

# 不同堆积密实度下尾矿库洪水漫顶溃坝的模型试验研究

党显璋<sup>1,2</sup>,高茂生<sup>1,2</sup>,张力霆<sup>3</sup>,汪小刚<sup>4</sup>,张少雄<sup>3</sup>

(1 自然资源部海洋环境地质重点实验室,中国地质调查局青岛海洋地质研究所,青岛 266071;

2 中国地质大学(武汉),武汉 430074;3 石家庄铁道大学,石家庄 050043;4 中国水利水电科学研究院,北京 100088)

**摘要:**以某尾矿库为原型,基于模型相似理论,在尾矿库溃坝模型平台上分别进行了松散状态、稍密状态、密实状态下 3 种不同堆积密实度的尾矿库洪水漫顶溃坝模型试验,研究尾矿库发生洪水漫顶后的溃决过程及机理,总结溃坝规律。结果表明,漫顶溃坝破坏的一般过程可归纳为 3 个阶段:细冲沟形成阶段、“陡坎”破坏导致溃口纵向发展阶段、崩塌导致的溃口横向发展阶段。通过分析 3 种堆坝密实度溃坝试验破坏关键点,得出提高尾矿坝堆积密实度能够有效延迟溃坝泥石流的形成时间,为下游居民撤离及制定相应的救援预案提供依据。

**关键词:**尾矿库;漫顶溃坝;模型试验;溃坝规律;防灾减灾

中图分类号:P736 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2018.09011

尾矿库溃坝的主要原因是洪水漫顶、排洪设施失效、坝体结构破坏,其中洪水漫顶是溃坝的主要原因<sup>[1-4]</sup>。洪水漫顶溃坝机理研究方面,美国学者基于对大量溃坝实例观察的基础,提出了一种新的土坝漫坝机理——“陡坎”冲刷<sup>[5-7]</sup>。Hancock<sup>[8]</sup>提出了流量、“陡坎”高度及土体材料参数与坝体被侵蚀速率之间的关系。魏勇和许开立<sup>[9]</sup>利用剪切应力(或牵引力)理论和“陡坎”冲刷模型研究了洪水漫顶后的坝面侵蚀和漫顶溃坝机理,提出了尾矿库溃坝破坏过程。模型试验研究方面,Chen 等<sup>[10]</sup>进行了 2 组室外大规模洪水漫顶破坏试验,试验结果表明单位流量越大溃口发展速度越快。张兴凯等<sup>[11]</sup>进行了尾矿库洪水漫顶溃坝

模型试验,发现尾矿库在洪水漫顶溃坝的过程中坝体位移与坝体饱和程度有关。刘磊等<sup>[12]</sup>通过进行尾矿库物理模型试验建立了尾矿库漫顶溃坝的洪水预测数学模型。赵一姝等<sup>[13]</sup>进行了加筋尾矿坝漫顶破坏模型试验,揭示了筋带在尾矿坝漫顶溃坝过程中的阻滞作用,得到了采取加筋措施能有效减轻尾矿库洪水漫顶破坏这一结论。对于尾矿库洪水漫顶溃坝的研究主要以模型试验为主,但大多未考虑复杂地形的影响,得到的试验结果往往不能全面的反映真实情况。现实中许多尾矿库运行中以稍密状态控制堆积密实度。目前并未见有关不同密实度尾矿库洪水漫顶方面的研究。本文依据模型相似理论,建立我国某尾矿库洪水漫顶溃坝三维模型试验,通过堆筑 3 种不同密实度的尾矿坝体进行试验,对比分析不同密实度工况下的坝体溃决过程和溃决模式,探求尾矿库洪水漫顶溃坝的溃决规律,为深入研究尾矿库洪水漫顶溃坝机理提供合理的科学参考。

收稿日期:2018-06-01

基金项目:科技部基础性工作专项(2014FY210600);中国地质调查项目“渤海湾西部等重点海岸带综合地质调查”(DD20160144)

