

尾矿库溃坝研究进展

姜清辉^{1,2}, 胡利民¹, 林海¹

(1. 南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 总结分析了近年来国内外尾矿库溃坝致灾机理、尾砂力学性质及溃坝流体性质、溃坝影响范围和预警及防治措施等领域的研究进展。总体而言, 尾矿库溃坝研究方面已积累了一定的基础和经验, 然而在许多领域有待进一步深入系统的研究; 尾砂不同于常规土料, 相关研究目前多针对具体工程, 尾砂的力学性质的系统研究有助于提升尾矿库溃坝安全评价水平; 物理模型试验法和数值模拟方法是目前预测尾矿库溃坝影响范围的主要手段。指出了当前尾矿库溃坝研究及灾害防治方面的几个关键问题, 建议从新试验技术、尾砂及溃坝流体性质和筑坝工艺等方面突破研究。

关键词: 尾矿库; 溃坝; 尾砂; 灾害防治

中图分类号: TV649 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2017)04-0077-10

Advances in research of tailings dam failures//JIANG Qinghui^{1,2}, HU Limin¹, LIN Hai¹(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Advances in research of mechanisms of tailings dam failure-induced disasters, mechanical properties of tailings and hyperconcentrated flow after dam failures, the range of influence of tailings dam failures, and measures of early-warning and disaster prevention are summarized and analyzed. On the whole, studies on tailings dam failures have made some progress, and certain experiences have been obtained. However, further in-depth and systematic studies are required in many areas. At present, research on tailings is mainly performed on specific projects, in contrast to research on the conventional soil material. Systematic study on mechanical properties of tailings helps to enhance the level of safety evaluation of tailings dams. Physical model tests and the numerical simulation method are the main means to predict the range of influence of tailings dam failures. Some key problems for further research of tailings dam failures and disaster control are pointed out, i.e., seeking breakthroughs with new testing technology, properties of tailings and hyperconcentrated flow after dam failures, and dam construction methods.

Key words: tailings pond; dam failure; tailings; disaster control

尾矿库是指筑坝拦截谷口或围地构成的,用以贮存金属、非金属矿山进行矿石选别后排出尾矿的场所,由于其存在溃坝危险,会对下游居民及设施的安全造成威胁,导致很多环境和灾害问题^[1]。截至 2014 年底,全国共有尾矿库 11 359 座,其中绝大部分采用上游法堆筑,这些尾矿库潜在风险高,其安全形势不容乐观^[2]。尾矿库溃坝事故时有发生,加之矿企及相关部门对尾矿库溃坝机理和致灾因素认识不足,最终导致的结果令人触目惊心。与拦水坝等结构不同,尾矿库的筑坝材料性质、筑坝方式和溃坝机理等方面更为复杂^[3]。根据《国家安全监管总局等七部门关于印发深入开展尾矿库综合治理行动方案

的通知》(安监总管一[2013]58 号)的要求,尾矿库区大都需要通过溃坝模拟试验研究来对尾矿库区下游村庄的溃坝淹没范围和影响程度进行评估,而尾矿库的溃坝研究涉及土力学、水力学和泥水动力学等相关学科,这使得相关研究具有一定难度。本文从尾矿库工程溃坝安全评价的角度对相关研究进展进行了综述,指出了我国尾矿库工程理论研究中存在的不足。

1 尾矿库溃坝致灾机理

国内外曾多次发生尾矿库溃坝的重大事故,表 1 为一些典型的尾矿库溃坝事件。从表 1 可以发

表 1 国内外尾矿库溃坝事故

时间	地点	事故原因	事故后果
1962 年 9 月	云南火谷都尾矿库	洪水漫顶	263 人死亡,直接经济损失 2000 多万元
1988 年 4 月	陕西栗西沟尾矿库	排洪设施损坏	经济损失达 3000 万元,严重污染环境
1994 年 7 月	湖北大冶铜矿尾矿库	洪水漫顶	28 人死亡,3 人失踪
2000 年 10 月	广西鸿图选矿厂尾矿库	渗透流土破坏	28 人死亡,直接经济损失 340 万元
2006 年 4 月	陕西镇安金矿尾矿库	坝体失稳	17 人死亡,2 人失踪,76 间房屋毁坏淹没
2007 年 11 月	辽宁海城尾矿库	坝体失稳	约 54 万 m ³ 尾矿下泄,13 人死亡,3 人失踪
2008 年 9 月	山西临汾新塔矿业尾矿库	坝体失稳	277 人死亡,直接经济损失超过 9000 万元
2010 年 7 月	河南干江沟尾矿坝	洪水漫顶	10 人死亡,毁坏良田数百公顷
2010 年 9 月	广东信宜银岩锡矿尾矿库	生产和管理问题	18 人死亡,直接经济损失约 4.6 亿元
2013 年 10 月	辽宁建平金源矿业尾矿库	不详	5 万 m ³ 尾砂灌满河道,12 户民宅受损
2014 年 4 月	浙江遂昌萤石矿尾矿库	生产和管理问题	下游乡镇河段受到影响
2015 年 11 月	湖南郴州云锡矿业尾矿库	排泄设施损坏	4 人失联,直接经济损失 7.9 亿元
1965 年 3 月	智利 El Cobre 尾矿坝	地震作用	35 万 m ³ 尾砂下泄 12km,至少 200 人死亡
1985 年 7 月	意大利 Stava 尾矿坝	渗透破坏	269 人死亡和巨大的财产损失
1995 年 8 月	圭亚那阿迈金矿尾矿坝	渗透破坏	近千人死亡及非常严重的环境污染
2000 年 1 月	罗马尼亚 Baia Mara 金矿	大雨和融雪造成溃坝泥石流	严重污染环境导致大量鱼类死亡
2002 年 8 月	菲律宾 San Marcelino 铜矿	大雨造成泥石流	下游 250 户居民被迫迁移
2005 年 4 月	美国密西西比州 Bangs Lake 磷矿	磷石膏堆积速度过快加上大雨造成泥石流	64 350 m ³ 泥石流下泄到沼泽地带,导致沼泽内植物全部死亡
2011 年 3 月	日本 Kayakari 尾矿坝	地震液化	下游多处房屋被摧毁
2014 年 8 月	加拿大 Mount Polley 金铜矿	坝基失稳	730 万 m ³ 尾矿流入相邻湖泊,严重污染环境
2015 年 11 月	巴西马里亚纳市某铁矿	坝体结构破坏	15 人死亡,45 人失踪,严重环境污染

现,导致尾矿库溃坝的原因很多,并且事实上往往是多个致灾因素共同作用的结果。尾矿库溃坝的致灾机理主要包括渗透破坏、洪水漫顶、地震液化、坝坡过陡、滑坡和尾矿坝裂缝演化等^[4]。

