

尾矿库漫顶溃决动态演化及溃口展宽模型试验

易富¹, 翟巍昆², 杜常博², 陶晗², 梁立东²

(1. 辽宁工程技术大学建筑与交通学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:为研究尾矿库漫顶溃决动态演化过程与溃口发展机理及规律,通过3组相似模型试验,对溃口展宽过程和演变机理进行了系统分析,提出了尾矿坝漫顶模式下溃口展宽速率的幂函数公式,并讨论了库水位上升阶段浸润线的变化过程及溃决阶段不同浸润线埋深条件下流速、流量、溃口宽度的变化过程。研究表明:尾矿坝的溃决过程可分为坝面漫流与冲沟形成、坝体崩塌与溃口快速扩张及稳定泄流3个阶段;浸润线埋深对流量、流速及溃口最终宽度有较大影响,排渗失效时峰值流量及溃口最终宽度接近正常排渗时的1.5倍,峰值流速可达1.2~1.3倍;降低浸润线高度可以延缓溃决泥石流到达下游的时间,紧急撤离时间也可延长3 min左右;提出的幂函数公式计算值与实测值吻合较好。

关键词:尾矿库;漫顶溃决;模型试验;演变机制;溃口展宽

中图分类号:TV122.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)03-0034-08

Dynamic evolution and breach spreading test for tailings pond overtopping failure//YI Fu¹, ZHAI Weikun², DU Changbo², TAO Han², LIANG Lidong²(1. College of Architecture and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: To investigate the dynamic process of tailings pond overtopping failure and the mechanism of breach development, three sets of comparable model tests were conducted to systematically analyze the process of breach spreading and the evolution of the breach. A power function formula of the breach spreading rate under overtopping failure mode was proposed. The process of infiltration line change during the reservoir water level rise stage and the change of flow velocity, flow rate, and breach width under different infiltration line depth conditions during the breaching stage was discussed. The results show that the breaching process of tailings dams can be subdivided into three stages, which are diffuse flow and gully formation, dam collapse and rapid expansion of the breach, and stable flow release. The depth of the infiltration line has a major impact on the flow rate, flow velocity, and the final width of the breach. The peak flow rate and the final width of the breach when the seepage fails are 1.5 times those of the normal discharge, and the peak flow velocity can be 1.2 to 1.3 times that of the normal discharge. Reducing the height of the infiltration line can delay the time for the debris flow reaching the downstream of the breached dam, which can extend the emergency evacuation time by about 3 min. The calculated values of the power function formula match the measured values well.

Key words: tailings pond; overtopping failure; model test; evolution mechanism; breach spreading

尾矿库作为一个高势能的人造泥石流危险源,一旦溃决,会对下游居民和设施安全造成严重的危害^[1-3]。由于尾矿库溃决的现场监测数据稀缺,只能通过有限的资料进行研究,因此开展相似模型试验研究尾矿库的溃决过程、分析溃口的发展机理与演化规律,对预测溃决过程中坝体溃口的水砂流量过程线十分重要,也对后续下游水砂演进及溃决预测结果的准确性有很大影响。

目前,尾矿库坝体的溃决过程与机理,尤其是溃

口演化机理尚不清晰,用解析计算与数值模拟方法预测的溃决结果很难与实际相符^[4-8],尤其是尾矿库溃决产生的“砂流”与通常水力溃决产生的水流有很大的不同,常用的溃口展宽模型不能很好地描述尾矿库溃决水砂流冲刷对溃口发展过程的影响。而且有关漫顶溃决的模型试验大多数尺寸较小,不能很好地反映三维效应,而基于相似模型理论的大尺度漫顶溃决模型相似比尺设计困难,增大模型尺度是减小比尺效应的有效方法,逐渐被许多学者认可

基金项目:辽宁省教育厅青年基金(LJKQZ2021153);辽宁省教育厅科学研究一般项目(LJ2020JCL037)

作者简介:易富(1978—),男,教授,博士,主要从事环境岩土工程研究。E-mail:yifu9716@163.com

通信作者:翟巍昆(1997—),男,硕士研究生,主要从事环境岩土工程研究。E-mail:928794891@qq.com

并进行了一系列研究。例如:刘磊等^[9]利用相似模型理论设计了尾矿库物理模型,并对下泄洪水的演化过程进行了观测;Qi等^[10-11]进行了排渗系统失效导致浸润线持续升高进而诱发溃决的物理试验,对排渗系统失效引起破坏的模式和现象进行了总结;尹光志等^[12]通过相似模型试验研究了尾矿坝溃决后泥石流流的演进规律和动力特性;Wang等^[13]通过模型试验分析了降雨情况下漫顶溃决的机理与降雨过程中浸润线的变化,结果表明降雨过程中浸润线受库水位变化影响明显;Yao等^[14]使用3种不同颗粒大小的尾矿进行物理试验,研究了尾矿颗粒大小对尾矿坝漫顶溃决的影响;Souza等^[15]使用膨润土建立物理模型对溃决破坏时尾矿的释放量进行了模拟;敬小非等^[16]对尾矿坝失稳破坏时的垮塌机制和溃决模式进行了研究。

