligence, high-precision have been produced through the researches on the dynamic tracking, real-time monitoring and early warning of landslides. A real-time monitoring and early warning system with multi-sensors is constructed. This system has successfully warned several landslide events, which leads to the zero casualties and zero-property losses. The program improves the level of disaster prevention and mitigation of landslides.

Key words: huge landslide; dynamic trackng; real-time monitoring; early warning

基金项目：国家重点研发计划项目（2018YFC1505100）
收稿日期：2022－03－05
*通信作者（E-mail: zhangqinle@263.net.cn）

0 引 言

为贯彻落实党中央、国务院防灾减灾救灾工作重大部署,“十三五”期间,科技部会同相关部门和地方,共同制定了国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项。2018 年 12 月,“特大滑坡实时监测预警与技术装备研发”(2018YFC1505100)项目正式获批立项,对应指南“重大地质灾害快速识别与风险防控”。该项目由长安大学牵头,联合中南大学、北方工业大学、南京大学、成都理工大学、中国科学院空天信息创新研究院、大连理工大学等 9 家单位组建项目团队,共同开展特大滑坡实时监测预警技术与装备研发。经过三年的科研攻关,项目组研制出北斗变形监测、便携式应急监测、自组网实时通信、地基大视场合成孔径雷达(SAR)、地下多场传感等滑坡实时监测装备 8 套,研制出空天遥感动态跟踪、多源智能预警等系统平台 5 套,构建起特大滑坡“动态跟踪—实时监测—精准预警”的技术体系,实时获取多层次多尺度滑坡关键监测指标,实现对特大滑坡的动态精准预警。目前,项目组在陕西、四川、重庆、云南、贵州、甘肃等 13 个省(自治区、直辖市)建有滑坡监测预警示范区,在西北黄土滑坡、三峡库区滑坡、西南岩溶滑坡等典型特大滑坡区开展监测预警示范,成功预警 7 起滑坡事件,显著提升了中国滑坡灾害的防灾减灾水平。本文就项目的研究背景、研究内容、主要创新成果,以及成果的应用情况等作介绍。

1 背景及国内外研究现状

自“十二五”和“十三五”防灾减灾计划实施以来,中国在滑坡监测和预警领域取得了显著进展,有力支撑了从国家到地方各级政府应对滑坡灾害的能力。然而,由于中国滑坡灾害分布十分广泛,每年特大滑坡灾害依然频发,造成了严重的人民生命财产损失。实施特大滑坡监测预警对防灾减灾至关重要。与不断创新发展的国际先进技术相比,中国在特大滑坡监测和预警领域仍有较大差距,存在监测装备适应性差、精度低、成本高等问题,难以实现实时跟踪监测,及时识别并精准预警水平低,导致总体先进性不足。与本项目相关的国内外研究现状及趋势分述如下。

(1)空天多源遥感技术在区域滑坡动态跟踪方面已进入应用阶段,但复杂环境下其适应能力差,无法满足特大滑坡快速动态跟踪需求。区域滑坡具有空间分布复杂、局部差异大的特点,往往经历“早期蠕动—加速变形—快速滑动”随时间而变化的复杂过程,对区域地表进行动态跟踪是实现及时捕捉不同滑坡变化并适时开展监测预警的首要前提[1]。空天多源遥感技术具有大范围、高精度、高分辨率的特点,在区域滑坡动态跟踪上具有不可替代的作用,并开始走向应用阶段。然而在特大滑坡复杂环境下(地质条件复杂、植被茂密、地形陡峭等),常规空天多源遥感技术存在监测精度低、快速探测与动态跟踪自动化程度低等问题,亟需开展复杂环境下的空天多源遥感数据融合的特大滑坡动态跟踪技术研究和突破。

(2)滑坡地表矢量监测装备自动化和专业化程度不断提升,但仍无法兼容低成本、小型化和高精度,监测装备的智能化程度也远不成熟,限制了在滑坡监测中的大规模应用推广。随着传感器与电子自动化技术的发展,近年来国内外滑坡地质灾害监测的自动化与专业化程度迅速提升,成为滑坡成因机理和监测预警研究突破的重要技术支撑,但现有自动化监测设备存在成本高、体积大、智能化程度不足、采样周期长、长期稳定性低、安装维护难度大等实际问题[2]。针对复杂山区特大滑坡的监测预警技术的现实需求,亟待微型化、低成本、高精度、易部署的滑坡三维矢量变形监测终端、自组织自愈混合组网通信技术、以及便携式智能化滑坡应急监测预警装备研制。

(3)地基 SAR 滑坡监测已得到实际应用检验,但适用于特大滑坡实时监测技术仍处于探索阶段,亟待研发大视场地基 SAR 特大滑坡三维变形监测技术及装备。地基 SAR 凭借其全天时全天候、大面积非接触测量、毫米级实时监测精度等优势成为滑坡监测预警领域的研究热点。经过近二十年的系统研制和应用检验,地基 SAR 在滑坡监测预警领域的技术适应性已经得到充分应用检验和行业用户认可[3]。然而,现有地基 SAR 系统监测视场范围有限、只能获得雷达视线方向一维形变、不能实时获取监测场景三维地形,难以满足特大滑坡复杂三维立体场景三维变形要求,亟待研发适用于特大滑坡实时监测预警的地基大视场 SAR 三维变形监测技术和先进装备。

(4)滑坡地下监测技术已在工程中逐步推广应用,但是多场信息实时获取技术仍处在萌芽期,亟待研发地下多源多场传感集成的特大滑坡实时监测技术和装备。最近二十年来,滑坡原位监测技术水平不断提高,并逐渐向实时采集和无线传输方向发展,在实现滑坡准确预警预报方面发挥了重要的作用。对于特大滑坡,其稳定性演化规律和触发机理复杂,影响因素多,需要实时获取地下渗流场、应力场、深部变形场等多场信息,常规点式电测技术无法在低漂移、多参量、全覆盖、快速响应等方面满足这一监测需求[4]。

滑坡多场监测技术的研发工作由于涉及多传感器、多系统协同工作，在国际上仍处在探索阶段，监测精度、量程和长期稳定性等指标也亟待完善。

（5）多源异构信息协同的滑坡预警已成发展趋势，但数据同化集成技术尚待突破，融合地质模型的数据驱动滑坡预警模型研究迫在眉睫。基于多源异构监测数据进行滑坡预警是目前研究热点。但是，目前方法存在两方面的问题，一是多源监测数据融合缺乏统一的数据标准，并且存在数据实时性不够的问题，亟需研究多源数据融合标准和实时汇聚理论。二是滑坡预警主要还是基于数学方法分析地表变形监测数据，这类方法脱离了岩土体自身变形这一最根本要素，导致滑坡预警成功率较低，研究融合地质模型的数据驱动滑坡预警模型显得迫在眉睫。

综上所述，面向国家重大需求，针对国内外研究现状，亟需研发特大滑坡高精度实时监测先进装备，建立无缝实时监测技术及精准实时预警方法，形成现代化滑坡智能监测预警体系，从而显著提升中国对滑坡地质灾害的防治水平，实现地区和社会的可持续发展。

2　研究目标、内容及关键科学技术问题

2.1　研究目标及内容

围绕指南要求，项目针对中国在特大滑坡监测装备适应性差、精度低、成本高的问题，突破关键核心技术，研发高精度、高稳定性、智能化、便携的滑坡实时监测装备，推动防灾减灾专用仪器设备的国产化和现代化；针对滑坡实时跟踪监测存在监测手段单一、监测精度低的技术瓶颈，基于研发的先进监测装备，构建空天地内一体化立体监测网络，实时获取多层次多尺度滑坡关键监测指标；针对目前滑坡实时动态预警准确性低的问题，研究多传感监测数据协同处理技术，建立基于长时间序列监测数据自学习自校正实时预警模型和监测预警云平台，实现特大滑坡动态精准预警，并在三峡库区开展典型重大滑坡灾害监测预警示范。

项目下设五大任务目标，即对应五大课题，课题名称及承担单位、负责人情况如表 1 所示。课题间逻辑关系如图 1 所示。

表 1　课题分工设置

Table 1 Arrangement of tasks

课题序号	课题名称	承担单位	课题负责人
1	空天多源遥感数据融合的特大滑坡三维动态跟踪技术与系统	中南大学	朱建军
2	地表三维矢量变形实时智能监测技术与装备	长安大学	张　勤
3	地基大视场 SAR 特大滑坡亚毫米级实时监测技术与装备	北方工业大学	王彦平
4	地下多源多场传感集成的特大滑坡实时监测技术与装备	南京大学	朱鸿鹄
5	多源异构信息融合的特大滑坡实时预警系统与典型区应用示范	成都理工大学	胡　伟

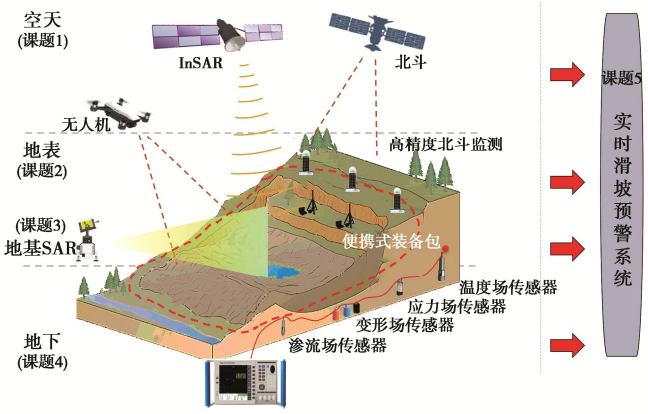


图 1　课题之间的逻辑关系

Fig. 1 Logical relationship of tasks

2.2　关键科学技术问题

围绕任务目标，“特大滑坡实时监测预警与技术装备研发”项目着重解决 5 个关键技术问题。

（1）复杂环境下 InSAR 毫米级三维变形动态提取

对区域地表进行动态跟踪是实现特大滑坡监测预警及稳定性分析的首要前提，可为多源传感的实时监测提供有效靶区。InSAR 技术在滑坡地表变形监测方面展现出巨大潜力，但在特大滑坡复杂环境，失相干现象严重，难以实现区域地表高精度动态跟踪监测。因此，最大限度提高 InSAR 监测目标的相干性，获取滑坡区大范围、高精度、高时空分辨率的三维地表变形，是实现滑坡动态跟踪的关键。

（2）低成本高精度地面实时监测技术

现有自动化监测设备成本高、体积大、安装维护难度大，难以满足复杂山区特大滑坡广泛布点的现实需求，需要研发微型化、低成本、高精度、易部署的滑坡三维矢量变形实时监测装备，其中高精度定位芯片的集成度和功耗是关键技术问题。项目将基于物联网思维，采用轻设备、重云端的理念，探索一种基于“云+端”思想的小型化低成本监测装备，突破高集成度、低功耗、低成本的瓶颈。

（3）特大滑坡地基大视场 SAR 三维变形实时数据获取技术

利用地基 SAR 技术获取特大滑坡大视场三维变形数据，目前是仍属于技术空白。在保证精度的同时

如何快速实时构造三维成像所需的二维合成孔径和实现三维变形反演的多角度联合观测，是数据获取技术和雷达装备研制所要解决的核心问题。研究地基大视场 SAR 数据获取方法，建立系统全链路误差模型，突破高相位稳定性微小型雷达双收双发、雷达收发采集与扫描运动高精度同步、高集成度轻量化即插即用系统集成等关键技术，是地基大视场 SAR 三维变形监测装备研制的关键。

（4）特大滑坡地下多源多场信息一体化技术

由于特大滑坡体量大、监测指标类别多，对地下多场信息进行实时监测将产生海量数据，如何对监测系统的分析效率进行优化，是项目面临的又一大挑战。项目将借助贝叶斯推断等特征提取方法，突破多传感器适配和信息融合的技术瓶颈，建立高速、高精度的传感器信号分布式处理策略，在此基础上结合模糊层次综合分析与时序模糊聚类等方法，构建基于特大滑坡的多源多场信息一体化平台，杜绝滑坡事件的漏报、误报。

（5）多源异构信息集成的滑坡动态预警

现有滑坡预警模型基本未考虑滑坡内在滑动机理，缺乏地质力学依据，导致滑坡预警成功率相对较低。如何建立基于滑动机理的滑坡预警模型，提高预警成功率是滑坡预警领域的关键技术问题之一。本研究拟从示范区滑坡机理入手，通过大型环剪试验和高速摩擦试验建立滑坡动力学模型；在此基础上，运用机器学习，整合挖掘试验数据和监测数据，建立数据驱动的滑坡变形预测预警模型。

3 主要创新成果

3.1 多源遥感融合的特大滑坡三维动态跟踪技术

在大区域范围内找到隐蔽着的“微小”滑坡隐患，是预测预警滑坡发生的首要前提。特大滑坡具有隐蔽性强、机理复杂、突发性强等特点，目前的识别技术无法快速精确定位滑坡隐患，为此项目组开展了多源遥感数据融合的特大滑坡早期识别研究。

（1）复杂山区环境下滑坡时序 InSAR 三维变形监测与动态探测

针对复杂山区环境下 InSAR 点目标密度低和观测精度低，难以实现特大滑坡高精度动态跟踪的难题，建立了面向滑坡区的 InSAR 毫米级三维变形动态提取理论。利用联合像素思想，提高了 InSAR 点目标观测密度；引入滑坡有限元模型，构建了符合滑坡孕育发展规律的 InSAR 三维地表变形函数模型[5]；研究了顾及状态方程的序贯平差理论，解决了多源异质几何及物理观测量的时空基准统一问题，实现了垂向精度优于 2 mm/a，水平向精度优于 5 mm/a 的三维变形动态获取[6]。图 2 为利用 InSAR 技术获取的三峡新铺滑坡三维形变速率。

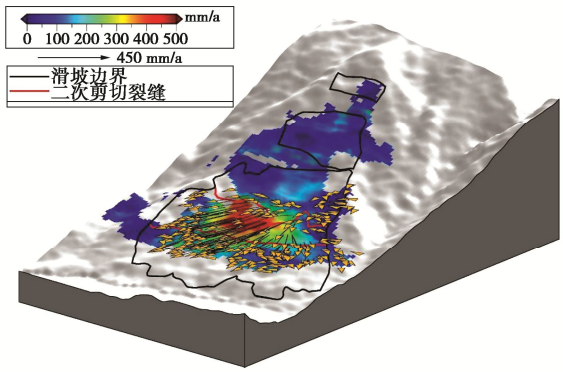


图 2 三峡新铺滑坡地表三维变形

Fig. 2 Three-dimensional deformation of Xinpu landslide in Three Gorges

（2）多源遥感数据融合的滑坡早期视觉认知模型

针对目前滑坡识别率较低的难题，构建了多源遥感数据融合的滑坡早期视觉认知模型。量化了滑坡隐患早期视觉解译标志和变形标志，挖掘了多源数据协同诊断滑坡的孕灾背景因子、变形量化因子、视觉识别因子；探索了孕灾背景因子、变形因子和视觉识别因子与不同规模、不同类型滑坡样本之间的耦合关系，构建了基于人工智能样本学习的滑坡自动探测模型；联合多源观测技术，利用数据挖掘分析灾害体变形的时空分布特征，建立了滑坡变形时空序列图，揭示了不同性质滑坡破坏模式、阶段与滑坡地表空间变形特征的关系。基于早期视觉认知模型，实现了特大滑坡快速自动化探测，将滑坡隐患识别率由 30%提高到 60%。

（3）多源遥感数据融合的滑坡动态监测与跟踪系统

为实现特大滑坡的快速识别和动态跟踪，以产品形态上“国产化、型谱化、跨平台”能力要求为原则，以“处理与入库—管理与发布—可视化应用”为技术主线，基于“微内核+外部插件”基础框架进行建设，采用数据层、平台层、服务层和应用层等四层架构模式，构建了具有高精度多源数据处理、信息融合、特征识别、信息共享与服务等能力的滑坡三维动态跟踪信息服务平台，如图 3 所示[7]。

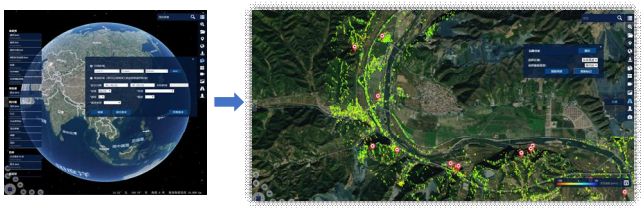


图 3 滑坡动态监测与跟踪系统

Fig. 3 Dynamic monitoring and tracking system for landslides

3.2　地表三维矢量变形实时智能监测技术与装备

获取滑坡瞬时（秒级）高精度（毫米级）的地表位移变化，明晰滑坡地表位移演化过程，是提前预警滑坡发生的重要手段。现有的装备存在监测参数单一、通讯实时性差、成本高、体积大、精度低等实际问题，限制了其进一步的推广应用，为此项目组研发了小型化、低成本、高精度、易部署的实时监测装备。

（1）小型化低成本毫米级北斗变形监测装备

现有北斗变形监测装备成本高、体积大、精度低，无法普适性推广。为此，项目组研制了小型化低成本毫米级北斗变形监测装备，实现了特大滑坡三维矢量实时监测，如图 4 所示。该装备突破了 22 纳米芯片工艺、射频基带解算一体化等技术难题，将北斗形变监测装备成本从原有的 5000 元降至 1000 元，体积从 300 cm^3 降至 100 cm^3，载波精度从 5 mm 提高至 1 mm，能够实时捕捉毫米级的滑坡位移变化，推动滑坡实时监测装备向普适化方向发展。

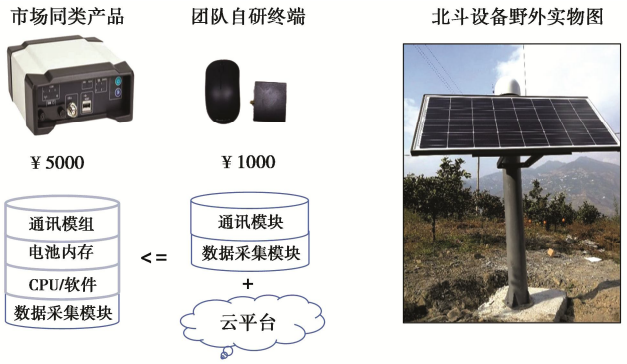


图 4　小型化低成本毫米级北斗变形监测装备

Fig. 4 Beidou monitoring equipments for deformation with small size, low cost and millimeter precision

（2）便携式滑坡灾害多参数应急监测装备包

为解决特大滑坡应急监测参数单一的问题，开展了多源传感数据的轻便化采集、集成与传输等关键技术研究，研制了集成雨量、温度、气压、裂缝等 8 类参数的便携式监测预警智能工具箱，实现了滑坡灾变（突变）过程的多参数、可配置、便携式快速应急监测预警，如图 5 所示。同时，攻关低功耗智能传感节点、无线组网、边缘计算网关、自适应变频智能感知等关键技术，实现滑坡灾变（突变）过程设备端的监测预警响应时间不低于 10 s。

（3）自组织自愈的无线传感混合组网即时通信装备

复杂山区环境下地形陡峭、植被茂密，通讯信号易受干扰，特大滑坡实时监测数据无法及时传出，导致预警不及时。为此，项目组研发了自组织自愈的无线传感网络混合组网即时通信技术及设备，通讯时间延迟小于 0.1 s，误码率小于 1%，如图 6 所示。该装备针对采集信号远距离传输易衰减等问题，突破了传统信号中继技术，引入了新式信号中继透传理念，实现了信号远距离采集和强抗干扰能力，解决了野外复杂环境下信号传输问题[8]。同时，开展了多功能接口扩展研究，突破了传统一对一信号采集技术，引入了一对多采集技术理念，实现了与便携式滑坡灾害多参数应急监测装备包的协同并用。

（4）北斗/GNSS 滑坡实时三维变形监测云平台

开展了北斗/GNSS 实时三维变形监测研究，并基于物联网思维建立了滑坡地表实时三维变形监测云平台，实现了地表监测终端的长期在线和连续智能化监测，如图 7 所示。针对北斗/GNSS 实时监测中基准站观测数据不连续，导致三维矢量变形解算精度大幅度降低，甚至监测中断的问题，创新性地提出了新型异步实时动态测量（RTK）算法，保证了滑坡变形监测的连续性[9]。针对北斗/GNSS 定位易受多路径、衍射等环境干扰，导致监测结果不可靠甚至不可用的问题，建立了基于测站地形周视图的环境模型，有效缓解了复杂环境下观测噪声对北斗/GNSS 实时监测产生的误差。研发了可以进行多元数据融合的智能化毫米级实时监测预警云平台，并提出了“云存储—云检核—云增强—云计算”的行业云平台数据处理模式，实现了三维矢量监测精度优于 3 mm，响应时间不低于 10 s。

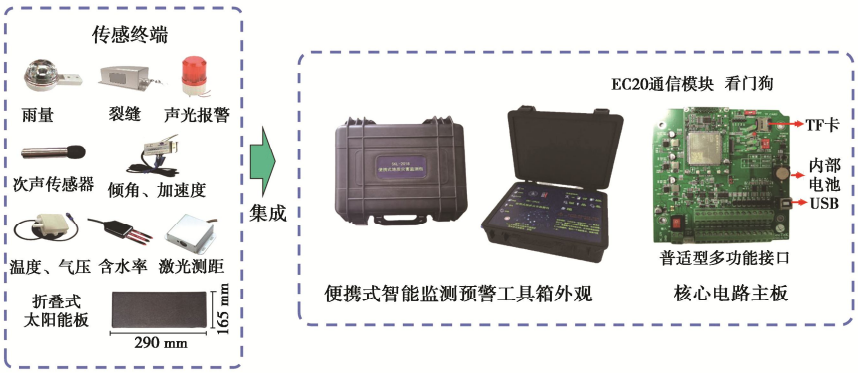


图 5　便携式滑坡灾害应急监测装备包

Fig. 5 Portable monitoring package for emergency disasters

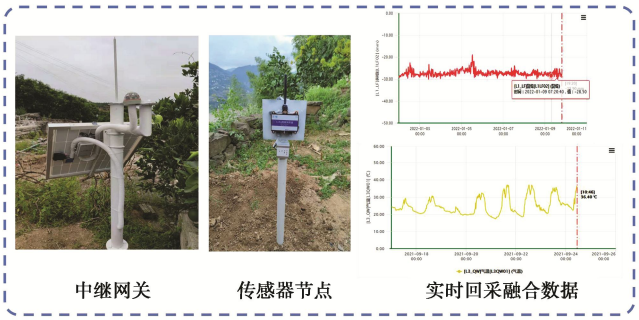


图 6 无线传感即时通信装备

Fig. 6 Wireless sensor instant communication equipments



图 7 北斗/GNSS 滑坡实时三维变形监测云平台

Fig. 7 Cloud platform of three-dimensional deformation monitoring with Beidou/GNSS equipments