1.1 渗流作用

长期以来,尾矿库渗流问题一直是研究的一个难点,也是矿山安全领域一直研究的热点。浸润线被誉为尾矿库的“生命线”,其位置反映了坝体排水的综合性能,浸润线的埋深是影响尾矿坝稳定性的主要因素之一^[5]。超标准暴雨、洪水和排水设施失效等常常使得尾矿坝内浸润线升高,进而诱发渗流破坏。对于尾矿坝而言,当渗透变形条件满足后,在尾矿坝体内将发生管涌。而发生管涌后尾砂的材料性质将发生变化,导致尾砂的渗透性增强,同时抗剪强度和变形模量降低。目前,工程中考虑渗流问题首先要确定坝体内部浸润线的位置。浸润线以下的尾砂固结速度缓慢,近乎饱和状态的尾砂使得坝体自重增加、抗剪强度降低和有效应力减小等,对坝体的稳定性极为不利。此外,在外力作用下,渗流场中会发生水力坡降,导致坝体应力重分布,当满足适宜条件后,坝内逐渐形成渗流通道,尾砂颗粒被渗流带走,导致坝体内部发生破裂或局部塌陷从而形成管涌,最终尾矿库大幅度塌陷从而溃坝。

由渗流引起的尾矿库溃坝引起了工程人员和学者们的重视。采用现场排放的尾砂为试验材料,敬小非等^[6-7]通过堆坝试验研究了尾矿堆积坝在洪水情况下发生垮塌破坏机制和尾矿沉积分布特征,试

验着重分析了尾矿坝内浸润线的变化和溃决过程中坝坡的位移矢量演化、坝体渗透破坏的发展过程等。张力霆等^[8]采用自行研发的尾矿库模型试验平台,分析了由于坝体排渗系统失效导致浸润线持续升高而诱发的尾矿库溃坝机制。由于细粒尾砂的渗透性要低于粗粒尾砂,细粒尾砂堆积坝内的浸润线要高于粗粒尾砂堆积坝,这样一来不同粒度尾矿坝的渗透安全性存在差异^[5]。长时间暴雨会升高尾矿坝内的浸润线,有研究^[9]表明降雨量与坝体稳定性近似呈线性关系。尾矿库中的渗流问题非常复杂,已有的试验研究多局限于定性层面上。由于缩尺土力学试验很难实现较好的相似性,关于尾矿库渗透的试验研究成果能否反映工程实际情况值得商榷。数值分析方法是尾矿库渗流分析的重要手段,常以实际工程为依托,将分析结果与实际勘测值进行对比分析^[10-11]。考虑尾矿性质变化的耦合渗流模型及参数设定是尾矿库数值分析的难点,准确而实用的数值模型将大幅度提升尾矿库工程的评估水平。

和尾矿库渗流相关的理论和试验研究仍有许多方面值得不断深入开展。Yin 等^[12]采用自行研发的试验观测设备,对渗流作用下尾矿微观结构变化进行了研究,认为尾砂的渗透破坏过程类似于土体,即微小颗粒被渗透水流冲走后使得尾砂承重骨架发生松动,进而导致尾砂内部发生明显的沉降或失稳。尾砂加筋料在一定程度上会改变尾砂的渗透性,但对于其微观机理尚不明确^[13]。关于尾矿库渗流的研究取得了一定的成果,但也有很大的局限性。影

响尾矿库渗流的因素很多,现有的研究多考虑比较单一的因素,考虑多因素耦合作用(例如考虑应力、变形和渗透的动态耦合)的尾矿库渗流分析将是未来的主要研究方向之一。另外,尾矿库渗流的动力学参数及其环境效应等方面有待深入研究。

1.2 洪水漫顶

尾矿库多依山而建,遇到强降雨或大量水流汇聚时,库内水位短时间上升,加之坝体渗透性低,雨水来不及排出,造成洪水漫顶而严重影响坝体稳定性。尾矿坝可以完全是土石坝(一次筑坝),也可以由尾砂分期堆筑形成。根据我国 1954—2000 年间水库大坝的溃决统计情况和尾矿库事故统计分析,漫顶是导致溃坝事故的主要原因之一^[14]。

对于一次筑坝类型的尾矿库,其漫顶溃坝研究可以参照一般土石坝。一次筑坝的尾矿库与水库有一定的相似性,由于此类尾矿库中的存水量远小于一般水库,因此参照水库进行设计管理更偏于安全。在过去的几十年中,世界各国先后进行了大量不同尺度的土石坝溃决模型试验,这其中既包括大尺度的野外模型试验,也包括在实验室内进行的小尺度溃决模型试验。考虑到溃坝模型试验的难度较大,数值模拟成为溃坝研究的重要手段,但如果缺少实测资料和模型试验的验证,数值模拟的可信度难以保证。无论何种材料构筑的堤坝,在发生漫顶情况下,其下游坝面的冲刷在开始阶段是缓慢渐进的。当冲刷最终发展到坝顶上游边缘后,溃决过程将十分迅速剧烈,并且首先向下发展到坝脚,随后才向两侧发展,溃口边壁在溃决过程中几乎垂直。坝体形式、筑坝材料、施工工艺及溃口位置都对溃口发展过程有较大影响。有研究成果^[14]表明坝体材料的性质是影响溃决发生时间、溃口发展速率的重要因素。

20 世纪我国针对一些具体工程(如三峡工程、板桥水库等)开展了相关的溃坝模型试验研究,同样近年来我国在土石坝漫顶破坏机理研究方面也取得了一定的成果。我国学者通过试验总结出了一些经验公式,坝体材料性质的差异使得大部分经验公式的应用有较大的限制。“陡坎”冲刷机制在由黏性混合土料填筑的堤坝溃决过程中扮演着非常重要的角色;对于砂质堤坝,其溃决过程主要由水流剪切冲刷主导,砂-粉砂-黏土混合料中的黏性土部分极大地减缓了堤坝溃决冲刷的速度^[15-16]。Zhang 等^[17]依据我国均质黏性土坝一般黏粒含量范围,在世界上首次开展了尺度最大、涵盖黏粒径范围最广的均质黏性土坝漫顶溃决试验(最大坝高达 9.7 m,坝体黏聚力范围为 7.5~39.5 kPa)。坝体填筑材料黏性很大时(如黏聚力大于 40 kPa)时,漫顶溃决过程非常缓慢

且溃口规模和溃口峰值流量相对较小,坝体溃决方式以“多级陡坎”发展为主要特征。坝体填筑材料黏性较小时,下游坝坡很快冲蚀下切、后退,迅速形成单级大陡坎,溃决过程迅速,溃口规模相对较大,流量很快可达到峰值。试验发现溃口形态与坝体黏性有很大关系。在土石坝漫顶溃坝过程中,首先在下游坝坡形成台阶状“陡坎”,随后陡坎合并成一个“大陡坎”,并逐渐向上游溯源冲刷^[18]。