漫顶溃决是一个动态灾变的过程。影响漫顶溃决的因素众多,各种因素相互作用对溃决结果影响很大,仅局限于对漫顶产生的溃决进行分析不足以完全表现溃决可能造成的后果与最终影响。根据最新统计数据,我国尾矿库中“头顶库”约占总量的14%,并且仍存在为数不少的病库、险库。浸润线过高是常见的尾矿库病害,且传统的上游式尾矿坝由于其排矿方式容易使细粒部分在坝前沉积并在坝内形成夹层,夹层渗透性很差,造成渗水在夹层间流动,渗流难以控制,最后导致浸润线偏高甚至逸出。浸润线作为尾矿库的“生命线”,不仅关乎坝体的稳定性及地震液化的风险,而且对漫顶溃决过程有巨大的影响,针对浸润线埋深状态对漫顶溃决影响的研究很少,因此研究不同浸润线埋深状态下的漫顶溃决对准确预测溃决后果十分重要。本文通过大型溃决相似模型试验,考虑溃决发生时浸润线埋深状态对溃决过程与结果的影响,分析溃口发展过程及其演化规律。

1 模型试验设计

1.1 相似模型布置

拟研究尾矿库场地地貌为山坡沟谷,属剥蚀残山夹沟谷地貌单元。沟谷断面呈窄深的V字形。沟道近似东北—西南走向。尾矿库初期坝轴线长525 m,顶宽25~115 m,底部宽600 m以上,坝高136.2 m,平均外坡比1:3.5。堆积坝坝轴线长600 m,坝高39 m,平均外坡比1:5,尾矿库总库容3 076万m³。制作完成的整体模型如图1所示,设计纵剖面图如图2所示。本次试验所模拟的实际地形投影面积为1 440 m×720 m。按照1:200的缩尺,在试验中所制作的物理模型投影面积为7.2 m×

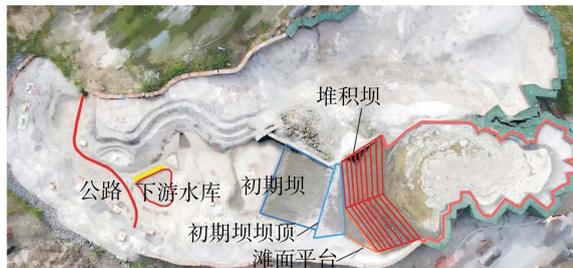


图1 无人机拍摄的试验模型全景

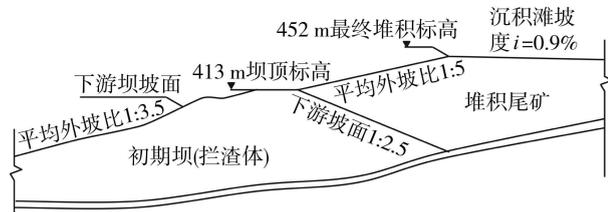


图2 模型设计纵剖面

3.6 m,包括尾矿库主体部分、下游沟道及下游范围内的地形和构筑物、蓄水池、降雨系统、尾水收集系统。库内沟道与下游地形均做成定床,用模型砂堆砌可冲刷的尾矿坝。

利用高清摄像机和无人机在不同点位、视角对试验过程进行全程详细记录。在试验时,将示踪颗粒均匀撒布在水流表面并使其跟随水砂流运动,再结合断面形态资料,即可求出表面流速;在库内设立水位尺观察水位变动来计算溃决流量;模型降雨系统采用雾化喷头,通过变频水泵与阀门调控;浸润线监测装置如图3所示,J1~J4为堆积坝中线处各孔隙水压计埋设位置,浸润线即自由水位线,是通过孔隙水压计数据转化为压力水头,与位置水头相加求出总水头得到。

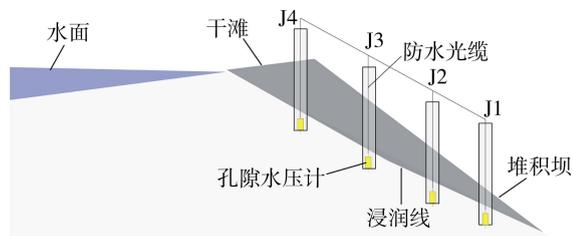


图3 浸润线监测示意图

1.2 模型试验相似条件

尾矿库溃决过程包含坝体侵蚀、水砂流汇集及流动过程,应该力求进行正态模型试验。大尺度溃决模型比尺设计的关键在于满足溃决的相似性,由于尾矿库溃决过程复杂,涉及水流侵蚀、坝体失稳、水砂流演进等,与之相关的许多相似关系往往不相容,无法做到完全相似。因此,只能集中在某些方面,取部分相似^[17],将尾矿库溃决后出现的现象按空间分割,各部分由各自的物理法则来支配,从而使相似法则放宽,在技术上进行简化。本次研究主要

关注漫顶溃决时溃口的展宽过程,在相似性方面重点考虑原型砂与模型砂的水流侵蚀能力相似、坝体冲蚀变形相似,包括满足原型滑塌位移的突发性,而对于水砂流的运动特性则适当放宽,满足起动流速相似条件即可。

考虑堆坝过程不是自然堆积,尾砂不能看作单个颗粒,需将尾砂筑坝后的粒径换算成为当量粒径。根据毛祖熙^[18]对各种土质抗冲等效粒径的研究,对于一般土体换算到碾压压实状态下当量粒径可扩大2~4倍,原型砂 $d_{50}=0.075\text{ mm}$,按扩大3倍取 0.225 mm 。