3.3 地基大视场 SAR 特大滑坡亚毫米级实时监测技术与装备

利用地基 SAR 装备实时观测整个滑坡体，摸清滑坡整体和局部关键部位的变形信息，对研究滑坡发生机理、预警滑坡发生具有重要的意义。目前的地基 SAR 设备监测视场范围有限、只能获得一维方向的变化信息，难以满足特大滑坡的监测需求，为此项目组研发了适用于特大滑坡的地基大视场 SAR 三维变形监测技术和装备。

（1）地基大视场 SAR 变形监测技术及装备

面向特大滑坡大范围、三维立体实时监测的需求，突破了多相位中心旁瓣抑制系统设计技术和宽温长时间高稳定性的调频连续波雷达自校准快速收发系统技术，研发了地基大视场 SAR 实时变形监测装备，实现了三维地形和形变的一体化实时监测，如图 8 所示。该地基 SAR 装备最大作用距离 5 km，形变监测精度优于 0.1 mm，三维地形分辨率优于 2 m×2 m×0.5 m，监测视场由原来的 60° 扩大到 120°，实现了全天时全天候条件下大面积亚毫米级精度形变信息的实时获取，填补了大视场地基 SAR 高精度形变信息获取的技术空白。

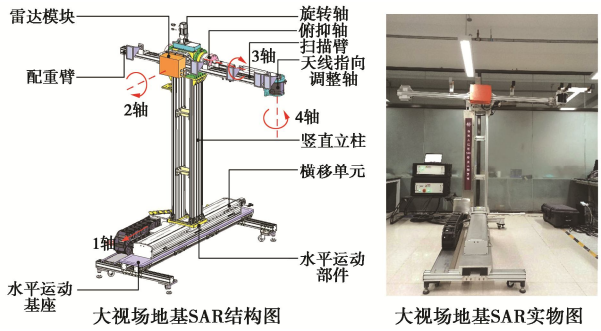


图 8 地基大视场 SAR

Fig. 8 Ground-based SAR with large field of view

（2）地基大视场 SAR 高精度实时成像与三维重建

为了利用研制的大视场地基 SAR 装备实时成像并快速提取三维变形，提出了悬臂扫描大视场快速成像和高精度地形自适应成像算法，解决了常规成像算法计算效率较低的问题，实现了特大滑坡的快速扫描成像；在此基础上，提出了基于多相位中心的地基圆周扫描三维成像旁瓣抑制方法，通过频谱稀疏的方式拓宽频谱抑制旁瓣以实现低旁瓣的三维 SAR 成像[10]；针对时域三维 SAR 成像方法计算量大的问题，提出圆周扫描地基 SAR 远场频域快速三维成像方法，兼顾了成像质量与监测效率（图 9）。

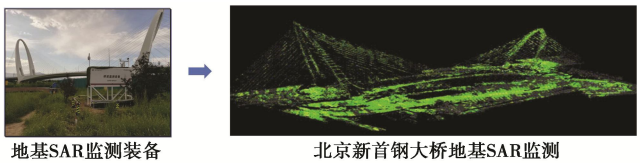


图 9 地基大视场 SAR 三维快速成像

Fig. 9 Three-dimensional fast imaging by using ground-based SAR

（3）星载和地基 SAR 联合估计三维地表变形

单个 InSAR 观测仅能获取视线向（LOS）形变，无法获取三维变形。通过联合星载和地基 SAR 观测结果，不需要引入额外的约束，即可获取准确的三维形变结果，便于揭示滑坡的真实形变情况。研究迭代最邻近算法寻找星载影像和地基影像之间的同名点，实现星载和地基 SAR 影像的高精度配准，解决三维空间中地基和星载高精度配准难题；联合升降轨和地基雷达视线方向的形变，通过地表应力应变模型和方差分量估计法迭代优化 3 个方向的观测量权值，发展顾及地基和星载雷达几何优化配置的三维地表变形约束模型以及基于方差分量估计的三维地表形变高精度反演模型，实现地基大视场 SAR 三维地表变形高精度反演[11]。图 10 为星载和地基 SAR 联合估计三峡新铺滑坡的三维地表变形。

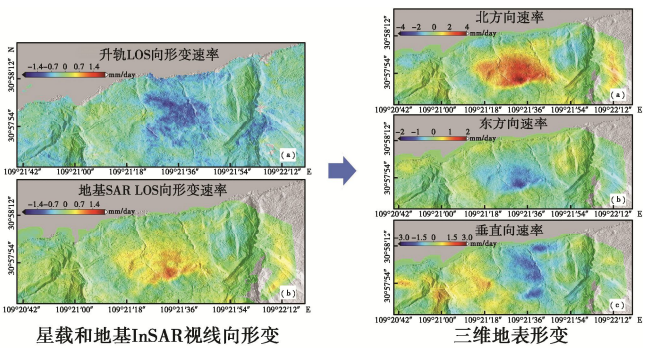


图 10 星载和地基 SAR 联合估计新铺滑坡三维变形

Fig. 10 Three-dimensional deformation by integrating ground-based and spaceborne SAR

3.4 地下多源多场传感集成的特大滑坡实时监测技术与装备

特大滑坡的稳定性演化规律和触发机理复杂，影响因素多，除了实时获取表层变形之外，实时获取隐藏于滑坡体内的地下渗流、应力、位移等变化信息，对滑坡预警同样具有重要的意义。目前的技术无法满足特大滑坡观测信息全覆盖、快速响应等方面的需求，为此项目组研发了适用于特大滑坡的地下信息实时监测技术和装备。

（1）滑坡渗流场全剖面动态感测技术及装备

为解决滑坡渗流场信息高精度、快速获取难题，提出了基于分布式温度传感（DTS）和光纤光栅（FBG）的岩土渗流监测技术，研制了全分布式和准分布式渗流场感测光缆，渗流速率监测精度可达 1%F.S，监测范围可达 2 km，实现特大滑坡动态渗流场实时高精度获取，如图 11 所示。

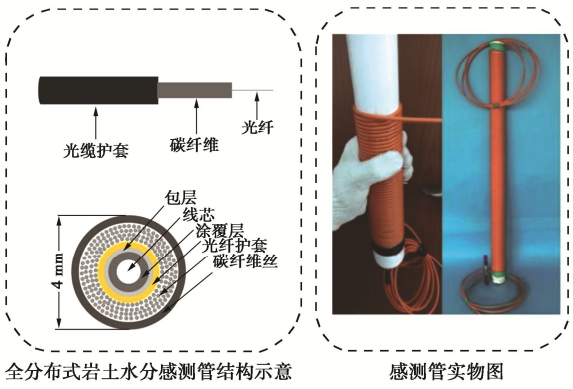


图 11 滑坡渗流场全分布式感测装备

Fig. 11 Fully distributed sensing equipments for seepage field of landslides

（2）滑坡三维应力场及灾变滑动力感测技术及装备

相比于传统岩土传感器，光纤传感器具有体积小、质量轻、抗电磁干扰、耐腐蚀和性能可靠等优点；MEMS 是一种内部结构一般为微米或纳米级的微型设备。将 MEMS 传感器与光纤光栅三维土压力盒结合能够有效输出土压力盒任意方向的正应力大小，实现埋入式微型三维土压力盒的偏移测量、精确定位的功能[12]。因此，项目组研发了一种基于 MEMS 的光纤光栅三维土压力盒，可高精度监测滑坡三维应力场，如图 12 所示。

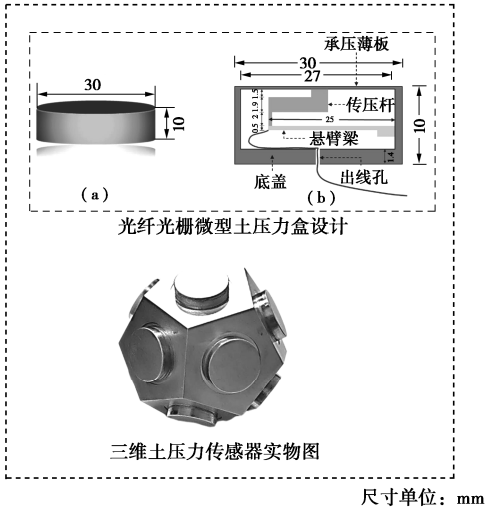


图 12 滑坡三维应力场监测装备

Fig. 12 Monitoring equipments for three-dimensional stress field of landslides

锚索现已成为边坡等岩土工程领域首选支护方法，然而在瞬时大量程灾变滑动力作用下，锚索极易出现索体损伤、性能紊乱等问题，相较于常用监测锚索应力状态的传感设备，光纤光栅锚索测力计具有抗干扰能力强、稳定性好等优势，此外在经过二次加工后其能够达到较大量程，可及时识别锚索失效风险。为此，团队开发了一种基于光纤光栅的灾变滑动力感测装备，可实现滑坡滑动力 0～3000 kN 监测，如图 13 所示。

（3）滑坡深部变形多源多向感测技术及装备

针对传统测斜仪在滑坡大变形作用下发生的剪切破坏问题，研究了滑坡深部变形感测及量程自适应技术，研制了适用于深部大变形监测的多源多向感测装备，如图 14 所示。研制了基于重力加速度的 MEMS 原位测斜传感器，监测精度达 0.1 mm，结合 RTU 可实现数据的远程传输采集。研制了基于霍尔原理的霍尔元件原位测斜传感器，角度测量范围 90°，实现了岩土体的非接触式大变形监测[13]。研制了光纤光栅原位测斜传感器，监测精度达 0.1 mm，角度测量范围为 90°，实现大变形监测。

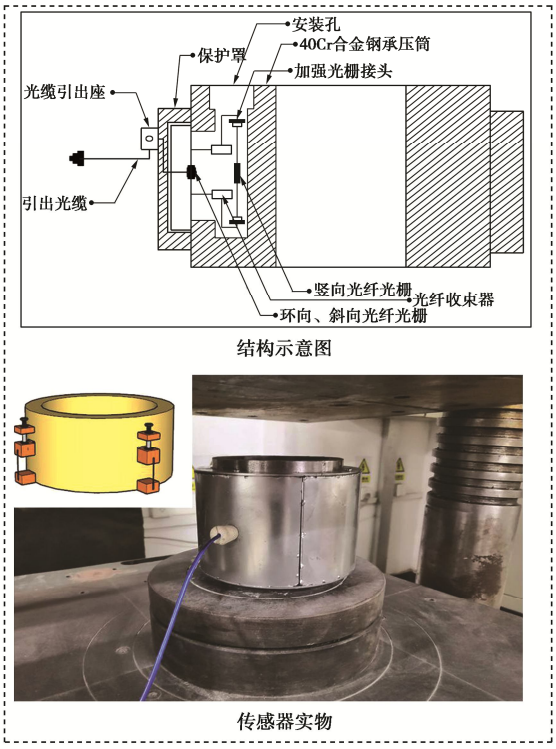


图 13 灾变滑动力感测装备

Fig. 13 Monitoring equipments for sliding force of landslides

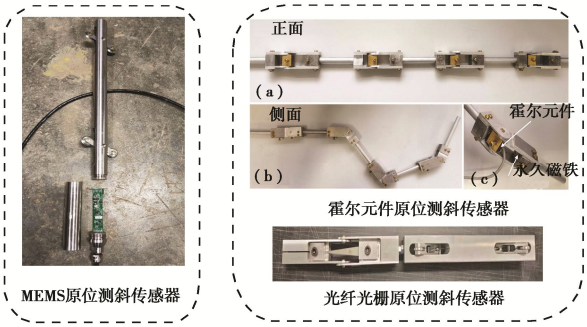


图 14 滑坡深部变形多源多向感测装备

Fig. 14 Multi-source and multi-directional monitoring equipments for deep deformation of landslides

(4)滑坡温度场时空分布高精度感测技术及装备

温度场通过影响土体中的相变、融沉、渗透等来改变滑坡体内部应力场与变形场，是滑坡监测中的重要参数。项目组融合了光纤布拉格光栅(FBG)、拉曼光时域反射测量（ROTDR）和热电偶测温技术，研发了高精度、高空间分辨率的光纤传感器；开展了滑坡温度场监测系统优化布设工法研究，攻克了滑坡数据漏检、传感器鲁棒性不高和安装工艺复杂等难题；基于物联网的感测信号解调、传输与处理，提高了监测数据的可靠性[14]。研发的温度场感测装备（图 15）监测精度优于 0.1℃，范围达 3 km，解决了滑坡体大范围、全分布、精细化温度获取难题。

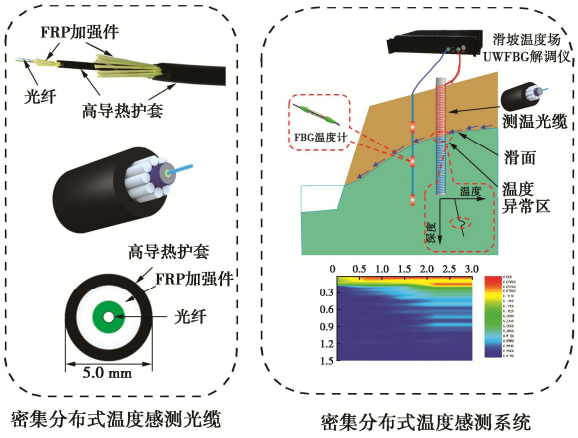


图 15 温度场感测装备

Fig. 15 Monitoring equipments for temperature field of landslides

4 成果应用情况及社会经济效益

项目组在在西北黄土滑坡、三峡库区滑坡、西南岩溶滑坡等典型特大滑坡区开展监测预警示范，成功预警 7 起滑坡事件，应用效果好，具有推广前景。图 16 为在三峡库区构建的实时监测网络。以三峡库区的新铺滑坡和甘肃黑方台黄土滑坡介绍成果应用情况。

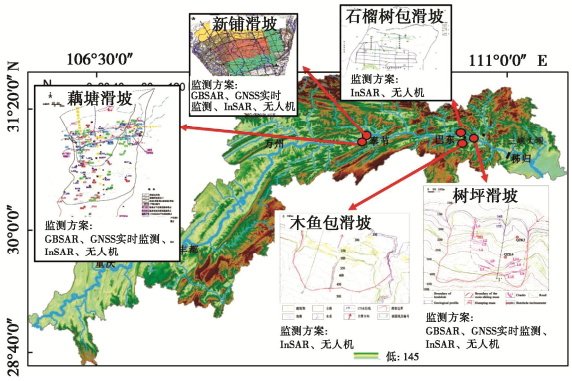


图 16 三峡库区 5 个示范区实时监测网络构建

Fig. 16 Real-time monitoring network for five demonstration areas in Three Gorges Reservoir area

4.1 三峡新铺特大滑坡实时监测预警

新铺滑坡位于重庆市奉节县长江南岸的安坪乡新铺村境内，滑坡区地处长江右岸。新铺滑坡为顺层—微切层特大型滑坡群，滑坡群平面形状似撮箕形，上窄下宽，滑坡前缘高程 81～85 m，后缘高程 810 m，为涉水滑坡。滑坡纵向长度约 2493 m，横向平均宽度约 1160 m，平均厚度 25 m，总面积 245×104 m^2，总体积 3998×104 m^3，主滑方向 348° 。滑坡滑动过程中受滑床基底岩性等多方面的因素控制，自下而上形成 3 个互有联系而又相对独立的滑坡体，即下二台滑坡（主滑坡）、上二台滑坡和大坪滑坡。为了掌握滑坡的实时动态变化，布设了天—空—地—内实时监测网

络，如图 17 所示。其中，天基 InSAR 监测结果显示新铺滑坡变形主要集中于前缘的下二台滑坡，其最大年变形速率约 50 mm/a。空基无人机结果显示下二台滑坡和上二台滑坡体地面出现不连续的裂缝及地面隆起。地表布设的 GNSS、裂缝计等，以及地下布设的渗流、温度、应力等传感，均通过无线通讯装备将数据传送至云端，对滑坡进行实时监测预警。图 18 为 GNSS 实时监测曲线。

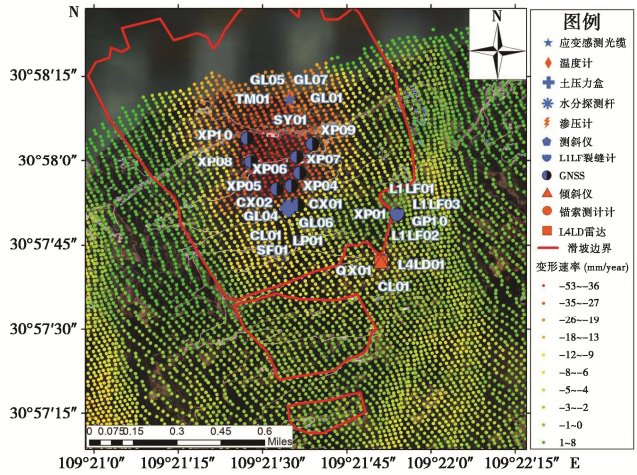


图 17　新铺滑坡实时监测网络

Fig. 17 Real-time monitoring network for Xinpu landslide

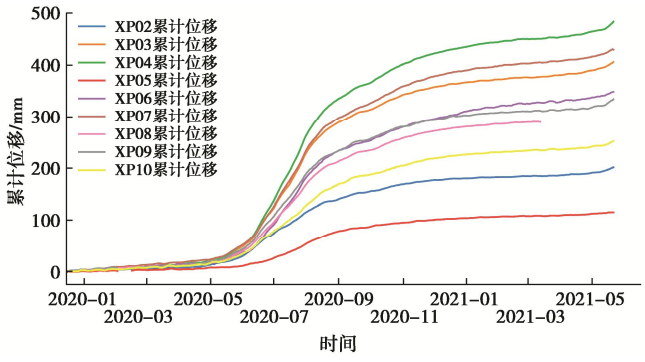


图 18　新铺滑坡 GNSS 实时监测

Fig. 18 GNSS monitoring results for Xinpu landslide

4.2　甘肃黑方台滑坡实时监测预警

黑方台位于甘肃省临夏州永靖县盐锅峡镇黄河北岸，是由黑台和方台组成的两个黄土台塬，黄土台塬面积 13.7 km^2。黑台位于方台的东侧，东西长 7 km，南北宽 2.5 km，属于黄河Ⅳ级阶地，是兰州西侧典型的黄土阶地。黑方台台面地形平坦，两个台塬中间隔着一条由北向南发育的虎狼沟。研究区内主要有主要 8 个行政村，包括了方台村、盐集村、新源村、朱王村、党川村、黄茨村、陈家村以及焦家村等，区内有 4 条高等级公路、一条专用铁路和一条规划兰合一级铁路，公路包括国道 309、兰永一级公路和折达公路等，研究区整体的交通条件较好。台上农田常年采用大水漫灌的方式浇地，每年平均灌溉量超过 500 万 m^3，受地形影响，地下水位聚集不散，台上部分区域地表下挖 1 m 即可出水，近年来黑方台边缘频繁发生滑坡，危害严重。

2021 年 01 月 27 日 20 时 53 分，甘肃黑方台发生黄土滑坡。依托项目研发的“高精度北斗地质灾害监测预警”平台捕捉到了滑坡处于临滑状态，提前 6 h 自动发出了红色预警，并以短信、微信和紧急电话方式通知了当地镇政府、镇地质灾害应急中心和村级干部，及时撤离了 200 余人，做好了相应的防范工作。由于提前发出了预警信息，本次滑坡未造成人员伤亡和财产损失。安装在滑坡体上的远程视频监测装置记录了滑坡灾害发生的全过程（图 19）。图 20 为高精度北斗地质灾害监测预警平台获取的三维位移时间序列。



图 19　2021 年 01 月 27 日甘肃黑方台滑坡视频

Fig. 19 Video of the landslide in Heifangtai, Gansu, which occurred on January 27, 2021

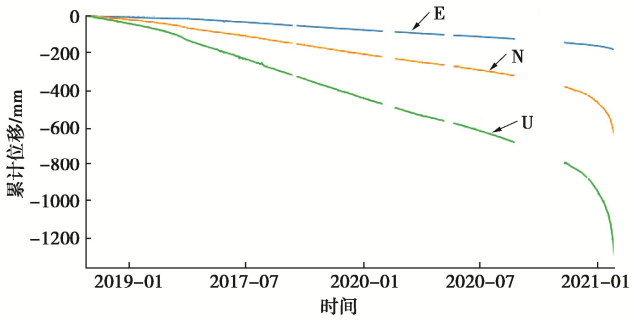


图 20　北斗监测装备实时获取的滑坡三维位移时间序列

Fig. 20 Three-dimensional deformation of Heifangtai landslide from Beidou observation

5　结　　语

面向特大滑坡实时监测预警的实际需求，按照“技术攻关—装备研制—系统开发—示范应用”全链路一体化研究思路，在滑坡动态跟踪、实时监测、精准预警等方面取得了系列创新成果，提升了我国滑坡监测预警技术和装备水平，具体体现在以下 4 个方面。

（1）创新理论体系：在多源遥感三维动态跟踪、地表和地下多参数高精度实时监测、大视场地基 SAR 三维变形实时获取、长时序监测数据精准预警等方面取得理论创新，拓展了中国在国际滑坡实时监测预警领域中的领先优势。

（2）突破技术瓶颈：以特大滑坡实时监测存在的诸多卡脖子技术为出发点，研制了北斗变形监测、地下多场传感等滑坡实时监测装备 8 套和空天遥感动态跟踪、多源智能预警等系统平台 5 套，构建了特大滑坡“动态跟踪—实时监测—精准预警”的技术体系，显著提升了滑坡灾害防灾减灾技术水平。

（3）服务国家需求：项目成果应用于黄河流域、川藏地区、长江经济带等滑坡灾害易发区，服务于黄河流域生态保护与高质量发展、川藏铁路等国家重大战略和工程。

（4）创新人才队伍：项目凝聚了一支居国际学术前沿、为国家重大战略决策服务的科研人才队伍，建立了具有国际领先水平的研发基地。

本项目发表第一标注学术论文 109 篇，其中 SCI 论文 70 篇；授权发明专利 48 项，软件著作权 21 项；向科技部、省政府等相关部门提交科技简报、专报 6 份；培养国家级青年人才 5 人；项目成果已经推广应用至全国 13 个地质灾害严重的省份，先后 7 次成功预警滑坡发生，有效地降低了财产损失，避免了人员伤亡。

参考文献：

[1] ZHANG J M, ZHU W, CHENG Y Q, et al. Landslide detection in the Linzhi–ya’an section along the Sichuan–Tibet railway based on InSAR and hot spot analysis methods[J]. Remote Sensing, 2021, **13**(18): 3566.

