

# 尾矿坝漫顶溃决溃口纵向演化与侵蚀试验

翟巍昆<sup>1</sup>, 易富<sup>2,3</sup>, 杜常博<sup>1</sup>, 陶晗<sup>1</sup>, 卢欣鑫<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学建筑与交通学院, 辽宁 阜新 123000;  
3. 北京京能地质工程有限公司, 北京 102300)

**摘要:**通过3组不同入流量下的水槽溃坝试验,对尾矿坝漫顶溃决溃口的纵向演化过程进行了系统分析,讨论了侵蚀率和切应力之间的关系。结果表明:尾矿坝漫顶溃决溃口纵向表现为陡坎侵蚀模式与支点旋转侵蚀模式;溃决流量和密度都呈先上升后下降的趋势,但水砂流密度波动较大;不同入流量影响各阶段大坝的侵蚀率,对阶段1侵蚀率的影响最小,对阶段2侵蚀率的影响最大,最大侵蚀率随上游入流量的增加而增大,但是不影响沿坝床侵蚀率的相对变化;坝体上土体的抗侵蚀能力不仅与坝体材料强度相关,还与坝体上流体的密度关系密切。

**关键词:**尾矿坝;漫顶溃决;坝体侵蚀;模型试验;演变机制

中图分类号:TV122.4

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)05-0045-08

**Longitudinal evolution of breach and erosion tests for tailings dam overtopping failure//ZHAI Weikun<sup>1</sup>, YI Fu<sup>2,3</sup>, DU Changbo<sup>1</sup>, TAO Han<sup>1</sup>, LU Xinxin<sup>1</sup> (1. College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. College of Architecture and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 3. Beijing Jingneng Geological Engineering Co., Ltd., Beijing 102300, China)**

**Abstract:** The evolution of the longitudinal process of tailings dams breaching during overtopping failure was systematically analyzed by three sets of flume breaching tests at different flow rates, and the relationship between erosion rate and shear stress was discussed. The results show that the tailings dam overtopping failure shows a longitudinal pattern of steep canyon erosion with a pivot point rotational erosion pattern. The outburst flow and density both show an upward and then downward trend, but with large fluctuations in water-sand flow density. Different inflow flows affect the erosion rate of the dam at each stage, with the least effect on the erosion rate in the first stage and the greatest effect in the second stage. The maximum erosion rate increases with the increasing upstream inflow, but does not affect the relative change of the erosion rate along the dam bed. The erosion resistance of the soil on the dam is not only recated to the strength of the dam material, but also closely related to the density of the fluid on it.

**Key words:** tailings dam; overtopping failure; dam erosion; model test; evolution mechanism

我国矿产资源种类丰富、储量巨大,但由于贫矿居多且多为伴生矿,矿石组成复杂,选矿和冶炼困难,并且随着矿产资源利用程度的提高,矿石开采品位下降,因此在选矿过程中排出了大量的尾矿。据统计,世界各国每年尾矿累计增量约50亿~70亿t,而我国仅2020年尾矿排出量就达到12.75亿t,且目前尾矿堆存量已经多达200多亿t。绝大部分尾矿都是通过建造尾矿库来堆存,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危害<sup>[1-3]</sup>。

坝体溃决主要涉及两个方面<sup>[4]</sup>:溃口几何形状

演化以及溃决水砂流演进。溃口演化研究一直是各类型溃坝问题研究的重点,其又可以细化为溃口横向演化与纵向演化两个方面,目前尾矿库坝体在溃决过程与溃决机理尤其是溃口演化方面尚不清晰,用解析计算与数值模拟方法来预测溃坝演化,结果与实际情况很难相符<sup>[5-8]</sup>。

由于尾矿坝溃坝现场观测不易,学者们多将真实案例的溃口形状视为溃口发展的形状,但其最终形态难以反映溃口纵向演化过程,因此通过试验研究溃口的纵向演化具有重要的实际意义。徐富刚等<sup>[9]</sup>以枷担湾堰塞坝为原型,考虑坝料粒径、坝体

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51774163);辽宁省教育厅青年基金项目(LJKQZ2021153);辽宁省教育厅科学研究一般项目(LJ2020JCL037)

**作者简介:**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

**通信作者:**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

高度、坝体下游坡度等影响因素进行了4组模型试验,通过观察不同工况下各坝体的破坏过程,分析了堰塞坝溃口演变机制;费建波<sup>[10]</sup>基于Osman模型,在边坡稳定性分析中考虑了溃坝过程中渗透力的作用,计算了岸坡破坏的倾角和判断岸坡稳定性的临界比值,并通过实际案例模拟了考虑渗流作用的溃坝过程。Fujita等<sup>[11]</sup>对无黏性粗砂和细砂组成的坝体分别进行室内溃坝试验,总结了纵断面上最大侵蚀深度点的位置,证实了下跌面最大冲刷深度在坝体纵断面上出现的位置与坝体材料颗粒级配密切相关;Coleman等<sup>[12]</sup>通过一系列恒定水位下无黏性土堤坝的漫顶溃决试验,发现其溃口纵剖面演化是围绕堤坝底部的一个固定支点旋转反向切割的过程,且支点的位置与堤坝材料的大小有关;Spinewine等<sup>[13]</sup>在对定库容的无黏性土坝溃决试验中发现溃口床底的坡度接近坝体材料的内摩擦角;Walder等<sup>[14]</sup>在大型水槽试验中研究了非黏性土坝的漫顶破坏,通过水下摄像揭示了溃口保持着接近沙子摩擦角的坡度后退,提出了一种溃口纵向后退侵蚀模型;Wahl<sup>[15]</sup>观察溃坝过程坝体纵剖面演化时发现溃坝过程中纵剖面上反复出现阶梯状的陡坎,且陡坎的分布、大小、位置存在一定的规律性。

