



# 高形态系数条件下宽级配堰塞坝 漫顶溃决试验研究\*

赵天龙, 曾永志, 但鹏, 胡雄

(重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

**摘要:** 堰塞湖溃决后, 洪水会对下游构成重大威胁, 因此有必要对其漫顶溃决过程的情况进行深入研究。以2018年金沙江白格堰塞坝为试验级配参照, 针对目前室内试验的堰塞湖形态系数较小与最大粒径较细的不足进行改进, 自变量选取不同上游来流量、泄流槽初始形状、最大库容。采用模型试验的方法对其溃决过程、洪峰与坝体冲蚀率进行分析。结果表明: 上游来流量对于洪峰出现时间成正相关, 上游来流量越大, 洪峰出现时间越早; 三角形槽因其冲蚀强度最大导致其在本组中洪峰流量最大且峰现时间最早, 梯形槽洪峰流量最低且峰现时间最晚, 矩形槽介于两者之间; 粗颗粒在较小的堰塞湖形态系数下对坝体起到延缓纵向破坏的作用, 增大该系数会导致延缓作用迅速减弱; 较大的堰塞湖形态系数不仅会造成坝料冲蚀加速与下游河道产生大规模堆积, 并且导致峰现时间提前与峰值流量急剧增加。

**关键词:** 堰塞坝; 漫顶溃决; 峰值流量

中图分类号: U612.3; TV698

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0028-10

## Experiment on overtopping collapse of wide gradation landslide dam with high shape coefficient

ZHAO Tianlong, ZENG Yongzhi, DAN Peng, HU Xiong

(National Technical Research Center for Inland Waterway Regulation Engineering,  
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The collapse of a landslide dam can pose a significant threat to downstream areas, and it is necessary to thoroughly study the overtopping and collapse processes. The Baige landslide dam on the Jinsha River in 2018 is taken as a reference for experimental gradation. Improvements are made to address the limitations of the landslide lake's small shape factors and fine maximum particle sizes of in current laboratory tests. The independent variables selected are different upstream inflow rates, initial shapes of the spillway, and maximum reservoir water volume. A model test method is employed to analyze the collapse process, peak flow, and dam erosion rate. The results show that the upstream inflow rate is positively correlated with the timing of peak flow, with higher inflow leading to earlier peak flow. The triangular spillway, due to its greatest erosion intensity, results in the highest peak flow and earliest occurrence time within the group, while the trapezoidal spillway has the lowest peak flow and latest occurrence time, with the rectangular spillway falling in between. Coarse particles help delay the longitudinal failure of the dam under small shape factors, but this delaying effect rapidly diminishes as the shape factor increases. A larger shape factor of the landslide lake not only increases the dam erosion rate and causes significant sediment accumulation in downstream channels, but also leads to earlier peak flow occurrence and a sharp increase in peak flow.

**Keywords:** landslide dam; overtopping collapse; peak flow

收稿日期: 2024-11-14

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(52279095, 52109149); 重庆市水利科技项目(CQSLK-2022028, CQSLK-2023003)

作者简介: 赵天龙(1986—), 男, 博士, 教授, 从事水工建筑物安全及地灾防控方面的研究。

堰塞坝是在一定条件下形成的堵塞河道的天然坝体, 而按照其类型可分为熔岩型堰塞坝、崩(塌)滑(坡)型堰塞坝、冰碛堰塞坝<sup>[1]</sup>。崩滑型堰塞坝出现的比例相对较大<sup>[2]</sup>, 其特点为坝体结构松散、稳定性较差<sup>[3]</sup>, 一旦溃坝, 通常会形成巨大洪水, 对下游地区造成巨大危害。国内外学者对于堰塞坝寿命进行过统计<sup>[4-5]</sup>, 堰塞坝形成后的寿命极短, 约一半的堰塞坝会在 10 d 内溃决; 而对堰塞坝溃决模式分析中, 因堰塞坝缺少泄水建筑物<sup>[6]</sup>, 随着水位上涨导致而发生的漫顶溃决最为常见<sup>[7-8]</sup>。随着堰塞坝溃决灾害的不断发生, 学术界对其溃决机理、溃决模式以及溃决洪水演进开展了研究工作。目前其研究途径主要为现场调查、数值模拟、试验研究。白格堰塞坝发生溃决后, 国内学者<sup>[9-10]</sup>曾对其下游地区进行走访调查; 学术界也对堰塞坝进行统计并建立数据库与快速分析方法<sup>[11-13]</sup>。

鉴于堰塞坝溃坝所引发的灾害后果极为严重, 当前国内外许多学者已广泛利用物理模型试验, 对堰塞坝的溃坝机理进行探究。谢忱等<sup>[14]</sup>针对堰塞坝泄流槽的尺寸设计进行试验, 认为开挖泄流槽应优先关注加大槽深度; Niu 等<sup>[15]</sup>针对梯级堰塞坝溃决情况, 进行针对流量变化的研究并采用新的测量方法进行图像数字化; Zhou 等<sup>[16]</sup>对室内试验的溃决过程, 提出一种新的纵向演化模型; 胡桂胜等<sup>[17]</sup>针对茂县宗渠沟堰塞湖进行户外模型试验, 并对其洪水演进进行探究; 蒋先刚等<sup>[18]</sup>对于堰塞坝溃口的下切过程变化进行试验, 发现侵蚀率与其流量大小有密切关系; 张靖等<sup>[19]</sup>针对背水坡坡度进行试验, 发现其坡度越大, 洪峰流量值越大; 赵天龙等<sup>[20-21]</sup>基于唐家山堰塞坝与白格堰塞坝级配曲线, 开展模型试验探究漫顶溃决发

