

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.06.012

护坡材料抗冲刷性能对小型均质土坝漫顶溃决影响的试验研究

赵昱¹, 张继勋¹, 任旭华¹, 邓成发², 张玉贤¹, 王虞清¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020)

摘要: 为从根本上降低小型土石坝漫溃失事率, 以实际坝高 15 m 的小型土石坝工程为例建立缩尺模型, 采用草皮、胶结土以及干砌石等修筑下游护坡, 分析了不同抗冲刷性能护坡材料对土石坝漫顶溃决进程的影响, 研究了溃口形态演化规律, 并结合溃口断面流速、流量变化过程, 深入探究了不同抗冲刷性能材料下游护坡抗冲刷破坏成效。试验结果表明: 入库流量稳定条件下, 应用胶结土与干砌石等抗冲刷性能较强的材料修筑下游护坡可显著削弱漫坝水流的侵蚀作用, 有效延长漫顶溃决历时 2~3 倍, 溃口最大流速降低约 3%, 断面最大流量下降 10%~12%; 采用草皮护坡进行防护可稍许延缓漫坝水流侵蚀破坏, 但延缓效果相对不明显, 只延缓近 1 倍历时。

关键词: 小型均质土坝; 漫顶溃决; 护坡材料; 抗冲刷性能; 模型试验

中图分类号: TV641

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)06-0101-09

Experimental study on influence of scour resistance of slope protection materials on overtopping and failure for small homogeneous earth-rockfill dams

ZHAO Yu¹, ZHANG Jixun¹, REN Xuhua¹, DENG Chengfa², ZHANG Yuxian¹, WANG Yuqing¹

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: In order to fundamentally reduce the overtopping and failure rate of small earth-rockfill dams, a scaled-down model was established based on a small earth-rockfill dam project with an actual height of 15 m. The downstream slope protection was constructed using turf, cemented soil, and dry-laid stone masonry. The influence of different scour-resistant slope protection materials on the overtopping and failure process of the earth-rockfill dam was analyzed. The evolution law of breach shapes was studied, and in combination with the flow velocity and flow rate changes at the breach section, the effectiveness of different scour-resistant material-based downstream slope protection in resisting erosion damage was deeply explored. The experimental results show that under stable inflow conditions, the use of materials with high scour resistance, such as cemented soil and dry-laid stone masonry, in downstream slope protection significantly reduces the erosive force of overtopping water. This substantially extends the duration of overtopping and failure by 2-3 times. The maximum flow velocity at the breach is reduced by approximately 3%, while the maximum cross-sectional discharge decreases by a range of 10%-12%. In contrast, turf-based slope protection offers only modest delay in erosion damage, extending the breach duration by approximately one fold.

Key words: small homogeneous earth-rockfill dam; overtopping and failure; slope protection material; scour resistance; model test

小型土石坝漫顶溃决一直是国内外学者研究的焦点, 但由于大部分坝体所处地理位置偏僻, 且溃决现场水情复杂, 难以直接获取溃口发展过程及其水力特征, 因此, 当前对土石坝漫顶溃决溃口冲蚀特性以及演化规律的研究主要通过物理模型试验^[1-2]进行。Chen 等^[3-4]开展均质坝与黏土心墙坝漫顶溃决过程离心模型试验, 分析溃口形态演化规律, 同时采用分时段迭代法对离心模型试验选取的均质土坝与黏土心墙坝漫顶溃

基金项目: 浙江省水利厅科技计划项目(RB2214, RB2401); 浙江省水利河口研究院院长基金项目(ZIHE21Y003)

作者简介: 赵昱(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事水工结构设计计算理论与试验研究。E-mail: 852760139@qq.com

通信作者: 张继勋(1974—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水工结构地下工程研究。E-mail: zhangjixun@hhu.edu.cn

引用本文: 赵昱, 张继勋, 任旭华, 等. 护坡材料抗冲刷性能对小型均质土坝漫顶溃决影响的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 101-109.

ZHAO Yu, ZHANG Jixun, REN Xuhua, et al. Experimental study on influence of scour resistance of slope protection materials on overtopping and failure for small homogeneous earth-rockfill dams[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(6): 101-109.

决的溃口发展过程和溃口流量过程进行数值模拟;Coleman等^[5]通过无黏性土石坝漫顶溃坝水槽试验,总结出能够预测溃口形状、溃口剖面以及溃口流量随时间变化的方法;张建云等^[6]基于我国现有土石坝黏粒含量范围资料,开展了国内外最高均质黏性土坝漫顶溃决实体试验,揭示了均质黏性土坝3种漫顶溃决方式作用机理以及筑坝材料黏性对坝体主要溃决方式的影响;罗优等^[7-8]将黏土和黄砂按照一定比例混合配制筑坝材料以探究均质土坝溃坝参数与溃坝模式之间的联系;张大伟等^[9-10]针对粒径相差明显的砂样进行土石坝漫顶溃决试验,以对比已有试验研究中泥沙粒径值较小、不同砂样粒径相差不大等研究成果,并在此基础上应用 deVries 输沙率公式建立溃口出流三维模型进行数值模拟;王立即^[11]建立了4组室内水槽模型试验,侧重于研究粗粒径颗粒与细粒径颗粒对无黏性土石坝漫顶溃决冲刷演变过程的影响;王秋生等^[12]开发了封闭式循环供水土石坝溃坝模型试验装置,研究加筋无黏性均质坝溃坝过程中各项水力特性变化情况;张露澄等^[13]基于南京水利科学研究院400 t溃坝离心模型试验系统,利用“时空放大”效应开展离心模型试验,研究坝高、下游坡比、坝料级配对堰塞坝漫顶溃决过程的影响;成泽霖等^[14]针对堰塞体模型试验库容相对较小的问题,设计开展较大库容下堰塞体漫顶溃决试验,分析溃口冲蚀特性与演化规律。

