

考虑河床坡度和泄流槽横断面影响的堰塞坝溃决过程试验研究

石振明, 张公鼎, 彭 铭, 马晨议

An experimental study of the breaching process of landslide dams with different bed slopes and drainage channel cross-sections

SHI Zhenming, ZHANG Gongding, PENG Ming, and MA Chenyi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202024>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

西藏洛隆县巴曲冰湖溃决型泥石流演进过程模拟研究

Characteristics and evolution process simulation of the Baqu gully debris flow triggered by ice-lake outburst in Luolong County of Tibet, China

刘波, 胡卸文, 何坤, 黄涛, 韩玫, 席传杰, 文强, 张晓宇 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 150-160

不同赋存环境下碳酸盐岩溶蚀过程试验模拟研究

Experimental simulation of the carbonate dissolution process under different occurrence conditions

林云, 任华鑫, 武亚遵, 贾方建, 刘朋, 梁家乐 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 15-26

基于底摩擦试验的硬岩岩质边坡变形过程及破坏机制研究

A study of deformation process and failure mechanism of hard rock slope based on the bottom friction test

李任杰, 胡富杭, 石豫川, 王磊, 吕可伟 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 145-152

川藏铁路某车站泥石流群发育特征及对线路的影响

Characteristics and potential engineering perniciousness of the debris flow group in one station of the Sichuan-Tibet Railway

何坤, 胡卸文, 刘波, 周瑞宸, 席传杰, 韩玫, 张晓宇 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 137-149

红层泥岩三轴膨胀力的试验研究

An experimental study of the triaxial expansion force of red-bed mudstone

郭永春, 赵峰先, 闫圣龙, 刘家志 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 87-93

层状非均质结构包气带入渗过程单相流与两相流数值模拟对比研究

A comparative numerical simulation study of single-phase flow and water-gas two-phase flow infiltration process in the vadose zone with the layered heterogeneous structure

高靖勋, 冯洪川, 祝晓彬, 吴吉春, 吴剑锋, 卫云波, 王水 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 24-32



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202024

石振明, 张公鼎, 彭铭, 等. 考虑河床坡度和泄流槽横断面影响的堰塞坝溃决过程试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 73-81.

SHI Zhenming, ZHANG Gongding, PENG Ming, *et al.* An experimental study of the breaching process of landslide dams with different bed slopes and drainage channel cross-sections[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 73-81.

考虑河床坡度和泄流槽横断面影响的 堰塞坝溃决过程试验研究

石振明^{1,2}, 张公鼎^{1,2}, 彭 铭^{1,2}, 马晨议^{1,2}

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092;
2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 针对缺乏地形条件和工程处置措施对堰塞坝溃决过程影响研究的现状, 采用4种河床坡度(0°、1°、2°、3°)和3种泄流槽横断面型式(三角形、梯形、复合型), 开展了堰塞坝溃决的模型试验。通过分析堰塞坝的溃决流量、溃决历时、溃口发展和坝体纵截面演变过程, 研究了不同河床坡度和泄流槽横断面对堰塞坝溃决过程的影响规律。试验结果表明: (1) 堰塞坝溃决过程可分为3个阶段。阶段I: 溃口形成阶段, 溃决流量较小; 阶段II: 溃口发展阶段, 水流下蚀及侧蚀强烈, 溃决流量到达峰值; 阶段III: 衰减-平衡阶段, 粗化层形成, 溃口停止发展。(2) 河床坡度增加意味着下游坝坡、坝顶及泄流槽的坡度增加, 导致水流侵蚀能力增强, 溃口下切迅猛, 因此在0°~3°范围内河床坡度越大, 峰值流量越大, 峰现时间越早, 溃决流量过程曲线越趋于“高瘦型”, 且残留坝高越小。(3) 泄流槽横断面型式不同导致其槽深、槽宽和侧坡坡度不同, 进而影响溃口发展和溃决流量。三角形槽的水土作用面积小, 溃口下切及展宽速率最高, 峰值流量最大, 峰现时间最早; 梯形槽的槽底高程最高, 水土作用面积最大, 溃口下切速率最低, 峰现时间最晚; 而复合槽介于前两者之间。试验成果将为堰塞坝应急抢险和工程措施的选取提供依据。

关键词: 堰塞坝; 溃决过程; 峰值流量; 河床坡度; 泄流槽横断面

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)05-0073-09

An experimental study of the breaching process of landslide dams with different bed slopes and drainage channel cross-sections

SHI Zhenming^{1,2}, ZHANG Gongding^{1,2}, PENG Ming^{1,2}, MA Chenyi^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The breaching process of landslide dams influenced by bed slopes and drainage channels are still unclear. In this study, flume tests of landslide dams including four different bed slope angles (0°, 1°, 2° and 3°) and three different drainage channel cross sections (triangle, trapezoid and compound) are carried out. The effects of bed slopes and drainage channel cross sections on the outflow discharge, breaching duration, breach

收稿日期: 2022-02-16; 修订日期: 2022-03-29

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41731283; 42071010; 41877234)

第一作者: 石振明(1968-), 男, 教授, 博士, 研究方向为地质灾害与岩土工程。E-mail: shi_tongji@tongji.edu.cn

通讯作者: 彭铭(1981-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为地质灾害风险防控。E-mail: pengming@tongji.edu.cn

development and longitudinal evolution process of landslide dams are investigated. The results show that (1) the breaching process is divided into three stages. Stage I is the breach initiation stage with a slow breach erosion. Stage II is the breach development stage with a severe breach erosion. Stage III is the attenuating and re-equilibrium stage with the formation of an armored layer and the breach erosion gradually stops. (2) With the increasing bed slope angle, the dam crest and downstream slope angle increases, which enhances the shear stress acting on the soil and the deep-cutting erosion. Thus, when the bed slope is steeper, the peak discharge is larger, the arrival time of peak is shortened and the residual dam height is smaller. (3) Drainage channels with different cross sections have different depths, widths and lateral slopes, which influence the breach development and the outflow discharge. For the triangle drainage channel, its water-soil interface area is small, both the breach deepening and widening rates are the largest, while the peak discharge is the largest and the arrival time of peak is the earliest. For the trapezoidal drainage channel, its bottom elevation is the highest and water-soil interface area is the largest, while the breach deepening rate is the lowest and the arrival time of peak is the latest. The compound drainage channel is between the two former channels. The experimental results may provide important references for emergency treatment of landslide dams.