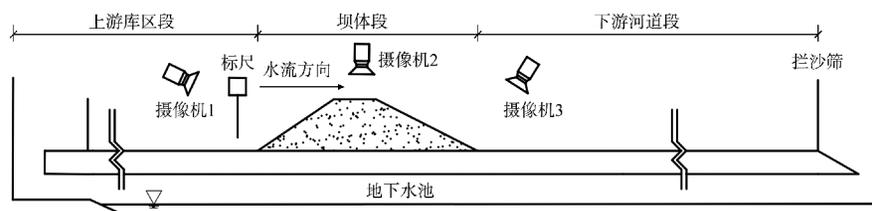
展演化过程。尽管一系列既有研究成果为学术界深入探索堰塞坝的溃坝问题提供了宝贵的借鉴与启示, 但当前模型试验的实践中仍然存在一些局限性。具体而言, 部分研究<sup>[22-23]</sup>在试验设计时, 选取最大粒径为 10 mm 或更小的颗粒进行模拟, 这种级配缩尺处理虽有其便利性, 却可能导致材料的黏性发生显著变化, 进而对坝体的整体稳定性及抗冲刷能力产生影响。此外, 真实世界中的大型堰塞湖, 如唐家山与白格堰塞湖, 其堰塞湖形态系数分别高达 8.43 与 8.30, 显著超出了部分室内模型试验的水槽可模拟范围(堰塞湖形态系数约为 2), 这在一定程度上限制了试验结果反映真实世界的准确性及其在实际工程中的适用性。

鉴于此, 本文在物理模型试验中采取更为贴近实际情况的试验设计, 系统开展不同上游来流量、泄流槽形状以及库容条件下的堰塞坝漫顶溃决试验。通过对各时段堰塞坝漫顶溃决特征参数的实时监测分析, 旨在深入剖析崩滑型堰塞坝溃坝过程中的关键机制, 为堰塞坝的风险评估与应急抢险策略的制定提供更为精准、科学的指导与参考。

## 1 物理模型试验设计

### 1.1 试验装置

崩滑型堰塞坝漫顶溃决试验物理模型试验在变坡水槽试验系统中进行, 水槽试验系统规格为 28.00 m×0.56 m×0.50 m(长×宽×高), 水槽有主钢架、透明玻璃槽身、回水系统和测量控制系统, 见图 1。水槽分为上游库区段、模型坝体段、下游河道段 3 个部分, 尾水经过拦沙筛最终流入地下水库便于循环利用, 其中 3 个摄像机记录全过程溃坝情况, 标尺记录上游水位变化。



a) 侧视图



b) 俯视图

图 1 试验水槽

Fig. 1 Experimental flume

### 1.2 试验材料与坝体设计

试验参考了 2018 年白格堰塞坝的坝料级配，其原型的最大粒径为 110 mm 左右，受水槽内部有效尺寸的限制对级配采取缩尺处理。等量替代法<sup>[24]</sup>具有替代后的级配仍可保持粗细粒含量及性质不变等优点，适用于超径含量小于 40% 的土石混合料。因此，本文采用等量替代法对原型级配进行

缩尺处理(图 2)，最大粒径控制在 40 mm，相较于此前部分研究的最大粒径为 10 mm，宽级配能更好反映堰塞坝自身材料结构松散的特点。

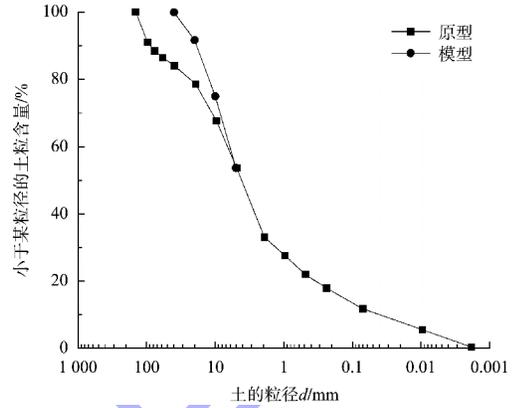


图 2 堰塞坝模型试验级配曲线

Fig. 2 Gradation curve of landslide dam model test

崩滑型堰塞坝沿河方向较长，白格堰塞坝长 1.3 km 左右，宽度约为 500 m，而最大坝高约为 130 m<sup>[25]</sup>，其总体为中部高、上下游两侧低，上游的平均坡度<sup>[26]</sup>为 36°，下游平均坡度为 20°。为方便模型坝的试验材料复现布置与观测，故模型坝体设计尺寸为坝高 300 mm、坝顶宽 250 mm、坝底宽 1 300 mm，其模型坝剖面尺寸与泄流槽横断面尺寸见图 3，坝长比例尺为 1:1 000，坝高比例尺为 1:400。