模型砂的最终配比是在保证满足模型试验相似准则的条件后进行反演确定的,其比重大约为1.9,原型砂比重大约为2.76,得到容重比尺为1.45;确定起动流速时,模型砂在试验初期通过小水深起动试验得到相应起动流速 $0.06\sim 0.08\text{ m/s}$,原型砂则需考虑当量粒径概念,由于无法配置当量粒径下的原型砂,因而通过参考文献^[19]及《水利计算手册》^[20],计算得到考虑当量粒径后的起动流速为 $0.74\sim 0.84\text{ m/s}$,从而求得计算起动流速比尺 $\lambda_{vc}=10.5\sim 13.2$,与流速比尺接近,表明所选模型砂近似满足起动流速相似条件。表1为获得的主要比尺。

表1 尾矿库溃决模型比尺

相似条件	比尺名称	数值	比尺确定方式
几何相似	水平比尺 λ_L	200	根据场地大小和研究范围确定
	垂直比尺 λ_H	200	正态模型: $\lambda_L=\lambda_H$
	面积比尺 λ_A	4万	$\lambda_A=\lambda_L^2$
	体积比尺 λ_V	800万	$\lambda_V=\lambda_L^3$
时间相似	时间比尺 λ_t	14	$\lambda_t=\lambda_L/\lambda_V$
	流速比尺 λ_v	14	$\lambda_v=\sqrt{\lambda_H}$
	流量比尺 λ_Q	56万	$\lambda_Q=\lambda_v\lambda_H\lambda_L$
运动相似	容重比尺 λ_γ	1.45	由原型尾砂和模型砂参数计算得到
	粒径相似比尺 λ_D	5.6	由原型尾砂和模型砂参数计算得到
	起动流速相似比尺 λ_v'	14	水槽试验确定

1.3 模型试验材料

模型砂的选取涉及水力侵蚀相似和岩土力学性质相似等多个科学问题,关系着尾矿库溃决试验效果,要求模型材料与原型材料在主要的物理、力学性质方面有较好的相似性^[17]。经过初步研究,选择细粒尾砂参加膨胀珍珠岩按一定配比组成的复合砂作为本次物理模型试验的模型砂,所选珍珠岩密度 200 kg/m^3 ,之后经过一系列推敲与研究最终确定了细粒尾砂与膨胀珍珠岩配比为1.5:1(体积比尺)的复合模型砂。

复合砂原料具有以下优点:膨胀珍珠岩起动流速小,易满足起动流速相似条件,物理化学性质稳定,并且还具有较强的吸附性,与其他材料的结合性

良好;细粒尾砂化学性质稳定且与筑坝使用的材料同源,物理力学性质相似,所以在变形、强度方面的性质与原型相似程度极高。复合砂原料的缺点:膨胀珍珠岩材料吸水率高,耐水性差,在同其他材料掺混过程中体积收缩变形较大;细粒尾砂则需要进行严格的分级处理。

试验准备过程中,通过对模型砂原料的粒径大小进行分类,将不同粒径含量的材料通过配比,得到与原型砂颗粒级配相似的试验材料。将模型砂的不均匀系数控制在要求的范围内,得到符合要求的模型砂。原型砂、模型砂及珍珠岩的颗粒级配曲线如图4所示。

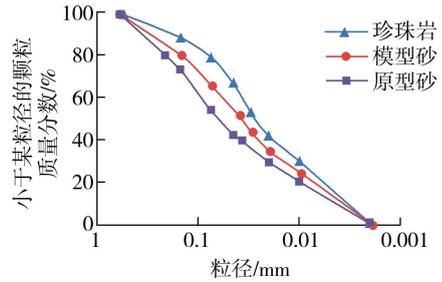


图4 尾砂颗粒级配曲线

试验所用的尾矿砂取自原尾矿库内,按照粒径相似的原则,通过粒径筛分后获取。原型砂与模型砂的物理力学性质参数具体见表2。从原型砂和模型砂的直剪试验结果来看,两者内摩擦角及黏聚力数值相差不大,说明所选模型砂力学特性同原型砂相近,可以保证两者溃口处滑塌位移的相似性。

表2 材料物理力学性质

材料	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	渗透系数/ ($10^{-4}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/($^\circ$)
原型砂	2.76	5.50	8.20	26.5
模型砂	1.90	4.72	8.43	26.9

1.4 模型试验方案

本试验主要关注流量和流速变化过程、泥石流形成时间等,对坝体主要观测溃决过程中尾矿坝溃口形态变化,忽略坝体分层,堆筑均质坝进行试验。模型尾矿坝筑坝时首先将模型砂烘干,控制含水率相同,之后通过称量所需模型砂的总质量来控制模型坝体的压实度,修筑时分4层压实,每层压实应保持压实次数一致,并且每次完成后进行刮毛处理,直到达到指定高度。当均质坝修筑完成后,清理现场,架设好试验所需仪器,通过排渗管个数来控制排渗效果,使达到漫顶条件时浸润线处在不同的高度。

尾矿坝浸润线状态为本次研究的关键性因素,影响浸润线状态的因素主要有排渗条件、尾矿沉积层的各向异性、库区边界条件。一般地,各向异性对上游式尾矿坝的影响比其他因素的影响小,而且筑

坝时采用的是均质坝,溃决时溃口靠近中间监测点位置,对于溃口部位的浸润线的数据还是比较准确的,这一干扰可以忽略。库区全库包括初期坝上游坡都铺设了防渗膜,因此可以只通过排渗设施来达到控制浸润线的目的。

