



论 文

堰塞料冲蚀特性与堰塞体漫顶溃决机理

胡亮¹, 钟启明^{1,2*}, 陈灵淳¹, 单熠博¹, 张露澄¹

1. 水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098

2. 水利部水库大坝安全重点实验室, 南京 210029

* E-mail: qmzhong@nhri.cn

收稿日期: 2025-12-28; 接受日期: 2026-06-11; 网络版发表日期: 2026-08-31

国家自然科学基金联合基金重点项目(编号: U22A20602, U24A20182)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(编号: Y324006, Yk325002)资助

摘要 堰塞体由滑坡体堵塞河道壅水形成, 极易发生漫顶溃决, 对下游地区构成巨大洪水威胁, 而堰塞料冲蚀特性及堰塞体溃口演化机制仍不明晰. 本文通过开展堰塞体漫顶溃决水槽模型试验, 探究了堰塞料级配和相对密实度对堰塞体溃决过程的影响规律. 试验结果表明, 相对密实度的变化主要改变溃口发展速度, 对溃口形态影响较小; 堰塞料级配控制着溃口形态演化过程, 随着粗颗粒含量增加, 纵向溃口依次呈现出陡坎、冲刷坑和线性等形态, 而横向溃口边坡间歇性失稳依次呈现出倾倒和剪切破坏; 溃口洪峰流量与堰塞料不均匀系数正相关, 溃决历时与平均粒径负相关; 通过冲蚀率试验认为推移质层状运动是导致高速水流下堰塞料冲蚀过程受到抑制的主因. 基于平均粒径、底床切应力与颗粒起动切应力, 建立了一个考虑冲蚀系数动态变化的堰塞料冲蚀率公式, 阐明了堰塞体溃决时的冲蚀抑制机制. 研究成果对揭示堰塞料冲蚀特性和堰塞体溃口形态与流量演化机制具有重要理论价值.

关键词 堰塞体, 漫顶, 冲蚀特性, 溃口形态, 溃口流量, 溃决机理

1 引言

堰塞体一般发生在高山峡谷地区, 由滑坡体堵塞河道形成, 具有复杂的地貌特征和岩土力学特性^[1,2]. 近年来, 极端降水和强震等灾害频发, 堰塞体发生概率显著增加^[3,4]. 由于堰塞体没有泄水通道, 在不断上升的堰塞湖水位作用下, 极易发生漫顶溃决, 对下游人员生命财产和重大基础设施造成严重威胁^[5,6]. 因此, 全面理解堰塞体漫顶溃决过程及其关键影响因素, 对堰塞体溃决洪水风险评估与灾害防控至关

重要.

学者们开展了大量的模型试验研究堰塞体漫顶溃决过程, 将其溃口形态演化过程概括为三个阶段^[7~10]: 纵向溯源冲蚀-纵向下切与横向坍塌-形态趋于稳定. 堰塞体漫顶溃决过程中, 溃口纵向剖面表现出显著非均匀冲蚀特征, 而溃口两侧边坡(后称溃口边坡)以不同破坏模式发生横向失稳坍塌^[11,12]. 此外, 学者们开展了堰塞体形态(高度、上/下游坡比)^[13,14]、堰塞料特性(级配、初始含水率、密度)^[15,16]、堰塞湖水动力条件(库容、来流量、河道底坡)^[17~19]以及泄流槽形

引用格式: 胡亮, 钟启明, 陈灵淳, 等. 堰塞料冲蚀特性与堰塞体漫顶溃决机理. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 2268–2282

Hu L, Zhong Q M, Chen L C, et al. Erosion characteristics of landslide deposits and overtopping-induced breach mechanisms of landslide dam (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 2268–2282, doi: 10.1360/SST-2025-0447

态^[20,21]等不同因素对堰塞体溃决过程影响规律的研究,认为堰塞料级配和密度对堰塞体溃决过程具有重要影响,但溃口形态与流量演化过程的控制因素仍不清晰.

堰塞体溃决过程本质是“水动力驱动-堰塞料冲蚀响应”的耦合过程,其核心在于堰塞料冲蚀率的研究,冲蚀率通常定义为单位时间、单位面积内被冲蚀的土体体积^[11].国内外对黏性土冲蚀率研究较多,发现级配、含水率和干密度对黏性土冲蚀率有重要影响,不同性质土体冲蚀率差异可达几个数量级^[22,23].堰塞料通常由粗粒土组成,但对其冲蚀率及其影响因素的研究尚显匮乏.

土体冲蚀率可表示为底床切应力与土颗粒临界起动切应力之差的函数,现有计算公式多采用线性或指数等函数形式^[24].但传统线性或指数公式在高流速条件下会高估土体冲蚀率^[25],且土体在不断增加的底床切应力下不应具有无限冲蚀率^[26].因此,现有冲蚀率公式不能反映真实的物理力学机制,高速水流作用下堰塞料冲蚀率定量表征方法仍需深入研究.

本文基于前人研究成果,重点考虑堰塞料的非均匀性和密实程度,通过控制堰塞料的粒径范围,开展一系列拥有不同不均匀系数或相对密实度的堰塞体漫顶溃决水槽模型试验,旨在阐明以下理论问题:(1)揭示堰塞体溃口形态和流量演化规律;(2)明晰堰塞体漫顶溃决过程关键控制因素;(3)建立基于堰塞料物理力学特性和水动力条件的冲蚀率公式.

2 堰塞体漫顶溃决模型试验设计

2.1 试验设备与模型

试验在水槽模型试验系统内进行,该系统由三部分组成:水流供应设备、矩形水槽和尾水池(图1(a)).水流供应设备配备一台水泵,最大来流量可达10.0 L/s;矩形水槽长4.0 m、高1.0 m,宽度可在0.1~0.3 m范围内调节;水深利用静水压力原理通过测量水压确定,误差范围为0.1 Pa;使用孔压计对水位变化进行实时监测,并在水槽顶部、右侧和下游侧布置高速摄像机,对试验过程进行拍摄.图1(b)和(c)分别为冲蚀测试与溃决试验模型的几何形态参数.

基于水量平衡原理,通过来流量和上游水位计算溃口流量:

$$Q_{in} - Q_b = \frac{dV_1}{dt}, \quad (1)$$

式中: Q_{in} 为来流量; Q_b 为溃口流量; V_1 为上游库容; t 为时间.

堰塞体几何形态对溃决过程具有显著影响,堰塞体稳定性、溃决机制及溃决洪水势能与堰塞湖库容、堰塞体高度和体积等几何形态参数高度相关^[11].Zhou等人^[27]通过对80多座堰塞体几何形态特征的统计分析发现其上、下游坡度在11°~45°之间,Xu等人^[28]和Peng等人^[29]根据统计资料提出可采用 H_d/B_d 、 $V_d^{1/3}/H_d$ 与 $V_1^{1/3}/H_d$ 等无量纲参数来表征堰塞体几何形态特征.

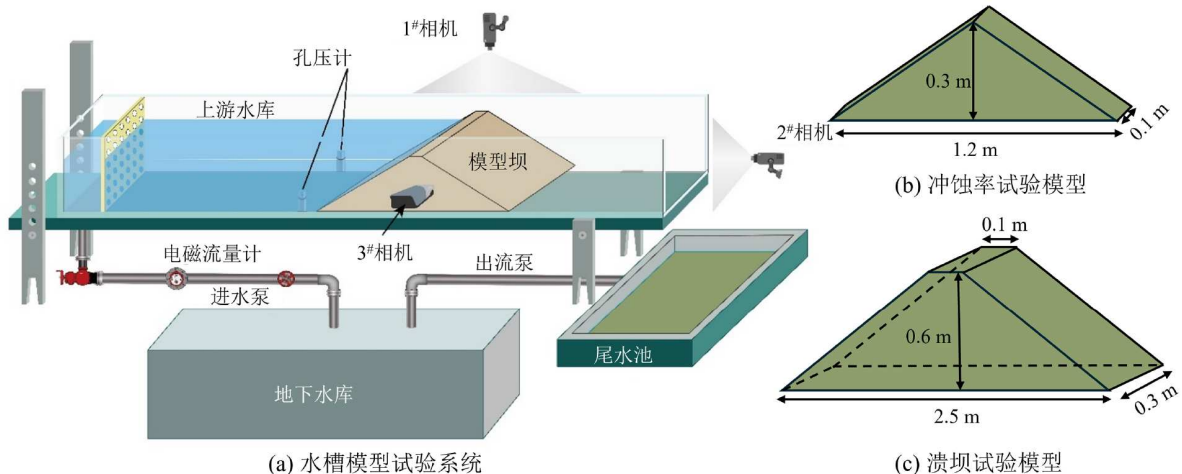


图1 (网络版彩图)溃坝水槽模型试验系统示意图
Figure 1 (Color online) The schematic of flume model test system.