[2] 张 勤, 黄观文, 杨成生. 地质灾害监测预警中的精密空间对地观测技术[J]. 测绘学报, 2017, **46**(10): 1300－1307. (ZHANG Qin, HUANG Guan-wen, YANG Cheng-sheng. Precision space observation technique for geological hazard monitoring and early warning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, **46**(10): 1300－1307. (in Chinese))

[3] WANG Y P, HONG W, ZHANG Y, et al. Ground-based differential interferometry SAR: a review[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2020, **8**(1): 43－70.

[4] 王家琛, 朱鸿鹄, 王 静, 等. 基于主动加热光纤法的毛细阻滞入渗模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(1): 147－155. (WANG Jia-chen, ZHU Hong-hu, WANG Jing, et al. Laboratory model tests on capillary barrier infiltration using actively heated fiber optic method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(1): 147－155. (in Chinese))

[5] GUAN L Y, HU J, PAN H B, et al. Fusion of public DEMs based on sparse representation and adaptive regularization variation model[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, **169**: 125－134.

[6] LUO X J, WANG C C, LONG Y, et al. Analysis of the decadal kinematic characteristics of the daguangbao landslide using multiplatform time series InSAR observations after the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020, **125**(12): e2019JB019325.

[7] JI P F, LV X L, DOU F J, et al. Fusion of GPS and InSAR data to derive robust 3D deformation maps based on MRF L1-regularization[J]. Remote Sensing Letters, 2020, **11**(2): 204－213.

[8] ZENG W,XIAO J Q, LIN F Q ,ZHU X. Design of Portable Mountain Flood Warning System Based on LoRa[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2012, **2**: 141－147.

[9] DU Y, HUANG G W, ZHANG Q, et al. A new asynchronous RTK method to mitigate base station observation outages[J]. Sensors, 2019, **19**(15): 3376.

[10] WANG Y P, SONG Y, LIN Y, et al. Interferometric DEM-assisted high precision imaging method for ArcSAR[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, **19**(13): 2921.

[11] WU W Q, HU J, LIU J H, et al. Derivation of high-quality three-dimensional surface deformation velocities through multi-source point cloud fusion: application to Kīlauea volcano[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, **95**: 102270.

[12] PEI H F, ZHANG S Q. Molecular dynamics study on the zeta potential and shear plane of montmorillonite in NaCl solutions[J]. Applied Clay Science, 2021, **212**: 106212.

[13] PEI H F, ZHANG F, ZHANG S Q. Development of a novel Hall element inclinometer for slope displacement monitoring[J]. Measurement, 2021, **181**: 109636.

[14] ZHANG L, CHENG G, WU J H, et al. Study on slope failure evolution under surcharge loading and toe cutting with BOTDA technology[J]. Optical Fiber Technology, 2021, **66**: 102644.

DOI：10.11779/CJGE202207013 “十三五”国家重点研发计划项目

水库大坝安全诊断与智慧管理关键技术与应用

盛金保[1, 2]，向 衍[1, 2]，杨德玮[1, 2]，严吉皞[1, 2]，董 凯[1]

(1. 南京水利科学研究院，江苏 南京 210029；2. 水利部水库大坝安全重点实验室，江苏 南京 210029)



摘 要：中国水库大坝建设水平世界领先，但管理水平相对滞后，突出表现在管理手段落后、信息化应用程度低，出险甚至溃坝事故仍时有发生，亟待加强传统水利与现代信息技术融合，充分应用大数据、人工智能、机器学习等现代信息技术，实现水库大坝安全智能诊断和智慧管理。“十三五”国家重点研发计划项目“水库大坝安全诊断与智慧管理关键技术与应用（2018YFC0407100）”以澜沧江流域代表性水电工程等为依托，以水资源高效利用为目标，以确保水库大坝安全为宗旨，以工程防灾减灾为突破点，通过近四年的联合攻关，在大型复杂水工结构性能演化测试装备与智能诊断技术、大坝结构与服役环境互馈仿真及智能监控关键技术、基于大数据的大坝安全诊断与预警关键技术等方面取得系列创新成果，为进一步健全中国大坝安全保障体系和强化预报、预警、预演、预案“四预”措施提供科技支撑，全面保障水库大坝安全运行和综合效能发挥，具有极高的科学价值和广阔的推广应用前景，社会效益、经济效益和生态环境效益极其显著。

关键词：水库大坝；安全；大数据；智能诊断；智慧管理

中图分类号：TV62；TU43 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2022)07－1351－16

作者简介：盛金保(1966—)，男，正高级工程师（二级），博士生导师，现任水利部大坝安全管理中心总工程师，南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所所长，享受国务院政府特殊津贴，水利部5151人才部级人选，江苏省第五期“333高层次人才培养工程”第二层次培养对象，世界银行（World Bank）大坝安全专家，国家注册土木工程师（水利水电工程），国家防汛抗旱总指挥部防汛抗旱专家，国家审计署病险水库除险加固工程专项审计调查技术咨询专家，江苏省注册咨询专家，河海大学兼职教授，武汉大学、四川大学博士生导师。长期从事大坝安全与管理领域科学研究工作，先后主持或参加数十项包括国家科技支撑计划项目、国家重点研发计划、“973”专题、科技部社会公益专项、水利部公益专项等各类重点科技项目研究，提出大量创新研究成果，在全国大坝安全行业管理实践中得到推广应用，推动了行业科技进步，获国家科技进步一等奖1次、二等奖1次，中国标准创新二等奖1次、省部级特等奖1次、一等奖1次、二等奖3次，牵头主持“十三五”国家重点研发专项“水库大坝安全诊断与智慧管理关键技术与应用（2018YFC0407100）”，并协助主持“重大水利工程大坝深水检测及突发事件监测预警与应急处置”研究。主持完成丹江口水利枢纽、小浪底水利枢纽、乌鲁瓦提水利枢纽、磨盘山水库等数十座重大水利工程安全评估或病险机理分析研究，解决其中复杂技术难题，为保障相关工程安全运行提供了科学依据。参与2008年“5.12”汶川地震和2012年“9.07”彝良地震、2013年甘肃李桥水库出险与东北抗洪、2016年长江九江干堤防汛抢险、2018年内蒙古增隆昌水库溃坝等重大水利突发事件应急处置或调查，发挥重要技术支撑作用。出版专（译）著6部，参编专著4部，公开发表学术论文70余篇，取得国际专利1项，国家发明专利5项，实用新型专利3项，软件著作权7项。主持或参与十余部水利行业技术标准或规规性文件制修订，为规范全国水库大坝安全运行管理提供了法规依据和技术标准支撑。培养研究生和博士后十余名。E-mail: jbsheng@nhri.cn。

Key technologies and applications of safety diagnosis and smart management of reservoir dams

SHENG Jin-bao[1, 2], XIANG Yan[1, 2], YANG De-wei[1, 2], YAN Ji-hao[1, 2], DONG Kai[1]

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Key Laboratory of Reservoir Dam Safety, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: The construction level of reservoirs and dams in China is leading in the world, but the management level is

基金项目：“十三五”国家重点研发计划项目（2018YFC0407100）

收稿日期：2022－03－15

relatively lagging behind, which is highlighted by the backward management means, and low application degree of information technology, and accidents and even dam breaks still occur from time to time. It is urgent to strengthen the integration of traditional water conservancy and modern information technologies, and make full use of the latter such as big data, artificial intelligence and machine learning to realize intelligent diagnosis and smart management of reservoir dam safety. The National Key Research and Development Program of China during the 13th Five-Year Plan period "Key technologies and applications of reservoir dam safety diagnosis and smart management (2018YFC0407100)" is based on the representative hydropower projects in Lancang River Basin, aiming at efficient utilization of water resources, ensuring safety of reservoir dam and taking disaster prevention and mitigation of projects as a breakthrough point. After nearly four years of joint researches, a series of innovative achievements were made in the test equipments and intelligent diagnosis technologies for performance evolution of large and complex hydraulic structures, the key technologies of mutual feed simulation and intelligent monitoring of dam structures and service environment, and the key technologies of dam safety diagnosis and early warning based on big data. The relevant achievements provide scientific and technological support for further improving China's dam safety guarantee system and strengthening the "four pre-measures", and comprehensively guarantee the safe operation and comprehensive efficiency of reservoirs and dams. The achievements have extremely high scientific value and broad prospects for popularization and application as well as extremely remarkable social, economic and ecological environmental benefits.

Key words: reservoir dam; safety; big data; intelligent diagnosis; smart management

0 引 言

2018 年 7 月，“水库大坝安全诊断与智慧管理关键技术与应用”（2018YFC0407100）项目正式获批立项，对应指南“水库大坝安全诊断与智慧管理关键技术与应用”方向。该项目由水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院牵头，天津大学、河海大学、中国水利水电科学研究院、长江勘测规划设计研究有限责任公司、华能澜沧江水电股份有限公司、长江水利委员会长江科学院、四川大学、中国科学院计算机网络信息中心、南京瑞迪水利信息科技有限公司共 10 家单位共同参与。项目围绕中国水库大坝工程运行能力提升及安全保障需求，通过近四年联合攻关，在大坝多源异构信息融合理论、大型复杂水工结构性能演化与灾变机理、基于大数据的大坝安全智能诊断和智慧决策理论与方法等方面取得多项创新突破，有力推动了水库大坝工程智慧、高效运行与安全保障领域的科技进步。本文就项目的研究背景、研究内容、主要创新成果，以及成果的应用情况等作简要介绍。

1 背景及国内外研究现状

水库大坝关系防洪安全、经济安全、生态安全与公共安全，其建设与安全运行一直是国内外坝工界研究的重点。中国现有 9.8 万余座水库大坝，建设水平世界领先，但管理水平相对滞后，信息化应用程度较低，智能诊断与协同管理能力薄弱，亟待利用物联网、云计算、大数据等现代信息技术，全面感知多源信息[1]，通过数据融合，实现大坝安全智能诊断与智慧管理，为充分发挥水利基础设施整体效能、进一步提升水库大坝应急管理能力、切实保障大坝安全运行提供科技支撑[2]。

在大坝安全多源信息融合与安全诊断技术方面，国内外在大坝安全诊断与风险评估技术领域已开展大量研究，取得丰富成果[3-4]，但多为离线分析，对多源异构信息的融合、重构，以及动态服役环境与大坝结构互馈作用机制及其建模仿真技术等研究仍不够充分。大坝破坏过程及其失效模式研究多采用动力破坏模型试验和数值计算方法，但模型试验相似率难以满足，破坏判据不完善；有限元等数值计算方法、材料模型和强度理论常局限于单一本构关系，缺乏不同材料模型之间的对比分析。传统的大坝安全诊断方法与准则以位移、应变、温度、渗流等常规物理量作为指标评价大坝安全性态，无法满足大坝安全实时快速感知、评价诊断需要。大数据环境下的大坝损伤机理、破坏过程、安全评估研究仍处于探索发展阶段，有待进一步完善大坝安全多源信息感知—融合与诊断评估理论和方法。

在大型复杂水工结构性能演化与预测预警技术方面，国内外在水工结构灾变破坏和耐久性、水工结构智能检测和加固、大坝安全评价和监控理论与方法、溃坝风险分析理论和方法、高性能水工程新材料等方向已开展大量研究[5-7]，包括混凝土坝裂缝性态诊断与危害性评定关键技术、SRAP 结构评估修复成套技术及水工混凝土静动态损伤断裂过程及其声发射特性研究等，相关研究主要针对混凝土结构构件本身，缺少针对钢筋混凝土和钢结构等大型复杂水工结构性能演化过程的定量检测方法与损伤断裂测试装备，相应劣化影响机制与灾变机理缺乏深入和系统研究，需进一

步研发大型复杂水工结构性能演化测试装备，结合大量试验建立细观及局部劣化与宏观响应关系，研发大型复杂水工结构病害智能诊断系统与性能劣化演变预测模型。

在基于大数据的大坝安全智能诊断与智慧决策技术方面，目前基于物联网、自动测控和云计算的智能大坝建设成套技术已取得重大进展并得以成功应用[8]，可实现对大坝施工进度、质量、温控与结构信息的实时、在线、个性化管理与分析，并实时对大坝质量和性能进行控制的综合管理，其基本特征是施工、监测数据智能采集入库，监测数据与仿真分析一体化，施工管理和运行控制实时智能化，典型工程主要以澜沧江代表的西南诸河流域梯级水电开发项目。对于运行期的水库大坝，研究多集中于信息实时采集、信息管理、基于“一机四库”的大坝安全专家系统等方面，大数据驱动的大坝健康诊断与除险决策、预测预警与优化调度、风险评估与应急管理等一体化的智慧管理系统是亟待研发的重大科技需求。

在现代信息技术应用方面，云计算、物联网、大数据、移动互联网、人工智能等新一轮信息技术与经济社会深度融合，智慧城市、智慧社区、智能电网、智慧交通、智慧医疗等在发达地区和相关行业得到初步应用，深刻改变着政府社会管理和公共服务的方式。在新一代信息技术支撑下，通过全面感知、识别、模拟和预测社会态势，辅助政府和企业进行精细管理、快速响应、协同调度、科学决策，进而提供人性化服务，让经济社会发展更高效、更集约、更智能。智慧社会的理念由 IBM 公司（2008）首先提出，其推出的《智慧地球赢在中国》计划书重点提出了“智慧城市”“智慧交通”“智慧电力”“智慧医疗”和“智慧银行”等方案（2009）。智慧水利是智慧社会建设的重要组成，而水库大坝安全智慧管理是智慧水利的重要安全保障，其重要特征包括透彻感知、全面互联、深度融合、广泛共享、智能应用、范在服务等。目前已有 BIM 技术应用于水利水电工程设计，AI 与 VR 技术应用于大坝安全监控领域。尽管水利信息化建设取得了一定成效，但与智慧城市、智慧交通、智慧电力等相比仍存在一定差距，一是在对信息技术应用的范围和水平上，二是在对大数据、云计算、物联网、移动通讯等新一代信息技术的认知上，更重要的是在对传统水利向智慧水利转变必要性、重要性的认识与实践上。

2　研究目标及内容

2.1　研究目标及内容

本项目针对大数据背景下大坝多源异构信息融合理论、大型复杂水工结构性能演化与灾变机理、大坝安全智能诊断和智慧决策理论与方法等关键科学问题，以及大坝结构与服役环境互馈动态建模仿真、大坝安全智能诊断与预警及智慧管理等关键技术，开展理论创新与技术攻关，设置大坝多源信息感知-融合-挖掘的理论与方法、大型复杂水工结构性能演化测试装备与智能诊断技术、大坝结构与服役环境互馈仿真及智能监控关键技术、基于大数据的大坝安全诊断与预警关键技术、大坝安全智慧管理决策系统研发与示范、国家大坝安全监管云服务平台研发与应用共 6 个研究课题。课题相关信息见表 1。课题间逻辑关系如图 1 所示。

表 1　课题设置基本信息

Table 1 Basic information of tasks

序号	课题名称	承担单位	负责人
1	大坝多源信息感知-融合-挖掘的理论与方法	天津大学	崔　博
2	大型复杂水工结构性能演化测试装备与智能诊断技术	河海大学	李同春
3	大坝结构与服役环境互馈仿真及智能监控关键技术	中国水利水电科学研究院	温彦锋
4	基于大数据的大坝安全诊断与预警关键技术	长江勘测规划设计研究有限责任公司	高大水
5	大坝安全智慧管理决策系统研发与示范	华能澜沧江水电股份有限公司	肖海斌
6	国家大坝安全监管云服务平台研发与应用	南京水利科学研究院	盛金保

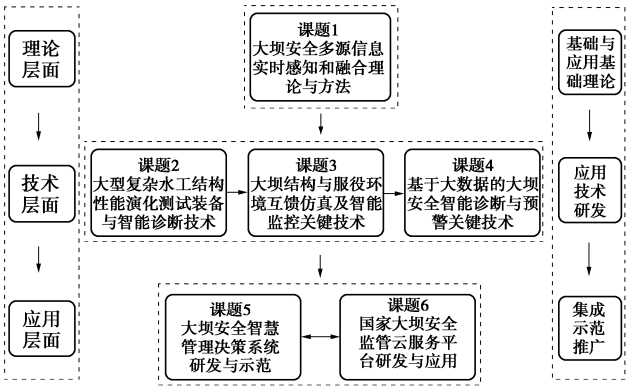


图 1　课题间逻辑关系

Fig. 1 Logical relation of tasks

2.2　关键科学技术问题

围绕任务目标，项目着重解决以下 3 大关键科学问题。

（1）大坝多源异构信息融合理论。中国水库大坝数量众多，施工期与运行期积累了长历时、多尺度、多源、异构海量信息，但信息之间缺乏有效交互，信息繁杂，增加了信息融合难度，造成信息交叠浪费。针对传统水库大坝信息采集方法存在机动性不足、可维护性差、缺乏时效性，以及在信息融合过程中缺乏

能够对大坝海量多源异构信息进行深度融合与可视化分析的成熟理论与方法，研究提出水库大坝多源信息透彻感知、智能分析、特征融合与挖掘的成套理论和方法，为实现多尺度、多维度、海量多源数据的智能采集、分析与深度融合，为大坝安全诊断与智能预警提供理论支持与技术支撑。

（2）大型复杂水工结构性能演化与灾变机理。目前水库大坝钢筋混凝土和钢结构等大型复杂水工结构性能演化过程的定量检测方法与损伤断裂测试装备尚不完善，无法深入系统探究其相应劣化影响机制与灾变机理。为此，需进一步研发复杂运行环境下钢筋混凝土结构（如挡水面板、孔口、隧洞、闸坝、进水塔、廊道）和钢结构（如闸门、压力钢管）等大型复杂水工结构性能演化测试装备，并通过大量试验研究明晰其细观及局部劣化与宏观响应之间的关系，揭示恶劣环境条件下大型复杂水工结构性能演化与灾变机理，提出大型复杂水工结构病害智能诊断方法与性能劣化演变预测模型，为大型复杂水工结构灾变控制提供理论基础。

（3）基于大数据的大坝安全智能诊断和智慧决策理论与方法。针对中国水库大坝管理水平相对滞后、信息化应用程度较低，智能诊断与协同管理能力薄弱等突出问题，利用现代信息技术手段，全面感知多源信息，通过数据融合，研究建立大数据环境下大坝安全诊断指标体系及评判准则，提出大坝安全多维多源信息的决策融合方法，构建大坝安全综合评估知识工程与智能诊断模型，集成高效精准的健康诊断与除险决策、预测预警与优化调度、风险评估与应急管理等一体化的智慧管理决策系统，实现大坝安全智能诊断与智慧管理。

项目重点解决的两大关键技术问题包括：①大坝结构与服役环境互馈动态仿真技术。针对大坝材料参数、边界条件、荷载、监（检）测信息、力学模型及淤积、地质灾害、超大或超长历时洪水、极端气温（持续高温或冰冻）、旱涝急转、水位骤升骤降等服役环境多源信息不确定性，研究大坝结构与服役环境多源信息不确定性的传递累计效应及降低技术，在此基础上研究融合多源信息的大坝建模与参数综合反演技术，动态服役环境下大坝四维全景仿真技术，揭示大坝结构与动态服役环境互馈机制与长效服役性能演化规律，并研发基于 BIM 的大坝结构与服役环境互馈智能监控技术。②大坝安全智能诊断、预警及智慧管理关键技术。基于现代信息技术手段，通过研究大数据环境下大坝安全智能诊断与预警指标体系及评判准则、安全智能诊断模型，以及结构性态预测预警自适应优化方法、智慧决策理论与方法，提出大数据驱动的大坝安全智能诊断、预警与智慧管理成套技术。

3 主要创新成果

3.1 大坝多源信息感知-融合-挖掘的理论与方法

（1）基于智能采集终端的大坝海量异构信息快速获取与高效通信传输理论

针对大坝多源信息采集与传输中存在的欠缺功效性以及信息离散化等问题，提出了基于窄带物联网技术的数据采集单元（见图 2）、基于“物联网标识管理公共服务平台”的数据标识技术及基于 WSN（无线传感器，wireless sensor network）的信息感知系统，研发了多源信息智能采集系统。针对水下环境，研究了基于水下边缘计算的网络架构和路由协议（见图 3），设计了水下网络环境下边缘计算数据卸载路径。针对海量信息异构特点，构建了多源信息分类与筛查原则；提出了用于计算两个不同语言本体相似值的跨语言相似测度，构造了跨语言本体匹配问题的最优模型[9]，并提出了基于问题交互式紧致差分进化算法。上述成果从智能采集、水下传输、异构匹配等构建了基于智能采集终端的海量异构信息快速获取与高效通信传输理论方法。