据统计,2000—2021年我国共发生88起溃坝事件,年均超过4起,其中小型水库溃坝占比高达90.1%。面对极端天气,对于防洪标准偏低、运行管理条件差、冲刷破坏严重的小型土石坝,无论采取加宽溢洪道还是增加泄洪孔洞的办法只能从一定程度上提高水库防/泄洪能力,并不能避免水库在遭遇超标准洪水条件下的漫顶溃决问题。为从根本上降低小型土石坝漫顶溃决失事率,大量学者开展坝体漫顶破坏过程以及漫坝水流水力特性研究,重点分析不同结构形式、土料级配工况下土石坝模型抗冲刷破坏能力,探究延缓土石坝漫顶溃决的措施,而对于采用不同抗冲刷性能材料修筑下游护坡延缓土石坝漫顶破坏过程具体情况研究相对较少。本文从下游坝坡防护角度出发,采用草皮、胶结土以及干砌石等常用材料修筑下游护坡,在此基础上开展土石坝漫顶溃决模型试验,分析在采用不同抗冲刷性能护坡材料工况下漫坝水流的流速、流量等水力特性分布规律,探究各材料对土石坝溃口发展过程以及溃口深宽等溃口冲蚀特征的具体作用,进一步为土石坝漫而不溃、漫而缓溃防护措施研究提供理论基础。

1 土石坝漫顶溃决试验系统

试验系统主要由供水系统、模型平台系统、量测系统组成,整体布置如图1所示。供水系统包括蓄水池、水泵、高水头供水池;模型平台由上游河道、上游库区、大坝、下游河道组成,总长4.6 m,宽0.8 m,高0.4 m;量测系统包括测压管、碾压控制标识、水位流量监测标识以及漫溃过程记录器。

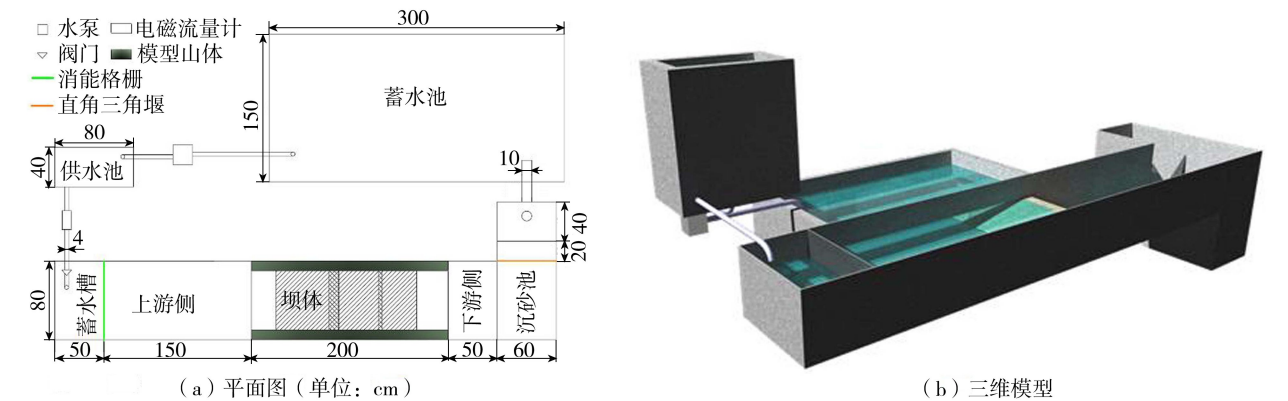


图1 试验系统
Fig. 1 Test system

上游河道段靠近高水头供水池处设置消能格栅以减小入库水流波动影响;模型坝体段靠近两侧边壁处设置模型山体,以更好地模拟实际工程中发生漫顶溢流后溃口起动、发展直至破坏的过程,填筑过程中直接将土料与模型山体相连,连接处用夯土器反复夯实,防止发生坝肩渗流;同时在山体预设位置开设孔洞,穿过硬质细管与平台外测压管相连,细管另一端接入渗流接头,试验中埋于设计点位以实时测量模型坝体内渗透压力分布情况;下游河道段与沉砂池相连,收集试验过程中冲毁的黏土、砂、砾石等填筑土料,防止其随尾水流入室外蓄水池内,阻塞水泵进水口,影响试验正常进行;沉砂池出口处设置直角三角堰以记录试验过程中

出水高度,结合水位流量表获得漫溃过程流量曲线。为了多角度记录漫顶溃决过程,在坝体下游侧斜上方以及下游正对方向各布置一台摄像机。

2 试验方法

2.1 相似准则

土石坝漫顶溃决是典型的水土耦合过程,通过室内模型试验开展研究时,需建立重力及漫坝水流的相似准则,试验中各物理量相似比如下:长度比尺为 1:50,流速比尺为 1:7.071,流量比尺为 1:17 677,压强比尺为 1:50,时间比尺为 1:7.071,重力比尺为 1:1,密度比尺为 1:1。具体推导方法见文献[15]。

