复杂条件下特高土石坝建设与长期安全保障关键技术研究进展

陈生水^{1,2*}

1. 南京水利科学研究院, 南京 210029;

2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 南京 210029

* E-mail: sschen@nhri.cn

收稿日期: 2018-08-21; 接受日期: 2018-10-08; 网络版发表日期: 2018-10-11

国家重点研发计划(编号: 2017YFC0404800)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(编号: Y717012)资助项目

摘要 我国是世界上200 m以上特高土石坝数量最多的国家, 复杂建坝条件和运行环境给这些高坝大库的建设和长期安全保障带来了严峻挑战。本文介绍了近年来我国在复杂条件下特高土石坝建设与长期安全保障关键技术等领域的主要研究进展: 揭示了筑坝粗颗粒土石料力学特性的尺度效应、细观及劣化机理, 建立了可考虑加载与流变耦合效应的堆石体流变计算模型; 基于计算接触力学方法提出了高土石坝复杂接触系统数值模拟方法, 并运用于面板坝面板损伤和心墙坝坝内廊道破损机理研究; 研发了变形与渗流耦合的试验装置, 进行了防渗土料渗透特性、坝体和坝基防渗系统服役性能试验; 基于当量密度法提出了覆盖层密度的旁压试验方法, 并进行了相关现场试验; 研究提出了300 m级特高面板坝复式结构、坝体增模技术及面板设计方法; 依托大石峡工程提出了特高面板砂砾石坝的安全评价和控制标准。上述研究成果已为如美心墙堆石坝、大石峡面板砂砾石坝等特高土石坝工程设计和优化等提供了重要的科技支撑。

关键词 特高土石坝, 复杂条件, 长期安全, 保障技术

1 引言

我国高土石坝建设起步晚、发展迅速, 目前已建及拟建高度200 m以上的特高土石坝约20座, 数量与高度均居世界前列。随着水资源开发进程的推进, 建坝条件和运行环境也更加复杂, 与200 m以下高土石坝相比^[1,2], 特高土石坝变形与渗流控制难度更大, 已建工程不少出现局部损伤破坏, 其建设与长期安全保

障面临严峻挑战^[3], 现有理论、方法、标准和技术水平无法完全满足复杂条件下特高土石坝建设和长期安全保障需求。为此, 2017年科技部启动了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”, 该项目聚集了我国高土石坝研究与设计等方面的优势力量, 立项以来, 研究团队针对复杂河谷和恶劣气候条件下坝高200 m以上特高土石坝建设与长期安全保障所面临的关键科学和技术问题开展了协

引用格式: 陈生水. 复杂条件下特高土石坝建设与长期安全保障关键技术研究进展. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 1040–1048

Chen S S. Research progresses in key technologies for construction and long-term safety protection of extra high earth-rock dams under complicated conditions (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 1040–1048, doi: [10.1360/N092018-00287](https://doi.org/10.1360/N092018-00287)

同攻关,取得了重要进展,相关研究成果已应用或正应用于数座国内外已建、在建和拟建的特高土石坝工程,社会效益显著.本文综述了粗颗粒料工程性质试验与本构理论、特高土石坝变形破坏机制与计算理论、防渗系统服役性能演化规律与模拟理论、深厚覆盖层上特高土石坝建设与安全保障技术、300 m级特高土石坝建设与安全保障技术以及特高土石坝长期安全保障决策支持系统等方面的主要进展,简要介绍了相关成果的应用情况,并分析了仍需进一步取得突破的方向.

2 研究进展

2.1 粗粒料工程性质多尺度试验和本构理论

现行粗粒土石料本构理论不能合理反映其在高应力与变化环境下的劣化与流变规律,且其力学性质试验参数存在较大不确定性,往往低估特高土石坝实际变形,增大安全风险.围绕上述问题,重点针对粗颗粒料力学特性的细观机理、粗颗粒料的劣化流变规律及其本构模拟等开展了研究工作,进展如下.

