

文章编号: 1672-3031(2018)05-0343-10

岩土工程研究60年回顾与展望

温彦锋, 邓刚, 王玉杰

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048)

摘要: 本文简要回顾了中国水利水电科学研究院岩土工程研究所建所60年的科研工作情况, 重点介绍了近10年来的主要科研进展及主要研究成果, 内容包括土的工程性质研究、土石坝工程技术研究、土工离心模拟技术研究、岩石力学与工程技术研究、工业固体废弃物安全贮放技术研究、现代信息技术在岩土工程中的应用研究等, 同时对今后岩土工程研究所的重点科研发展方向进行了展望。

关键词: 土的工程性质; 土石坝工程技术; 土工离心模拟技术; 岩石力学

中图分类号: TU43

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.05.003

1 引言

中国水利水电科学研究院岩土工程研究所(下文简称岩土所)建所至今, 依托国家重点研发计划项目、国家科技攻关项目(国家科技支撑项目)、国家重点基础研究发展计划、国家自然科学基金项目等国家级科研项目及省部级重点科研项目, 围绕水利水电工程建设项目论证、建设和运行中的岩土工程问题开展了科学研究, 并先后对我国不同时期的重大工程及若干国际工程提供了卓有成效的技术咨询, 解决了众多实际工程中的技术难题, 为国家水利水电建设提供了科技支撑。本文简要介绍了岩土所60年, 特别是近10年来的主要研究进展和科研成果以及今后的研究展望。

2 岩土工程研究回顾

2.1 土的工程性质研究 土的工程性质研究一直是岩土所的特色研究方向, 前期研究主要针对细粒土及红土、分散性土、膨胀土等特殊土, 解决了土料应用中的诸多技术难题。1980年代以来, 高土石坝迅速发展, 堆石、砂砾石等粗粒料, 以及风化料、天然或人工掺配砾石土等宽级配防渗土料的使用日益增多, 岩土所率先研制了试件直径为300 mm系列粗粒料试验设备, 近期又陆续研制了大型高压三轴和侧限流变试验设备, 大型动静接触面试验设备、直径为1000 mm的特大型静动三轴仪等, 形成了国内系列最完整的材料试验平台, 开展了大量的不同种类土的工程性质试验研究。

(1)土石坝防渗土料研究。岩土所防渗土料特性的研究始于1950年代, 针对水中倒土和水力冲填等筑坝方法, 开展了孔隙水压力消散规律的分析, 提出根据坝体排水固结情况控制施工速率, 支撑了汾河水库水中倒土坝等工程的成功建设。1960—1970年代, 结合云南毛家村土坝和甘肃碧口土质心墙坝等工程研究, 提出控制压实干密度和含水率以改善工程特性的建议, 确立了根据土的工程特性进行土料选择和设计的原则^[1-2]。“六五”国家科技攻关期间, 结合云南鲁布革工程研究了风化料作为心墙土料的筑坝关键技术^[3-4], “七五”和“八五”国家攻关期间, 结合四川瀑布沟工程, 研究了宽级配砾质土料用作心墙土料的筑坝关键技术^[5], 提出剔除超超大颗粒调整级配、采用重型击实, 改善了土料渗透和压实特性, 为大坝坝料设计和断面分区优化提供了依据。结合黄河小浪底等工程, 研究了筑坝土料在高应力和复杂应力状态下的力学性质。“九五”国家攻关期间结合水布垭心墙堆石坝方

收稿日期: 2018-08-01

作者简介: 温彦锋(1965-), 河北辛集人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事土石坝工程、岩土工程研究。

E-mail: wenyf@iwhr.com

案,又进一步研究了强风化和砾质土料作心墙土料的筑坝关键技术^[6]。近期对糯扎渡、双江口、长河坝、两河口、如美等 300 m 级土质心墙堆石坝的相关技术开展了大量研究工作,研究了土料密度、含砾比等对抗渗特性及孔隙压力消长规律的影响,研究了应力、变形和水力坡降耦合作用下砾石土的抗渗性能。研究促进了过去所谓“不良土料”,即特殊土、砾质土、风化土及掺砾(碎石)黏土料的利用,有效拓宽了防渗土料的选择范围。岩土所主持完成的国家科技攻关成果《土质防渗体高土石坝研究》获得国家科技进步一等奖,针对土石坝土质防渗体参与完成的多项研究成果获得国家科技进步二等奖。

(2)粗粒料的工程特性研究。1980 年代以来,对覆盖层和筑坝粗粒料进行了大量的试验研究,研究对象囊括了国内几乎所有种类的粗粒料,揭示了高应力水平、复杂应力条件的影响。近年来,随着土石坝坝高的不断攀升,已建高土石坝运行过程中暴露出比较突出的变形控制问题,粗粒料变形问题成为当前筑坝材料性质研究的热点与难点,岩土所围绕粗粒料变形特性的尺寸效应和时间效应开展了较系统的工作。

受室内试验试样尺寸的限制,粗粒土室内试验常需缩尺,导致粒径和级配与现场筑坝材料差异较大,出现所谓的尺寸效应。通过不同试样尺寸的对比试验,采用不可破碎颗粒材料的离散元数值试验^[7]和控制颗粒强度的人工材料平面应变物理试验、原型堆石材料的侧限压缩试验^[8]和实际工程反演分析^[9]等手段,揭示了颗粒强度对变形模量的影响,提出了适用于堆石料、砂砾石料等粗粒料的模量-最大粒径相关关系^[10],可采用室内试验模型参数推算现场模型参数,以改进数值模拟预测的精度。