Keywords: landslide dam; breaching process; peak discharge; riverbed slope; cross-section of drainage channel

堰塞坝是滑坡体在运动过程中受到地形阻碍而在河道沟谷中堆积形成的天然地质体^[1-2]。由于没有经过人工压实和改造,堰塞坝通常呈不规则形状,材料粒径变化范围广,坝体结构松散,缺乏足够的稳定性^[3-4],因此极易在短时间内发生溃决^[5-6]。溃决后的洪水会严重威胁下游人员生命和财产安全,例如 1933 年叠溪堰塞坝^[7-8]和 2000 年易贡堰塞坝^[9-10]溃决均对下游造成了巨大危害。为了预防或减轻堰塞坝溃决后的洪水灾害,对于潜在风险较大的堰塞坝,常采取的工程措施是在坝顶低凹处开挖满足设计过流要求的泄流槽,降低堰塞湖水位和库容,清除坝体表面高冲蚀性物质,以提前引流泄洪,控制溃口发展和溃决流量,以降低堰塞坝的溃决风险及危害,最终达到排除险情的目的^[11]。因此,开展不同地形条件和工程处置措施对堰塞坝溃决过程影响的研究具有重要意义。

长期以来,水槽模型试验是研究堰塞坝溃决过程和溃决机理的重要手段。例如,Gregoretti 等^[12]开展了粒径范围分别为 2~5 mm、5~9.5 mm 和 6~13 mm 的 3 种砾石材料堰塞坝的溃决试验,研究了无泄流槽条件下的坝体破坏模式,提出了基于坝前水位的堰塞坝破坏临界条件。Chen 等^[13]通过水槽试验分别模拟了由地震和降雨诱发的 2 种不同特性堰塞坝的溃决过程,研究了坝体材料和坝体形态等因素对堰塞坝破坏模式和下游沉积情况的影响。蒋先刚等^[14]通过开

展不同条件下的堰塞坝漫顶溃决试验,研究了不同入流量和坝体形态对溃口下切以及侵蚀规律的影响。同时,针对堰塞坝应急除险的工程措施也开展了一些研究。例如,陈晓清等^[15]分析了唐家山和小岗剑等堰塞坝的泄流过程及其对下游的影响,初步提出了人工可控的堰塞坝泄流处置方法。曹永涛等^[16]以四川某堰塞坝为原型,通过模型试验模拟了坝体泄流过程,对水流冲刷和机械开挖这 2 种溢洪道的泄流效果进行了比较。赵天龙等^[17]通过离心模型试验研究了泄流槽断面型式对堰塞坝泄流过程和总泄流量的影响。可以看出,前人研究大多集中于坝体材料、坝体形态和入流量等因素对堰塞坝破坏模式和溃口发展的影响规律上^[18-25],但与堰塞坝应急除险密切相关的不同河床坡度和泄流槽横断面对溃决过程的影响研究却相对匮乏,具体的影响规律和溃决参数仍有待于进一步确定。

本文通过开展水槽模型试验,模拟了不同地形条件和工程处置措施下的堰塞坝溃决过程,分别研究了河床坡度与泄流槽横断面型式对堰塞坝溃决流量、溃决历时和溃口发展等方面的影响规律,探讨了堰塞坝除险时开挖泄流槽的最优横断面型式。

1 试验设计

1.1 试验装置

模型试验在特制的水槽装置中进行,试验装置主

要由矩形水槽、供水设备和尾水池等 3 部分组成(图 1)。矩形水槽用以模拟河道,长×宽×高为 5 m×0.4 m×0.4 m。水槽侧壁均为透明聚丙烯板,便于实时观测和记录试验现象。水槽前端装有液压牵引装置,用以自由调节水槽底部坡度,可调坡度范围为 0°~5°。供水设备由蓄水箱、水泵、电磁流量计和进水箱组成。其中,蓄水箱长×宽×高为 2 m×2 m×1 m,容积为 4 m³。试验过

程中,入流量 Q_i 由水泵以恒定流速进行供给,并通过电磁流量计精确控制,误差为±0.01 L/s。进水箱与矩形水槽的前端相连,可有效避免水流泵出时产生飞溅影响坝体稳定。尾水池则与矩形水槽的末端相连,长×宽×高为 1 m×1 m×0.5 m,用以排出和收集试验过程中的下游洪水和泥沙沉积物。

