

DOI: 10.11779/CJGE201610016

尾矿库安全评价存在的问题与对策

陈生水

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029; 2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏南京 210029)

摘要:指出了目前尾矿库安全评价中在尾矿料物理力学性质试验、沉积尾矿料物理力学性质概化分区方法、尾矿料本构模型与固结理论、尾矿库防渗与排渗系统服役性能长期演化规律、尾矿库溃坝致灾过程研究等方面存在的问题,分析了产生上述问题的原因,提出了今后应重点研究的方向。

关键词:尾矿库; 安全评价; 问题; 对策

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)10-1869-05

作者简介:陈生水(1962-),男,江苏南京人,博士,教授级高级工程师,博士生导师,主要从事土石坝试验技术、安全评价、灾害预测与防控方法的研究。E-mail: sschen@nhri.cn。

Problems and countermeasures of safety evaluation of tailing pond

CHEN Sheng-shui

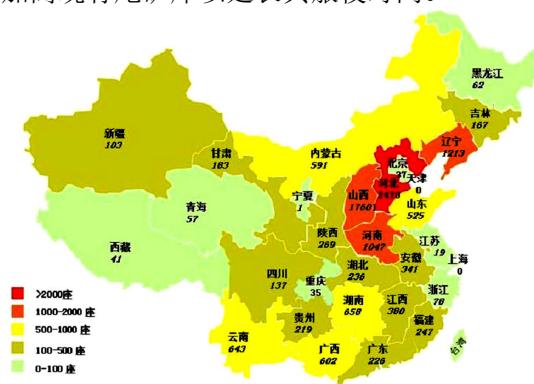
(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-Rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: The existing problems in the safety evaluation of tailing pond are pointed out, including the physical and mechanical tests on tailing materials, the generalized partitioning methods for physical and mechanical properties of deposited tailing materials, the constitutive models and the consolidation theories, the long-term performance evolution of drainage systems as well as the researches on the breaching process of tailing pond due to different disaster-induced factors. In this research, the reasons for the above problems are analyzed. Meanwhile, the key research direction of the safety evaluation of tailing pond in future is proposed as well.

Key words: tailing pond; safety evaluation; problem; countermeasure

0 引言

中国有尾矿库1.2万余座,几乎遍布全国各地(如图1),绝大部分为上游式筑坝法形成的尾矿库。据不完全统计,目前中国每年尾矿排量超过10亿吨^[1],且呈逐年增长态势,但其平均利用率低,必需新建尾矿库或加高现有尾矿库以延长其服役时间。



好考虑尾矿料复杂的物理力学特性、尾矿库的形成与运行特点、以及孕灾和致灾机制密切相关。

1 尾矿料的物理力学特性及其变化规律

与一般黏性土和无黏性土相比,尾矿料中常含有较多金属氧化物、不稳定化合物和结晶水等,在进行烘干、煮沸等处理时易导致化学成分和微观结构等发生变化,从而对其物理特性测试结果产生影响;尾矿料的固体颗粒具有复杂的吸水和释水机制,如风干的磷石膏等化工尾矿料颗粒具有较强的吸水性,当骨架长期受荷时,其接触点晶格发生歪曲和变形,结晶水不断渗出^[3-4],明显不同于常规土体排水固结;随着选矿工艺和磨矿技术不断进步,尾矿料颗粒日益细化,按照现行土工试验规程,许多尾矿料的颗粒尺度属黏土,但其显然并非黏土矿物。然而,目前尾矿料物理力学性质的试验仍主要套用现行的土工试验规程,未能充分考虑尾矿料微观结构和组构成分对于制样和试验方法的特殊要求,得出的物理力学性质指标很难正确反映尾矿料的本质属性^[5],从而影响了尾矿库安全评价结果的可靠性。

与水库大坝不同,土石坝坝体通常采用分区设计,同一分区内的材料的级配、压实度和物理力学特性是近乎一致且容易测定。而尾矿库一般由初期坝和多级后期子坝,以及库区沉积尾矿料构成,如图2所示。