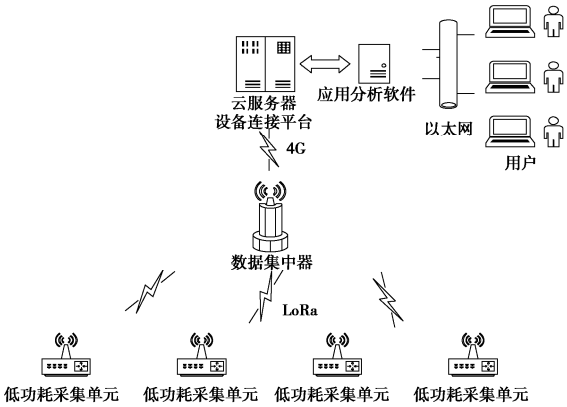


图 2 基于窄带物联网技术的数据采集系统

Fig. 2 Data acquisition system based on narrowband internet of things technology

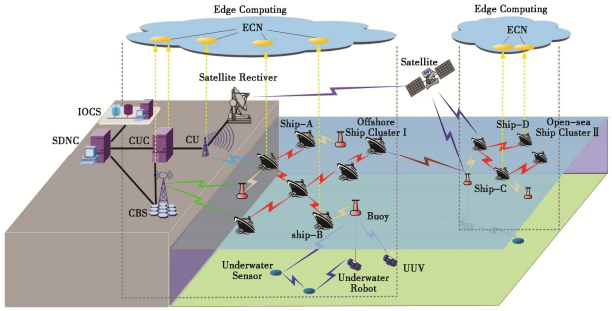


图 3 水下边缘计算物理架构

Fig. 3 Physical architecture of underwater edge computing

（2）大坝长历时、多尺度、多维度、异构海量多源信息透彻感知和智能分析体系

采用无人机摄影、图像识别等高新技术与机器学习、数据挖掘等智能分析算法，构建了包括大坝空间基础信息、服役环境信息全方位透彻感知和智能识别能力的感知体系：实现了基于无人机倾斜摄影的大坝参数化建模，运用深度学习目标检测网络 YOLOv3 实现了对大坝现场信息感知，设计了水下结构物表面缺陷仿生双目视觉测量方法和水下偏振成像缺陷监测系统[10]。基于智能方法，剖析了大坝效应量与影响量序列变化特征与趋势：提出了基于混合灰色关联分析的大坝变形驱动因素分析方法[11]，通过耦合 STL 分解和相空间重构理论提出了改进极限学习及大坝变形预测模型，并构建了基于 Bootstrap 和 ICS-MKELM 算法的变形预测模型[12]（见图 4），建立了变形性态小波支持向量机预报模型和算法；耦合小波多分辨率分析和突变理论，建立了大坝运行状况突变分析模型；并提出了基于 D-S 证据理论的大坝整体安全推理模型；提出了基于 PCA-SSA-XGBoost 算法的拱坝应力预测方法。上述成果形成了大坝长历时、多尺度、多维度、异构多源信息透彻感知和智能分析体系，可实现大坝多源信息及服役环境信息的全方位智能感知和分析。

（3）大坝服役性态多尺度及多维度特征多源信息融合模型与可视化分析方法

针对目前大坝信息融合过程中多局限于结构化数据，缺乏考虑多源异构信息深度融合以及信息智能可视化分析的不足，在数据融合层面，研究大坝多源异构信息融合体系和准则，研发大坝服役环境变量与效应量同类和异类信息融合模型：采用多源图像信息进行智能融合和重建模型，提出了大坝安全状况多指标贡献度分析方法[13]，以及基于多点测值序列的大坝安全警戒域拟定 KPCA 方法[14]，建立了考虑证据冲突的改进 DST 大坝结构多源信息融合动态诊断模型[15]，提出基于多源测值序列的大坝安全空间警戒域自适应拟定方法；在可视化分析层面，研究基于 BIM 的大坝多尺度、多维度、异构、多源信息无缝集成与智能可视化分析并基于 unity 可视化展示平台，融合 BIM 模型与 GIS 技术，实现库坝多源信息的可视化动态展示，如图 5 所示。

3.2　大型复杂水工结构性能演化测试装备与智能诊断技术

（1）描述混凝土劣化时变特性的变参数损伤模型理论

基于 Heish-Ting-Chen 本构模型和不可逆过程热力学的混凝土变四参数模型，引入等效应变，将多轴应变状态转化为等效拉伸应变，确定拉伸损伤。考虑混凝土渐进破坏过程中参数的变化，建立了变参数损伤本构模型[16]，与常规本构模型相比，能更好描述混

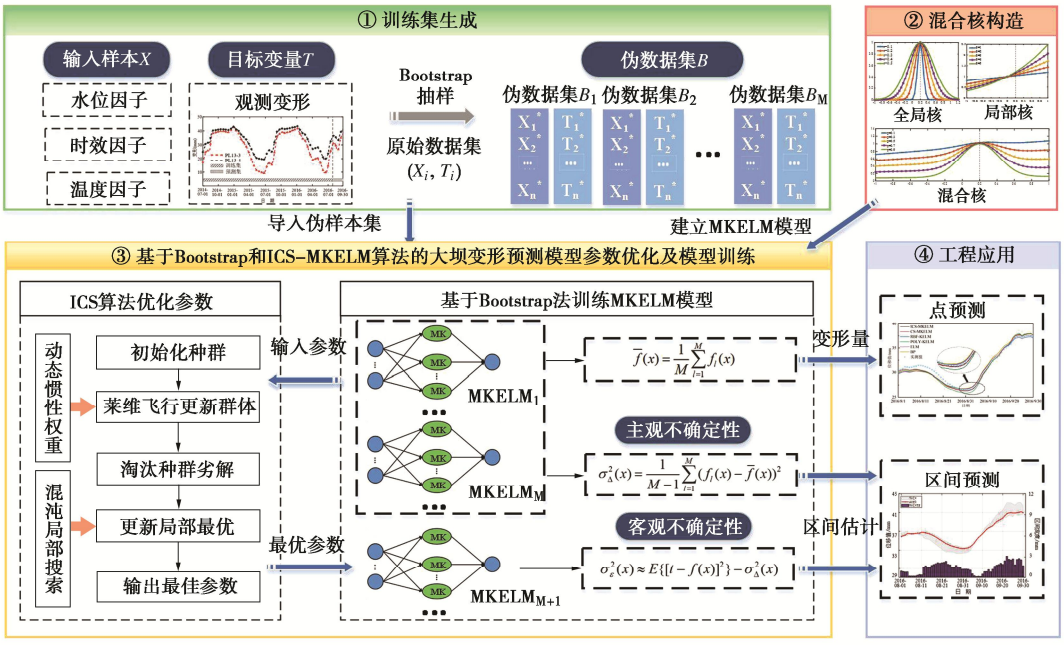


图 4　基于 Bootstrap 和 ICS-MKELM 算法的大坝变形预测流程

Fig. 4 Dam deformation prediction process based on Bootstrap and ICIBA SM algorithm

凝土软化特性、失效过程，并准确预测混凝土状态，模拟结果与经典混凝土试验结果比较如图 6 所示。



图 5 基于 BIM 技术的可视化分析

Fig. 5 Visual analysis based on BIM technology

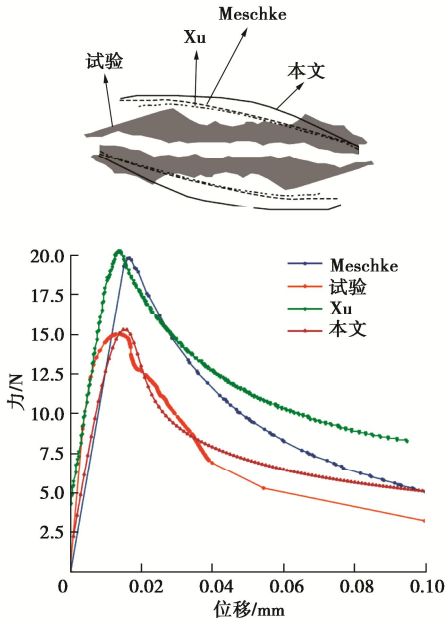


图 6 Nooru 试验 4 a 加载路径下损伤情况与位移和力曲线

Fig. 6 Nooru 4 a damage phenomenon and curves of force and displacement

（2）遥控检查混凝土微裂缝的技术与设备

基于混凝土微裂缝选择性热激励理论，发明了热激励混凝土微裂缝识别设备。喷水温差激励过程中，因裂缝处的水与其周围混凝土进行的热传递比较快，裂缝处温差持续时间较短。基于混凝土微裂缝具有的强烈毛细吸水性能，向微裂缝混凝土面喷洒不同的化学试剂溶液，微裂缝处吸入或黏附的水溶液明显多于混凝土表面的其他位置，所喷洒的化学试剂能够在微裂缝处发生反应并能长时间稳定地放热。因而裂缝处存在的温差能够维持较长时间且明显高于其他部位，则微裂缝能够长时间在热像图上清晰呈现出来，识别效果如图 7 所示。

（3）水工结构劣化影响机制和灾变机理

荷载－环境因素耦合作用是大型复杂水工结构局部材料劣化的主要因素，考虑其结构种类众多，以压力钢管、水垫塘、闸坝、闸门等为例，选取典型建筑物研究局部劣化和灾变之间定性与定量关系，首次系统揭示了大型复杂水工结构局部劣化和破坏之间的关系[17-18]，计算模型如图 8，9 所示。

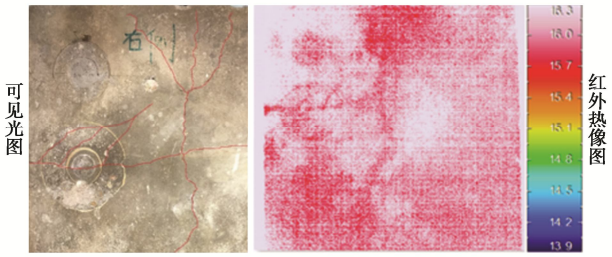


图 7 混凝土柱表观裂缝激励效果

Fig. 7 Concrete columns exhibiting crack excitation effects

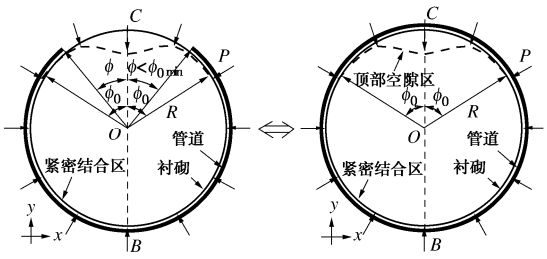


图 8 冠部空隙区域管道和完好管道中内衬的等效性示意

Fi g. 8 Equivalent schematic diagram of lining of upper gap area pipe and intact pipe

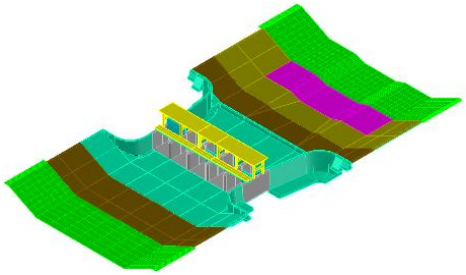


图 9 泄洪闸闸整体结构

Fig. 9 Overall structure of sluice gate

（4）病害智能诊断系统设计与性能劣化演变预测理论

基于已有大数据资料，结合具体材料基础检测指标及其与强度参数的关系特性，材料细观性能与结构宏观性能间的定量关系模型，形成基于监（检）测信息的复杂水工结构多源信息健康诊断系统[19]，技术路线图如图 10 所示。利用神经网络、模糊数学等手段，开发了水工结构表观缺陷高清全景图像获取技术，智能判别水工结构外观缺陷的软件和预测混凝土裂缝开合度的 BP 人工神经网络改进混合预测模型，依据复杂水工结构劣化影响机制与灾变机理制定合理的评价指标。通过示范工程验证了劣化损伤智能诊断模型、

变温冻融损伤模型及裂缝发展预测模型的可靠性与可行性。

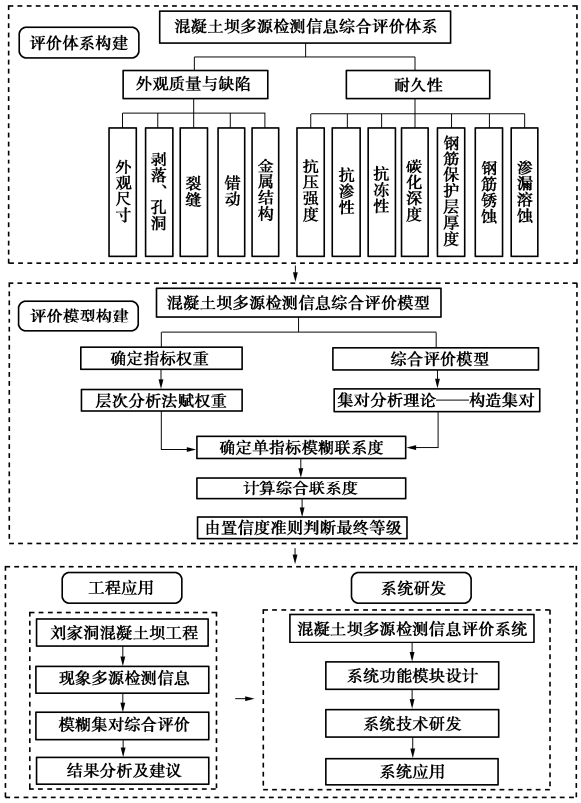


图 10　系统技术路线图

Fig. 10 Technology roadmap of system

3.3　大坝结构与服役环境互馈仿真及智能监控关键技术

（1）大坝参数-模型综合反演与精准识别成套技术

提出了集多点监测数据降维融合参数反演、多类数据概率融合更新的参数-模型联动识别、多源信息协同驱动的参数决策与模型筛选等关键技术于一体的大坝参数-模型综合反演与精准识别成套技术[20]（见图 11），实现了材料试验、服役环境、原观监测、现场检测等多源信息融合驱动的大坝物理力学模型识别与参数综合反演[21-22]，解决了目前大坝模型识别与参数反演信息源单一，易偏离材料、结构本征的问题，提高了大坝运行性态仿真模拟的精度与可靠性。

（2）水利水电枢纽群水工安全监测信息动态监控技术

提出了统一的水工建筑物安全监测数据库表结构及对象标识符命名规则，构建了针对水工建筑物、水工监测设备的对象模型，构建了普适于商用云计算基础设施的枢纽群水工监测信息数据中台。研发了融合散点数据形成大坝数字孪生模型的微服务体系和技术中台，实现了对枢纽群水工安全监测数据复杂查询分析和空间分布特性展示，基于 BIM 模型进行水工建筑物和监测设施三维轻量化展示查询和漫游，形成了对监测设备故障、构筑物病害进行实时预警的业务前台，提出了基于水工建筑物数字孪生模型、通过 VTK 架构实现大坝性态数字孪生模型线上交互分析和三维浏览的可视化方法。监控平台（见图 12）可实时监控、分析、预测工程安全性态。

（3）大坝结构性态与动态服役环境互馈作用机制以及长效服役性能演化规律

以土石坝为例，揭示了结构性态与动态服役环境互馈作用机制以及长效服役性能演化规律；建立了综合考虑筑坝材料的流变效应、湿化效应等力学特性的性态描述数学模型，揭示了真实复杂服役环境下筑坝材料力学性能参数、环境参数与大坝性态之间的关联关系；利用云计算服务平台，通过四维全景仿真，揭示了考虑水位变化、温度场、渗流场与应力场耦合条件下的坝体长效服役性能演变规律，以及考虑渗流场与应力场耦合、不同介质相互作用下土石坝长效服役性能演变规律[23-24]，模拟结果见图 13。

3.4　基于大数据的大坝安全诊断与预警关键技术

（1）大数据驱动的大坝安全诊断与预警指标体系及评判准则

扩展考虑大坝非自身安全风险因素，提出了大数

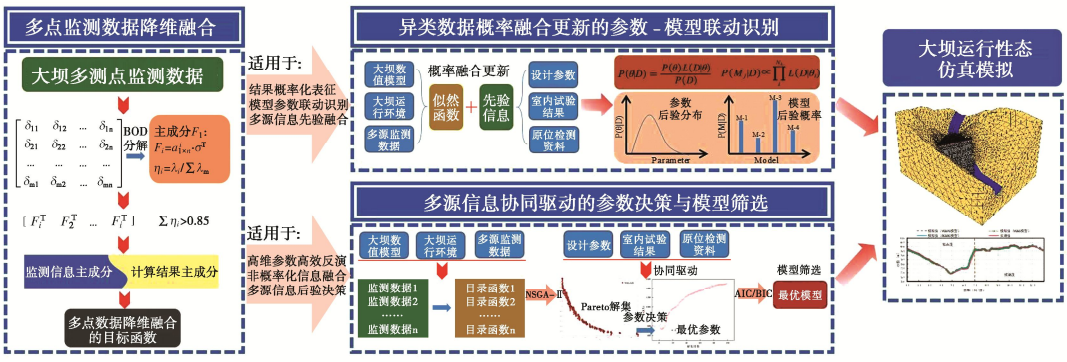


图 11　大坝参数-模型综合反演与精准识别成套技术

Fig. 11 Complete set of technology for comprehensive inversion and accurate identification of dam parameters and models



图 12 水工水情智慧分析平台

Fig. 12 Intelligent analysis platform of hydraulic and water conditions

据环境下大坝安全数据源的分类方法。基于大坝安全数据源分类，建立了具有典型递阶层次结构的大坝多层次安全诊断预警指标体系；基于最大熵法和典型小概率法，提出了大坝安全诊断预警指标阈值拟定方法，建立了大坝安全诊断预警指标阈值拟定方法体系（见图 14）；完善建立了大坝安全诊断预警准则体系，提出了涵盖单一指标预警、局部系统预警、整体综合预警的多层次大坝安全诊断预警架构。建立了大坝多层次多级安全诊断预警模型，实现了“微观”、“局部”、“整体”3 个层次的多级预警，可为决策层提供直观决策支持，为作业层提供具体作业指导。

（2）大坝安全多维多源信息的决策融合方法

构建了基于大坝多维多源数据特征的信息融合诊断模式、方法及体系，诊断模拟见图 15；重点研究了贝叶斯推理、D-S 证据理论、粗糙集理论及模糊聚类方法等决策级高层次融合方法，提出了决策级信息融合模型和信息交互决策系统。为了提高大坝安全评价精度，减小主观随意性，克服传统评价模型在同时考虑多重因素确定性和不确定性方面的不足，采用集对分析方法从同、异、反三方面综合分析，并用熵值法实现 D-S 证据理论的加权基本概率赋值，构建了 D-S 证据理论与集对分析相结合的监测信息融合模型，探讨了模型构建原理、算法及流程，并实现了大坝安全性态的趋势预估。通过大数据环境下大坝安全诊断与预警指标决策融合方法的示范工程应用，结果表明采用决策融合方法得到的大坝安全状态与实际的安全鉴定结果一致，验证了决策融合方法的有效性。

（3）大坝安全综合评估知识工程与智能诊断模型

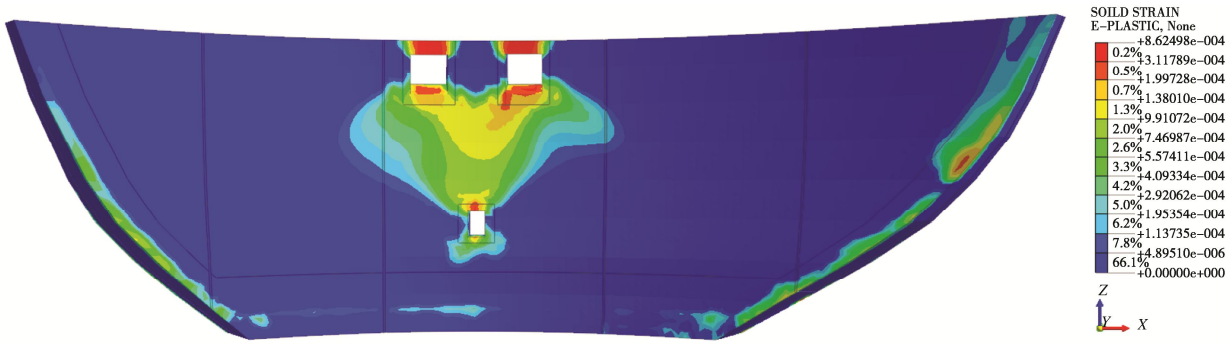


图 13 坝体屈服区计算结果

Fig. 13 Calculated results of yield zone of dam

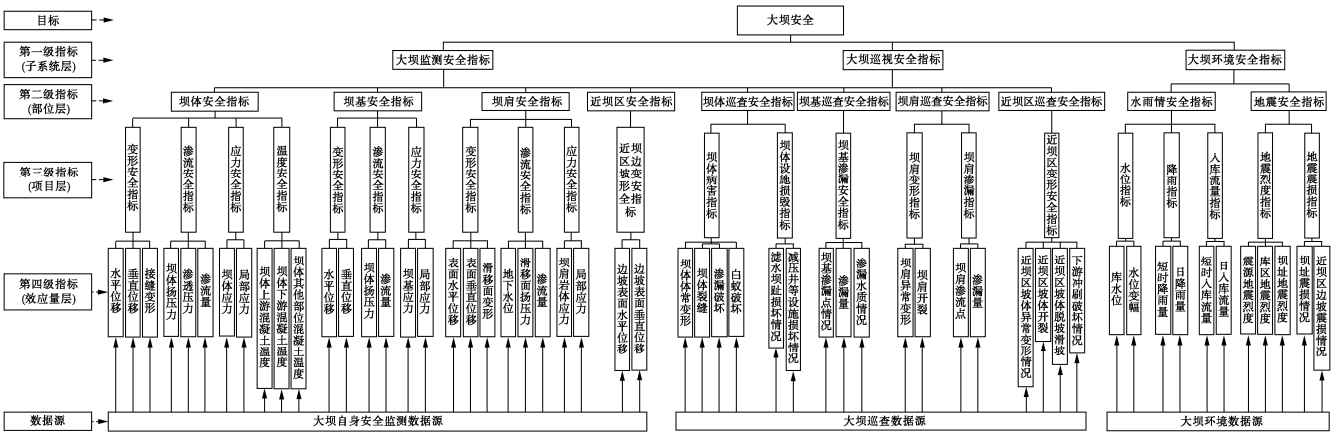


图 14 大坝多层次安全诊断预警指标体系架构

Fig. 14 Framework of multi-level safety diagnosis and early warning index system for dams

