

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会副主任、核学会核设施建构筑物安全专委会副理事长、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: zoudgao@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用量较少, 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。

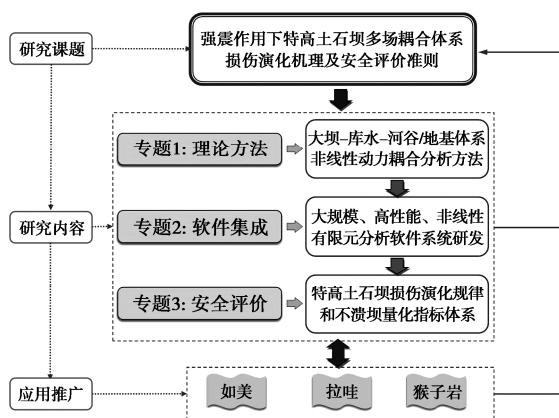


图 1 课题内容概况

Fig. 1 Overall contents of tasks

2.3 拟解决的关键技术问题

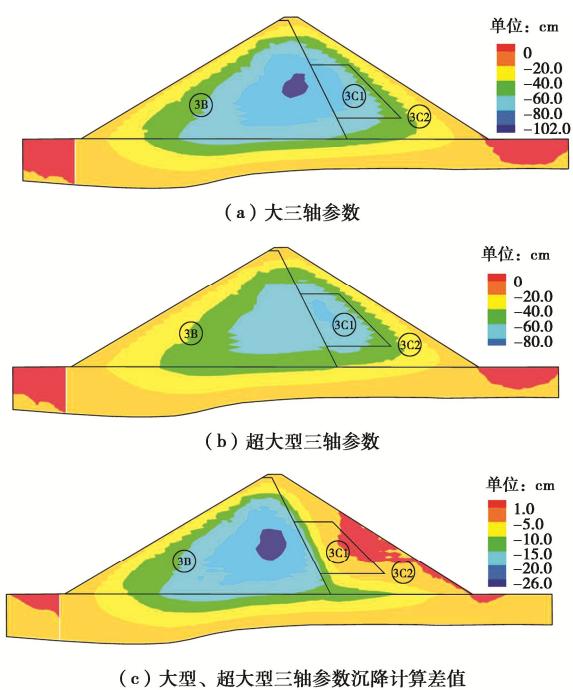
(1) 大坝-河谷/地基-库水体系的非线性动力耦合分析方法, 研发大规模、功能强大、高效精细化的非线性有限元分析软件系统。

(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。



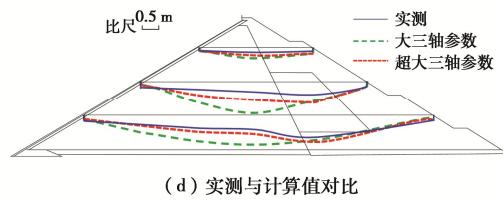
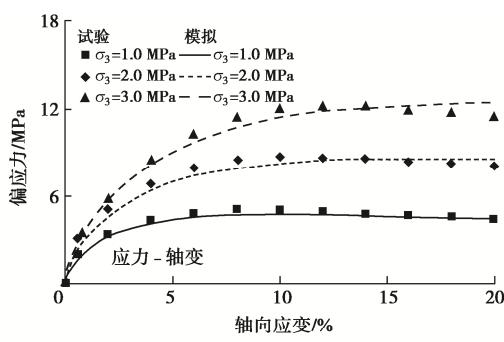