各种类型天然坝、人工坝的溃口纵向演化研究已经取得不少成果,而关于尾矿坝溃口纵向演化还没有相关讨论,溃口纵向演化作为溃口发展的重要组成部分,完善其理论基础和试验研究对尾矿坝的防灾减灾工作具有十分重要的意义。

## 1 试验设计及数据分析

### 1.1 试验设计

小比例尺水槽试验满足模型相似准则过于困难,本文主要开展尾矿坝溃坝的基础理论研究,因此未考虑模型相似准则,冲刷特性试验侧重于定性结果的讨论,所有试验采用相同的级配、筑坝方式和试验过程控制措施。

#### 1.1.1 试验材料及筑坝方式

试验采用的尾砂颗粒级配如图1所示。

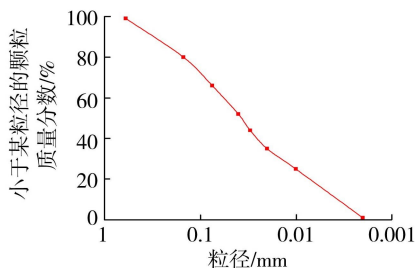


图1 试验尾砂颗粒级配

模型坝体堆筑采用模具分层填筑法,先用模具

将坝体上下游坡面固定,将尾砂烘干后依据土工试验规程配置最优含水率土样,然后分3层向模具内填筑压实,用木锤夯击相同的次数,直到整体坝高超设计坝高2~3cm,最后在坝顶放置重物0.5h,去除模具对坝体进行修整。当模型坝修筑完成后,清理现场,调整观测设备,确保都处于待工作状态。根据调整好各工况下的进水流量,开启进水阀门向库区注水,当水流到达坝顶视为漫顶开始。

#### 1.1.2 试验装置和试验方案

试验装置如图2所示,试验水槽全长2m,分为试验段和泥沙淤积段,试验段坝体全长1.2m,宽0.4m,高0.3m,泥沙淤积段长0.8m。水槽底部和侧壁均采用钢化玻璃,在过流槽一侧边壁划分网格,用于测量溃坝过程底部高程变化。在坝体上方、一侧与下游安装3台高清摄像机,出口处放置标有刻度的集液箱回收废水。

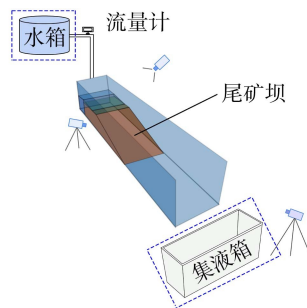


图2 试验装置示意图

为了使选择的示踪粒子不干扰液体流动和便于测量,示踪颗粒的密度必须小于液体,以使其可以漂浮在水面上,同时颗粒大小要适当,便于被摄像机拍摄。基于以上考虑,选择白色聚苯乙烯塑料颗粒,图3为侵蚀结束后效果图及过流槽示意图,设计时通过坝体与玻璃壁之间开槽的方式控制溃口位置。参考张贵金等<sup>[16]</sup>以库容、坝体参数等确定不同入库洪水组合方式的思想,根据试验模型参数共采用3个不同的上游入流量( $1 \times 10^{-4}$ 、 $3 \times 10^{-4}$ 、 $5 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s)研究入流量对尾矿坝破坏过程和溃口侵蚀率的影响,每次试验都进行两次,以评估试验结果的可重复性。

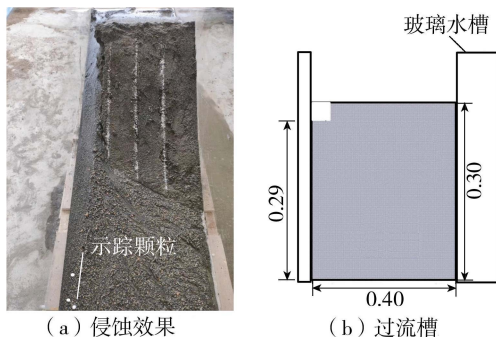


图3 侵蚀效果和坝顶过流槽(单位:m)

Korup等<sup>[17-19]</sup>认为大坝的高度 $H_d$ 、宽度 $W_d$ 和蓄

水库容  $V_d$  是评估大坝稳定性和溃决参数的关键变量;任强等<sup>[20]</sup>认为大坝的溃决风险主要取决于上游来水量、坝的拦蓄水量、坝体几何尺寸等;石振明等<sup>[21]</sup>对堰塞坝的分布、成因、坝高、库容等特征进行统计分析,建立了溃决参数的快速评估模型,并将其应用于唐家山堰塞坝,得到了良好的预测结果;梅世昂等<sup>[22]</sup>选择库容、水位比及坝高等作为自变量进行回归分析,建立了土石坝溃坝的参数经验模型。以上研究说明大坝外形参数与溃决具有相关性,为了验证试验模型尾矿坝能否代表真实的尾矿坝,参考 Peng 等<sup>[23]</sup>提出的用来定义大坝几何特征的一套无量纲变量  $H_d/W_d$ 、 $V_d^{1/3}/H_d$ , 基于 WISE 铀矿项目及 Rico 等<sup>[1]</sup>收集的世界不同地区尾矿坝的无量纲参数与模型坝系数进行评估,从图 4 可以看出试验所给的定义尾矿坝模型的无量纲参数位于可接受值范围内,因此可以代表尾矿坝。

