

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-gang¹, CHEN Yi-feng², LU Bo³, WANG Yu-jie¹, XU Wei-ya⁴, YANG Qiang⁵, ZHANG Xi-wei⁶

(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。

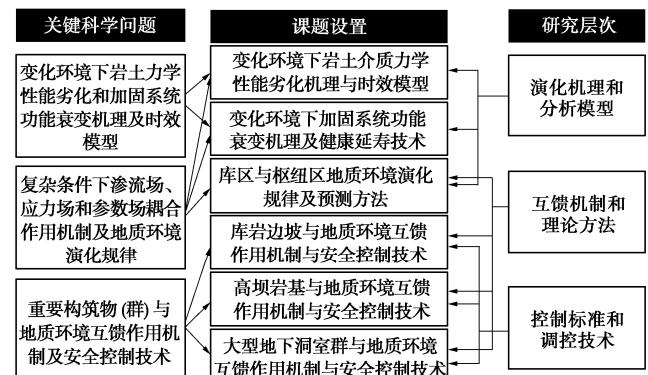


图1 课题与科学问题及课题之间的逻辑关系

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)。

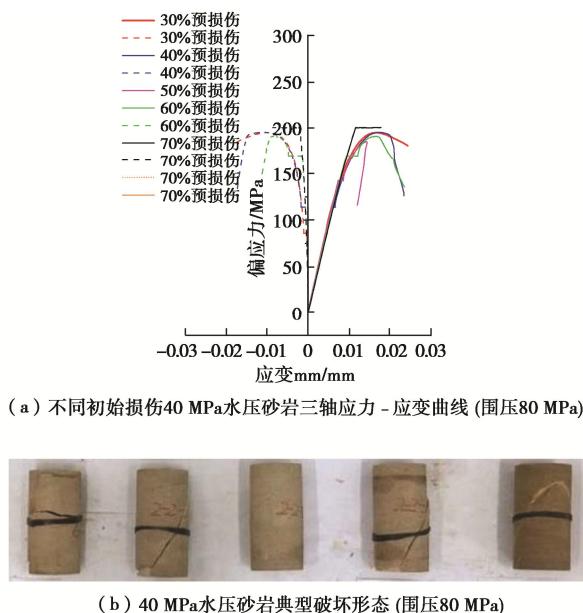


图 2 岩石水岩耦合试验

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:

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

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)。

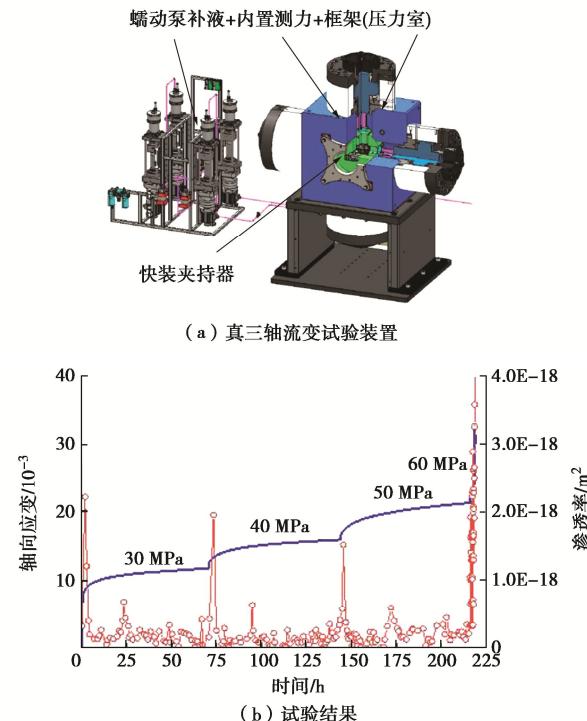
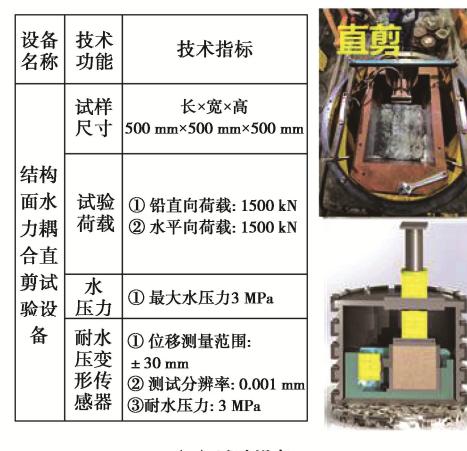


图 3 高渗压条件下岩石三轴蠕变试验

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))。



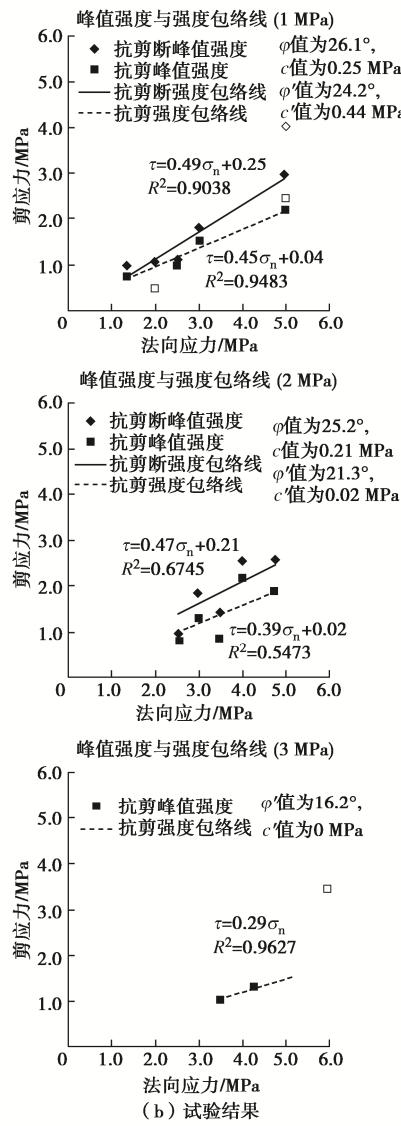


图 4 结构面水岩耦合试验

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。

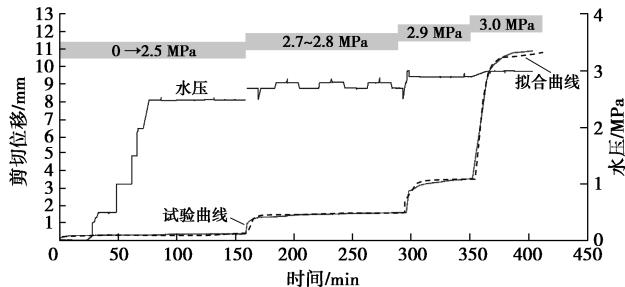


图 5 逐级增加水压结构面剪切位移时间曲线

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:

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

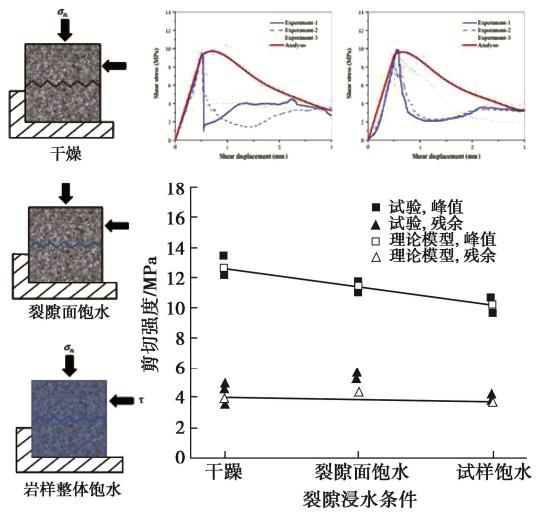
模型计算结果与试验结果吻合较好。

(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)。

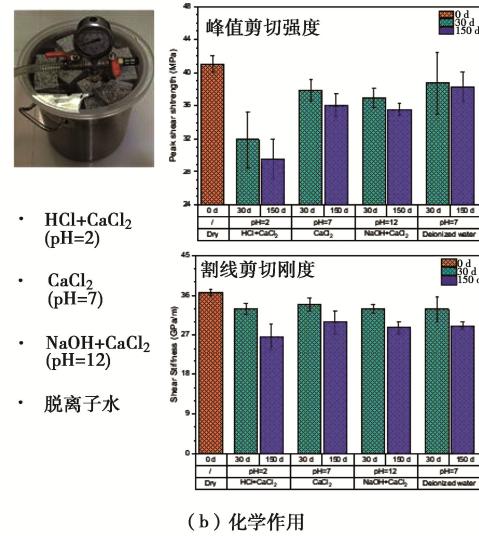
(4) 裂隙岩体性能劣化机理及时效模型

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



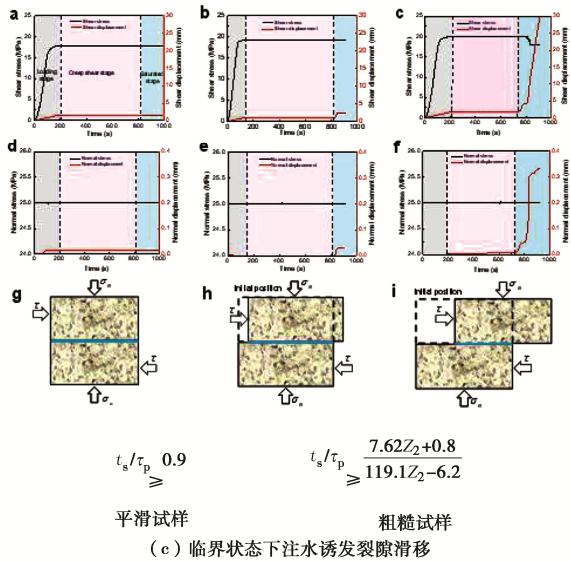
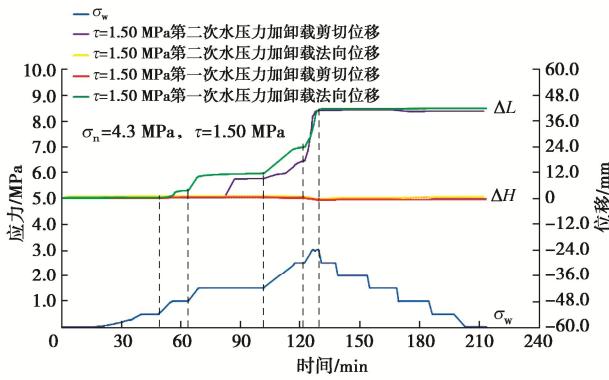


图 6 结构面水理化特性试验装置和结果

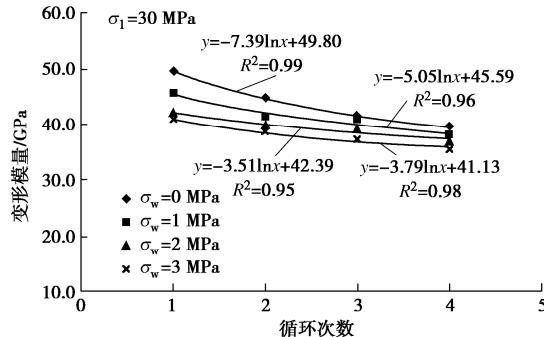
Fig. 6 Test devices and results for hydrophysicochemical properties of rock discontinuities

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: 12000 kN 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 3 MPa
	耐水压	① 位移测量范围: ± 5 mm ② 测试分辨率: 0.001 mm ③ 耐水压: 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 6 裂隙岩体现场水岩耦合试验

Fig. 6 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:

$$E = E_0 - ap_w - b \ln(N) \quad (3)$$

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]。



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

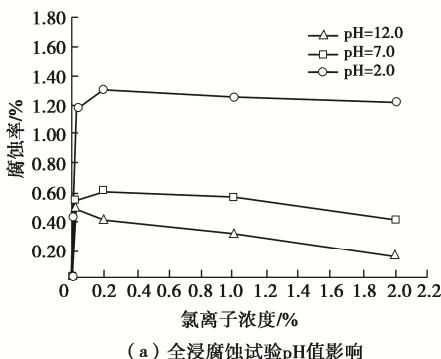
研制了预应力锚索全浸泡、电解加速和干湿循环条件下的室内拟环境腐蚀试验装置(图9), 系统开展了锚索在不同环境下的近2000余组的腐蚀试验^[13-14]。



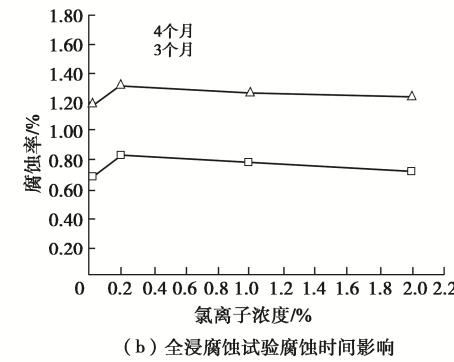
图9 室内拟环境加速腐蚀试验装置

Fig. 9 Simulated environment accelerated corrosion test devices in laboratory

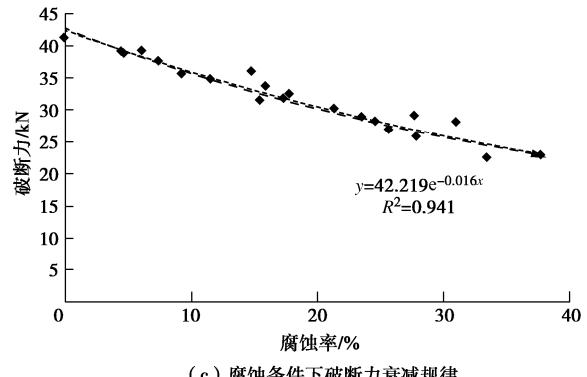
基于不同介质全浸泡腐蚀试验, 获得不同离子类型和离子浓度下锚索腐蚀规律(图10(a), (b))。为解决浸泡腐蚀试验时间过长的问题, 进一步采用电解加速腐蚀试验, 基于法拉第定律建立了不同腐蚀环境、应力水平下的腐蚀时间与锚索腐蚀量之间的对应关系, 获得腐蚀全过程曲线, 为预应力锚索功能衰变研究提供了基础(图10(c))。通过与预应力锚索现场腐蚀过程更相近的干湿循环腐蚀试验, 研究了不同Cl⁻浓度、干湿比(5:1)以及循环周期条件下的钢绞线腐蚀规律, 试验结果表明: ①锚索腐蚀率随着氯盐浓度的增加, 其敏感性逐步下降, 且存在上限值。从目前的试验结果来看, 该浓度上限值应≤1%。②随着腐蚀率的增大, 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。



