

堰塞体漫顶溃决溃口冲蚀特性试验研究

成泽霖, 夏云峰, 徐华, 吴道文, 闻云呈, 刘祺

Experimental investigation on the erosion characteristics of landslide dam failure induced by overtopping

CHENG Zelin, XIA Yunfeng, XU Hua, WU Daowen, WEN Yuncheng, LIU Qi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20230704001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

土坝溃决跌坎水流水动力特性数值模拟

Numerical study of hydrodynamic characteristics of dam-break headcut flow

水利水运工程学报. 2017(5): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.05.001>

窄深河谷近坝库岸滑坡涌浪特性及传播规律

Surge characteristics and propagation of landslide near the dam in narrow river valley

水利水运工程学报. 2021(5): 120 <https://doi.org/10.12170/20210416001>

黄土地基地下连续墙基础竖向抗压特性试验研究

Experimental study on vertical compressive bearing capacity of underground diaphragm wall foundation in loess area

水利水运工程学报. 2018(5): 89 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.013>

齐齐哈尔地区粉质黏土冻胀特性试验研究

Experimental study on frost heaving characteristics of silty clay in Qiqihar region

水利水运工程学报. 2020(4): 80 <https://doi.org/10.12170/20200106005>

高速明渠流条件下高性能加筋草皮抗侵蚀特性研究

Experimental studies of anti-erosion ability of high-performance reinforced turf on high-speed open channel

水利水运工程学报. 2018(6): 77 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.06.010>

混凝土冻融劣化后动态单轴抗压特性试验研究

Experimental studies of dynamic uniaxial compressive properties of concrete after freeze-thaw deterioration

水利水运工程学报. 2017(6): 69 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.010>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20230704001

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))

堰塞体漫顶溃决溃口冲蚀特性试验研究

成泽霖^{1,2}, 夏云峰¹, 徐华¹, 吴道文¹, 闻云呈¹, 刘祺¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098)

摘要: 针对堰塞体漫顶溃决室内试验中库容普遍过小的现状, 开展了较大库容下堰塞体漫顶溃决试验, 观测分析了溃口冲蚀特性和演化规律。研究结果显示堰塞体漫顶溃决的冲蚀过程可分为初始阶段、加速冲蚀阶段和减速冲蚀阶段, 各阶段动力特性和冲蚀特性均有显著差异。初始阶段冲蚀特性表现为局部跌坎的溯源冲刷, 加速冲蚀阶段为全断面高速下切, 减速冲蚀阶段为上游冲刷下游淤积。溃决期间侵蚀速率峰值出现在溃决加速阶段, 同时溃口流量峰值总是滞后于侵蚀速率峰值。初始坡比 1:3 条件下, 在初始阶段与减速冲蚀阶段堰塞体下游坡面坡度持续变缓, 在加速冲蚀阶段则先变陡后变缓; 坝顶坡度在初始阶段变陡, 在加速冲蚀阶段和减速冲蚀阶段不断变缓。冲刷历时方面, 上游入库流量变化对初始阶段历时存在较大影响, 但对加速冲蚀阶段和减速冲蚀阶段影响较小。初始阶段泄流槽内局部抗冲刷能力较强的材料会阻碍溯源冲刷发展, 对该阶段历时产生一定影响。研究结果有助于深入认识堰塞体漫顶溃决机制, 并为相关防洪减灾工作提供参考。

关键词: 堰塞坝; 库容; 冲蚀特性; 宽级配材料; 溃决历时; 纵向形态演化

中图分类号: TV144

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2024)03-0014-10

堰塞体是一类由降雨、地震、融雪和火山喷发等因素诱发斜坡失稳, 阻塞山谷河道, 造成上游壅水的天然土石坝。通常这类结构表面未经充分压实, 结构较为松垮, 堆积体材料粒径从 10~20 m 的大块岩石到黏土均有分布^[1], 表现出宽级配特征, 渗流和力学稳定性较差。中国西南高原深谷险壑众多, 地震频发, 因此饱受堰塞体堵江灾害困扰。2008 年“5.12”汶川大地震形成了 250 余处堰塞体, 其中唐家山堰塞湖受到了社会广泛关注; 2014 年, 云南鲁甸 6.5 级地震诱发金沙江支流两岸崩塌形成红石岩堰塞体; 2018 年, 金沙江上游和雅鲁藏布江下游分别两次堵江形成了白格堰塞体和加拉堰塞体。堰塞体堵江形成的堰塞湖, 具有集雨面积广、蓄水量大等特点, 由于缺乏必要的洪水溢流设施, 大部分堵江堰塞体极易发生溃决, 对下游地区生命财产和基础设施构成严重威胁^[2-3]。堰塞体溃决是高速非恒定流对坝体冲刷的复杂过程, 涉及水力学、土力学、泥沙动力学及水土力学等问题^[4]。自然条件下, 堰塞体的溃决模式包括漫顶冲刷、渗流破坏和边坡失稳。其中, 漫顶冲刷是指水位受堰塞体阻挡抬高, 水流漫坝后冲蚀坝顶及下游坝坡, 使得坝体变薄、变低, 最终导致坝体溃决^[5]。统计研究^[6]表明, 超过 90% 的堰塞体破坏模式为漫顶冲刷。

鉴于堰塞体漫顶溃决带来的巨大威胁, 科学模拟堰塞体溃决过程并准确预测溃口溃决流量, 一直是国内外研究的焦点^[7-8]。由于堰塞体形成地区地质环境险恶, 溃决现场水情复杂, 难以直接获取溃口的发展过程及水力学信息^[9], 因此, 当前对堰塞体漫顶溃决溃口冲蚀特性和演化规律的认识主要依赖物理模型手段。近 10 年来, 国内外已开展了众多模型试验, 探究了堰塞体冲蚀过程与边界条件^[10]、坝体结构^[11-13]、材料特征^[14-15]等因素的关系, 并根据溃口水动力和形态变化, 将复杂的堰塞体漫顶溃决非恒定动态冲蚀过程划分

收稿日期: 2023-07-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2040221); 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3204504)