对于降雨前浸润线埋深条件的控制,试验中先在测压管入口端做好防砂网并保证管内水体流通,并通过水准仪测定测压管基准高程。之后开放供水系统向库内排水,一段时间后观察水压计确保工作正常后,按照试验方案开闭排渗管蓄水 50 min,测量 3 组试验中溃决前浸润线埋深区别明显,认为可以满足控制条件。

通过设计 3 组漫顶开始时处在不同浸润线埋深下的尾矿库漫顶溃决试验方案,观测尾矿库在发生漫顶溃决后溃口的展宽发展过程,分析浸润线埋深对漫顶溃决全过程的影响规律;研究尾矿库漫顶溃决的动态灾变过程,确定尾矿库溃决溃口演化的机制,具体试验方案见表 3。

表 3 模型试验方案

组次	沉积滩坡比	平均外坡比	总坝高/m	排渗情况	J4 浸润线埋深/m
1	1 : 100	1 : 5	175.2	排渗失效	23.4
2	1 : 100	1 : 5	175.2	1 条排渗管	32.8
3	1 : 100	1 : 5	175.2	2 条排渗管	39.6

注:总坝高和浸润线埋深均经过换算。

2 漫顶溃决过程及溃口演变机制

2.1 尾矿坝溃决过程与阶段划分

根据漫顶溃决过程中溃口几何形状变化与水砂流流量突变情况,将其溃决过程定性划分为 3 个阶段:

a. 坝面漫流与冲沟形成阶段。在降雨引起的库水位上升期,由于雨滴对坝体表面的溅蚀和片蚀,

尾矿坝表面形成了鳞片状波纹沟网。伴随着降雨过程的进行,尾矿库水位不断抬升,当库内水位高于坝顶高程后,水流开始漫溢,由于初始下泄流量较小,库内水位几乎没有下降。漫顶水流下切侵蚀形成初始溃口,初始溃口过流能力不足导致坝顶出现多个溢水点,溢流在坝坡面呈现出多条相似的顺直细窄水流,整体呈梳齿状排列(图 5(a));下泄水流持续增强并且连续冲蚀坝坡面,坝坡表面被水流冲蚀形成数条冲沟,之后溃口逐渐展宽加深,正对主流的优势溃口开始形成,诸多溃口逐渐出现分流不均的情况,优势溃口被水流冲刷逐渐形成一条稳定的冲沟,之后坝体溃口基本形成,其他溢水点停止出水,水流回缩至坝体沟谷内;多级阶梯状陡坎形成,水位落差使水流加速下切,冲沟不断加深,阶梯状陡坎逐渐合并成两级陡坎,溃口冲沟内水流流速增大,由于冲沟此时过流量较大,水流挟砂能力强,优势沟不断横向展宽,溯源冲刷使溃口逐渐展宽上延(图 5(b))。

b. 坝体崩塌与溃口快速扩张阶段。冲沟内水流流速增大,水流挟砂能力增强,对冲沟侧向坝体的侵蚀能力也增强,陡坎向上移动直至消失,由于此时冲沟深度较大而水深较小,溃口侧壁底部被不断侵蚀,溃口两侧坝体形成临空结构,沿临空面在重力作用下出现崩塌(图 5(c)(d));随着洪峰来临,溃决发展剧烈,随后坝面又发生多次崩塌,溃口横向展宽速率加快,此时尾矿库堆积坝的溃决已经到最危险的时刻,随着溃口扩张到来的是溃决水砂流引起的洪峰。坝体下游冲积扇扩大,开始向两边和上游延伸,溃口此时呈现上游窄、下游宽的不规则梯形;随着洪峰过去,坝面坍塌大幅减少,坝体局部仍有少量崩塌,重力侵蚀造成的崩塌已经不能完全被水砂流冲走,反而对水砂流有一定的阻碍作用,冲沟的下切冲刷还在继续,冲沟陡坎完全消失,沟道底部形成一



(a) 梳齿状漫溢水流



(b) 陡坎形成



(c) 第一次崩塌前



(d) 第一次崩塌后



(e) 溃口扩展完成



(f) 稳定泄流阶段

图 5 尾矿坝溃决过程

条缓坡,水砂流冲刷土体能力与土体抵抗冲刷能力相当,溃口保持相对稳定(图 5(e))。

c. 稳定泄流阶段。冲沟及库内的水深显著减小,流量大幅减小且流速降低,导致挟砂能力也随之减弱,溃口已经停止扩展,水流对溃口上游侧与下游侧土体的冲刷能力将逐渐变弱,冲沟内接近清水下泄,冲沟断面尺寸不再变化(图 5(f))。稳定泄流阶段溃口整体几乎没有变化,但库内的溯源冲刷还在继续,至溃决完成后库区内的溯源冲刷正对溃口,冲沟与溃决时主流方向一致。