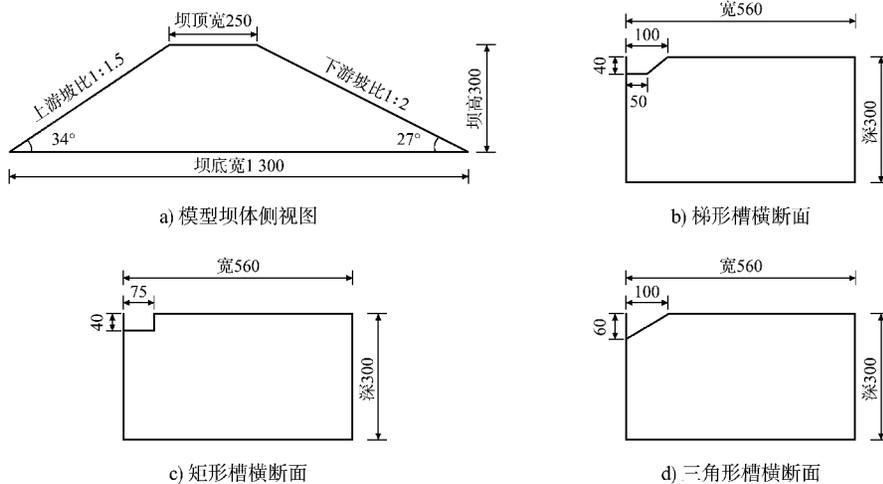


图 3 模型堰塞坝侧视图与横断面 (单位: mm)

Fig. 3 Side view and cross section of landslide dam model (unit: mm)

文献[16]参照超过 80 个堰塞坝真实案例统计的堰塞坝的无量纲参数见表 1，其中的坝体形态系

数与堰塞湖形态系数对于堰塞坝溃决的过程模拟至关重要。而得益于试验水槽的规模与前人研究

的相比更大, 通过在水槽不同位置布置坝体控制最大库容与堰塞湖形态系数, 其堰塞湖形态系数最大为 5.18, 显著改善了之前室内水槽试验中该

系数过小的不足, 故本文试验能更真实地模拟堰塞坝溃决。

表 1 模型坝体与真实堰塞坝案例库的形态特征参数

Tab. 1 Morphological characteristic parameters of model dam body and real landslide dam case database

坝体类型	$H:C$	$H:B$	$S_u/(\circ)$	$S_d/(\circ)$	坝体形态系数( $V_d^{1/3}:H$ )	堰塞湖形态系数( $V_l^{1/3}:H$ )
模型试验坝	1.2	0.23	34	27	1.55	4.26~5.18
真实案例库	0.2~3.0	0.02~1.00	11~45	11~45	0.50~5.00	0.20~10.00

注:  $H$  为最大坝高;  $C$  为坝顶宽;  $B$  为坝底宽;  $S_u$ 、 $S_d$  分别为上、下游坝坡的坡度;  $V_d$  为坝体体积;  $V_l$  为堰塞湖上游最大库容。

### 1.3 工况设计

试验自变量控制为上游来水量、溃口初始形状、上游库容。物理模型试验与原型过程水流应当满足弗劳德数相似的准则<sup>[27]</sup>, 结合白格堰塞坝实测资料, 确定试验起始流量为 8 L/s。在此基础

上进行选择为 6、7 L/s, 探究上游入库流量影响。保证每个断面的面积一致; 上游库容根据试验水槽不同长度布置堰塞坝, 模拟不同库容下的堰塞坝溃决。考虑天然河道中坡度<sup>[28]</sup>, 本文试验中水槽坡度均选取为 1°。堰塞坝溃决试验工况见表 2。

表 2 堰塞坝溃决试验工况

Tab. 2 Test conditions of landslide dam collapse

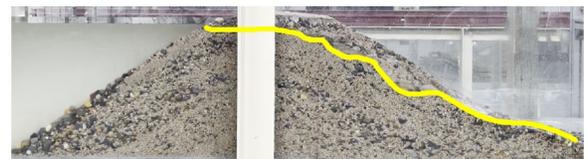
试验工况	入库流量/ ( $L \cdot s^{-1}$ )	最大库容/ $m^3$	溃口初始形状	溃口尺寸/mm		溃口断面面积/ $mm^2$	堰塞湖形态系数
				深度	宽度		
1	8	2.08	梯形	40	100	3 000	4.26
2	8	2.08	三角形	60	100	3 000	4.26
3	8	2.08	矩形	40	75	3 000	4.26
4	6	2.08	梯形	40	100	3 000	4.26
5	7	2.08	梯形	40	100	3 000	4.26
6	7	2.92	梯形	40	100	3 000	4.76
7	7	3.76	梯形	40	100	3 000	5.18

注: 1~3 组试验工况控制变量为溃口初始形状; 1、4、5 组试验工况控制变量为上游入库流量; 5~7 组试验工况控制变量为最大库容。

## 2 试验结果

### 2.1 总体结果

试验中均出现了类似的溃决过程, 但根据自变量的不同, 洪峰流量与出现时间、下游河道段的泥沙分布有所不同。选取工况 4 为例进行详细分析, 在堰塞湖水位达到初始溃口位置开始过流时定义为  $t=0$  s, 其不同阶段见图 4, 试验过程可以按照泄流槽的扩宽发展过程分为 3 个阶段。



b) 下游坝坡形成多级陡坎( $t=80$  s)



c) 陡坎溯源至上游并伴随边坡坍塌( $t=150$  s)



a) 水流开始漫过泄流槽( $t=0$  s)



d) 溃口不断展宽, 流量达到峰值( $t=214$  s)