作者简介: 成泽霖(1995—), 男, 江西高安人, 博士研究生, 主要从事河流泥沙研究。E-mail: zlcheng@nhri.cn

通信作者: 夏云峰(E-mail: yfxia@163.com)

为不同的发展阶段^[16]。虽然不同学者对发展阶段的划分存在一定差异,但总体上表现为起始阶段-加速阶段-稳定阶段。然而,也有学者认为现有室内水槽试验得出的部分结论与实际大型堰塞体溃决过程存在差异^[17],并认为现有试验未能正确模拟库容是导致冲蚀过程不相似的重要原因之一。受试验场地限制,以往大部分堰塞坝漫顶溃决试验库容偏小,未能模拟较大库容条件下的溃决过程。因此有必要开展大库容堰塞体泄流溃决试验,以更准确地探究大型堰塞体漫顶溃决不同阶段的演化机制与影响因素^[2]。近年来,试验中的库容问题开始受到关注,一些大库容漫顶溃决试验研究^[13]已相对真实和完整地反映了堰塞体溃决过程,然而,溃口的水下实时演化特征仍然值得深入探索。为此,本文采用侧面设置泄流槽的方式开展了室内大库容堰塞体泄流冲刷试验,观测泄流通道冲蚀发展过程,分析溃口在不同溃决阶段的冲蚀特性及演化规律,以期揭示大型堰塞坝漫顶溃决溃口发展的物理全过程。

1 试验设计

试验系统主要由地下水库、供水系统、上游水库、试验水槽及下游沉砂池组成,平面布置如图1(a)所示。水槽试验段长40 m,宽1 m,高1 m,坡降1:200,其中钢化玻璃观测段长3 m。试验过程中上游入库流量通过转子流量计控制保证流量稳定。堰塞体上下游水位变化通过超声波水位仪进行测量,测量精度为0.1 mm,采样频率为1 Hz,其中在坝体上游设置3台,坝体下游设置2台。为了多角度记录漫顶溃决过程,在坝体正面、背面和玻璃观测段正对面各设置1台摄像机。

堰塞体模型布置于水槽观测段,模型以“1103”白格堰塞体为原型进行概化。坝体高 $H_d = 0.4$ m,顺河向长 $L_d = 2.7$ m,垂直河向宽 $W_d = 1$ m,坝顶长0.3 m,坝体体积 $V_d = 0.6$ m³;下游坡比1:3,上游坡比1:3。在玻璃观测段一侧(顺流向右侧)预开挖泄流槽,模拟以玻璃观测面为中心对称面的一半坝体的溃决过程。泄流槽坡降为0,断面形状为倒梯形,顶宽10 cm,底宽5 cm,高5 cm,如图1(b)所示。

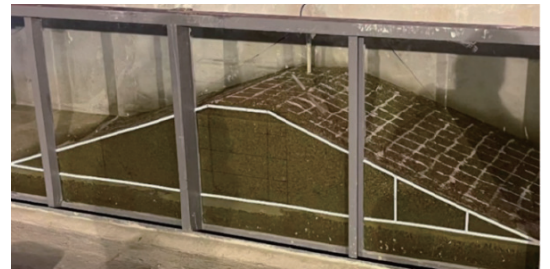
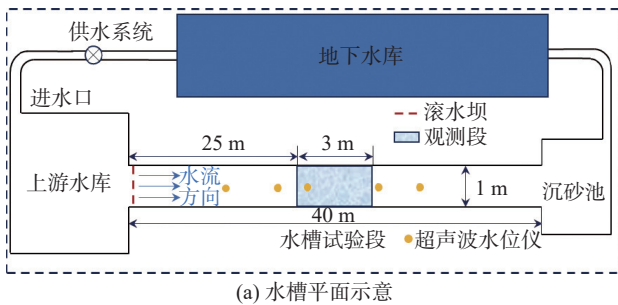


图1 水槽平面示意和堰塞体模型照片

Fig. 1 The schematic plan of water flume and photograph of landslide dam models

Peng等^[18]通过分析全球堰塞体数据集提出了一系列无量纲系数以表征天然堰塞体,包括无量纲坝体体积 $V_d^{1/3}/H_d$,无量纲坝高 H_d/L_d 和无量纲库容 $V_1^{1/3}/H_d$ 。通过对比模型无量纲数与天然堰塞体无量纲数,可以确定模型尺寸设计的合理性。表1统计了部分堰塞坝漫顶溃决试验文献中参数设置,对比大型堰塞体如唐家山堰塞体与白格堰塞体的无量纲库容(分别为8.43和8.30),可见现有大部分室内试验库容偏小。本次试验无量纲库容 $V_1^{1/3}/H_d$ 为5.4,相较以往多数室内试验,一定程度改善了库容过小的问题。此外,坝高无量纲数 $H_d/W_d = 0.15$ 与坝体体积无量纲数 $V_d^{1/3}/H_d = 2.1$ 均与天然堰塞坝无量纲数接近^[10],证明模型坝体尺寸设计合理。

表1 部分文献中堰塞坝漫顶溃决模拟试验设置

Tab. 1 Experimental parameters for simulated tests of landslide dam breaching due to overtopping in selected literature

文献	水槽坡降	坝高/m	下游坡比	中值粒径/mm	库容/m ³	$V_d^{1/3}/H_d$
张婧等 ^[11]	0.003	0.3	1:2~1:4	1.5~3.0	0.48	2.61
杨阳等 ^[19]	0.003	0.3	1:2.5	2.85		
邓明枫等 ^[14]	0.050	0.4	1:2.1	4.0		
王道正等 ^[15]	0.030	0.6	1:1.5	5.4~9.2		
刘磊等 ^[20]		0.1~0.2	1:1.5~1:2.5	0.15	0.33~0.66	4.3
谢忱等 ^[21]		0.4	1:4	2.0	2.3	3.3
黄卫等 ^[13]		1	1:3~1:6	0.69	238	6.2