粗粒料变形时间效应包含有较多成分,一般认为流变和湿化,以及水位变化等循环荷载导致的变形积累等都是可能的原因。岩土所通过大型三轴流变试验^[11]和大型侧限流变试验研究,发现了更为贴合实际的流变发展过程。结合实际堆石坝后期变形规律的分析,提出了对数模式流变模型^[12],并发展为通用的对数幂模式流变模型^[10],与多个高土石坝工程实测沉降过程符合良好。同时,开展了水位上升和循环作用下粗粒料湿化和变形累积规律试验^[13],为进一步改进长期变形规律预测模型提供了基础。

(3)联合室内试验和原位测试综合确定土体工程特性参数的相关技术研究。常规的覆盖层土体强度和变形参数确定方法是取扰动样,模拟现场级配和密实度条件进行室内试验。不能反映土体的原位结构性和土体天然沉积的特点,同时,由于现场级配和密实度的可靠测定也具有相当难度,因此覆盖层土体的力学特性参数测定面临诸多问题。1990 年代,开发了联合现场旁压试验和现场载荷试验与室内材料试验综合确定深覆盖层土体变形特性和本构模型参数的方法^[14],该方法以室内试验确定土体变形特性参数的变化规律,通过现场试验的反演分析土体的本构模型参数,较以往单纯依靠室内试验确定的参数更能反映实际情况。在此基础上,结合现场大型剪切试验、大型载荷试验、现场大型压缩试验等大型现场试验,为合理确定大粒径筑坝材料的力学特性提供了新的方法^[15-16]。上述方法已应用于青海公伯峡、四川仁宗海、新疆卡拉贝利、新疆阿尔塔什等工程。

(4)非饱和土理论的研究和应用。岩土所在国内最早开展了非饱和土的工程特性研究,在 1960 年代初,研制了非饱和土吸力量测设备,1965 年在国内首次发表了非饱和土的水气形态及其对力学性质影响的研究成果^[17],按其饱和度的不同,将孔隙流体分为三种水气形态,分别制订了测定孔隙水、气压力及确定有效应力的方法,这些成果开辟了我国非饱和土力学研究的先河。

近年来,在多个国家计划研究项目和国家自然科学基金项目的资助下,开展了非饱和黄土和膨胀土的研究。将土作为由土颗粒、气、水和收缩膜组成的四相系,突破基质吸力均等性的常规认识,提出了基质吸力各向异性理念,建立了非饱和黄土的三维有效应力公式^[18],提出了黄土的破坏条件^[19];同时,分析黄土地基加固的饱和湿陷设计思想的弊端,提出了依据增湿变形确定实际可能湿陷的设计思想及浸水变形计算模式和强度衰减公式^[20-21]。成果应用于南水北调黄土渠道高边坡、新疆坎儿井加固等工程,并被纳入相关国家标准。

2.2 土石坝计算分析技术 自 1960 年代起开展土石坝的应力变形数值计算分析工作, 采用弹性本构关系进行了土石坝应力变形分析。自 1980 年代起, 历经了国外计算程序引进和大规模二次开发, 逐渐形成了具有自身特色的土石坝应力变形分析软件, 能够采用不同本构模型, 较好处理应力变形与渗流耦合以及流变、湿化等长期变形, 模拟坝体分期填筑和复杂接缝体系, 实现土石坝建设和运用全过程的仿真分析。

1950 年代开始使用二维及三维的电模拟试验技术解决工程中的渗流问题, 1958 年建立了渗流电模拟试验室。1970 年代开始渗流数值分析研究, 开发了多种计算方法和程序, 解决了复杂条件下渗流场的数值计算问题。目前, 已形成具有多场耦合计算分析能力的大型三维渗流有限元计算程序, 可考虑非稳定渗流、复杂地质结构及密集排水孔幕等复杂渗控措施分析大工程区域的渗流问题。

陈祖煜院士基于改进的 Morgenstern-Price 法建立了严格的边坡稳定求解方法体系^[22-24], 编制了 STAB 专用程序, 并于 1984 年经水利水电规划设计院批准在水利水电设计系统中推广使用, 为坝坡稳定分析提供了科学有效技术手段。此后还持续进行了可视化、云计算等升级改造, 是国内广泛使用的土石坝坝坡稳定分析工具^[24]。

2.3 心墙堆石坝渗流控制与水力破坏问题研究 1950 年代末期, 岩土所研究了反滤层的设计方法, 之后陆续解决了岳城、毛家村等多个工程的反滤设计问题。1980 年代以来, 对软岩风化料、砾石土、掺碎石料等宽级配防渗土料的渗透特性及反滤设计进行了大量研究^[25-27], 揭示了防渗土料裂缝自愈性能和渗透破坏机理, 基于保护细颗粒和有利于裂缝自愈的原则, 提出了宽级配防渗土料的反滤层设计准则, 支撑了瀑布沟、糯扎渡、双江口等工程的防渗土料选择与大坝设计, 并应用于相关规范的修订。