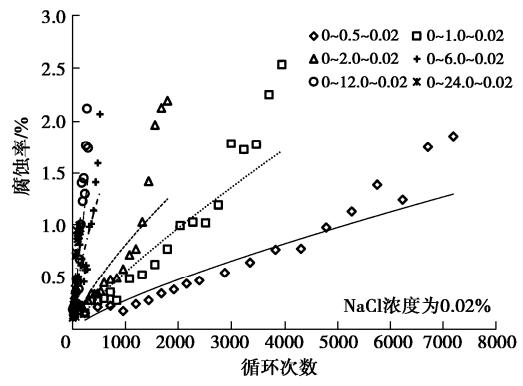
(a) 全浸腐蚀试验pH值影响



(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

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:

$$t_{\text{service}} = \frac{w_a}{w_t(\omega_{\text{Cl}}, T_p, \sigma_s, \dots, A_{\text{st}})} \quad . \quad (4)$$

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 ($L=8\text{ m}$) 11.3 ($L=24\text{ m}$)

(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。

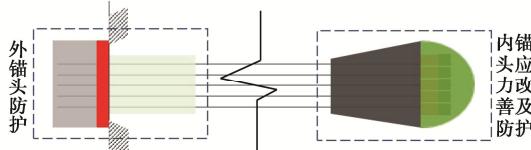


图11 内外锚头防腐结构

Fig. 11 Corrosion prevention 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]。

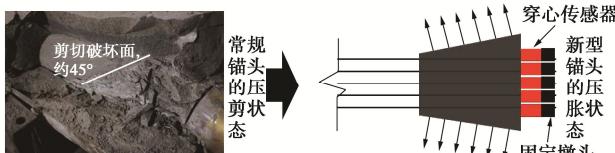


图12 压胀式楔形内锚头结构及受力特征

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)。

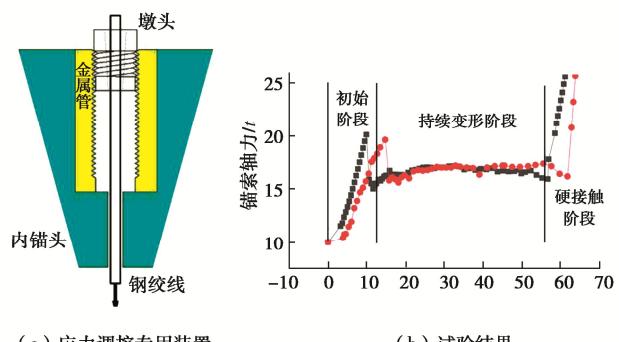
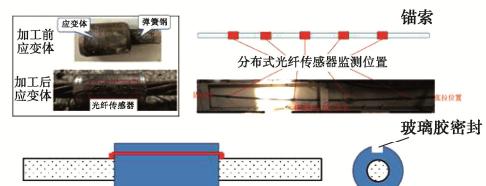


图13 新型超限荷载变形调整预应力锚索内锚头
Fig. 13 New type of anchor head for deformation adjustment under excessive load

c) 分布式应力变形实时监测及缺陷检测设备

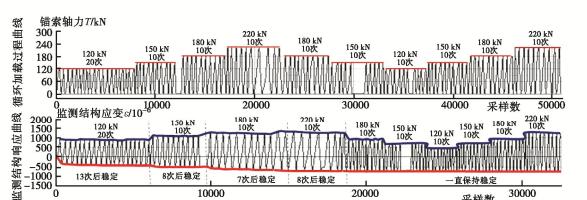
针对锚索内部应力监测的难题,提出了一种基于应变体的新型锚索全程分布式应力监测方法^[16]。该监测设备与方法既能保持锚索本身的索体结构特征,又能实现锚索内部应力监测,同时还可以为锚索缺陷检测提供基础条件。室内反复张拉试验结果表明:监测结构与锚索耦合部位强度大于锚索本身强度,锚索轴力超过屈服荷载前能够保持很好的协调一致性;根据反复张拉试验响应曲线建立了监测结构应变与锚索轴力计算公式(图14),利用该装置相邻应变体的异常响应特征,可实时捕捉到锚索存在或产生的缺陷。该装置在阿尔塔什右岸高边坡工程中得到了应用和验证。



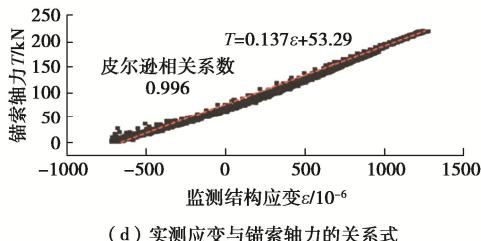
(a) 分布式内部应力监测结构示意图



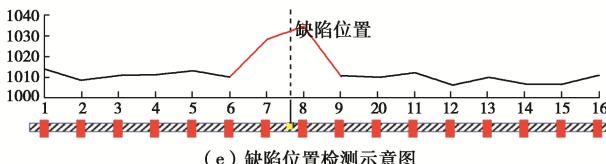
(b) 反复张拉试验设备



(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

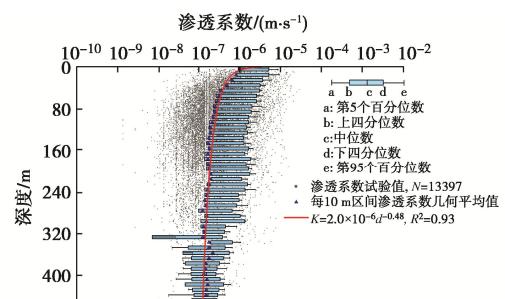
2.3 复杂条件下渗流场、应力场和参数场耦合作用机制及地质环境演化规律

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

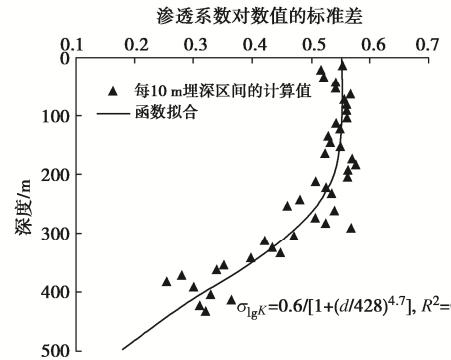
(b) 岩体渗透系数对数标准差随埋深的分布规律
Fig. 15 Variation of hydraulic conductivity of rock masses with depth in deep-incised valleys, Southwest China