由于土石坝相似模型材料根据相似比尺缩放后黏性较实际更大,难以满足泥沙运动相似条件,因此本文试验主要结合漫坝水流流速和流量变化过程、坝身冲深展宽以及漫溃各级段历时等试验参数进行对照分析。大部分模型试验^[16-19]对材料的选择方法表明,研究坝体溃决过程须放宽相似准则,因此本文主要基于重力相似准则,通过设置模型几何比尺进而确定其余各比尺具体数值。

2.2 试验方案

选择不同护坡材料(草皮、胶结土^[17]、干砌石以及未采取防护措施)的试验方案开展漫顶溃决模型试验,探究溃口形态演化规律与溃口流量过程,分析不同抗冲刷性能材料护坡对漫顶溃决过程的影响。①草皮护坡:考虑草皮的固土作用,筛取粒径小于0.5 mm的黏性颗粒与草粉均匀混合,铺设于下游坝坡表面。②胶结土护坡:称取细粒黏土(粒径小于0.075 mm)、水泥、石灰、粉煤灰,按照质量分数分别为90%、5%、2.5%、2.5%充分混合,铺设于下游坝坡表面。③干砌石护坡:实际工程中大多取长度50 cm左右干砌石,以一层与一层错缝锁结的方式铺砌在夯实的砂砾层上,利用石块之间的重力作用以及石块接触面间的摩擦力保持稳定,根据几何相似原理,试验采用长度约1 cm砾石以相同的锁结方式铺砌于下游坝坡表面,考虑到缩尺后砾石依靠自身重量与相互作用不能形成稳定下游坡面,试验过程中将砾石块少部分嵌入下游坝坡表面土体中,并使其尽量相互依靠,砾石布置完毕后应用同比配制的胶结土对不同石块间进行加固处理,使其形成一个稳定的整体,模拟实际工程中干砌石块间的锁结作用。④未设置护坡(对照组)。

2.3 试验模型

模型坝体以浙江省新昌县棺材弄水库为原型进行缩尺,开展土石坝漫顶溃决试验。模型坝体高度为 0.3 m,坝顶宽度为 0.1 m,受两岸山体影响,坝轴线长度自坝底 0.35 m 近似线性增至坝顶 0.65 m,顺河向长 1.22 m,上游坡比 1:1.8,下游坡比 1:1.8,马道宽 0.04 m,位于坝体下游侧 0.14 m 高程处。模型坝体具体尺寸设置如图 2 所示。

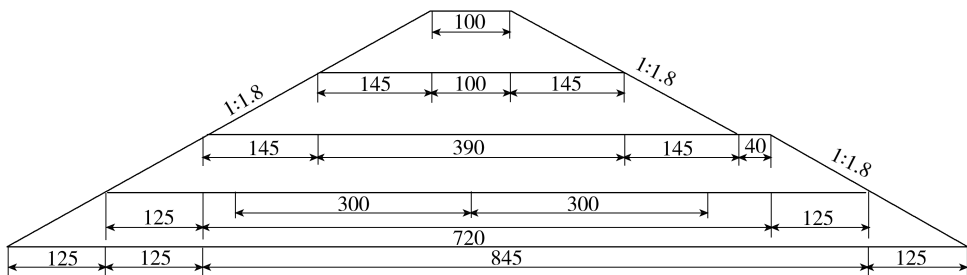


图2 模型坝体剖面示意图(单位:mm)

Fig. 2 Model dam section (unit: mm)

基于现场钻探及室内击实试验获得原型坝填筑土料物理力学性质参数如下:粒径 $2 \sim < 20 \text{ mm}$ 的土料含量为 12.8% (质量分数,下同),粒径 $1 \sim < 2 \text{ mm}$ 的土料含量为 7.2% ,粒径 $0.5 \sim < 1 \text{ mm}$ 的土料含量为 11.6% ,粒径小于 0.5 mm 的土料含量为 68.4% 。坝体填土干密度为 1.35 g/cm^3 ,最优含水率为 28% ,液限 (w_L) 为 39.0% ,塑限 (w_p) 为 25.6% ,土粒比重为 2.72 。原型坝与模型坝填筑土料颗粒级配曲线如图 3 所示。

2.4 试验过程

对于不同工况试验均按照以下步骤进行操作：

- a. 配置筑坝土料。**将第一层土料尽可能薄的均匀摊开,用电动喷壶绕土料均匀喷洒,随后迅速搅拌土

体使其均匀混合,充分混合后再次将土体均匀摊开,继续用喷壶均匀喷洒,循环往复直至达到试验要求含水率。过程中,将砾石与砂加至土料中,充分搅拌至混合均匀,即完成第一层土料配制,其余层土料配置方法相同,尽量避免某处喷水较多、搅拌速度慢以及搅拌不均匀所造成的土体结块现象。

b. 模型坝体填筑。将配好的土料转移至试验水槽内,根据预先绘制好的模型轮廓线进行填筑与压实,确保各组试验土体压实度相同。压实结束后,对除最上一层土料外的其余各层进行刨毛处理,以更好地模拟坝体实际土料间接触情况。完成刨毛后,用塑料布覆盖已填筑坝体,减少水分流失。

c. 埋设测压管。将渗流接头与细管相连,在纱布内铺设一层粒径稍大于渗水孔的细砂,将其包裹在渗流接头上,埋设在预设位置,以防土料细粒阻塞渗水孔。此外,为防止因接头故障导致测压管最终无读数产生,每个测点均通过三通接头接入 2 个渗流接头。