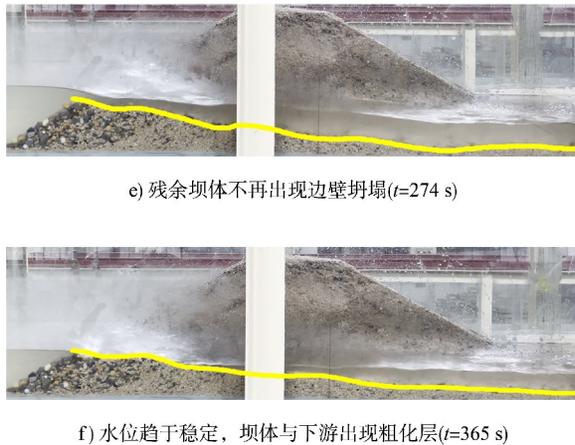
c) 残余坝体不再出现边壁坍塌( $t=274$  s)f) 水位趋于稳定, 坝体与下游出现粗化层( $t=365$  s)

图4 工况4的溃决过程侧视图

Fig. 4 Side view of collapse process under condition 4

## 2.2 阶段 I: 溃口初始阶段

此时水流会进入预留的泄流槽位置, 见图 4a), 由于堰塞坝宽级配的松散特性, 此时会伴随有轻微沉降过程与渗流过程。水流漫过泄流槽后, 随着冲蚀将细颗粒带走, 形成了多级陡坎, 见图 4b)。多级陡坎从下游逐渐向上游蔓延的过程, 称为溯源侵蚀现象。此试验粒径尺寸较大, 阶段 I 过程中观察到了大粒径土料 ( $10\text{ mm} < d < 40\text{ mm}$ ) 堵塞堰塞坝溃口, 而导致溯源侵蚀速率显著降低的情况, 与前人试验中的溯源侵蚀发展过程较快存在差异。此阶段溃口水流流速较低, 泥沙起动仅侵蚀带走细颗粒, 残留粗颗粒停留在背水坡流道内是导致溯源侵蚀现象发生较缓慢原因。

## 2.3 阶段 II: 加速冲蚀阶段

在多级陡坎向上游蔓延后, 溃口的横断面出现发展迹象, 边壁开始展现坍塌情况, 见图 4c)。此时的溃口过流能力增强与水流流速逐渐增大, 导致对坝体下部过水位置被不断冲刷, 出现了更多的边壁坍塌情况。边壁大规模坍塌导致过水面积急剧增大, 上游库容高速下泄, 溃口宽度持续扩大, 最终流量增大到最大值, 见图 4d), 下游坡脚处出现一定深度冲坑, 水位下降明显。此阶段过程中, 因为初始溃口设置在右岸边壁, 水流冲刷呈喇叭状, 靠近溃口位置流速较大, 导致高含沙水流经过溃口后出现了背水坡位置左岸泥沙的大规模淤积的现象。伴随库容急剧下泄后, 水位下降速度减缓, 边壁坍塌现象出现减少, 溃决

开始进入下一阶段。

## 2.4 阶段 III: 减速平衡阶段

这个阶段开始伴随溃口的形状与下泄量趋于稳定, 上游水位下降速率缓慢。流速减缓导致溃口的边壁坍塌现象开始停止, 见图 4e), 坝体冲蚀减少伴随过流水体清澈, 表明其挟带的悬移质含量大幅下降, 但仍观察到了有部分推移质被水流运输的情况。观察残留坝体与下游河道段, 均存在不同程度的粗化层形成现象, 粗化层对残余坝体起到了一定保护作用, 防止其继续被水流冲蚀。随着上游水位整体趋于稳定, 上游来流量基本等于下泄流量, 此时溃决过程结束, 见图 4f)。

## 3 溃决流量与坝料冲蚀量分析

### 3.1 溃决流量

溃决流量是研究各型堰塞坝溃决过程的重要参数之一, 溃决流量图可以直接反映堰塞坝漫顶溃决的各个阶段特征。溃决过程中峰值流量和峰现时间的研究, 可为堰塞坝灾害的防灾减灾与应急救援提供理论支撑。利用水量平衡原理, 通过列出不同时刻的上游水位变化的水量平衡方程, 可以推导出溃决流量的计算公式:

$$Q = \frac{(h_1 - h_2)(A_1 + A_2)}{2(t_2 - t_1)} + q_{in} \quad (1)$$

式中:  $h_1$ 、 $h_2$  分别为上游  $t_1$ 、 $t_2$  时刻水库水位;  $A_1$ 、 $A_2$  分别为上游  $t_1$ 、 $t_2$  时刻湖面面积;  $q_{in}$  为水库入流流量。

#### 3.1.1 不同泄流槽形状的影响

根据试验中监测水位的摄像机视频, 起点以水流漫过坝顶为起始点记为 0 s, 此后每间隔 3 s 读取 1 次上游水位, 采用式(1)求得不同自变量下的水位与流量过程线见图 5。可以看出, 在不同泄流槽形状自变量下梯形(工况 1)、三角形(工况 2)、矩形(工况 3), 峰现时间与峰值流量依次是(158 s, 20.81 L/s)、(118 s, 25.88 L/s)、(125 s, 24.20 L/s)。3 组工况前期流量曲线均较为平缓, 对应阶段 I 溃口初始阶段中, 大颗粒土料堵塞泄流槽延缓了溃口的进一步展宽下切。此外明显看出峰值流量从

大到小为三角形、矩形、梯形槽。三角形槽峰值流量相比矩形和梯形槽, 增长率为 16.9% 和 24.4%。而峰现时间为三角形槽最早, 矩形槽次之, 梯形槽最后。造成上述情况原因分析如下: 三角形槽底部高程最低且形状呈尖角, 水流对底部水土作用面积最小, 水流经过后, 所带走的坝体细颗粒对槽底的侵蚀程度较大, 导致此种断面在阶段 II 加速冲蚀阶段中展宽下切速率较快, 最终其峰现前流量增长率明显高于另两者; 矩形槽边壁在冲蚀阶段中侧面坍塌较多, 导致流量增长比梯形槽快, 故开挖泄流槽以梯形槽为宜。