(1) 粗颗粒土石料细观响应模拟方法^[4,5].为了描述颗粒形状的影响,提出了蛋形颗粒和非球形颗粒的接触检索算法,实现了粗颗粒料真实形状的高效模拟.使用连续-离散耦合方法(FDEM),结合率相关内聚力断裂模型,提出了颗粒破碎模拟方法,如图1所示,实现了破碎模型从描述粗颗粒土石料颗粒破碎到预测颗粒破碎的突破.揭示了颗粒材料三维应力条件下临界状态的细观本质,以及材料体系宏观特性与微观接触方向与接触力之间的本质联系,提出了适用于三维应力条件的状态相关剪胀方程,实现了密实颗粒集合体

剪胀特性的合理模拟.

(2) 粗颗粒土石料劣化流变规律与机理.开展了大型劣化三轴试验,研究了劣化流变过程中颗粒破碎规律,以及温度变化和冻融循环对劣化过程的影响;提出了描述流变过程随时间发展规律的指数模型和描述流变方向的黏塑性流动准则.采用应变控制应力加载和应力控制稳压流变联合控制模式,解决了流变的起算时间问题,开展了系统的堆石料加载与流变耦合试验,揭示了粗颗粒料的流变硬化机理以及再加载对前期流变记忆的抹除效应,提出了正向流变区、无流变区以及反向流变区的概念,如图2所示,为建立粗颗粒土石流变弹塑性本构模型奠定了基础.

(3) 粗颗粒土石料弹塑性本构理论.考虑流变的塑性硬化效应,引入流变应变的累积规则,提出了复杂加载条件下堆石体加载与流变耦合效应的计算方法.以应力、应变和时间为基础变量,建立了一个可以统一模拟粗粒土加载变形、蠕变、应力松弛等性质的弹塑性本构模型^[6,7].模型假定粗粒土的加载塑性变形和流变可同时发生,应力和时间变化均会引起屈服面扩张,从而产生塑性变形,但两者服从不同的塑性流动准则.运用某特高心墙堆石坝坝壳堆石料和砾石土心墙料的试验结果对模型的合理性进行了验证,并对该大坝填筑施工过程进行了模拟,发现忽略坝料施工期流变可使竣工期沉降量低估10%以上^[7].

(4) 粗颗粒料孔隙结构与尺度效应.进行了不同最大粒径的粗粒土大型三轴试验,研究了主要强度变形参数的尺度效应,提出了估算现场原级配粗粒土强度及静止侧压力系数的方法.基于PFC软件,考虑颗粒破碎指标演化方程^[8],编写了具有不同孔隙结构特征(孔径分布、空间位置分布、孔隙形态、孔隙定向性等)

图1 (网络版彩图)颗粒破碎模拟示意图

图2 应力应变空间的流变分区示意图

的粗粒土试样制备、参数统计等程序; 对不同孔隙结构特征试样开展了数值模拟, 研究了孔隙结构特征对宏观强度变形特性的影响。

2.2 复杂条件下特高土石坝变形破坏机制与计算理论

国内外已建成的特高土石坝不少出现坝体结构、防渗系统等局部损伤破坏, 影响大坝整体安全, 揭示特高土石坝的变形破坏机制亟需研发高性能计算平台。围绕上述目标, 针对高土石坝复杂接触系统精细化模拟方法、非饱和土渗流固结过程模拟方法、高土石坝灾变模拟方法等开展了系统研究, 进展如下。

(1) 高土石坝复杂接触系统模拟方法。开展了高土石坝工程接触面试验, 研究了接触面的细观非连续变形和传力机制; 开展了软接缝材料挤压特性试验, 建立了软接缝材料双线性挤压模型^[9]。针对目前常用接触面单元法存在的不足^[10], 将非线性接触力学方法引

入到高土石坝工程多体接触问题的数值模拟计算, 自主研发了非线性接触分析大型计算机软件Contana, 实现了高土石坝复杂接触问题的精细模拟。在天河II号计算机上开展了天生桥一级面板堆石坝热-力强耦合非线性接触计算分析, 自由度达到 8×10^7 , 揭示了该坝施工期出现较大规模面板脱空及破损的物理机制(图3)。针对项目示范工程如美心墙堆石坝, 开展了岸坡及河谷中央廊道块体复杂接触关系的三维有限元模拟(图4), 成果已被初步设计采纳。