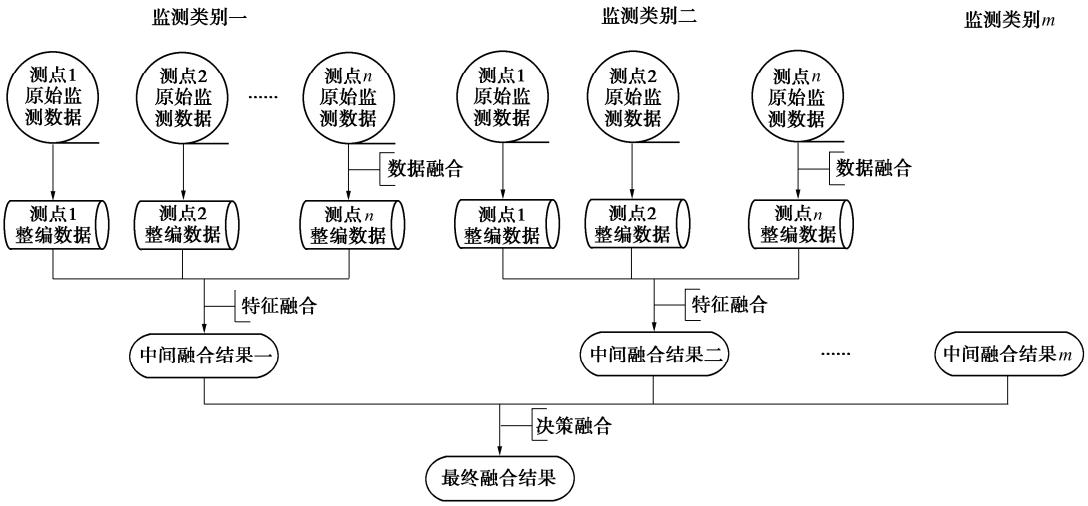


图 15　多源信息融合诊断模式

Fig. 15 Multi-source information fusion diagnosis mode

研究了大坝安全综合评估知识表示法，构建了基于大数据的大坝安全综合评价指标体系，提出了融合知识图谱和知识推理的大坝安全专家会商辅助决策方法；针对大坝安全多源异构数据的关联关系，提出了关联性量化指标构建和提取方法，建立了大坝安全序列相似特征的时空相似性指标，提出了划分大坝结构效应时空演变的数据聚类挖掘方法[25]，实现了大坝变形区域的精准划分（图 16），可为利用海量数据分析大坝不同时段变形性态提供新视角；融合单测点变形时序相关性和多测点变形空间关联性，提出了大坝变形动态监控模型和自适应全局优化分析模型；借助混合监控模型和结构正反分析方法模拟了大坝结构性态，确立了大坝安全诊断分析模型与判据。

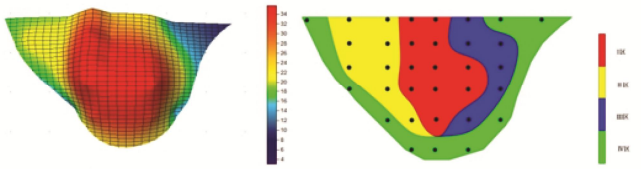


图 16　拱坝高水位实测径向位移分布和变形聚类分区图

Fig. 16 Distribution of monitoring deformation and clustering map of deformation distribution during high-water-level period

（4）大坝结构性态预测预警自适应优化方法

提出了大坝安全监测数据的小波自适应阈值去噪方法和小波多分辨率快速分析方法，分离了大坝安全时效、水压、温度和噪声等分量，提出了大坝材料物理参数的精细化反演模型。建立了基于多输出支持向量机的大坝安全性态多测点预报模型（见图 17），借助模型因子主成分优化提取，提出了大数据环境下大坝安全工作性态自适应建模与预测预报方法[26]。

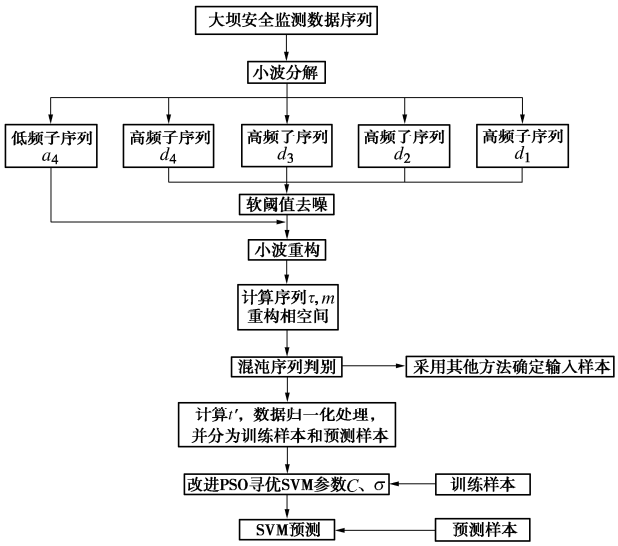


图 17　大坝安全运行性态预报模型构建流程图

Fig. 17 Construction process of prediction model for safety operation behavior of dams

3.5　大坝安全智慧管理决策系统

（1）大坝安全管理决策系统动力学特性与智慧决策方法体系

a）大坝安全管理智慧决策架构体系

基于系统安全理念，围绕以工程安全、公共安全、生态安全的智慧管理目标，深入分析了智慧决策内涵，即透彻感知、全面互联、深度融合、广泛共享、智能应用、泛在服务[27]，在此基础上构建了具有预报、预警、预演、预案“四预”功能的智慧决策架构体系（图 18），为优化决策过程、科学化决策方案提供了借鉴。

b）大坝安全管理决策影响要素动态演化机制

突破大坝安全管理决策研究的传统线性思维和局部视野，系统考虑组织、人员、技术多层级风险因素，

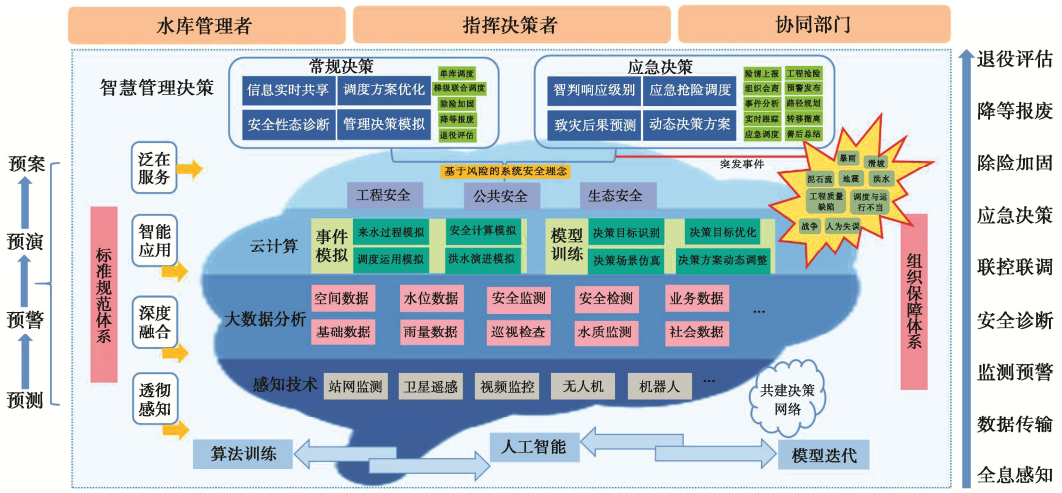


图 18 水库大坝安全管理智慧决策架构体系

Fig. 18 Intelligent decision-making framework system for safety management of reservoir dam

构建了决策影响要素因果反馈回路[28]，形成了风险演化过程与管理决策互馈调节结构（图 19）。揭示了预警时间、组织抢险能力、群众风险意识、洪水淹没程度与决策效果的动力学演化机制，为大坝安全管理决策提供了理论支撑。

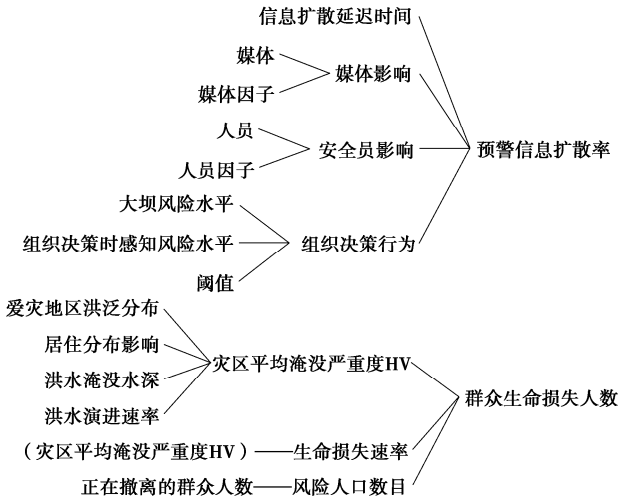


图 19 水库大坝安全管理决策影响要素因果树

Fig. 19 Causal trees of influencing factors for safety management decision-making of reservoir dam

c）大坝安全智慧决策系统动力学模型与方法

通过对驱动决策过程动态因子及其反馈关系的深入挖掘，揭示了动态因子对决策的影响机制，建立了如图 20 所示的决策系统动力学数值模型，实现了决策行为与处置效果的定量描述。通过对典型工程案例仿真模拟（图 21），推演了组织决策与群众生命损失随时间变化的动态过程，重现了水库溃坝历史行为，实现了临界预警决策时间界定与决策效果的重构和预测；基于协同进化的多目标混沌粒子群算法对大坝系统安全决策多目标化进行优选，形成集运行调度、补强加固、应急管理、风险防控等相结合的大坝安全管理智慧决策方法体系，提高了决策的科学性和有效性。

（2）大坝安全智能感知-风险辨识-应急响应成套技术

针对水库大坝运行期工程安全影响主要因素，提出了地震监测、水情监测、库岸滑坡监测与安全监测等多源数据与信息有效融合方法，以及基于深度学习的大坝缺陷特征自动提取[29]，样本训练与标识，缺陷监测与识别等综合感知、巡检与监测联动识别与诊断互判、缺陷发展和风险扩散趋势分析与研判技术[30]；研发了地震、洪水、地质灾害等突发事件下大坝与泄水建筑物运行安全判别标准、分类分级预警指标；分析各类型大坝的应急响应措施方案，提取应急措施方法的关键路与关键节点，制定了基于典型大坝的非常工况风险控制机制；采用遥感、激光扫描、物联网等先进技术，构建了集实时监测、安全分析、风险辨识与分级响应为一体的水库大坝运行安全防控成套技术[31]，框架如图 22 所示。

3.6 国家大坝安全监管云服务平台

（1）国家大坝安全智慧监管模式和机制

基于中国水库大坝安全管理现状和国家大坝安全监管需求，提出了以“法规制度为依据，监管机制为保障，监管体制为支撑，监管措施为抓手”的跨管理层级、全业务覆盖的大坝安全智慧监管模式与机制；提出了基于大坝安全管理全业务权重计算的管理评估标准体系及分级预警指标[32]、基于词频和关键词学习的大坝安全技术手册质量智能评估方法，研发了智能评估系统并开展了实践验证[32]，监管业务流程如图 23 所示。

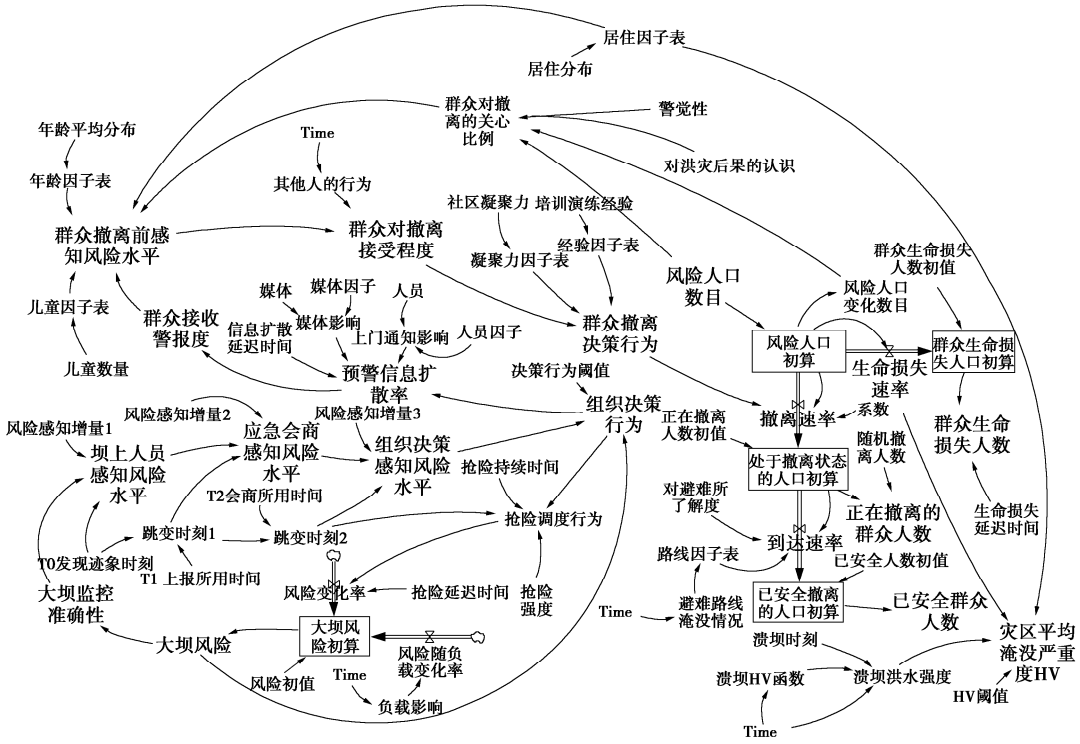


图 20 水库大坝安全管理决策系统动力学模型

Fig. 20 Dynamic model for safety management decision-making system of reservoir dam

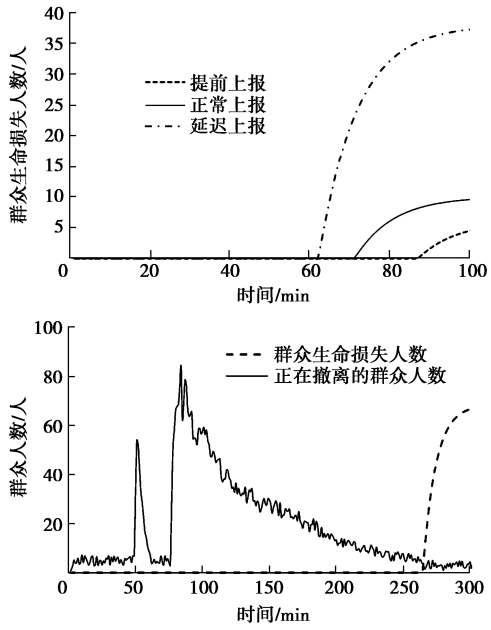


图 21 某水库大坝安全管理决策模型仿真结果

Fig. 21 Simulated results of decision-making model for dam safety management of a reservoir

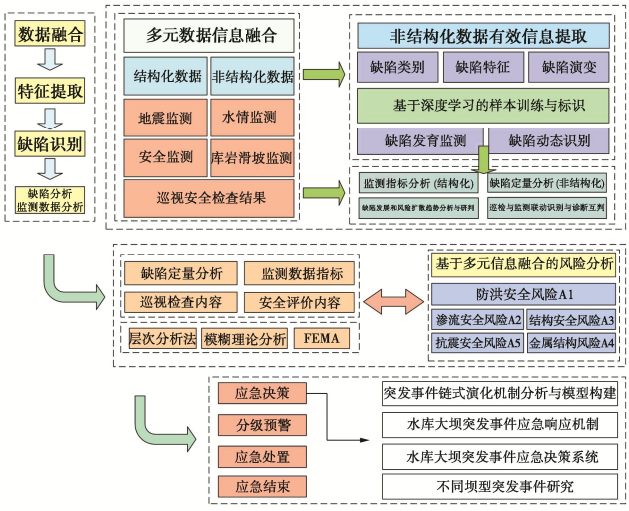


图 22 水库大坝运行安全防控成套技术框架

Fig. 22 Complete technical framework for safety prevention and control of reservoir dam operation

（2）国家大坝安全监管信息分类与标准化

围绕国家大坝安全监管信息种类多、异构性强、标准化体系不完善等问题，基于国家大坝安全监管多层级管理、多业务监管的信息特征、信息分类和细化方法，通过系统化、规则化的管理元素剖分，编制了《大坝安全管理信息表结构与标识符》《大坝安全监测数据库表结构及标识符》《水库大坝安全资料标准化处理指南》等适用于大坝安全多层级、多业务监管的多源异构信息分类标准，完善了大坝安全监测监督数据库与数据处理标准体系，建立了全国大型水库大坝安全实时监测信息模型，构建了标准化、规模化、集中化的全国大型水库大坝安全实时监测信息数据库和面向主题的集成时变数据仓库。监测数据库概念模型见图 24。

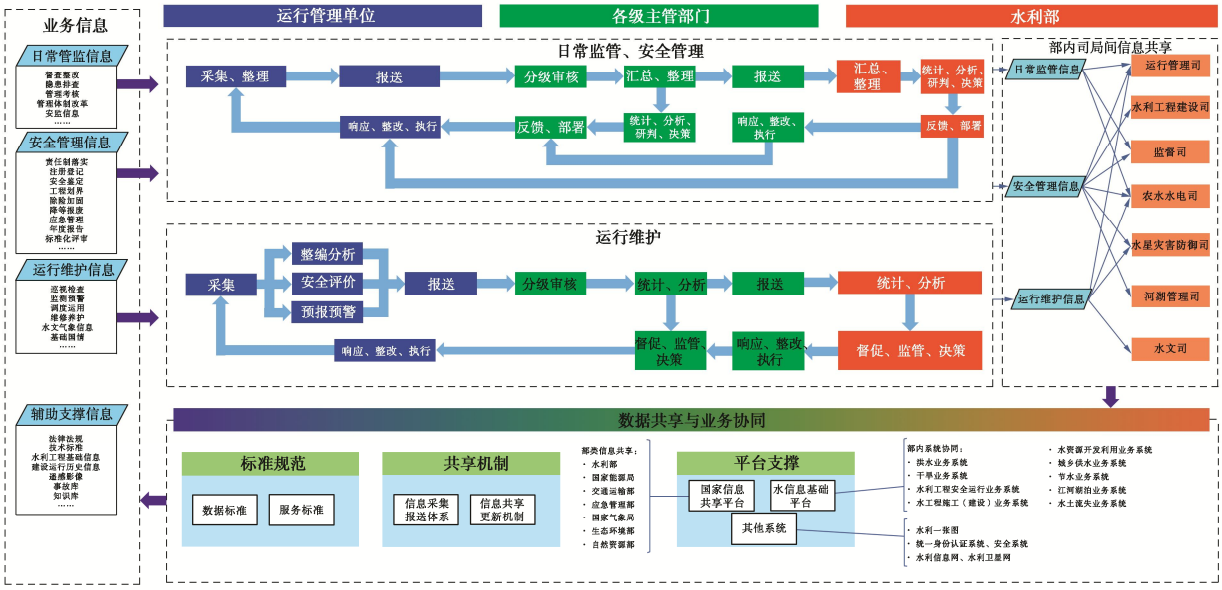


图 23 监管业务流程示意图

Fig. 23 Schematic diagram of regulatory business process

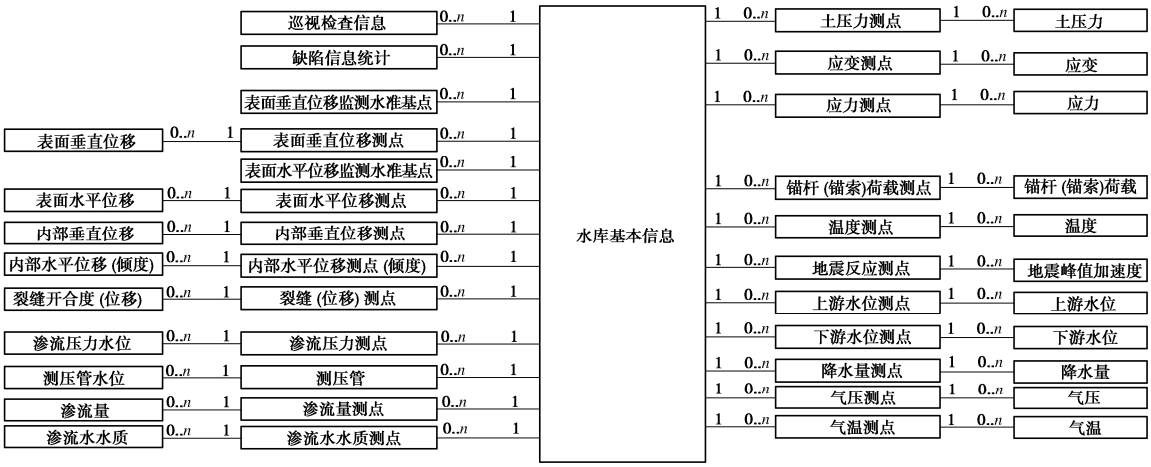


图 24 安全监测数据库概念模型

Fig. 24 Conceptual model for safety monitoring database

（3）国家大坝安全智能监管技术

基于监管信息特征与规律、监管需求，融合水库大坝安全监管多源信息大数据成果，研判识别安全监管风险源，运用关联、聚类等方法挖掘大坝安全监管信息特征，提出了适应不同阶段和不同风险等级大坝安全动态监管方法；针对大坝变形、渗流等真实反映大坝安全性态的重要参数，提出多种大坝变形预测模型、渗压水位极值预测模型[33-35]；提出大坝安全预警指标拟定、基于单测点和多测点的大坝安全运行动态预警方法，研发全坝型大坝安全异常预警自适应模型，构建水库大坝安全监测智能预警体系，预警系统如图 25 所示。