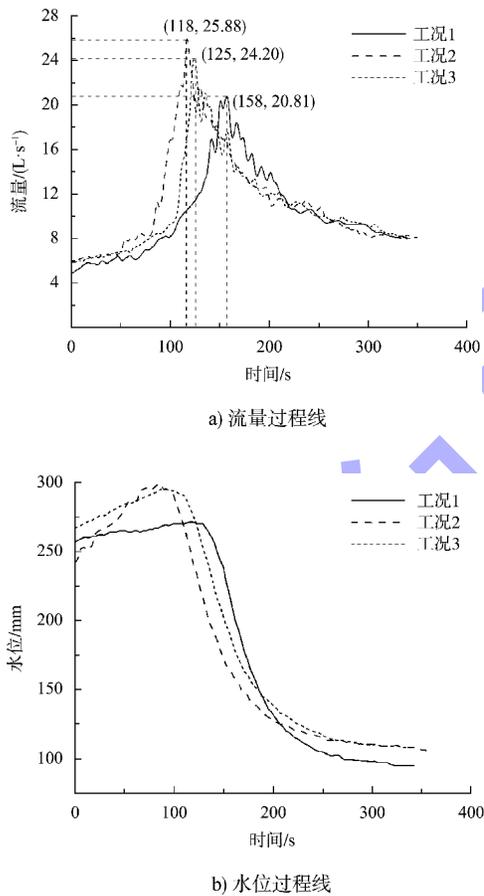


图 5 不同泄流槽的流量和水位过程线  
Fig. 5 Process lines of flow and water level under different spillways

### 3.1.2 不同上游来流量的影响

不同上游来流量的水位和流量过程线见图 6。可以看出, 在不同上游来流量 8 L/s (工况 1)、7 L/s (工况 5)、6 L/s (工况 4) 下, 峰现时间与峰值流量分别为 (158 s, 20.81 L/s)、(193 s, 20.63 L/s)、

(214 s, 20.27 L/s)。3 组试验峰现时间与峰值流量差异为上游来流量越大, 其峰现时间越早, 但洪峰流量增值与上游来流量增加值相比却较缓。上游来流量下 8 与 7 L/s 相较于 6 L/s, 其洪峰流量增长率仅为 2.7%、1.5%。三者流量过程线均呈现出“矮胖”的特征, 但注意到工况 1 的洪峰流量增长较为平缓, 而工况 4 与 5 均出现了增长较快的洪峰。造成上述情况的原因是: 在其他相同条件下, 上游来流量的减少, 会导致坝前出现最高水位时间明显延后, 见图 6b), 工况 4 的最高水位在同组中最大, 致使坝体浸润线位置在 3 组中最高, 见图 7; 低来流量下库容蓄水到最大库容时间变长 (流量从高到低所需时间依次为 465、637、720 s), 工况 4、5 长时间渗流带走了坝体底部细颗粒, 致使抗剪强度降低, 在溯源侵蚀结束后的阶段 II 加速冲蚀后, 水流冲蚀边壁展宽下切过程迅速, 使流量增长率较高。

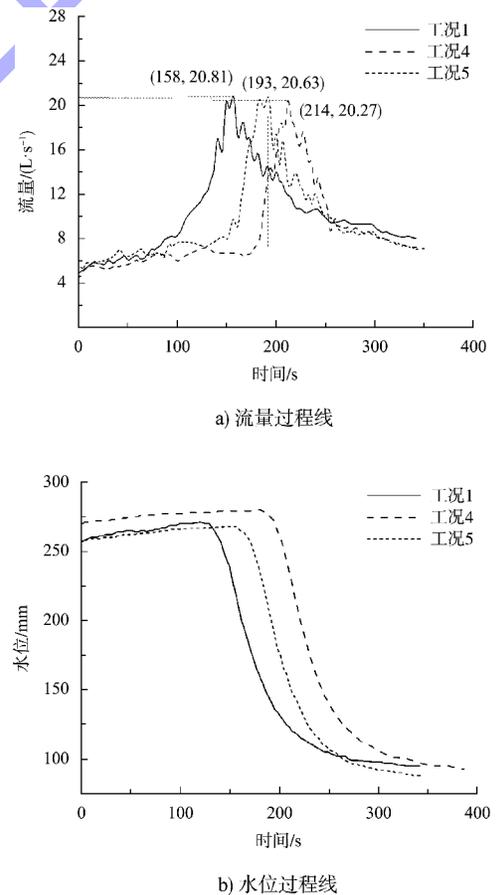


图 6 不同上游来流量的流量和水位过程线  
Fig. 6 Process lines of flow and water level under different upstream inflows