不同于黏土型坝,由尾砂堆筑的尾矿坝发生漫顶后更容易发生侵蚀破坏。以 Merriespruit 尾矿库为例,洪水漫顶导致尾矿库失稳的大致过程为:暴雨作用下在尾矿坝上形成小的冲沟;尾矿坝边坡下部的松散尾砂发生侵蚀,并诱发下部坝体发生局部失稳;水流持续侵蚀尾矿坝体,尾矿坝中部的边坡局部失稳;冲蚀后的尾矿坝开始整体失稳,尾砂大量下泄^[19]。漫顶水流的流速大于尾砂的起动流速后,会对尾砂坝不断产生向下和两侧的侵蚀;水力侵蚀使得尾砂坝的漫顶溃口不断扩大和坡度变陡,进而使得尾砂坝发生局部或整体失稳坍塌。刘磊等^[20]引入非平衡输沙理论及河流动力学输沙公式并结合试验手段,建立了预测尾矿库溃坝洪水流量及溃口变化过程的数学模型。Chen 等^[21]通过室外 2 组大规模溃坝试验,模拟了大坝洪水漫顶的破坏情况,结果表明,溃口发展速率与单位流量有关,单位流量越大,溃口发展速率越大。Sun 等^[22]基于非恒定水流泥沙非饱和和非平衡侵蚀理论以及模型相似理论,采用粗尾矿建立物理模型模拟尾矿库洪水漫顶过程,研究显示,坝体位移取决于漫顶过程中坝体的饱和程度,浸润线越高,坝体滑动位移越大,溃口破坏程度与溢流对坝体冲刷有关,降低浸润线高度和提高尾矿坝的干滩长度可以减小溃坝带来的危害。Yang 等^[23]通过水槽试验模拟了尾矿坝洪水漫顶的破坏过程,整个破坏过程可分为 5 个阶段:渗流侵蚀阶段、初始溃口形成阶段、溃口逆向侵蚀阶段、溃口发展阶段以及溃口重新平衡阶段。坝体一旦产生溃口,溃口发展就会连续不断,直到下游重新达到平衡,表明坝体初始溃口对坝体后续变形有重大影响。初始溃口最有可能发生在下游边坡上,靠近渗流面的上边缘,该试验结果表明了尾矿坝溃口破坏的“陡坎”机制。

1.3 地震作用

尾矿坝地震安全问题一直是科技工作者和政府部门关注的焦点。由于我国尾矿库普遍采用上游法筑坝,而按照 AQ 2006—2005《尾矿库安全技术规程》规定,对于抗震设防烈度为 7 度以下地区宜采用上游法筑坝,而对于 8~9 度地区宜采用中线法或

下游法,可知上游法尾矿库抗震能力较差,一旦发生地震,其安全性得不到保障。地震作用导致尾矿坝溃坝的主要原因是尾砂液化。影响尾砂液化的主要因素有尾砂颗粒组成、形状、大小、级配、排列情况、密实度以及浸润线埋深、地震烈度等。根据尾砂堆坝的施工特点,坝中尾砂一般处于欠密实状态,在地震作用下,坝内超静孔隙水压力迅速增加,当孔压达到临界状态时,尾砂产生液化。当尾矿坝内开始出现液化后,易形成裂隙渗流通道并造成局部塌陷,同时地震作用下会使得坝体的滑动力或力矩增加,从而引起坝体滑移直到坝体整体失稳破坏,典型案例如日本 Kayakari 尾矿坝^[24]。

潘建平^[25-26]介绍了尾矿库地震液化评价及稳定性分析研究情况,并在前人基础上对地震液化时的孔压和应变进行简化分析后用于拟静定法分析。王文星^[27]以某工程为背景,采用拟静定法分析其在地震作用下的稳定性,并用相应软件进行了验证。孔宪京^[28]基于双线性模型分析方法,利用商业软件对某尾矿库进行了地震液化变形分析。孙恩吉^[29]在离心振动机上模拟了尾矿坝在强震作用时的动力反应及演变规律,并测量了其加速度、孔压、坝体变形等情况。虽然学者对尾矿坝安全问题做了一定的研究,但是有关尾矿坝抗震安全评价体系尚没有统一的标准。张超^[30]分析了不同细粒含量对尾矿材料动力液化特性的影响,并结合标准贯入试验分析了不同细粒含量对尾矿材料抗液化强度的影响,研究成果对尾矿库抗震设计具有一定的参考价值。杜艳强^[31]用动三轴试验系统分析了尾砂粉土液化后变形特性与孔隙水压力间的关系。目前尾矿坝地震破坏研究多集中在拟静力法,今后可以从尾砂的动力特性方面进行研究(例如尾砂动强度和动本构方程等),提出尾矿坝的动稳定分析方法及相应的数值计算模型。

1.4 坝基或坝坡失稳

尾矿坝失稳溃坝的另一致灾因素为坝基失稳,如加拿大 Mount Polley 金铜矿溃坝事故(表 1)。西班牙阿斯纳科利亚尔尾矿库溃坝是由于坝基失稳导致溃坝的典型事件,整个坝体发生了深层滑移并使得库区内部形成了巨大的竖直和近似水平的滑移面,滑动破坏过程中坝体类似刚体滑动而没有发生大的变形。Gens 等^[32]详细分析了该尾矿库的溃坝特点,并采用强度折减法和极限平衡法解释了该尾矿库的破坏机理。尾矿坝坝基失稳通常是由于地质勘察不明或设计失误导致,根据详实的地质资料进行相应的地基处理能防止出现坝基失稳现象。

由于漫顶水流作用或坝体长期浸泡软化的影

响,会使得尾矿坝的坝坡变陡或筑坝材料的抗剪强度降低,进而出现坝坡局部或整体失稳破坏。尾矿坝边坡稳定性分析一般采用极限平衡法或强度折减法。极限平衡法理论较成熟,但在应用过程中滑移面的形状和位置难以确定。坝坡失稳破坏通常与水力作用等伴随出现,尽管强度折减法在一定程度上可以避免滑移面的选择难题和考虑流固耦合作用^[33],但由于缺乏完善的尾矿坝失稳判断准则,使得强度折减法的工程应用受到了限制。

2 尾砂力学性质及溃坝流体性质

2.1 尾砂力学性质

尾砂的力学性质是影响尾矿坝边坡稳定性的关键。在上游式尾矿坝的工程勘察过程中,尾砂样品的运输、存放过程中存在易扰动的特点,获取与实际情况相符的尾砂抗剪强度指标有利于对尾矿坝进行客观的安全评估。尾砂的粒径级配沿尾矿库纵、横方向分布不同,而且粒径、含水率和孔隙比等因素影响尾砂的内摩擦角^[34]。与一般砂土不同,尾砂由于独特的化学环境(显著的尾矿淋滤固结和化学固结过程)而存在一定的黏聚力^[35]。李志平等^[36]根据某铅锌矿尾砂的大量固结快剪试验,得出尾砂内摩擦角关于含水率和标准贯入击数的经验计算公式。尾砂中含有矿山开采过程中提炼未完全的金属元素,其土粒比重和抗剪强度等力学特性与常规土料差异较大,粗尾砂力学特性呈现出剪胀性和软化性,而细尾砂无明显剪胀性^[37]。Bedin 等^[38]对某尾砂进行了大量的单轴加压不排水和动三轴试验,根据试验结果建立了单轴加压作用下尾砂的不排水临界状态线,发现此状态线具有高度的非线性。Schnaid 等^[39]在经过一系列的排水与不排水三轴压缩试验和拉伸试验后,以试验结果建立了某黄金尾矿材料的临界状态线,证实了在临界状态下可采用对小应变状态下的剪切强度与剪切模量进行耦合的方法来估算主要状态参数。