图2 筑坝料缩尺效应对阿尔塔什面板坝计算变形的影响

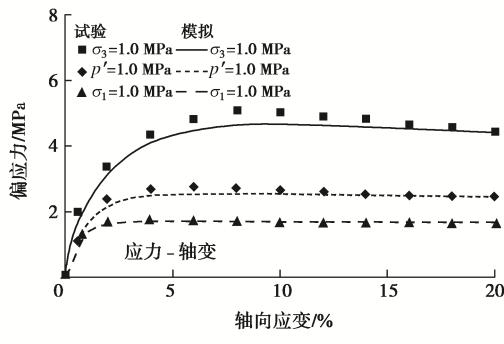
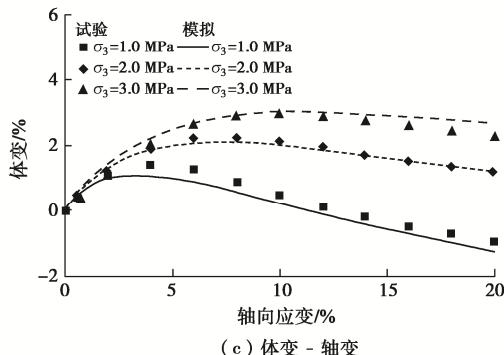
Fig. 2 Influences of scale effect on deformation analysis of Aertashi CFRD

3.2 高土石坝筑坝堆石料-界面-防渗体强非线性本构理论

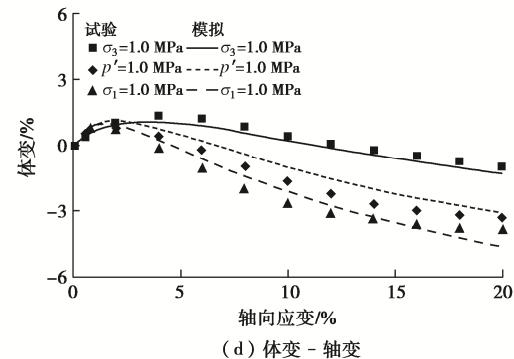
在国内率先开展三维广义塑性本构模型及其应用研究基础上, 大连理工大学基于广义塑性理论和比例记忆理论, 聚焦颗粒破碎、剪胀等关键力学特性, 建立了反映有效加载历史的记忆参数, 重构了弹塑性本构理论三要素, 提出了反映颗粒破碎、剪胀和加载历史动态演化的堆石料广义塑性本构模型^[16], 通过一套参数即可统一模拟堆石料颗粒破碎、剪胀、软化、模量衰减、残余变形等特性(图3), 解决了传统模型不适用于强非线性, 难以静动统一分析的问题。