(2) 面板堆石坝面板应力精细化计算分析方法。近年来数目众多坝高超过150 m的面板堆石坝发生了面板沿纵缝的挤压破坏问题, 迫切需要建立高精度面板应力与结构破损数值计算方法。依托古水高面板堆石坝工程, 研究了面板厚度单元划分层数的影响。结果表明, 面板厚度划分层数对坝体应力变形、面板挠度、轴向应力影响较小, 但对顺坡向应力存在一定影响; 面板厚度方向划分为3层单元以上时可满足实际工程计算的精度要求。

(3) 非饱和土渗流固结理论及计算方法研究。在非饱和土简化固结理论的基础上提出了多场耦合分析方法, 综合考虑物理状态场、应力变形场与渗流场的相互影响, 建立了饱和-非饱和土渗流固结分析方法, 解决了非饱和土多场耦合分析方法中有效应力计算、渗透性模拟、应力-应变关系选择等核心问题。结合试验数据, 通过强度等效的方法研究了糯扎渡心墙掺砾料的非饱和土有效应力参数。

(4) 特高土石坝灾变过程模拟方法。基于Linux平台, 发展了基于格子玻尔兹曼方法(LBM)与离散元方

图3 (网络版彩图)天生桥一级面板堆石坝热-力-接触计算模型

图 4 (网络版彩图)如美心墙坝混凝土观测廊道有限元模型

法(DEM)的流-固耦合分析方法,对土石坝灾变过程中常见的内部侵蚀现象进行了研究.基于等几何的思想,将边界积分方程和非均匀有理B样条边界(NURBS)结合起来,提出了一种新的边界类型无单元法.采用快速多极算法对该计算平台进行加速,将计算复杂度降低到接近线性,并应用于大规模计算中.计算结果表明,该方法计算精度高,且便于与其他CAD软件对接.

2.3 特高土石坝防渗系统服役性能演化规律与模拟理论

防渗系统是特高土石坝安全的生命线,现行设计计算理论对其在复杂条件下长期服役性能的演化规律考虑不足.近年来,我国水利高校和科研院所在防渗材料试验技术、坝料防渗性能与渗透破坏规律、面板及止水性能演化规律等方面开展了大量卓有成效的研究,进展如下.

(1) 复杂条件下(含砾)土体渗透特性试验平台研发^[10].研制了应力-渗流耦合的侧限试验装置和应力-剪切变形-渗流耦合的接触土料试验装置(如图5所示),为研究复杂应力和变形条件下坝料渗透特性及其演化规律提供了先进试验手段.其中,应力与渗流耦合的侧限试验装置可模拟心墙中部的防渗土料在实际应力条件和水力条件下的抗渗透破坏特性;应力-剪切变形-渗流耦合试验装置,可模拟接触土料在土压力和大剪切变形条件下渗透特性的演化规律.

(2) 筑坝土石料渗透特性及其演化规律.针对示范工程如美心墙坝砾石土料开展了应力-渗流耦合试验,发现砾石土料渗透破坏水力梯度随应力提高而增大.

图 5 (网络版彩图)应力-剪切变形-渗流耦合试验装置示意图

针对接触土料开展了应力-剪切变形-渗流耦合试验,发现:当剪切变形发生时,接触面渗透系数突然增大,随后渗透系数迅速降低并逐渐趋于稳定,当剪切变形停止后,接触面渗透系数等于或略小于剪切变形前的渗透系数,试验过程中,试样未发现渗出浑水现象.针对示范工程大石峡面板砂砾石坝坝址砂砾石料开展了试样体积为 1 m^3 的大型渗透试验,如图6所示.研究发现:砂砾石料中粒径小于 5 mm 的细粒含量对渗透系数、抗渗透破坏能力及其破坏模式具有重要影响,粒