d. 接触部位加固。试验过程中,对于与山体接触处应尽量压实,防止接触不均或存在孔隙导致坝肩渗漏严重影响试验。

e. 绘制监测网格。完成筑坝后,用彩色细砂于坝体下游坝坡绘制出 10 cm×10 cm 网格(图 4),以便监测坝体漫顶溢流过程以及最终溃口深宽。

f. 架设摄像机。

g. 漫顶溃决观察。观察测压管水柱变化情况,当水面较长时间处于稳定状态,则证明渗流场已达到稳定,开始试验。调节阀门开度至流量计示数为试验设计入库流量,试验过程中,需不断向上游水库内撒入彩色小纸片以便监测流速。

h. 试验数据记录与分析。

根据试验步骤建立的 4 组不同护坡材料土石坝缩尺模型如图 4 所示。

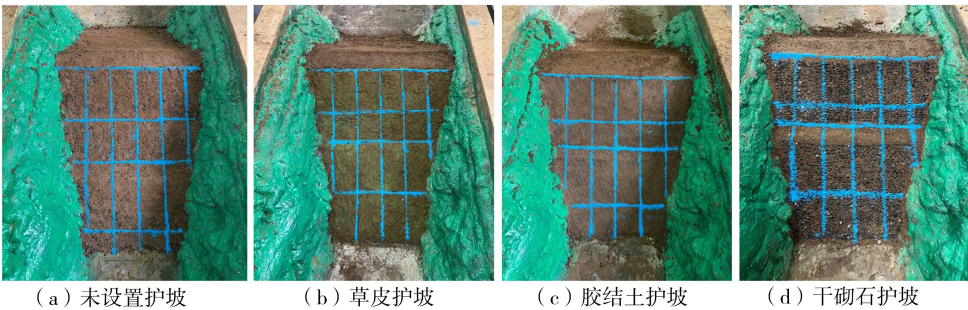


图 4 不同护坡材料土石坝缩尺模型

Fig. 4 Scaled-down model of earth-rockfill dams with different slope protection materials

3 试验结果分析

3.1 渗透压力

原型坝渗压点位分别位于距离上游侧坝脚 15、30、45 m,坝高 3.5 m 处。以未设置护坡组为例,正常运行过程中,数值模拟的浸润线起点位于上水库水面与坝体上游坡面相交处,下游出逸点位于坝高 3.64 m 处(图 5),正常蓄水位 13.35 m

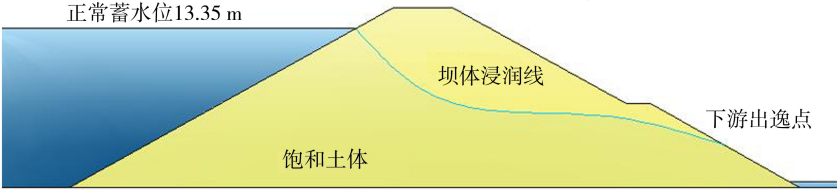


图 5 原型坝体内部数值模拟浸润线分布

Fig. 5 Numerical simulation of distribution of infiltration lines within dam body

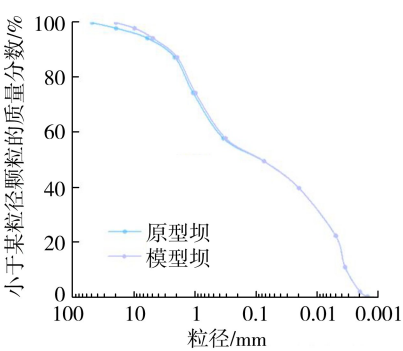


图 3 填筑土料颗粒级配曲线

Fig. 3 Particle gradation curve of fill materials

3 处测点测得渗压水头依次为 11.36、7.69、5.72 m,浸润线整体呈现先迅速降低而后逐渐减缓的趋势。

图 6 为模型坝蓄水至正常蓄水位,坝体内部达到渗流稳定状态后测压管液面高度。由左至右每 3 根测管对应同一监测点,测点分别位于距离上游侧坝脚 30、60、90 cm,坝高 7 cm 处。每组 3 根测管取平均液面高度作为该测点实际渗压水头,依次为 22.3、15.5、11.7 cm。第 2 组测管中存在一根测管与另外 2 根测管液面高度相差较大的情况,原因可能为该处渗流接头受土体细小颗粒阻塞不能准确测定该断面渗压水头,故不考虑该测管液面高度,由另外 2 根测管测定。图 7 为根据实测数据绘制的模型坝内部浸润线分布, x 轴 0 点处对应上游坝坡表面与上游水库水面交界处。从试验测定结果及浸润线下降趋势看,模型试验与原型坝数值模拟结果几乎一致,且符合实际浸润线变化规律,模型试验具有较高可靠性。