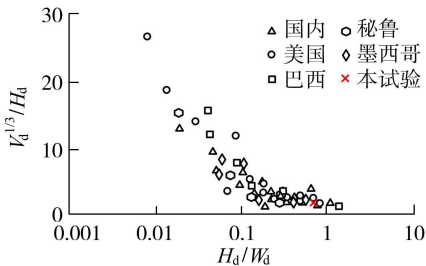


图 4 尾矿坝高宽比参数分布

## 1.2 数据分析

流速是通过跟踪示踪粒子在参考系内的运动轨迹来测量的,示踪粒子的速度为预定义的参考系内

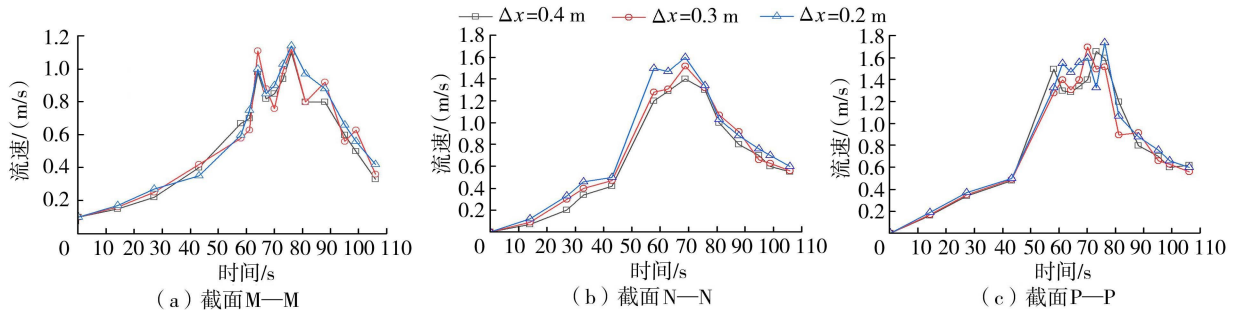


图 6 不同距离空间窗口流速测量结果

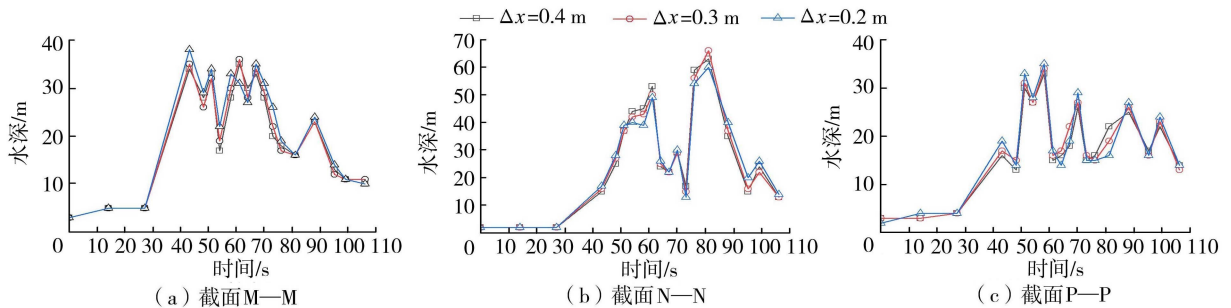


图 7 不同距离空间窗口水深测量结果

移动的总距离除以示踪剂移动参考系跨度所需的总时间来测量,如图 5 所示。单位时间粒子的移动距离定义为一个初始点和最终点之间的差值,通过摄像机以 25 帧/s 频率记录的快照计算得到。

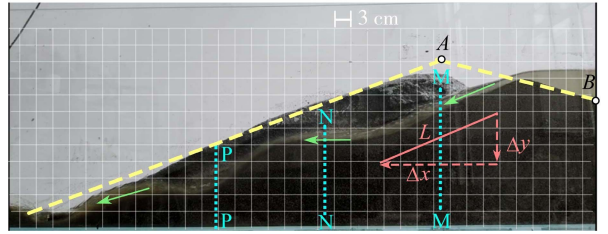


图 5 流速、水深测量窗口

截面 M—M 位于坝顶断面,N—N、P—P 位于坝体中部分别距坝趾 0.8、0.6 m 处,为了排除误差和参考坐标系对测量结果的影响,预先估计流速,分别设置  $\Delta x=0.2、0.3、0.4$  m 3 种不同长度的待测空间窗口,在水槽一侧的玻璃板上画出 3 cm 的网格单元。

流速的测量结果如图 6 所示,流速整体先增大后减小直到稳定泄流状态,并且流速沿纵向逐渐增大;另外测量结果由于距离的变化而出现波动,考虑到流速较大且  $\Delta x=0.4$  m 时精度略低,认为  $\Delta x=0.3$  m 为最适合后续测量和分析的距离。

与测量流速相似,在代表性截面 M—M、N—N 和 P—P 上测量了水深,如图 7 所示。在每个截面测量 3 次,测量时需要一个示踪粒子来跨越空间测量窗口,测量颗粒代表的自由面与坝坡床之间的距离,3 次测量结果表明,水深先缓慢增大,然后突然快速增大并开始剧烈波动最后逐渐减小。这 3 次测

量结果都反映了水深的变化,结果几乎一致。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 溃口纵向侵蚀过程

以入流量  $3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  为例说明尾矿坝的纵向演化过程。 $T=0 \text{ s}$  时漫溢水流开始沿开槽移动,最后到达下游峰(坝顶与坝坡面交点  $A$  处),漫顶开始,由于本阶段漫溢水流较浅,流速相对较缓,因此还不足以侵蚀坝体。从图 8(a)可以看出,早期纵向侵蚀最快的位置在下游峰处, $T=30 \text{ s}$  时该处侵蚀深度变化最大,根据河床切应力公式  $\tau = \rho g n^2 v^2 / h^{1/3}$  (其中  $\rho$  为水流密度; $g$  为重力加速度; $n$  为曼宁系数; $v$  为流速; $h$  为水深)可知,由于坝顶到坝坡面交界处地形的变化,水流流速与重力加速度夹角变小,使得水流加速度在该位置最大,增强了对床底的切应力,因此输砂量主要集中在  $A$  点下方区域,此时水流中挟带的大部分尾砂不会移动太远,而是在下游坝坡附近沉积。 $T=53 \text{ s}$  时出水量整体不大,其中一部分水流渗入坝坡面内,另一部分推动侵蚀点尾砂堆积在水流前端,这也造成水流反射向后淘蚀坝体。随着上游供水持续增大,流速逐渐增加,后续增多的水流推动堆积砂运动并翻越堆积砂形成数量大小不固定的阶梯状小陡坎,这一过程流速的增加使得侵蚀速率加快,细颗粒尾砂更容易被侵蚀带入洪水,水中悬移质颗粒增加,形成尾矿坝溃坝的水砂流,爆发性水砂流开始发展,如图 8(b) 所示。 $T=$