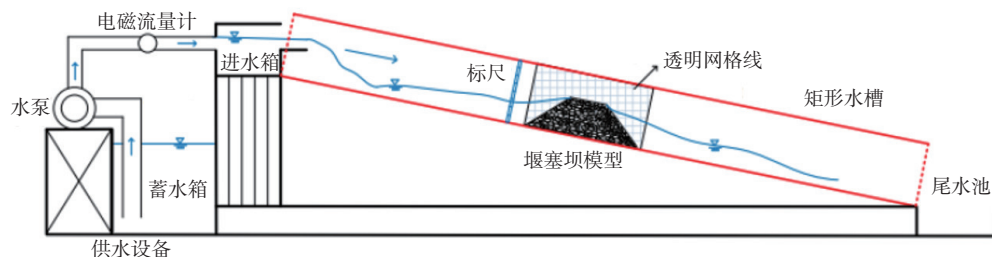


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Experimental apparatus

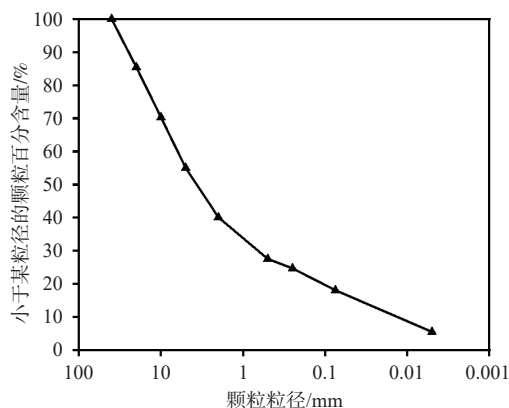
1.2 试验材料

考虑到堰塞坝材料的宽级配特性,以唐家山堰塞坝的平均颗粒级配曲线为基础^[26-27],将试验材料的最大粒径控制为 40 mm,采用等量替代法^[28],将 40 mm 以上的超粒径颗粒按比例用 5~40 mm 粒径的颗粒进行等质量替换,缩尺后得到的坝体材料颗粒级配曲线如图 2(a)所示。

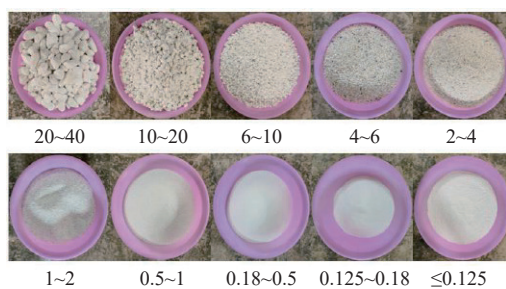
试验中模型坝体的干密度 ρ_d 为 1 780 kg/m³,与唐家山堰塞坝的真实钻孔数据接近^[27]。通过混合不同粒径的卵石和石英砂来配制坝体材料,如图 2(b)所示。根据粒径范围可将试验所用的卵石和石英砂分为 10 个区间,分别是 20~40 mm、10~20 mm、6~10 mm、4~6 mm、2~4 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.18~0.5 mm、0.125~0.18 mm 和 ≤0.125 mm。试验前先根据图 2(a)所示的颗粒级配曲线,确定每个粒径分布区间所占的百分比,然后计算模型坝体的总质量,再依次获取每个区间所对应的颗粒质量,最后将相应质量的颗粒材料充分混合、搅拌均匀后,分层填筑压实坝体。

1.3 工况设计

试验中堰塞坝的纵截面为梯形,如图 3 所示,坝高为 0.24 m,坝顶宽为 0.24 m,坝底宽为 1.08 m,坝高与坝顶宽的比为 1:1,上游坝坡坡比为 1:2,下游坝坡坡比为 1:1.5。堰塞坝的横截面为矩形,坝长等于水槽宽度 0.4 m。模型坝体位于矩形水槽的中央部分,上游坡脚距离水槽前端 2.10 m。模型坝体的设计遵循了



(a) 坝体材料颗粒级配曲线



(b) 配制坝体材料的卵石和石英砂 (mm)

图 2 坝体材料

Fig. 2 Experimental materials

物理模型试验的相似准则,堰塞坝几何形状和堰塞湖体积可用 3 个无量纲参数来描述,即高宽比(H/B)、坝体形态系数($V_d^{1/3}/H$)和堰塞湖形态系数($V_l^{1/3}/H$),其中 H 、 B 、 V_d 、 V_l 分别为坝高、坝底宽、坝体体积和堰塞

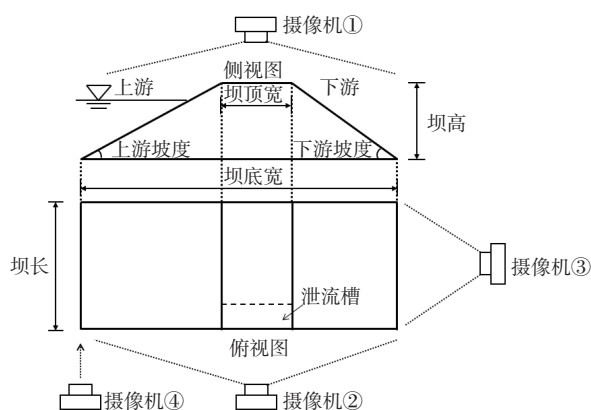


图 3 模型坝体和量测装置

Fig. 3 Model dam and measurements

湖体积^[4]。本试验中的 3 个无量纲参数,即高宽比、坝体形态系数和堰塞湖形态系数,分别为 0.22、1.66 和 2.53。通过与超过 80 个真实堰塞坝案例的无量纲参数集中范围($0.02 \leq H/B \leq 1$ 、 $0.5 \leq V_d^{1/3}/H \leq 5$ 和 $0.2 \leq V_l^{1/3}/H \leq 10$)进行对比^[29],可见本试验中的 3 个参数均处在其合理范围内,因此模型坝体可以代表真实堰

塞坝。

试验共采用 6 组工况以模拟不同河床坡度和泄流槽横断面条件下的堰塞坝溃决过程,各工况的参数设置见表 1。工况 1—工况 4 的河床坡度不同,分别为 0° 、 1° 、 2° 和 3° 。工况 2、工况 5、工况 6 的泄流槽横断面型式不同,分别为三角形、梯形和复合型。试验中泄流槽均在靠近水槽侧壁的坝顶一侧开挖,3 种泄流槽具有相同的横断面面积,即开挖工程量相同,泄流槽的具体形态及尺寸如图 4 所示。考虑到唐家山堰塞坝的实际入流量和弗劳德相似准则,各工况的入流量 Q_i 均为 1.0 L/s。