土质防渗体堆石坝的心墙水力破坏问题一直被认为是心墙堆石坝安全的重大威胁。过去普遍认为堆石坝壳与土质心墙之间的拱效应引起的心墙竖向应力低于水压力是导致水力劈裂的主要原因^[28]。近期通过国内外高土石坝工程疑似水力劈裂案例调研分析、离心模拟试验和数值模拟计算分析研究发现, 心墙堆石坝防渗心墙的应力变形特性受坝壳与心墙、岸坡与心墙两种拱效应的影响, 岸坡凸变和库水位快速变动是心墙不利应力条件的重要诱因^[29], 深化了对防渗体水力劈裂的认知。研究还发现, 宽级配砾石土料破坏形式并非传统意义上的水力劈裂, 而是呈现类似渗透破坏的“水力击穿”^[30], 即砾石土中的水压力仅需在数值上接近土体最小主应力, 不需要存在垂直于最小主应力的土体贯穿面, 高压水即可沿大致平行于水力梯度方向击穿砾石土^[10]。研究发现, 合理设置反滤可以有效控制防渗体缺陷的发展, 保障防渗体渗流稳定^[31-32]。

2.4 混凝土面板堆石坝筑坝技术研究 自 1980 年代开始, 随着混凝土面板堆石坝技术被引入中国, 结合堆石材料工程特性试验研究和现场试验及实际施工, 岩土所以西北口水库为试点, 开展了混凝土面板堆石坝技术的全面研究和再开发工作^[33-34]。其后, 结合茄子山、天生桥一级、洪家渡、水布垭、察汗乌苏、九甸峡、茨哈峡等多个工程, 开展了利用软岩筑面板堆石坝关键技术、峡谷地区高面板堆石坝关键技术、超硬岩筑面板堆石坝关键技术、深覆盖层上修建面板堆石坝关键技术^[12,35-36]等系列研究, 解决了软岩和超硬岩坝料合理利用、坝料分区设计与坝体变形控制、混凝土面板与混凝土防渗墙连接结构形式等设计和施工技术难题, 支撑了 100 m 级、200 m 级混凝土面板堆石坝建设及 300 m 级面板堆石坝建设可行性论证, 相关研究成果曾两次获得国家科技进步二等奖, 主编或参编了碾压式土石坝及混凝土面板堆石坝的设计和施工规范。

砂砾料筑坝材料的设计填筑标准采用相对密度, 而受级配缩尺效应和压实功能的影响, 室内试验所得到的最大干密度并不是真实的最大干密度, 导致工程实际检测中常出现相对密度大于 1 的不合理现象。近年来, 依托阿尔塔什、大石峡、玉龙喀什、前坪等重大水利工程, 发展和倡导了基于现场大型相对密度试验确定坝料压实指标的方法, 采用原级配砂砾料、现场压实机具和大直径密度桶, 在现场确定材料的最大干密度和最小干密度, 为合理确定大坝碾压质量控制指标提供了实用方法^[37]。

2.5 土石坝风险定量化分析技术 基于风险的土石坝安全分析和管理的国内外广受关注的发展方向。一般认为,风险等于失效后的致灾损失与失效概率的乘积。

土石坝溃口流量的准确计算,是土石坝致灾损失定量化评价和科学应急处置的一个重要前提。在陈祖煜院士带领下自主研发了大型圆筒型土样侵蚀率冲刷试验装置,研究了土体材料侵蚀速率和启动流速。在国内率先开展了土石坝溃决过程的离心机模型试验研究,揭示了坝体溃决破坏特征。基于溃坝实测数据分析与溃决模型试验研究,改进了溃坝水力学计算方法,采用圆弧滑裂面模拟溃口的侧向展宽过程,发展了基于双曲线侵蚀率模型的土石坝溃决过程模拟计算方法^[38],开发了具有自主知识产权的溃坝过程模拟软件系统,并应用于红石岩堰塞湖应急救援方案的制定^[39]。

可靠度方法是在现有规范的技术框架内,为分析工程安全的不确定性而提供的一种较为契合的系统性定量化方法。近年来,在陈祖煜院士带领下创新性地提出了“相对安全率”的概念,形成了安全判据理论标定方法,建立了传统单一安全系数和可靠指标之间的桥梁^[40]。以此研究为基础,借鉴其他行业的经验,提出了土石坝边坡稳定性风险控制标准,并就 200 m 以上特高土石坝分等、分级提出了建议^[41]。

土石坝特别是高土石坝溃坝案例较少,溃坝失效概率的定量分析面临诸多困难。近期,岩土所以贝叶斯风险理论为基础,提出了采用贝叶斯网络建模,虚、实溃坝样本结合、多源监测信息融合的高土石坝失效概率分析方法,以及基于薄防渗体土石坝渗流状态概化^[42],统计方法和贝叶斯方法结合的动态概率计算方法,探索了溃坝统计资料缺乏条件下高土石坝失效概率的计算方法。

2.6 灰坝、尾矿坝及堰塞坝研究 岩土所自 1980 年代初起着手开展了灰坝、尾矿坝等工业固体废弃物的安全贮放技术研究,研究涉及废弃物的工程性质,分级筑坝技术、贮放对地下水环境影响^[43]等多个方面,近年来又率先开展了贮灰场灰坝安全评价工作,有效提高了燃煤电厂贮灰场安全管理水平。目前,正在负责编制贮灰场防渗技术导则,以规范防渗设计,提高贮灰场地下水环保水平。

自本世纪初以来,结合西藏贡嘎滑坡形成的堰塞坝、5·12 汶川特大地震形成的唐家山、小岗剑、肖家桥等堰塞坝^[39],岩土所开展了较为系统的堰塞坝风险和险情应急处置技术研究,近期针对云南鲁甸地震形成的红石岩堰塞坝,开展了堰塞坝溃决流量分析、堰塞体物料特性、堰塞体抗渗和变形性能、以及后期防渗处置等相关问题研究,为应急和长期处置工作提供了直接支撑。

