

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.01.015

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 Tian-long, CHEN Sheng-shui, ZHONG Qi-ming. Advances in studies of tailing dam break mechanism and process[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(1):105-111.)

尾矿坝溃决机理与溃坝过程研究进展

赵天龙, 陈生水, 钟启明

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 尾矿库是维持矿山生产的重要设施,同时也是矿山的重大危险源,开展尾矿坝溃决机理与溃坝过程研究对于提升我国尾矿库防灾减灾水平具有重要意义。分析比较了尾矿坝与挡水土石坝在溃决机理与溃坝致灾过程方面的区别和联系,总结了尾矿坝在坝体形式、填筑方式、坝料组成和溃决机制等方面的特点,对近年来我国在尾矿坝溃坝机理与溃坝致灾过程方面的研究工作进行了较为系统的总结,指出当前我国尾矿坝工程理论研究中存在的问题,并对该领域今后需深入开展的研究工作提出建议。

关键词: 尾矿坝; 溃决机理; 溃坝过程; 研究进展

中图分类号: TD926.4⁺1; TV144 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2015)01-0105-07

我国是矿业大国,矿业经济在国民经济中占有相当重要的比例。据不完全统计,我国年尾矿排放量已超过10亿t^[1],这些选矿产生的尾矿料大多需要兴建尾矿库储存。至2012年底,我国已拥有各类尾矿库12273座,随着我国矿山行业生产规模的不断扩大,这个数量还在逐年增加。

由于尾矿料复杂的工程力学特性及特殊的构筑和运行方式,尾矿坝具有比水库大坝更高的溃坝风险。N. Lemphers^[2]对世界范围内3500座尾矿坝进行了统计分析,发现其溃坝失事概率是水库大坝的10倍以上。我国尾矿库数量多、分布广,加之历史因素、管理与技术等方面的原因,是尾矿坝事故高发的国家之一。仅2005—2011年,我国共发生尾矿库安全生产事故(包括环境安全事件)70起,给人民生命财产及生态环境带来了巨大灾难,特别是山西襄汾“9·8”事故后,尾矿坝突出的安全问题受到公众更广泛地关注。至2012年底,我国仍有1223座危、险、病库尚未得到有效治理,而且,随着现有尾矿坝服役时间延长和新建尾矿坝数量的增长,加之近年来极端气候现象与地震灾害频发,病危险库的数量势必持续增加。深入研究尾矿坝的溃决机理与溃坝过程,对进一步提升尾矿库的灾害防治水平具有重大的理论及现实意义。

1 尾矿坝的特点

采用上游法构筑的尾矿坝一般由初期坝和多级后期子坝构成,初期透水坝一般为透水土石坝,后期子坝主要利用库内尾矿料填筑而成。目前,大多数学者将尾矿坝视为一种特殊的挡水土石坝,沿用土石坝的相关研究成果,对尾矿库溃坝机理及溃坝过程进行试验研究与计算分析,往往得出与实际不符的结论。事实上,尾矿坝与挡水土石坝相比具有明显差别,主要表现在以下几个方面:

(1) 尾矿坝的安全性与挡水土石坝相比普遍较低。我国90%以上的尾矿坝都采用上游式筑坝,上游式筑坝法工艺简单、管理方便,但存在子坝地基不均匀、排渗系统易淤堵导致坝内浸润线抬高,以及沉积尾矿料

收稿日期: 2014-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51109141, 51379129, 91215301)

作者简介: 赵天龙(1986-),男,山东淄博人,博士研究生,主要从事尾矿坝溃坝机理及数值模拟研究。

E-mail: Neo_3303@163.com

抗地震液化能力低、坝坡地震动力稳定性差等特点^[3-4]。S. Azam^[5]等对世界范围内 18 401 座矿山尾矿库进行调查发现,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^[6]2001 年公布的挡水坝约 0.01%的溃坝率。