作者简介:党显璋(1993—),男,在读博士,主要从事岩土工程的治理和防护工作。E-mail:841198962@qq.com

# 1 模型设计与制作

## 1.1 原型尾矿库概况

尾矿库区地处燕山山脉中北部,其西面、东面及南面三面环山,山坡较陡,属山谷型尾矿库。原型初期坝位于距沟口约 50 m 的位置,初期坝为透水型堆石坝,初期坝坝底标高为 626 m,最大坝高为 10.5 m,坝顶宽 1.2 m,顶长 61.6 m,外坡坡比约为 1 : 1.8,内坡坡比约 1 : 1.5,坝底宽 37.4 m。原型堆积坝外坡平均坡比为 1 : 1.87,堆积坝高 42.5 m。库内沉积滩南部设有收集尾矿水的集水坑,水位标高为 675 m,库内水位标高比坝顶标高低 1.1 m,沉积滩干滩长度约 35 m,沉积滩平均坡度约 2%。原型尾矿库总库容约为 40 万 m<sup>3</sup>,按《尾矿设施设计规范》(GB50863—2013)的规定,该尾矿库为四等库。

本文模型试验采用正态模型,模型与原型的几何比尺确定为 1 : 35。溃坝模型试验平台如图 1 所示,原型库区下部地形模型如图 2 所示。

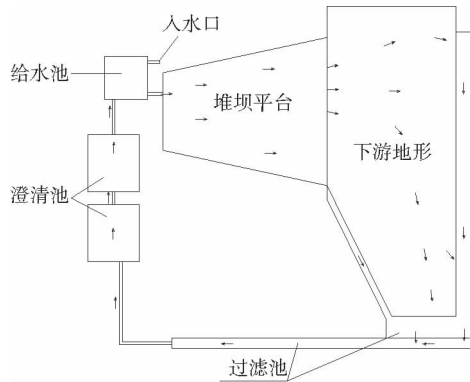


图 1 溃坝模型试验平台简图

Fig. 1 The experimental platform for dam break modeling

## 1.2 模型砂选取

尾矿库洪水漫顶溃坝模型试验的关键点之一就是模型砂的选取,其对于模型试验是否能够准确反映原型溃坝的机理与规律起着至关重要的作用。考虑到输砂率与缩尺效应等相似问题,原型尾矿砂不宜直接作为模型砂进行试验。模拟尾矿

砂的材料主要需要满足颗粒粒径级配、渗透性、强度性质等方面的相似与性质稳定。模型砂选取的方法为:根据沉降相似算出粒径比尺,并满足挟砂能力相似,以此来选取模型砂,然后用起动相似条件进行校核。查阅文献[14]后可知,本次试验的模型砂采用粉煤灰,其物理化学性质比较稳定。通过进行室内物理力学试验与泥砂起动流速试验后,发现拟采用的粉煤灰符合粒径比尺要求与起动流速相似条件,可作为模型砂进行溃坝模型试验。



图 2 库区下部地形模型

Fig. 2 The terrain model for the lower part of the reservoir area

# 2 尾矿库漫顶溃坝模型试验

## 2.1 试验概况

依据几何相似比尺,原型尾矿库的尺寸将相应的缩小 35 倍来建立模型。由试验需要,需堆筑 3 种密实度的堆积坝。第 1 种为松散状态,密实度控制为 0.19。其中第 2 种为稍密状态,密实度控制为 0.42。第 3 种为密实状态,密实度控制为 0.68。堆筑完成后的模型尾矿库如图 3 所示。本模型试验模拟的原型尾矿库已进入后期运行阶段,坝体内部有稳定的渗流场。为了更好的模拟实际情况,在每组试验开始前都往模型的沉积滩注水,使水向下渗透浸润坝体,直至初期坝有水渗出则认为已形成稳定的渗流场,之后按照设计的洪水过程线向模型库内注水,开始溃坝模型试验。