2.7 土工离心模型试验技术 离心模拟试验作为一种先进的物理模拟方法,在模拟研究原型复杂的岩土工程问题,验证数学模型及数值分析结果等方面具有明显优势。岩土所 1991 年建成了 LXJ-4-450 土工离心模拟试验机,容量为 450 g·t,属当时亚洲最大。经过近十年的发展,先后研发了世界首台可试验水平和垂直双向振动的离心机振动台、具备 4 自由度的离心机机械手、离心机冲击/爆破系统、可实现大荷载加载的离心机液压加载系统,使得目前的离心模拟试验室成为一个功能齐全、设备先进、适应多种研究需要的试验平台。

依托设备优势,近年来陆续开展了动力离心模型试验^[44-45]、冲击—爆破离心模拟试验^[46]、污染物运移离心模拟试验^[47]以及溃坝离心模拟试验等重点及特色研究,取得了一系列创新性成果,并作为主编单位编制了水利和电力行业土工离心模型试验规程。

目前,正在中国水利水电科学研究院延庆试验基地建设新的离心模拟试验室,计划建设 1 台容量为 1000 g·t 的大型土工离心机和 1 台最高离心加速度达 1000 g 的高速土工离心机,将于 2021 年正式投入运行。

2.8 岩石力学及工程 岩土所早期的岩石力学研究以试验研究为主,在现场岩体原位试验研究、岩石抗剪强度和变形特性试验研究、软弱夹层抗剪强度试验研究等方面在业界影响较大。1980 年之后,研究工作逐渐转向以科学计算为主。目前,以极限平衡和极限分析理论为基础的边坡稳定分析原理、方法以及相应的程序系列 W-SLOPE,以岩体变形和稳定有限元分析方法及相应的分析软件,已形成特色并应用于许多大型水利水电工程中;另外,岩体锚固技术、隧洞与地下工程等方面的研究也日趋深入。

(1) 岩质高边坡稳定分析及加固技术。结合一系列国家和省部级重点科研项目,应用弹塑性力学

理论,提出了边坡稳定的二、三维上下限分析方法^[48],并形成用户数达 260 家的边坡稳定 STAB 与 EMU 软件。针对水工结构设计风险分析和可靠度设计方法的基础理论和关键技术难题,提出了“相对安全率”理论,对重力坝、拱坝及挡土墙和加筋土边坡的抗滑稳定分析相应的允许安全系数和分项系数进行了理论标定^[49-55]。开发了锚拉悬臂抗滑桩、分散压缩型无黏结预应力锚索和倾斜山脊地形重力式挡墙等治理大型滑坡新技术,解决了三峡、小浪底、小湾、洪家渡、阿尔塔什等工程的关键技术难题。

(2)锚固技术。通过大型锚固岩体模型试验与数值模拟分析,对锚索加固边坡的阻滑抗剪作用机理进行了深入研究,揭示了预应力锚索的主动被动支护特征,建立了预应力锚索的综合抗剪作用模型和基于复合材料力学理论的锚固岩体本构模型,并提出了基于预应力锚索拉剪复合破坏的新型锚固设计方法^[56-61]。

为解决工程界对预应力锚索长期耐久性的关注,首次在漫湾挖出了一根已运用了 20 年的深 26 m、1000 kN 全长黏结型预应力锚索,通过理论分析和室内试验研究,揭示了复杂地质环境条件下预应力锚索的腐蚀体征和基本规律。自主研制了预应力锚索腐蚀试验平台,开展了钢绞线腐蚀试验及腐蚀损伤探测技术等方面的研究,初步建立了预应力锚索全生命周期腐蚀评判模型,为预应力锚索长期运行健康评价提供了重要的技术支撑^[62-65]。

针对目前预应力锚索技术存在的主要技术问题,提出了大吨位楔形预应力锚索内锚头结构、新型应力削峰式预应力锚索结构、可拆卸预应力锚索结构^[66]、新型多重腐蚀防护的新型外锚头结构等新型锚索结构技术及新型全程监测智能锚索系统。

(3)隧洞与地下工程。针对吉林引松、陕西引汉济渭、新疆引额济乌、云南滇中调水等长距离引调水工程、锦屏二级引水隧洞、阳蓄抽水蓄能电站等工程中的地下洞室岩石力学问题,对高应力岩爆机理、判据和控制技术^[67-69];衬砌结构外水压力确定^[70]、预应力环锚衬砌结构力学特性及原位试验技术^[71-72]、复杂围岩支护时机确定方法及支护数值方法、高压岔管充水围岩水力劈裂机理及控制技术等进行深入研究。建立了以围岩变形量为控制指标的多种支护措施最佳支护时机确定方法;提出了有压隧洞预应力环锚衬砌支护技术和施工工艺;建立了基于非线性流变模型的软岩长期变形预测分析方法;揭示了灌浆对隧洞衬砌结构外水压力的消减规律和渗流量变化规律的影响;建立了考虑围岩和裂隙应力-渗流耦合作用的高压隧洞充水过程的块体离散元数值模拟技术,揭示了高压隧洞充排水内水外渗后在围岩及节理裂隙中渗流规律。

在有压输水隧洞原位试验方面,结合吉林引松工程项目,开展了有压隧洞围岩衬砌联合受力变形的大型原位试验技术研究^[71-72],提出了圆环形扁千斤顶模拟水压现场试验技术、橡皮囊无水压力试验技术,以及真实水压试验技术方案,通过现场试验验证,取得了良好的试验效果。