本文试验堰塞体模型的纵剖面被设计为梯形, 模型长度(垂直河道方向)即为水槽宽度(0.3 m), 模型高度0.6 m, 模型顶宽0.1 m, 上、下游坡比均为1:2 (约为26.6°). 采用无量纲参数比对模型坝与实际堰塞体几何形态参数(表1), 证实预设值在实际值范围内, 表明预设堰塞体与实际情况相似. 在模型坝坝肩预设一个截面为直角梯形的泄流槽, 高4 cm、底宽3 cm、顶宽5 cm.

为精准获取溃决过程中溃口冲蚀率空间分布特征及堰塞料冲蚀特性, 消除溃口边坡物质补给与溃口形态非均匀发展带来的测量误差, 同步开展了纵向断面为三角形的单宽(0.1 m)冲蚀试验(图1(b)), 且试验过程中保证全断面过流.

2.2 模型试验材料

堰塞体物质组成复杂, 堰塞料级配表现出显著不均匀性, 而其级配是力学行为的决定因素. 例如, 级配良好的堰塞体由于颗粒排列优化, 会形成更致密的结构, 且拥有更大的密度, 提高堰塞料抗剪强度, 同时降低其渗透性. 以往的研究主要通过控制级配范围或细颗粒含量来研究级配对堰塞体溃决过程的影响. 但在模型试验尺度限制下, 选择相同的最大和最小粒径, 通过改变堰塞料不均匀系数来开展研究是更直接科学的方法. 另外, 试验时通常采用孔隙率或干密度等参数, 控制堰塞料达到相同堆积状态^[7,18], 但不同级配堰

表1 堰塞体几何形态预设值与实际值对比

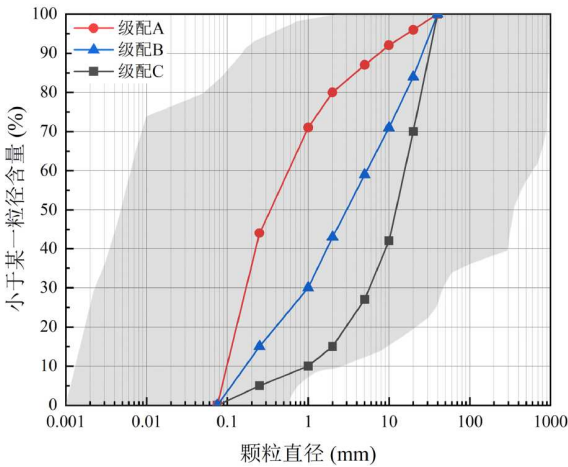
Table 1 Comparison of preset and actual values of the landslide dam's geometry

形态参数 ^{a)}	预设值	实际值
H_d/C_d	2	0.2~3.0
S_u (°)	26.6	11~45
S_d (°)	26.6	11~45
H_d/B_d	0.24	0.02~1
$V_d^{1/3}/H_d$	1.03	0.5~5
$V_l^{1/3}/H_d$	1.13	0.2~10

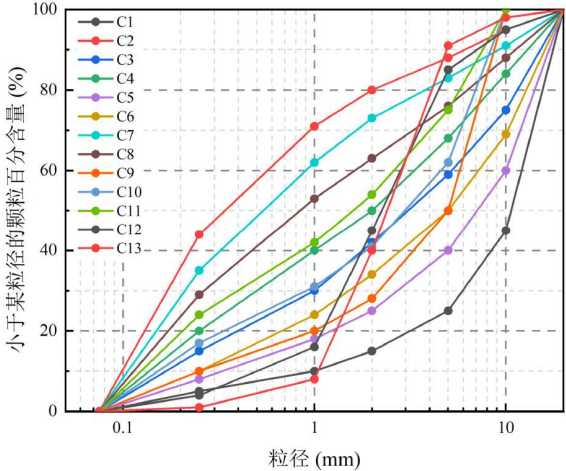
a) H_d 为坝高; C_d 为堰塞体长度(垂直河道方向); S_u 为上游坝坡坡度; S_d 为下游坝坡坡度; B_d 为堰塞体底部宽度(顺河方向); V_d 为堰塞体体积; V_l 为堰塞湖最大库容.

塞料的堆积特性存在差异, 难以通过此类参数实现准确控制, 本文采用相对密实度作为堰塞料堆积质量的控制参数. 基于上述理解, 分别设计了不同级配与相对密实度的堰塞体漫顶溃决试验.

Casagli等人^[30]汇编了包含42座堰塞体级配特征的数据集(图2(a)阴影区域). 三条曲线(A, B和C)对应于本文开展模型试验的级配曲线, 曲线落在阴影区域内, 表明其与现实场景的相关性. 单宽冲蚀率试验级配如图2(b), 不同级配堰塞料的颗粒特征见表2. 为避免其他因素影响, 除目标参数外, 所有试验堰塞料参数均保持一致, 堰塞体初始含水率均选取为5%.



(a) 堰塞体漫顶溃决试验级配



(b) 冲蚀率测试试验级配

图2 (网络版彩图)堰塞体漫顶溃决模型试验堰塞料级配曲线

Figure 2 (Color online) The particle gradation curves for landslide dam breach model tests.

表 2 不同级配堰塞料物理特性指标

Table 2 Physical properties of landslide deposits with different gradings

坝料	$D_r^{a)}$	$d_{50}^{b)}$ (mm)	$\rho_d^{c)}$ (g/cm ³)	$C_c^{d)}$	$C_u^{e)}$	$k^{f)}$ (cm/s)	试验编号
级配A	0.32	0.31	1.800	0.51	5.5	0.00615	T-1
	0.25	0.31	1.765	0.51	5.5	0.00661	T-2
	0.10	0.31	1.694	0.51	5.5	0.00725	T-3
级配B	0.10	3.0	1.906	1.25	30.0	0.1952	T-4
	0.05	3.0	1.800	1.25	30.0	0.2137	T-5
级配C	0.10	10.2	1.800	3.40	10.5	7.517	T-6

a) D_r 为相对密实度. b) d_{50} 为平均粒径. c) ρ_d 为干密度. d) C_c 为曲率系数. e) C_u 为不均匀系数. f) k 为渗透系数.

2.3 模型试验步骤

堰塞体漫顶溃决模型试验过程分为以下五个步骤. (1) 试验准备: 根据预先设计的形态, 在水槽侧壁钢化玻璃上绘制出堰塞体轮廓和网格, 并在相应位置设置孔压计; 按图2级配曲线, 将石英砂和砂砾石按不同比例混合, 以满足表2中制备模型坝的要求. (2) 堰塞体填筑: 建造采用分层填筑法, 各层按照规定质量标准配制对应级配堰塞料, 并均匀压实以达到所需干密度; 填筑完成后, 为了便于观测, 在坝肩开挖初始溃口. (3) 溃决过程: 由于堰塞体形成后堰塞湖水位不断抬升直至发生漫顶, 为符合实际工况, 试验时蓄水达到堰顶后直接漫溢, 而不静置等待稳定渗流场形成. (4) 数据记录: 三台摄像机记录堰塞体溃口形态演化过程, 同时孔压计监测蓄水和溃决时的水位变化. (5) 来流控制: 通过电磁流量计将来流量控制在1.0 L/s, 在溃决结束后停止供水.

3 堰塞体溃口形态与流量演化规律

本文分别开展不同级配与相对密实度的堰塞体漫顶溃决模型试验. 采用级配曲线为A (细粒组), B (中粒组)和C (粗粒组)的模型试验结果表明, 尽管不同级配堰塞料粒径范围相同, 但不均匀系数与平均粒径等级配特征参数的差异还显著影响了堰塞体漫顶溃决过程. 相较而言, 相对密实度的变化主要改变溃口发展速度, 对溃口形态演化过程影响较小. 针对堰塞体漫顶溃决模型试验新发现, 从溃决过程阶段划分、纵向和横向溃口形态、溃口流量与冲蚀率演化特征等方面揭示堰塞料冲蚀特性与堰塞体漫顶溃决机理.