提醒指标

实际测值	小概率法		置信区间法	
	最小值/mm	最大值/mm	预测值	标准差
−8.53	−8.69	4.12	−5.734851	0.73525

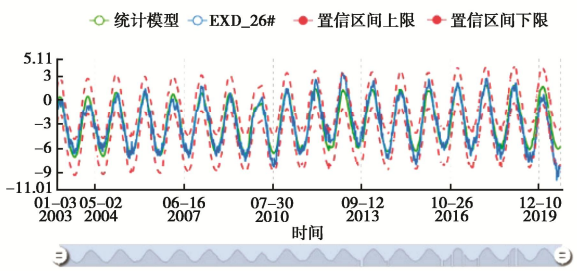


图 25 预警系统示意图

Fig. 25 Schematic diagram of early warning system

（4）国家大坝安全智慧监管业务应用系统与云服务平台研发

围绕安全管理监督、工程安全预警、应急决策支持等 3 个大坝安全监管重点环节，基于多维度大坝安全监管权责，构建了水库大坝安全信息共享与多维协同监管云服务架构，研发了跨管理层级的国家大坝安全智慧监督系统、全坝型自适应大坝安全监测智能预警系统、突发事件全过程动态跟踪应急决策支持系统[36]。应用多源异构信息汇集与交换技术，构建了规模化、高效能、集约化的国家大坝安全监管云服务平台，为“全国大型水库大坝安全监测监督平台”一期工程建设提供了技术支撑，并应用于全国大型水库大坝安全监管，支撑水利行业水库大坝主管部门监测监督与应急管理，显著提升中国水库大坝安全运行管理、监督管理及应急管理智能化水平。

4　成果应用情况及社会经济效益

围绕中国水库大坝工程运行能力提升与安全保障的实际需求，集成项目主要研究成果，依托澜沧江流域代表性水电工程等，开展了大型复杂水工结构性能劣化评估技术、复杂环境钢及钢筋混凝土结构腐蚀劣化测试装置、基于大数据的大坝安全诊断与预警关键技术等一系列示范应用；依托南方电网电站群等，开展了大坝结构与服役环境互馈仿真及智能监控关键技术示范应用；依托全国大型水库大坝安全监测监督平台、全国水库运行管理信息系统等平台，开展了国家大坝安全智慧监管模式和智能评估方法的示范应用。

（1）大型复杂水工结构性能劣化评估技术示范应用

针对重力坝混凝土材料长期性能劣化问题，研发基于图像识别的混凝土表面缺陷评估技术，提出了全坝覆盖与典型部位兼顾、物理方法与化学手段综合、微观检测与仪器监测比对的重力坝混凝土长期性能评估新工艺。通过对历经 30 a 运行的澜沧江流域漫湾常态混凝土重力坝不同强度等级分区典型部位的混凝土钻芯取样，将检测成果与电站各阶段混凝土试验成果对比分析，有效揭示了漫湾混凝土重力坝在多重环境因素、多重荷载等复杂动态环境影响条件下混凝土长期性能演化机理，为研究复杂水工结构细观与宏观响应关系、性能综合评价等提供了基础数据，提升了水工混凝土智能诊断和病害演化智能预测质量和精度，为漫湾大坝安全诊断、除险决策、风险评估与应急管理等提供了先进的技术支撑，为大坝安全稳定运行起到重要保障作用。

（2）复杂环境钢及钢筋混凝土结构腐蚀劣化测试装置示范应用

为保障水工钢筋混凝土结构安全服役，有必要及时掌握混凝土内钢筋锈蚀状况。围绕中国大型复杂水工建筑安全诊断和智慧管理的实际需求，在总结各类电化学测试技术的基础上，基于护环技术，研发设计了具有补偿功能的直线型三参比三辅助钢筋腐蚀测试探头；根据混凝土中钢筋电化学阻抗特征及变化规律，定制了具有双恒电位反馈电路设计的便携式钢筋混凝土腐蚀测试仪，初步形成了一套复杂环境钢及钢筋混凝土结构腐蚀劣化测试装备，初步解决了多年来水工钢筋混凝土结构腐蚀劣化定量检测方面存在的技术难题。现场工程应用研究发现，红雁池水库排水管钢衬电化学阻抗图谱，与预想基本一致，采用自制钢筋腐蚀测试探头及定制的便携式钢筋锈蚀测试仪，可以得到准确、稳定的测试结果。

（3）基于大数据的大坝安全诊断与预警关键技术示范应用

基于此关键技术，项目在梅山、陆水、百色等代表性水利水电工程进行应用示范。构建了示范水库大坝安全诊断与预警指标体系、评判准则体系，基于大坝安全多维多源信息决策融合方法和结构性态预测预警自适应优化方法，建立了示范水库大坝安全综合评估知识工程和智能诊断模型，构建了以一整套大数据驱动的大坝安全智能预警平台。成果应用以来，进一步促进了水库大坝的信息化，提升了水库大坝安全诊断和预警的水平，为水库大坝长效安全运行提供了技术保障，产生了良好的应用示范效果。

（4）大坝结构与服役环境互馈仿真及智能监控关键技术示范应用

围绕大坝结构与服役环境互馈动态仿真技术进行研究，项目提出了异类数据概率融合更新的参数－模型联动识别技术、数据-机理融合的大坝服役性能耦联评估模型、水利水电枢纽群水工安全监测信息动态监控技术等关键技术。实施过程中依托南方电网电站群、瀑布沟、官地等大型水利水电工程，研究成果已应用于实际大坝性态分析和在线安全风险管控，为工程安全管理提供了理论和技术支持。为水库大坝全生命期的安全保障和应急管理等提供了新的手段，具有广阔的推广应用前景，将极大推进水利行业自动化、信息化、智能化发展，直接经济效益显著。

（5）国家大坝安全智慧监管模式和智能评估方法示范应用

国家大坝安全智慧监管模式和智能评估方法研究成果已在全国大型水库大坝安全监测监督平台（一期）工程、全国水库运行管理 APP、全国水库运行管理信息系统、全国水库大坝注册登记系统、江西省水利工程运行管理信息系统、于桥水库大坝安全监测信

息管理系统等建设与运行中得到应用，发挥了强化水库大坝安全运行管理、监督管理、应急管理实践作用，提升了国家水库大坝安全监管水平和能力，产生了显著的经济和社会效益，具有广泛的推广应用前景。

5 结 语

本项目围绕水库大坝工程运管工作实际，在大坝多源异构信息融合理论、大型复杂水工结构性能演化与灾变机理、基于大数据的大坝安全智能诊断和智慧决策理论与方法等方面形成了一批具有时代特色的科研成果，有力推动了相关领域的科技进步，具体体现在以下 3 个方面。

（1）促进理论学科发展。项目团队充分应用云计算、大数据、物联网等现代信息技术，建立了水库大坝安全多源信息融合、基于大数据的大坝安全智能诊断和智慧决策等理论与方法，实现了大坝安全智能诊断与智慧管理，构建和集成区域以及国家大坝智慧管理决策系统，显著提高大型水库和流域水库大坝安全诊断与智慧管理水平，促进大坝安全智慧管理学科向更加深入、广泛的方向发展。

（2）引领应用技术进步。为了提高中国水库大坝管理水平，加强传统水利与现代信息技术的融合，本项目从基础理论和工程实际出发，研发了大型复杂水工结构性能演化测试装备，形成了大坝参数-模型综合反演与精准识别技术、水利水电枢纽群水工安全监测信息动态监控技术、水库大坝安全智能感知-风险辨识-应急响应技术在内的一系列关键应用技术。经工程应用检验，相关技术在服务于水库大坝工程运行与管理方面具有较好的适用性，显著提升了水库大坝安全管理水平和能力。

（3）推动技术应用标准化。项目团队基于项目相关研究成果，充分吸收技术应用过程中的成功经验，在水工结构病害诊断和防护方面，形成了《混凝土结构耐久性电化学技术规程》[37]、《有机硅渗透型防护剂规程》[38]、《混凝土抗氯离子渗透性能的交流的交流电测量方法》[39]等团体标准 3 部；在大坝安全监测和管理方面，形成了《水利水电工程白蚁实时自动化监测预警系统技术规范》[40]等团体标准 1 部，在为进一步提高水库大坝运行和管理水平提供了标准化方案。

结合本项目研究，发表论文 179 篇，其中 SCI/EI 收录 82 篇；出版专著 37 部；申请国家专利 67 件，获得软件著作权 49 项，形成团体标准 4 部。研究成果直接服务于全国水库大坝安全诊断与智慧管理，为进一步健全我国大坝安全保障体系提供了科技支撑，全面保障水库大坝安全运行和综合效能发挥，提高了溃坝灾害防控能力，社会效益、经济效益和生态环境效益极其显著。

致 谢：在此谨对参加本项目的有关单位及科研人员表示感谢。

参考文献：

[1] 向 衍, 盛金保, 刘成栋. 水库大坝安全智慧管理的内涵与应用前景[J]. 中国水利, 2018(20): 34－38. (XIANG Yan, SHENG Jin-bao, LIU Cheng-dong. Intention of intelligent safety management for reservoir dams and future applications[J]. China Water Resources, 2018(20): 34－338. (in Chinese))

[2] 盛金保, 厉丹丹, 蔡 荨, 等. 大坝风险评估与管理关键技术研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, **48**(10): 1057－31067. (SHENG Jin-bao, LI Dan-dan, CAI Qian, et al. Research progress and its practice of key techniques for dam risk assessment and management[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2018, **48**(10): 1057－1067. (in Chinese))

[3] 盛金保, 刘嘉炘, 张士辰, 等. 病险水库除险加固项目溃坝机理调查分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(11): 1620－1625. (SHENG Jin-bao, LIU Jia-xin, ZHANG Shi-chen, et al. Investigation and analysis of failure mechanism of reinforced dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(11): 1620－1625. (in Chinese))

[4] 杨德玮, 盛金保, 彭雪辉, 等. BREACH 模型与 MIKE21 模型在溃坝风险中的耦合分析[J]. 水利水运工程学报, 2016(6): 23－28. (YANG De-wei, SHENG Jin-bao, PENG Xue-hui, et al. Coupling analysis of MIKE21 model and BREACH model for dam-break risk[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(6): 23－28. (in Chinese))

[5] 盛金保, 王昭升. 水利讲坛 第十四讲: 水库大坝安全评价[J]. 中国水利, 2010(4): 63－66. (SHENG Jin-bao, WANG Zhao-sheng. Lecture 14: Safety evaluation of reservoir dam[J]. China Water Resources, 2010(4): 63－66. (in Chinese))

[6] 杨德玮, 彭雪辉, 盛金保. 基于大坝缺陷的群坝风险排序方法研究[J]. 安全与环境学报, 2016, **16**(2): 11－15. (YANG De-wei, PENG Xue-hui, SHENG Jin-bao. On the dams risk sequential method based on the analysis of the dam protection and maintenance deficiencies[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, **16**(2): 11－15. (in Chinese))

[7] LU X, CHEN C, DONG K, et al. An equivalent method of jet impact loading from collapsing near-wall acoustic bubbles: a preliminary study[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, **79**:

105760.

[8] 李庆斌, 马　睿, 胡　昱, 等. 大坝智能建造研究进展与发展趋势[J/OL]. 清华大学学报(自然科学版): 1－18[2022-03-05]. DOI.10.16511/J.cnki.qhdxxb.2022.25.018. (LI Qing-bin, MA Rui, HU Yu, et al. A riview of intelligent dam construction techniques[J/OL]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology): 1－18[2022-03-05]. DOI.10.16511/J.cnki.qhdxxb.2022.25.018. (in Chinese))

[9] CHEN J F, XUE X S, HUANG Y K, et al. Interactive cross-lingual ontology matching[J]. IEEE Access, 2019, **7**: 79095－79102.

[10] 徐灵丽, 朱晓坡, 侯一兴, 等. 基于增强色调特征的涵洞裂缝缺陷分割算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, **57**(8): 081016. (XU Ling-li, ZHU Xiao-po, HOU Yi-xing, et al. Culvert crack defect segmentation algorithm based on enhanced hue features[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, **57**(8): 081016. (in Chinese))

[11] CHEN W L, WANG X L, WANG J J, et al. Dynamic interpretation of the factors causing dam deformation with hybrid grey dynamic incidence model[J]. Engineering Structures, 2021, **242**: 112482.

[12] 王晓玲, 谢怀宇, 王佳俊, 等. 基于 Bootstrap 和 ICS-MKELM 算法的大坝变形预测[J]. 水力发电学报, 2020, **39**(3): 106－120. (WANG Xiao-ling, XIE Huai-yu, WANG Jia-jun, et al. Prediction of dam deformation based on Bootstrap and ICS-MKELM algorithms[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, **39**(3): 106－120. (in Chinese))

[13] 吕　鹏, 王晓玲, 余红玲, 等. 基于 FDA 的大坝渗流安全动态可拓评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, **48**(5): 433－439. (LU Peng, WANG Xiao-ling, YU Hong-ling, et al. Dynamical and scalable evaluation model for dam seepage safety based on FDA[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, **48**(5): 433－439. (in Chinese))

[14] 李　俊, 苏怀智, 周仁练. 基于关联规则的土石坝渗流推理预测方法及应用[J]. 水利水电科技进展, 2019, **39**(5): 89－94. (LI Jun, SU Huai-zhi, ZHOU Ren-lian. Seepage prediction method based on association rules and its application to earth-rock dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, **39**(5): 89－94. (in Chinese))

[15] FANG Z, SU H Z, WEN Z P. Joint back-analysis for dynamic material parameters of concrete dam based on time-frequency domain information[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, **26**(9): 1－12.

[16] QI H J, LI T C, LIU X Q, et al. A variable parameters damage model for concrete[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, **228**: 106898.

[17] 赵兰浩, 郑　拓, 贾国新, 等. 水垫塘反拱底板极限荷载非线性有限元计算[J]. 水电能源科学, 2020, **38**(1): 86－89. (ZHAO Lan-hao, ZHENG Tuo, JIA Guo-xin, et al. Nonlinear finite element method of ultimate load of inverted arch floor of plunge pool[J]. Water Resources and Power, 2020, **38**(1): 86－89. (in Chinese))

[18] 赵兰浩, 郑　拓, 杨校礼. 大型弧形钢闸门流激振动数值计算[J]. 水利水电技术, 2020, **51**(6): 58－64. (ZHAO Lan-hao, ZHENG Tuo, YANG Xiao-li. Numerical calculation of flow-induced vibration of large-scale steel radial gate[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, **51**(6): 58－64. (in Chinese))

[19] LIN C N, LI T C, ZHAO L H, et al. Reinforcement effects and safety monitoring index for high steep slopes: a case study in China[J]. Engineering Geology, 2020, **279**: 105861.

[20] WU Z Y, CHEN J K. Pressure-dependent variability in shear strength of a blasting-quarried granite rockfill material[J]. Soils and Foundations, 2019, **59**(6): 2299－2310.

[21] FAN X F, WU Z Y, LIU L J, et al. Analysis of sluice foundation seepage using monitoring data and numerical simulation[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, **2019**: 2850916.

[22] WU Z Y, LI J R, BIAN K, et al. Reliability analysis of slope with cross-correlated spatially variable soil properties using AFOSM[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, **80**(19): 1－12.

[23] 陈　辉, 邓　刚, 张延亿, 等. 考虑温度变化和长期变形的面板堆石坝模拟[J]. 水力发电学报, 2021, **40**(10): 124－134. (CHEN Hui, DENG Gang, ZHANG Yan-yi, et al. Simulation of faced rockfill dams considering temperature change and long-term deformation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, **40**(10): 124－134. (in Chinese))

[24] PEI L, CHEN C, HE K, et al. System reliability of a gravity dam-foundation system using Bayesian networks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, **218**: 108178.

[25] CHEN B, HU T Y, HUANG Z S, et al. A spatio-temporal clustering and diagnosis method for concrete arch dams using deformation monitoring data[J]. Structural Health Monitoring,

2019, **18**(5/6): 1355－1371.

[26] CHEN S Y, GU C S, LIN C N, et al. Prediction of arch dam deformation via correlated multi-target stacking[J]. Applied Mathematical Modelling, 2021, **91**: 1175－1193.

[27] 肖海斌, 陈 豪, 陈 琨, 等. 漫湾水电站大坝安全诊断与决策支持系统研究与构建[C]// 中国大坝工程学会 2019 学术年会, 昆明, 2019. (XIAO Hai-bin, CHEN Hao, CHEN Kun, et al. Research and construction of dam safety diagnosis and decision support system for manwan hydropower station[C]// Proceeding of 2019 Academic Annual Meeting of China Dam Engineering Society, Kunming, 2019. (in Chinese))

[28] MAO Y C, GAO J, QI H, et al. Event fusion and decision approach based on node reliability in dam safety monitoring[C]// 2019 IEEE Fifth International Conference on Big Data Computing Service and Applications (BigDataService), 2019, Newark.

[29] 毛莺池, 王 静, 陈小丽, 等. 基于特征组合与 CNN 的大坝缺陷识别与分类方法[J]. 计算机科学, 2019, **46**(3): 267－274. (MAO Ying-chi, WANG Jing, CHEN Xiao-li, et al. Dam defect recognition and classification based on feature combination and CNN[J]. Computer Science, 2019, **46**(3): 267－274. (in Chinese))

[30] MAO Y C, ZHANG J H, QI H, et al. DNN-MVL: DNN-multi-view-learning-based recover block missing data in a dam safety monitoring system[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, **19**(13): 2895.

[31] CHEN H, MAO Y C, WANG L B, et al. Spatial-temporal features based sensor network partition in dam safety monitoring system[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, **20**(9): 2517.

[32] 朱沁夏, 张士辰, 杨正华. 水库大坝安全管理预警标准研究[J]. 中国水利, 2020(16): 23－25. (ZHU Qin-xia, ZHANG Shi-chen, YANG Zheng-hua. Research on early warning standard of reservoir dam safety management system[J]. China Water Resources, 2020(16): 23－25. (in Chinese))

[33] 刘 帅, 盛金保, 王昭升, 等. 基于模糊神经网络的水电施工安全隐患评价[J]. 水利水运工程学报, 2020(1): 105－111. (LIU Shuai, SHENG Jin-bao, WANG Zhao-sheng, et al. Evaluation method for hidden safety dangers of hydropower construction based on fuzzy neural network[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(1): 105－111. (in Chinese))

[34] XU G Y, JING Z X, MAO Y C, et al. A dam deformation prediction model based on ARIMA-LSTM[C]//2020 IEEE Sixth International Conference on Big Data Computing Service and Applications (BigDataService), 2020, Oxford.