(2)尾矿库内沉积尾矿料物理力学性质的时空变化规律更为复杂。土石坝坝体通常采用分区设计,同一分区内材料的级配、压实度和物理力学特性近乎一致,而尾矿库内沉积尾矿料是尾矿坝的重要组成部分,由于水力冲填尾矿料沉积过程的随机性,以及尾矿料复杂的固-液-气-化(学)耦合作用,使其物理力学性质的时空变化规律远比土石坝复杂^[7-8]。

(3)尾矿坝的溃决机理与挡水土石坝不尽相同。土石坝溃决溃口主要在漫顶水流冲刷作用下逐渐发展破坏,形成流量较大的溃坝洪水;而尾矿坝溃坝过程往往因排渗系统易淤堵、坝内浸润线抬高以及沉积尾矿料地震液化导致坝坡失稳,坝顶高程降低,漫顶尾矿料与水的混合物共同作用于溃口,破坏能力更强,溃口发展规律和溃口流量过程更复杂。

(4)尾矿坝溃决后的下泄物演进规律更为复杂。土石坝溃决后向下游河道排泄的流体主要是水(筑坝材料相对于库水的体积而言可以忽略);而尾矿坝溃决后的下泄物是水和尾矿料的混合物,具有二相流的性质,体现出较强的非牛顿流体特征,其下游演进、沿程侵蚀以及和构筑物的相互作用规律都比单纯考虑水流作用时要复杂得多^[9-10]。

2 尾矿坝溃坝机理模型试验研究

在尾矿库所有的事故类型中,溃坝危害最大,尾矿库溃决及其下泄物是造成次生灾害的主要原因。无论是排渗设施失效还是经历超限洪水或遭遇强震作用,尾矿库的大范围成灾都源于尾矿坝体的溃决。迄今为止,针对挡水土石坝的溃决机理与溃坝发展过程已开展了大量的模型试验研究,取得了一系列重要成果^[11-19],但有关尾矿坝溃坝机理与溃坝发展过程的模型试验研究才刚刚起步。

张红武等^[20]认为,开展尾矿坝溃坝模型试验,模型设计应当综合考虑水流重力相似、水流阻力相似、水流挟沙相似、尾矿料悬移相似、河床变形相似及尾矿料起动相似,同时建议了模型砂的选择及模型试验方法。张兴凯等^[21]以国内某尾矿库为工程背景,通过 1 组几何比尺 1:100 的溃坝模型试验,重点研究了漫顶溃坝发生时坝体位移、浸润线变化情况及溃坝演化过程,认为尾矿库洪水漫顶溃坝属于溢流侵蚀溃决型,如图 1(a),溃坝位移与坝体饱和程度有关,坝体浸润线越高,尾矿坝溃坝时滑动位移越大。陶东良^[22]首先通过 4 组预备试验对所用模型坝进行校正,发现浸润线位置、坝坡大小,模型砂级配以及模型坝体材料的密实度对坝体整体稳定性、溃坝后形态及溃坝洪水流量过程影响较大;随后他们通过 1 组几何比尺 1:100 的漫顶溃坝试验对溃坝破坏过程进行了较为详细的分析,试验中观察到尾矿库子坝漫顶溃坝发生后,下游坝坡首先在漫顶水流的冲刷作用下形成冲槽,随着子坝的不断冲刷溃决,最终在尾矿库初期坝形成溃口,初期坝下游坝坡溯源冲刷发展迅速,随后初期坝溃口在上游水流与尾矿料混合物的冲击下,其边坡发生间歇性垮塌,溃口急剧增大,尾矿库内剩余的尾矿料与水混合物沿溃口不断向下游输移。尹光志等^[23]开展了洪水水位条件下尾矿坝滑塌溃坝模型试验,重点研究了由坝体浸润线过高引发的滑坡溃坝模式,试验结果表明,坝体浸润线抬升速度明显小于库水位高度变化,坝体浸润线抬升过程中,坝坡水平方向总应力增量比垂直方向大,滑坡溃坝发生后,破坏首先发生在坝脚处,继而向上游发展,坝坡破坏呈现出典型的牵引式发展模式,如图 1(b),最终破坏的滑动面由多个弧形滑移面构成。郑欣等^[24]以某尾矿库为研究背景,开展了尾矿坝渗透破坏溃坝模型试验,发现尾矿料沉积分层对坝内浸润线的位置和形状影响较大,试验中观察到当库水位达到一定的高度时,坝体预留的渗透通道涌出清水,随后砂层出现小的砂沸点,开始涌出浑水,随着水头的不断增加,清水与浑水交替出现,但最终是靠近试验砂槽观察玻璃板一侧的坝体因接触冲刷被掏空并发生溃坝。