(4)TBM 掘进相关研究。利用自主研发的新型岩体钻进实时数字监测技术,利用数学分析方法,对岩体工程力学特性进行实时评价分析,并提出了钻进比能的概念和公式^[73],可为 TBM 施工掌子面前方围岩快速分类与强度估计提供了一种途径。针对双护盾 TBM 卡机和脱困难题,应用卡机洞段三维数值仿真分析模型,对 TBM 掘进围岩大变形卡机风险和处理工法进行了研究,提出了不同围岩条件的卡机判别公式、双护盾 TBM 掘进下围岩快速支护技术和高效通过高地应力洞的工法。

2.9 工程建设与管理信息化技术 应用物联网、云计算、大数据等技术,先后研发了大坝填筑施工实时智能化监控系统、水利工程建设管理云平台、大坝填筑碾压机械无人驾驶系统和大坝安全巡检系统,已在多个工程中得到成功应用。

(1)水利工程建设管理云平台建设。在国家“十二五”科技支撑项目支持下,基于云计算、大数据、物联网技术,针对土石坝建设管理中施工信息存储不及时、不准确、难以查询等问题,通过对水利工程建设管理中的各类信息采集、传输、分析及展示标准的研究,提出了水利工程建设信息管理架构标准,建立了实时共享的“设计-施工-监理-检测-业主”五位一体、以数据采集、传输与应用为主线的水利工程建设管理云平台,实现了水利工程建设信息文档的实时化、精细化、体系化管理,以及电子文件的自动生成、自动分类、自动归档,向“无纸化”施工管理迈出了坚实的一步^[74]。

(2)大坝填筑施工实时智能化监控系统研发。为保障土石坝碾压的施工质量,岩土所研制了基于北斗高精度导航系统的大坝填筑施工实时智能化监控系统^[75]。该系统可实现取料、运输、加水、摊铺、碾压、压实质量检测等大坝填筑施工过程的实时、连续、远程监控。另外,研发了基于图像识别的粗颗粒坝料级配特性分析技术、基于频域反射的坝料含水率快速检测技术、坝料压实质量的实时检测技术等多项配套技术,提升了该系统的实用化水平。目前该系统已在云南月亮湾水库、河北双峰寺水库、河南出山店水库、安徽江巷水库、新疆阿尔塔什水利枢纽、老挝南俄 3 水电站等大坝碾压施工中得到了推广应用。

(3)大坝填筑碾压机械无人驾驶系统。以高精度卫星导航技术、自主环境实时感知技术、智能机械控制系统等方面的研究结果为基础,开发了大坝填筑碾压机械无人驾驶系统。该系统具有碾压路线规划、施工环境监测、障碍避让和紧急遥控停车等功能,可严格按照规定的施工参数进行施工,且驾驶机构安装调试便捷,常规驾驶与无人驾驶转换方便,有效改善了施工人员工作条件,对施工技术的进步提供了先进的手段。该系统已在出山店水利枢纽工程大坝碾压施工中得到的应用。

(4)大坝安全管理系统开发。以水工建筑物三维地形、地质建模技术研究^[76]为基础,初步建立了基于水库大坝三维工程和地质信息、异构多源监测信息融合的土石坝(堤防)安全监控预警系统,该系统具有日常安全巡检、大坝在线监控、大坝工作性态数值模拟与预测、大坝安全预警与应急处置等功能。

(5)水库工程数据库与河道管理系统。基于自主研发的三维智能数字地球平台技术,开发了“河道管理范围内建设项目信息管理系统”,实现了部、省(或流域机构)等多级动态信息的实时定位、信息录入、统计分析等功能,并已在水利部建管司得到应用,提高了我国涉河项目建设和工程管理的信息化水平。

2.10 工程爆破安全控制及防护技术研究 水利水电工程爆破与安全防护研究工作始于 1958 年,1978 年建设了直径 9 m 的爆炸试验洞及配套设施。之后,陆续开展了岩塞爆破、定向爆破筑坝、坝料控制爆破开采、拆除爆破、爆破安全监测评估等方面的研究^[3,77],并为多个工程提供了直接技术支持。近年来,依托国家自然科学基金重点项目、“十二五”科技支撑项目等,率先开展了土工离心机中爆破模拟技术、高坝抗爆特性研究、爆破破冰等方面的研究。

2.11 大坝工程安全评价与安全鉴定 我国已建水库大坝 9.8 万余座,其中 95% 以上为土石坝,安全管理任务繁重。历经数十年来的相关研究,岩土所在土石坝安全评价方法与评价标准、病害调查与隐患探测、自然因素与人为因素对大坝安全的影响、大坝安全管理与维护、大坝除险加固等方面积累了丰富的经验,依托国家“十一五”科技支撑计划项目和多个水利部科研项目,系统开展了水库大坝安全管理技术研究^[78],相关研究成果荣获国家科技进步一等奖。近年来,形成了实力雄厚的专家团队,先后完成了密云水库、官厅水库等多座大型水库大坝的安全评价,为 20 余座国内外大型水电站、抽水蓄能电站和水利枢纽工程开展了蓄水安全鉴定和竣工安全鉴定工作。

2.12 土工合成材料质量检测与工程应用 建立了性能完备的土工合成材料质量检测实验室,能够进行包括物理、力学、水力学、耐久性、界面特性和蠕变特性等 42 项检测,检测材料范围涉及土工布、土工膜、土工格栅、土工格室、膨润土防水毯、透水管和土工复合材料等多种土工合成材料。开展了土工合成材料在危险固废储存、景观工程、水利工程等方面的应用技术研究,主持编写了土工合成材料应用技术标准。