3.1 堰塞体漫顶溃决过程阶段划分

堰塞体由于物质组成松散, 其溃决过程表现出显著的渐进破坏特征(图3). 尽管不同级配堰塞体在溃决过程中呈现出不同的溃口形态演化路径, 其特征还表现为溯源冲蚀、伴随溃口边坡间歇性横向坍塌的垂直下切以及交替出现的冲蚀-沉积现象, 最终使溃口趋于稳定. 根据溃口形态和流量演变特征, 本文将堰塞体漫顶溃决过程分为“初始-发展-衰退-稳定”四个阶段. 第I阶段(初始阶段): 以溃口形态为划分依据, 定义为从水流漫顶到溯源冲蚀至上游坡面. 第II阶段(发展阶段): 以溃口流量为划分依据, 定义为从溯源冲蚀至上游坡面到溃口洪峰出现. 第III阶段(衰退阶段): 以溃口流量为划分依据, 定义为从溃口洪峰出现到衰减至与来流量相等. 第IV阶段(稳定阶段): 以溃口形态为划分依据, 定义为从溃口出流量与来流量相等到溃口形态稳定.

3.2 纵向溃口形态演化特征分析

由于相同级配条件下, 不同相对密实度试验的溃口形态演化过程相同. 因此, 选取 $D_r = 0.1$ 条件下不同级配试验(T-3, T-4, T-6)开展分析. 由于级配差异, 细、中和粗粒组堰塞体纵向溃口形态演化过程截然不同(图4~6).

细粒组试验坝蓄水过程中浸润线发展缓慢, 发生漫顶时下游坡尚处于非饱和状态(图4(a)); 漫顶水流冲刷下游坡, 溃口底床呈近似线性形态, 此时漫顶水流产生的渗流力方向垂直向下, 抑制了堰塞料冲蚀(图4(b)); 溯源冲蚀发展至坝顶上游坡后, 漫顶水头迅速增大导致冲蚀加剧, 在下游坡出现冲坑, 此时渗流力方向仍然垂直向下, 在漫顶后52 s溃口洪峰出现(图4(c)); 溃



图 3 (网络版彩图)白格堰塞体溃决过程实拍图像

Figure 3 (Color online) The actual pictures of Baige landslide dam breach process.

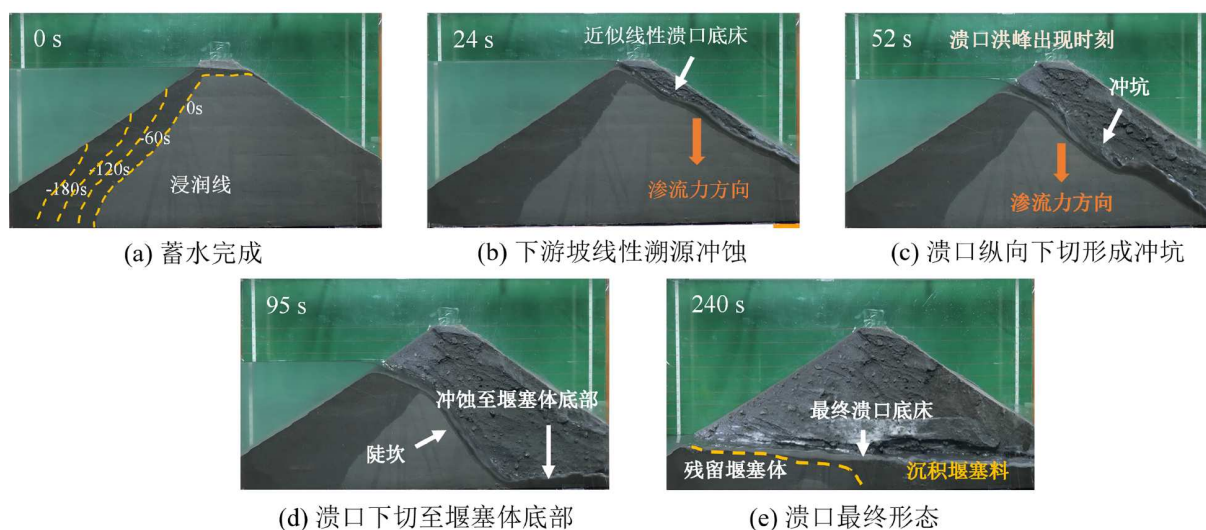


图 4 (网络版彩图)细粒组堰塞体漫顶溃决纵向溃口形态演化过程

Figure 4 (Color online) Longitudinal breach morphology evolution of the fine-grained landslide dam overtopping breaching.

口边坡发生失稳,但坍塌土体被漫顶水流迅速带走,随后溃口下切至堰塞体底部,形成较为直立的“陡坎”(图4(d));水位下降导致水动力减弱,被冲蚀堰塞料在下游发生沉积,形成近似直线的最终溃口底床(图4(e)).

中粒组试验粗颗粒含量有所增加,蓄水过程中浸润线发展速度较细粒组有所加快,但发生漫顶时下游坡仍处于非饱和状态(图5(a));由于粗颗粒的阻滞作

用,漫顶水流冲蚀下游坡时仅带走细颗粒,粗颗粒留在原位导致溃口底床呈多级冲坑状态,且漫顶水流产生的渗流力方向垂直向下,抑制了粗颗粒的冲蚀(图5(b));溯源冲蚀发展至坝顶上游坡后,漫顶水头迅速增大导致冲蚀加剧,在下游坡出现冲坑,由于堰塞体饱和,渗流力方向垂直边坡向上,在漫顶后53 s溃口洪峰出现(图5(c));溃口边坡发生失稳,坍塌土体堆积在溃口流

道, 水动力衰减, 溃口下切速率降低(图5(d)); 水位下降导致水动力减弱, 被冲蚀堰塞料在下游发生沉积, 形成近似直线的最终溃口底床, 但残留坝高较细粒组更大(图5(e)).

粗粒组试验粗粒土含量更大, 蓄水过程中浸润线发展较快, 未发生漫顶时堰塞体已处于饱和状态(图6(a)); 由于下游坡粗粒土含量较高, 溃口底床呈现近似线性状态, 此时渗流力方向垂直下游坝坡向上, 促进了堰

塞料冲蚀(图6(b)); 溯源冲蚀发展至坝顶上游坡后, 漫顶水头迅速增大导致冲蚀加剧, 但大颗粒也在下游坡产生沉积, 在漫顶后39 s溃口洪峰出现(图6(c)); 溃口边坡发生小范围失稳, 坍塌土体堆积在溃口流道, 水动力衰减, 溃口下切速率迅速降低(图6(d)); 水位下降导致水动力减弱, 形成近似直线的最终溃口底床, 但残留坝高较细和中粒组更大(图6(e)).

总体来说, 随着粗颗粒含量的增加, 纵向溃口经历

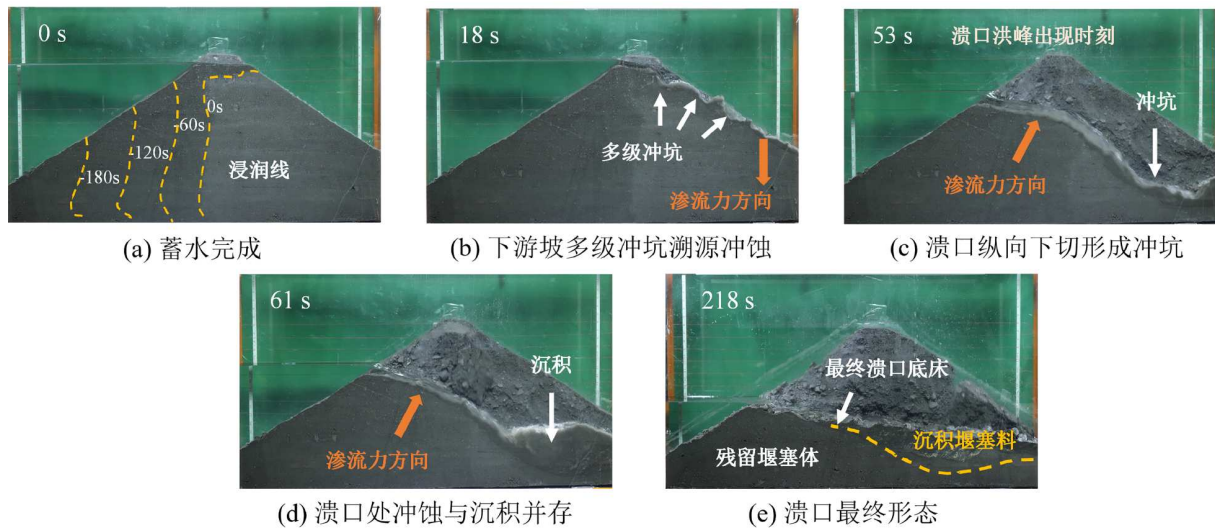


图 5 (网络版彩图)中粒组堰塞体漫顶溃决纵向溃口形态演化过程

Figure 5 (Color online) Longitudinal breach morphology evolution of the medium-grained landslide dam overtopping breaching.