张超等^[40]进行了铜矿尾砂的共振柱试验,对铜尾砂的动孔隙水压力、动剪切模量和阻尼比等进行了研究。当相对密度大于 70% 时,尾砂抗液化能力随着相对密度增大而提高的趋势不太明显,而当相对密度小于 70% 时,抗液化能力随着相对密度的增大而明显提高。饱和尾砂具有敏感的不稳定结构,密度对尾砂的应力应变关系和抗剪强度影响显著,在很小的密度变化范围内饱和尾砂甚至会从不液化转变为完全液化^[41]。毛细水带内尾砂的内摩擦角随含水率的增大呈先增大后减小、最后基本稳定的变化规律^[42]。尾矿坝中存在粗细颗粒分层结构或

透镜体结构,这些结构的分布状况和力学性质对尾矿坝的稳定性会造成影响^[43]。尾矿坝中的分层结构体或透镜体表现出较弱的力学性质,进行尾矿坝安全评价时应特别注意其分布状况^[44]。

有关尾砂力学特性的研究成果多基于某特定的尾砂,一些规律尚不能确定是否为不同尾砂的共有规律,并且不同种类尾砂之间的力学性质差异有待深入系统的研究。利用先进的观测设备,从微细观角度去解释尾砂或尾砂结构体宏观力学特性的机理,或许会有新的发现。

2.2 溃坝流体性质

尾矿库溃坝对下游的影响程度与溃坝流体的力学特性密切相关。流变性是溃坝流体最重要的力学特性,在结合理论与试验分析的基础上,已提出多种流变模型^[45-47]。近几年,基于尾砂料浆在矿山管道运输的需要,浆体的不同配比、浓度、黏度等对其流变特性和强度的影响研究取得了一定的成果^[48]。3种不同浓度尾砂浆体进行的流变试验表明,以细颗粒为主的尾砂浆体,其剪应力与剪切速率呈正相关性;而以粗颗粒为主的尾砂浆体,其剪应力会呈现先减小后增大的趋势;对于同种试样,在剪切速率相等的情况下,浓度高的浆体剪应力更大,对尾矿坝下游的影响范围更小^[49]。尾矿库溃坝流体含有大量的尾砂,其流变性质与泥石流具有一定的相似性,根据流变仪对泥石流的流变特性分析得到,在同种剪切速率下,黏粒含量和容重越大,浆体剪应力越大^[50]。目前对含尾砂浆体流变性的研究很少,而且尾砂浆体的流体参数选取和数值模型没有统一的标准。

3 尾矿库溃坝影响范围

工程中常常需要对尾矿库区下游村庄的溃坝淹没范围和影响程度进行评估,目前预测尾矿库溃坝影响范围的主要方法为模型试验法和数值模拟法。

3.1 模型试验法

模型试验法在溃坝演进过程中可以很好地考虑地形等因素,是目前研究尾矿库溃坝影响范围的主要手段。Rico 等^[51]收集了历史上尾矿坝溃坝事故的信息,通过分析比较建立了尾矿坝几何参数(坝高、库容等)与溃坝下泄尾砂水力特性之间的统计关系,指出了尾矿坝库容与尾矿溢流量之间的幂函数经验关系。Zhang 等^[52]通过 13 组水槽漫顶溃坝模拟试验表明,泥沙峰值速率随坝顶加宽和坝坡变缓而变小,从而延长了泥沙峰值速率到达的时间。尹光志等^[53-54]以云南某尾矿库为研究背景,进行了不同坝高和不同溃口形态(1/4、1/2 和全部瞬溃)的溃坝试验,结果表明,坝高和溃口形态对下游泥浆淹

没厚度和范围有较大影响,随着坝高和溃口的增大,下泄泥浆到达同一断面的冲击力和泥深成非线性增大的趋势,而且到达时间也相应缩短,因此溃坝灾情会加重。王永强等^[55]以四川某尾矿库为依托,采用模型比尺 1 : 400 进行了尾矿坝全溃坝试验,分析了在某一高度和库容情况下,溃坝泥浆的冲击力、淹没深度及流速的变化规律,冲击压力、泥深和流速在达到峰值后会随着距离延伸而减小,直到平稳停止运动,局部地形对这 3 个指标的波动具有影响。

尾矿库溃坝过程的模拟涉及岩土力学、水力学与河流动力学等多个专业学科,综合多方面的相似关系在理论和技术上存在相当的难度。尽管可以查到少量尾矿库溃坝试验研究资料,然而在物理模型的相似性设计方面缺乏可靠的依据。尾矿库溃坝物理模拟严格意义上应包含几个方面:坝体和下游地形的相似、尾矿坝溃坝过程相似、尾矿库内尾砂的启动和沉积相似等。对于一次筑坝的土石坝尾矿库,通常采用与原型相近的坝料、级配及坝体施工质量,然而缩尺效应严重影响模型试验结果与原型间的相似性^[56]。尾矿坝的相似材料目前主要凭借经验选取或采用原型尾砂,尚缺乏完备的理论支撑。在溃坝洪水的演进过程相似方面,坝体的溃口发展和下游河道的糙率模拟成为试验的关键。张红武等^[57]借鉴沟道高含沙洪水及淤地坝溃坝模型研究成果,基于尾砂颗粒尺寸相似和侵蚀率方面的考虑对模型尾矿坝材料的选择提出了建议。然而,在尾砂的启动和沉积方面的相似模拟,仍有较长的一段路要走。离心模型试验具有较好保持模型与原型应力相同的特点,从而能较好地模拟坝体自重应力场及其与自重有关的变形过程,合理应用应能够提升尾矿库溃坝安全评价水平^[56,58]。

相似模型的设计是开展溃坝模型试验的前提,试验结果可以根据相似律直观地预测溃坝演进过程。借助于离心模型试验系统,有望深入研究各致灾因素引发的尾矿库溃决机理及溃坝过程,建立正确的溃坝动态模拟理论和计算方法。然而尺寸限制和较高投入使得离心试验在工程服务方面受到制约,例如大型尾矿库缩尺在离心机中会因缩尺比过小而误差较大。常重力条件下尾矿库溃坝模型试验仍会是工程中的重要评估手段,改进常重力条件下的尾矿库溃坝相似试验技术很有必要。

3.2 数值模拟法

随着数值计算方法不断发展和计算机运算能力的增强,数值模拟也逐渐成为研究溃坝砂流影响范围的重要方法。李全明等^[59]以溃坝洪水运动和泥浆动力学理论为基础,建立了尾矿库溃坝泥浆数值