堰塞体材料组成与物质来源及滑坡过程密切相关,是影响试验结果的重要因素之一。由于堰塞体材料根据相似比尺缩放后会产生黏性,难以满足泥沙运动相似条件,因此本次试验主要开展定性研究。大多模型试验对材料的选择方法也表明,研究坝体溃决过程须放宽相似准则^[22],关注宏观溃决过程。现场调查^[9]显示占白格堰塞体顶面70%的碎石土中值粒径为9~37 mm,占堰塞体顶面30%的粉土质砾区中值粒径约4.1 mm。为了更准确地复现堰塞体漫顶溃决动态非恒定冲蚀过程,本次试验参考白格堰塞体粉土质砾区级配配制了中值粒径 $d_{50} = 5$ mm、粒径几何标准差 $\sigma_g = d_{84}/d_{16} = 48$ 的无黏性筑坝材料,可基本反映天然堰塞体宽级配特征(图2)。泥沙颗粒的起动沉降特性与颗粒的几何形态密切相关,由于实际堰塞体材料来源主要为山体滑坡,表面多不规则,因此筑坝材料选用山石破碎后的米砂,而未选用常年受水流冲刷表面较圆润的河道泥沙。使用不同孔径的筛网对原料进行筛分,得到各级材料(图3)。

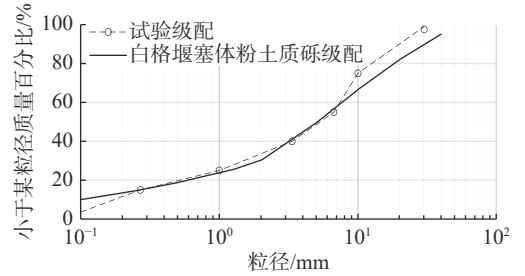


图2 坝体材料级配曲线

Fig. 2 The gradation curves of dam materials

泥沙颗粒的起动沉降特性与颗粒的几何形态密切相关,由于实际堰塞体材料来源主要为山体滑坡,表面多不规则,因此筑坝材料选用山石破碎后的米砂,而未选用常年受水流冲刷表面较圆润的河道泥沙。使用不同孔径的筛网对原料进行筛分,得到各级材料(图3)。



图3 筑坝材料

Fig. 3 Dam materials

试验准备阶段将各级粒径材料按预设质量混合,搅拌均匀后倾倒入水槽中进行筑坝。筑坝完成后在坝体表面绘制 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 方格以便后续数据处理。每组试验后,将试验材料收集烘干,再次对筑坝材料进行筛分并对各级材料称重。为确保各工况筑坝材料级配一致,根据预设质量补充各级材料损失(主要为细颗

粒)的质量, 后将材料重新搅拌均匀并筑坝, 以便开展下一组试验。本次试验共设计了 3 组不同入库流量工况, 各组试验坝体参数、材料级配、土体干密度、开槽位置均基本一致, 具体试验参数如表 2 所示。

表 2 试验参数
Tab. 2 Experimental parameters

工况	坝体体积/m ³	密度/(g/cm ³)	库容/m ³	入库流量/(m ³ /s)	峰值流量/(m ³ /s)	初始阶段历时/s	加速冲蚀阶段历时/s	减速冲蚀阶段历时/s	总历时/s
1	0.6	1.67	10.09	0.003	0.044	184	70	225	479
2	0.6	1.67	10.09	0.006	0.050	125	60	245	430
3	0.6	1.68	10.09	0.015	0.064	32	75	245	352

2 漫顶溃决动态冲蚀过程

图 4 展示了不同工况下溃口流量、库区水位及相对水位变化率的过程线。结合冲蚀特征变化、溃口流量变化和上游水位变化, 可将冲蚀过程划分为 3 个主要阶段: 阶段 I 初始阶段(t_1-t_2)、阶段 II 加速冲蚀阶段(t_2-t_3)和阶段 III 减速冲蚀阶段(t_3-t_4)。不同阶段在图 4 中以不同颜色背景进行区分。试验结果表明, 上游入库流量越大, 峰值流量越大, 初始阶段历时越短, 而加速冲蚀阶段和减速冲蚀阶段历时差别较小。分析多角度溃决过程录像发现, 虽然总溃决历时存在较大差别, 但各工况在不同阶段的冲蚀特性及溃口最终形态基本一致, 因此以工况 1 溃决过程为例, 对动态冲蚀过程进行分析。

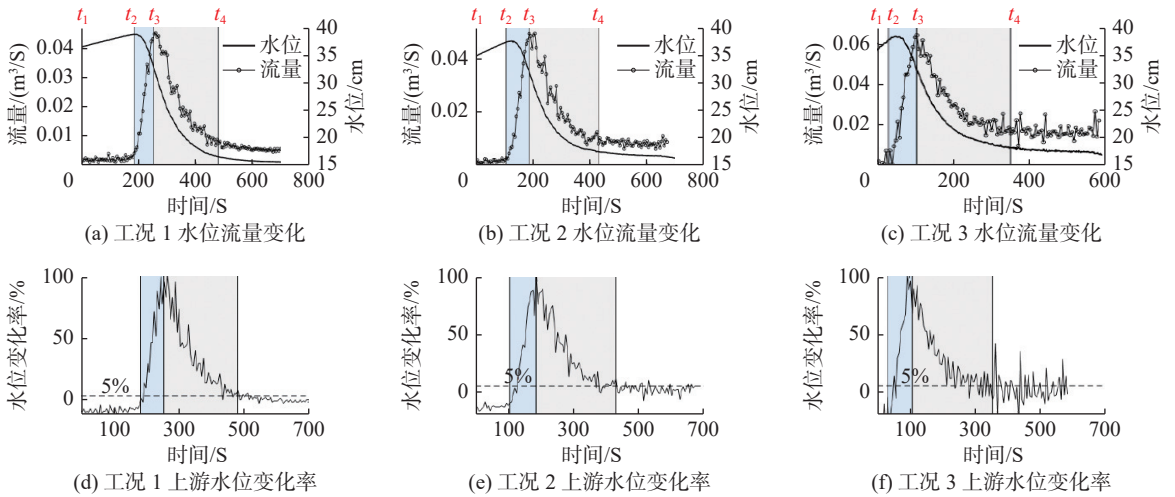


图 4 不同工况水位流量、水位变化率过程线

Fig. 4 Hydrographs depicting discharge, water level, and water level change rate under various conditions