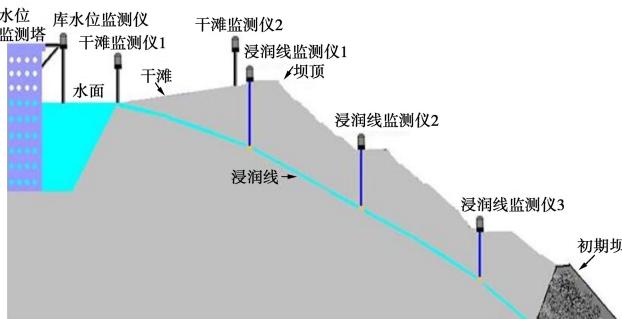


图 2 典型尾矿库示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a typical tailing pond

上游式尾矿库子坝坝基下面的尾矿料沉积层既是子坝的坝基,也是整个尾矿坝的一部分,各级子坝坝基和坝前尾矿料沉积层的力学性质对整个尾矿库的稳定性起着关键作用。而且,选矿后输送至尾矿库的尾矿料经水力分选,其在尾矿库内宏观呈现上粗下细,坝前粗库尾细的分布特征,并伴有粗细相间的夹层、互层、交错层、千层饼结构等现象,如此极为不均匀的沉积特征使尾矿料物理力学性质的概化分区和参数确定尤为困难^[6-7]。中国现行《尾矿设施设计规范》(B50863—2013)虽要求根据颗粒的粗细程度和尾矿的固结度将上游式沉积尾矿料概化分区为尾中砂、尾

细砂、尾粉砂、尾粉土、尾粉质黏土和尾黏土,但这样的分区方法没有考虑沉积尾矿料历经复杂的固-液-气-化(学)耦合作用后,其物理力学特性复杂的空间分布与时间变化规律。显然,现有的沉积尾矿料物理力学性质概化分区方法科学性不足,随意性较大,从而给尾矿库安全评价结果带来很大的不确定性。

因此,有必要深入研究尾矿料的微观结构和组构成分对其物理力学特性影响,揭示其宏观力学特性的微观机理,提出与尾矿料微观结构与组构成分相适应的物理力学性质测试方法,在现行土工试验规程的基础上制定尾矿料的物理力学性质试验规程;联合运用室内单元试验、大型水工模型和离心模型试验、以及原位测试技术,深入研究尾矿库内沉积尾矿料物理力学特性的空间分布与时间变化规律,提出符合尾矿库形成与运行特点的尾矿料物理力学性质概化分区方法,进一步提高尾矿库安全评价结果的可靠性。

2 尾矿料的本构模型

作为理论土力学的核心,本构模型历来是国内外岩土力学领域研究的重点,但绝大多数本构模型是针对黏土、砂土和粗颗粒料3类土体的,鲜有专门针对尾矿料提出的本构模型。究其原因主要是国内外对于尾矿库安全性的关注主要集中在渗流安全和坝坡稳定方面,变形问题并未受到足够的重视。但不可忽略的事实是尾矿库应力场、渗流场和位移场之间密切相关,割裂三者之间的动态耦合作用很难正确揭示尾矿库真实的孕灾机制。美国国家自然科学基金委曾组织Davis加州大学、麻省理工学院、剑桥大学等7家单位开展了“液化分析方法的离心模型试验验证(VELACS)”,VELACS的一个重要研究成果即证明了全面考虑流固耦合作用对于揭示液化机理的必要性^[8]。因此,在现代本构理论框架内建立专门针对尾矿料的静动力本构模型,并将其与合适的流固耦合分析理论和计算方法相结合仍是未来精细模拟尾矿库全服役期渗流、变形和稳定性演化规律的必然要求。