模型,研究了其溃坝影响范围。胡凯衡等^[60]对一些泥石流的数值模型进行了总结,就算法而言主要有:有限元法、有限体积法、有限差分法、SPH 法等。Rickenmann 等^[61]综合比较了 3 种常见流变模型对数值模拟结果的影响,虽然结果基本符合实际泥石流的运动范围,但地形因素对不同模型计算结果的影响较大,因此,流变模型的选择是数值分析计算的关键之一。王纯祥等^[62]为了模拟复杂地形泥石流的演进规律,假定雨水和泥石组成的混合物为均匀连续不可压缩非定常的牛顿流体,采用深度积分法,导出了模拟泥石流运动的二维数学模型。刘洋等^[63]以实际工程为背景,建立了三维溃坝模型对溃后泥石流演进过程进行模拟分析,得到了流速和淹没深度随时间的变化规律以及最终的影响范围。皇甫凯龙等^[64]基于二维溃坝水流及高含沙水流研究成果,建立了尾矿坝溃坝砂流数值模型,分别对某尾矿坝溃决洪水和砂流运动情况进行了分析,结果表明溃坝砂流与溃决洪水过程有着明显区别,由于泥沙与水的相互作用以及下游地形的影响,溃坝砂流流速及泥浆厚度均比溃决洪水小。

虽然目前对尾矿库溃坝砂流的研究积累了一定的经验,但在计算方法上大多还是借鉴水库溃坝泥石流的相应理论。数值计算中假定尾矿库的瞬间破坏形式在事实上与尾矿库逐渐溃坝不符,这势必会带来一定的误差。尾矿库多为逐渐溃坝破坏模式,采用计算手段模拟出尾矿库溃决过程并对坝体和溃坝流体分别赋予准确的本构模型和流体参数,将使得计算结果更接近真实工况。

4 尾矿库溃坝预警机制及防治措施

尽管尾矿库工程目前在技术层面上存在一定的不足,但溃坝事故的发生却常因为施工和管理方面的原因(见表 1)。勘察和设计不当、施工不良、管理不善和应急处理不当等都是实际工程中造成尾矿库溃坝灾害后果严重的原因。梅国栋^[65]在分析了国内外 160 起事故案例的基础上,提出了尾矿库溃坝预警监测指标体系,包括浸润线埋深、降雨强度、泄水量和安全超高等。尾砂的剪切强度会随着时间而逐渐降低,尾矿坝的变形破坏先后经历衰减变形、稳定变形和加速变形 3 个阶段,因此变形分级预警机制的建立确有必要。

在建立尾矿库监测预警机制的同时,仍需改进现有的尾矿筑坝技术和研究溃坝灾害防治措施。加筋尾矿坝浸润线的上升滞后于未加筋情况,筋带对尾矿坝漫顶破坏发展速度和侵蚀沟加深加宽产生明显的阻滞作用^[66]。土工合成材料在增大尾矿坝边

坡稳定性的同时,使得常规坝坡的圆弧滑动破坏模式发生改变^[67]。模袋法是目前尾矿坝上游法筑坝的一种新方法。由于土工布和尾砂的共同作用,充尾砂模袋的极限抗压强度远大于单纯尾砂的极限抗压强度^[68]。由于模袋具有反滤作用,还能够减轻漫顶水流对坝体的侵蚀作用。当模袋达到承受的极限荷载时,通常会在模袋边缘处发生土工布的撕裂破坏,因此在使用模袋筑坝法时需引起注意。另外,采用高浓缩分级尾矿上游法筑坝能够使得沉积滩颗粒分布均匀,减少互层和细泥夹层的出现,改善坝体内部结构并增强尾矿坝的稳定性^[69]。极端情况下尾矿库的溃决可能无法避免,可以研究采取一定的应急工程措施,以减小溃坝损失或延缓溃坝时间。例如,工程中在尾矿坝下游设置临时坝体不仅可以对溃坝砂流起到导流的作用,还可以拦蓄一部分砂流,有效地减小尾矿坝溃坝砂流下泄距离^[70]。虽然人们对尾矿库溃坝预警和防治有了一定的认识,但仍有许多需要改进和深入研究的地方。

5 研究展望

尾矿库溃坝分析在很多时候借鉴了一般水库和大坝的理论研究和工程经验,但又与蓄水大坝或水库存在明显的区别。虽然人们在尾矿库溃坝方面做了大量的研究工作,但是在许多关键领域的进展较缓慢,建议今后可从以下几方面开展深入研究:

a. 结合新的试验技术和观测手段,深入揭示尾矿库的溃坝机理。例如从微、细观角度对尾矿库的溃坝成因和发展过程进行描述,研究复杂情况下尾矿库的溃口发展规律和多因素耦合作用下的尾矿库渗流分析等。

b. 对尾砂料进行系统深入的物理力学性质分析。尾砂不同于一般黏性土和无黏性土,深入分析尾矿料的微细观结构和组成成分对其物理力学特性的影响,有助于提升尾矿库溃坝安全评价水平。

c. 开展模拟具体工况下的模型试验研究和改进现有尾矿库相似模型试验技术。采用离心试验系统来模拟复杂渗流、漫顶和地震等致灾因素诱发的尾矿库的浸润线抬升、溃决机理及过程。基于尾砂的物理力学性质,从坝体变形、冲刷和强度方面综合提出改进的常重力下尾矿库相似模型材料选取办法,改进尾矿库溃坝模型试验技术。

d. 提升尾矿库溃坝数值模型计算水平。基于尾矿库溃坝资料分析和物理试验,研究尾矿库溃坝流体的性质、演进规律及其与土层、构筑物的相互作用,构建相应的数学计算模型。模拟尾矿库漫顶逐渐溃决过程,并对坝体和溃坝流体分别赋予准确的

本构模型和流体参数,将使得计算结果更接近真实工况。

e. 研究尾矿库溃坝灾害防治措施和完善应急处理预案。随着土工合成材料在水利和岩土工程中的大量应用,进一步研究土工合成材料加筋尾矿筑坝技术,优化和提升尾矿库的稳定性。研究溃坝应急处理预案,以便在极端情况下尾矿库溃决可能无法避免时,能减小溃坝损失,或延缓溃坝时间以赢得应急救援时间。

参考文献:

[1] 张力霆. 尾矿库溃坝研究综述[J]. 水利学报, 2013, 44(5): 594-600. (ZHANG Liting. Summary on the dam-break of tailing pond [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(5): 594-600. (in Chinese))

[2] 梅国栋, 王云海. 我国尾矿库事故统计分析与对策研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(3): 211-213. (MEI Guodong, WANG Yunhai. Statistic analysis and countermeasure study on tailings pond accidents in China [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(3): 211-213. (in Chinese))

[3] 赵天龙, 陈生水, 钟启明. 尾矿坝溃决机理与溃坝过程研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2015(1): 105-111. (ZHAO Tianlong, CHEN Shengshui, ZHONG Qiming. Advances in studies of tailing dam break mechanism and process [J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(1): 105-111. (in Chinese))