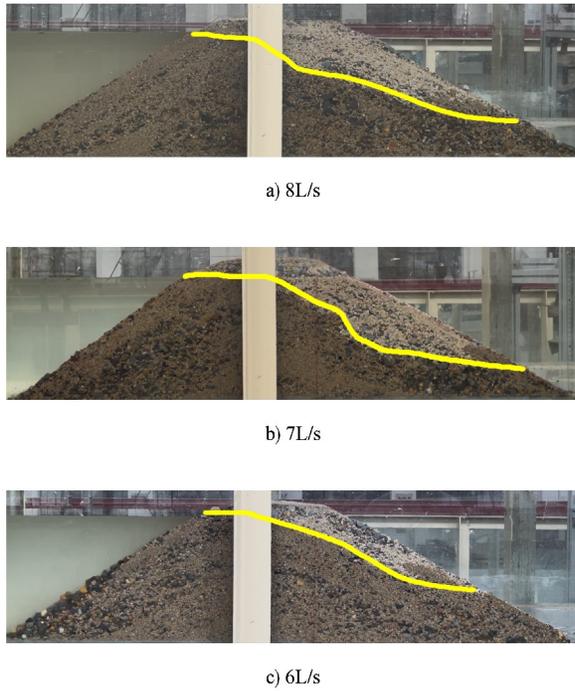


图 7 不同来流量下浸润线  
Fig. 7 Phreatic line under different inflow

### 3.1.3 不同最大库容的影响

不同库容的水位和流量过程线见图 8。可以看出，在不同的最大库容自变量下  $2.08 \text{ m}^3$ (工况 5)、 $2.92 \text{ m}^3$ (工况 6)、 $3.76 \text{ m}^3$ (工况 7)下，峰现时间与峰值流量分别为 (193 s, 20.63 L/s)、(135 s, 31.41 L/s)、(120 s, 41.90 L/s)，3 组工况的堰塞湖体积形态系数为 4.26、4.76、5.18。随着堰塞湖的最大库容增加，其洪峰流量与峰现时间急剧增加和提前。工况 6 与 7 相较于工况 5，其洪峰流量增长率为 52.33% 和 103.1%。造成上述原因与不同来流量组情况类似：渗流降低了堰塞坝整体抗剪强度，同时库容增大导致溃口水流下泄速度较之前 5 组极快，高速水流将大颗粒土料冲至下游，因此粗粒料对堰塞体起到的阻挡溯源侵蚀作用较小，最终导致阶段 I 发展时间较少并迅速进入阶段 II 加速冲蚀阶段。

工况 6 与 7 的洪峰流量增长比工况 1~5 猛烈得多，工况 6、7 的堰塞湖形态系数更接近堰塞坝真实案例(白格堰塞坝为 8.30)，其较好地模拟了堰塞湖溃决的迅猛过程。

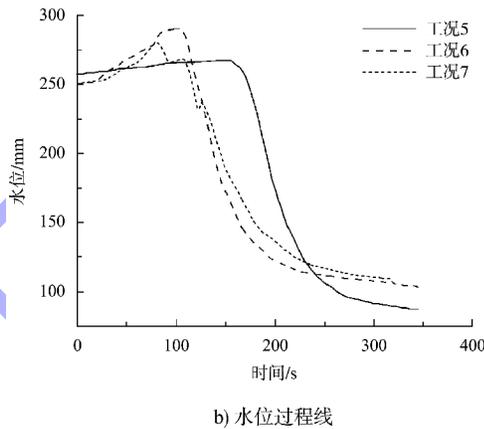
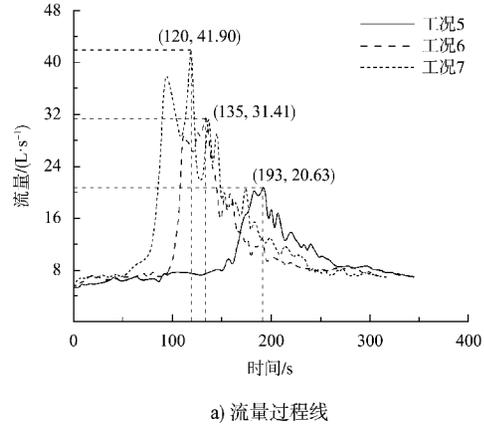


图 8 不同库容的流量和水位过程线  
Fig. 8 Process lines of flow and water level under different reservoir capacities

### 3.2 坝料冲蚀量分析

采用坝料冲蚀量(不同位置坝体质量与坝体总质量之比)进行间接分析溃决过程，每次试验完成后，针对残留坝体与下游各个位置之间的淤积泥沙进行收集与烘干，并与堰塞坝的总质量进行对比，得到的结果见表 3。可以发现，漫顶溃决发生后，下游的泥沙淤积主要发生在下游  $0 \sim <3 \text{ m}$  位置，而  $5 \text{ m}$  及以上受限于水槽长度且其每米长度内泥沙淤积较少，故将  $5 \text{ m}$  及以上作为一个整体进行测量。试验完成后对水槽末端的拦沙筛进行清理发现，被溃决洪水冲向最远端的土料以粗粒料( $5 \text{ mm} < d < 40 \text{ mm}$ )为主，而细颗粒占比较少，推测此现象可能是阶段 II 加速冲蚀过程中峰值洪水将之前堵住泄流槽的大颗粒运输至此，细颗粒一方面在蓄水阶段就已经被渗流带走部分并沉积

在下游河道, 另一方面是大颗粒会一定程度上阻碍水流流动、降低溃决过程中洪水流速, 从而对洪水的细颗粒泥沙输运起到了抑制作用。

表3 堰塞坝各位置段占总质量的百分比

Tab.3 Percentage of total mass for each position section of landslide dam

工况	残留坝体	0~<1 m	1~<2 m	2~<3 m	3~<4 m	4~<5 m	5 m 及以上
1	44.26	16.58	15.08	10.81	4.25	1.95	7.07
2	40.38	17.57	16.38	10.99	4.57	2.25	7.86
3	42.17	16.69	15.91	10.83	4.95	2.98	6.47
4	53.97	18.22	14.72	7.27	0.94	0.91	3.97
5	50.71	18.29	14.01	8.5	1.25	0.96	6.29
6	35.33	16.35	14.42	12.53	7.13	1.49	12.74
7	31.92	16.93	13.97	12.52	6.74	3.94	13.99