$65 \text{ s}$  时,从图 8(c) 可以看到陡坎逐渐消失,当坝坡出现间歇性崩塌时,坝坡跌进溃口后短暂阻断溃口水砂流,造成溃口陡坎再次形成,如图 8(d) 所示。 $T=95 \text{ s}$  后,后续流量开始减缓,进入稳定阶段,床底形成一条接近平滑的直线,如图 8(e)(f) 所示。

### 2.2 溃决水文演化过程

图 9 为尾矿坝漫顶破坏过程的水文演化图。初始阶段溃决水流在前水头到达测量位置前持续发展,因此前 28 s 没有测量数据。此后,溃坝下泄流量逐渐增大,标志着初始浪涌和小浪涌的到来。在  $T=60 \text{ s}$  时出现了一个拐点,即流量趋势的突然正变化,标志着爆发性水砂流的发生;当达到峰值时,下泄流量曲线不再急剧上升。此后,与拐点前的流量相比,溃决水砂流在较长一段时间内保持相对较大的流量。 $T=100 \text{ s}$  后,随着爆发水砂流的减弱,测量的流量值逐渐减小。

确定溃决水砂流的流动特性对于防灾减灾是必要的,因此试验中通过连续抽样测量了溃坝水砂流的密度。由图 9(b) 可知,水砂流密度在波动,呈先上升后下降的趋势。在大坝破坏的早期阶段,水砂流密度相对较高,表明了泥石流的形成;中期溃坝水砂流不稳定,主要是由于洪水侵蚀导致坝体沿纵向发生了不规则崩塌;而在下切侵蚀过程结束时,水砂流密度的波动减小。水砂流向较低密度的转变时间对应洪峰结束的时间,在  $T=105 \text{ s}$  左右,该阶段的水砂流主要为低密度浊流(密度低于  $1.165 \text{ t}/\text{m}^3$ )。在

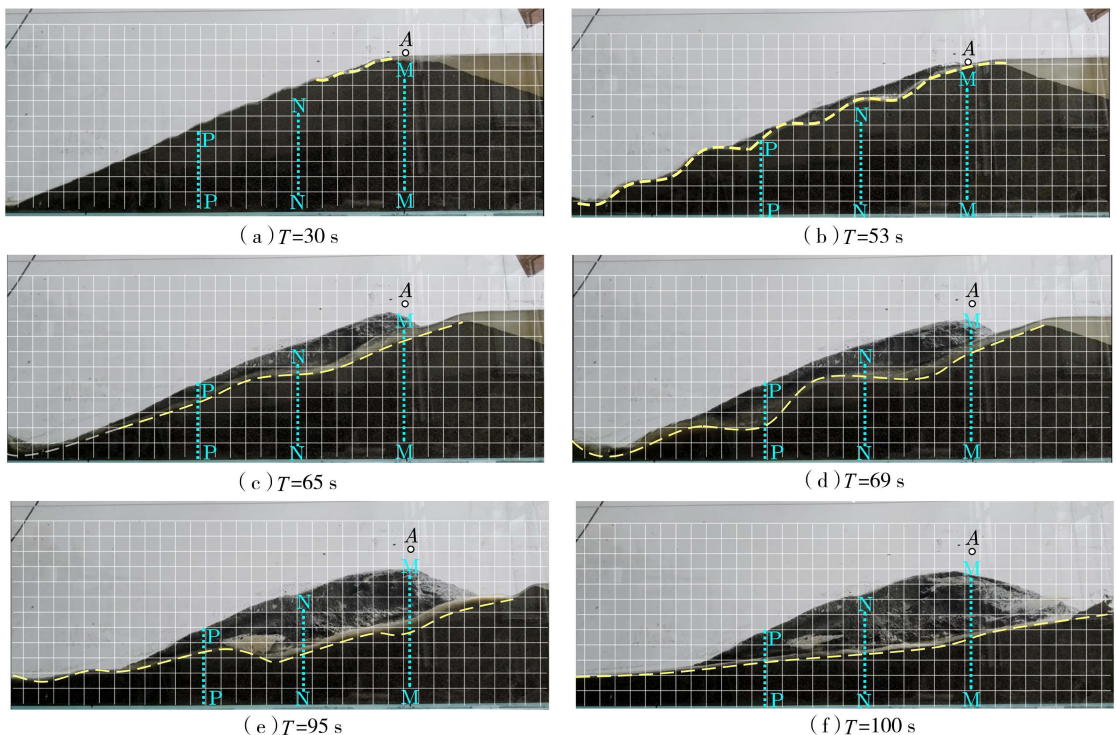
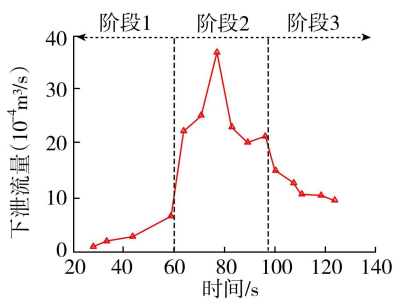
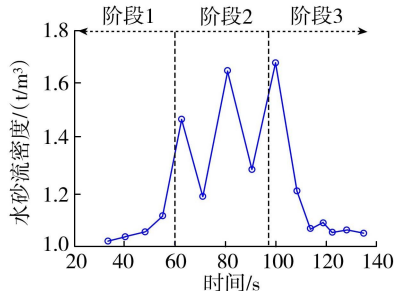