## 2.2 尾矿库漫顶溃坝规律

洪水漫顶对尾矿坝的破坏过程为逐渐破坏过

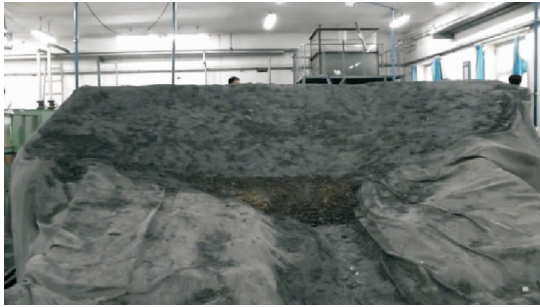


图 3 模型尾矿库

Fig. 3 The model of tailing pond

程,由于尾矿库的特殊性,破坏过程区别于一般的水坝等。通过 3 种不同密度下的溃坝试验,可以总结出尾矿库发生洪水漫顶溃坝的破坏过程一般可概括为 3 个主要阶段。

第 1 阶段,细冲沟形成阶段。当水流溢过堆积坝坝顶时,初期漫顶水流在坝坡坡面上会逐渐

形成一道或数道清水流,此时水流的含砂量较低,漫顶水流对坝体的作用主要表现为水流的剪切力。当水流内含砂量增高时,剪切力逐渐转变为含沙流的牵引力。随着水流流经部位的尾砂被挟走,堆积坝坝面形成一道细冲沟。

第 2 阶段,溃口以纵向发展为主的“陡坎”侵蚀阶段。细冲沟在水流的冲蚀作用下,其深度与宽度不断发展,并伴随初期坝少部分被冲毁。当细冲沟发展到一定程度时,由于水流平行于坡面的剪切力与动水压力作用下,一些类似阶梯状的小陡坎在坝面中下游出现,开始发生“陡坎”侵蚀。“陡坎”侵蚀是溃口纵向发展的主要模式。陡坎呈向上游溯源冲刷式发育,多级小陡坎会很快合并为少数大陡坎,如图 4~6,分别为 3 种堆积密度溃坝试验中出现的多级小“陡坎”发育现象。图 7~9 为 3 种堆积密度溃坝试验中出现的大“陡



图 4 松散状态

Fig. 4 Loose state



图 5 稍密状态

Fig. 5 Slightly dense state



图 6 密实状态

Fig. 6 Dense state



图 7 松散状态

Fig. 7 Loose state



图 8 稍密状态

Fig. 8 Slightly dense state



图 9 密实状态

Fig. 9 Dense state



坎”发育现象。“陡坎”侵蚀后期,细冲沟已发展为一道较深的沟壑,某些可冲刷至基岩。在这一阶段,随着坝顶处溃口宽度与深度的增加,溃坝洪水流量逐渐增加,大量初期坝石料被冲走损失,失去初期坝支撑的堆积坝坝脚将会出现崩塌,底部溃口宽度迅速扩大,此时溃口呈底部宽、中上逐渐变窄的倒“Y”状。

第3阶段,溃口以横向发展为主的两侧崩塌阶段。溃口的横向扩宽贯穿整个溃坝过程。在细冲沟发育阶段与“陡坎”侵蚀阶段,溃口的发展主要以纵向发展为主,横向扩宽的主要方式为水流

的冲刷侵蚀,横向扩展速度较慢。当多级小陡坎合并为少数大陡坎后,溃口深度迅速增长,原来的冲沟发展为一道较深的沟壑,两侧的土体在重力与水的侵蚀作用下发生滑动、崩塌,使沟壑两端不断展宽,伴随着坝顶溃口的崩塌,积水区得不到有效的拦挡,尾矿库内存水将大量汇集下泄,产生高势能的泥石流,极具危险性。此时溃口的纵向发展模式逐渐转变为横向扩展为主,直至溃坝结束,最终形成一道下宽上窄的梯形状溃口。如图10~12,分别为3种堆积密实度溃坝试验中出现的溃口崩塌现象。