目前,数值模拟方法在尾矿库安全评价中的运用正日益广泛,但仍存在不少值得重视的问题。如在进行尾矿库地震液化计算分析时,大多采用土体的本构模型,由于尾矿料特殊的组构成分和形成过程,其性质与土体存在显著的差别,因此一般的土体的本构显然不能合理反映尾矿料物理力学特性及其应力应变规律,而且所采用的土体本构模型大多不能统一考虑静动力加载过程,导致同一尾矿库工程静动力分析需要两套模型和两套参数,不仅不同工况之间衔接不便,也在一定程度上影响了计算结果的精度。另一方面,

在尾矿库固结变形计算时, 固结方程大多采用小变形假定, 与许多观测资料证实的沉积尾矿料大变形几何非线性特性不符。

因此, 有必要在深入研究尾矿料物理力学性质基础上, 建立能正确反映不同类型尾矿料应力应变特性及其时变规律, 统一考虑静动力加载过程和沉积尾矿料大变形特性的弹塑性本构模型, 提出尾矿库多相多场耦合的大变形固结与静动力非线性渐进破坏计算分析方法, 形成尾矿库全服役期安全评价理论与方法体系。同时, 考虑到上游式尾矿库内低密度沉积尾矿料对扰动的极为敏感性以及沉积尾矿料物理力学性质复杂的空间分布与时间变化规律, 有必要探索联合采用室内试验与原位试验确定本构模型参数的方法。

3 尾矿库防渗排水系统服役性能及其演化规律

渗流浸润线是尾矿库的生命线, 强降雨、排渗系统淤堵、地震等原因都有可能导致尾矿库的浸润线抬高, 并对尾矿库安全产生两方面的威胁: ①地震导致饱和尾矿料的有效应力下降使其抗剪强度降低; ②水力坡降增大导致渗透破坏风险提高。因此, 渗流控制是尾矿库安全控制的关键之一。国内外对于尾矿库防渗和排渗系统的调查研究表明, 排渗系统淤堵导致尾矿库的浸润线抬高, 是尾矿库极为常见的隐患, 且淤堵成因复杂多样, 既可能是其它部位的细颗粒料充填排渗体孔隙所致, 也可能是尾矿料及其流体在复杂环境中的生化作用所致。目前, 对于淤堵现象和成因的研究多采用室内小比尺试验或者现场试验, 虽能够再现其局部淤堵现象, 但前者通常无法还原尾矿库内实际的应力场和渗流场, 而后者难以考虑淤堵现象形成的长期性。需要指出的是, 部分尾矿库采用竖井与水平碎石排水盲沟构建其排渗系统, 此类排渗系统在服役初期可能排水性能良好, 可有效降低尾矿库能尾矿库内浸润线。但随着服役时间延长, 低密度沉积尾矿料沉积层因自身固结和上部荷载作用下产生的大变形、地震荷载等很可能使得该排渗系统发生倒塌(竖井)、错位(排水碎石盲沟)、断裂(排水管道)等问题, 导致其排水能力急剧下降, 尾矿库内浸润线抬高而影响尾矿库的安全稳定。另一方面, 尾矿库内含有重金属和有毒有害化学成分的水溶液从尾矿库中泄漏可能造成重大环境污染事件, 根据中国法律法规以及相关国家标准, 贮存“危险废物”和“第Ⅱ类一般工业废弃物”的尾矿库必须采取专门的环保防渗措施。当尾矿库底部存在透水层时, 通常采用注浆帷幕或混凝土连续墙构成垂直防渗系统来阻隔库内污染液向周边地下

环境渗透扩散, 这与水利水电工程坝基防渗的要求是基本一致的。若不具备采用垂直防渗的条件, 则应参照《生活垃圾卫生填埋技术规范》(CJJ17—2004) 设置水平防渗设施, 如采用黏土铺盖或土工膜防渗衬层等。需要指出的是, 尾矿料溶液, 特别是化工尾矿料溶液对混凝土的腐蚀性较强, 尾矿库垂直防渗系统在腐蚀性尾矿料溶液长期作用下其防渗能力是否衰减甚至丧失值得研究; 而水平防渗在干湿循环、冻融循环和不均匀变形作用下易出现老化、开裂, 且防渗土工膜普遍存在焊缝缺陷, 其长期防渗能力同样值得深入研究。