[35] 何 露, 王士军, 谷艳昌, 等. 土石坝渗压水位极值预测[J]. 水利水运工程学报, 2021(4): 29－35. (HE Lu, WANG Shi-jun, GU Yan-chang, et al. Prediction of seepage water level extremum of earth rock dam[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(4): 29－35. (in Chinese))

[36] 陈 剑, 毛才传, 严吉皞, 等. 水库 GIS 智能巡检系统研究与应用[J]. 水利信息化, 2020(4): 37－41, 29. (CHEN Jian, MAO Cai-chuan, YAN Ji-hao, et al. Research and application of GIS intelligent patrol system for reservoir[J]. Water Resources Informatization, 2020(4): 37－41, 29. (in Chinese))

[37] 中国工程建设标准化协会. 混凝土结构耐久性电化学技术规程: T/CECS 565—2018[S]. 2018. (Technical Specification of Electrochemical Technology for Durability of Concrete: T/CECS 565—2018[S]. 2018. (in Chinese))

[38] 混凝土结构用有机硅渗透型防护剂应用技术规程: T/CCES 12—2020[S]. 2020. (Technical Specification of Organosilicon Permeating Protective Agents Applied for Concrete Structures: T/CCES 12—2020[S]. 2020. (in Chinese))

[39] 混凝土抗氯离子渗透性能的交流电测量方法: T/ASC 16—2020[S]. 2020. (Alternating-Current Method for Measuring Chloride Penetration Resistance of Concrete: T/ASC 16—2020[S]. 2020. (in Chinese))

[40] 水利水电工程白蚁实时自动化监测预警系统技术规范: T/CHES 43—2020[S]. 2021. (Technical Specification for Realtime Automatic System for Monitoring and Alerting Termites in Water and Hydropower Projects: T/CHES 43—2020[S]. 2021. (in Chinese))

DOI：10.11779/CJGE202207001 一文彩色插图

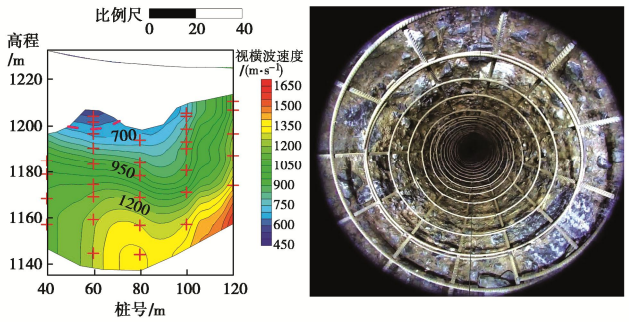


图 6　堰塞坝空间结构和物性参数检测识别

Fig. 6 Detection and recognition of spatial structure and physical parameters of barrier dams

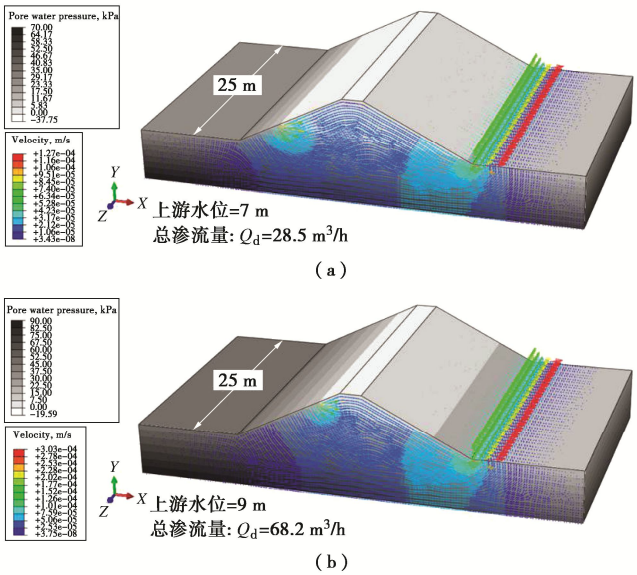


图 8　不同水位条件下的确定性分析结果（渗透系数保持常数）

Fig. 8 Deterministic analysis results under different water level conditions (permeability coefficient keeping constant)

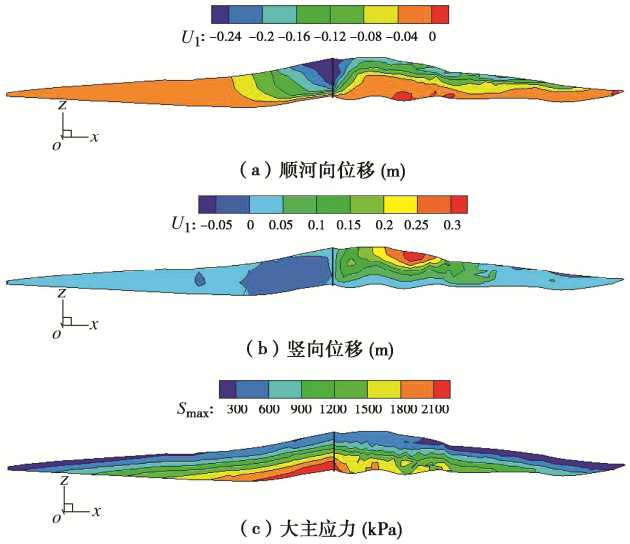


图 9　红石岩堰塞坝工程蓄水运行期典型纵剖面应力变形分布

Fig. 9 Distribution of stress and deformation of typical longitudinal section of Hongshiyan dam project during water storage and operation

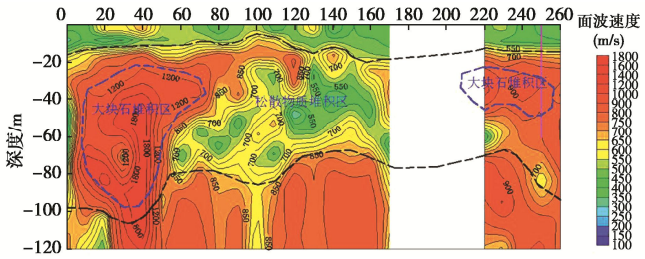


图 17　典型渗流通道模型磁场平面分布图

Fig. 17 Plane distribution of magnetic field in typical seepage channel model

DOI：10.11779/CJGE202207002 一文彩色插图

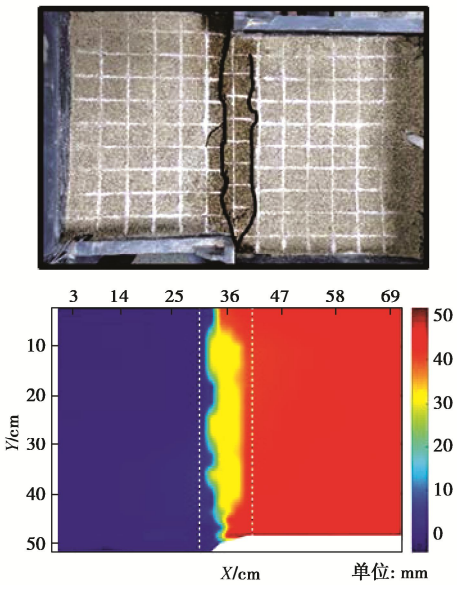


图 15　隧洞错断模型试验与断裂带位移分布 PIV 监测

Fig. 15 Model tests on tunnel faults and PIV monitoring of displacement distribution in fault zone

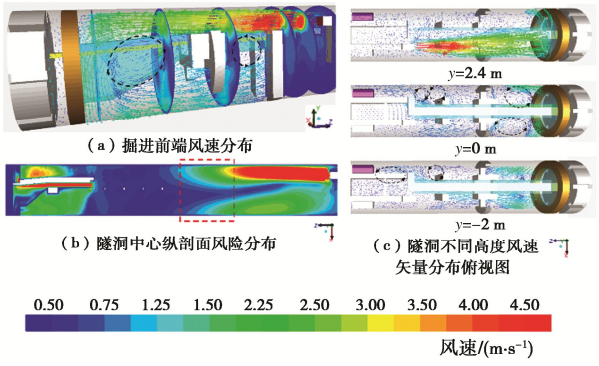
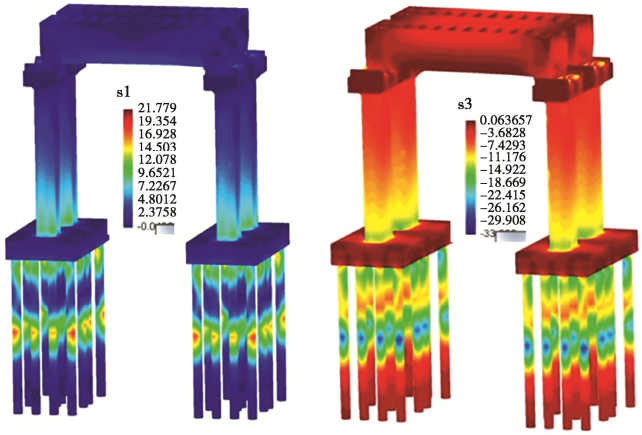


图 24　隧洞内部风速分布

Fig. 24 Distribution of wind speed in tunnel

DOI：10.11779/CJGE202207003 一文彩色插图



（a）静动综合主拉应力极值　　（b）静动综合主压力极值

图 27　渡槽结构的非线性地震响应计算结果

Fig. 27 Calculation results of nonlinear seismic response of aqueduct structure

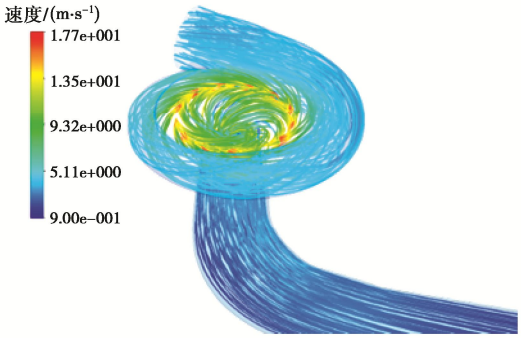


图 31　全流道流线

Fig. 31 Full channel streamline

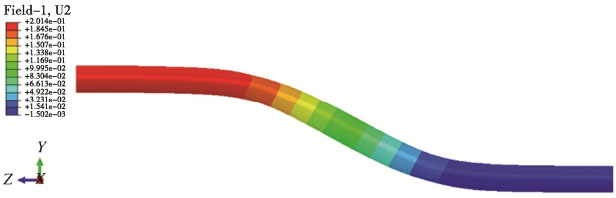
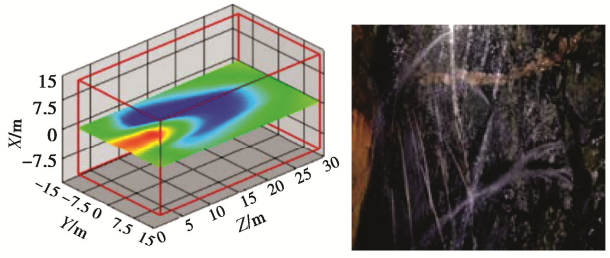


图 46　活动断裂错动位移云图

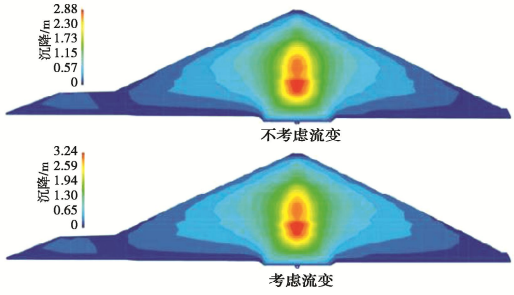
Fig. 46 Staggered displacement nephogram of active fault



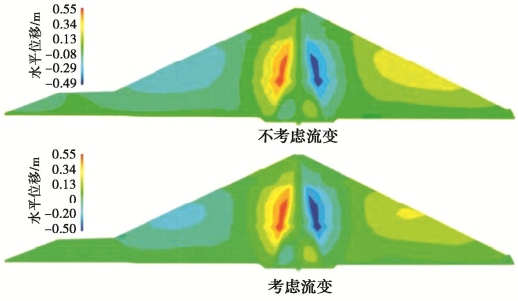
（a）激发极化三维成像　　（b）裂隙流水

图 57 T9+199 激发极化探测与开挖揭露情况

Fig. 57 Polarization detection and excavation exposure at the mileage of T9+199



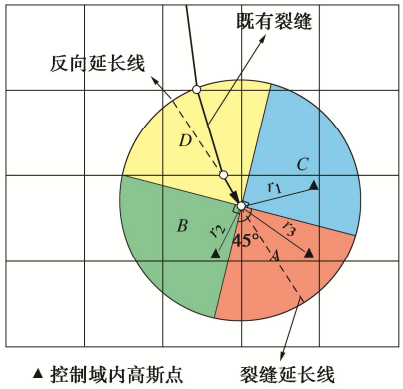
（a）最大剖面沉降分布云图



（b）最大剖面水平位移分布云图

图 2　某特高心墙堆石坝填筑施工过程模拟[4]

Fig. 2 Deformation behaviors of a high rockfill dam by proposed model[4]



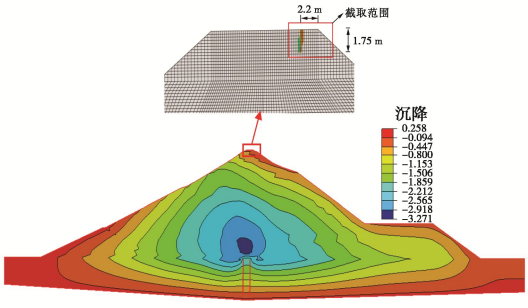


图 7　高土石坝坝顶裂缝模拟方法与案例[8]

Fig. 7 Modeling of crest crack in a high rockfill dam[8]

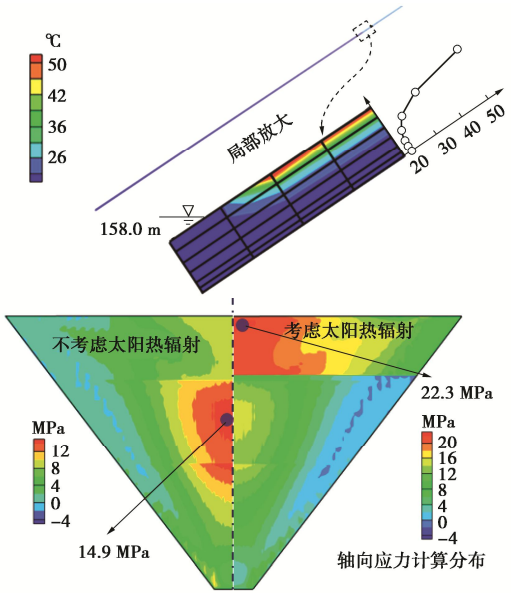
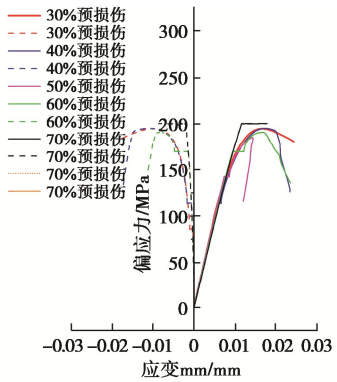


图 11　面板坝应力场－温度场耦合高精度分析方法特点

Fig. 11 Coupling analysis of temperature and stress fields for concrete-faced dam

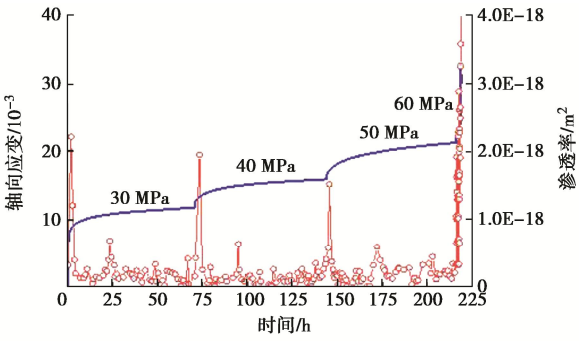
DOI：10.11779/CJGE202207004 一文彩色插图



（a）不同初始损伤40 MPa水压砂岩三轴应力－应变曲线 (围压80 MPa)

图 2　岩石水岩耦合试验

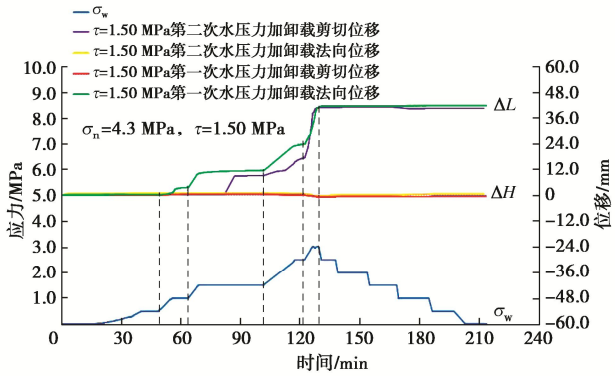
Fig. 2 Water-rock interaction test of rock samples



（b）试验结果

图 3　高渗压条件下岩石三轴蠕变试验

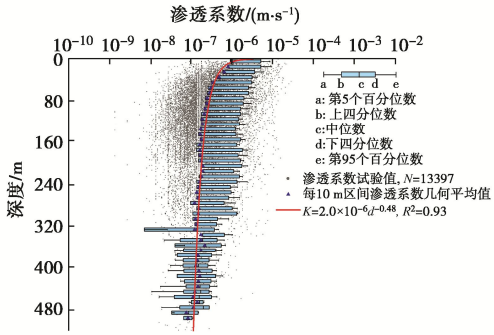
Fig. 3 Triaxial creep test of rock under high water pressure



（b）试验荷载－水压力－位移－时间试验曲线

图 7　裂隙岩体现场水岩耦合试验

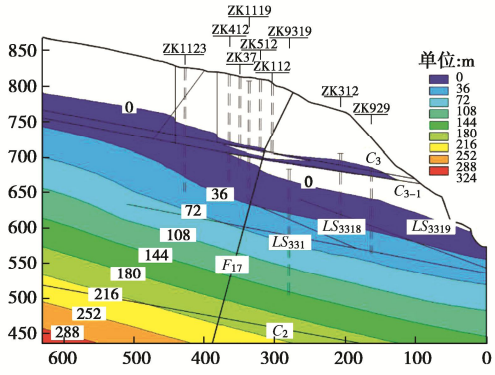
Fig. 7 Water-rock interaction tests on joint rock in field



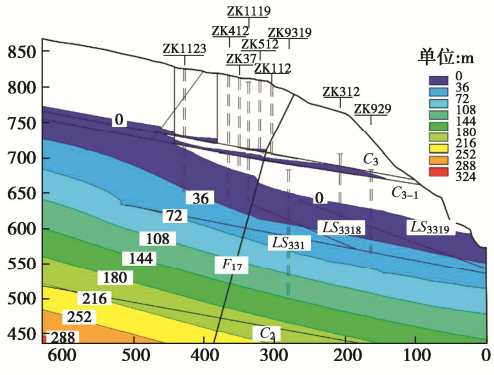
（a）岩体渗透系数随埋深的分布规律

图 15　西南深切峡谷区岩体渗透系数随埋深分布规律

Fig. 15 Variation of hydraulic conductivity of rock masses with depth in deep-incised valleys, Southwest China



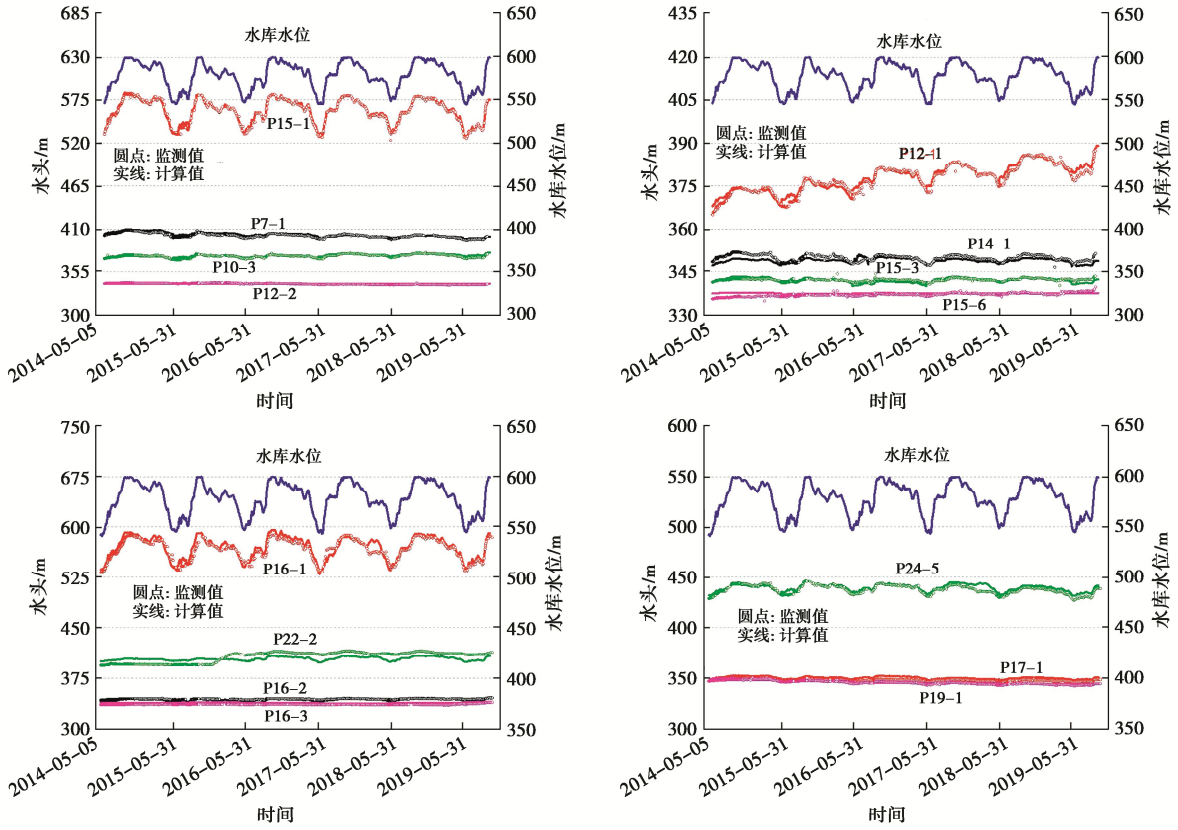
（a）



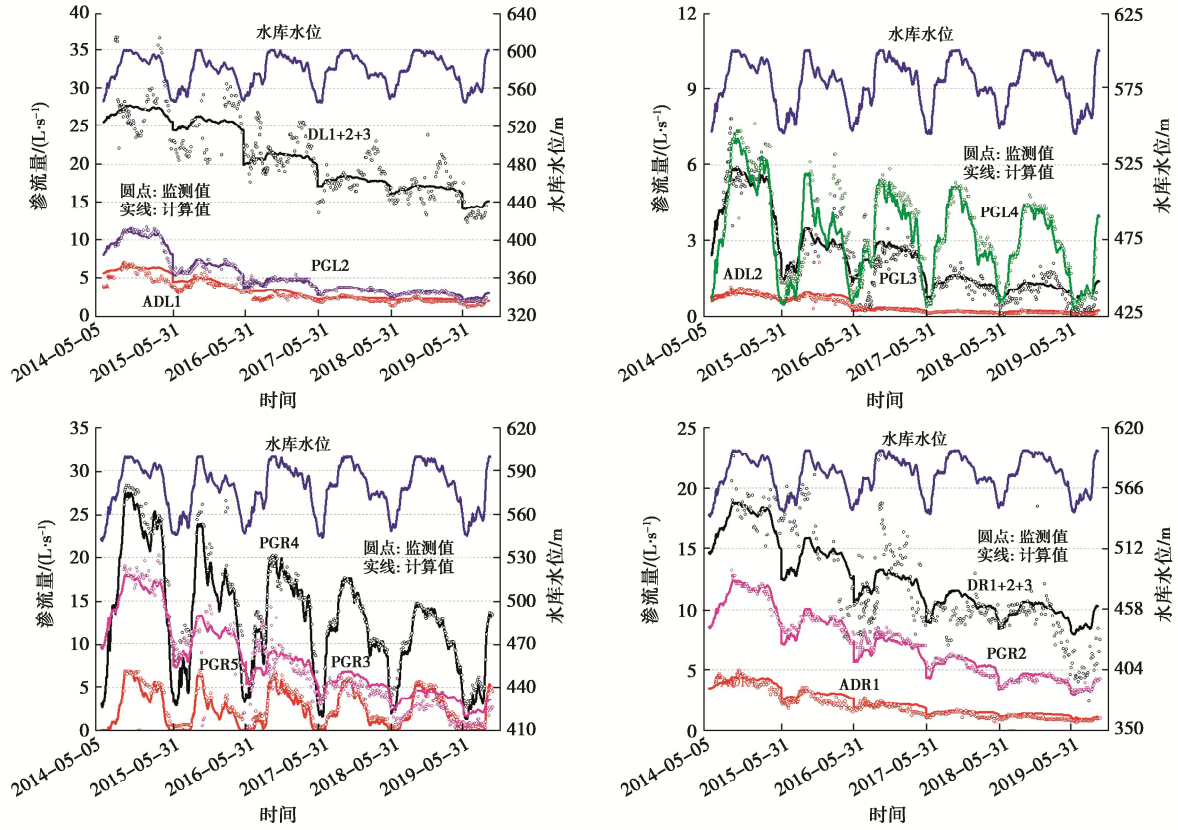
（b）

图 18　白鹤滩水电站坝址区水文地质环境演化特征

Fig. 18 Variation of hydrogeological environment at the site of Baihetan Hydropower Station