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。

$$\frac{K_t}{K_0} = \frac{e^{-\alpha t} + \beta}{1 + \beta} \quad . \quad (5)$$

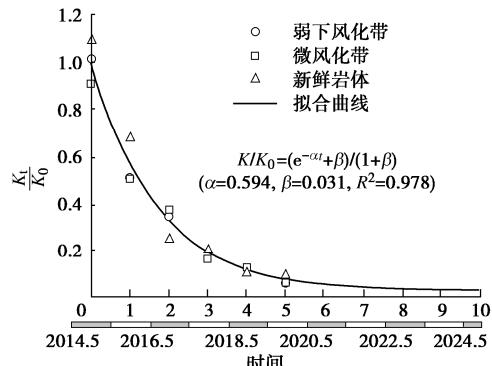


图 16 溪洛渡水电站近坝区玄武岩渗透系数的演化规律

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:

$$\left. \begin{aligned} & (c_w, \omega S_s) \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot v = 0, \\ & v = -k_r K \cdot \nabla(h + z), \\ & S_e = \frac{\theta - \theta_s}{\theta_s - \theta_r} = [1 + (\alpha |h|)^n]^{-m}, \\ & K_r = [1 - (1 - S_e)^m]^{2+\beta}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

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

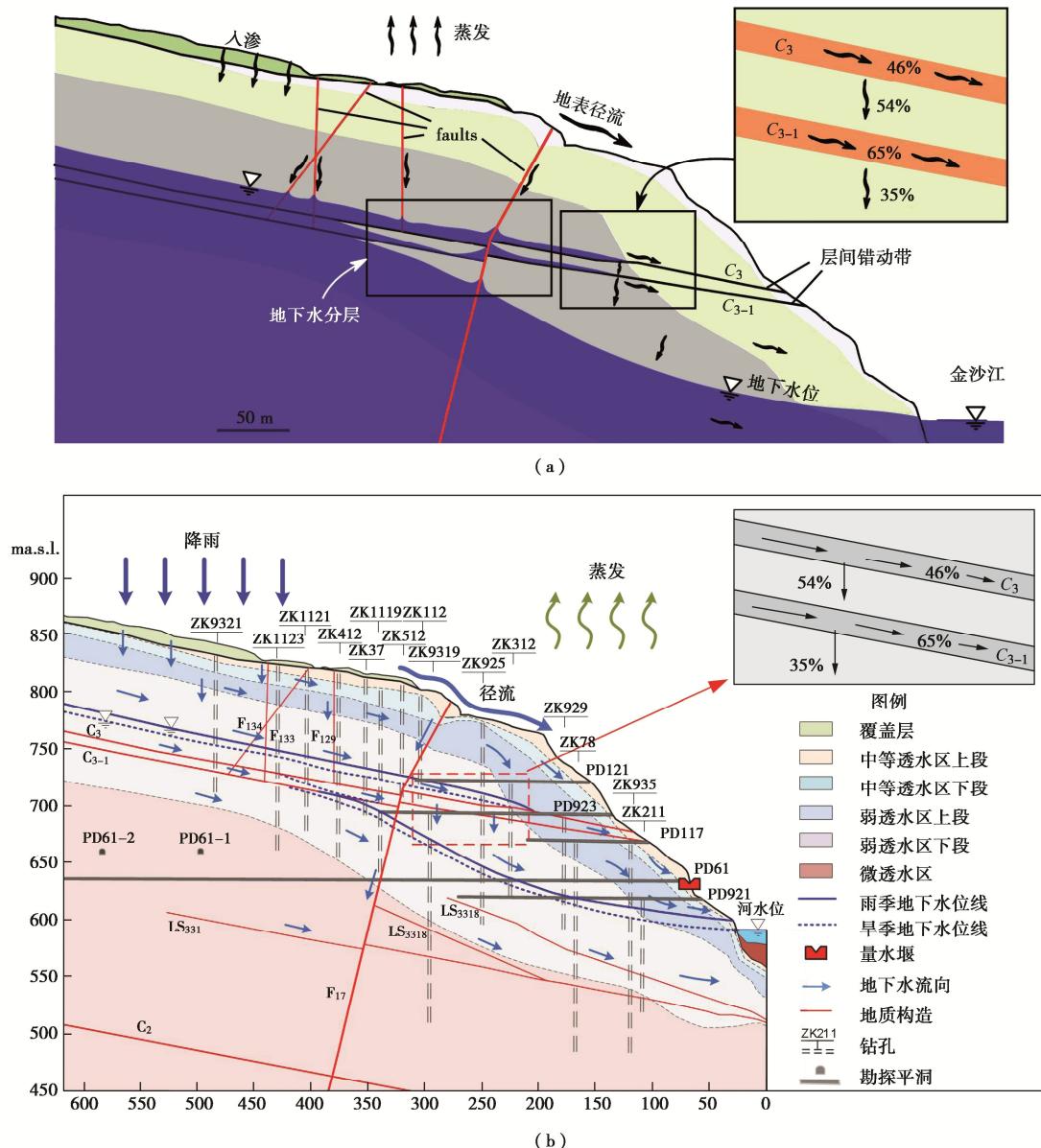


图 17 地下水分层现象与脉状地下水运动特征

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

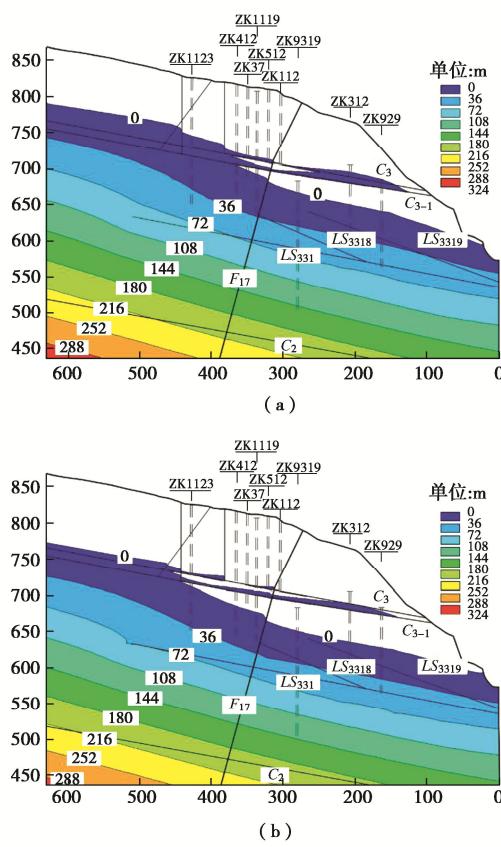


图 18 白鹤滩水电站坝址区水文地质环境演化特征

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:

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

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)。

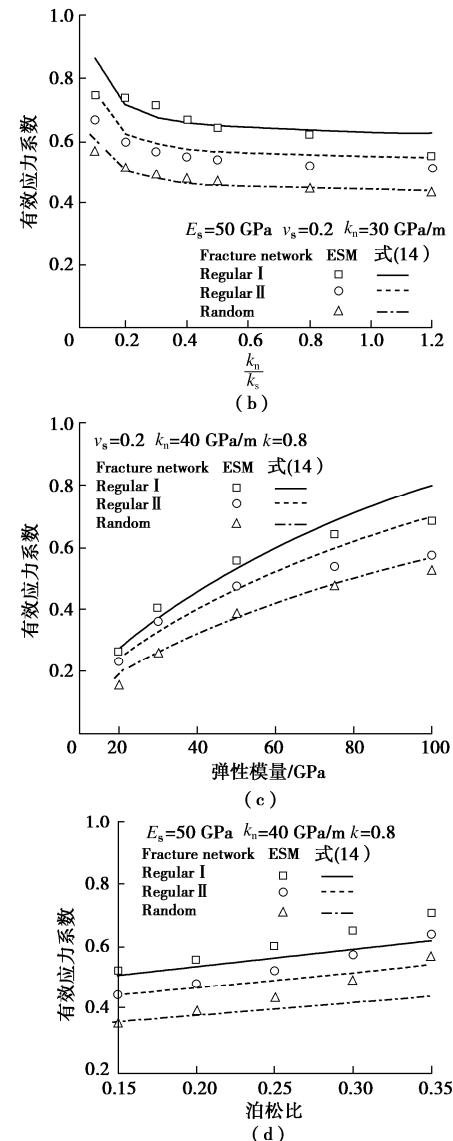
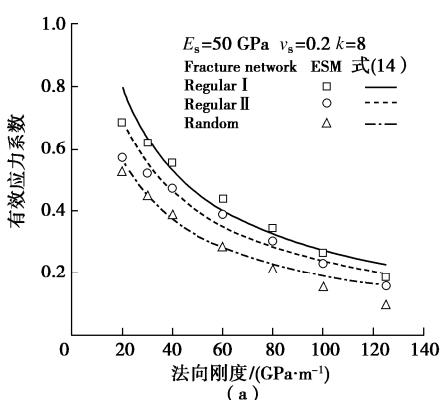


图 19 预测饱和裂隙岩体有效应力系数的经验模型

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演分析研究，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。