因此, 在对尾矿库进行安全评价时要特别重视其防渗和排渗系统长期服役性能演化规律。研究排渗系统在应力场、渗流场以及沉积尾矿料大变形条件或动力作用下的淤堵、变形错位、倒坍等行为, 揭示其失效机理以及尾矿库排渗量、浸润线变化与其排渗系统长期服役性能演化之间的本质联系, 提出以服役时间、排渗量、尾矿库浸润线变化以及尾矿料类型及其排放方式为核心指标的尾矿库排渗系统长期服役性能评价方法, 同时也为研究开发长期服役性能好的新型排渗系统提供科学依据。研究尾矿库防渗系统在腐蚀性尾矿料溶液、干湿循环、冻融循环和不均匀变形作用下长期服役性能演化规律, 揭示防渗系统失效机理以及防渗系统缺陷和失效条件下尾矿渗滤液中重金属及有毒化学污染物在库区地下环境中的迁移扩散规律、影响范围与浓度分布规律及其主要影响因素, 在此基础上提出以服役时间和渗漏量、尾矿污染物类型及其浓度为核心指标的尾矿库防渗系统长期服役性能评价方法, 为在役尾矿库污染控制及新建尾矿库选址与新型防渗系统优化设计提供科学依据。值得指出的是, 目前对于防渗系和排渗系统长期服役性能演化规律的研究大多采用室内单元试验或小比尺模型试验, 前者显然无法反映防渗系和排渗系统整体长期服役性能演化规律, 后者由于模型应力水平低, 也无法真实反映其在尾矿库内实际的应力场和渗流场, 且试验时间较短。而具有显著“时空压缩效应”的离心模型试验技术是克服上述困难的有效途径, 有望在揭示尾矿库防渗系和排渗系统在真实工作环境下的长期服役性能演化规律研究中发挥重要作用。

4 尾矿库溃决机理与溃坝灾害评估

Azam等^[9]对世界范围内18401座尾矿库的调查发现, 过去100年内尾矿库的溃坝率高达1.2%, 远远高于国际大坝协会2001年公布的挡水坝约0.01%的溃坝率。然而, 为节约土地资源, 尾矿库正向“高、大、

陡”方向发展，如攀钢集团白马寺尾矿库设计坝高已达325 m，德兴铜矿5号尾矿库最大库容已超过10亿m³，这些高坝大库一旦溃决，将造成严重的生命财产损失和生态环境灾难，为此，国家安监总局和国家环保部相继出台了《尾矿库事故灾难应急预案编制指南》以及《尾矿库环境应急预案编制指南》。为提高应急预案的科学实用性，近年来，尾矿库溃决机理与溃坝灾害预测研究成为热点。

调查表明，尾矿库发生溃坝主要有以下几个原因：①遭遇超设计标准洪水或尾矿库泄洪系统故障导致洪水漫顶溃坝。②排渗系统排水能力大幅降低导致尾矿库内浸润线显著抬高，尾矿坝发生滑坡或出现渗透破坏。③地震导致饱和尾矿料沉积层发生液化，有效应力下降导致滑坡。因此尾矿库发生溃坝的模式主要有水流漫顶引发的溃坝、渗透破坏引发的溃坝和滑坡引发的溃坝3种。

需要指出的是，目前针对尾矿库溃决机理与溃坝致灾过程预测的研究工作存在诸多问题，主要表现为：①尾矿库溃决机理模型试验中模型尺寸过小，模型应力水平与模型相差过大^[10-11]，导致试验得出的溃口发展规律、溃口最终形状以及溃口流量过程与实际不符。②现有的溃坝物理模型试验主要针对水流漫顶引发的溃坝，因排渗系统排水能力大幅降低导致库内浸润线显著抬高，尾矿坝发生滑坡或出现渗透破坏引发的溃坝，以及地震导致饱和尾矿料沉积层发生液化，有效应力下降导致滑坡引发的溃坝模型试验几乎没有开展。③现行尾矿库溃决致灾后果评价大多沿用水库土石坝溃决致灾后果评价方法。水库土石坝溃决后向下游河道排泄的主要是水（坝体土石料相对于库水的体积可以忽略），属牛顿流体（ $\tau = \mu du/dy$ ），其黏滞系数 μ 几乎不变，而尾矿库溃决后的下泄物是水和尾矿料的混合物，属宾汉流体（ $\tau = \tau_0 + \mu du/dy$ ），且混合物中的固相含量在溃坝和下游演进过程中不断发生变化^[12]，即其初始剪应力 τ_0 和黏滞系数 μ 不断发生变化。