此外观察到工况 6、7 两组较大堰塞湖形态系数下坝体冲蚀量较大, 且泥沙输运到了 5 m 及以外的远端仍有较大的质量占比, 表明真实情况中极有可能会产生较明显的下游河道淤积情况。

### 3.3 宽级配与堰塞湖形态系数对溃决影响

在试验工况 1~5 (堰塞湖形态系数 4.26) 中, 尽管各组的自变量均有所不同, 但粒径 ( $10 \text{ mm} < d < 40 \text{ mm}$ ) 均对堰塞坝在阶段 I 溃口初始阶段有着不同程度的溯源侵蚀阻碍, 大颗粒堆积在泄流槽与下游陡坎中, 致使水流对坝体纵向冲蚀速率放缓; 但大颗粒对于坝体横向展宽影响较少, 水流侵蚀导致坝体侧面细颗粒被不断带走, 最终泄流槽与陡坎底部被掏空形成边坡坍塌, 溃口展宽后流速增大, 粗颗粒也被带走到下游并逐渐堆积形成粗化层。工况 4 中因为其上游来流量最小为 6 L/s, 水流冲蚀速率较小与粗颗粒阻碍作用, 共同导致其峰现时间最晚到达。故在真实堰塞坝案例中, 对于拥有较小堰塞湖形态系数与上游来流量的情况, 人工开挖合理的泄流槽形状尺寸能较为轻松排解险情。

但堰塞湖形态系数一旦增大, 如工况 6、7 (形态系数 4.76、5.18) 的高速下泄水流会迅速冲过梯级陡坎并带走粗颗粒, 图 8a) 的流量过程线呈现近 90° 的增加, 与白格堰塞坝溃决实测资料一致, 且在最大流量前均出现了小洪峰情况, 表明了在

较大堰塞湖形态系数下, 粗颗粒对于阻碍溃决过程起的作用微小且边坡坍塌与溃口展宽速度极快, 因此对于应急抢险来说, 面对有较高堰塞湖形态系数下的堰塞坝, 需要疏散下游与开挖泄流槽。

## 4 结论

1) 根据坝体冲蚀状态将漫顶溃决分为 3 个阶段: 溃口初始阶段、加速冲蚀阶段、减速平衡阶段, 其中堰塞坝中所含的粗粒径料在阶段 I 中起到了延缓坝体纵向破坏的作用。

2) 泄流槽初始形状中, 三角形槽冲蚀强度在 3 组形状中最大且峰值流量最大、峰现时间最早, 梯形槽峰值流量最小且峰现时间最晚, 矩形槽介于两者之间。

3) 不同上游来流量主要影响的是峰现时间, 上游来流量越大其峰现时间越快, 但较小来流量会导致坝体因渗流过大而强度降低, 最终在加速冲蚀阶段中流量增长较快。

4) 对于洪峰流量与峰现时间, 起主导作用的是最大库容。增大库容会导致粗颗粒对坝体的保护作用削弱, 导致峰值流量剧增且峰现时间提前; 同时较大库容会导致下游泥沙淤积量增加, 易对河道产生不良影响, 故在应急抢险中, 对于有较高堰塞湖形态系数的堰塞坝须及早干预。