图 8 典型时刻纵向侵蚀情况



(a) 水砂流流量



(b) 水砂流密度

图9 漫顶溃决水文演化

$T=110$  s 后,溃坝水砂流密度进一步降低,当溃坝结束时侵蚀停止,浊流逐渐变为清澈水(与上游流入相同),密度约为  $1 \text{ t/m}^3$ 。

### 3 尾矿坝溃口纵向演化模式

#### 3.1 纵向下切过程

尾矿库溃坝过程坡床地形处于时刻变化中,但由于下泄水流含沙量大、水流浑浊,无法直接观测溃口下切过程。一般大坝纵向侵蚀过程可总结为4种情况:针对黏性坝的后退侵蚀模式与陡坎侵蚀模式,针对无黏性坝的床底层状侵蚀模式与支点旋转侵蚀模式。通过观察试验过程中尾矿坝的纵向侵蚀轨迹,可以发现侵蚀过程具有陡坎侵蚀和支点旋转侵蚀的部分特征。

另外,4种侵蚀模式是在假设坝前水位恒定(库容无限大)的情况下给出的,床底可以侵蚀到接近坝基,然而尾矿坝的库容是有限的,坝前水深会逐渐下降。因此有必要细化尾矿坝纵向侵蚀模式,其在前期局部出现小陡坎,整体体现为支点旋转侵蚀,中期主要体现为陡坎侵蚀,后期主要体现为支点旋转侵蚀,最后在上游来流不足以侵蚀坝体时达到平衡,床底维持一个稳定的坡度,经测量发现,每次试验溃决后坝体的纵剖面坡度基本一致,接近颗粒的内摩擦角。

上述变化产生的原因是前期水流中挟带的大部分尾砂不会移动太远,有部分在下游坝坡附近沉积,后续增多的水流推动堆积砂运动并翻越堆积砂形成数量、大小不固定的小陡坎;中期主要是坝体不规则的崩塌导致陡坎的出现;而到了冲刷后期,坝体接近饱和,坝体材料与水流之间仅受摩擦力作用,颗粒结

构较为松散,如果出现新的冲刷坑,颗粒会被搬运填埋,从而维持出一个接近平滑的固定坡度。

图10为不同时刻被侵蚀坝面的剖面图。在漫顶刚发生时,由于水动力较弱,只有下游坡顶A处被侵蚀,随着时间的推移,侵蚀点同时向上下游开始移动,并且在破坝时旋转点没有固定在坝趾处,而是一直沿着下游坝坡从坝顶向坝趾移动。此外,由于初始阶段的流量和速度较小,被侵蚀的沉积物不能完全被挟带入下游水流中,可能会在坝坡上沉积并积累(图8(a)(b)),这进一步导致了阶段1坡床表面的不规则性。在阶段2中,流速逐渐增加,初始阶段形成的不规则的纵向剖面因快速的水流和泥沙流动而迅速变平,但由于该阶段下切深度较大,坝坡开始出现间歇性崩塌,水流越过阻挡再次出现陡坎,因此会出现不规则的曲线,但可侵蚀性的纵向轮廓床层在上游沿流动方向逐渐平滑。在阶段3,观察到流速减弱,侵蚀方式改变,纵向轮廓床层逐渐形成一条接近平滑的直线,悬移质泥沙在坝趾附近沉积。

阶段1  $\blacklozenge$   $t=0$  s  $\circ$   $t=30$  s  $\blacktriangle$   $t=53$  s  
阶段2  $\blacksquare$   $t=65$  s  $\bullet$   $t=70$  s  $\blacktriangledown$   $t=95$  s  
阶段3  $\blacklozenge$   $t=100$  s  $\blacklozenge$   $t=120$  s

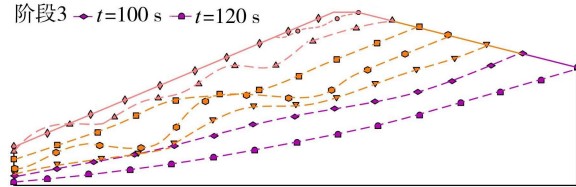


图10 尾矿坝溃坝纵向下切过程

#### 3.2 不同阶段的侵蚀特征

图11分别为3个阶段典型时刻的纵向高程变化,时间间隔  $\Delta t$  取1s,相对侵蚀率  $E_i/E_{\max}$  的图在初始时间沿所述剖面的上方位置绘制,定义为特定点的侵蚀率除以最大侵蚀率,叠加在纵向剖面上,以进一步说明沿水流的侵蚀及发展过程。

沿流动方向的侵蚀过程中溯源侵蚀率相对前、中部较为稳定,从图11(a)(b)可以发现侵蚀率极大值出现在阶梯状陡坎的断面峰处,极小值出现在陡坎的底部,且阶段2、3峰值的位置说明陡坎演化还存在一个向后溯源的过程。整体上看,阶段2的侵蚀率比阶段1、3大,阶段3的侵蚀率更加稳定,从试验过程中也可以发现尾矿坝的纵向下切过程是一个侵蚀率由小到大最后趋于稳定的过程。

#### 3.3 不同入流量下尾矿坝的侵蚀率

图12为不同入流量下各阶段中间时刻尾矿坝破坏的侵蚀率,研究发现:不同入流量影响各阶段大坝的侵蚀率,其对阶段1侵蚀率的影响最小,对阶段2侵蚀率的影响最大;最大侵蚀率随上游入流量的增加而增大,但是不影响大坝沿坝床侵蚀率(先增后减)的相对变化;尽管大坝坝体崩塌导致数