为克服常重力场小尺度溃坝模型试验由于模型和原型应力水平相差过大，试验结果与实际不符的不足，同时又能较好解决大尺度溃坝模型试验费用高、准备周期长和风险控制困难等问题，笔者研究团队2009年发明了土石坝溃坝离心模型试验系统，建立了模型和原型的相似准则。该系统由自动水流控制系统（如图3）、专用试验模型箱（如图4）、数据采集系统、视频实时监测系统和PIV图像测量系统组成，能在100倍重力场下持续稳定提供开展溃坝试验所需水流，可进行土石坝与尾矿库在不同致灾因子下的溃坝试验^[13]。

此外，为提升尾矿库溃坝致灾后果预测的精度，建议采用带振动台的溃坝离心模型试验系统及其分析

方法，模拟尾矿库的形成和运行工况，深入研究水流漫顶，浸润线抬高以及地震等致灾因子引发的尾矿库溃决机理及其溃坝过程，建立正确反映不同致灾因子单独或联合作用下尾矿库溃口发展规律和溃坝下泄物流量过程的数学模型；研究尾矿库溃坝下泄物在受灾区的流动特性、演进规律、沿程侵蚀机制及其与构筑物的相互作用，提出科学预测溃坝下泄物泛滥过程、最终覆盖范围与厚度的动力演进数学模型、致灾过程动态模拟理论和计算分析方法。为改变目前套用水库土石坝溃坝理论预测尾矿库致灾后果局面，提升尾矿库溃坝应急预案的科学合理性奠定理论基础。

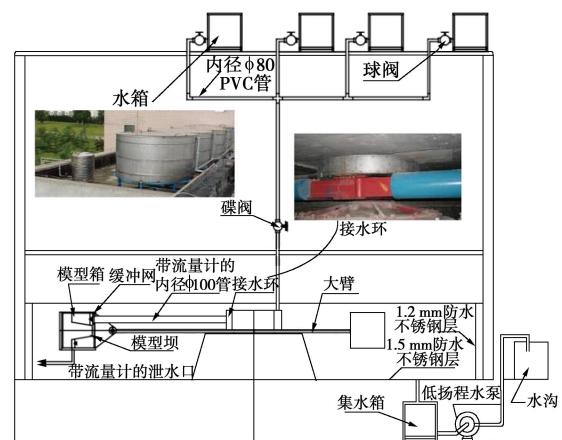


图3 离心机水流控制系统

Fig. 3 Water control system of centrifuge

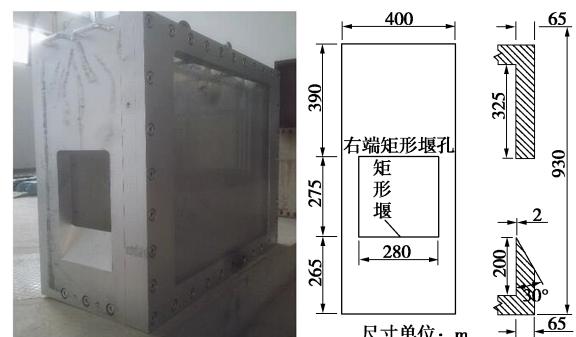


图4 溃坝模型试验专用模型箱

Fig. 4 Specialized model box for dam breach model tests

5 结语

本文指出了目前尾矿库库安全评价中在尾矿料物理力学性质试验、沉积尾矿料物理力学性质概化分区方法、尾矿料本构模型与固结理论、尾矿库防渗与排渗系统服役性能长期演化规律、尾矿库溃坝致灾过程研究等方面存在的问题，分析了产生上述问题的原因，提出了今后应重点研究的方向和相应的对策。尾矿库安全攸关国家经济社会发展和人民生命财产安全，但中国专门从事尾矿库安全问题研究的力量明显不足，