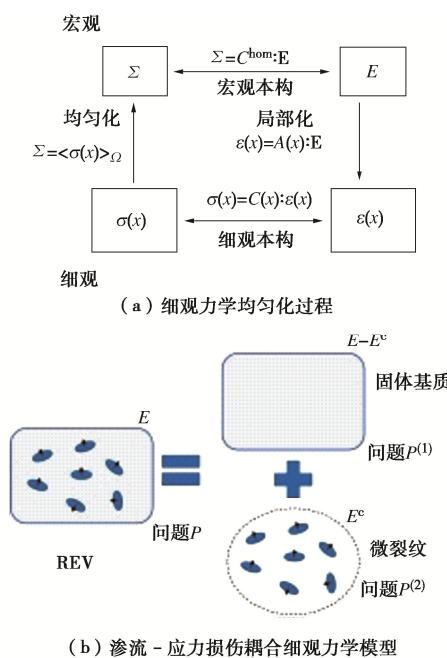


图 20 渗流 - 应力耦合损伤力学模型

Fig. 20 Micromechanical damage model for hydro-mechanical coupling

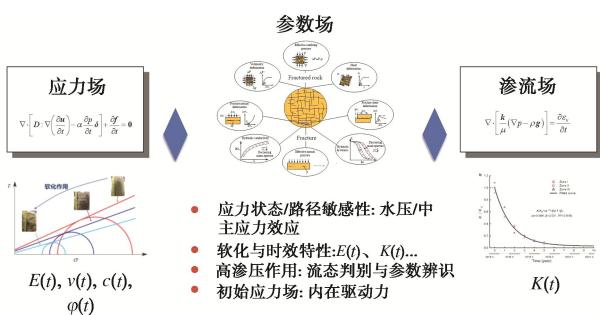


图 21 岩体渗流 - 应力 - 参数耦合数值模拟方法框图

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。

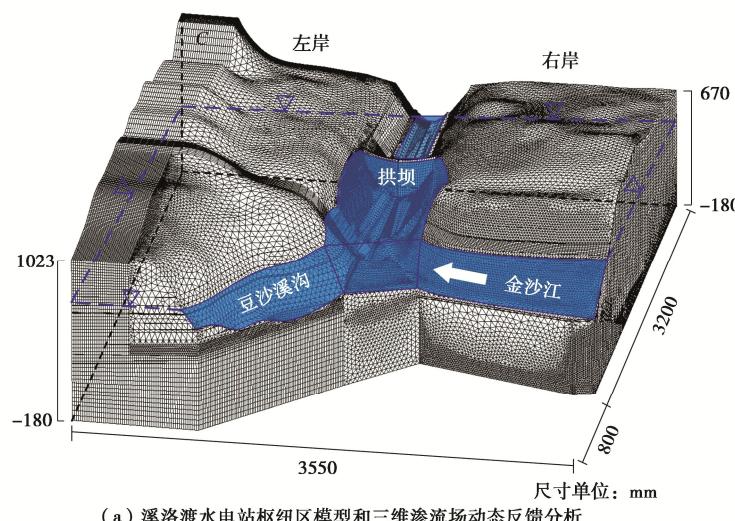
(1) 工程边坡与地质环境互馈作用机制及安全控制技术

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

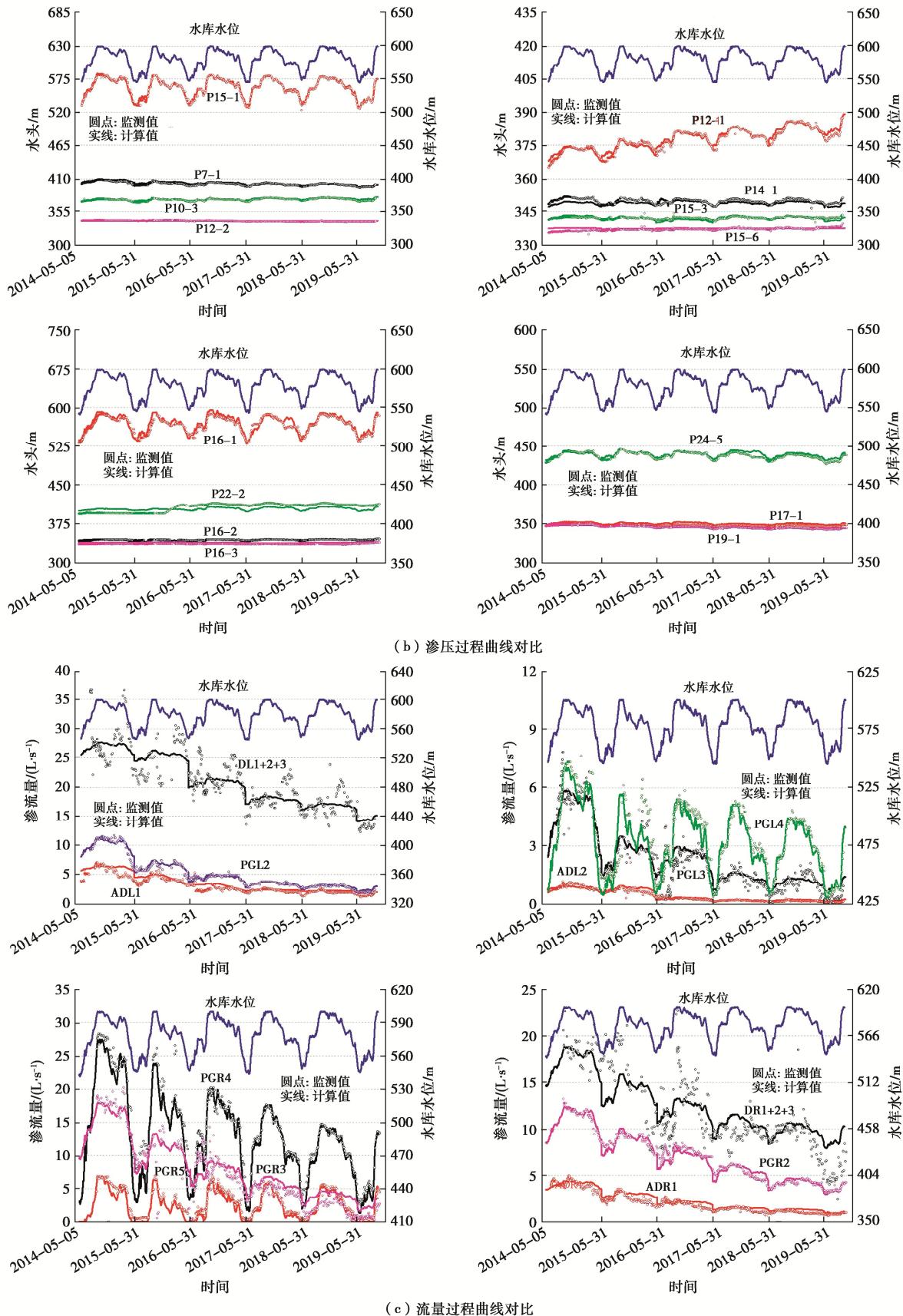


图 22 溪洛渡水电站三维渗流场动态反馈分析

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

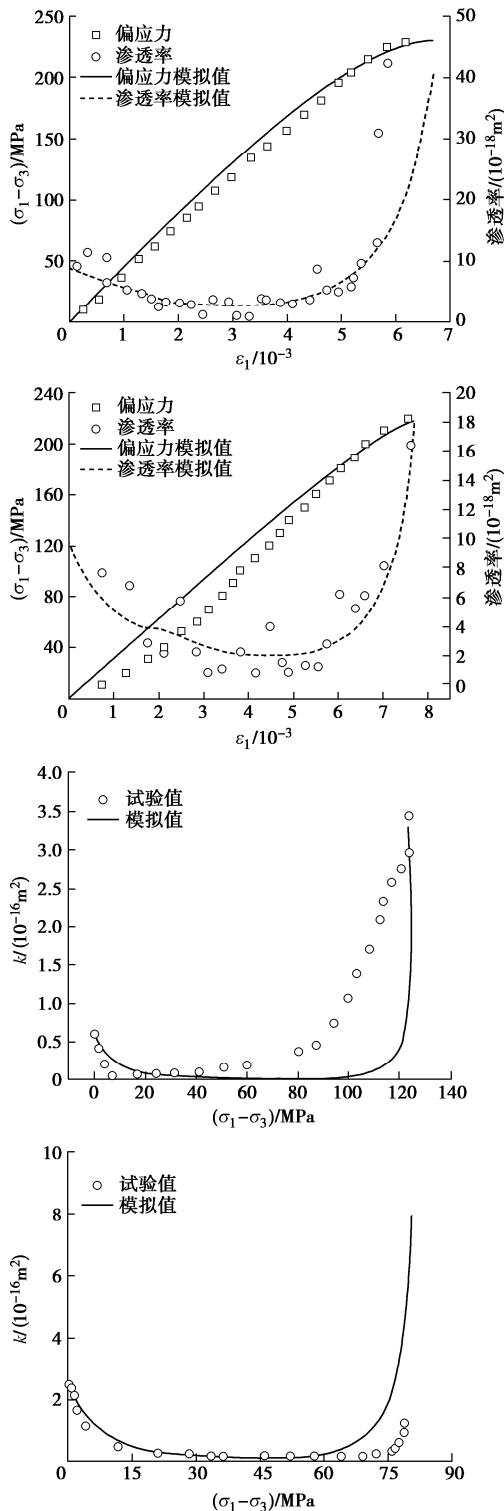


图 23 库岸边坡渗流应力耦合损伤力学模型

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。

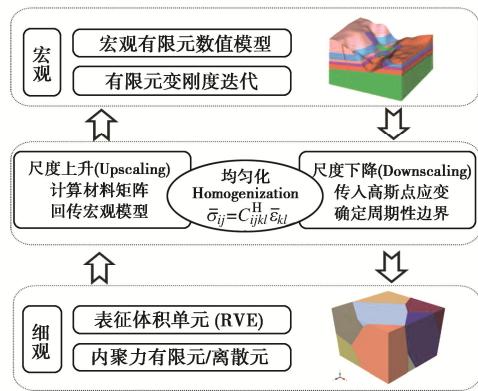


图 24 多尺度分析计算流程

Fig. 24 Flow chart of multiscale analysis

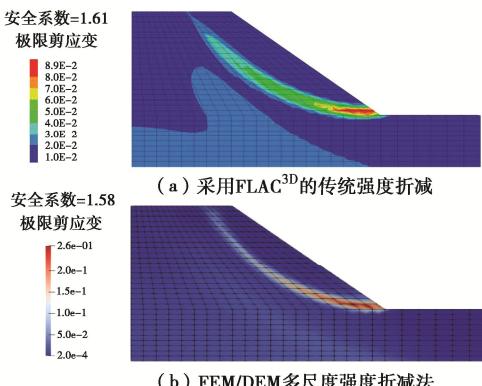


图 25 基于多尺度和传统强度折减方法结果对比

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。

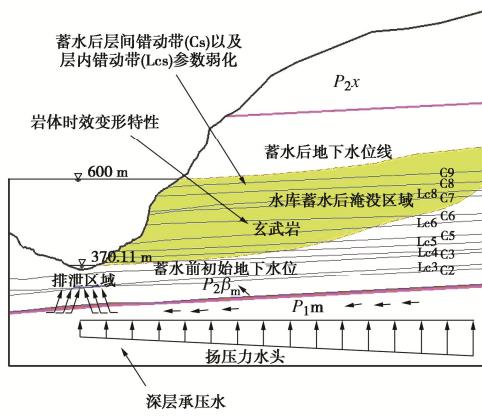