图6 (网络版彩图)大型高压渗透仪

径小于5 mm 含量在30%左右,其强度变形特性最优,抗渗透破坏能力最强;砂砾石料在振动压实过程中试样表面的细颗粒离析现象严重,对试验结果影响很大,常用的 $\Phi 300$ 渗透仪明显高估了砂砾石料的透水性和抗渗透破坏能力。

(3) 复杂环境下面板及其止水性能演化规律. 研发了全景微裂纹定量分析技术,揭示了高寒地区面板在温度、湿度、紫外线等环境作用下面板和止水盖板裂缝的发展规律;开展了冻融-干湿与外部荷载耦合作用下面板的性能演化试验研究,研究了高寒地区混凝土面板的破损机理与性能演化,建立了相应耐久性预测模型. 针对三元乙丙橡胶、聚脲涂层、普通橡胶等止水材料开展了冻融循环和干湿循环试验,揭示了其止水性能的演化规律;利用MTS万能试验机及低温试验箱进行了冰荷载作用下特高坝面板止水结构的耐久性试验。

2.4 深厚覆盖层上特高土石坝建设与安全保障技术

随着我国水利水电开发进程的推进,优良坝址日益减少,云、贵、川、渝、藏、疆等大江大河上均面临深厚覆盖层上筑坝的难题. 准确测定覆盖层物理力学性质,创新其防渗结构型式及施工质量检测技术是建设优质防渗体的迫切要求. 围绕上述需求,在覆盖层测试技术、强度变形规律、防渗墙深度及其检测技

术等方面取得了以下进展。

(1) 百米级深厚砂卵石覆盖层旁压试验技术. 自主研发了端部滑移式高压大旁胀量的旁压仪新型探头(最大体变达1000 mL),实现了具有显著原位结构性的深厚覆盖层临塑荷载和极限荷载的定量测量,测量深度达到100 m级;研制了直径1.5 m、高2.0 m的大型旁压模型试验箱,如图7所示,实现了边界条件可控的砂卵石覆盖层室内旁压试验. 基于当量密度法的原创思想,提出了测定深厚覆盖层原位密度的旁压试验方法,为准确测定深厚覆盖层力学性质提供了先进手段。

(2) 复杂应力状态下砂卵石覆盖层强度变形特性. 开展了覆盖层砂卵石料真三轴试验研究,如图8所示,揭示了砂卵石料强度变形规律,并在广义应力框架内研究了砂卵石料应力、强度和剪胀规律. 研究表明,内摩擦角随中主应力系数增加而增大;经典强度理论中,Lade-Duncan准则的预测结果与试验结果最为相近;剪胀角随应力水平增加而减小。

(3) 防渗墙深度对大坝防渗性能的影响规律. 针对水库大坝工程设计关心的坝基防渗墙深度问题开展对比计算,研究了防渗墙深度变化对单宽流量、出逸比降等渗透指标的影响,发现随着防渗墙深度的缩短,单宽流量显著增大,坝体防渗心墙下游侧自由面显著升高,下游坝坡出现渗流溢出口,并且出逸高度随着防渗墙深度的缩短而逐渐升高,坝坡、坝基出逸比降也逐渐增大,渗透稳定性显著降低。

图7 (网络版彩图)大型旁压模型试验系统

图8 (网络版彩图)真三轴试样典型变形形态

(4) 针对声波CT的多发多收数据采集装备具有效率高、精度高的优势,开展了CT多发多收观测系统的主控芯片电路板设计,开发了相应的数据采集软件。

2.5 300 m级特高土石坝建设与安全保障技术

我国现行坝体结构、坝料选择、级配设计、碾压标准等设计和施工规范一般仅适用于低于200 m的高土石坝,对200 m以上特高土石坝适用性尚不明晰,特高土石坝设计、施工和安全评价相关规范标准缺失的局面亟需改变。为此,在新型坝体结构形式、坝体增模技术、面板材料和新型止水、土石坝抗冰冻技术等方面开展了创新研发工作,主要进展包括以下方面。

(1) 依托大石峡面板砂砾石坝工程,创新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)^[11],如图9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,提升超高面板坝安全性的优点。