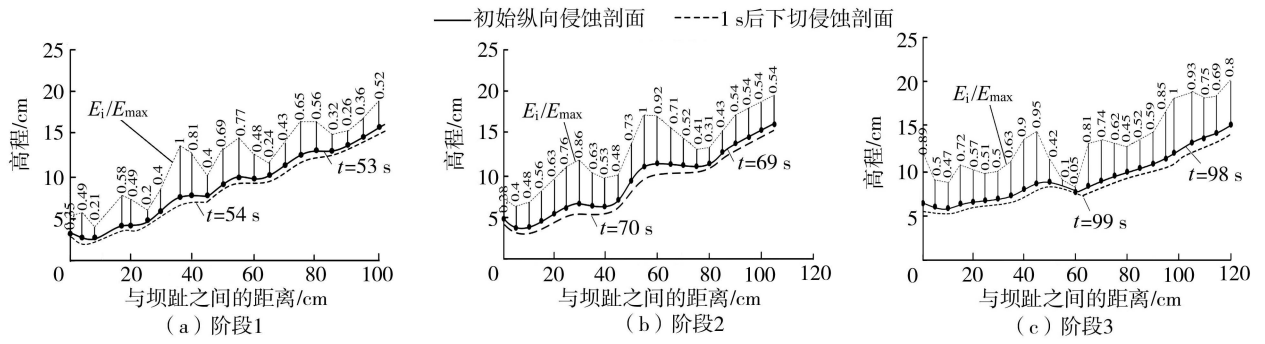


图 11 3 个阶段典型时刻侵蚀率沿程分布

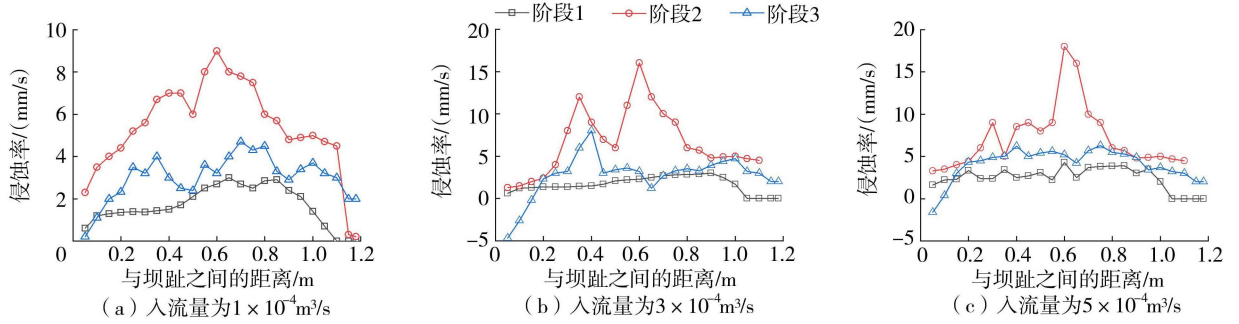


图 12 不同入流量下 3 个阶段沿程侵蚀率

据点存在波动,但即使在不同入流量下,各阶段相同的侵蚀机制也占主导地位。

为了简化和排除干扰,不考虑由侵蚀或沉积引起的局部地貌变化所带来的形状不规则性,基于尾矿坝模型的下切侵蚀过程,本文提出一种新的尾矿坝溃口纵向演化模式,如图 13 所示(图中  $h_{j-1}$ 、 $h_j$ 、 $h_{j+1}$  为不同时间步长下的纵向侵蚀深度)。

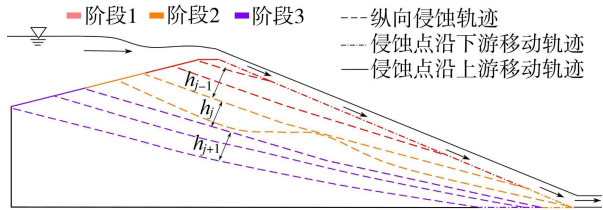


图 13 尾矿坝溃口纵向演化模式

#### 4 侵蚀率-切应力关系

尾矿坝溃决与一般的水力溃坝差异很大,由于尾矿坝坝体的材料来源于尾砂,与其他坝体材料相比抗冲蚀性较差,并且溃坝洪水携带大量尾砂,因此在尾矿坝溃决过程应考虑水砂流与坝体材料特性。坝体材料的冲蚀特性对坝体漫顶溃决的发展起着至关重要的作用,关乎坝体在相同洪水来流情况下溃决发展模式,直接决定了溃坝洪水流量与下游洪水演进过程。漫顶破坏沿纵向的演变是床载侵蚀的结果,它直接受到床层上水流施加的切应力  $\tau$  和床层抗荷载侵蚀性  $\tau_c$  的影响,假设溃坝引起的溃决洪水为均匀流量,床的切应力可以根据测量的水力半径

和速度来估算:

$$\tau = \rho g n^2 v^2 / R^{1/3} \quad (1)$$

式中:  $R$  为水力半径;  $n$  为曼宁系数,与筑坝材料中值粒径  $d_{50}$  有关:

$$n = d_{50}^{1/6} / A_n \quad (2)$$

式中  $A_n$  为一个经验系数,  $Wu^{[24]}$  推荐实验室取值为 16, 现场取值为 12。考虑水深小于截面宽度的一半 ( $h < b/2$ ) 的浅流中侧壁效应的水力半径,采用下式表示:

$$R = h(b - h) / b \quad (3)$$

若  $b$  高于  $h$ , 可以取  $R = h$ 。

为了找到侵蚀率与切应力的关系,参考 Meyer 等<sup>[25-26]</sup> 提出的细沟侵蚀率基本表达式和 Gaucher 等<sup>[27-28]</sup> 提出的土石坝溢流侵蚀破坏过程关系式,在阶段 1、2、3 测量并计算了大坝横截面 M—M、N—N 和 P—P 处的侵蚀率和切应力,根据阶段 2、3 观察到的侵蚀率和切应力之间的关系,可得出:

$$E = k_d (\tau - \tau_c)^\xi \quad (4)$$

式中:  $E$  为侵蚀率;  $\tau_c$  为材料起动切应力;  $k_d$  为冲蚀系数,代表土体的可蚀性,取决于材料的岩性;  $\xi$  为泥沙指数。