2.1 初始阶段

泄流通道贯通后(图 5(a)), 堰塞坝漫顶溃决过程进入初始阶段。该阶段中, 溃口流量较为稳定, 上游入库流量大于溃口流量, 因此库区水位持续抬升, 相对水位变化率为负值。在下游坡面, 水流漫流并发生侵蚀, 逐渐形成喇叭状侵蚀粗化区域(图 6(a)), 同时流道开始呈弯曲分汊形态(图 6(b))。随着时间推移, 水流持续侵蚀, 坡面上出现多个陡坎并向上游发展, 同时溃口边壁发生小规模崩塌, 喇叭状侵蚀区域逐渐扩大。当陡坎发展至上游库区时, 泄流通道进口开始展宽冲深, 溃口流量及流速骤然增大, 溃决过程进入下一发展阶段。

该阶段的主要冲蚀形式表现为溯源冲刷, 但试验中观测到的溯源冲刷过程并不连续, 总是间歇性地向上游快速发展一定距离, 随后又进入缓慢冲刷状态。这一现象主要是因为试验坝体材料中的大颗粒砾石($10.0\text{ mm} < d \leq 30.0\text{ mm}$)的影响。该阶段溃口流速较小, 水流对细颗粒的选择性侵蚀导致粗颗粒在流道中停留, 在大颗粒砾石位置处易形成陡坎(图 5(c)), 使流道呈锯齿状。随着冲刷发展势能集中, 受跌落水流的

冲击和紊动作用影响,陡坎坎脚不断受淘刷,最终使得陡坎崩解,溯源过程得以快速向上游推进,直到上游再次形成陡坎,阻碍溯源冲刷发展。与前人试验^[11]观测到的“全程剥蚀”式溯源冲刷不同,这一现象表现出显著的局部跌坎式溯源冲刷特征^[23]。分析原因可能是前人试验中筑坝材料粒径相对较小,无法在冲蚀过程中形成较为稳定的局部跌坎来阻碍溯源冲刷过程。在实际大型堰塞体泄流冲刷过程中,也曾观测到类似溯源冲刷现象,唐家山堰塞体距离进口 320~380 m 处,有一抗冲刷能力较强的中-薄层碎裂岩组成的小石梁,当溯源冲刷发展至该位置时,陡坎发展速率较慢,而当溯源冲刷发展至小石梁上游时,陡坎后退速率显著加快^[24]。上述现象表明,在堰塞体漫顶溃决初始阶段中,泄流槽内的局部抗冲刷能力对冲蚀过程影响较大,因此堰塞体材料的非均匀性和分布随机性可能是影响该阶段历时的关键。