[4] 吴宗之, 梅国栋. 尾矿库事故统计分析及溃坝成因研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(9): 70-76. (WU Zongzhi, MEI Guodong. Statistical analysis of tailings pond accidents and cause analysis of dam failure [J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(9): 70-76. (in Chinese))

[5] 尹光志, 敬小非, 魏作安, 等. 粗、细尾砂筑坝渗流特性模型试验及现场实测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊2): 3710-3718. (YIN Guangzhi, JING Xiaofei, WEI Zuonan, et al. Study of model test of seepage characteristics and field measurement of coarse and fine tailings dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup2): 3710-3718. (in Chinese))

[6] 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): 1377-1404. (JING Xiaofei, YIN Guangzhi, WEI Zuonan, et al. Model experimental study of collapse mechanism and broken mode of tailings dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1377-1404. (in Chinese))

[7] 邓涛, 万玲, 魏作安. 温庄尾矿库堆坝模型试验及坝体稳定性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3647-3652. (DENG Tao, WAN Ling, WEI Zuonan. Stacking model test of Wenzhuang tailings reservoir and its stability analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3647-

3652. (in Chinese))

[8] 张力霆, 齐清兰, 李强, 等. 尾矿库坝体溃决演进规律的模型试验研究[J]. 水利学报, 2016, 47(2): 229-235. (ZHANG Liting, QI Qinglan, LI Qiang, et al. Experimental model study on dam break and evolution law of tailings pond [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(2): 229-235. (in Chinese))

[9] 何锦龙, 伍跃胜, 刘泽东, 等. 不同降雨量对尾矿坝稳定性的影响规律分析[J]. 金属矿山, 2015(8): 150-153. (HE Jinlong, WU Yuesheng, LIU Zedong, et al. Influence law analysis of different precipitation to the stability of tailings dam [J]. Metal Mine, 2015(8): 150-153. (in Chinese))

[10] 李宗伟, 孙丹, 尹大娟. 吊水壶尾矿坝渗流特性三维有限元分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(6): 65-69. (LI Zongwei, SUN Dan, YIN Dajuan. Analysis on seepage behavior of Diaoshuihu Tailing Dam by 3-D FEM [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(6): 65-69. (in Chinese))

[11] 王东, 沈振中, 陶小虎. 尾矿坝渗流场三维有限元分析与安全评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(3): 307-312. (WANG Dong, SHEN Zhenzhong, TAO Xiaohu. Three-dimensional finite element analysis and safety assessment for seepage field of a tailings dam [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(3): 307-312. (in Chinese))

[12] YIN Guangzhi, ZHANG Qiangui, WANG Wensong, et al. Experimental study on the mechanism effect of seepage on microstructure of tailings [J]. Safety Science, 2012, 50: 792-796.

[13] 白建平, 叶辰, 赵一姝, 等. 不同筋料对尾矿坝渗透特性影响规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(8): 55-59. (BAI Jianping, YE Chen, ZHAO Yishu, et al. Study on influence laws of different reinforced materials on permeability characteristics of tailing dam [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(8): 55-59. (in Chinese))

[14] 李云, 宣国祥, 王晓刚, 等. 土石坝漫顶溃决模拟与抢护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.

[15] 朱勇辉, VISSER P J, VRIJLING J K, 等. 堤坝溃决试验研究[J]. 中国科学: E 辑 技术科学, 2011, 41(2): 150-157. (ZHU Yonghui, VISSER P J, VRIJLING J K, et al. Experimental investigation on breaching of embankments [J]. Science in China: Series E Technological Sciences, 2011, 41(2): 150-157. (in Chinese))

[16] 张大伟, 黄金池, 何晓燕. 无黏性均质土石坝漫顶溃决试验研究[J]. 水科学进展, 2011, 22(2): 222-228. (ZHANG Dawei, HUANG Jinchi, HE Xiaoyan. Experimental study on overtopping breaching of noncohesive homogeneous embankment dams [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(2): 222-228. (in Chinese))

- [17] ZHANG Jianyun, LI Yun, XUAN Guoxiang, et al. Overtopping breaching of cohesive homogeneous earth dam with different cohesive strength [J]. Science China Technological Sciences, 2009, 52(10): 3024-3029.
- [18] 朱勇辉, 廖鸿志, 吴中如. 土坝溃决模型及其发展[J]. 水力发电学报, 2003(2): 31-38. (ZHU Yonghui, LIAO Hongzhi, WU Zhongru. The earth-dam-break model and its development [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2003(2): 31-38. (in Chinese))
- [19] FOURIE A B, BLIGHT G E, PAPAGEORGIOU G. Static liquefaction as a possible explanation for the merriespruit tailings dam failure [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38: 707-719.
- [20] 刘磊, 张红武, 钟德钰, 等. 尾矿库漫顶溃坝模型研究 [J]. 水利学报, 2014, 45(6): 675-681. (LIU Lei, ZHANG Hongwu, ZHONG Deyu, et al. Research on tailings dam break due to overtopping [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(6): 675-681. (in Chinese))
- [21] CHEN Suchin, ZHENG Yifeng, WANG Chiang, et al. A large-scale test on overtopping failure of two artificial dams in Taiwan [J]. Engineering Geology for Society and Territory, 2015(2): 1177-1181.
- [22] SUN Enji, ZHANG Xingkai, LI Zhongxue, et al. Tailings dam flood overtopping failure evolution pattern [J]. Procedia Engineering, 2012, 28: 356-362.
- [23] YANG Yang, CAO Shuyou, YANG Kejun, et al. Experimental study of breach process of landslide dams by overtopping and its initiation mechanisms [J]. Journal of Hydrodynamics, 2015, 27(6): 872-883.
- [24] ISHIHARA K, UENO K, YAMADA S, et al. Breach of a tailings dam in the 2011 earthquake in Japan [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 68: 3-22.
- [25] 潘建平, 孔宪京, 邹德高. 尾矿坝地震液化稳定的简化分析 [J]. 水利学报, 2006, 37(10): 1224-1229. (PAN Jianping, KONG Xianjing, ZOU Degao. Simplified analysis of liquefaction and stability of tailing dam during earthquake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(10): 1224-1229. (in Chinese))
- [26] 潘建平, 曾庆筠, 宋应璐, 等. 尾矿坝地震液化侧向位移分析方法及应用 [J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(12): 99-104. (PAN Jianping, ZENG Qingyun, SONG Yinglu, et al. An analysis method of seismic liquefaction-induced lateral displacement for tailings dam and its application [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(12): 99-104. (in Chinese))
- [27] 王文星, 曹平, 刘业科, 等. 地震条件下尾矿坝稳定性分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2006, 2(6): 58-61. (WANG Wenxing, CAO Ping, LIU Yeke, et al. Analysis on stability of tailing pond under earthquake [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2006, 2(6): 58-61. (in Chinese))
- [28] 孔宪京, 潘建平, 邹德高. 尾矿坝液化流动变形分析 [J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(4): 541-545. (KONG Xianjing, PAN Jianping, ZOU Degao. Analysis of liquefaction-induced flow deformation of tailings dam [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008, 48(4): 541-545. (in Chinese))
- [29] 孙恩吉, 张兴凯, 程嵩. 尾矿库溃坝离心机振动模型试验研究 [J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(6): 130-135. (SUN Enji, ZHANG Xingkai, CHENG Song. Centrifuge and shaking table experiment on the tailings dam failure [J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(6): 130-135. (in Chinese))
- [30] 张超, 杨春和. 细粒含量对尾矿材料液化特性的影响 [J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1133-1137. (ZHANG Chao, YANG Chunhe. Effect of fines content on liquefaction properties of tailings material [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1133-1137. (in Chinese))
- [31] 杜艳强, 杨春和, 张超, 等. 尾矿粉土液化后的大变形特性试验研究 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2016, 37(8): 1166-1171. (DU Yanqiang, YANG Chunhe, ZHANG Chao, et al. Experimental study on large post-liquefaction deformation behavior of tailings silt [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(8): 1166-1171. (in Chinese))
- [32] GENS A, ALONSO E E. Aznalcollar dam failure [J]. Geotechnique, 2006, 56(3): 165-201.
- [33] 韩建波, 张力霆, 李强, 等. 流固耦合-强度折减法在尾矿坝稳定分析中的应用 [J]. 金属矿山, 2011(11): 29-32. (HAN Jianbo, ZHANG Liting, LI Qiang, et al. Study on the stability of tailing dam by strength reduction methods based on fluid-solid coupling theory [J]. Metal Mine, 2011(11): 29-32. (in Chinese))
- [34] 王凤江, 张作维. 尾矿砂的堆存特征及其抗剪强度特性 [J]. 岩土工程技术, 2003(4): 209-212. (WANG Fengjiang, ZHANG Zuwei. Deposit characteristic and shear strength of tailing sand [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2003(4): 209-212. (in Chinese))
- [35] 曹净. 攀钢集团马家田尾矿堆积特性研究及尾矿堆积坝体稳定性分析 [D]. 南宁: 广西大学, 2001.
- [36] 李志平, 彭振斌, 肖尊群, 等. 含水率影响下尾矿砂内摩擦角随标贯击数变化研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1340-1344. (LI Zhiping, PENG Zhenbin, XIAO Zunqun, et al. Variation of internal friction angle of tailings with standard penetration number under influence of water content [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1340-1344. (in Chinese))
- [37] 张鹏伟, 吴辉, 胡黎明, 等. 铁矿尾矿料力学特性及坝体变形稳定性研究 [J]. 工程地质学报, 2015, 23(6): 1189-1195. (ZHANG Pengwei, WU Hui, HU Liming, et al. Mechanical characteristics of iron mine tailing materials and analysis on deformation and stability of tailing dam