表 1 试验工况参数表

Table 1 Summary of the test conditions

工况	河床坡度/ $(^\circ)$	泄流槽横断面型式	入流量/($L \cdot s^{-1}$)
1	0	三角形	1.0
2	1	三角形	1.0
3	2	三角形	1.0
4	3	三角形	1.0
5	1	梯形	1.0
6	1	复合型	1.0

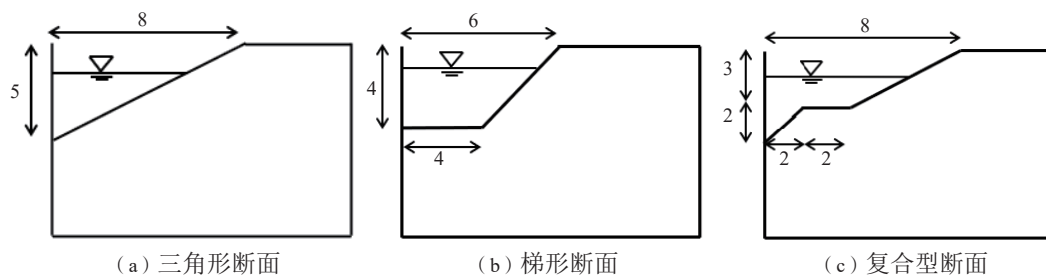


图 4 泄流槽横断面型式(单位:cm)

Fig. 4 Cross sections of drainage channels (unit: cm)

分别在坝体顶部、坝体侧面、水槽末端和坝前水位侧面架设 4 台高清摄像机,用以观测堰塞坝的溃决全过程,如图 3 所示。通过在坝顶上方设置刻度尺、在水槽侧壁玻璃上粘贴透明网格线,利用摄像机记录堰塞坝溃决过程中的溃口发展情况、坝体截面演变过程和坝前水深变化等。试验所用摄像机为 JVC 生产的 GZ-R10BAC 型号。

1.4 试验步骤

水槽模型试验的详细过程如下:

(1)根据模型坝体的形状和尺寸,在水槽侧壁玻璃上绘制坝体轮廓并粘贴透明网格线,然后将水槽底部调整为预先设计的坡度。坝体填筑时采用密度控制法,分 3 层进行填筑,并充分压实。

(2)如前文所述在水槽外架设 4 台高清摄像机,然后打开供水设备,入流量始终控制为 1.0 L/s,同时开启摄像机记录试验过程。

(3)当坝体完全破坏或保持稳定后,关闭供水设备和摄像机,试验结束。

(4)清除水槽内的残余坝体,然后进行新的 1 组试验。

2 试验结果及分析

2.1 堰塞坝溃决特征

试验发现,不同工况下堰塞坝的破坏模式基本一致,都属于漫顶溢流破坏。现选取工况 2(河床坡度为 1° ,泄流槽横断面为三角形)为例进行分析,其溃决过

程如图 5 所示。为了在后文中统一表达和准确描述,将溃决时间 $t=0$ 定义为泄流槽过流开始的时刻。

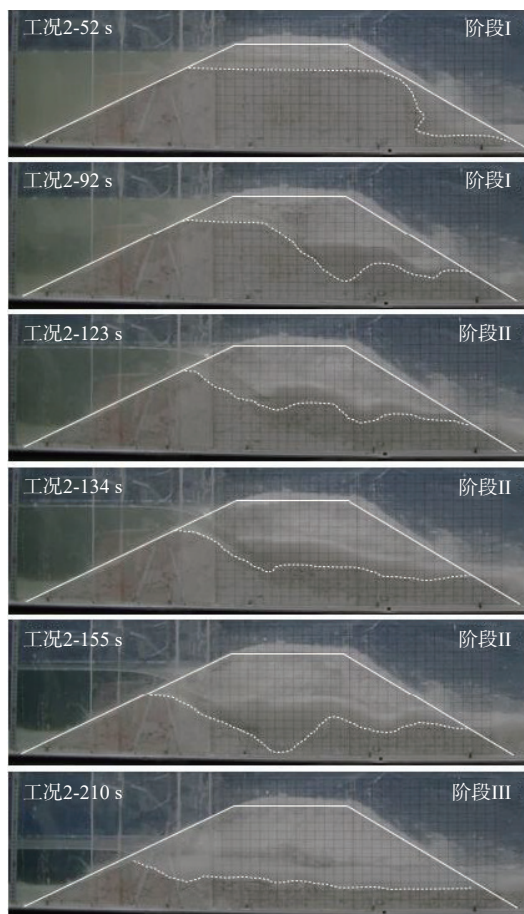


图 5 工况 2 的坝体溃决过程

Fig. 5 Breaching process of the dam in test 2

试验结果表明,堰塞坝的溃决过程从泄流槽发生过流开始。水流在泄流槽末端向下侵蚀槽底,下游坝坡逐渐变陡乃至近似于垂直,很快形成了 1 个类似于瀑布的陡坎(图 5 中 $t=52$ s)。由于水流不断掏蚀陡坎底部表面土颗粒,陡坎开始松动、垮塌并随之向前移动(图 5 中 $t=92$ s)。于是,坝体纵截面上坡度的转折点,即坡折点,亦不断向前移动,直到临近上游坡面(图 5 中 $t=123$ s),就此形成了 1 个完整的溯源侵蚀过程。随后泄流槽前端的溃口侧坡土体发生坍塌,导致溃口横向展宽(图 5 中 $t=134$ s)。溃口展宽扩大了溃口断面面积,使得上游库水大量下泄。由于水头高度增大,整个坝体受水流剧烈冲刷,溃口迅速下切,坝体底部沿顺河向呈波浪状起伏(图 5 中 $t=155$ s)。在坝前水位快速下降后,由于流速减小和携沙能力减弱,水流只能侵蚀搬运细颗粒至下游河道,而粗颗粒则被留在原地,在溃口底部逐渐形成了粗化层(图 5 中