图 6 测压管液面高度分布

Fig. 6 Liquid level distribution of piezometer

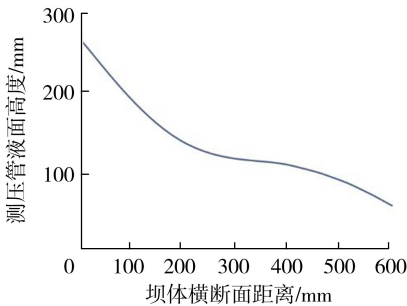


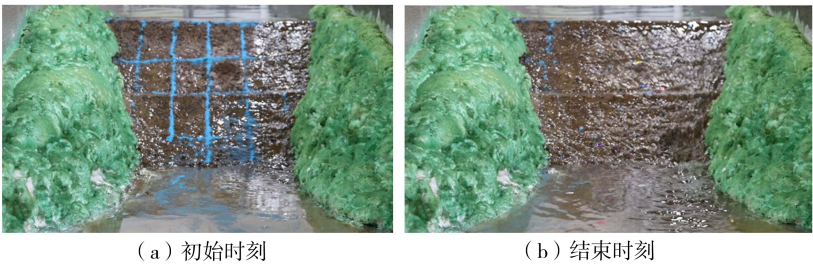
图 7 模型坝内部浸润线分布

Fig. 7 Distribution of infiltration lines within model dam

3.2 漫顶溃坝过程

结合冲蚀特征变化与漫顶水流流速、流量变化,以 t_i 表示漫顶破坏发展至某一程度总历时,可将漫顶破坏过程划分为 4 个主要阶段^[14,18-19]:初始起动阶段($t_0 \sim t_1$)、溯源发展阶段($t_1 \sim t_2$)、加速冲蚀阶段($t_2 \sim t_3$)、冲蚀衰退阶段($t_3 \sim t_4$)。以对照组为例分析未设置护坡土石坝漫顶破坏过程及溃口发展规律。

a. 初始起动阶段。上游库水位不断升高,水流逐渐漫过坝顶流向下游,漫顶溃决过程进入初始起动阶段。漫坝水流率先侵蚀下游坝脚部位,随着冲刷的不断进行,坝脚处薄弱部位土料达到起动条件被水流携带走,坝体整体性遭到破坏,形成初始冲坑(图 8)。

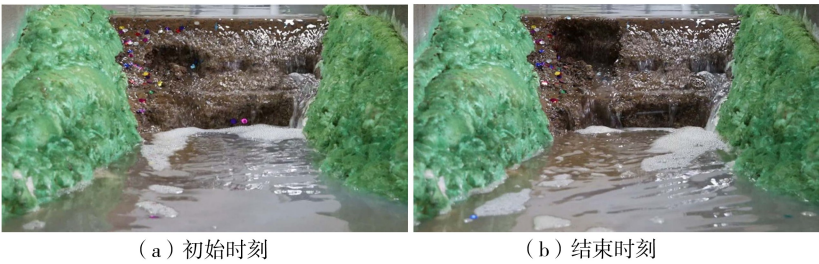


(a) 初始时刻 (b) 结束时刻

图 8 初始起动阶段

Fig. 8 Initial start-up stage

b. 溯源发展阶段。随着时间的推移,初始冲坑上方土料开始逐步松动、流失,冲坑沿坝坡面向上游侧延伸,同时坡面上出现多个陡坎并且边壁发生小规模坍塌,出现多处微小冲坑,侵蚀区域进一步扩大(图 9)。



(a) 初始时刻 (b) 结束时刻

图 9 溯源发展阶段

Fig. 9 Traceability development stage

在漫顶水流的持续作用下,陡坎逐渐发展至下游侧坝顶处,在此过程中,漫坝水流流态稳定,坝体侵蚀速率缓慢,但随着坝顶土体的逐渐脱落,冲坑处水流流速逐渐增大,冲刷程度加剧。当陡坎发展至上游侧坝顶处时,进入下一溃决发展阶段。

c. 加速冲蚀阶段。随着溯源冲刷发展至上游侧坝顶处,上游坝坡后侧土体因水流淘刷大量流失,剩余土料难以支撑水库水体的巨大水压,因而形成贯穿溃口,冲蚀特征开始突变^[20-21]。由于漫坝水流全部流向贯穿溃口,致使坝体下游侧冲刷更为集中,上阶段出现的其余冲坑不再受漫坝水流的侵蚀作用,最终以冲蚀空洞的样式呈现。随着溃口不断扩大,坝体对库区水体的约束能力持续衰减,溃口流量短时间内急剧增大,上游水库水位迅速下降,溃口内同时存在横向扩展与垂直下切 2 种侵蚀形式,溃口尺寸变化明显(图 10)。该阶段持续时间相对较短,主要冲蚀特性表现为溃口全断面高速冲深,漫坝水流流速、流量在此阶段达到峰值。



图 10 加速冲蚀阶段
Fig. 10 Accelerated scour stage

d. 冲蚀衰退阶段。加速冲蚀过后,库区水位下降,水头差不断减小,溃口流量同样开始减小。该阶段溃口仍存在一定展宽态势,但展宽速率相较上一阶段显著减小。随着水位降低,对于整个溃口断面的冲刷侵蚀能力衰减,冲刷终止,床面达到稳定状态(图 11)。



图 11 冲蚀衰退阶段
Fig. 11 Scour recession stage

3.3 溃口断面流量过程

由图 12 可知,在初始溃口发展阶段,断面流量增至稳定状态,漫顶水流持续侵蚀下游坝体,多级陡坎溯源发展至坝顶处,形成贯穿性溃口,水库水体大量涌进,断面流量骤增并逐渐发展至最大,溃口横向、纵向冲刷加剧,筑坝土料随水流以悬移或是推移的方式冲向下游,库水位迅速下降。随后,上游水库总水量不断减少,流量曲线开始下降,最终稳定在与上游入库流量相平衡位置,漫顶溃决过程结束。