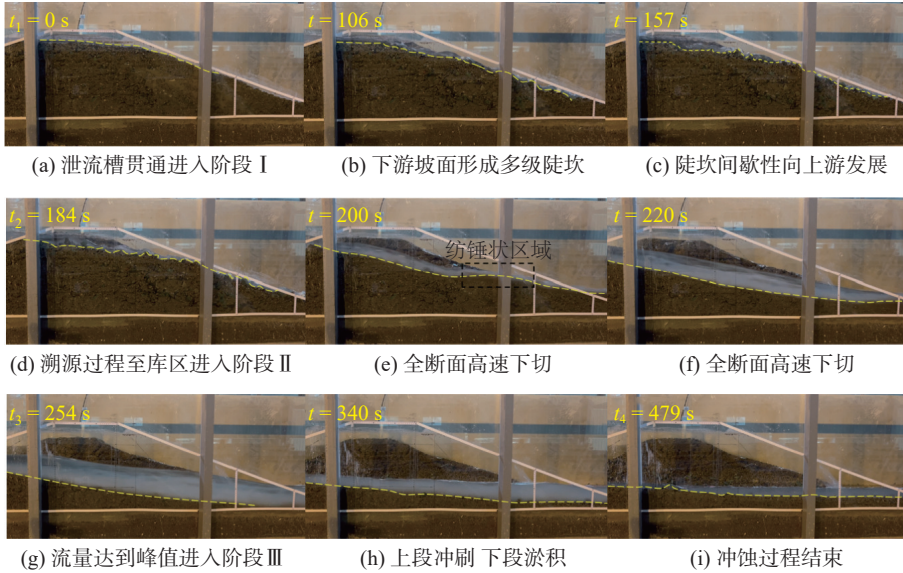


图 5 工况 1 纵断面演化过程

Fig. 5 Longitudinal evolution processes of Case 1

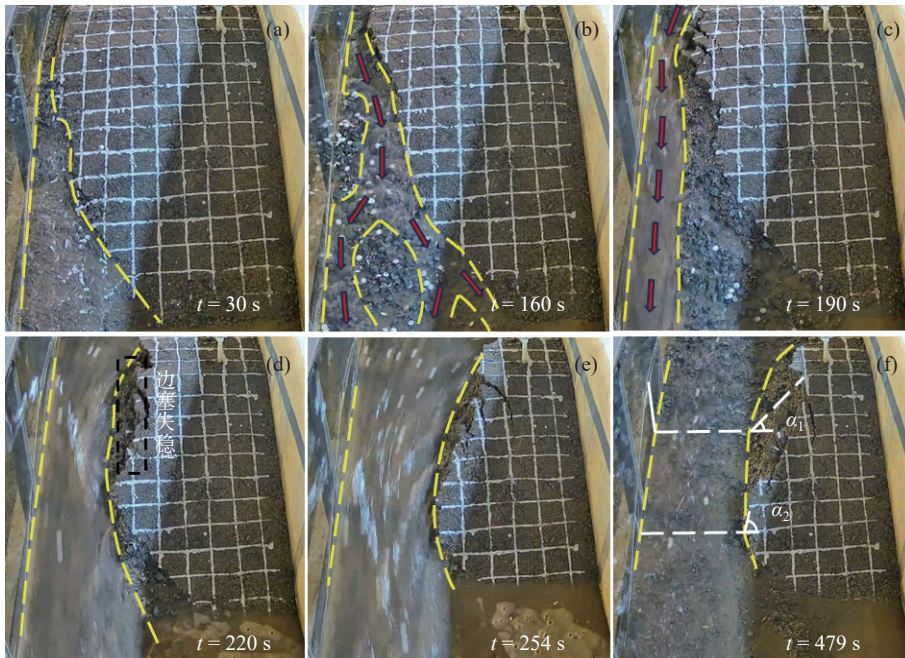


图 6 工况 1 下游坡面演化过程

Fig. 6 Evolution processes of the downstream slope in Case 1

2.2 加速冲蚀阶段

进入加速冲蚀阶段后 (图 5(d)), 溃口冲蚀特征开始突变。随着进口扩大, 对库区水体的束窄能力不断减弱, 溃口流量短时间内急剧增大, 上游水位加速下降, 直至溃口流量到达峰值。在初始阶段末期, 流道已开始趋于顺直, 进入加速冲蚀阶段后流道已完全顺直 (图 6(c)), 这与金沙江白格堰塞体溃流过程观测到的下游裁弯取直时间节点相一致^[25]。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。坝体纵向剖面较为平滑 (图 5(e~f)), 同时也观测到 Zhou 等^[10]发现的纺锤形断面冲蚀特征。此阶段溃口侧面土体不断失稳崩塌 (图 6(d)), 溃口顶部宽度持续扩大。上游进口则以弧形形态不断向坝体上游侵蚀后退, 如图 7 所示。当溃口流量达到峰值后, 进口平面形态的高速发展趋势减缓, 溃决过程进入下一阶段。

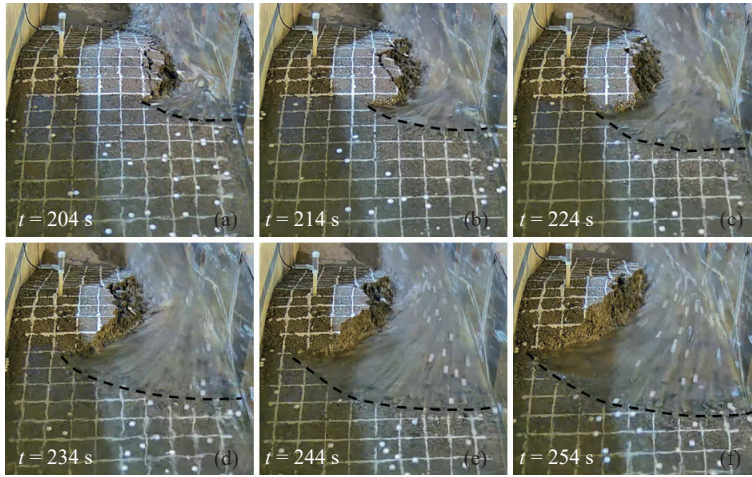


图 7 工况 1 上游坡面演化过程

Fig. 7 Upstream slope evolution processes of Case 1

2.3 减速冲蚀阶段

进入减速冲蚀阶段后, 溃口流量开始减小, 库区水位持续下降, 但水位下降速率不断减小。该阶段溃口仍表现出一定展宽态势, 流道沿程侧面土体仍有失稳坍塌现象, 但展宽速率相较上一阶段显著减小。随着水位降低, 平面上弧形进口仍然受冲蚀后退, 后退速率较前一阶段减小。

与加速冲蚀阶段的纵断面全线下切不同, 减速冲蚀阶段的纵断面特征表现为上游冲刷下游淤积 (图 5(g)~(h)), 流道坡度不断减小, 冲刷态势整体上趋缓。当水位变化速率接近 5% 时, 水体浑浊度显著降低 (图 5(i)), 这表明水体含沙量降低, 悬移质运动能力大幅下降, 观察发现床面仍有部分细颗粒发生推移质运动, 床面逐渐粗化, 但溃口形态基本不再变化, 整体上冲蚀过程已结束。冲蚀结束后的残坝图像 (图 6(f)) 显示, 溃口的最终形态普遍呈倒梯形。其中, 坝体下游坡面溃口边坡坡度沿纵断面不断增大, 至泄流通道口处时溃口最终形态几乎呈矩形。

3 漫顶溃决冲蚀特性及演化规律

3.1 平面冲蚀特性及演化规律

堰塞体漫顶溃决冲蚀过程显示, 溃口形态在不同阶段及不同位置的演化特征存在显著差异。图 8 展示了工况 1 坝体溃决平面演化的过程, 即坝体各断面顶部展宽过程。该发展过程与 Zhang 等^[26]提出的演化模型基本一致。初始阶段, 主要变化发生在

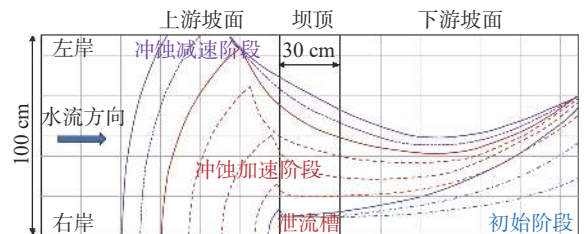


图 8 工况 1 平面演化示意

Fig. 8 Plane evolution diagrams of Case 1

下游坡面。进入加速冲蚀阶段后,溃口展宽速率在泄流通道进口处最大,沿程展宽速率自上游至下游不断减小,与此同时,进口位置随着冲蚀发展不断向上游移动。进入减速冲蚀阶段后,沿程展宽速率自上游至下游先增大后减小,最大展宽速率位于坝顶上段,同时进口位置仍在向上游移动,但移动速率不断减小,直至冲蚀结束。