3 今后的研究方向

未来水利水电开发条件日趋复杂,为岩土工程相关技术研究提出了更高要求。高土石坝的变形控制问题、建筑物的抗震安全问题、高边坡与深埋地下洞室稳定性问题、特殊土的变形与处理等都亟待解决;量大面广的土石坝工程的安全管理和除险加固面临前所未有的压力,生态环境修复与日益严峻的地下水环境问题,也对岩土工程研究提出了新的课题。面对新的挑战,仍需在以下几个方

面开展深入的研究。

(1) 筑坝材料工程性质研究。深化筑坝材料的尺寸效应和时间效应研究, 掌握粗颗粒筑坝材料的真实变形特性, 揭示土石构筑物后期变形的机理与长期发展变化规律。以膨胀土、分散性土等特殊土为重点, 进一步研究其性质劣化的内在机制, 探索新的处理技术。

(2) 离心模拟试验技术研究。完善离心模拟试验配套装备与测试手段, 扩展试验功能, 提高试验精度。开展离心模拟技术基础研究, 发展完善离心模拟试验理论与试验方法。探索数值模拟与模型试验相结合的模拟技术, 为复杂结构和大型工程模拟试验创造条件。

(3) 高土石坝建设和管理关键技术研究。完善土石坝静动力计算方法和计算技术, 实现高土石坝工作性状的高效可靠全生命期仿真分析。针对高土石坝建设需要, 进一步开展坝体变形控制技术、防渗体系耐久性、大坝动力性状与抗震减灾技术等方面的研究。开展大坝病险原位综合探测技术研究, 提高大坝安全综合诊断和评价水平, 支撑大坝安全管理; 基于现代信息技术和安全监测新技术, 研发大坝安全实时智能监控与预警技术, 提升大坝安全管理水平; 进一步研究自然条件和战争、恐怖活动等非自然条件下土石坝溃决致灾机理, 完善溃坝分析技术, 发展基于风险的大坝安全管理技术。

(4) 高边坡关键技术研究。深化高边坡失稳机理研究, 完善高边坡的稳定分析方法和安全控制标准; 开展边坡锚固机理与锚固结构耐久性研究, 形成科学的锚固机构安全性评价技术; 开展新型边坡锚固技术及锚固结构监测新技术研究, 研发实用边坡安全智能监控技术。

(5) 深埋长隧洞和大型地下结构关键技术研究。针对复杂地质条件下深埋长大隧洞工程建设和大型地下厂房的建设中的疑难和复杂问题, 重点研发实用的地质超前预报新技术及围岩稳定性快速分析方法, 完善支护结构设计方法, 研发新的支护技术和新型监测技术, 为工程建设和安全管理提供技术支持。

(6) 环境岩土工程技术研究。开展燃煤电厂灰渣、尾矿等工业固体废物的安全贮放技术研究, 放射性核废料安全贮放技术研究, 污染土地治理技术研究, 淤地坝建设与管理关键技术研究, 以及土工合成材料在生态和环境治理工程中的应用技术研究。

致谢: 本文基于岩土工程研究所 60 年来的主要成果编写而成。参加编写的人员还有魏迎奇, 赵剑明, 蔡红, 赵宇飞, 田继雪, 殷旗等。

参 考 文 献:

- [1] 蒋国澄, 杨荫华. 打破土坝红粘土料填筑标准的“框框”——以礼河一级电站土坝心墙红粘土料填筑标准的试验研究[J]. 水利水电技术, 1965(10): 15-20.
- [2] 蒋国澄, 杨荫华. 一种石灰岩风化洪积红粘土心墙土料填筑标准的研究[J]. 水利学报, 1965(4): 40-53.
- [3] 蒋国澄. 岩土工程研究 50 年回顾[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2008, 6(4): 258-268.
- [4] 刘杰, 缪良娟. 风化石料在鲁布革土石坝防渗体中的应用[J]. 水利水电技术, 1987(12): 2-7.
- [5] 蒋国澄. 特殊土石坝材料的研究[C]//海峡两岸土力学与基础工程、土工技术学术研讨会论文集. 西安, 1994.
- [6] 温彦锋, 蔡红, 边京红. 强风化岩防渗土料的压实及渗透特性[J]. 水力发电学报, 2000(2): 17-24.
- [7] 陈兵, 于沐, 温彦锋, 等. 宽级配粗粒土数值试验微观参数的敏感性分析[J]. 水利学报, 2015, 46(S1): 315-320.
- [8] 张延亿, 汪小刚, 邓刚, 等. 级配缩尺对堆石压缩特性影响试验研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(7): 116-122.
- [9] ZHANG X X, DENG G, ZHANG D, et al. Assessing In-situ Nonlinear Model Parameters for Material of Changheba High Earth Core Rockfill Dam Through Finite Element Analysis[C]//Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Transportation Geotechnics and Pavement Engineering. Shanghai, 2018.
- [10] 汪小刚. 高土石坝几个问题探讨[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 203-222.