2.2 尾矿坝溃口演变机制

尾矿坝漫顶溃口发展的过程主要由水砂流剪切与陡坎侵蚀、过顶流侵蚀与溃口边坡失稳间歇性崩塌组成^[21-23],溃口不同发展阶段主导溃口发展的因素不同。坝体漫顶初期,溢出水流首先对坝顶产生破坏,出现初始溃口,溃口具有一定的束水作用,会造成水流流速和对坝面的剪切力的增加,而坝面由于水流侵蚀,从坝顶至坝脚形成一条冲沟。此时溃口的扩展主要是过顶流对坝面的侵蚀,之后水流不断冲刷冲沟侧壁,导致溃口缓慢扩张,这一过程中水流对溃口的侵蚀可以称为表层冲刷;随着溃口发展,溃口的水位也开始下降,由于陡坎侵蚀作用,溃口纵向下切侵蚀速度较快,此时水砂流无法侵蚀溃口上端,而溃口侧壁的底部由于水砂流的侵蚀逐渐被掏空,在上部形成一个临空结构,随水砂流的不断侵蚀最后崩塌。崩塌展宽机制如图 6 所示。

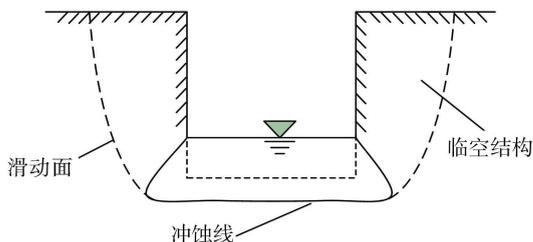


图 6 尾矿库崩塌展宽机制

溃口纵向发展是水砂流剪切力与陡坎侵蚀共同作用的结果,陡坎的产生是由于水砂流向下冲击床面,产生正向水砂流与反向旋流,旋流在阶梯断面上施加剪应力,冲刷掏蚀跌水面,使得陡坎下跌高度在溃决过程中逐渐增大,反向旋流使阶梯状陡坎逐渐合并,之后向上游掏蚀使陡坎逐渐上移,最终陡坎消失,冲沟底部形成一条缓坡。陡坎侵蚀机制如图 7 所示。

3 漫顶溃决动态演化过程

3.1 库水位上升阶段浸润线变化过程

在模型坝蓄水阶段,从蓄水 50 min 后开始记录浸润线变化,其中 J4 位置浸润线变化过程如图 8 所示。浸润线高度随库水位上涨呈上升趋势。初期坝

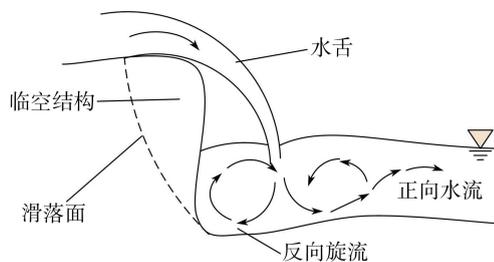


图 7 陡坎侵蚀机制

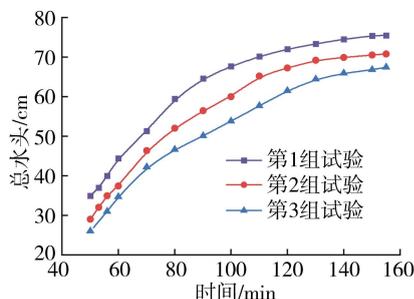


图 8 浸润线变化过程

体处于非饱和状态,土体基质吸力大,浸润线上升速度较快;中后期坝体饱和度增加,基质吸力降低,浸润线上升的速度逐渐减缓,直到趋近于一个稳定值。对比 3 组试验来看,排渗效果越好,浸润线上升越慢,且达到漫顶时浸润线埋深越深。

3.2 溃决阶段溃口流量和流速变化过程

试验过程中溃口流量与流速变化过程如图 9 所示。由图可知,第 1 组试验尾矿坝溃口土体出现坍塌前下泄水砂流量约为 $500 \text{ m}^3/\text{s}$,之后溃口流量随时间不断增加,到达峰值持续一段时间,此时峰值水砂流量为 $3200 \sim 3300 \text{ m}^3/\text{s}$,峰值流速约为 12 m/s 。第 2,3 组试验的流量及流速变化过程基本与第 1 组类似,其中第 2 组试验的峰值水砂流量为 $2568.21 \text{ m}^3/\text{s}$,峰值流速为 10.08 m/s ;第 3 组试验的峰值水砂流量为 $2211.83 \text{ m}^3/\text{s}$,峰值流速为 9.52 m/s 。

进一步分析可以得出,随着溃口发展,溃口下泄水砂流量增长迅速,达到峰值持续一段时间后减小;流速也逐渐增大,但增大速率逐渐减小,洪峰过后流速逐渐减小;第 1 组试验排渗失效时峰值流量及溃口最终宽度接近第 3 组试验正常排渗时的 1.5 倍,峰值流速可达 1.2 ~ 1.3 倍。

3.3 溃口展宽过程

图 10 为 3 组试验溃口展宽的整体发展趋势,无论是从溃口的上部宽度还是下部宽度都可以看出侵蚀率存在由弱变强再变弱的变化过程,在总宽度上表现得更为明显。这与溃决下泄流量有直接关系。由于溃决初期流量增长迅速,第一个阶段持续时间很短,在峰值流量到达前后溃口的侵蚀率则一直处于较强的状态,而当峰值过去,流量回落,侵蚀率也