基于上述尾矿坝溃坝模型试验结果,可以发现:

(1)尾矿坝漫顶溃坝属于溢流侵蚀型。漫顶发生后,漫坝水流不断冲蚀下游坝坡并形成细的冲沟,坝顶溃口在上游水流与尾矿料混合物的冲击下,边坡发生间歇性垮塌,溃口急剧增大,尾矿库内尾矿料与水混合

物沿溃口不断向下游输移,随着冲刷作用的加剧,冲沟不断扩宽加深并向上游发展,导致溃口底部高程降低。另外需要指出的是,漫顶后首先发生溢流侵蚀破坏的位置可能出现在下游坝坡^[22]、坝脚^[23],也可能出现在坝顶并形成初始溃口。

(2)因浸润线过高导致的尾矿坝失稳溃坝属于逆向渐进型。当坝体浸润线过高时,在渗透压力作用下,首先在下游坝坡出现沼泽化甚至表面流,出逸水流将下游坝脚的尾矿料带走并形成小型滑塌,随后在渗透压力与渗流水联合作用下,滑塌逐渐向上游方向发展,坝坡破坏呈现出典型的牵引式发展模式,最终破坏的滑动面由多个弧形滑移面构成。

(3)尾矿库是否发生管涌破坏受放矿条件影响较大,若尾矿库采用集中放矿,容易导致坝体形成软弱坝壳,导致尾矿水外坡出渗,最终引发溃坝;而在均匀分散放矿的前提下,由于尾矿料级配较为均匀,由尾矿料构筑而成的子坝因管涌破坏而发生溃坝的可能性较小,子坝与河谷岸坡接触部位因接触冲刷而导致溃坝的可能性更大。

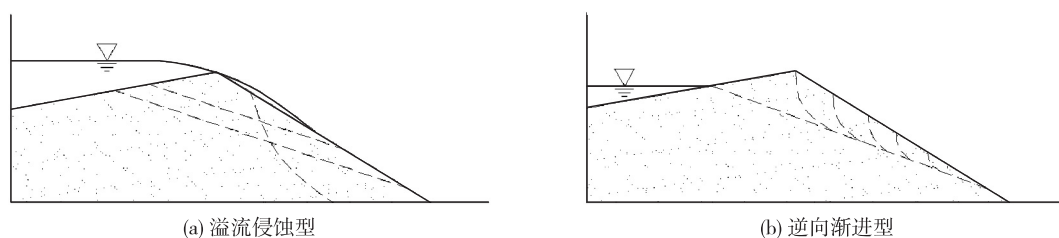


图1 尾矿坝溃决模式示意

Fig. 1 Tailing dam failure modes

3 溃坝下泄物流动特性及下游演进规律研究

尾矿坝溃坝致灾后果与其下泄物的流动特性及演进规律密切相关。为此,尹光志等^[25]利用自主研发的尾矿坝溃坝破坏模拟试验装置,通过对不同高度尾矿坝进行的溃坝模型试验研究发现:

(1)尾矿坝与普通水坝相比溃坝材料特性差异较大,水坝溃坝为黏性系数较小的水流,而尾矿坝溃坝下泄物流体黏性较大。

(2)与典型泥石流相比,尾矿坝溃坝下泄物粒径分布范围窄,颗粒级配较均匀,因此与泥石流的“阵流”相比,溃坝冲击力曲线相对“平缓”,不存在由较大石块撞击所产生的突变点(见图2和3),并且溃坝下泄物在流动过程中流量和水位相对稳定。