3.2 纵向冲蚀特性及演化规律

图 9 为工况 1~3 的溃口纵断面冲蚀过程,其冲蚀特性可总结如下:初始阶段(黑色线段),起始下游坡面与坝顶交界处下切并出现陡坎,随后陡坎以溯源冲刷形式向上游发展;加速冲蚀阶段(红色线段),泄流通道全断面高速下切;减速冲蚀阶段(蓝色线段),冲蚀速率不断减小,纵向剖面显示出上段冲刷、下段淤积的特点,残余坝体坡度不断减小。

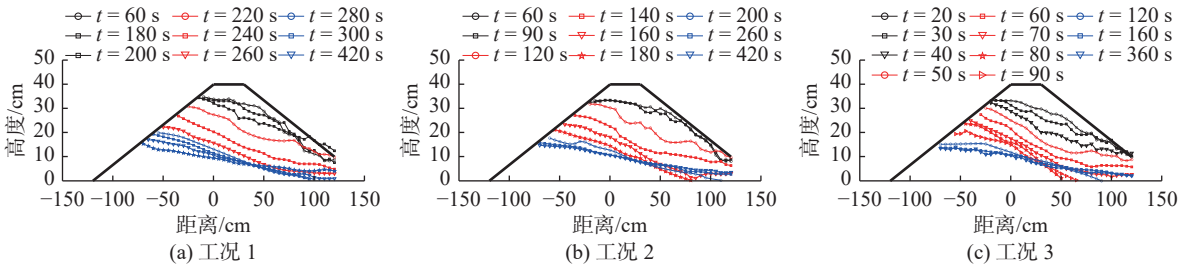


图 9 纵断面演化过程

Fig. 9 Longitudinal evolution processes

上述试验观测到的冲蚀特性与现有大多数纵断面演化模式^[10, 27-30]存在差异,主要表现在减速冲蚀阶段的上冲下淤现象。以往绝大多数室内试验^[11-12, 31]并未观测到减速冲蚀阶段纵向剖面上冲下淤的特征,该现象仅在大型野外试验中^[9]有过记录。因此,可以推测上游水量不足可能会导致冲蚀过程历时过短,使得减速冲蚀阶段与天然堰塞坝漫顶溃决过程不相似,进而对堰塞体漫顶溃决纵向演化规律的理解产生偏差。

图 10(a) 统计了工况 1 中断面 M 和断面 N(断面位置如图 10(a) 所示)的垂向侵蚀下切速率。可以发现主要侵蚀过程发生在加速冲蚀阶段前后,断面 M 与断面 N 的侵蚀速率峰值较为接近,分别为 3.7 和 4.0 mm/s。上游断面 M 侵蚀速率出现峰值的时刻要晚于下游 N 断面,二者侵蚀速率出现峰值时刻均早于洪峰流量时刻。

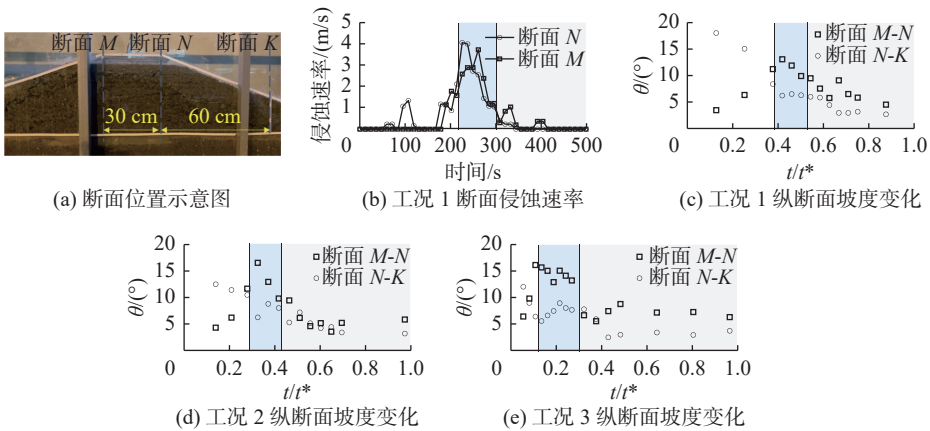


图 10 纵向演化过程侵蚀速率及坡度变化

Fig. 10 The evolution of erosion rate and slope during longitudinal evolution

图 10(c)~(e) 分别显示了工况 1~3 溃决过程中 M-N 断面(坝顶)和 N-K 断面(下游坡面)坡度变化情况,其中 t^* 表示溃决总历时。由图 10 可见,不同入库流量下堰塞体纵向坡度发展特征相似:初始阶段,坝顶断

面 $M-N$ 坡度持续变陡,而下游坡面断面 $N-K$ 坡度持续变缓;加速冲蚀阶段,坝顶断面 $M-N$ 不断变缓,下游坡面断面 $N-K$ 坡度先变陡后变缓;减速冲蚀阶段,坝顶断面 $M-N$ 和下游坡面断面 $N-K$ 变化特征一致,初期坡度快速变缓,中后期变化幅度较小。不同入库流量条件下的下游坡面断面 $N-K$ 最终坡度均接近 3° ,而坝顶断面 $M-N$ 最终坡度则随着入库流量的增大而减小,变化范围为 $4.5^\circ\sim 6.3^\circ$ 。Zhong 等^[27]对唐家山溃决前后坝体纵断面资料进行对比分析后,认为堰塞体纵向演化过程是一个自上游至下游整平的过程。本次试验数据显示,下游坡面坡角宏观上不断变缓,但该过程主要发生在初始阶段和减速冲蚀阶段,在历时较短的加速冲蚀阶段坡度反而出现坡度先变陡后变缓的局部变化。

4 结 语

通过开展堰塞体漫顶溃决试验,完整模拟了较大库容下堰塞体冲蚀发展过程,重现各阶段水位流量过程与冲蚀特征变化。基于多角度的观测资料,分析了溃口在不同溃决阶段的冲蚀特性及演化规律。试验主要结论如下:

(1)堰塞体溃决主要冲蚀过程可分为3个阶段:初始阶段、加速冲蚀阶段和减速冲蚀阶段。各阶段水动力特性、冲蚀特性均存在显著差异。初始阶段历时受入库流量影响较大,加速冲蚀阶段和减速冲蚀阶段历时受入库流量影响较小。溃口峰值流量会随着入库流量的增大而增大。