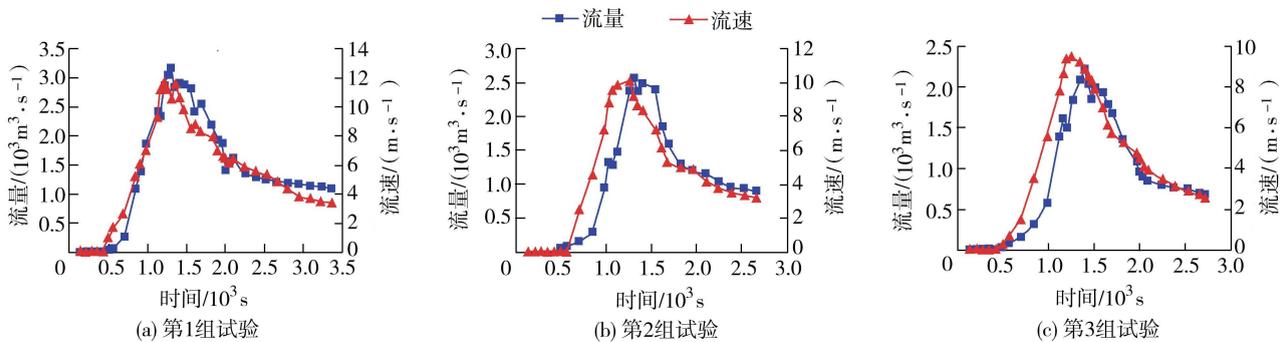


图9 溃口流量与流速变化过程

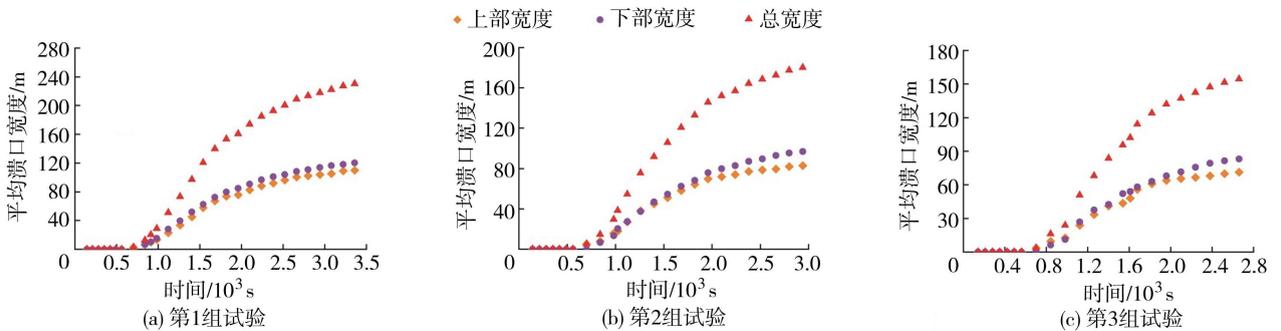


图10 尾矿库溃口宽度变化过程

同样减弱。第1组试验历时3360s,溃口展宽至230m左右,平均展宽速率0.0685m/s;第2组试验历时2940s,溃口展宽至180m左右,平均展宽速率0.0612m/s;第3组试验历时2660s,溃口展宽至154m左右,平均展宽速率0.0578m/s。

观察试验中溃口展宽过程,发现溃决完成后溃口下部宽度较上部稍宽,坝体上部比下部更早停止发展。浸润线埋深同样对坝体溃口宽度有显著影响,浸润线埋深越小,溃决完成后溃口的宽度越大,溃口完成展宽过程所需的时间更长,且平均展宽速率更大。

3.4 溃决关键时间节点

3组不同浸润线埋深的尾矿坝在漫顶破坏过程中的部分关键时间节点见表4,可以看出浸润线越高,坝体的稳定性越差,初次崩塌和峰值流量出现得越快,溃决持续时间也越长,表明浸润线埋深对溃决泥石流灾害形成的时间有较大影响。降低浸润线可以提高坝体稳定性,延缓溃决泥石流到达的时间,能够增加3min左右的紧急撤离时间,有利于下游群众财产的转移,降低造成的损失。

表4 溃决破坏过程部分关键时间节点

溃决过程	开始时间/min		
	第1组试验	第2组试验	第3组试验
开始漫顶	9.3	9.3	9.3
细冲沟开始发育	12.0	12.0	14.8
尾矿坝初次崩塌	15.0	16.3	18.0
达到峰值流量	19.0	20.8	23.0
进入泄流阶段	43.3	38.3	33.0

4 水砂流冲刷溃口展宽计算公式及验证

溃决演变过程中无论是溃口的纵向下切还是横向展宽,本质上都是水流侵蚀力与坝体材料重力、黏聚力等相互作用的结果^[24]。本文将水流对坝体的侵蚀推广到尾矿库溃决形成的高含砂水流对坝体的侵蚀,修正系数后, Δt 时间内水砂流对尾矿坝的冲刷宽度 ΔE 可表示为

$$\Delta E = K_d (\tau - \tau_c)^\xi \Delta t \quad (1)$$

式中: τ 为水流切应力,Pa; τ_c 为材料起动切应力,Pa; K_d 为冲蚀系数; ξ 为泥沙指数。

为了更直观地研究溃口展宽,本文选择对主要作用力进行分析,根据曼宁公式可知,水流流速的变化对剪应力起主要作用,通过引入宏观物理量来说明侵蚀现象。以溃口水砂流的断面平均流速代表水砂流横向冲刷坝身土体的强度,以土体的起动流速代表土体抵抗水砂流冲刷的能力,提出 Δt 时间内尾矿坝横向展宽宽度 ΔW 及展宽速率 ε 的计算关系式:

$$\Delta W = \eta (\bar{v} - v_c)^\beta \Delta t \quad (2)$$

$$\varepsilon = \eta (\bar{v} - v_c)^\beta \quad (3)$$

式中: β 为待定系数; η 为待定的冲蚀系数,与颗粒的级配、含水率、干密度、凝聚力等土体抗冲刷特征参数有关,不同土体的冲刷系数不同; \bar{v} 为水砂流的垂向平均流速,m/s; v_c 为土体的起动流速,m/s。