- [11] 李海芳, 张茵琪, 金伟, 等. 堆石料蠕变特性试验研究 [J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 212-217.
- [12] 邓刚, 徐泽平, 吕生玺, 等. 狭窄河谷中的高面板堆石坝长期应力变形计算分析 [J]. 水利学报, 2008, 39(6): 639-646.
- [13] ZHAO Z Y, DENG G, ZHOU M J, et al. Influence of the constant deviator stress on deformation characteristics of saturated sand under cyclic spherical stress [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, doi: 10.1007_s13369-018-3197-z.
- [14] 刘小生, 汪小刚, 马怀发, 等. 旁压试验反演邓肯-张 E-B 模型参数的方法研究 [J]. 岩土工程学报, 2004, 24(5): 601-605.
- [15] 汪小刚, 刘小生, 陈宁, 等. 深厚覆盖层力学特性测试技术研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [16] 刘小生, 刘启旺, 王钟宁, 等. 联合室内和现场试验确定土体本构模型参数方法研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(3): 220-225.
- [17] 俞培基, 陈愈炯. 非饱和土的水-气状态及其与力学性质的关系 [J]. 水利学报, 1965(1): 16-23.
- [18] 邢义川, 谢定义, 汪小刚, 等. 非饱和黄土的三维有效应力 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 288-293.
- [19] 邢义川, 谢定义, 李振. 非饱和黄土的破坏条件 [J]. 工程力学, 2004(2): 167-172.
- [20] 金松丽, 邢义川, 赵卫全, 等. 基于单线法试验的黄土增湿变形非线性模型研究 [J]. 水利学报, 2017, 48(6): 710-716.
- [21] 邢义川, 金松丽, 赵卫全, 等. 基于离心模型试验的黄土湿陷试验新方法研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3): 389-398.
- [22] 陈祖煜. 土坡稳定分析通用条分法及其改进 [J]. 岩土工程学报, 1983, 5(4): 11-27.
- [23] 陈祖煜. 采用非线性强度指标的边坡稳定分析 [J]. 水力发电, 1990(9): 9-13.
- [24] 陈祖煜. 土力学经典问题的极限分析上、下解 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 1-11.
- [25] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析 - 原理、方法、程序 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [26] 刘杰, 缪良娟. 鲁布革土石坝风化料心墙反滤层的试验 [J]. 水利水电技术, 1989(12): 16-22.
- [27] 刘杰. 土的渗透变形特性和控制 [J]. 人民黄河, 1984(5): 24-28.
- [28] 于沐, 邓刚, 温彦锋, 等. 土石坝裂缝数值模拟方法研究 [J]. 水利水电技术, 2014, 45(1): 152-157.
- [29] 邓刚, 韩巍巍, 温彦锋, 等. Hyttejuvet 坝突然渗漏事故的回顾和心墙堆石坝水力劈裂的反思 [C]//土石坝技术 2012 年论文集. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [30] 刘令瑶, 崔亦昊, 张广文. 宽级配砾石土水力劈裂特性的研究 [J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 10-13.
- [31] 刘杰, 罗玉再. 高土石坝心墙裂缝的自愈机理与反滤层的防护作用 [J]. 水利学报, 1987(7): 20-29.
- [32] 刘杰, 张雄. 多级配砾石土反滤设计方法试验研究 [J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 1-9.
- [33] 蒋国澄. 混凝土面板堆石坝的面板裂缝问题 [J]. 水利管理工程, 1994(4): 10-15.
- [34] 蒋国澄. 混凝土面板堆石坝的渗流控制 [J]. 水利管理工程, 1994(2): 1-7.
- [35] 徐泽平, 邓刚. 高面板堆石坝的技术进展及超高面板堆石坝关键技术问题探讨 [J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1226-1234.
- [36] 邓刚, 汪小刚, 温彦锋, 等. 混凝土面板坝面板变形模式与水平向挤压破损研究 [J]. 水利学报, 2015, 46(4): 396-404.
- [37] WANG L, LIU X S, ZHAO J M. Indoor and Outdoor Experimental Study on Relative Density [C]//Proceeding of seminar on intelligent technologies in construction industry, 2017: 101-107.
- [38] CHEN Z, MA L, YU S, et al. Back analysis of the draining process of the tangjiashan barrier lake [J]. J. Hydraul. Eng., 2015: 05014011.
- [39] ZHOU X B, CHEN Z Y, YU S, et al. Risk analysis and emergency actions for Hongshiyuan barrier lake [J]. Natural Hazards, 2015, 79(3): 1933-1959.
- [40] 陈祖煜. 建立在相对安全率准则基础上的岩土工程可靠度分析与安全判据 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 521-544.
- [41] 周建平, 王浩, 陈祖煜, 等. 特高坝及其梯级水库群设计安全标准研究 I: 理论基础和等级标准 [J]. 水利学报, 2015, 46(5): 505-514.
- [42] DENG G, CAO Kui, CHEN Rui, et al. A simple approach to evaluating leakage through thin impervious element of high embankment dams [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, doi: 10.1007/s12665-017-7195-3.