图10 松散状态  
Fig. 10 Loose state

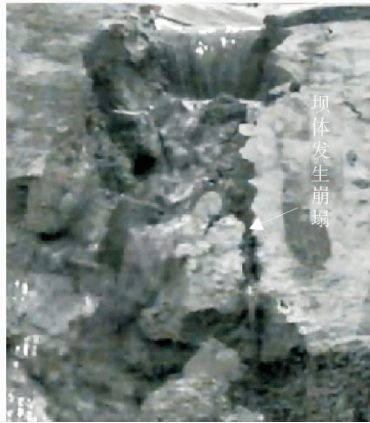


图11 稍密状态  
Fig. 11 Slightly dense state

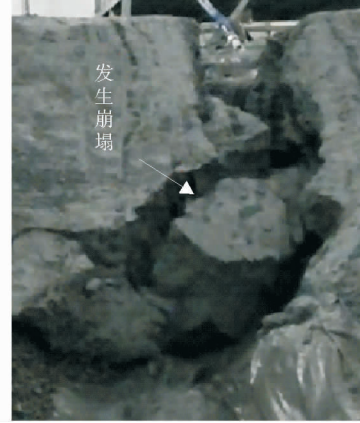


图12 密实状态  
Fig. 12 Dense state

表1为三组模型试验溃坝过程中关键点发生时刻表。由表1可知:

(1)在整个洪水过程中,从开始漫顶至尾矿坝完全失去挡水作用所占据的时间很短。第1组松散状态下的溃坝,至27 min时尾矿坝失去挡水作用,占洪水过程总时间的比重为10.38%;第2组稍密状态下的溃坝,至39 min时尾矿坝失去挡水作用,时间比重为15%;第3组密实状态下的溃坝,至69 min时尾矿坝失去挡水作用,时间比重提高到了26.54%。在尾矿坝失去挡水作用之前,其具有一定调蓄洪水能力,即能够截留一部分洪水在尾矿库内,一旦尾矿坝失去挡水作用,高势能的泥石流将汇集下泄,瞬时流量往往达到最大值,对尾矿库下游的生命财产造成严重破坏。因此,一旦漫顶溃坝发生,下游居民最迟须在尾矿坝完全失去挡水作

用之前撤离完毕。综上所述,必须严格控制尾矿坝的密实度,提高堆坝密实度可延长坝体抵御洪水的时间,更大程度的保护下游生命财产安全。

(2)假设从开始漫顶至尾矿坝完全失去挡水作用为撤离的最迟时间,在最迟时间内,三组溃坝试验中大陡坎出现所需时间的比重依次为:48.15%、51.28%、50.72%,大约占撤离最迟时间的一半。通过三组溃坝试验发现,大陡坎出现之前,洪水流量较小,表现为清水流;大陡坎出现之后,洪水流量增长速度显著变大,洪水含砂量逐渐增多。因此从开始漫顶至大陡坎形成这段时间里,必须组织下游居民紧急撤离疏散。大陡坎形成之后,溃坝泥石流对下游的威胁逐渐变大,有关部门应注意合理安排尾矿库溃坝防灾减灾工作。

表 1 溃坝过程关键点时刻表

Table 1 Timing of key points during dam break

时间/min	松散状态	中密状态	密实状态
0	开始漫顶	开始漫顶	开始漫顶
6	细冲沟开始发育并出现管涌现象	细冲沟开始发育	—
8	多级小陡坎出现	—	—
11	—	多级小陡坎出现	细冲沟开始发育
13	大陡坎出现	—	—
20	—	大陡坎出现	—
21	—	—	多级小陡坎出现
23	溃口纵向侵蚀结束,开始以横向 发展为主的边岸崩塌发展式	—	—
27	尾矿坝失去挡水作用	—	—
35	—	—	大陡坎出现
38	—	溃口纵向侵蚀结束,开始以横向发展 为主的边岸崩塌发展模式	—
39	溃口趋于稳定	尾矿坝失去挡水作用	—
62	—	溃口趋于稳定	溃口纵向侵蚀结束,开始以横向 发展为主的边岸崩塌发展模式
69	—	—	尾矿坝失去挡水作用
110	—	—	溃口趋于稳定