(3)尾矿坝的高度对下游淹没范围与深度影响明显,随着尾矿坝高度的不断增加,溃坝下泄物的冲击强度和最大淹没深度逐渐增加,且最大淹没深度与冲击距离呈正相关。

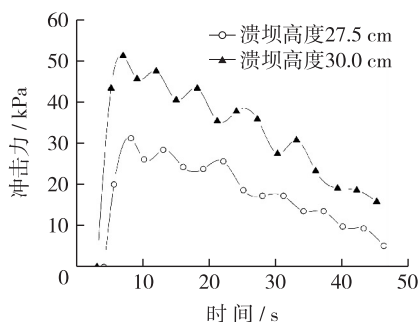


图2 尾矿库溃坝下泄物冲击力变化曲线

Fig. 2 Impact force diagram of dam break property

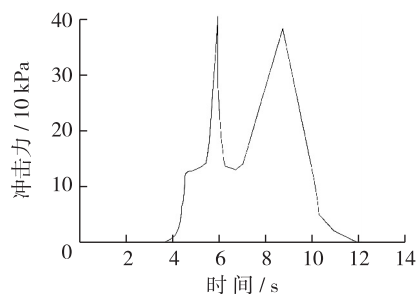


图3 泥石流冲击力脉冲图(尖峰型)

Fig. 3 Impact force pulse diagram of debris flow (spike type)

敬小非等^[26]通过对模型坝 1/4、1/2 及全部瞬时溃决 3 种情况进行模型试验,探讨了不同溃口形态下的溃坝下泄物流动特征,分析结果发现,溃口形态对溃坝下泄物的冲击力、淹没范围及演进规律影响较大,随着溃口逐渐加大,下泄物前锋到达同一断面以及峰值出现时间均缩短,且溃坝下泄物在同一断面处的冲击力随下泄物厚度的增加呈非线性增大趋势。王永强等^[27]以四川某尾矿库为研究背景,忽略溃坝过程对下泄物演进规律的影响,以一倾斜挡板代替模型坝来模拟堆积坝坡(图 4),通过溃坝试验专门研究了尾矿料与水混合物在下游沟谷的演进流动特性;试验发现,溃坝下泄物的冲击强度、厚度和流速 3 个参数在运动过程中快速达到峰值,但下泄物峰值流量到达时间受下游地形变化的影响较大,存在一定的先后顺序,峰值流量到达后 3 个参数随着演进距离的增长而不断减小,直至下泄物堆积稳定停止运动。值得指出的是,王永强通过试验所得淹没厚度变化曲线在达到峰值后没有立刻持续降低,而是在一定时间范围内保持周期性变化(图 5),其原因是所用尾矿料在试验过程中并未均匀下泄,而是存在持续的间歇性滑塌,导致了流量过程的非均匀性,使淹没厚度曲线在短时间内也呈现一定的周期性变化。王孟来等^[28]以云南某尾矿库为工程背景,通过尾矿坝溃坝模型试验,重点研究了尾矿坝坝高对下泄物淹没深度和冲击力强度的影响,发现溃坝下泄物流动过程中,淹没厚度和冲击力变化曲线迅速达到峰值后逐渐趋于平缓,后期出现明显拖尾现象,随着尾矿坝坝高的增加,溃坝下泄物淹没厚度及冲击力强度呈现整体增大趋势,且达到最大淹没厚度及冲击力峰值的时间也相应缩短。