图 26 溪洛渡坝肩边坡变形机理分析

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。

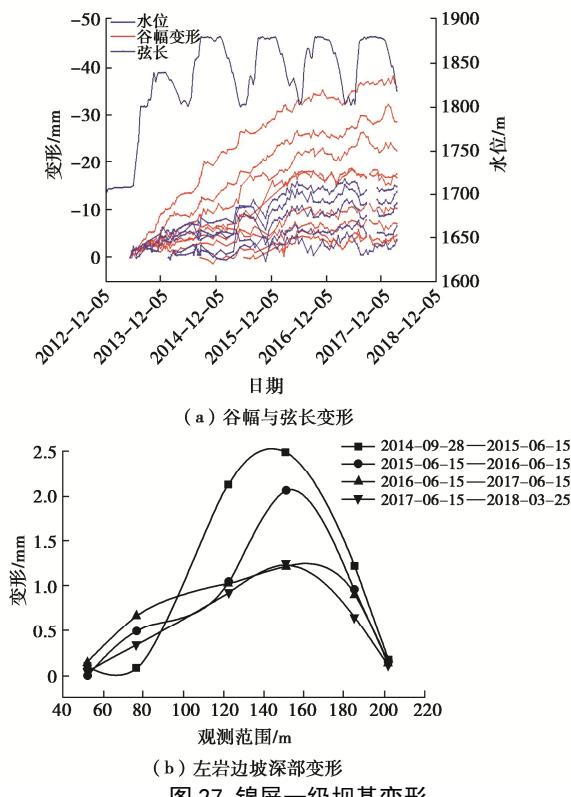


Fig. 27 Deformations of dam foundation of Jinping No.1

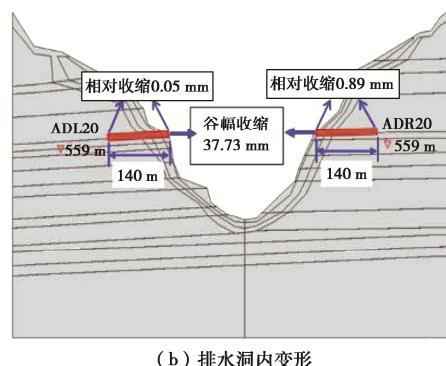
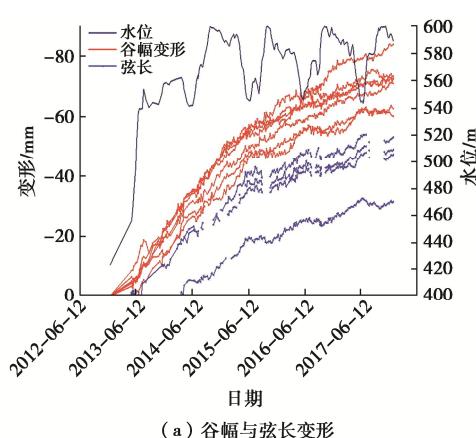
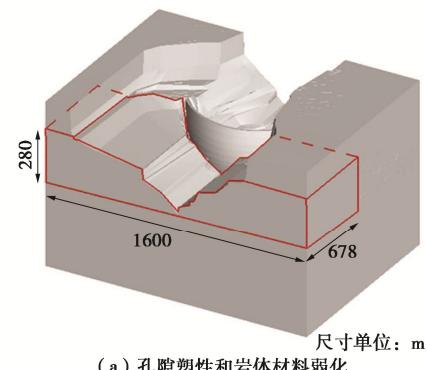


图28 溪洛渡坝基变形

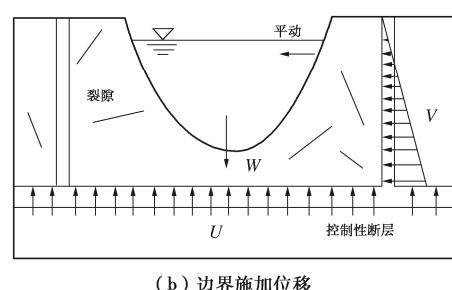
Fig. 28 Deformations of dam foundation of Xiluodu

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 。

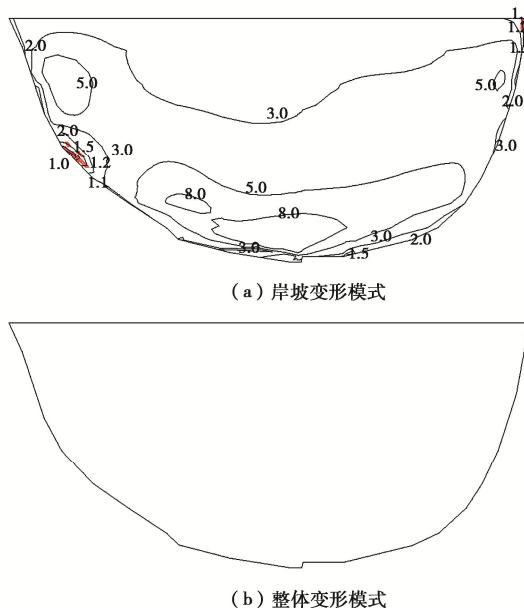


图 30 白鹤滩拱坝上游坝面屈服区图

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

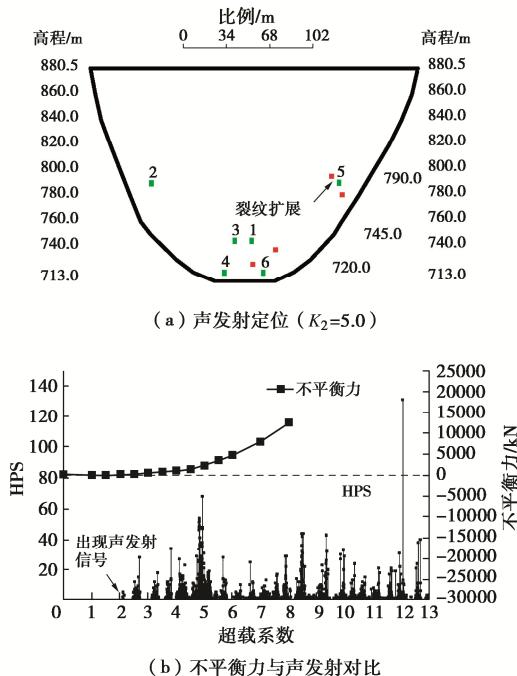


图 31 不平衡力与声发射和拱坝开裂破坏的关系

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。

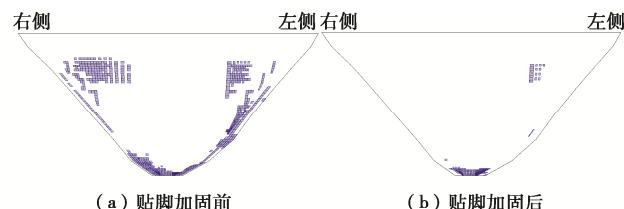


图 32 孟底沟拱坝下游坝面屈服区图
Fig. 32 Yield zone map of downstream of Mengdigou Arch Dam

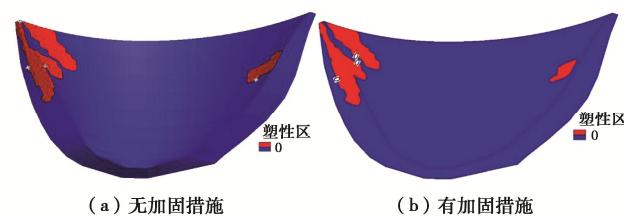
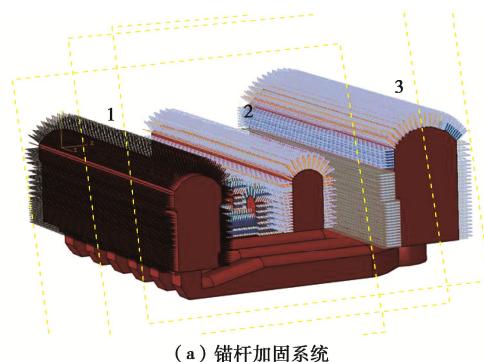