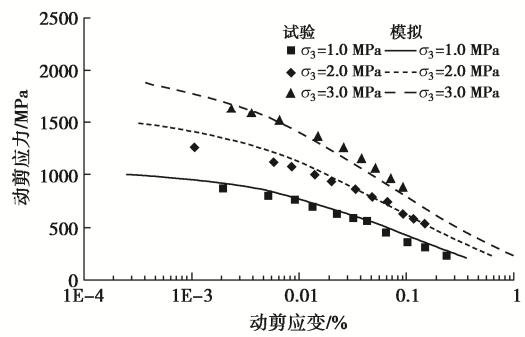
(a) 常规静力试验

(b) 等σ₁、p、k_e试验

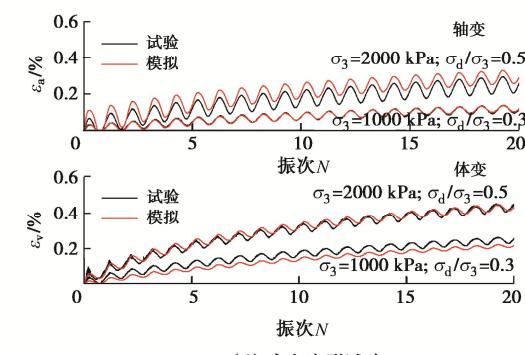
(c) 体变-轴变



(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。

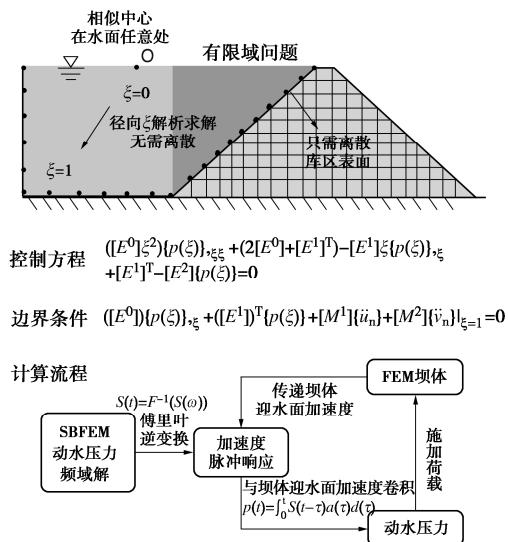


图4 高精度的坝-库水流固耦合分析方法

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]。

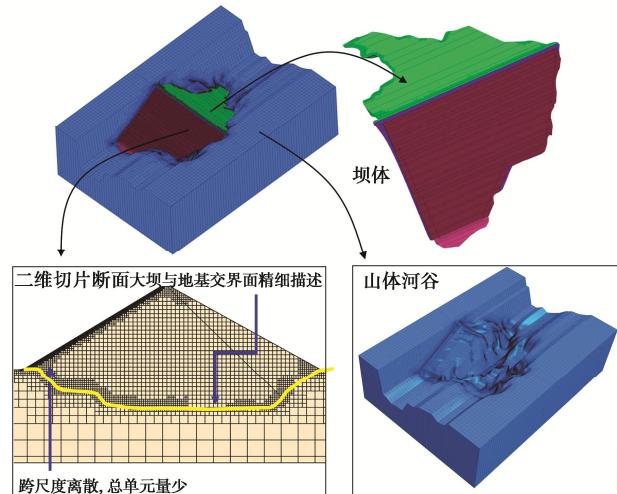


图5 大石峡大坝的高保真跨尺度建模

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

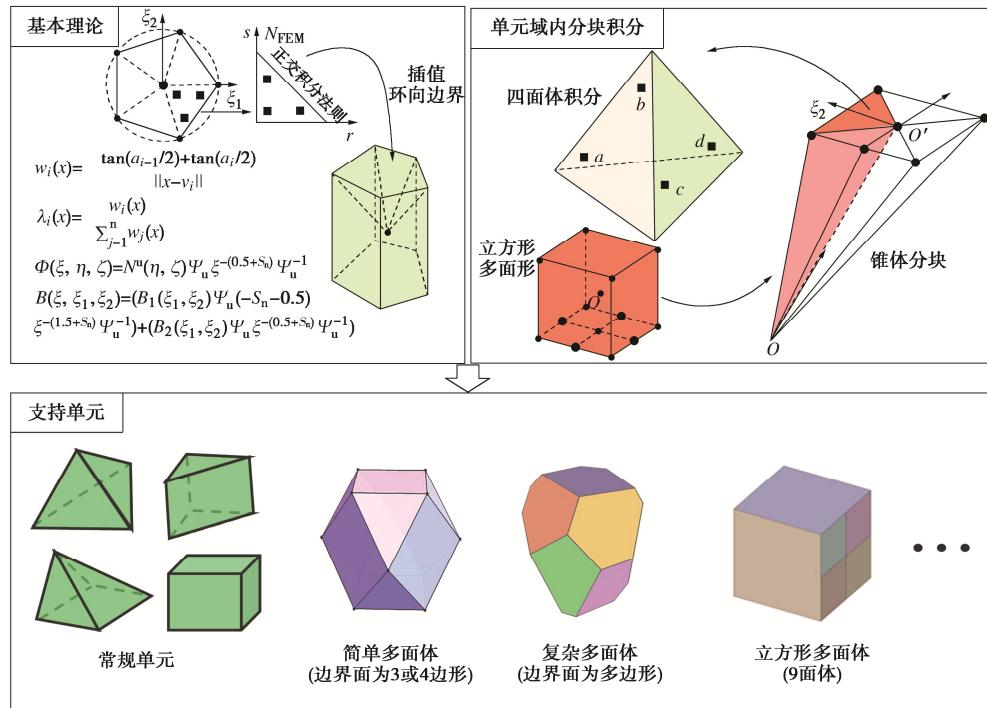


图 6 复杂几何的多面体单元构造方法

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。

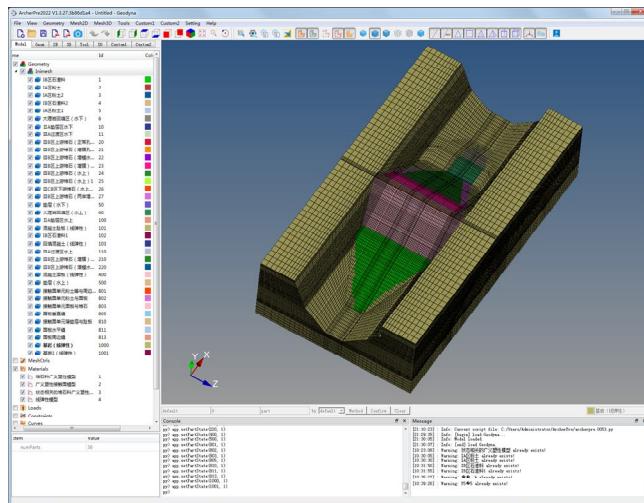


图 7 GEODYNA 计算软件可视化界面

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。

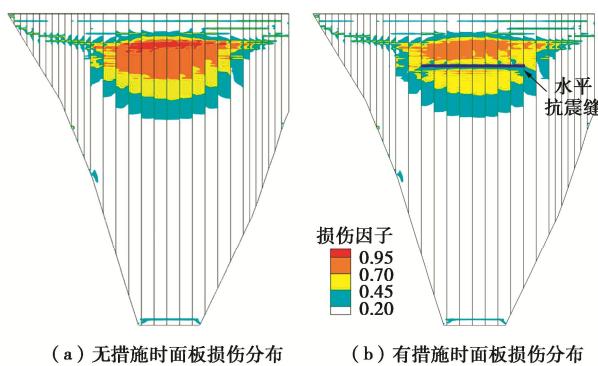