符合尾矿库形成过程和运行特点的安全评价与灾害预测基础理论缺失, 希望能有更多的专家学者能关注尾矿库工程安全和生态环境安全, 参与尾矿库安全问题研究, 为进一步提高中国尾矿库的安全评价与灾害预测水平, 减轻或避免尾矿库灾害损失贡献力量。

参考文献:

- [1] 谢旭阳, 田文旗, 王云海. 中国尾矿库安全现状分析及管理对策研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(2): 6 - 9. (XIE Xu-yang, TIAN Wen-qi, WANG Yun-hai. The safety analysis of current situation and management countermeasure on tailing reservoir in China[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009, 5(2): 5 - 9. (in Chinese))
- [2] Lemphers. Could the Hungarian tailings dam tragedy happen in Alberta[EB/OL]. Oct. 12, 2010. Website: www.pembina.org.
- [3] 沈婷, 王芳, 李国英. 磷石膏的物理力学特性[J]. 磷肥与复肥, 2008, 23(3): 21 - 23. (SHEN Ting, WANG Fang, LI Guo-ying. The physical-mechanical properties of phosphogypsum[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2008, 23(3): 21 - 23. (in Chinese))
- [4] 盛树馨, 顾春媛. 磷石膏物理力学性质试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2000. (SHENG Shu-xin, GU Chun-yuan. Research on physical and mechanical properties of phosphogypsum[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2000. (in Chinese))
- [5] 郦能惠, 等. 灰坝工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (LI Neng-hui, et al. Ash-retention dam engineering[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2012. (in Chinese))
- [6] 卡梅什尼克. 论尾矿冲积体密度随时间的变化[J]. 国外金属矿山, 1989(1): 80 - 82. (KAMEISHINIKE, SARATOV. Discussion on the time history of density for tailings alluvial body[J]. Foreign Metal Mining Magazine, 1989(1): 80 - 82. (in Chinese))
- [7] AZAM S, CHALATURNYK R J, SCOTT J D. Geotechnical characterization and sedimentation behaviour of laterite slurries[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, 28(6): 1 - 11.
- [8] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (SHEN Zhu-jiang. Theoretical soil mechanics[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2000. (in Chinese))
- [9] AZAM S, LI Q R. Tailing dam failures: a review of the last one hundred years[J]. Geotechnical News, 2010, 28(4): 50 - 54.
- [10] 陈生水. 土石坝溃决机理与溃坝过程模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (CHEN Sheng-shui. Breach mechanism and simulation of breach process for earth-rock dams[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2012. (in Chinese))
- [11] 敬小非, 尹光志, 魏作安, 等. 尾矿坝垮塌机制与溃决模式试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1377 - 1384. (JING Xiao-fei, YIN Guang-zhi, WEI Zuo-an, et al. Model experimental study of collapse mechanism and broken mode of tailings dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1377 - 1384. (in Chinese))
- [12] 敬小非, 尹光志, 魏作安, 等. 基于不同溃口形态的尾矿坝溃决泥浆流动特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 745 - 752. (JING Xiao-fei, YIN Guang-zhi, WEI Zuo-an, et al. Study of tailings dam-break surges with floating slurry in model experiment in different collapse gates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 745 - 752. (in Chinese))
- [13] 陈生水, 徐光明, 钟启明, 等. 土石坝溃坝离心模型试验系统研制及应用[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 241 - 245. (CHEN Sheng-shui, XU Guang-ming, ZHONG Qi-ming, et al. Development and application of centrifugal model test system for break of earth-rock dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(2): 241 - 245. (in Chinese))

(in Chinese))