试验表明主导溃口展宽与决定最终溃口宽度的主要时期为溃决中后期。尾矿坝溃决初期库内水位

几乎无变化,横向展宽主要是由于过顶流的侵蚀;在溃决中后期,横向边坡失稳崩塌是溃口扩展的主导因素,崩塌过程主要表现为水砂流对下层土体的侵蚀,引发上层土体发生崩塌,可认为是由水砂流冲刷主导的展宽过程,展宽速率为 $8.0 \times 10^{-3} \sim 45 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 。本试验的溃口流速较大,流速为 $4.0 \sim 12.0 \text{ m/s}$,水砂流侵蚀能力较强,且测量的溃口展宽速率包含水砂流横向冲刷与土体崩塌过程,故溃口的展宽速率较快。

图 11 为 ε 与 $\bar{v}-v_c$ 的关系曲线,可见饱和状态下溃口的横向展宽速率的幂函数关系式为 $\varepsilon = 2.045 \times 10^{-3} (\bar{v}-v_c)^{1.269}$, $R^2 = 0.943$ 。可以看出溃口处垂线平均流速与起动流速的差值越大,受水砂流横向冲刷坝体的强度越大,溃口的展宽速率也越大。

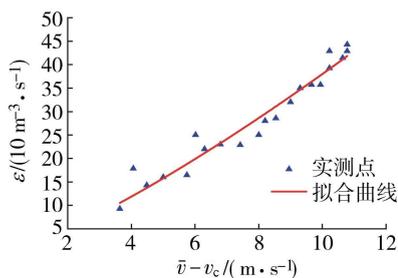


图 11 ε 与 $\bar{v}-v_c$ 的关系曲线

利用拟合关系式验证第 1~3 组试验溃口宽度变化情况,结果如图 12 所示。选择溃口发展的中后段验证拟合关系,总体来看,由于溃口的中间展宽过程坝体崩塌较剧烈,溃决中期计算值与实测值有一定偏差,但最终溃口宽度基本相当。

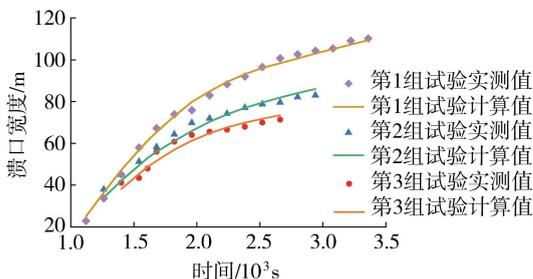


图 12 计算与实测溃口宽度比较

Jing 等^[25]通过水槽试验建立了考虑加固层数的尾矿坝溃口宽度预测数学公式,取加固层数为 0 的情况下代入试验数据,将其与实测数据和本文公式计算值对比。根据本文公式和文献[25]公式模拟的溃决后果如图 13 所示。

由图 12 可以得出浸润线埋深对溃口展宽有较大的影响,且溃决发生时坝体浸润线通常都处于很高的位置,因此采用本文公式对尾矿库漫顶溃决溃口宽度预测结果更好。综上所述,本文基于相似模型试验建立的尾矿坝溃口宽度计算公式,在溃决过程溃口宽度的变化和最终结果上与实测数据吻合较

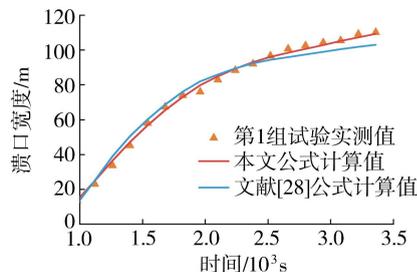


图 13 溃决后果比较

好,可以为尾矿坝漫顶溃决溃口展宽过程的相关研究提供一定的参考。

5 结论

a. 尾矿库漫顶溃决过程可定性分为坝面漫流与冲沟形成、坝体崩塌与溃口快速扩张及稳定泄流 3 个阶段。其溃口展宽的主要方式为:水砂流不断侵蚀溃口底部,导致下层尾砂被逐渐掏空,随后上部临空结构崩塌,在水砂流侵蚀溃口底部尾砂、上部临空结构崩塌的循环往复中,溃口逐渐展宽。

b. 排渗失效时峰值流量及溃口最终宽度接近正常排渗时的 1.5 倍,峰值流速可达 1.2~1.3 倍;溃决完成后溃口下部宽度较上部稍宽,坝体上部比下部更早停止发展,同时浸润线埋深对坝体溃口宽度及平均展宽速率有显著影响;浸润线埋深越小,溃决历时时间越长,降低浸润线可以延缓溃决造成的泥石流的形成时间,并且综合坝体出现崩塌丧失拦水能力和泥石流形成时间来看,紧急撤离时间可延长 3 min 左右。

c. 以尾砂的起动流速与断面平均流速分别代表尾砂抵抗冲刷的能力与水砂流冲刷强度,提出了计算尾矿堆积坝溃口展宽速率的幂函数公式,与实测数据吻合较好。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] LYU Zongjie, CHAI Junrui, XU Zengguang, et al. A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 4159306.
- [3] 吴宗之,梅国栋.尾矿库事故统计分析及其溃坝成因研究[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))
- [4] 姜清辉,胡利民,林海.尾矿库溃坝研究进展[J].水利