$t=210$ s)。粗化层可以保护层下土颗粒不再被水流侵蚀冲刷,因此溃口逐渐停止发展,残留坝体保持稳定,出入流也达到平衡,整个溃决过程结束。

工况 2 的溃决流量过程曲线如图 6 所示,溃决流量随溃决时间先增大而后减小。试验中的溃决流量通过获取各时刻的坝前水位、利用水量平衡公式计算得到。根据坝体纵截面演变过程和溃决流量过程曲线,堰塞坝的溃决过程可分为 3 个阶段。

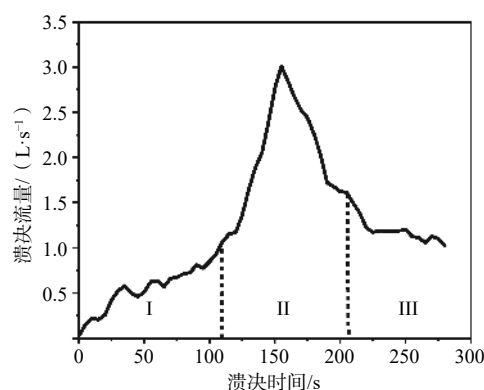


图 6 工况 2 的溃决流量过程曲线

Fig. 6 Outflow discharge hydrograph of test 2

阶段 I: 溃口形成阶段,这一阶段从泄流槽过流开始,直到上游坡面出现侵蚀为止。此阶段溃决流量较小,溃口发展缓慢,溃口侧向坍塌时有发生,但规模较小。阶段 II: 溃口发展阶段,这一阶段从上游坡面出现侵蚀开始,直到溃口前端处停止侵蚀为止。在阶段 II 期间,溃决流量迅速增加并到达峰值,随后又迅速下降,溃口下切和展宽同时发育,溃口侧向坍塌发生更为频繁,平均规模也大于阶段 I。阶段 III: 衰减-平衡阶段,这一阶段开始后,由于溃决流量很小,不会再对溃口造成较大的下蚀及侧蚀,因此在溃口底部形成了粗化层。当溃口发展至最终尺寸不再变化,溃决流量等于入流量时,残留坝体保持稳定,溃决过程结束。

由于上述 3 个阶段的溃决特征明显不同,因此明确界定这 3 个阶段有助于对不同工况进行定量比较。6 组试验工况的坝体纵截面演变过程如图 7 所示,溃决历时和峰值流量等溃决参数见表 2。

2.2 河床坡度的影响

工况 1—工况 4 的河床坡度分别为 0° 、 1° 、 2° 和 3° ,其溃决流量过程曲线如图 8 所示。从图 8 可以看出,不同河床坡度条件下的流量曲线具有不同的峰值及峰现时间。从整体上看,当河床坡度从 0° 逐步增加

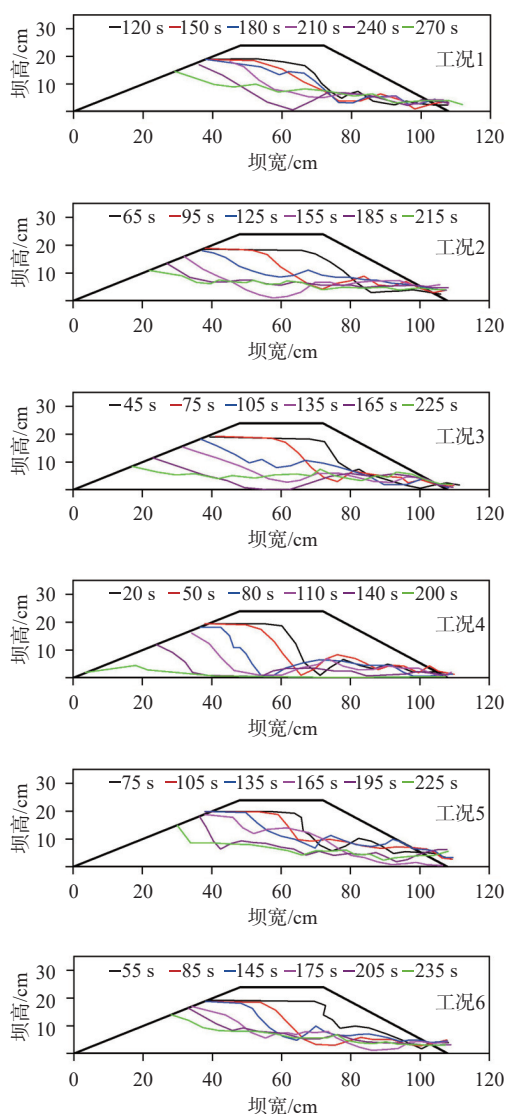


图 7 工况 1—工况 6 的坝体纵截面演变示意图

Fig. 7 Longitudinal evolutions of dams in tests 1-6

表 2 工况 1—工况 6 的坝体溃决参数

Table 2 Breaching parameters of tests 1-6

工况	阶段 I 历时/s	阶段 II 历时/s	阶段 III 历时/s	溃决 历时/s	峰值流量 ($L \cdot s^{-1}$)	峰现 时间/s
1	206	62	57	325	2.61	240
2	123	82	75	280	3.01	155
3	102	105	56	263	3.67	135
4	76	137	33	246	4.14	110
5	158	89	65	312	2.63	195
6	139	103	50	292	2.41	175