(2) 300 m级特高面板坝坝体增模技术。通过复合浆液在多孔介质中流动试验,结合CT扫描技术,研究了复合浆液掺量、配合比等因素对复合浆液流动性能的影响规律。通过室内试验,研究了复合浆液对提高堆石体变形模量,改善堆石体压实性能的作用,同时研究了掺复合浆液堆石料渗透、强度及长期变形特性及其影响因素。在试验研究的基础上,建立了基于复合浆液配合比、掺量等参数的堆石料力学性能调控方法。开展了7组复合浆液堆石筑坝现场碾压试验,通过原位渗透试验、跨孔声波法试验、瑞雷波法试验等技术,对注浆增模处理效果进行了论证。

图9 (网络版彩图)混凝土重力坝-面板砂砾石坝复式结构示意图

(3) 特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,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。研究了锚固密封一体的新型止水结构,并初步开展了小样试验,初选了合适的肋槽方案以及锚固封边剂,如图10所示。

(4) 严寒地区面板结构与止水抗冰冻技术。研发了冰情数据库系统和冰情预报系统,发明了一种能够测试冰剪切黏结力的装置以及一种防冰涂层材料,使用该材料涂覆混凝土表面,可削减冰剪切粘结力53%;开发了导电发热混凝土,可实现30 V低压直流电压下导电发热;开展了动冰对面板的撞击试验;进行了荷载、干湿循环、冻融循环、光热老化等多因素耦合作

图10 (网络版彩图)新型止水盖板和锚固封边试验小样

用下材料性能的演化规律研究. 基于上述成果, 优化了严寒地区止水材料、胶黏剂与嵌缝材料指标体系, 提出了优选原则.

(5) 特高土石坝堆石体填筑标准与级配优化. 开展了堆石料填筑级配的随机特性及其统计规律研究, 揭示了堆石料级配、孔隙率、相对密度之间的关系; 提出了300 m级高土石坝筑坝堆石料的合理填筑标准(相对密度 D_r 与孔隙率 n 双控)及其级配设计方法.

2.6 特高土石坝长期安全保障决策支持系统

构建特高土石坝长期安全保障决策支持系统, 对于确保其长期安全运行至关重要, 其核心包括复杂条件下特高土石坝破坏模式识别、特高土石坝长期安全评价标准、特高土石坝灾变防控技术以及安全实时监控与预警平台等, 其主要进展包括以下几方面.

(1) 复杂条件下特高土石坝破坏模式. 完成国内外71座(35座心墙堆石坝和36座面板堆石坝)150 m以上高心墙堆石坝和高面板堆石坝工程案例调研^[12], 总结归纳了现代高土石坝的主要破坏模式. 对于心墙堆石坝, 主要破坏模式是长期运行过程中坝顶纵向和横向裂缝; 对于面板堆石坝, 主要破坏模式是面板在长期运行过程中的挤压破碎和接缝止水系统破坏.

(2) 特高土石坝长期安全评价标准. 结合247 m高的新疆大石峡面板坝工程, 基于同类工程现场监测资料和数值模拟结果, 从坝体变形、面板和接缝变形、垫层料水力梯度、砂砾石料压实标准、水库放空系数

等角度提出了特高面板砂砾石坝的安全评价和控制标准, 如表1所列, 为我国250 m级面板砂砾石坝设计提供了依据.

(3) 特高土石坝灾变防控与长期安全保障技术. 研发了一种面板脱空情况下, 防止面板应力状态持续恶化和开裂的气囊式自动保护技术及预警装置, 如图11所示. 该装置的核心构建为保护气囊、气体发生器和自动触发装置. 自动触发装置采用一组置于滑动轨道的电池组来控制, 允许脱空量通过调整电池组阳极与阳极铜片之间的距离实现; 提出了按照抗裂准则和抗断准则确定斜置面板临界脱空深度的方法, 综合考虑构造要求, 建议了保护气囊安装高程确定方法; 提出了考虑面板脱空深度、安全气囊尺寸、安装位置以及安全气囊个数(指单块面板下安全气囊的总数)等因素的气囊经向和纬向抗拉强度确定方法.