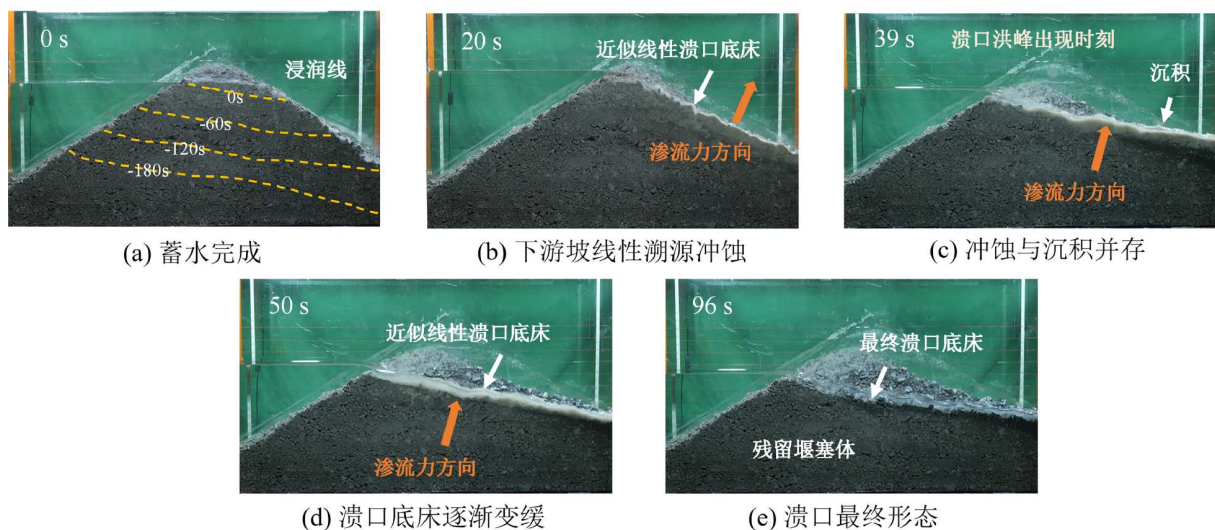


图 6 (网络版彩图)粗粒组堰塞体漫顶溃决纵向溃口形态演化过程

Figure 6 (Color online) Longitudinal breach morphology evolution of the coarse-grained landslide dam overtopping breaching.

了陡坎(细粒组)、冲坑(中粒组)和线性(粗粒组)等形态。对于细粒组试验, 溃口纵断面下切至堰塞体底部, 溃口呈现陡坎形态, 溃口边坡坍塌发生在下游坡脚处, 对溃口底床抬升有限; 对于中粒组试验, 溃口未下切至堰塞体底部, 溃口呈现冲坑形态, 溃口边坡坍塌发生在下游坡中上部, 抬升溃口底床并减小坡度; 对于粗粒组试验, 溃决过程中呈现上冲下淤的情况, 溃口呈现出线性形态, 溃口底床坡度逐渐减小。

3.3 横向溃口形态演化特征分析

本次试验研究阐明了堰塞料级配对溃口横向扩展的主导作用, 相对密实度仅影响了溃口横向拓展速度。图7~9展示了三种不同级配堰塞体模型(T-3, T-4, T-6)

在横向上的溃口演变过程。

对于细粒组试验, 漫顶水流首先对下游坡进行冲刷, 横向溃口呈近似线性形态(图7(a)); 随着溃口的掏蚀, 下游坡溃口上部悬空土体在重力和拉应力作用下发生倾倒破坏, 位于下游坡靠下位置, 对溃口流道影响较小, 坍塌土体在水流作用下迅速冲蚀(图7(b)); 由于下游坡倾倒破坏, 溃口沿下游坡面呈现出上窄下宽的形态, 在漫顶后52 s溃口洪峰出现(图7(c)); 随着冲刷继续, 溃口进一步发展, 在下游坡方向形成一个正梯形最终溃口(图7(d))。

对于中粒组试验, 漫顶水流首先对下游坡进行冲刷, 由于大颗粒的抗冲蚀能力较强, 横向溃口呈多级冲坑形态(图8(a)); 随着溃口的掏蚀, 多级冲坑合并,

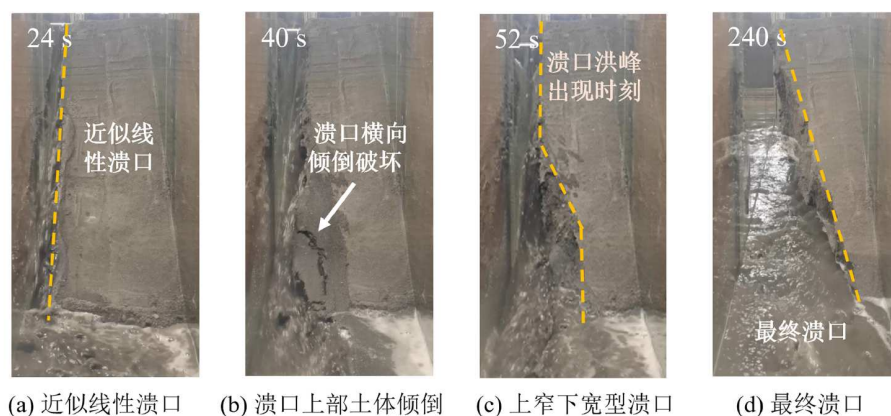


图7 (网络版彩图)细粒组堰塞体漫顶溃决横向溃口形态演化过程

Figure 7 (Color online) Transversal breach morphology evolution of the fine-grained landslide dam overtopping breaching.

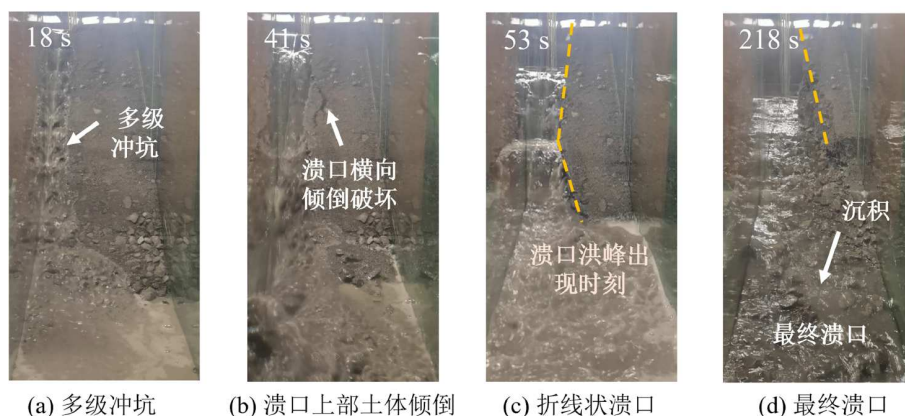


图8 (网络版彩图)中粒组堰塞体漫顶溃决横向溃口形态演化过程

Figure 8 (Color online) Transversal breach morphology evolution of the medium-grained landslide dam overtopping breaching.

下游坡溃口上部悬空土体在重力和拉应力作用下发生倾倒破坏, 位于下游坡靠上位置, 对溃口流道影响较大, 抬升了溃口底床高程, 坍塌土体在水流作用下缓慢冲蚀(图8(b)); 由于下游坡倾倒破坏, 溃口沿下游坡面呈现出“上宽-中窄-下宽”的形态, 在漫顶后53 s溃口洪峰出现(图8(c)); 随着冲蚀继续, 溃口进一步发展, 在下游坡方向形成一个正梯形最终溃口(图8(d)).

对于粗粒组试验, 在蓄水过程中, 坝体下游坡即发生饱和渗水现象, 并逐渐变清(图9(a)); 漫顶水流首先对下游坡进行冲蚀, 大颗粒抗冲蚀能力较强, 横向溃口发展较为缓慢, 但伴随横向小范围剪切失稳破坏(图9(b)); 随着溃口持续下切, 被冲蚀的粗颗粒在下游坡发生沉积, 呈现出“上冲下淤”的情况, 在漫顶后39 s溃口洪峰出现(图9(c)); 随着水动力衰退, 溃口发展逐渐减缓, 在下游坡方向形成一个倒梯形最终溃口(图9(d)).