到 3° 时, 峰值流量逐渐增加, 峰现时间逐渐提前。由表 2 可知, 工况 1 (河床坡度为 0°) 的峰值流量为 2.61 L/s, 当河床坡度分别增加到 1°、2° 和 3° 时, 工况 2—工况 4 的峰值流量分别为 3.01、3.67、4.14 L/s, 相比工况 1 依次增加了 15.3%、40.6% 和 58.6%。工况 1 (河床坡度为 0°) 的峰现时间为 $t=240$ s, 当河床坡度分别增加到

1°、2° 和 3° 时, 工况 2—工况 4 的峰值流量分别提前到 $t=155$ 、135、110 s, 相比工况 1 依次提前了 85、105、130 s。由此可以看出, 在 0°~3° 的范围内, 河床坡度越陡, 峰值流量越大, 峰现时间越早, 溃决流量曲线也从“矮胖型”转变为“高瘦型”, 但峰值流量的增加及峰现时间的提前并不是线性的, 例如河床坡度 0° 和 1° 所对应的峰值流量相差 0.40 L/s, 峰现时间相差 85 s; 而河床坡度 1° 和 2° 所对应的峰值流量相差 0.66 L/s, 峰现时间相差 20 s。

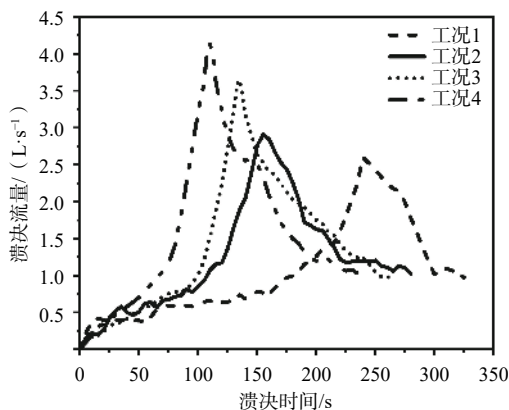


图 8 工况 1—工况 4 的溃决流量过程曲线

Fig. 8 Outflow discharge hydrographs of tests 1-4

由表 2 可知, 河床坡度越陡, 溃决历时越短。从溃决过程的 3 个阶段来看, 随着河床坡度的增加, 阶段 I 历时逐渐缩短, 阶段 II 历时逐渐增长, 阶段 III 历时则是先增长后缩短。造成上述差异的原因是: 河床坡度的增加提高了溯源侵蚀速率, 因此阶段 I 历时缩短; 同时河床坡度增加又使水流侵蚀能力增强, 下蚀时间延长, 溃口下切剧烈, 因此阶段 II 历时增长; 粗化层的形成时间则与阶段 III 历时密切相关。从图 7 也可以看出, 在 0°~3° 的范围内, 河床坡度越陡, 坝体的溯源侵蚀越迅速, 溃口纵向下切越剧烈, 残留坝体的坝高越低, 溃坝风险也越高。

2.3 泄流槽横断面的影响

工况 2、工况 5、工况 6 的泄流槽横断面型式分别为三角形、梯形和复合型, 溃决流量过程曲线如图 9 所示。

从图 9 可以看出, 不同泄流槽横断面条件下的流量曲线具有不同的峰值及峰现时间。由表 2 可知, 工况 2 (三角形槽) 的峰值流量最大, 为 3.01 L/s; 工况 5 (梯形槽) 次之, 峰值流量为 2.63 L/s; 工况 6 (复合槽) 的峰值流量最小, 为 2.41 L/s。相比于三角形槽, 梯形槽和复合槽的峰值流量分别减小了 12.6% 和 19.9%。

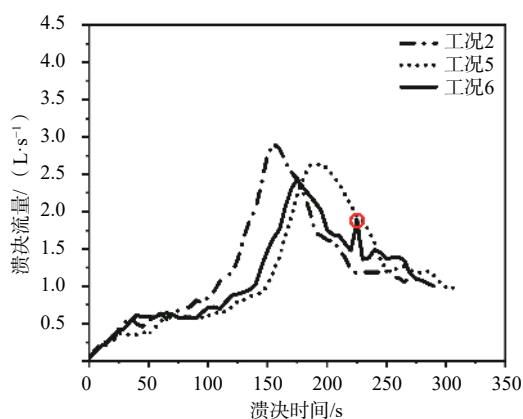


图9 工况2、工况5、工况6的溃决流量过程曲线

Fig. 9 Outflow discharge hydrographs of tests 2, 5 and 6

工况2、工况5、工况6的峰现时间分别为 $t=155, 195, 175$ s, 三角形槽最早、复合槽次之、梯形槽最晚。图9还反映了不同泄流槽在溃决流量变化速率上的差异,例如在溃决过程的阶段I中,流量增速是三角形槽最快、复合槽次之、梯形槽最慢。同时还注意到,与三角形槽和梯形槽对应溃决流量过程的“单峰”曲线不同,复合槽对应溃决流量过程曲线表现出“双峰”特点,原因是复合槽在溃决前中期展宽较慢,后期溃决流量减小,槽内侧壁坍塌堵塞溃口,溃坝水流暂时中断,直到堵塞体被冲散后才恢复,因此在流量曲线上表现出第二个峰值(图9)。