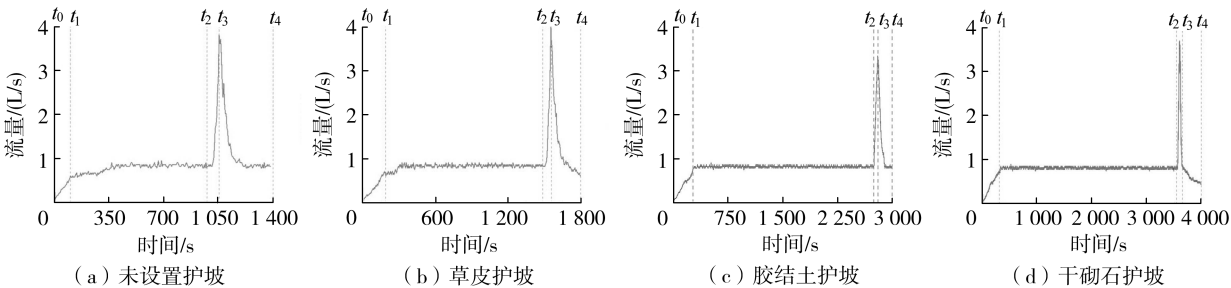


图 12 不同护坡材料土石坝漫顶溃决溃口断面流量过程线
Fig. 12 Flow process line of breach sections of earth-rockfill dams with different slope protection materials during overtopping and failure

3.4 溃口断面平均流速

由图 13 可知,在溃口发展阶段,水流流速存在较大波动,原因是在漫坝水流持续冲刷下游坝体时,由于筑坝土料中掺拌砾石阻碍水流运动以及下游坝坡形成多级“陡坎”以致水流出现流速波动。当初始溃口贯穿坝体上下游,水流流速迅速增加并增至最大,此时对于坝身的侵蚀作用同样最强,之后因上水库水头降低,断面流速逐渐减小,波动情况逐渐缓解,最终达到过流稳定状态。

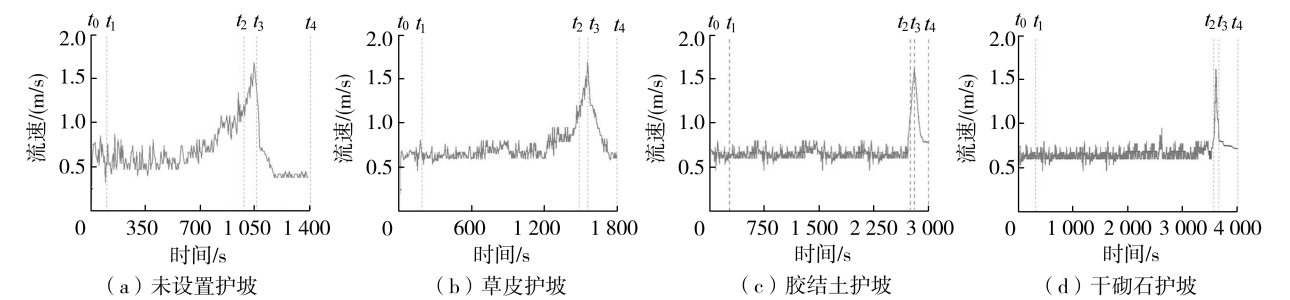


图 13 不同护坡材料土石坝漫顶溃决溃口断面平均流速过程线

Fig. 13 Average velocity process line of breach sections of earth-rockfill dams with different slope protection materials during overtopping and failure

由表 1 可知,溃口最大深度 18.36 cm,坝底处溃口最大冲刷宽度为 20.56 cm,坝顶处溃口最大冲刷宽度为 28.36 cm,溃决过程中溃口最大流速为 1.70 m/s,最大的断面最大流量为 4.026 L/s。应用胶结土与干砌石等抗冲刷性能较强的材料修筑下游护坡可显著削弱漫坝水流的侵蚀作用,有效延长漫溃历时 2~3 倍,溃口最大流速降低约 3%,断面最大流量下降 10%~12%;采用草皮护坡进行防护可稍许延缓漫坝水流侵蚀破坏,但延缓效果相对不明显,延缓历时不足 1 倍。试验中,对照组土料按照 87.2%土体与 12.8%砾石的占比配制,使得坝体填土间黏聚力增大^[22],以致最终溃口横向扩展与垂直下切程度降低,溃口断面最大流速、流量减小,且溃口侧壁近乎直立。后考虑实际工程配料情况,结合水库资料,对于草皮、胶结土以及干砌石组采用 80%土体、12.8%砾石以及 7.2%砂的占比配制填筑土料,开展漫顶溃决模型试验。

表 1 模型坝溃口及水力特性汇总

下游护坡材料	溃口出现时间		漫顶溃决 总历时	溃口宽度/cm		溃口 深度/cm	断面最大 流速/(m/s)	断面最大 流量/(L/s)
	坝顶下游侧	坝顶上游侧		坝顶	坝底			
未设置(对照组)	15 h13 min46 s	16 h21 min44 s	18 h20 min36 s	9.28	9.02	16.18	1.68	3.820
草皮	24 h45 min32 s	25 h50 min12 s	28 h30 min08 s	26.83	20.56	18.36	1.70	4.026
胶结土	45 h32 min10 s	46 h36 min46 s	48 h47 min28 s	25.12	14.38	17.64	1.63	3.332
干砌石	59 h00 min16 s	60 h05 min40 s	62 h15 min52 s	28.36	11.63	17.59	1.63	3.426