总的来说, 溃口的横向扩展是由水流连续侧向冲蚀与边坡间歇性失稳构成, 随着粗颗粒含量的增加, 溃口边坡的失稳坍塌经历了倾倒破坏(细和中粒组)和剪切破坏(粗粒组)两种模式. 对于细粒组试验, 非饱和堰塞料黏聚力是导致倾倒破坏的主因, 且失稳块体从下游坝脚处向上扩展, 溃口流道偶尔会被坍塌土体暂时堵塞, 最终形成喇叭形溃口. 对于中粒组试验, 饱和度增加导致堰塞料黏聚力降低, 溃口边坡稳定性下降, 主要通过溃口侧向频繁小尺度倾倒破坏导致溃口扩展. 对于粗粒组试验, 堰塞料高渗透性导致蓄水阶段堰塞体发生饱和, 漫顶溃决过程中, 渗流力和漫顶水流的

共同作用支配着溃口的发育, 溃口边坡失稳以浅层剪切滑动破坏为主.

3.4 溃口流量与冲蚀率演化特征分析

图10给出了不同试验组的溃口流量曲线, 级配相同试验组的流量过程相近, 细粒组试验流量过程较为平缓, 洪峰流量较小; 中粒组试验流量变化较为剧烈, 洪峰流量较大; 粗粒组试验流量过程呈现典型单峰特征. 当级配相同时, 相对密实度越高, 洪峰流量越小. 当相对密实度相同时, 三组模型试验(T-3, T-4, T-6)在粒度分布上的差异导致了不同的溃口出流过程.

T-3组试验溃口流量曲线较为平缓, 呈单峰型; T-4组试验溃口流量曲线不规则, 且因溃口边坡失稳坍塌堵塞流道而呈现多峰型; T-5组试验溃口流量曲线也呈单峰型, 而当溃口发生剪切破坏时, 溃口流量陡增至峰值, 上升速率和衰减速率均超过细粒组. 此外, 三组模型试验的溃口洪峰流量值与堰塞料粗粒含量均无明显定量关系, 溃口洪峰流量由大到小依次为中、粗和细粒组试验. 溃决第II和第III阶段的历时与堰塞料粗粒含量、相对密实度呈线性负相关.

试验数据证实了堰塞料特性对溃决过程的决定性影响, 由图11可以看出, 溃决历时与平均粒径呈明显的负相关关系. 在漫顶水流与渗流作用下, 冲蚀率随平均粒径增大而升高, 即粗粒组堰塞料具有高冲蚀率、高临界起动切应力和高渗透性等特征. 随着平均粒径增大, 堰塞料冲蚀率增加, 残余坝高也相应增加, 导致溃决历时更短. 溃口洪峰流量与不均匀系数之间存在显

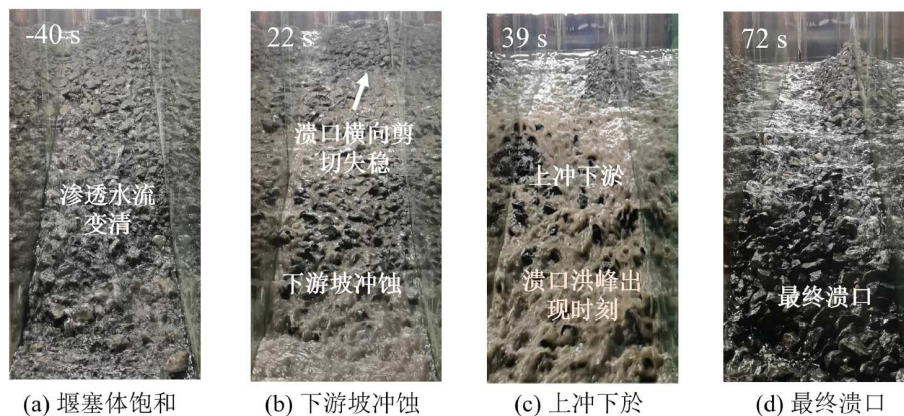


图9 (网络版彩图)粗粒组堰塞体漫顶溃决横向溃口形态演化过程

Figure 9 (Color online) Transversal breach morphology evolution of the coarse-grained landslide dam overtopping breaching.

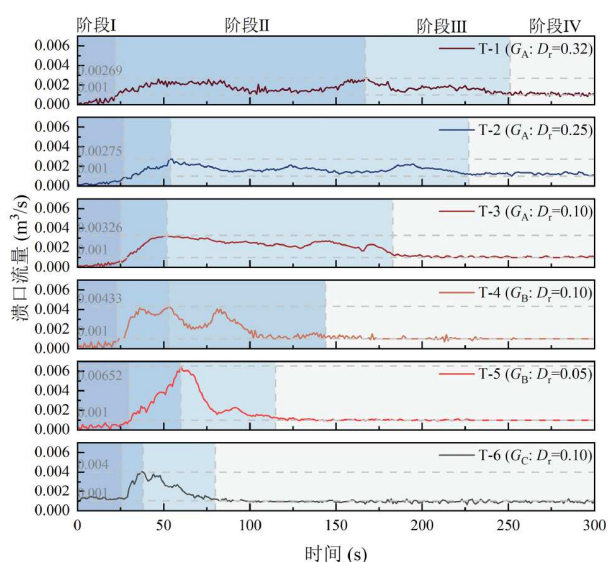


图 10 (网络版彩图)不同粒组堰塞体溃口流量过程线
Figure 10 (Color online) Breach hydrographs for landslide dams with different particle groups.

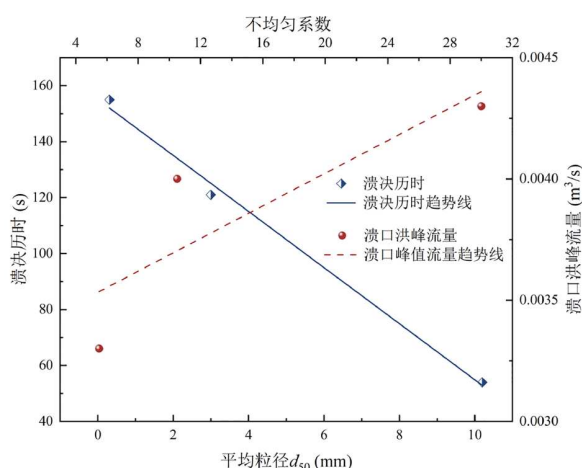


图 11 (网络版彩图)堰塞体溃决参数与堰塞料特性的关系
Figure 11 (Color online) Relationship of landslide dam breaching parameters and landslide deposit properties.

著的正相关关系,其主要机制在于,溃口洪峰流量由溃口发展速度与程度耦合决定,堰塞料不均匀性表征了粗、细颗粒含量占比与内部孔隙孔径分布状态^[31,32],是影响冲蚀特性与非饱和强度的主要原因。尽管粗粒组级配的高冲蚀率使溃口发展速度加快,但溃决持续时间缩短,溃口流量还未能得到充分发展。当不均匀系数增大时,尽管冲蚀率有所减小,但残余坝高还随

之降低,使得溃口流量能够得到更充分的发展。

以中粒组试验(T-4)为例,通过对溃口流量、底床切应力和冲蚀率演化过程的对比分析发现(图12),第II和第III阶段是溃决过程的主要时期,各参数剧烈变化且相互作用。通过对比各参数峰值出现时间可以发现,冲蚀率最早达到峰值($t = 59$ s),依次是底床切应力($t = 63$ s)和溃口流量($t = 65$ s),溃口流量显著滞后于冲蚀率发展。当底床切应力仍在增加时($t = 59\sim 63$ s),冲蚀率已下降了约42.3%,表明此时堰塞料冲蚀过程受到了显著抑制;当溃口流量达到峰值时($t = 65$ s),尽管底床切应力仍处于较高水平,但冲蚀率还大幅降低。

4 堰塞料冲蚀率定量表征方法与验证

4.1 堰塞料冲蚀特性分析

堰塞料冲蚀率试验发现,冲蚀率 E 与过剪应力 $\tau_b - \tau_c$ 之间并不呈现线性或指数规律。当水动力较弱时,冲蚀率与水动力间呈现线性相关,但当床面切应力较高时,冲蚀过程受到显著抑制(图13)。其他学者在研究中也发现了类似情况,如Briaud等人^[33]在开展黏性土冲蚀率试验时发现,当水流流速增至6 m/s时,冲蚀率随流速增长的趋势由原先的线性关系明显转缓。

土体冲蚀率可采用下式表达^[34]:

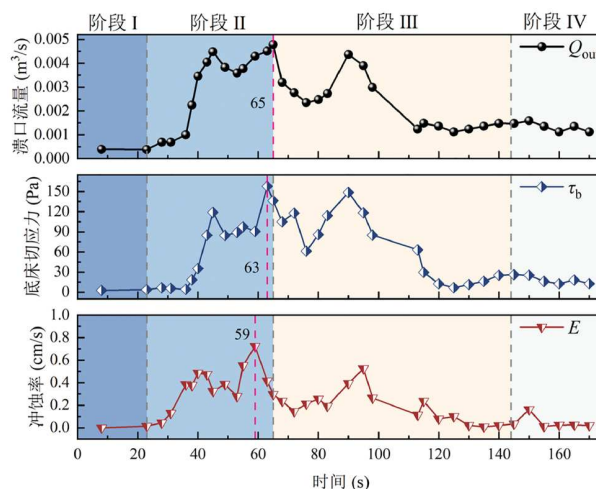


图 12 (网络版彩图)中粒组堰塞体溃决时溃口流量、底床切应力与冲蚀率的演化过程
Figure 12 (Color online) Evolutions of breach flow discharge, flow shear stress, and erosion rate during the medium-grained landslide dam breaching.