图 8 猴子岩工程应用效果举例

Fig. 8 Application examples of Houziyan CFRD

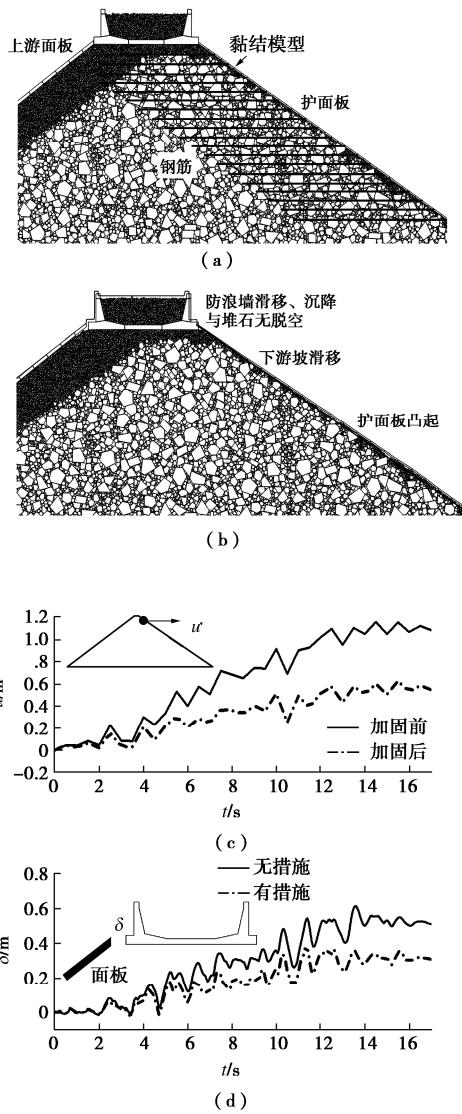


图 9 高土石坝钉结护面板抗震措施效果评价

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, HOU 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]. 水力学报, 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]. 水力学报, 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]. 水力学报, 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 Reservoir 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 seismic 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的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, 并优先利用这些稿件。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)