试验结果表明,模型坝的漫溃过程符合土石坝溃坝机理,溃口发展过程满足溃口发展规律。随着护坡材料抗冲刷性能增大,溃口出现时间不断推后且发展速度减慢,原因在于漫坝水流自坝顶处流出,在重力作用下经下游坝坡流向下河道,此过程中水流重力势能转变为动能,在坝脚处流速率先达到筑坝土料起动流速,随后向上游侧溯源冲刷直至形成溃口。但在护坡的作用下,土料的起动过程受到限制,当护坡在水流持续冲刷作用下发生破坏后,筑坝土料才会随水流发生悬移或是推移运动,因此坝体受水流侵蚀破坏历时明显延长,断面流量过程线更为平缓,峰值流量更晚出现。但当设置的护坡率先受漫坝水流作用发生破坏后,对于土料起动的限制作用则会减弱甚至消失,故采用不同抗冲刷性能防护材料铺设护坡可有效延长漫顶溃决历时,但在上游来流的持续侵蚀下各工况溃口最终破坏程度相近。

4 结 论

a. 土石坝漫顶溃决主要冲刷过程可分为 4 个阶段:初始起动阶段、溯源发展阶段、加速冲刷阶段和冲刷衰退阶段。各阶段水动力特性与溃口冲刷特性存在明显差异,初始起动阶段与溯源发展阶段历时受护坡材料抗冲刷性能影响较大,而加速冲刷阶段与冲刷衰退阶段历时受材料抗冲刷性影响较小,漫顶破坏发生过程以及溃口横向冲宽、纵向下切深度相近。

b. 应用胶结土与干砌石等抗冲刷性能较强的材料修筑下游护坡可显著削弱漫坝水流的侵蚀作用,有效

延长漫溃历时 2~3 倍,溃口最大流速降低约 3%,断面最大流量下降 10%~12%;采用草皮护坡进行防护可稍许延缓漫坝水流侵蚀破坏,但延缓效果相对不明显,延缓历时不足 1 倍。

参考文献:

[1] 周建银,姚仕明,王敏,等. 土石坝漫顶溃决及洪水演进研究进展[J]. 水科学进展,2020,31(2):287-301. (ZHOU Jianyin, YAO Shiming,WANG Min,et al. Review on overtopping failure and flood evolution of earth-rock dams[J]. Advances in Water Science,2020,31(2):287-301. (in Chinese))

[2] 钟启明,沈光泽,曹伟. 土石坝溃决机理模型试验研究进展[J]. 防灾减灾工程学报,2018,38(4):615-623. (ZHONG Qiming,SHEN Guangze,CAO Wei. Review on the model tests for earth-rock dam breach[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2018,38(4):615-623. (in Chinese))

[3] CHEN Shengshui,FANG Xushun,ZHONG Qiming,et al. Centrifugal model tests and numerical simulations for break of earth-rock dams due to overtopping[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(5):922-932.

[4] 陈生水,钟启明,曹伟. 黏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,2011,22(5):674-679. (CHEN Shengshui,ZHONG Qiming,CAO Wei. Centrifugal model test and numerical simulation of the breaching process of clay core dams due to overtopping[J]. Advances in Water Science,2011,22(5):674-679. (in Chinese))

[5] 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.

[6] 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 Jianyun,LI Yun,XUAN Guoxiang,et al. Overtopping breaching of cohesive homogeneous earth dam with different cohesive strength[J]. Science in China Series E:Technological Sciences,2009,39(11):1881-1886. (in Chinese))

[7] 罗优,陈立,平妍容,等. 土石坝漫顶溃决模式与溃坝参数预测[J]. 长江科学院院报,2016,33(2):38-41. (LUO You, CHEN Li,PING Yanrong,et al. Impact of overtopping breach mode on dam-break parameters of homogeneous earth-rock dams [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2016,33(2):38-41. (in Chinese))

[8] 罗优,陈立,郝婕妤,等. 均质土石坝不同因素与漫顶破坏模式的内在联系[J]. 武汉大学学报(工学版),2014,47(5):610-614. (LUO You,CHEN Li,HAO Jieyu,et al. Impact of different factors on dam break mode of homogeneous earth-rock dams[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2014,47(5):610-614. (in Chinese))

[9] 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))

[10] 张大伟,权锦,何晓燕,等. 堰塞坝漫顶溃决试验及相关数学模型研究[J]. 水利学报,2012,43(8):979-986. (ZHANG Dawei,QUAN Jin,HE Xiaoyan,et al. Experimental and numerical investigation on overtopping breaching of barrier dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(8):979-986. (in Chinese))

[11] 王立即. 无黏性土石坝漫顶溃决水槽试验研究[J]. 低温建筑技术,2020,42(10):118-120. (WANG Liji. Experimental research on overtopping breach flume of cohesionless earth rock dam[J]. Low Temperature Architecture Technology,2020,42(10):118-120. (in Chinese))

[12] 王秋生,王洪洋,苏瑞林. 加筋无黏性土石坝漫顶溃坝试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2017,15(4):263-271. (WANG Qiusheng,WANG Hongyang,SU Ruilin. Experimental study on overtopping of geotextile-reinforced noncohesive embankments[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2017,15(4):263-271. (in Chinese))

[13] 张露澄,钟启明,杨蒙,等. 堰塞坝漫顶溃决离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(增刊1):197-200. (ZHANG Lucheng,ZHONG Qiming,YANG Meng,et al. Centrifugal model tests on overtopping-induced breaching of landslide dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(Sup1):197-200. (in Chinese))

[14] 成泽霖,夏云峰,徐华,等. 堰塞体漫顶溃决溃口冲蚀特性试验研究[J]. 水利水运工程学报,2024(3):14-23. (CHENG Zelin,XIA Yunfeng,XU Hua,et al. Experimental investigation on the erosion characteristics of landslide dam failure induced by overtopping[J]. Hydro-Science and Engineering,2024(3):14-23. (in Chinese))

[15] 赵振兴,何建京. 水力学[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2010.