在过去的几十年里,学者们做了大量的努力来预测土体对侵蚀的抵抗力,相关结果<sup>[29-32]</sup> 表明抗侵蚀性仅取决于颗粒空隙的尺寸和密度,一旦坝体颗粒混合均匀,在坝体内分布均匀,其抗侵蚀性应保持相同值,并在溃坝破坏时保持不变。

为了验证这一假设,将 3 组试验计算得到的侵

蚀率放在侵蚀率-切应力关系图中,可以得到3个独立的区间,这表明每个区间的过程彼此独立。关于泥沙指数,初步拟合得到1.139~1.184,统一采用纵向侵蚀泥沙指数1.16,拟合不同截面上的侵蚀率,得到3条近似平行的线,如图14所示, $k_d$ 在坝体内基本相同,认为筑坝时条件良好(密度、孔隙比);抗侵蚀性 $\tau_c$ (横坐标上的截距)沿流动方向逐渐增大,在截面M—M、N—N、P—P处测出的 $\tau_c$ 分别为4.1、26.3与40.5。

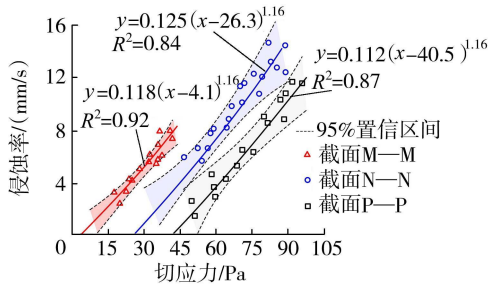


图14 侵蚀率-切应力拟合关系曲线

此外,通过对比已有的经验方程与拟合结果可知,坝体对清水流的抗侵蚀性主要表现在截面M—M处( $\tau_c=4.1$ ),处于表1计算值1.66~10.06范围内;而截面N—N、P—P处的坝体抗侵蚀性(26.3与40.5)远超出这个范围。下游抗侵蚀性明显增加可能与溃决水流的冲刷能力有关,因为下游沉积物浓度(含砂量)明显高于上游。因此坝体上土体的抗侵蚀性 $\tau_c$ 不仅与坝体材料强度相关,还与坝体上流体密度关系密切。这也说明在纵向上,尽管水流提供的切应力持续增加,但坝体侵蚀率不一定随流量的增加而增加。由图8可以看出,由于坝体崩塌导致溃坝水砂流的密度存在波动,在今后的研究中需要根据不同阶段调整侵蚀率和切应力之间的关系。另外,由于实际尾矿坝溃决呈三维性,不同尾砂之间存在差异,且纵向演化与侵蚀过程一般是在泄洪槽中发生的,不可能像水槽试验那样简单,因此本文给出的图形、模式以及侵蚀率和切应力之间的关系式是否可以应用于工程实际还有待进一步研究。

表1 已有抗侵蚀性计算经验公式汇总

经验公式	本文数据代		来源
	入经验公式计算值	主要参数	
$\tau_c = 3.54 \times 10^{-28.1d_{50}}$	3.523	中值粒径 $d_{50}$	Smerdon 等 <sup>[29]</sup>
$\tau_c = 0.493 \times 10^{0.0182P_c}$	2.988	黏粒含量占比 $P_c$	
$\tau_c = 0.0012\rho_d^{1.2}$	10.06	干密度 $\rho_d$	Ockenden 等 <sup>[30]</sup>
$\tau_c = 0.015(\rho_d - 1000)^{0.73}$	2.272	土体天然密度 $\rho_d$	Mitchener 等 <sup>[31]</sup>
$\tau_c = 0.16I_p^{0.84}$	1.66	塑性指数 $I_p$	
$\tau_c = 6.8I_p^{1.68}P^{-1.73}e^{-0.97}$	1.85	孔隙比 $e$	Chang 等 <sup>[32]</sup>

## 5 结论

### a. 尾矿坝漫顶溃决溃口的纵向演化过程可根

据侵蚀模式、溃决过程流量和水砂流密度变化将尾矿坝溃口下切过程可分为3个阶段,其中阶段1、3为支点旋转侵蚀,阶段2主要为陡坎侵蚀,溃决完成后存在残余坝体,坝床底部维持一个稳定的坡度,接近颗粒的内摩擦角。

b. 不同入流量影响各阶段大坝的侵蚀率,其对阶段1侵蚀率的影响最小,对阶段2侵蚀率的影响最大。最大侵蚀率随上游入流量的增加而增大,但是不影响大坝沿坝床侵蚀率(先增后减)的相对变化。

c. 溃口坡床的抗侵蚀能力不仅与坝体材料强度相关,还与坝体上流体的密度关系密切,而尾矿坝坝体材料抗冲蚀性差,溃坝洪水容易挟带沿程大量尾砂,尽管水流提供的切应力持续增加,但尾矿坝侵蚀率不一定随流量的增加而增大。尾矿坝坝体侵蚀率在纳入切应力模型时,需要根据不同阶段调整侵蚀率和切应力之间的关系。