## 参考文献:

- [1] 刘宁,程尊兰,崔鹏,等.堰塞湖及其风险控制[M].北京:科学出版社,2013.  
LIU N, CHENG Z L, CUI P, et al. Dammed lakes and risk management[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [2] SHAN Y B, CHEN S S, ZHONG Q M. Rapid prediction of landslide dam stability using the logistic regression method[J]. Landslides, 2020, 17(12): 2931-2956.
- [3] 郑鸿超,石振明,彭铭,等.崩滑碎屑体堵江成坝研究综述与展望[J].工程科学与技术,2020,52(2):19-28.  
ZHENG H C, SHI Z M, PENG M, et al. Review and prospect of the formation mechanism of landslide dams caused by landslide and avalanche debris[J]. Advanced engineering sciences, 2020, 52(2): 19-28.
- [4] COSTA J E, SCHUSTER R L. The formation and failure of natural dams[J]. Geological Society of America bulletin, 1988, 100(7): 1054-1068.
- [5] PENG M, ZHANG L M. Breaching parameters of landslide dams[J]. Landslides, 2012, 9(1): 13-31.
- [6] 陈生水,赵天龙,钟启明.堰塞坝溃坝数学模型研究与应用[J].水利水运工程学报,2015(3):1-8.  
CHEN S S, ZHAO T L, ZHONG Q M. Dam-break numerical model for a barrier dam and its application[J]. Journal of hydraulic engineering, 2015(3): 1-8.
- [7] 石振明,周明俊,彭铭,等.崩滑型堰塞坝漫顶溃决机制及溃坝洪水研究进展[J].岩石力学与工程学报,2021,40(11):2173-2188.  
SHI Z M, ZHOU M J, PENG M, et al. Research progress on overtopping failure mechanisms and breaching flood of landslide dams caused by landslides and avalanches[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2021, 40(11): 2173-2188.
- [8] 刘嘉欣,钟启明,陈亮,等.堰塞坝溃决机理与溃决过程模拟技术研究综述[J].防灾减灾工程学报,2022,42(3):638-652.  
LIU J X, ZHONG Q M, CHEN L, et al. Review on the simulation technologies of breach mechanism and breaching process of landslide dam[J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2022, 42(3): 638-652.
- [9] 余志球,邓建辉,高云建,等.金沙江白格滑坡及堰塞湖洪水灾害分析[J].防灾减灾工程学报,2020,40(2):286-292.  
YU Z Q, DENG J H, GAO Y J, et al. Analysis on Baige landslide and barrier lake flood disasters in Jinsha River[J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2020, 40(2): 286-292.
- [10] 张新华,薛睿瑛,王明,等.金沙江白格滑坡堰塞坝溃决洪水灾害调查与致灾浅析[J].工程科学与技术,2020,52(5):89-100.  
ZHANG X H, XUE R Y, WANG M, et al. Field investigation and analysis on flood disasters due to Baige landslide dam break in Jinsha River [J]. Advanced engineering sciences, 2020, 52(5): 89-100.
- [11] 冯震宇,廖海梅,杨兴国,等.堰塞坝稳定性评估与模型评价[J/OL].工程地质学报(2023-05-19)[2024-03-15].<https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2022-0712>.  
FENG Z Y, LIAO H M, YANG X G, et al. Stability assessment and model evaluation of landslide dams [J/OL]. Journal of engineering geology (2023-05-19) [2024-03-15]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2022-0712>.
- [12] 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 Z M, MA X L, PENG M, 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.
- [13] COSTA J E, SCHUSTER R L. Documented historical landslide dams from around the world [R]. Vancouver: US Geological Survey, 1991.
- [14] 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 C, LI C J, YANG X G, et al. Erosion and breach of landslide dam based on physical model tests [J]. Advanced engineering sciences, 2021, 53(6): 43-53.
- [15] NIU Z P, XU W L, LI N W, et al. Experimental investigation of the failure of cascade landslide dams[J]. Journal of hydrodynamics, 2012, 24(3): 430-441.
- [16] ZHOU G G D, ZHOU M, SHRESTHA M S, et al. Experimental investigation on the longitudinal evolution of landslide dam breaching and outburst floods [J].

- Geomorphology, 2019, 334: 29-43.
- [17] 胡桂胜, 陈宁生, 邓明枫, 等. 茂县宗渠堰塞湖漫顶溃决洪水演进规律模型试验研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 172-176.  
HU G S, CHEN N S, DENG M F, et al. Model experiment study of evolution of overtopping outburst flood for Zongqu landslide lake in Mao County [J]. Research of soil and water conservation, 2011, 18(3): 172-176.
- [18] 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 X G, CUI P, WANG Z Y, et al. Experiments investigation, on longitudinal breaching of natural dam[J]. Journal of Sichuan University(engineering science edition), 2016, 48(4): 38-44.
- [19] 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 J, CAO S Y, YANG F G, et al. Experimental study on outlet and scour of blocked dam[J]. Journal of Sichuan University (engineering science edition), 2010, 42(5): 191-196.
- [20] 赵天龙, 陈生水, 王俊杰, 等. 堰塞坝漫顶溃坝离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 1965-1972.  
ZHAO T L, CHEN S S, WANG J J, et al. Centrifugal model tests overtopping failure of barrier dams [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2016, 38(11): 1965-1972.
- [21] 赵天龙, 岳亮, 李方芳, 等. 爬高型堰塞坝漫顶溃决机理研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(4): 910-920.  
ZHAO T L, YUE L, LI F F, et al. Study on the overtopping breach mechanism of climbing-type landslide dams[J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2024, 44(4): 910-920.
- [22] 付建康, 罗刚, 胡卸文. 滑坡堰塞坝越顶溢流破坏的物理模型实验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(1): 203-212.  
FU J K, LUO G, HU X W. Physical model experiment on overtopping overflow failure of landslide dam[J]. Journal of Jilin University (earth science edition), 2018, 48(1): 203-212.
- [23] 徐富刚, 陈志宇, 曹俊, 等. 不同断面泄流槽的堰塞坝溃决模型试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(6): 32-38.  
XU F G, CHEN Z Y, CAO J, et al. Experimental study on collapse models of landslide dam with different cross-section discharge troughs [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science edition), 2024, 43(6): 32-38.
- [24] 陈祖煜, 陈生水, 王琳, 等. 金沙江上游“11.03”白格堰塞湖溃决洪水反演分析[J]. 中国科学(技术科学), 2020, 50(6): 763-774.  
CHEN Z Y, CHEN S S, WANG L, et al. Back analysis of the breach flood of the “11.03” Baige barrier lake at the upper Jinsha River [J]. Scientia Sinica (technologica), 2020, 50(6): 763-774.
- [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 Y J, LUAN Y S, YANG Q G, 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.
- [26] 左永振, 张伟, 潘家军, 等. 粗粒料级配缩尺方法对其最大干密度的影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): 417-422.  
ZUO Y Z, ZHANG W, PAN J J, et al. Study on the effect of particle size distribution scaling method on the maximum dry density of coarse-grained soils [J]. Rock and soil mechanics, 2015, 36(S1): 417-422.
- [27] 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.
- [28] 周圆媛. 崩滑型堰塞坝成坝特征及其对溃坝影响研究[D]. 上海: 同济大学, 2022.  
ZHOU Y Y. The formation characteristics of landslide dams formed by rock avalanches or debris and their impact on dam failure [D]. Shanghai: Tongji University, 2022.