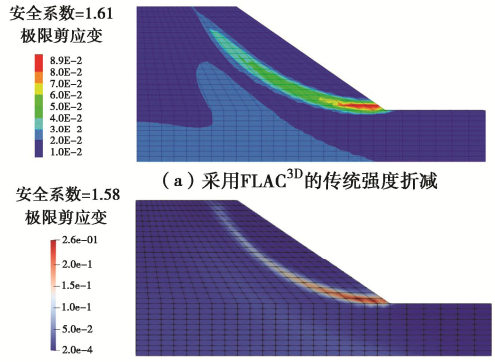
（b）渗压过程曲线对比



（c）流量过程曲线对比

图 22　溪洛渡水电站三维渗流场动态反馈分析

Fig. 22 Dynamic feedback analysis of 3D seepage field of Xiluodu Hydropower Station

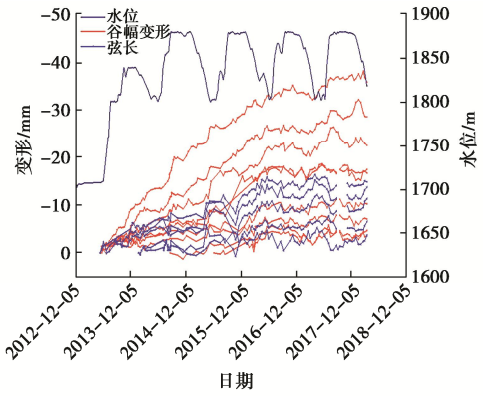


（a）采用FLAC^{3D}的传统强度折减

（b）FEM/DEM多尺度强度折减法

图 25　基于多尺度和传统强度折减方法结果对比

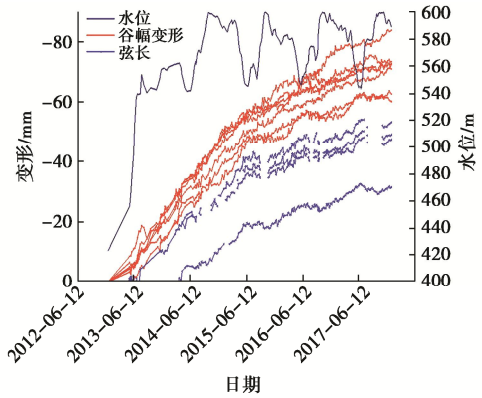
Fig. 25 Comparison of results by multi-scale and traditional strength reduction methods



（a）谷幅与弦长变形

图 27　锦屏一级坝基变形

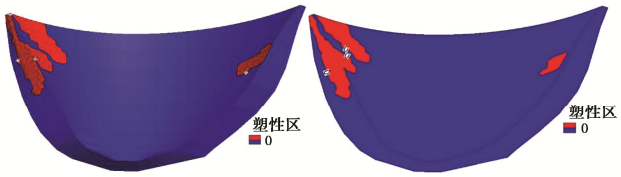
Fig. 27 Deformations of dam foundation of Jinping No.1



（a）谷幅与弦长变形

图 28　溪洛渡坝基变形

Fig. 28 Deformations of dam foundation of Xiluodu



（a）无加固措施　（b）有加固措施

图 33　白鹤滩拱坝下游坝面屈服区图

Fig. 33 Yield zone map of downstream of Baihetan Arch Dam

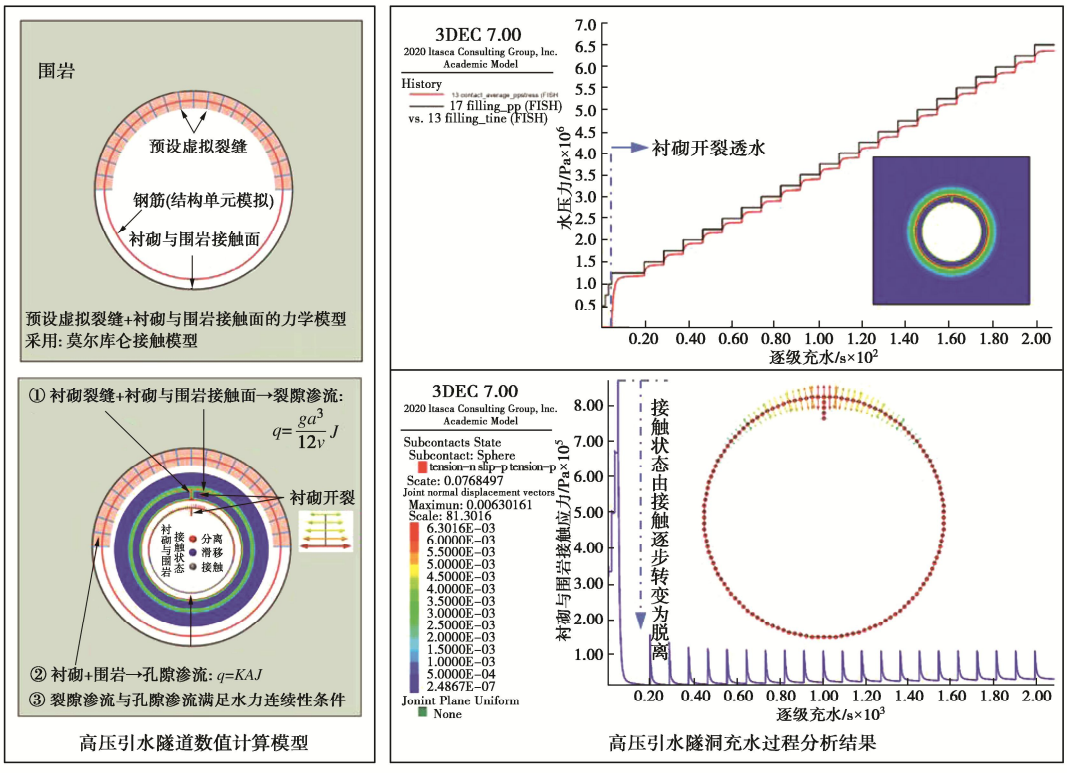
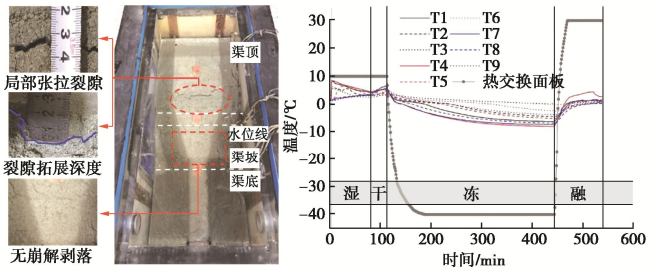


图 36　高压引水隧洞工程实际运行工作性状模拟分析

Fig. 36 Simulation analysis of actual operation and working characteristics of high-pressure diversion tunnel

DOI：10.11779/CJGE202207005 一文彩色插图



（b）坡面裂隙发育　　（c）渠基土温度响应

图 4　高寒区渠道湿干冻融离心模拟

Fig. 4 Centrifuge modelling of wetting-drying and freeze-thaw in high and cold regions

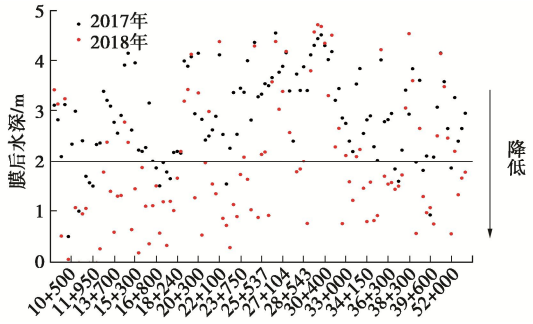


图 19　渠道沿线渠身水位变化规律

Fig. 19 Variation of water lever inside canal slope

DOI：10.11779/CJGE202207009 一文彩色插图

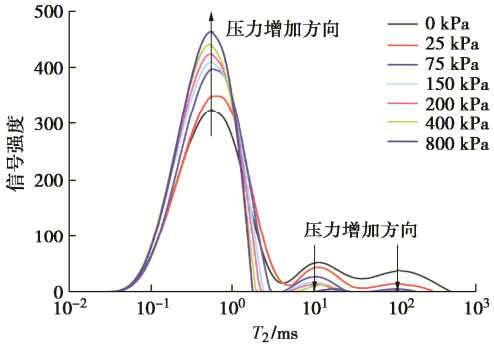


图 4　膨胀土原位力学特性

Fig. 4 In-situ mechanical behaviors of expansive soils

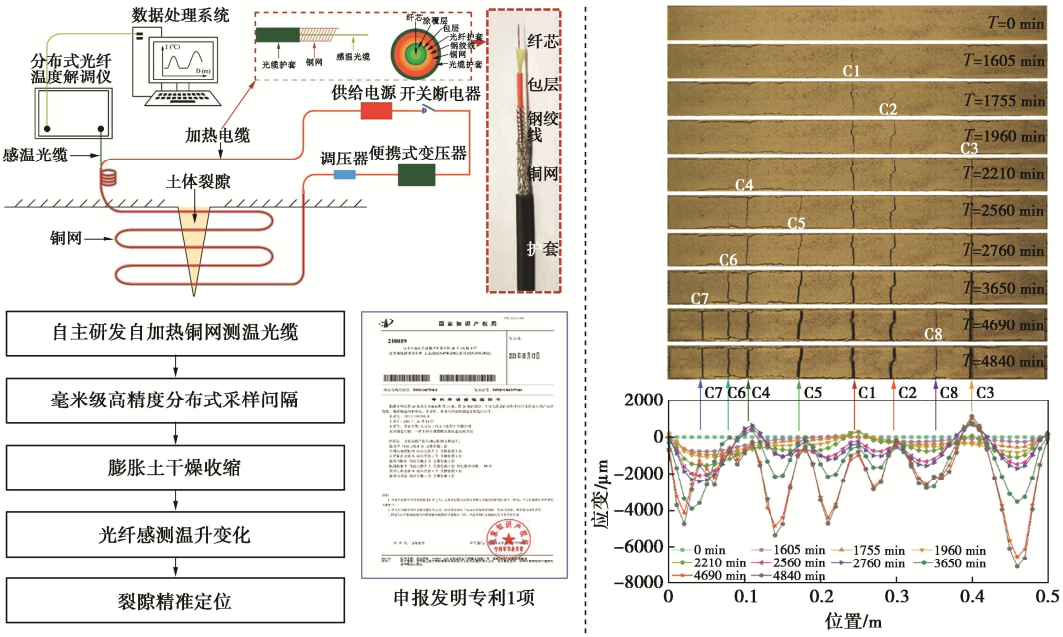
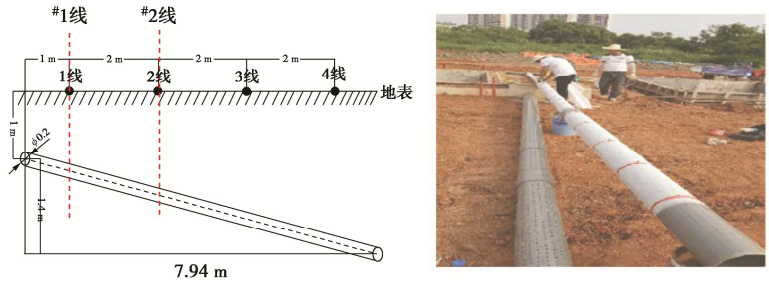


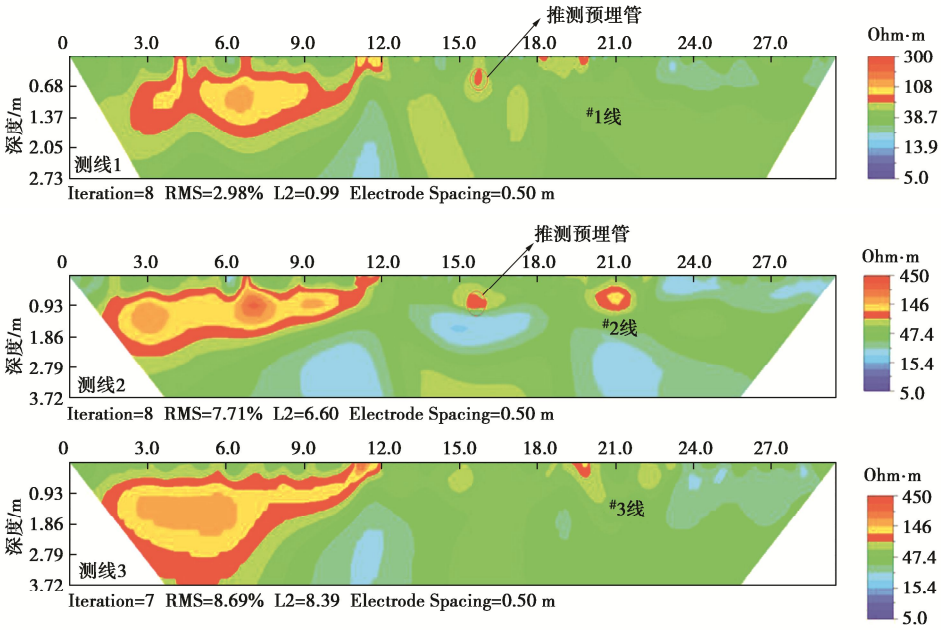
图 8　基于分布式光纤测温系统的膨胀土裂隙监测技术

Fig. 8 Distributed fiber optic sensing (DFOS)-based crack monitoring technique

DOI：10.11779/CJGE202207010 一文彩色插图



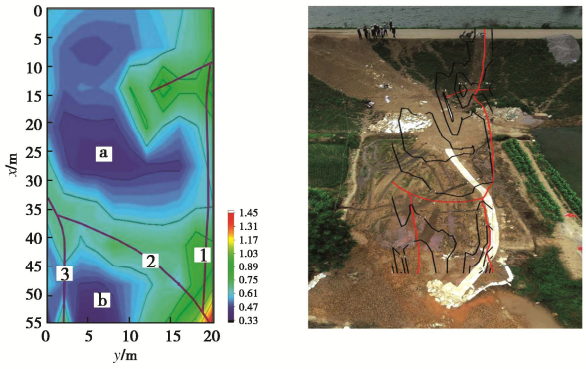
（a）倾斜式PVC管模拟空洞



（b）相应剖面电阻率二维影像图

图 11 MD-12 研制设备测试结果

Fig. 11 Test results of MD-12 equipment

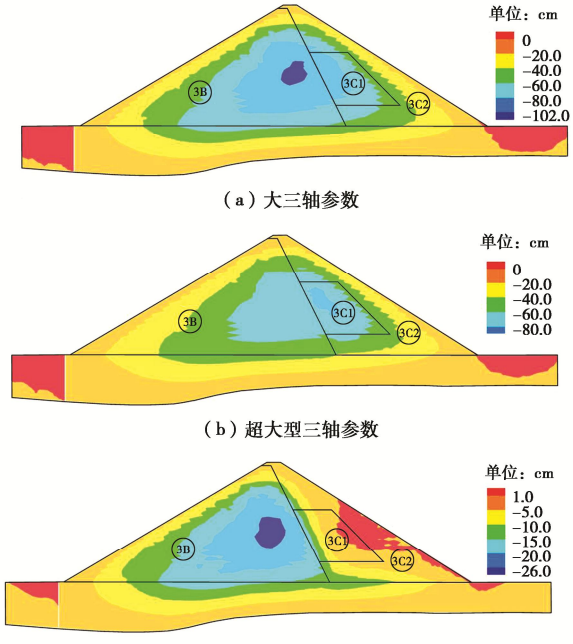


（a）磁场异常比率响应图　　（b）弱磁探测结果解译图

图 20 管涌弱磁法探测结果图

Fig. 20 Detected results of piping path by weak magnetic method

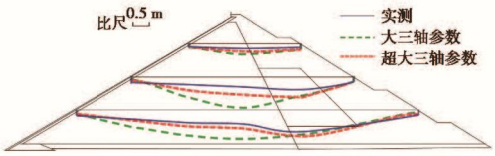
DOI：10.11779/CJGE202207011 一文彩色插图



（a）大三轴参数

（b）超大型三轴参数

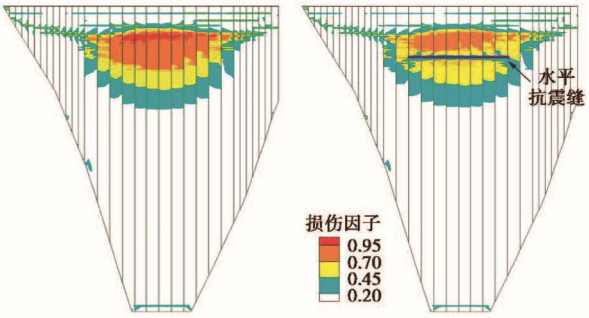
（c）大型、超大型三轴参数沉降计算差值



（d）实测与计算值对比

图 2 筑坝料缩尺效应对阿尔塔什面板坝计算变形的影响

Fig. 2 Influences of scale effect on deformation analysis of Aertashi CFRD



（a）无措施时面板损伤分布　（b）有措施时面板损伤分布

图 8 猴子岩工程应用效果举例

Fig. 8 Application examples of Houziyan CFRD

DOI：10.11779/CJGE202207012 一文彩色插图

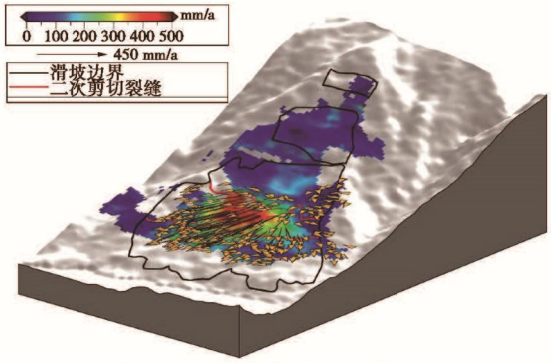


图 2 三峡新铺滑坡地表三维变形

Fig. 2 Three-dimensional deformation of Xinpu landslide in Three Gorges

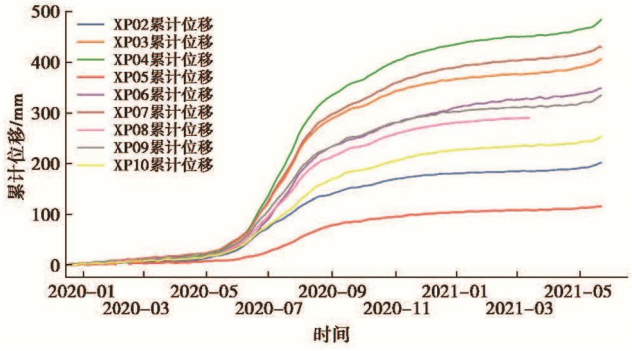


图 18 新铺滑坡 GNSS 实时监测

Fig. 18 GNSS monitoring results for Xinpu landslide

DOI：10.11779/CJGE202207013 一文彩色插图

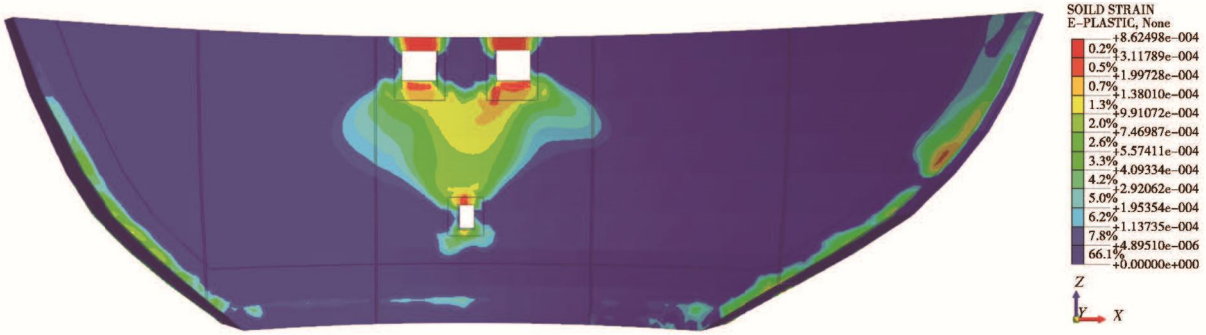


图 13 坝体屈服区计算结果

Fig. 13 Calculated results of yield zone of dam

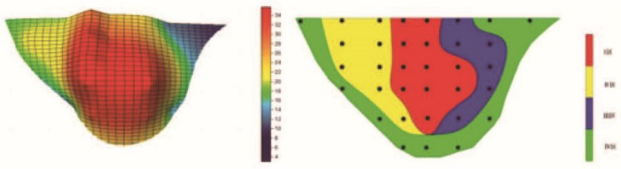


图 16 拱坝高水位实测径向位移分布和变形聚类分区图

Fig. 16 Distribution of monitoring deformation and clustering map of deformation distribution during high-water-level period

中国标准连续出版物号 ISSN 1000–4548 / CN 32–1124/TU　发行代号 国内 28–62 / 国外 MO 0520　国内定价 40 元 / 期 / 480元 / 年