- [43] 温彦锋, 蔡红, 边京红. 灰渣的化学性质及贮放对环境的影响[J]. 水利学报, 2000(4): 19-23.
- [44] 张雪东, 侯瑜京, 梁建辉, 等. 饱和砂土地基液化离心机振动台模型试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(S2): 105-111.
- [45] 张雪东, 魏迎奇, 张紫涛, 等. 深厚覆盖层中地震动传播规律离心模拟试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 15(4): 272-278.
- [46] 胡晶, 陈祖煜, 魏迎奇, 等. 挡水结构水下爆炸作用的离心模型试验[J]. 水利学报, 2017, 38(9): 1073-1081.
- [47] 蔡红, 温彦锋, 魏迎奇, 等. 惰性污染因子 Cl⁻ 迁移特性的离心模拟试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(12): 1493-1498.
- [48] 陈祖煜, 汪小刚, 杨健, 等. 岩质边坡稳定分析 - 原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [49] CHEN Z Y, WANG Y J, SUN P. Stability analysis on the Unit 3 gravity concrete dam foundation of the Three Gorges Project[J]. Scientia Sinica, 2017, 47(8): 814-822.
- [50] 陈祖煜, 徐佳成, 孙平, 等. 重力坝抗滑稳定可靠度分析: (一) 相对安全率方法[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 148-159.
- [51] 陈祖煜, 徐佳成, 陈立宏, 等. 重力坝抗滑稳定可靠度分析: (二) 强度指标和分项系数的合理取值研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 160-167.
- [52] 陈祖煜, 陈立宏, 王玉杰, 等. 滑坡和建筑物抗滑稳定分析中的可靠度分析和分项系数设计方法[C]//高坝大库安全建设与风险管理高端论坛. 北京: 中国大坝协会, 2011.
- [53] 陈祖煜. 水利水电工程风险分析及可靠度设计技术进展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [54] 陈祖煜. 建立在相对安全率基础上的岩土工程可靠度分析与安全判据[J]. 中国岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 521-544.
- [55] 汪小刚, 贾志欣, 赵宇飞, 等. 岩质边坡预应力锚固作用机制及优化设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [56] 林兴超, 汪小刚, 陈文强, 等. 边坡锚固与加固协调作用机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 3123-3128.
- [57] 赵宇飞. 加锚结构面剪切特性及锚固岩体综合力学模型研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
- [58] 汪小刚, 周纪军, 贾志欣, 等. 加锚节理面的抗剪试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 250-256.
- [59] 陈文强, 贾志欣, 赵宇飞, 等. 剪切过程中锚杆的轴向和横向作用分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 143-148.
- [60] 赵宇飞, 汪小刚, 贾志欣, 等. 基于动力显式方法的岩体结构面剪切破坏特征研究[C]//中国水利水电科学研究院青年学术交流会. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2014.
- [61] REN A, WANG Y, CHEN Z, et al. Performance of the reinforced right abutment slope of Zipingpu Dam during magnitude 8.0 earthquake, Wenchuan, China[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology, 2016, 49(4): 298-307.
- [62] 任爱武, 汪彦枢, 樊海柱, 等. 预应力锚索砂浆包裹体 20 年夹层未凝现象及其成因初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 3724-3729.
- [63] WANG Y, REN A, WANG Y, et al. Investigations on corrosion and mechanical properties of a 20 year old ground anchor exhumed at a power station site[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(4): 589-602.
- [64] 任爱武, 汪彦枢, 王玉杰, 等. 拉力集中全长黏结型锚索长期耐久性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 493-499.
- [65] 赵宇飞, 汪小刚, 贾志欣, 等. 可拆卸锚索的现场试验研究[J]. 水利水电技术, 2012, 43(7): 55-58.
- [66] 刘立鹏, 汪小刚, 李卓民, 等. 基于硬脆性岩体剥落性状的初始地应力场评估[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 363-368.
- [67] LIU L, WANG X, ZHANG Y, et al. Tempo-spatial characteristics and influential factors of rockburst: a case study of transportation and drainage tunnels in Jinping II Hydropower Station[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, 3(2): 179-185.
- [68] 刘立鹏, 汪小刚, 贾志欣, 等. 锦屏二级水电站施工排水洞岩爆机理及特征分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(10): 3150-3156.

- [69] 刘立鹏,汪小刚,贾志欣,等.水岩分算隧道衬砌外水压力折减系数取值方法[J].岩土工程学报,2013,35(3):495-500.
- [70] 曹瑞琅,王玉杰,赵宇飞,等.无粘结曲线锚索式预应力衬砌结构数值建模方法研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2016,14(6):471-477.
- [71] 曹瑞琅,段庆伟,赵宇飞,等.基于HOEK-BROWN准则西原模型的圆形隧洞黏弹塑性解[J].水利水电技术,2017,48(4):64-71.
- [72] 曾俊强,王玉杰,曹瑞琅,等.基于钻孔过程监测的花岗岩钻进比能研究[J].水利水电技术,2017,48(4):112-117.
- [73] 陈祖煜,杨峰,赵宇飞,等.水利工程建设管理云平台建设与工程应用[J].水利水电技术,2017,48(1):1-6.
- [74] 赵宇飞,祝云宪,姜龙,等.水利工程建设管理信息化技术应用[M].北京:中国水利水电出版社,2018.
- [75] 魏迎奇,陈树铭,蔡红,等.复杂地质单元的三维智能建模方法[J].水利学报,2014,45(S2):19-25.
- [76] 梁向前,张芳,陆遐龄,等.爆破挤淤水中冲击波特性和工程监测[J].工程爆破,2009,12(2):16-19.
- [77] 严祖文,魏迎奇,李维朝.水库除险加固技术方案关联分析与决策[J].中国水利水电科学研究院学报,2012,10(2):153-159.
- [78] 李维朝,武富强,唐斌,等.蒸发塘岸坡土工膜防渗层力学响应分析[J].岩土工程学报,2016,38(S1):25-29.

Review of Geotechnical Engineering Research at IWHR in the last 60 years and its future development

WEN Yanfeng, DENG Gang, WANG Yujie

(Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: This paper briefly reviews research work of IWHR geotechnical engineering department in the last 60 years. Main research progress and research results in recent 10 years are especially summarized, such as in the field of engineering properties of soil, engineering technology for earth-rockfill dams, geotechnical centrifuge simulation technology, rock mechanics and engineering, safe storage of industrial solid waste, and application of modern information technology. Finally, future key research fields on geotechnical engineering research are presented.

Keywords: rock mechanics and engineering; engineering properties of soil; engineering technology for earth-rockfill dams; geotechnical centrifuge simulation technology

(责任编辑: 祁 伟)