(2)分析溃决过程发现,初始阶段泄流槽内局部抗冲刷能力较强的材料随机分布会阻碍溯源冲刷的发展,对该阶段历时产生一定影响。

(3)堰塞体纵向演化冲蚀特性方面,初始阶段表现为溯源冲刷,加速冲蚀阶段表现为全断面高速下切,减速冲蚀阶段表现为上段冲刷下段淤积。

(4)堰塞体坝顶不同位置侵蚀速率极值相近,下游侵蚀速率极值出现时刻早于上游,洪峰流量出现时刻总是晚于侵蚀速率极值出现时刻。堰塞体下游坡面坡度在初始阶段与减速冲蚀阶段持续不变,在历时较短的加速冲蚀阶段则先变陡后变缓;坝顶坡度则在初始阶段变陡,在加速冲蚀阶段和减速冲蚀阶段不断变缓。

参 考 文 献:

- [1] 石振明,李建可,鹿存亮,等.堰塞湖坝体稳定性研究现状及展望[J].*工程地质学报*,2010,18(5):657-663. (SHI Zhenming, LI Jianke, LU Cunliang, et al. Research status and prospect of the stability of landslide dam[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(5): 657-663. (in Chinese))
- [2] 蔡正银,钟启明,何宁,等.堰塞体状态相关剪胀理论与坝体溃决演化规律研究构想[J].*工程科学与技术*,2021,53(6):21-32. (CAI Zhengyin, ZHONG Qiming, HE Ning, et al. Research framework of the state-dependent dilatancy theory and breach evolution law of landslide dam[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(6): 21-32. (in Chinese))
- [3] 胡亮,钱亚俊,傅中志,等.河道堰塞生命损失评估方法研究[J].*水利水电工程学报*,2021(5):58-66. (HU Liang, QIAN Yajun, FU Zhongzhi, et al. Study on the evaluation method of life loss due to river clogging[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2021(5): 58-66. (in Chinese))
- [4] 周兴波,周建平,杜效鹤,等.白格堰塞湖抢险处置应急管理 with 经验启示[J].*水利学报*,2021,52(10):1229-1239. (ZHOU Xingbo, ZHOU Jianping, DU Xiaohu, et al. Lessons and experiences from emergency management of Baige Barrier Lake on the Jinsha River, China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(10): 1229-1239. (in Chinese))
- [5] 柴贺军,刘汉超,张倬元,等.天然土石坝稳定性初步研究[J].*地质科技情报*,2001,20(1):77-81. (CHAI Hejun, LIU Hanchao, ZHANG Zhuoyuan, et al. Preliminary stability analysis of natural rock field dam resulting from damming landslide[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2001, 20(1): 77-81. (in Chinese))
- [6] SHEN D, SHI Z M, PENG M, et al. Longevity analysis of landslide dams[J]. *Landslides*, 2020, 17(8): 1797-1821.

- [7] ZHONG Q M, CHEN S S, SHAN Y B. Prediction of the overtopping-induced breach process of the landslide dam[J]. *Engineering Geology*, 2020, 274: 105709.
- [8] 周兴波, 周建平, 杜效鹄, 等. 金沙江白格堰塞湖应急抢险与处置技术[J]. *中国科学:技术科学*, 2022, 52(2): 343-356. (ZHOU Xingbo, ZHOU Jianping, DU Xiaohu, et al. Emergency rescue and disposal technology for Baige Barrier Lake on the Jinsha River, China[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2022, 52(2): 343-356. (in Chinese))
- [9] 蔡耀军, 杨兴国, 周招, 等. 基于物理模拟的堰塞湖溢流溃决机理[J]. *工程科学与技术*, 2023, 55(1): 150-160. (CAI Yaojun, YANG Xingguo, ZHOU Zhao, et al. Barrier lake break mechanism with physical model[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2023, 55(1): 150-160. (in Chinese))
- [10] ZHOU G G D, ZHOU M J, SHRESTHA M S, et al. Experimental investigation on the longitudinal evolution of landslide dam breaching and outburst floods[J]. *Geomorphology*, 2019, 334: 29-43.
- [11] 张婧, 曹叔尤, 杨奉广, 等. 堰塞坝泄流冲刷试验研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42(5): 191-196. (ZHANG Jing, CAO Shuyou, YANG Fengguang, et al. Experimental study on outlet and scour of blocked dam[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, 42(5): 191-196. (in Chinese))
- [12] 刘杰, 李丽华, 林跃水, 等. 堰塞坝漫顶溃决过程溃口纵向下切与溯源[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(6): 1795-1803. (LIU Jie, LI Lihua, LIN Yueshui, et al. Depth erosion and tracing of overtopping landslide dam breach[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(6): 1795-1803. (in Chinese))
- [13] 黄卫, 齐子杰, 段文刚, 等. 堰塞坝背水面坡度对溃决过程影响机理大尺度试验[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(3): 14-24. (HUANG Wei, QI Zijie, DUAN Wengang, et al. Large-scale experiment on impact of downstream slope on breaching mechanisms of landslide dams[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(3): 14-24. (in Chinese))
- [14] 邓明枫, 陈宁生, 廖世春, 等. 堰塞坝漫顶溃决过程及其受组成结构的影响[J]. *人民长江*, 2012, 43(2): 30-35. (DENG Mingfeng, CHEN Ningsheng, LIAO Shichun, et al. Overtopping outburst process of barrier dam and influence by dam component and structure[J]. *Yangtze River*, 2012, 43(2): 30-35. (in Chinese))
- [15] 王道正, 陈晓清, 罗志刚, 等. 不同颗粒级配条件下堰塞坝溃决特征试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2016, 36(5): 827-833. (WANG Daozheng, CHEN Xiaqing, LUO Zhigang, et al. Experimental research on breaking of barrier lake dam under different grading conditions[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016, 36(5): 827-833. (in Chinese))
- [16] 钟启明, 陈小康, 梅胜尧, 等. 滑坡堰塞湖溃决风险与过程研究进展[J]. *水科学进展*, 2022, 33(4): 659-670. (ZHONG Qiming, CHEN Xiaokang, MEI Shengyao, et al. A state of the art review on the failure risk and process of the landslide-induced dammed lake[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(4): 659-670. (in Chinese))
- [17] 段文刚, 黄卫, 魏红艳, 等. 堰塞坝溃决模拟研究综述与展望[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(1): 51-58. (DUAN Wengang, HUANG Wei, WEI Hongyan, et al. Review and prospects of landslide dam breaching modelling[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(1): 51-58. (in Chinese))
- [18] PENG M, ZHANG L M. Breaching parameters of landslide dams[J]. *Landslides*, 2012, 9(1): 13-31.
- [19] 杨阳, 曹叔尤. 堰塞坝溃决机理试验研究[J]. *水利学报*, 2012, 43(增刊2): 60-67. (YANG Yang, CAO Shuyou. Experimental study on breach growth mechanisms of natural barrier dams[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(Suppl2): 60-67. (in Chinese))
- [20] 刘磊, 钟德钰, 张红武, 等. 堰塞坝漫顶溃决试验分析与模型模拟[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2013, 53(4): 583-588. (LIU Lei, ZHONG Deyu, ZHANG Hongwu, et al. Experimental and numerical study of a landslide dam failure due to overtopping[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2013, 53(4): 583-588. (in Chinese))
- [21] 谢忱, 李从江, 杨兴国, 等. 基于物理模型试验的堰塞坝冲刷溃决过程研究[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(6): 43-53. (XIE Chen, LI Congjiang, YANG Xingguo, et al. Erosion and breach of landslide dam based on physical model tests[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(6): 43-53. (in Chinese))
- [22] 张红武, 刘磊, 钟德钰, 等. 堰塞湖溃决模型设计方法及其验证[J]. *人民黄河*, 2015, 37(4): 1-5, 42. (ZHANG Hongwu, LIU Lei, ZHONG Deyu, et al. Physical model design method and verification on dammed lake break[J]. *Yellow River*, 2015, 37(4): 1-5, 42. (in Chinese))
- [23] 张跟广. 水库溯源冲刷模式初探[J]. *泥沙研究*, 1993(3): 86-94. (ZHANG Genguang. An experiment study on the form of