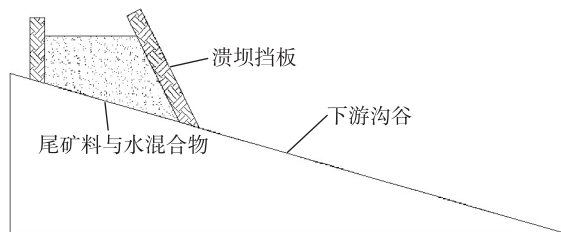


图 4 试验模型示意

Fig. 4 A test model

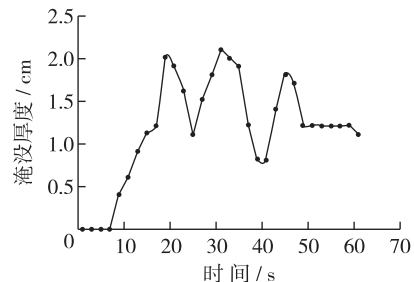


图 5 某断面淹没厚度曲线

Fig. 5 Mud depth in a certain section

总结近几年国内学者在尾矿坝溃坝下泄物流动特性和演进规律方面取得的研究成果不难看出,下泄物的冲击力强度、淹没厚度及下泄流速是定量评价尾矿坝溃坝致灾后果的 3 个重要参数,也是国内学者研究的重点,针对这 3 个参数,主要取得了以下认识:

(1) 尾矿坝溃坝发生后,溃坝下泄物冲击力在较短时间内达到峰值,之后随时间缓慢减小,时程变化曲线总体呈前陡后缓的趋势,与挡水土石坝漫顶溃口流量过程较为类似,不过曲线在单调区域内凹凸性略有不同,冲击力强度随溃口尺寸和溃坝高程的增加而增加,峰值处到达的时间则缩短。

(2) 下泄物淹没厚度在溃坝后同样很快达到峰值,随后持续减小,同一断面处淹没厚度随溃口尺寸和溃坝高程的增加而增加,另外,淹没厚度受下游地形影响较大,如下游弯沟地形处会出现明显的侧向爬升现象,在坡降突变区下游,坡降较缓的区域淹没厚度明显增大等,并且下游地形的变化会对下泄物产生不同程度的反射波,使得淹没深度曲线出现波动现象,但随着下泄物能量的减弱,波动幅值也逐渐衰减。

(3) 下泄物流速曲线在整个溃坝过程中同样呈现先增后减的总体趋势,但各研究断面流速过程因距坝址距离的不同而存在差异,离坝址较近的断面,流速过程表现为前陡后缓,随着距离的增加,峰值到达时间相应延长,流速过程逐渐变为前缓后陡,同一断面处下泄物流速随溃口尺寸和溃坝高程的增加而增加。

4 结 语

综上所述,近年来我国尾矿坝溃决机理与溃坝过程试验研究工作取得了相当的进展,为进一步提升我国

尾矿库的安全管理水平提供了有力技术支撑。但仍存在以下不足,主要表现为:

(1) 试验模型的尺度小,模型应力水平与原型差别过大,其试验结果能否真实反映尾矿坝的溃决机理与溃坝致灾过程尚需深入研究。

(2) 目前尾矿坝溃决机理与溃坝过程的研究工作主要集中在室内小尺度模型试验方面,关于尾矿坝溃坝致灾过程的模拟与评价理论、计算分析方法、计算机软件研制工作几乎还未涉及,急需加强。

针对上述问题,建议今后应着重开展以下几个方面的研究工作:

(1) 开展尾矿坝大尺度溃坝模型试验研究,进一步提升尾矿坝溃决机理与溃坝过程试验结果的可靠性。考虑到大尺度的野外溃坝模型试验成本高、风险控制困难等,建议利用已成功应用于土石坝溃坝机理与溃坝过程研究的溃坝离心模型试验系统^[18,29],深入研究尾矿坝在水流漫顶、排水系统淤堵引起库内浸润线抬高导致的渗透破坏和坝坡失稳、尾矿库料地震液化导致的坝坡失稳的几种主要致灾因子作用下的溃坝机理与溃坝过程,在此基础上,分别建立能合理模拟尾矿坝在不同致灾因子作用下溃坝全过程以及溃坝下泄物流量过程的溃坝数学模型,为溃坝下泄物下游演进致灾评价提供更为合理的初始数据。

(2) 联合应用大型水工模型试验和溃坝离心模型试验,深入研究不同致灾因子作用下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,建立能合理预测溃坝下泄物泛滥与破坏过程、最终覆盖范围与厚度的动力演进数学模型,为正确评价尾矿坝溃坝致灾后果提供科学理论。