[16] 陈淑婧,王秋生,于沐,等. 土石坝漫顶溃决模型的分析比较[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(5):406-411. (CHEN Shujing,WANG Qiusheng,YU Shu,et al. Comparative analysis of models for overtopping-induced earth-rock dam breach [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2016,44(5):406-411. (in Chinese))

[17] 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))

[18] 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))

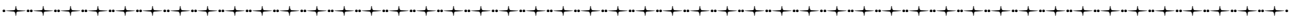
[19] 翟巍昆,易富,杜常博,等. 尾矿坝漫顶溃决溃口纵向演化与侵蚀试验[J]. 水利水电科技进展,2023,43(5):45-52. (ZHAI Weikun,YI Fu,DU Changbo,et al. Longitudinal evolution of breach and erosion tests for tailings dam overtopping failure[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(5):45-52. (in Chinese))

[20] ZHOU G G D,ZHOU Mingjun,SHRESTHA M S,et al. Experimental investigation on the longitudinal evolution of landslide dam breaching and outburst floods[J]. Geomorphology,2019,334:29-43.

[21] 俞振钊,彭辉,韩凯,等. 均质黏性土坝漫顶溃决过程试验研究[J]. 水电能源科学,2020,38(7):99-102. (YU Zhenzhao,PENG Hui,HAN Kai,et al. Experimental study on collapse process of homogeneous cohesive earth dam[J]. Water Resources and Power,2020,38(7):99-102. (in Chinese))

[22] 梁军,陈晓静. 纵向增强体土石坝漫顶溢流安全性能分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(3):238-242. (LIANG Jun,CHEN Xiaojing. Analysis on the overtopping safe operation performance of longitudinal reinforced rockfill dam[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(3):238-242. (in Chinese))

(收稿日期:2024-08-21 编辑:刘晓艳)



(上接第 81 页)

[20] 李占杰,陈基培,刘艳民,等. 土壤水分遥感反演研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(3):474-481. (LI Zhanjie,CHEN Jipei,LIU Yanmin,et al. Soil moisture retrieval from remote sensing[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2020,56(3):474-481. (in Chinese))

[21] XU Lei,CHEN Nengcheng,ZHANG Xiang,et al. Improving the North American multi-model ensemble (NMME) precipitation forecasts at local areas using wavelet and machine learning[J]. Climate Dynamics,2019,53(1/2):601-615.

[22] 马春辉,侯媛媛,杨杰,等. 基于 RUN-XGBoost 算法的土石坝渗流预测模型[J]. 水利水电科技进展,2024,44(2):72-78. (MA Chunhui,HOU Yuanyuan,YANG Jie,et al. Seepage prediction model of earth-rockfill dams based on RUN-XGBoost algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(2):72-78. (in Chinese))

[23] JABEUR S B,GHARIB C,MEFTEH-WALI S,et al. CatBoost model and artificial intelligence techniques for corporate failure prediction[J]. Technological Forecasting and Social Change,2021,166:120658.

[24] 张珂,牛杰帆,李曦,等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比[J]. 水资源保护,2021,37(1):28-35. (ZHANG Ke,NIU Jiefan,LI Xi,et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China's semi-arid and semi-humid regions[J]. Water Resources Protection,2021,37(1):28-35. (in Chinese))

[25] XIAO Changjiang,CHEN Nengcheng,HU Chuli,et al. Short and mid-term sea surface temperature prediction using time-series satellite data and LSTM-AdaBoost combination approach[J]. Remote Sensing of Environment,2019,233:111358.

[26] 张宏鸣,陈丽君,刘雯,等. 基于 Stacking 集成学习的夏玉米覆盖度估测模型研究[J]. 农业机械学报,2021,52(7):195-202. (ZHANG Hongming,CHEN Lijun,LIU Wen,et al. Estimation of summer corn fractional vegetation coverage based on stacking ensemble learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(7):195-202. (in Chinese))

[27] 邓小东,王宏全. 土壤水分微波遥感反演算法及应用研究进展[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2022,48(3):289-302. (DENG Xiaodong,WANG Hongquan. Recent advances on algorithms and applications of soil moisture retrieval from microwave remote sensing[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences),2022,48(3):289-302. (in Chinese))

[28] 李明星,马柱国. 中国气候干湿变化及气候带边界演变:以集成土壤湿度为指标[J]. 科学通报,2012,57(28/29):2740-2754. (LI Mingxing,MA Zhuguo. Soil moisture-based study of the variability of dry-wet climate and climate zones in China[J]. Chinese Science Bulletin,2012,57(28/29):2740-2754. (in Chinese))

[29] DU J,KIMBALL J S,JENCOS K,et al. Machine-learning based multi-layer soil moisture forecasts-an application case study of the Montana 2017 flash drought[J]. Water Resources Research,2024,60(10):e2023WR036973.

(收稿日期:2024-08-22 编辑:刘晓艳)