- headwater erosion in reservoir[J]. *Journal of Sediment Research*, 1993(3): 86-94. (in Chinese))
- [24] 罗小杰, 马贵生, 杨乾伟, 等. 唐家山堰塞坝泄流过程中的地质作用[J]. *人民长江*, 2008, 39(22): 52-54. (LUO Xiaojie, MA Guisheng, YANG Qianwei, et al. Geological function in the discharge process of Tangjiashan weir dam[J]. *Yangtze River*, 2008, 39(22): 52-54. (in Chinese))
- [25] 蔡耀军, 栾约生, 杨启贵, 等. 金沙江白格堰塞体结构形态与溃决特征研究[J]. *人民长江*, 2019, 50(3): 15-22. (CAI Yaojun, LUAN Yuesheng, YANG Qigui, et al. Study on structural morphology and dam-break characteristics of Baige barrier dam on Jinsha River[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(3): 15-22. (in Chinese))
- [26] ZHANG J Y, FAN G, LI H B, et al. Large-scale field model tests of landslide dam breaching[J]. *Engineering Geology*, 2021, 293: 106322.
- [27] ZHONG Q M, CHEN S S, MEI S A, et al. Numerical simulation of landslide dam breaching due to overtopping[J]. *Landslides*, 2018, 15(6): 1183-1192.
- [28] CHANG D S, ZHANG L M. Simulation of the erosion process of landslide dams due to overtopping considering variations in soil erodibility along depth[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, 10(4): 933-946.
- [29] ZHANG L M, XIAO T, HE J, et al. Erosion-based analysis of breaching of Baige landslide dams on the Jinsha River, China, in 2018[J]. *Landslides*, 2019, 16(10): 1965-1979.
- [30] YANG F G, ZHOU X Q, LIU X N, et al. Experimental study of breach growth processes in sand dams of quake lakes[J]. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 2011, 5(5): 445-459.
- [31] NIU Z P, XU W L, LI N W, et al. Experimental investigation of the failure of cascade landslide dams[J]. *Journal of Hydrodynamics (Ser B)*, 2012, 24(3): 430-441.

Experimental investigation on the erosion characteristics of landslide dam failure induced by overtopping

CHENG Zelin^{1,2}, XIA Yunfeng¹, XU Hua¹, WU Daowen¹, WEN Yuncheng¹, LIU Qi¹

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: This study addresses the limitation of laboratory tests with underestimated storage capacities by conducting experiments on the breach failure of landslide dams with larger storage capacities. The erosion characteristics and evolution patterns of the breach were observed and analyzed. The research identifies three stages in the erosion process: the initial stage, accelerated erosion stage, and decelerated erosion stage, each exhibiting distinct hydraulic and erosion characteristics. Notably, the initial stage displays 'local drop' type headwater erosion, the accelerated erosion stage features high-speed downward erosion across the entire section, and the decelerated erosion stage is marked by erosion in the upstream and sedimentation in the downstream. Peak erosion rate occurs during the accelerated erosion stage, and peak discharge follows afterward. The downstream surface slope of the landslide dam varies continuously during the initial and decelerated erosion stages, while it increases and then decreases during the accelerated erosion stage. The dam crest slope increases in the initial stage and decreases in both the accelerated and decelerated erosion stages. Upstream inflow significantly affects the duration of the initial stage, with a smaller impact on the accelerated and decelerated erosion stages. Materials with strong local erosion resistance in the spillway hinder headwater erosion during the initial stage, influencing its duration. These findings provide valuable insights into the breach failure mechanism of landslide dams and contribute to flood control and disaster reduction efforts.

Key words: landslide dam; storage capacity; erosion characteristics; wide-graded material; erosion duration; longitudinal morphological evolution