(4) 高土石坝安全实时监控与预警平台. 完成了全国大型水库大坝实时监控与预警平台建设方案编制, 启动了高土石坝安全实时监控与预警平台研发工作. 该监控与预警平台是在建的全国大型水库大坝实时监控与预警平台的子平台, 其工情、水情监测资料的采集、安全信息的对外发布和应急决策支持系统与后者共用; 只需研究提出高土石坝专用的安全评价标准.

3 应用情况

本文所述本构理论已运用于反馈计算分析我国已

表1 特高面板砂砾石坝设计安全控制指标

项目		标准与控制指标	备注	
设计安全控制指标	坝体变形	坝体沉降率	坝高0.8%	
		坝顶震陷率	坝高0.6%~0.8%	
	面板和接缝变形	弦长比	0.2%	不考虑流变
		压应变	900×10 ⁻⁶	—
		裂缝控制	0.1 mm	死水位以上
			0.2 mm	死水位以下
		周边缝 (mm)	20/100/65	张拉/沉降/剪切
		垂直缝 (mm)	30/30/30	
	水力梯度	面板	200	—
		垫层料	40	—
	砂砾石控制标准	相对密度	≥0.9	现场原级配
水库放空系数		0.60~0.65	—

图 11 (网络版彩图)面板堆石坝脱空的气囊式自动保护装置

建最高面板堆石坝——水布垭面板堆石坝(233 m)的应力变形。现有理论预测大坝沉降约2.0 m; 本文理论预测大坝沉降约2.5 m; 该坝实测沉降约2.6 m。变形预测精度提高20%左右。研制的高性能计算软件亦已应用于我国已建最高心墙坝——糯扎渡心墙堆石坝(261.5 m)的变形反馈分析研究, 验证了提出和开发的本构模型与计算软件的可靠性与先进性。

针对大石峡面板砂砾石坝开展了以下应用研究工作: 系统研究了坝料的强度、变形和渗透特性; 预测了大坝变形及其分布规律。提出了大坝变形和渗流安全控制措施, 并对大坝设计方案进行了优化。建立了特高面板砂砾石坝的长期安全评价标准。依托我国拟建最高心墙坝——如美心墙堆石坝开展了以下研究工作: 研究了坝料的强度、变形和渗透特性, 预测了大坝变形及其分布规律。基于应力-剪切-渗流耦合试验和接触力学算法, 重点研究了坝体与岸坡、坝内廊道与坝体接触安全问题。提出了相应的变形和渗流控制措施等。本文所述研究成果目前还运用于深厚覆盖层上的面板坝——阿尔塔什面板砂砾石坝(坝高165 m, 覆盖层深94 m)和在建最高心墙堆石坝——两河口水电站心墙堆石坝(295 m)工程中, 将为这些重大水利水电工程建设和长期安全保障提供强有力的科技支撑。

4 总结与展望

总体而言, 我国复杂条件下特高土石坝建设与长期安全保障关键技术领域研究进展显著, 取得的研究成果创新性和实用性强, 显著提升了特高土石坝变形和渗流安全的预测精度, 为如美特高心墙坝(拟建世界最高315 m)、大石峡特高面板砂砾石坝(世界在建最高247 m)等重大水利水电枢纽工程的建设发挥了重要的科技支撑作用。

今后仍需进一步提出粗颗粒土石料强度、变形和渗流特性指标缩尺效应定量计算公式和缩尺试验方法; 完善自主研发计算软件, 对大石峡、如美等重大工程面板、防渗心墙与河谷接触问题进行精细计算分析, 为确定趾板布置、结构型式, 以及高塑性黏土层厚度和设置部位等提供技术支撑; 揭示掺砾心墙土料(掺砾量30%~50%之间)渗透特性长期演化规律与影响机制, 揭示心墙与河谷接触黏土层渗流-固结(剪切)变形和破坏机制, 建立特高心墙坝渗流-变形耦合分析理论与计算方法; 研发适应大变形能力强、耐久性与止水效果好的面板接缝止水结构, 以及坝体与坝基防渗体接头型式; 建立特高心墙坝长期安全评价标准, 加快构建高土石坝安全监督与预警平台。