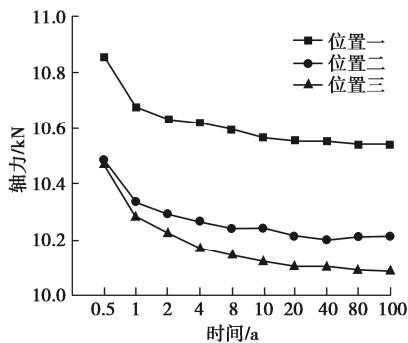
图 33 白鹤滩拱坝下游坝面屈服区图
Fig. 33 Yield zone map of downstream of Baihetan Arch Dam

(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。





(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

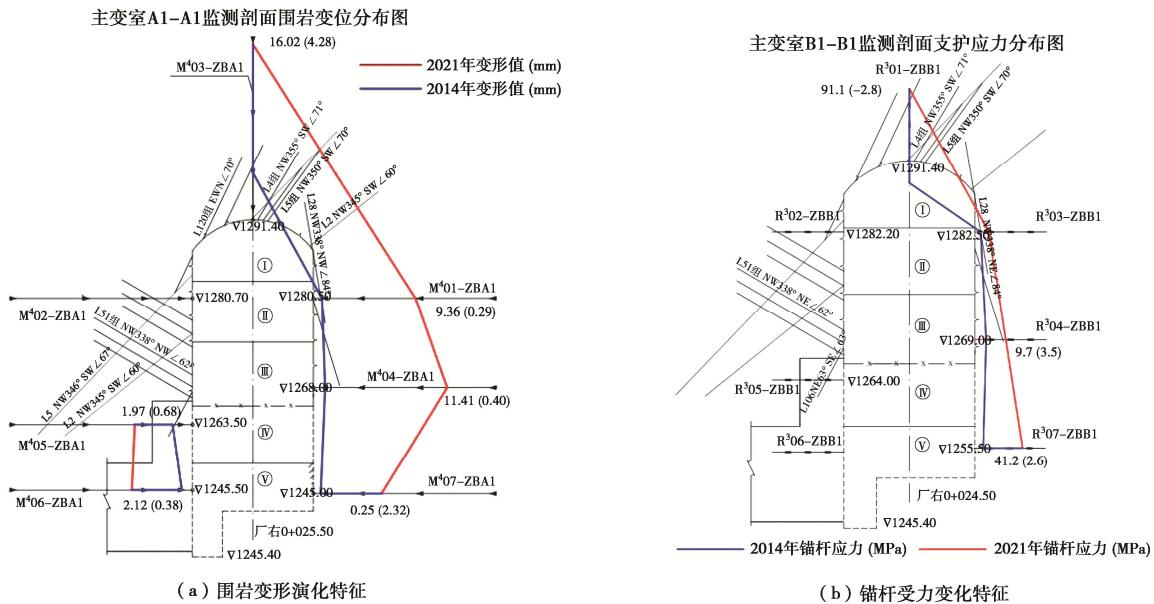


图 35 地下洞室群围岩变形与锚杆受力变化规律

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

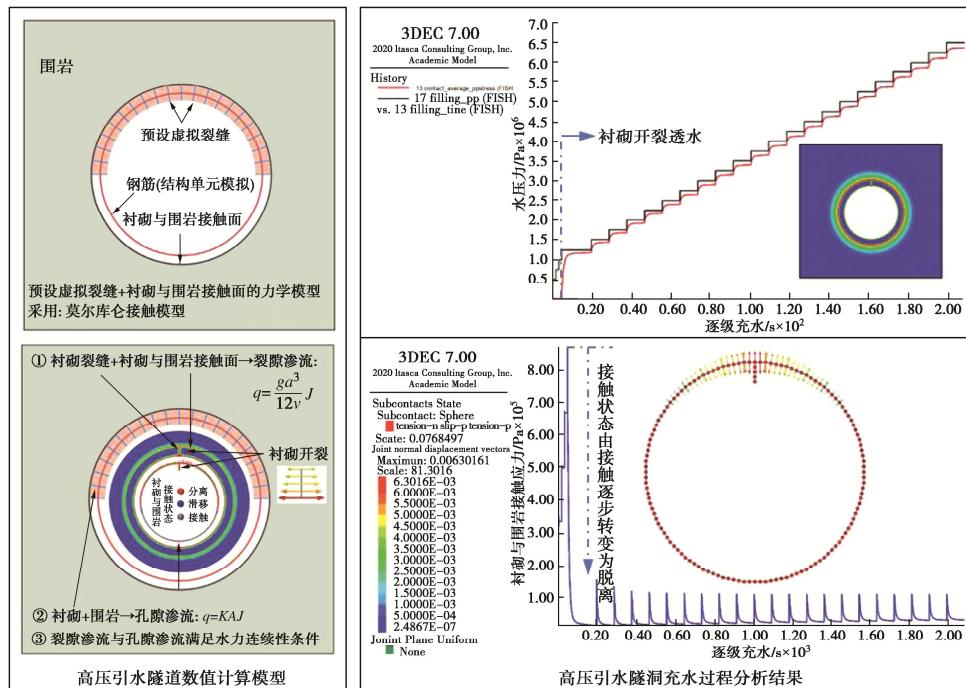


图 36 高压引水隧洞工程实际运行工作性状模拟分析

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

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)。

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。

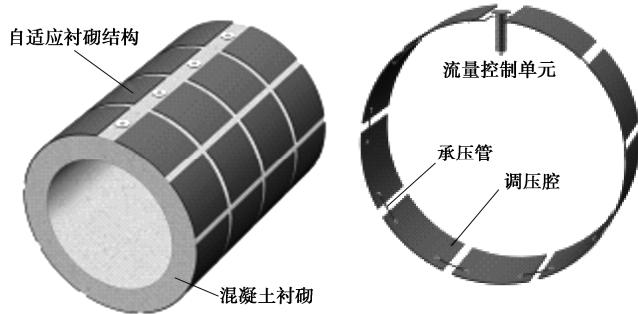


图 37 高内外水作用下自适应衬砌结构图

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



(a) 物理模型平台

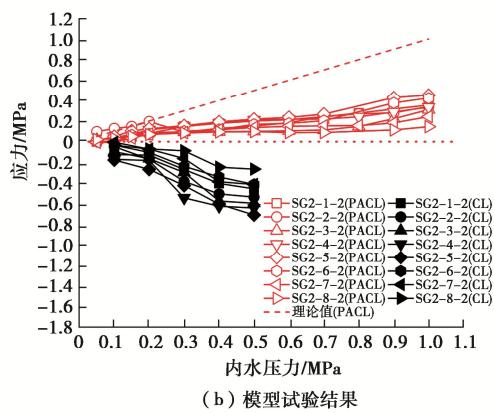


图 38 高内外水自适应衬砌模型试验

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 韶, 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)