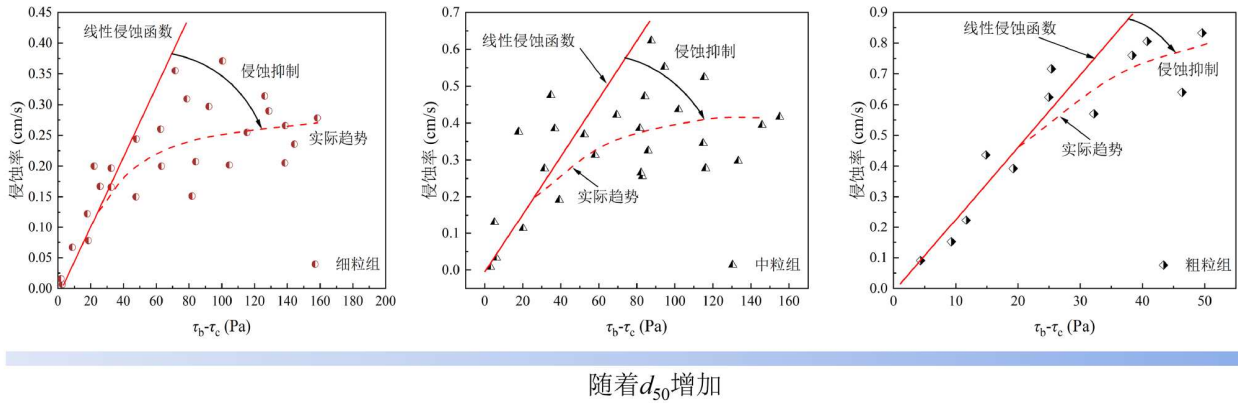


图 13 (网络版彩图) E 与 $\tau_b - \tau_c$ 的关系

Figure 13 (Color online) The relationship between E and $\tau_b - \tau_c$.

$$E = k_d(\tau_b - \tau_c)^\alpha, \quad (2)$$

式中: E 为冲蚀率; k_d 为冲蚀系数; τ_b 为底床切应力, 即水土界面由水流剪切作用产生的切应力; τ_c 为堰塞料临界起动切应力; α 为常数, 一般取值为 1, 当取其他大于 1 的值时为指数型公式。

由式(2)可以看出, 传统土体冲蚀率公式为无上限函数, 且认为冲蚀系数是与土体参数相关的常数, 这与实际观测到的规律相悖。一些学者基于泥沙动力学, 提出了考虑冲蚀抑制的冲蚀率公式。Winterwerp 等人^[35]根据现场观测数据提出了针对细沙的冲蚀率计算公式:

$$E = 0.012(\sqrt{\theta} - 1.3)D_*^{0.3}, \quad (3)$$

式中: θ 为 Shields 数; D_* 为无量纲颗粒数。

van Rijn 等人^[36]基于高流速条件下细沙冲蚀试验数据, 建立了细沙冲蚀率公式:

$$E = \frac{0.00033D_*^{0.3}}{\theta} \left(\frac{\theta - \theta_c}{\theta_c} \right)^{1.5}, \quad (4)$$

式中: θ_c 为临界 Shields 数。

为验证上述两个经验公式的适用性, 采用作者开展的不同级配堰塞料冲蚀率试验数据进行对比验证(图14)。式(3)对细颗粒有较好的预测精度, 但随着颗粒粒径增大, 其预测精度逐渐下降; 相比之下, 式(4)能够较好描述 $d_{50} = 2.7 \text{ mm}$ 的土体冲蚀行为, 但会高估其他级配堰塞料冲蚀率。

当前基于经验的土体冲蚀率公式无法考虑高流速

下的冲蚀抑制规律, 基于泥沙理论建立的冲蚀率公式虽可考虑冲蚀抑制, 但忽略了土体物理力学性质对冲蚀行为的影响。这种方法的缺陷在于, 不同公式仅对某一粒径范围内的土体冲蚀行为有较高预测精度, 而对土体冲蚀机理理解存在不足。堰塞体颗粒级配宽泛, 且溃决过程涉及水土耦合过程, 溃口床面冲蚀过程是一个复杂的多因素互馈过程。对堰塞料物理力学机制认知的缺失导致传统水力学冲蚀模型无法准确表征溃决水流条件下堰塞料的冲蚀特性。

4.2 溃决过程中冲蚀抑制机制分析

学者对冲蚀抑制机制也提出了多种解释, 如密度梯度效应、黏性变化、含沙量变化的滞后效应、紊流猝发频率降低以及絮凝作用等^[37,38]。由于这些机制并非彼此独立, 如何准确描述底部边界层的动力特性, 并合理估算含沙水体作用于床面的切应力, 仍是当前尚未攻克科学难题。

本文认为, 在低强度水流作用下, 底床表层堰塞料以单颗粒的推移质运动为主, 当水流强度增至足够大时, 推移质运动将转变为层状运动, 其典型运动特征表现为临底高含沙层输移。在高流速水流环境中, 推移质运动将变化为近底层状运动。在这类层状运动过程中, 层间颗粒持续滚动和跃动有效耗散湍流能量, 当推移质层浓度过高时, 层间颗粒频繁碰撞导致能量的迅速衰减, 导致切应力无法向下层土体传递, 显著抑制底层颗粒的运移。因此, 推移质层状运动是导致高速水流作用下堰塞料冲蚀抑制的主因。

4.3 基于动态冲蚀系数的堰塞料冲蚀率公式

在传统冲蚀公式中, 冲蚀系数(k_d)通常被视为一个恒定的经验常数. k_d 在本质上应反映堰塞料在水流作用下的冲蚀特征, 然而将其定义为常数则无法准确描述堰塞料在高水动力条件下的冲蚀行为. 通过研究水流动力特性与堰塞料的冲蚀响应过程(图15(a)), 建立了 k_d 与溃决过程中动态变化的 τ_b 之间的关系:

$$k_d = \frac{E}{\tau_b - \tau_c} = A \tau_b^B, \quad (5)$$

式中: A 和 B 为冲蚀参数.

冲蚀试验数据表明, 冲蚀参数 A 和 B 与堰塞料平均粒径间存在明确的函数关系(图15(b)), A 和 B 可分别表达如下:

$$\lg A = 0.2d_{50} - 1.0, \quad (6)$$

$$B = -0.1d_{50} - 0.6. \quad (7)$$

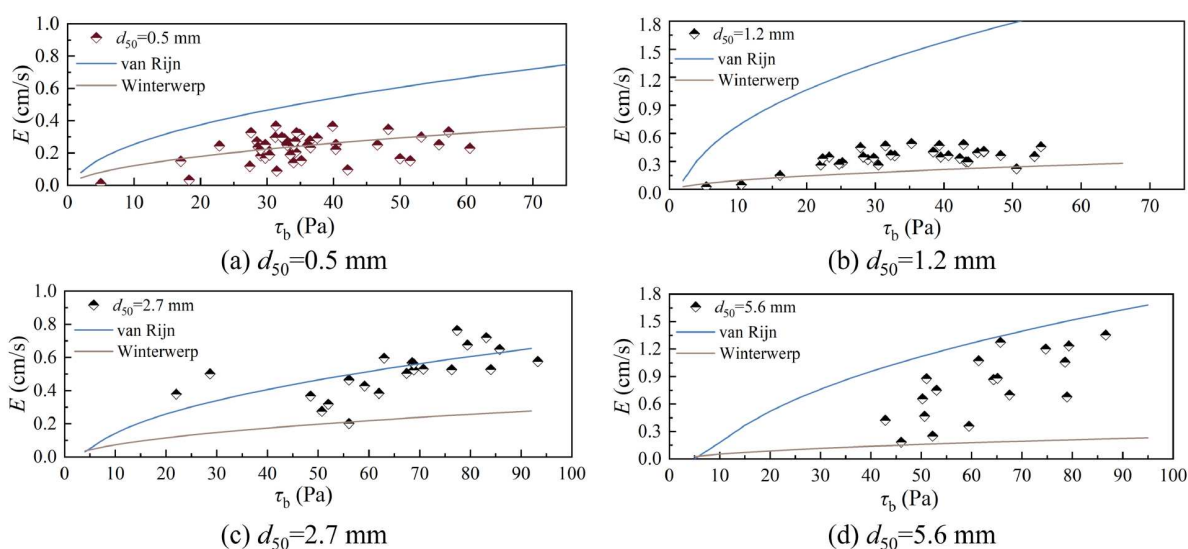


图 14 (网络版彩图)土体冲蚀率计算值与实测值对比

Figure 14 (Color online) Comparison of measured and calculated soil erosion rates.