由表2可知,泄流槽横断面对堰塞坝的溃决历时也有一定程度的影响。从整体的溃决历时长看,梯形槽>复合槽>三角形槽。从溃决过程的3个阶段来看,阶段I历时为梯形槽>复合槽>三角形槽,阶段II历时为复合槽>梯形槽>三角形槽,阶段III历时为三角形槽>梯形槽>复合槽。这3组工况溃决历时之间的差异也与其溃决流量过程曲线发展规律相对应。因此,综合考虑上述3种泄流槽横断面条件下堰塞坝的峰值流量、峰现时间、溃决历时及总泄流量可以得出:三角形槽的峰现时间最早,峰值流量最大,但不利于安全泄流;梯形槽的峰现时间最晚,峰值流量居中,但在溃决前期流量增速缓慢,堰塞湖上游淹没风险较大;复合槽的峰现时间居中,峰值流量最小,且在溃决前期流量增速较快,与三角形槽和梯形槽相比相对安全、高效。

3 讨论

3.1 河床坡度的影响机理分析

试验发现,在 $0^\circ \sim 3^\circ$ 范围内,河床坡度越陡,峰值

流量越大,峰现时间越早,残留坝高越小。造成上述现象的原因是:河床坡度的增加相当于增大了下游坝坡、坝体顶面及泄流槽的坡度,根据水土界面剪切应力公式中 $\tau = \gamma_w R_w S$ 可知^[30],坡度增加意味着溃坝水流侵蚀能力的增强,当河床坡度变陡时,水流下蚀作用强烈,溃口下切迅猛,溃口底部高程降低和过流断面扩展导致单位时间内坝前库容下降幅度增大,因而峰值流量增加、峰现时间提前、残留坝高降低。不过河床坡度的增加也相当于减小了上游坝坡的坡度,同时坝前库容也逐渐减小,且库容减小程度与河床坡度呈正比,而库容减小意味着总出流量受限。在试验中,当河床坡度增加时,水流侵蚀能力增强仍是影响溃决流量的主导因素,但河床坡度从 2° 增加到 3° 时峰值流量的增加幅度相比从 1° 增加到 2° 时有所降低,便是上游坝坡坡度和坝前库容减小所导致的。

3.2 泄流槽横断面的影响机理分析

试验发现,不同泄流槽横断面条件下的峰值流量和峰现时间等溃决参数不同。造成上述现象的原因是:不同的泄流槽横断面型式具有不同的槽深、槽宽和侧坡坡度,从而影响了溃口发展和溃决流量过程。

工况2、工况5、工况6的溃口下切及展宽的平均速率见表3,反映了不同泄流槽横断面条件下的溃口尺寸发展速率的差异。对于三角形槽来说,它的槽底高程低于梯形槽,同时其槽内水土作用面积较小,导致水流侵蚀冲刷能力显著增强,因此它的溃口下切及展宽速率均是最高。对于梯形槽来说,它的槽底高程最高,说明其对坝前库容的减小程度最低,同时其槽内水土作用面积最大,水流下蚀能力最弱,因此它的溃口下切速率最低。对于复合槽来说,它分为上下两部分,上部分是梯形槽,下部分是三角形槽。复合槽的槽底高程等于三角形槽、低于梯形槽。复合槽下部分的槽内水土作用面积较小,因此在溃决前期它的溃口下切较快,溃决流量增速也是高于梯形槽、低于三角形槽。同时,与其他两种泄流槽相比,复合槽上部分的底部槽宽大于三角形槽,侧坡坡度比梯形槽小,这在一定程度上限制了溃口横向过快扩宽,在溃口快速下切同时能够较好地降低溃口展宽速率。因

表3 工况2、工况5、工况6的溃口下切及展宽平均速率

Table 3 Breach deepening and widening rates in tests 2, 5 and 6

工况	溃口下切速率/(mm·s ⁻¹)	溃口展宽速率/(mm·s ⁻¹)
2	0.643	0.679
5	0.561	0.545
6	0.599	0.479

此复合槽的溃口下切速率高于梯形槽、低于三角形槽,溃口展宽速率则是最低的。

4 结论

(1)通过 6 组堰塞坝溃决模型试验,研究了不同河床坡度(0° 、 1° 、 2° 、 3°)和泄流槽横断面型式(三角形、梯形、复合型)对堰塞坝溃决过程的影响,堰塞坝溃决过程可根据溃口发展和溃决流量特征分为 3 个阶段:溃口形成阶段、溃口发展阶段、衰减-平衡阶段。

(2)河床坡度增加导致下游坝坡、坝顶面及泄流槽的坡度增加,同时导致坝前库容减小,但前者的影响起主导作用。在 $0^\circ \sim 3^\circ$ 范围内,河床坡度越陡,峰值流量越大,峰现时间越早,残留坝高越小。

(3)泄流槽横断面型式显著影响溃口发展和溃决流量。三角形槽的溃口下切及展宽速率最高,峰值流量最大,峰现时间最早;梯形槽的溃口下切速率最低,峰现时间最晚;复合槽则介于前两者之间,相对高效安全。

参考文献 (References):