致谢 本文得到项目课题负责人武汉大学周伟教授、清华大学张丙印教授、中国水利水电科学研究院邓刚教高、长江勘测规划设计研究有限责任公司熊泽斌教高、水利部水利水电规划设计总院关志诚教高, 以及各参研单位的大力支持, 向为本项目研究做出贡献的专家致以衷心的感谢。

参考文献

- 1 顾淦臣, 束一鸣, 沈长松. 土石坝工程经验与创新. 北京: 中国电力出版社, 2004
- 2 曹克明, 汪易森, 徐建军, 等. 混凝土面板堆石坝. 北京: 中国水利水电出版社, 2008
- 3 马洪琪. 300 m级面板堆石坝适应性及对策研究. 中国工程科学, 2011, 13: 4–8
- 4 Zhou W, Wu W, Ma G, et al. Study of the effects of anisotropic consolidation on granular materials under complex stress paths using the DEM. *Granular Matter*, 2017, 19: 76
- 5 Ma G, Regueiro R A, Zhou W, et al. Role of particle crushing on particle kinematics and shear banding in granular materials. *Acta Geotech*, 2018, 13: 601–618
- 6 傅中志, 陈生水, 张意江, 等. 堆石料加载与流变过程中塑性应变方向研究. 岩土工程学报, 2018, 40: 1–9
- 7 陈生水, 傅中志. 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. 岩土工程学报, 2018, in press
- 8 Guo W L, Zhu J G. Particle breakage energy and stress dilatancy in drained shear of rockfills. *Geotech Lett*, 2017, 7: 304–308
- 9 殷殷, 张丙印, 袁会娜, 等. 接触面直剪试验及数值模拟分析. 水力发电学报, 2018, 37: 84–92
- 10 Zhou M, Zhang B, Peng C. Numerical evaluation of soft inter-slab joint in concrete-faced rockfill dam with dual mortar finite element method. *Int J Numer Anal Methods Geomech*, 2018, 42: 781–805
- 11 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. 岩土工程学报, 2017, 39: 1949–1958
- 12 Fu Z Z, Chen S S, Ji E Y. Practices in Constructing high rockfill dams on thick overburden layers. *Dam Eng*, 2018, in press

Research progresses in key technologies for construction and long-term safety protection of extra high earth-rock dams under complicated conditions

CHEN ShengShui^{1,2}

¹ Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

² Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China

China has the largest amount of extra-high earth-rock dams over 200 m in the world. Complicated construction and severe operation conditions pose great difficulties and huge challenges in their construction and long-term safety. This paper introduces main research progresses in the areas of Key Technologies for Construction and Long-term Safety Protection of Extra High Earth-rock Dams under Complex Conditions. The particle-size effect, mesoscopic and deterioration mechanism of dam materials were studied thoroughly. The calculation model of rheological behavior of rockfill materials considering loading and creep coupling effect was established. The numerical simulation method for complex contacting problems in high earth-rock dams was developed using computational contact mechanics, and was used in studying the damage mechanism of concrete slabs and galleries. Testing apparatus conducting deformation-seepage coupling experiments were fabricated, and were used to investigate the permeability characteristics of core materials, the performance of anti-seepage systems in dam body and foundation. An equivalent density method was proposed to evaluate the in-situ density of overburden materials based on pressuremeter tests both in laboratory and field. New compound structure, modulus increasing technology, slab design method and water-stop materials for extra-high concrete face rockfill dams were studied, and safety evaluation and control standards were proposed for the demonstrating Dashixia project. The relevant results have provided technological supports for the two demonstrating projects, i.e. Rumei and Dashixia extra-high earth-rock dams, improving considerably the construction level and long-term safety of extra-high earth-rock dams.

extra high earth-rock dams, complicated conditions, long-term safety, key technologies

doi: 10.1360/N092018-00287