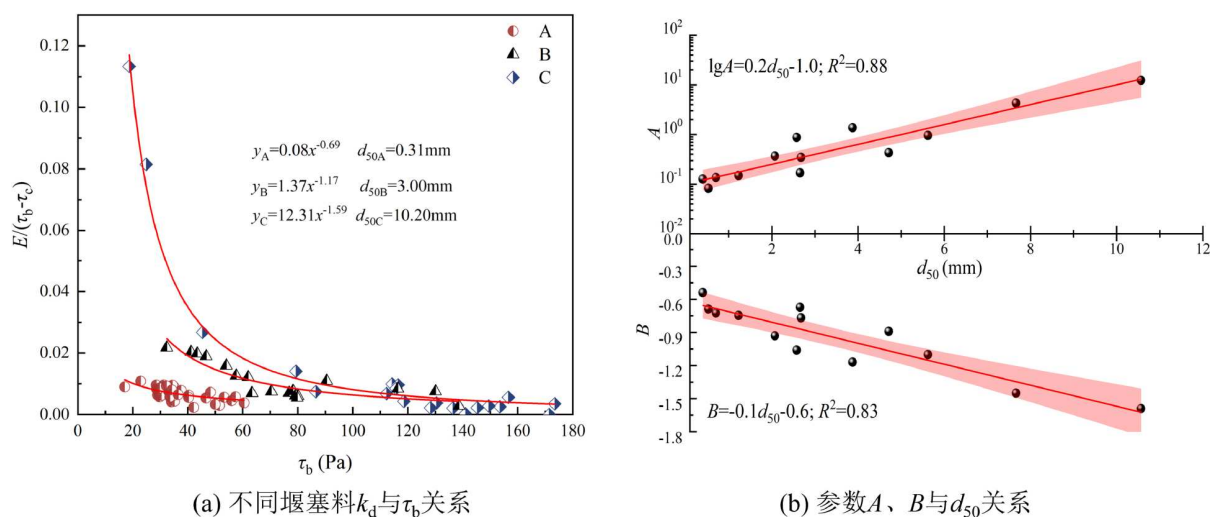


图 15 (网络版彩图)堰塞料冲蚀率与相关参数的关系

Figure 15 (Color online) Relationship among the erosion rate and relevant parameters of landslide deposits.

图15(a)表明, 在相同的过剪应力条件下, 随着粗颗粒含量的增加, 最大冲蚀率增加, 原因在于溃决过程中的渗流力作用. 由于粗颗粒材料的渗透性强, 在漫顶时堰塞体已处于饱和状态, 渗流力方向垂直于下游坡向上, 促使颗粒起动. 在非饱和土中, 含水率的变化会改变基质吸力和堰塞料强度^[39,40], 且渗流力方向垂直向下, 导致颗粒起动的临界切应力增大.

另外, τ_b 可用曼宁公式计算:

$$\tau_b = \frac{\rho_w g n^2 Q_b^2}{A^2 R^{\frac{1}{3}}}, \quad (8)$$

式中: ρ_w 为水的密度; n 为曼宁糙率; A 为过流面积; R 为水力半径.

考虑到试验中钢化玻璃糙率的影响, 本文采用Einstein方法对水流切应力进行修正. Einstein^[41]通过修正曼宁糙率系数, 率先对边壁阻力分量进行了量化, 为边界摩擦补偿提供了解决方案:

$$\frac{\tau'_b}{\tau_b} = \left(\frac{n}{n_d} \right)^{1.5}, \quad (9)$$

式中: τ'_b 为修正后的床面切应力; n_d 为总曼宁糙率系数.

τ_c 可用Hu等人^[42]提出的基于颗粒雷诺数的颗粒临界起动切应力公式计算:

$$\log R_{c*} = 1.242 \log D_* - 0.497 + 0.070 (\log D_*)^2, \quad (10)$$

式中: R_{c*} 为颗粒雷诺数, $R_{c*} = u_* d / \nu$, 其中 u_* 为摩阻流速($u_* = \sqrt{\tau_c / \rho_w}$), d 为堰塞料粒径, ν 为水的动力黏滞系数, 颗粒临界起动切应力 τ_c 为

$$\tau_c = \rho_w \left(\frac{R_{c*} d}{\nu} \right)^2. \quad (11)$$

式(11)给出了堰塞料颗粒在水平床面起动所需的水流切应力. 然而, 在实际溃决过程中, 溃口底床具有一定的坡度, 因此对于坡面上的颗粒, 采用修正后的临界起动切应力 τ'_c ^[43]:

$$\frac{\tau'_c}{\tau_c} = \frac{\sin(\varphi - \beta)}{\sin \varphi}, \quad (12)$$

式中: β 为溃口底床坡度; φ 为堰塞料内摩擦角.

在蓄水期间, 由不同材料组成的堰塞体内部渗流线发展呈现显著差异. 当堰塞体下游坡处于非饱和状态时, 漫顶水流向下渗流产生的渗流力会抵抗颗粒的

起动作用; 当下游坡达到饱和状态时, 向外渗出的内部水流产生的渗流力会促使颗粒起动. 因此, 分析堰塞体溃决过程中的颗粒起动时应考虑渗流的影响. Jewel等人^[44]根据渗流单元试验, 提出了入渗或出渗条件下颗粒起动切应力修正公式:

$$\frac{\tau''_c}{\tau'_c} = 1 + C_s \frac{i}{i_c} \sin \alpha, \quad (13)$$

式中: τ''_c 为考虑渗流影响的颗粒临界起动切应力; C_s 为与渗流方向相关的系数, 入渗时取0.5, 出渗时取-0.5^[45]; i 为水力梯度; i_c 为临界水力梯度, $i_c = (1 - n_i) \times (\rho_s / \rho_w - 1)$, 其中 n_i 为孔隙率, ρ_s 为堰塞料密度; α 为渗流方向与坡面的夹角.

5 结论

本文通过开展不同级配与相对密实度的堰塞体漫顶溃决过程的模型试验, 明晰了堰塞体的溃决过程, 阐明了堰塞料非均匀性对堰塞体溃决过程的控制机制, 建立了考虑堰塞料物理力学特性的动态冲蚀率公式, 揭示了堰塞料冲蚀特性与堰塞体漫顶溃决机理. 主要结论如下.

(1) 堰塞料级配对溃口演化过程具有主控作用, 相对密实度主要影响溃口发展速度. 堰塞体纵向溃口形态演化过程受溃口沿程冲蚀率分布控制, 而堰塞料的饱和-非饱和强度变化决定了横向溃口拓展方式. 在堰塞体漫顶溃决过程中, 纵向溃口形态随着堰塞料平均粒径的增加, 分别呈现出陡坎、冲坑与线性等形态特征; 横向溃口随着平均粒径的增大, 溃口边坡失稳模式由倾倒破坏转化为剪切破坏.

(2) 堰塞体溃口流量受堰塞料物理力学特性影响显著. 堰塞料冲蚀率、颗粒临界起动切应力与渗透性均与平均粒径正相关; 堰塞体溃决历时与平均粒径呈负相关; 而溃口洪峰流量受堰塞体溃决过程控制, 堰塞料不均匀性表征材料冲蚀特征与非饱和强度, 显著影响堰塞体溃决过程, 试验结果表明溃口洪峰流量与堰塞料不均匀系数呈现正相关关系.