### 3 结论

(1)进行了洪水漫顶导致尾矿库溃决的模型试验,通过对 3 组不同密实度堆积坝的溃坝过程进行总结研究,分析了溃坝规律,得出溃口发展一般可分为 3 个阶段:细冲沟形成发育阶段、以“陡坎”侵蚀为主的纵向发展阶段、以边岸崩塌为主的横向发展阶段。

(2)通过对溃坝过程中各破坏关键点发生时间的分析,并结合试验现象,可以得出,发生洪水漫顶灾害后,尾矿坝较快的会失去挡水作用,在这之前下游群众应撤离完毕。在开始漫顶至大陡坎出现这段时间内,溃坝水流含沙量与流量都较小,下游群众撤离较为安全。需要指出的是较高密实度的尾矿坝不容易被破坏,各个破坏关键点发生时间都相对延后,尤其是大陡坎的较迟形成与失去挡水作用时间的延后,为下游群众的生命财产的安全撤离提供了更高的保障。

#### 参考文献:

[1] 杨丽红,李全明,程五一,等.国内外尾矿坝事故主要危险因

素的分析研究[J].中国安全生产科学技术,2008,4(5):28-31.

- [2] Strachan C. Tailings dam performance from US COD incident-survey data[J]. Mining Engineering, 2001, 53(3): 49-53.
- [3] 李兆庆,张孝仁.洪水漫顶的成因及抢护措施[J].河北农业科技,1980(4):25-26.
- [4] 柴贺军,刘汉超.岷江上游多级多期崩滑堵江事件初步研究[J].山地学报,2002(5):616-620.
- [5] Wahl T L. Prediction of Embankment Dam Breach Parameters: A Literature Review and Needs Assessment[R]. DSO-98-004, Dam Safety Research Report, U. S. Bureau of Reclamation, 1998.
- [6] Hanson G J, Temple D M, Cook K R. Dam overtopping resistance and breach processes research[C/CD]//Proceedings of the 1999 Annual Conference Association of State Dam Safety Officials, St. Louis, Mo, 1999.
- [7] Ralston D C. Mechanics of Embankment Erosion During Overflow[C]//Proceedings of the 1987 ASCE National Conference on Hydraulic Engineering. Williamsburg, Virginia: 1987:733-738.
- [8] Hancock G R. The use of landscape evolution models in mining rehabilitation design[J]. Environmental Geology, 2004,46(5): 578-583.
- [9] 魏 勇,许开立.尾矿坝漫顶溃坝机理及过程研究[J].金属矿山,2012(4):131-135.

- [10] Chen S C, Zheng Y F, Wang C A, et al. A large-scale test on overtopping failure of tow artificial dams in Taiwan [J]. *Engineering Geology for Society and Territory*, 2015, 2: 1177-1181.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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. doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20150749

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE MODEL OF FLOOD OVERTOPPING AND DAM BREAK OF A TAILING POND UNDER DIFFERENT DEPOSIT COMPACTNESS

DANG Xianzhang<sup>1,2</sup>, GAO Maosheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Liting<sup>3</sup>, WANG Xiaogang<sup>4</sup>, ZHANG Shaoxiong<sup>3</sup>

(1 Key Laboratory of Marine Environmental Geology, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of marine geology, CGS, Qingdao 266071, China; 2 China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

3 Shijianzhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 4 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100088, China)

**Abstract:** This paper takes a tailing pond as the prototype for modeling the effect of flood overtopping and dam break under different deposit compactness. Model similarity theory is adopted for the experimental researches under loose state, dense state, and solid state respectively with different compactness and densities to study the process and mechanism of tailings pond outburst by flood overtopping. Our results suggest that the general process of overtopping dam failure can be divided into three stages: the forming stage of fine gullies, the stage of trace erosion which leads to the vertical development of breaches, and the horizontal development stage of collapse. By analyzing the schedule of the key failure points of the three kinds of dam failure with different compactness, it is found that increasing the compactness of the deposits may effectively delay the formation time of debris flow in dam break. The modeling results are helpful for evacuation of downstream residents and making of corresponding rescue plans.

**Key words:** tailing pond; overflow dam; model test; dam break; disaster prevention and mitigation