(3) 研究提出不同致灾因子作用下尾矿坝溃坝数学模型、溃坝下泄物受灾区动力演进致灾数学模型的求解方法,构建能科学预测尾矿坝灾害发生、发展过程和致灾后果的具有自主知识产权的计算机软件,并在工程实践中对其验证与完善,为进一步提升我国尾矿库的安全管理水平,减轻或避免尾矿坝溃坝灾害损失提供有力的技术支撑。

参 考 文 献:

- [1] 梅国栋. 尾矿库溃坝灾害脆弱性评估指标体系及方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(12): 11-15. (MEI Guodong. Research on the dam-break hazard vulnerability assessment index system and methods of tailings pond [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(12): 11-15. (in Chinese))
- [2] LEMPHERS N. Could the Hungarian tailings dam tragedy happen in Alberta[Z]. 2010.
- [3] RICO M, BENITO G, SALGUEIRO A R, et al. Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(2): 846-852.
- [4] VANGULCK J F, ROWE R K. Evolution of clog formation with time in columns permeated with synthetic landfill leachate[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2004, 75(1): 115-139.
- [5] AZAM S, LI Q. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years[J]. Geotechnical News, 2010, 28(4): 50-54.
- [6] International Commission on Large Dams. Tailings dams: risk of dangerous occurrences: lessons learnt from practical experiences [M]. New York: United Nations Publications, 2001.
- [7] 卡梅什尼克 C C, 萨拉托夫 ИЕ, 房俭生. 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. (C C KAMEISHINIKE, CAPATOB ИЕ, FANG Jian-sheng. Discussion on the variation of alluvial mass density go along with time [J]. Foreign Metal Mining Magazine, 1989(1): 80-82. (in Chinese))
- [8] ROBERTSON A M, ENG P. The influence of depositional methods on the engineering properties of tailings deposits[C] // Int Conf on Mining and Industrial Waste Management. Johannesburg, South Africa, August, 1987.
- [9] 张力霆. 尾矿库溃坝研究综述[J]. 水利学报, 2013(5): 594-600. (ZHANG Li-ting. Summary on the dam-break of tailing pond [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013(5): 594-600. (in Chinese))
- [10] RICO M, BENITO G, DIEZ-HERRERO A. Floods from tailings dam failures[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1): 79-87.
- [11] MORRIS M W, HASSAN M, VASKINN K A. Conclusions and recommendations from the IMPACT project WP2: Breach formation[Z]. 2002.
- [12] MORRIS M W, HASSAN M A A M, VASKINN K A. Breach formation: field test and laboratory experiments[J]. Journal of