- [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23 (6): 1189-1195. (in Chinese))
- [38] BEDIN J, SCHNAID F, DA FONSECA A V, et al. Gold tailings liquefaction under critical state soil mechanics [J]. Geotechnique, 2012, 62 (3): 263-267.
- [39] SCHNAID F, BEDIN J, DA FONSECA A V, et al. Stiffness and strength governing the static liquefaction of tailings [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139 (12): 2136-2144.
- [40] 张超, 杨春和, 白世伟. 尾矿料的动力特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27 (1): 35-40. (ZHANG Chao, YANG Chunhe, BAI Shiwei. Experimental study on dynamic characteristics tailings material [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (1): 35-40. (in Chinese))
- [41] 阮元成, 郭新. 饱和尾矿料静、动强度特性的试验研究 [J]. 水利学报, 2004, 35 (1): 67-73. (RUAN Yuancheng, GUO Xin. Experimental study on static and dynamic strength properties of saturated tailings [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35 (1): 67-73. (in Chinese))
- [42] 张志军, 李亚俊, 贺桂成, 等. 某尾矿坝毛细水带内的坝体材料物理力学特性研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35 (6): 1561-1568. (ZHANG Zhijun, LI Yajun, HE Guicheng, et al. Study of physico-mechanical properties of dam body materials in capillary water fringe of a certain tailings dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (6): 1561-1568. (in Chinese))
- [43] 李夕兵, 蒋卫东, 贺怀建. 尾矿堆积坝透镜体分布状态研究 [J]. 岩土力学, 2004, 25 (6): 947-949. (LI Xibing, JIANG Weidong, HE Huaijian. Study on distributing state of lenticle in tailings fill dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (6): 947-949. (in Chinese))
- [44] 张千贵, 尹光志, 周永昆, 等. 尾矿粗细颗粒分层结构体的力学特性分析 [J]. 重庆大学学报, 2012, 35 (5): 97-102. (ZHANG Qiangui, YIN Zhiguang, ZHOU Yongkun, et al. Analysis on mechanical characteristic of coarse and fine particles layered structure of tailing [J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35 (5): 97-102. (in Chinese))
- [45] HUNT B. Newtonian fluid mechanics treatment of debris flows and avalanches [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 120 (12): 1350-1363.
- [46] O'BRIEN J S, JULIEN P Y. Laboratory analysis of mudflow properties [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114 (8): 877-887.
- [47] IMRAN J, PARKER G, LOCAT J, et al. 1D numerical model of muddy subaqueous and subaerial debris flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127 (11): 959-968.
- [48] 蔡嗣经, 黄刚, 吴迪, 等. 尾砂充填料浆流变性能模型与试验研究 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2015, 36 (6): 882-886. (CAI Sijing, HUANG Gang, WU Di, et al. Experimental and modeling study on the rheological properties of tailings backfill [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36 (6): 882-886. (in Chinese))
- [49] 廖威林, 周小文. 尾矿砂流变特性及其对溃坝尾砂下泄影响研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11 (增刊1): 282-287. (LIAO Weilin, ZHOU Xiaowen. Study on the rheological characteristic of tailing slurry and its influence on tailing flow after dam-break [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11 (Supl): 282-287. (in Chinese))
- [50] 胡正红, 张婧, 刘兴年, 等. 泥石流浆体流变特性影响因素试验研究 [J]. 水力发电学报, 2014, 33 (2): 131-136. (HU Zhenghong, ZHANG Jing, LIU Xingnian, et al. Experimental study on rheological properties factors of debris flow slurry [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33 (2): 131-136. (in Chinese))
- [51] RICO M, BENITO G, DIEZ-HERRERO A. Floods from tailings dam failures [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154 (1): 79-87.
- [52] ZHANG J, GUO Z, CAO S, et al. Experimental study on scour and erosion of blocked dam [J]. Water Science and Engineering, 2012, 5 (2): 219-229.
- [53] 尹光志, 敬小非, 魏作安, 等. 尾矿坝溃坝相似模拟试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (增刊2): 3830-3838. (YIN Guangzhi, JING Xiaofei, WEI Zuoan, et al. Experimental study of similar simulation of tailings dam-break [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (Sup2): 3830-3838. (in Chinese))
- [54] 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 Xiaofei, YIN Guangzhi, WEI Zuoan, 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))
- [55] 王永强, 张继春. 基于相似试验的尾矿库溃坝泥石流预测分析 [J]. 中国安全科学学报, 2012, 22 (12): 70-75. (WANG Yongqiang, ZHANG Jichun. Tailings dam-break debris flow prediction analysis based on similar tests [J]. China Safety Science Journal, 2012, 22 (12): 70-75. (in Chinese))
- [56] 陈生水. 土石坝试验新技术研究与应用 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37 (1): 1-28. (CHEN Shengshui. Experimental techniques for earth and rockfill dams and their applications [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37 (1): 1-28. (in Chinese))
- [57] 张红武, 刘磊, 卜海磊, 等. 尾矿库溃坝模型设计及试验方法 [J]. 人民黄河, 2011, 33 (12): 1-5. (ZHANG Hongwu, LIU Lei, BU Hailei, et al. Test and design of tailings dam model [J]. Yellow River, 2011, 33 (12): 1-5. (in Chinese))
- [58] 陈生水. 尾矿库安全评价存在的问题与对策 [J]. 岩土