### 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] 易富, 翟巍昆, 杜常博, 等. 尾矿库漫顶溃决动态演化及溃口展宽模型试验 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 34-41. (YI Fu, ZHAI Weikun, DU Changbo, et al. Dynamic evolution and breach spreading test for tailings pond overtopping failure [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 34-41. (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] 邓翌, 陈生水, 钟启明. 尾矿库漫顶溃坝数学模型研究与应用 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 932-938. (DENG Zhao, CHEN Shengshui, ZHONG Qiming. Mathematical model for breach of tailings dam due to overtopping and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 932-938. (in Chinese))
- [6] DENG Z, WU S Q, FAN Z W, et al. Research on the overtopping-induced breaching mechanism of tailings dam and its numerical simulation [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 3264342.
- [7] 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 Ziqian. 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))
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 徐富刚, 杨兴国, 周家文. 堰塞坝漫顶破坏溃口演变机制试验研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2015, 34(6): 79-83. (XU Fugang, YANG Xingguo, ZHOU Jiawen. Experimental study on dyke evolution mechanism in dam-break process of landslide dam [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2015, 34(6): 79-83. (in Chinese))
- [10] 费建波. 考虑渗流作用的溃坝溃口发展模型 [C]//2014 年全国工程地质学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2014: 225-229.
- [11] FUJITA Y, TAMURA T. Enlargement of breaches in flood levee on alluvial plains [J]. Journal of Natural Disaster Science, 1987, 9(1): 37-60.
- [12] COLEMAN S E, ANDREWS D P, WEBBY M G. Overtopping breaching of noncohesive homogeneous embankments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(9): 829-838.
- [13] SPINOWINE B, DELOBBE A, ELSLANDER L, et al. Experimental investigation of the breach growth process in sand dikes [M]//River Flow 2004. London: Taylor and Francis, 2004: 983-993.
- [14] WALDER J S, IVERSON R M, GODT J W, et al. Controls on the breach geometry and flood hydrograph during overtopping of noncohesive earthen dams [J]. Water Resources Research, 2015, 51(8): 6701-6724.
- [15] WAHL T L. Prediction of embankment dam breach parameters: a literature review and needs assessment [R]. Denver: Bureau of Reclamation, 1998.
- [16] 张贵金, 罗舸旋子, 朱博渊, 等. 极端条件下堆石坝溃坝风险及应急预案 [J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (2): 28-35. (ZHANG Guijin, LUO Gexuanzi, ZHU Boyuan, et al. Dam-break risk and emergency plan of a rockfill dam under extreme conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (2): 28-35. (in Chinese))
- [17] KORUP O. Rock-slope failure and the river long profile [J]. Geology, 2006, 34(1): 45-48.
- [18] KORUP O. Geomorphometric characteristics of New Zealand landslide dams [J]. Engineering Geology, 2004, 73(1/2): 13-35.
- [19] KORUP O, MONTGOMERY D R, HEWITT K. Glacier and landslide feedbacks to topographic relief in the Himalayan syntaxes [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(12): 5317-5322.
- [20] 任强, 陈生水, 钟启明, 等. 堰塞坝的形成机理与溃决风险 [J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(5): 30-34. (REN Qiang, CHEN Shengshui, ZHONG Qiming, et al. Formation mechanism and breaching failure risk of barrier dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(5): 30-34. (in Chinese))
- [21] 石振明, 马小龙, 彭铭, 等. 基于大型数据库的堰塞坝特征统计分析与溃决参数快速评估模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1780-1790. (SHI Zhenming, MA Xiaolong, PENG Ming, et al. Statistical analysis and efficient dam burst modelling of landslide dams based on a large-scale database [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1780-1790. (in Chinese))
- [22] 梅世昂, 陈生水, 钟启明, 等. 土石坝溃坝参数模型研究 [J]. 工程科学与技术, 2018, 50(2): 60-66. (MEI Shiang, CHEN Shengshui, ZHONG Qiming, et al. Parametric model for breaching analysis of earth-rock dam [J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(2): 60-66. (in Chinese))
- [23] PENG M, ZHANG L M. Breaching parameters of landslide dams [J]. Landslides, 2012, 9(1): 13-31.
- [24] WU Weiming. Simplified physically based model of earthen embankment breaching [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(8): 837-851.
- [25] MEYER L D, FOSTER G R, NIKOLOV S. Effect of flow rate and canopy on rill erosion [J]. Transactions of the ASAE, 1975, 18(5): 905-911.
- [26] FOSTER G R, MEYER L D, ONSTAD C A. An erosion equation derived from basic erosion principles [J]. Transactions of the ASAE, 1977, 20(4): 678-682.
- [27] GAUCHER J, MARCHE C, MAHDI T F. Experimental investigation of the hydraulic erosion of noncohesive compacted soils [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136(11): 901-913.
- [28] WU Songbai, YU Minghui, WEI Hongyan, et al. Non-symmetrical levee breaching processes in a channel bend due to overtopping [J]. International Journal of Sediment Research, 2018, 33(2): 208-215.
- [29] SMERDON E T, BEASLEY R P. Critical tractive forces in cohesive soils [J]. Agricultural Engineering, 1961, 42(1): 26-29.
- [30] OCKENDEN M C, DELO E. Consolidation and erosion of estuarine mud and sand mixtures: an experimental study [R]. Wallingford: Hydraulics Research Wallingford, 1988.
- [31] MITCHENER H, TORFS H. Erosion of mud/sand mixtures [J]. Coastal Engineering, 1996, 29(1/2): 1-25.
- [32] CHANG D S, ZHANG L M, XU Y, et al. Field testing of erodibility of two landslide dams triggered by the 12 May Wenchuan earthquake [J]. Landslides, 2011, 8(3): 321-332.

(收稿日期: 2022-10-26 编辑: 俞云利)