- Hydraulic Research, 2007, 45(Suppl1): 9-17.
- [13] HANSON G J, ROBINSON K M, COOK K R. Prediction of headcut migration using a deterministic approach[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(3): 525-531.
- [14] HANSON G J, COOK K R, HUNT S L. Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments [J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(5): 1783-1794.
- [15] HUNT S L, HANSON G J, COOK K R. Breach widening observations from earthen embankment tests[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(3): 1115-1120.
- [16] 张建云, 李云, 宣国祥, 等. 不同粘性均质土坝漫顶溃决实体试验研究[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(11): 1881-1886. (ZHANG Jian-yun, LI Yun, XUAN Guo-xiang, et al. Overtopping breaching of cohesive homogeneous earth dam with different cohesive strength [J]. Sci China(Tech Sci), 2009, 39(11): 1881-1886. (in Chinese))
- [17] 陈生水, 钟启明, 曹伟. 土石坝渗透破坏溃决机理及数值模拟[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2012, 42(6): 697-703. (CHEN Sheng-shui, ZHONG Qi-ming, CAO Wei. Breach mechanism and numerical simulation for seepage failure of earth-rock dams. [J]. Sci China (Tech Sci), 2012, 42(6): 697-703. (in Chinese))
- [18] 陈生水, 钟启明, 曹伟. 粘土心墙坝漫顶溃坝过程离心模型试验与数值模拟[J]. 水科学进展, 2011(5): 674-679. (CHEN Sheng-shui, ZHONG Qi-ming, CAO Wei. Centrifugal model test and numerical simulation of the breaching process of clay core dams due to overtopping [J]. Advances in Water Science, 2011(5): 674-679. (in Chinese))
- [19] 陈生水, 钟启明, 任强. 土石坝管涌破坏溃口发展数值模型研究[J]. 岩土工程学报, 2009(5): 653-657. (CHEN Sheng-shui, ZHONG Qi-ming, REN Qiang. Numerical study on break development due to piping failure for earth-rock dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009(5): 653-657. (in Chinese))
- [20] 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(12): 1-5. (ZHANG Hong-wu, LIU Lei, BU Hai-lei, et al. Test and design of tailings dam model [J]. Yellow River, 2011(12): 1-5. (in Chinese))
- [21] 张兴凯, 孙恩吉, 李仲学. 尾矿库洪水漫顶溃坝演化规律试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(7): 118-124. (ZHANG Xing-kai, SUN En-ji, LI Zhong-xue. Experimental study on evolution law of tailings dam flood overtopping[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(7): 118-124. (in Chinese))
- [22] 陶东良. 某钼矿尾矿库洪水溃坝模型试验研究[J]. 工程设计与研究, 2011(1): 18-24. (TAO Dong-liang. Experimental study on dam break model of a Mo Ores tailings pond [J]. Engineering Design and Research, 2011(1): 18-24. (in Chinese))
- [23] 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(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(5): 1377-1384. (in Chinese))
- [24] 郑欣, 亢永, 许开立, 等. 尾矿坝管涌的试验研究[J]. 工业安全与环保, 2013(6): 37-39. (ZHENG Xin, KANG Yong, XU Kai-li, et al. Experimental study on tailings dam piping [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2013(6): 37-39. (in Chinese))
- [25] 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(增2): 3830-3838. (YIN Guang-zhi, JING Xiao-fei, WEI Zuo-an, et al. Experimental study of similar simulation of tailings dam-break [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010(Suppl2): 3830-3838. (in Chinese))
- [26] 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))
- [27] 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(12): 70-75. (WANG Yong-qiang, ZHANG Ji-chun. Tailings dam-break debris flow prediction analysis based on similar tests [J]. China Safety Science Journal, 2012(12): 70-75. (in Chinese))
- [28] 王孟来, 李耀基, 李小双. 尾矿库溃后泥沙流流动特性研究[C]//中国采选技术十年回顾与展望——2012 中国矿业科技大会论文集, 北京:冶金工业出版社, 2012. (WANG Meng-lai, LI Yao-ji, LI Xiao-shuang. Study on flow characteristics of mud caused by tailings dam break[C]//Retrospect and Prospect on Acquisition and Technology of China in Past Ten years——China Mining Technology Proceeding' 2012, Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012. (in Chinese))
- [29] 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))

Advances in studies of tailing dam break mechanism and process

ZHAO Tian-long, CHEN Sheng-shui, ZHONG Qi-ming
(*Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: The tailing ponds in our country are not only great in quantity, but also distributed widely, and countless security and eco-environmental accidents caused by the tailing ponds not only make a serious threat to the national public security, but also restrict China's economic and social development in some ways. Therefore, studies of the mechanism and process of the tailing dam break would be of great significance to the disaster prevention and mitigation for the tailings ponds in China. In this paper, the difference and connection between the tailing dams and the water retaining dams in the mechanism and process of dam break are analyzed and compared, and the characteristics of the tailing dams are summarized in the aspects of dam body form filling ways, and dam material composition and failure mechanism, and the research achievements acquired in recent years are introduced systematically. Deficiency in research is also pointed out, and suggestions for further development in this research field proposed. In short, safety of the tailing dams is still a serious problem in China, and basic theoretical research is relatively weak. In view of the fact that mechanism of the tailing dam break is not clear and too many findings of earth-rock dam break are used in the analysis of the tailing dam break, it is necessary to carry out more experiments on the tailing dam break, so as to explore the mechanism of the break fundamentally.

Key words: tailing dam; failure mechanism; process of dam break hazard; advances in experimental research