- [1] CASAGLI N, ERMINE L, ROSATI G. Determining grain size distribution of the material composing landslide dams in the Northern Apennines: Sampling and processing methods[J]. *Engineering Geology*, 2003, 69(1/2): 83 - 97.
- [2] PENG M, JIANG Q L, ZHANG Q Z, et al. Stability analysis of landslide dams under surge action based on large-scale flume experiments[J]. *Engineering Geology*, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105191>.
- [3] LI M H, SUNG R T, DONG J J, et al. The formation and breaching of a short-lived landslide dam at Hsiaolin Village, Taiwan—Part II: Simulation of debris flow with landslide dam breach[J]. *Engineering Geology*, 2011, 123(1/2): 60 - 71.
- [4] PENG M, ZHANG L M. Breaching parameters of landslide dams[J]. *Landslides*, 2012, 9(1): 13 - 31.
- [5] 吴瑞安, 马海善, 张俊才, 等. 金沙江上游沃达滑坡发育特征与堵江危险性分析[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(5): 120 - 128. [WU Ruian, MA Haishan, ZHANG Juncai, et al. Developmental characteristics and damming river risk of the Woda landslide in the upper reaches of the Jinshajiang River[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 120 - 128. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 杨琴, 范宣梅, 许强, 等. 北川唐家湾滑坡变形历史与形成机制研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(2): 136 - 141. [YANG Qin, FAN Xuanmei, XU Qiang, et al. A study of the deformation history and mechanism of the Tangjiawan landslide[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(2): 136 - 141. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 王兰生, 杨立铮, 李天斌, 等. 四川岷江叠溪较场地震滑坡及环境保护[J]. *地质灾害与环境保护*, 2000, 11(3): 195 - 199. [WANG Lansheng, YANG Lizheng, LI Tianbin, et al. Evolution mechanism of Jiaochang earthquake landslide on Ming River and its controlling[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2000, 11(3): 195 - 199. (in Chinese with English abstract)]
- [8] CHAI H J, LIU H C, ZHANG Z Y, et al. The distribution, causes and effects of damming landslides in China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2000, 27(3): 302 - 307.
- [9] ZHU P Y, LI T. Flash flooding caused by landslide dam failure[J]. *ICIMOD Newsletter*, 2011(38): 4 - 5.
- [10] SHANG Y J, YANG Z F, LI L H, et al. A super-large landslide in Tibet in 2000: background, occurrence, disaster, and origin[J]. *Geomorphology*, 2003, 54(3/4): 225 - 243.
- [11] 王光谦, 傅旭东, 李铁建, 等. 汶川地震灾区堰塞湖应急处置中的计算分析[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(5): 1 - 6. [WANG Guangqian, FU Xudong, LI Tiejian, et al. Analysis for emergency treatment of quake lakes in Wenchuan earthquake-hit regions[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(5): 1 - 6. (in Chinese with English abstract)]
- [12] GREGORETTI C, MALTAURO A, LANZONI S. Laboratory experiments on the failure of coarse homogeneous sediment natural dams on a sloping bed[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 136(11): 868 - 879.
- [13] CHEN S C, LIN T W, CHEN C Y. Modeling of natural dam failure modes and downstream riverbed morphological changes with different dam materials in a flume test[J]. *Engineering Geology*, 2015, 188: 148 - 158.
- [14] 蒋先刚, 崔鹏, 王兆印, 等. 堰塞坝溃口下切过程试验研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2016, 48(4): 38 - 44. [JIANG Xiangang, CUI Peng, WANG Zhaoyin, et al. Experiments investigation on longitudinal breaching of natural dam[J]. *Journal of Sichuan*

- University (Engineering Science Edition), 2016, 48(4): 38 – 44. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 陈晓清, 崔鹏, 游勇, 等. 一种人工调控排泄流量的堰塞湖处置方法及其应用: CN101718085B[P]. 2011-02-02. [CHEN Xiaoqing, CUI Peng, GAO Quan, et al. Disposal method of barrier lake for artificially regulating and controlling drain flow and application: CN101718085B[P]. 2011-02-02. (in Chinese)]
- [16] 曹永涛, 高航, 夏修杰. 堰塞湖坝体处理及溃决模拟试验研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(12): 205 – 206. [CAO Yongtao, GAO Hang, XIA Xiujie. Experimental study on treatment and dam break simulation of landslide dam[J]. Yellow River, 2010, 32(12): 205 – 206. (in Chinese)]
- [17] 赵天龙, 陈生水, 付长静, 等. 堰塞坝泄流槽断面型式离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1943 – 1948. [ZHAO Tianlong, CHEN Shengshui, FU Changjing, et al. Centrifugal model tests on section form of drainage channel of barrier dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1943 – 1948. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 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.
- [19] MORRIS M W, HASSAN M A A M, VASKINN K A. Breach formation: Field test and laboratory experiments [J]. Journal of Hydraulic Research, 2007, 45(Sup 1): 9 – 17.
- [20] DAVIES T R, MANVILLE V, KUNZ M, et al. Modeling landslide dambreak flood magnitudes: Case study[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133(7): 713 – 720.
- [21] XU F G, YANG X G, ZHOU J W, et al. Experimental research on the dam-break mechanisms of the jiadanwan landslide dam triggered by the Wenchuan earthquake in China[J]. The Scientific World Journal, 2013. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/272363>.
- [22] 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 with English abstract)]
- [23] 赵高文, 王萌, 杨宗伟, 等. 震后泥石流沟内滑坡堰塞坝的侵蚀特征分析: 以银洞子堰塞坝为例[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(5): 68 – 77. [ZHAO Gaowen, WANG Meng, YANG Zongji, et al. Eroding characteristics of landslide dams in debris flow gullies after earthquakes—Case study of Yindongzi landslide dam[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(5): 68 – 77. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 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 Xiaoqing, 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 with English abstract)]
- [25] 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 with English abstract)]
- [26] XU Q, FAN X M, HUANG R Q, et al. Landslide dams triggered by the Wenchuan Earthquake, Sichuan Province, south West China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(3): 373 – 386.
- [27] 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.
- [28] 郭万里, 朱俊高, 温彦锋. 对粗粒料4种级配缩尺方法的统一解释[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1473 – 1480. [GUO Wanli, ZHU Jungao, WEN Yanfeng. Unified description for four grading scale methods for coarse aggregate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1473 – 1480. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 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.
- [30] GRAF W H. Hydraulics of sediment transport[M]. New York: McGraw Hill, 1971.