- 工程学报, 2016, 38 (10): 1869-1873. (CHEN Shengshui. Problems and countermeasures of safety evaluation of tailing pond [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38 (10): 1869-1873. (in Chinese))
- [59] 李全明, 李玲, 王云海, 等. 尾矿库溃坝淹没范围的定量计算方法研究 [J]. 中国安全科学学报, 2011, 21 (11): 92-96. (LI Quanming, LI Ling, WANG Yunhai, et al. Research on quantitative calculating method for tailing ponds submerged area in metal and nonmetal mines [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21 (11): 92-96. (in Chinese))
- [60] 胡凯衡, 崔鹏, 田密, 等. 泥石流动力学模型和数值模拟研究综述 [J]. 水利学报, 2012, 43 (增刊 2): 79-84. (HU Kaiheng, CUI Peng, TIAN Mi, et al. A review of the debris flow dynamic models and numerical simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43 (Sup2): 79-84. (in Chinese))
- [61] RICKENMANN D, LAIGLE D, MCARDELL B, et al. Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events [J]. Computational Geosciences, 2006, 10 (2): 241-264
- [62] 王纯祥, 白世伟, 江崎哲郎, 等. 泥石流的二维数学模型 [J]. 岩土力学, 2007, 28 (6): 1237-1241. (WANG Chunxiang, BAI Shiwei, ESAKI Tetsuro, et al. Two-dimensional mathematical model of debris flow [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (6): 1237-1241. (in Chinese))
- [63] 刘洋, 齐清兰, 张力霆. 尾矿库溃坝泥石流的演进过程及防护措施研究 [J]. 金属矿山, 2015 (12): 139-143. (LIU Yang, QI Qinglan, ZHANG Liting. Study on evolution of debris flow from dam break and protection measures [J]. Metal Mine, 2015 (12): 139-143. (in Chinese))
- [64] 皇甫凯龙, 廖文景, 孙志辉, 等. 尾矿坝溃决砂流数值模拟研究及应用 [J]. 中国安全科学学报, 2015, 25 (8): 171-176. (HUANGFU Kailong, LIAO Wenjing, SUN Zhihui, et al. Numerical simulation of sandy flow due to mine tailings dam failure and its application [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25 (8): 171-176. (in Chinese))
- [65] 梅国栋. 尾矿库溃坝机理及在线监测预警方法研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- [66] 赵一姝, 敬小非, 周筱, 等. 筋带对尾矿坝漫坝破坏过程阻滞作用试验研究 [J]. 中国安全科学学报, 2016, 26 (1): 94-99. (ZHAO Yishu, JING Xiaofei, ZHOU Xiao, et al. Experimental study on blocking action of bar strip on tailings dam overtopping [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26 (1): 94-99. (in Chinese))
- [67] 尹光志, 魏作安, 万玲, 等. 细粒尾矿堆坝加筋加固模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (6): 1030-1034. (YIN Guangzhi, WEI Zuoan, WAN Ling, et al. Test study on stability of fine grained tailings dam in geo-grid reinforcement situation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (6): 1030-1034. (in Chinese))
- [68] 李巧燕, 王惠栋, 马国伟, 等. 尾矿坝筑坝模袋力学性能试验研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (4): 957-964. (LI Qiaoyan, WANG Huidong, MA Guowei, et al. An experimental study of the mechanical performance of tailings dam geofabriform [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (4): 957-964. (in Chinese))
- [69] 张东明, 郑彬彬, 尹光志, 等. 高浓缩分级尾矿上游法堆坝及模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (7): 1832-1838. (ZHANG Dongming, ZHENG Binbin, YIN Guangzhi, et al. Model tests on upstream dam-building method using concentrated and classified tailings [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (7): 1832-1838. (in Chinese))
- [70] 刘洋, 齐清兰, 张力霆. 尾矿库溃坝泥石流的演进过程及防护措施研究 [J]. 金属矿山, 2015 (12): 139-143. (LIU Yang, QI Qinglan, ZHANG Liting. Study on evolution of debris flow from dam break and protection measures [J]. Metal Mine, 2015 (12): 139-143. (in Chinese))

(收稿日期: 2016 - 09 - 11 编辑: 熊水斌)

+++++
(上接第 35 页)

- [11] 黄云, 金峰, 王光纶, 等. 高拱坝上游坝踵裂缝稳定性及其扩展 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2002, 42 (4): 555-559. (WANG Yun, JING Feng, WANG Guanglun, et al. Stability and propagation of cracks at the heel of high arch dams [J]. Journal of Tsinghua University (Sciences and Technology), 2002, 42 (4): 555-559. (in Chinese))
- [12] 游茂源, 杜成斌, 陈玉泉, 等. 动载作用下的混凝土水力劈裂试验研究 [J]. 中州煤炭, 2016, 38 (5): 54-57. (YOU Maoyuan, DU Chengbin, CHEN Yuqian, et al. Experimental study on hydraulic fracturing of concrete under dynamic loading [J]. Zhongzhou Coal, 2016, 38 (5): 54-57. (in Chinese))
- [13] 甘磊. 水工混凝土结构水力劈裂试验及数值模拟 [D]. 南京: 河海大学, 2013.
- [14] 速宝玉, 谢兴华, 王国庆. 水泥砂浆水力劈裂试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (增刊 1): 2952-2957. (SU Baoyu, XIE Xinghua, WANG Guoqing. Hydraulic fracture test on cement and sand mortar [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (Sup1): 2952-2957. (in Chinese))
- [15] 方修君, 金峰. 裂隙水流与混凝土开裂相互作用的耦合模型 [J]. 水利学报, 2007, 38 (12): 1466-1474. (FANG Xiujun, JING Fen. Coupling model for interaction between fissure water and cracking in concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38 (12): 1466-1474. (in Chinese))

(收稿日期: 2016 - 08 - 19 编辑: 郑孝宇)