- 水电科技进展,2017,37(4):77-86. (JIANG Qinghui, HU Limin, LIN Hai. Advances in research of tailings dam failures[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(4):77-86. (in Chinese))
- [5] DENG Zhao, WU Shiqiang, FAN Zhikun, et al. Research on the overtopping-induced breaching mechanism of tailings dam and its numerical simulation[J]. Advances in Civil Engineering,2019(1):1-10.
- [6] 沈鸿杰,徐力群,刘子茜.改进 DB-IWHR 模型及其在尾矿库溃坝影响分析中的应用[J]. 水利水电科技进展,2022,42(5):64-70. (SHEN Hongjie, XU Liqun, LIU Zixi. Improved DB-IWHR model and its application in influence analysis of tailings dam break[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (5):64-70. (in Chinese))
- [7] LUMBROSO D, DAVISON M, BODY R, et al. Modelling the Brumadinho tailings dam failure, the subsequent loss of life and how it could have been reduced [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,2021,21(1):21-37.
- [8] YU Dayu, TANG Liyu, CHEN Chongcheng. Three-dimensional numerical simulation of mud flow from a tailings dam failure across complex terrain [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, 2019, 298;1-20.
- [9] 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))
- [10] QI Qinglan, ZHANG Liting, WANG Xiaogang, et al. Model test study on dam failure in tailings pond [J]. IOP Conference Series; Earth and Environmental Science, 2019,304(2):022057.
- [11] QI Qinglan, ZHANG Liting, WANG Xiaogang. Research on the model test of the debris landslide's evolution process in tailings reservoir[J]. IOP Conference Series; Earth and Environmental Science, 2019,304(4):042043.
- [12] 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))
- [13] WANG Guangjin, YANG Shuo, KONG Xiangyun, et al. Study on the process and mechanism of indoor overtopping dam-failure of tailings dam model experiment under the rainfall[J]. Modelling Measurement and Control C,2016,77(1):86-97.
- [14] YAO Chi, WU Ligong, YANG Jianhua, et al. Influences of tailings particle size on overtopping tailings dam failures [J]. Mine Water and the Environment, 2021, 40 (1): 174-188.
- [15] SOUZA JR T F, TEIXEIRA S H C. Simulation of tailings release in dam break scenarios using physical models[J]. REM-International Engineering Journal, 2019, 72 (3): 385-393.
- [16] 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 Xiaofei, YIN Guangzhi, WEI Zuoan, 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))
- [17] 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))
- [18] 毛昶熙. 闸坝泄流局部冲刷问题(五):粘性土的局部冲刷[J]. 人民黄河,1989(2):67-69. (MAO Changxi. Local scouring of sluice dam discharge (V): local scouring of cohesive soil[J]. Yellow River,1989(2):67-69. (in Chinese))
- [19] 蔡蓉蓉,张罗号,张红武.李保如泥沙起动流速公式修正研究[J]. 水利学报,2019,50(5):547-554. (CAI Rongrong, ZHANG Luohao, ZHANG Hongwu. Modifications to Li Baoru's sediment incipient velocity formula[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50 (5):547-554. (in Chinese))
- [20] 李炜.水利计算手册[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2006.
- [21] 刘昉,戚园春,吴敏睿.冻土条件下均质土堤漫顶溃决试验研究[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6):21-27. (LIU Fang, QI Yuanchun, WU Minrui. Experimental study on erosion process of homogeneous embankment breaching due to overtopping under frozen soil condition [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(6):21-27. (in Chinese))
- [22] 杜艳强,王新武,张坤,等.细粒尾矿坝漫顶溃坝机制及灾变过程[J]. 中国安全科学学报,2017,27(2):104-108. (DU Yanqiang, WANG Xinwu, ZHANG Kun, et al. Process and mechanism of fine grained tailings dam's failure due to overtopping [J]. China Safety Science Journal,2017,27(2):104-108. (in Chinese))
- [23] 李兆宇,贾金生,苏安双,等.胶结土坝漫顶溃坝模型试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):98-104. (LI Zhaoyu, JIA Jinsheng, SU Anshuang, et al. Experimental study on overtopping and dam break model of cemented soil dam [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5):98-104. (in Chinese))
- [24] 果鹏,夏军强,周美蓉,等.生产堤溃口展宽过程的概化模型试验研究[J]. 水科学进展,2020,31(2):249-259. (GUO Peng, XIA Junqiang, ZHOU Meirong, et al. Investigation into lateral widening process of farm dike breach using a sketched physical model[J]. Advances in Water Science,2020,31(2):249-259. (in Chinese))
- [25] JING Xiaofei, CHEN Yulong, WILLIAMS D J. Overtopping failure of a reinforced tailings dam: laboratory investigation and forecasting model of dam failure[J]. Water, 2019, 11 (2):315.

(收稿日期:2022-07-11 编辑:俞云利)