(3) 堰塞料在低流速条件下的冲蚀率与流速呈线性增长关系, 而在高流速条件下则表现出明显的抑制效应. 传统土力学冲蚀率公式无法描述堰塞料在高流速下的冲蚀抑制行为, 基于泥沙动力学的冲蚀率公式无法考虑堰塞料级配变化导致的冲蚀特性变化. 本文

通过引入了床面切应力和平均粒径等参数, 并考虑堰塞体溃决时溃口底床坡度和渗流力的影响, 建立了基于动态冲蚀系数的堰塞料冲蚀率公式, 与传统公式相比, 更能合理反映溃决水流作用下堰塞体的冲蚀特性。

参考文献

- Costa J E, Schuster R L. The formation and failure of natural dams. *Geol Soc Am Bull*, 1988, 100: 1054–1068
- Fan X, Dufresne A, Siva Subramanian S, et al. The formation and impact of landslide dams—State of the art. *Earth-Sci Rev*, 2020, 203: 103116
- Gariano S L, Guzzetti F. Landslides in a changing climate. *Earth-Sci Rev*, 2016, 162: 227–252
- Xiao S, Zhang L, Xiao T, et al. Landslide damming threats along the Jinsha River, China. *Engineering*, 2024, 42: 326–339
- Cai Y J, Cheng H Y, Wu S F, et al. Breaches of the Baige Barrier Lake: Emergency response and dam breach flood. *Sci China Tech Sci*, 2020, 63: 1164–1176
- Zhong Q M, Chen X K, Mei S Y, et al. Research progress on outburst risk and evolution process of landslide-dammed lakes (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2022, 33: 659–670 [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. *水科学进展*, 2022, 33: 659–670]
- Zhang J, Fan G, Li H, et al. Large-scale field model tests of landslide dam breaching. *Eng Geol*, 2021, 293: 106322
- Zhou G G D, Li S, Lu X, et al. Large-scale landslide dam breach experiments: Overtopping and “overtopping and seepage” failures. *Eng Geol*, 2022, 304: 106680
- Ma C, Peng M, Zhang L, et al. Erosion, deposition and breach evolution of landslide dams composed of various dam material types based on flume tests. *Eng Geol*, 2024, 337: 107598
- Zhong Q M, Chen S S, Shan Y B. Numerical simulation of the outburst process of Baige landslide-dammed lake in Jinsha River (in Chinese). *Adv Eng Sci*, 2020, 52: 29–37 [钟启明, 陈生水, 单熠博. 金沙江白格堰塞湖溃决过程数值模拟. *工程科学与技术*, 2020, 52: 29–37]
- Zhong Q, Chen S, Wang L, et al. Back analysis of breaching process of Baige landslide dam. *Landslides*, 2020, 17: 1681–1692
- Zhong Q M, Chen S S, Deng Z. Overtopping failure mechanism and dam-break process simulation of landslide dams (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2018, 48: 959–968 [钟启明, 陈生水, 邓翌. 堰塞坝漫顶溃决机理与溃坝过程模拟. *中国科学: 技术科学*, 2018, 48: 959–968]
- Zheng Y, Hu W, van Asch T, et al. Experimental study on the failure mechanisms of non-cohesive soil landslide dams with different scales. *Eng Geol*, 2024, 333: 107489
- Zhu X, Peng J, Liu B, et al. Influence of textural properties on the failure mode and process of landslide dams. *Eng Geol*, 2020, 271: 105613
- Shen D, Shi Z, Zheng H, et al. Effects of grain composition on the stability, breach process, and breach parameters of landslide dams. *Geomorphology*, 2022, 413: 108362
- Zhao G W, Jiang Y J, Qiao J P, et al. Experimental study on overtopping failure of landslide dams under different compaction conditions (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2018, 37: 1496–1505 [赵高文, 姜元俊, 乔建平, 等. 不同密实条件的滑坡堰塞坝漫顶溃决试验. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37: 1496–1505]
- Gregoretti C, Maltauro A, Lanzoni S. Laboratory experiments on the failure of coarse homogeneous sediment natural dams on a sloping bed. *J Hydraul Eng*, 2010, 136: 868–879
- Jiang X G, Wu L. Study on dam-break process of landslide dams under different bed slopes (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2019, 38: 3008–3014 [蒋先刚, 吴雷. 不同底床坡度下的堰塞坝溃决过程研究. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38: 3008–3014]
- Liu B X, Zhu X H, Guo J, et al. Experimental study on incision process of breach in landslide dams with different gully bed slopes (in Chinese). *J Yangtze River Sci Res Inst*, 2020, 37: 59–66 [刘邦晓, 朱兴华, 郭剑, 等. 不同沟床坡度堰塞坝溃口下切过程试验研究. *长江科学院院报*, 2020, 37: 59–66]
- Shi Z M, Zheng H C, Peng M, et al. Analysis on failure mechanism of landslide dams considering different discharge channel schemes: A case study of Tangjiashan landslide dam (in Chinese). *J Eng Geol*, 2016, 24: 741–751 [石振明, 郑鸿超, 彭铭, 等. 考虑不同泄流槽方案的堰塞坝溃决机理分析——以唐家山堰塞坝为例. *工程地质学报*, 2016, 24: 741–751]
- Zhao W Y, Chen X Q, Gao Q, et al. Experimental study on outburst of earthquake-induced landslide-dammed lakes with discharge channels of different cross-sections (in Chinese). *J Sedim Res*, 2011, 36: 29–37 [赵万玉, 陈晓清, 高全, 等. 不同横断面泄流槽的地震堰塞湖溃决实验研究. *泥沙研究*, 2011, 36: 29–37]
- Winterwerp J C, Cornelisse J M, Kuijper C. Parameters to characterize natural muds. In: *Proceedings of the International Workshop on Cohesive*

Sediment. 1990. 103–105

- 23 Zhang Q. Analysis on outburst flood and long-distance routing of landslide deposits considering material erosion and hyperbolic lateral expansion characteristics (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Xi'an University of Technology. 2024 [张强. 考虑材料冲蚀-双曲线侧向扩展特性的堰塞体溃决洪水及长距离演进分析. 博士学位论文. 西安: 西安理工大学. 2024]
- 24 Ju J, Liu S B, Zhang R Y, et al. Evaluation on theories and methods of soil mechanics-based dam-break models (in Chinese). *J Sedim Res*, 2025, 50: 1–8 [巨江, 刘少斌, 张若羽, 等. 土力学溃坝模型的理论与方法评价. 泥沙研究, 2025, 50: 1–8]
- 25 van Rhee C. Sediment entrainment at high flow velocity. *J Hydraul Eng*, 2010, 136: 572–582
- 26 Chen Z, Ma L, Yu S, et al. Back analysis of the draining process of the Tangjiashan barrier lake. *J Hydraul Eng*, 2015, 141: 05014011
- 27 Zhou G G D, Zhou M, Shrestha M S, et al. Experimental investigation on the longitudinal evolution of landslide dam breaching and outburst floods. *Geomorphology*, 2019, 334: 29–43
- 28 Xu Y, Zhang L M. Breaching parameters for earth and rockfill dams. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2009, 135: 1957–1970
- 29 Peng M, Zhang L M. Breaching parameters of landslide dams. *Landslides*, 2012, 9: 13–31
- 30 Casagli N, Ermini L, Rosati G. Determining grain size distribution of the material composing landslide dams in the Northern Apennines: Sampling and processing methods. *Eng Geol*, 2003, 69: 83–97
- 31 Kosugi K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resour Res*, 1996, 32: 2697–2703
- 32 Yan W, Cudmani R. A general analytical expression for pore size distribution based on probability theory. *Eng Geol*, 2022, 297: 106501
- 33 Briaud J L. Erodibility of fine grained soils and new soil test. *Erosion Soils Scour Found*, 2005, 10: 1–10
- 34 Ju J, He C L, Li P F. Overtopping breaching and propagation model for earth-rock dams of landslide-dammed lakes (in Chinese). *J Sedim Res*, 2024, 49: 1–8 [巨江, 贺翠玲, 李鹏峰. 堰塞湖土石坝漫顶溃坝扩散模型. 泥沙研究, 2024, 49: 1–8]
- 35 Winterwerp J C, Bakker W T, Mastbergen D R, et al. Hyperconcentrated sand-water mixture flows over erodible bed. *J Hydraul Eng*, 1992, 118: 1508–1525
- 36 van Rijn L C, Bisschop R, Rhee C. Modified sediment pick-up function. *J Hydraul Eng*, 2019, 145: 06018017
- 37 Foortse B, Visser P J, Bisschop R, et al. Experimental investigation into the reduction of erosion of sand at high flow velocities. *Proc Institution Civil Engineers-Maritime Eng*, 2019, 172: 55–70
- 38 Jop P, Forterre Y, Pouliquen O. A constitutive law for dense granular flows. *Nature*, 2006, 441: 727–730
- 39 Zhao Y X. Measurement methods and evolution laws of pore water distribution and strength characteristics of soils in a wide suction range (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Beijing Jiaotong University. 2025 [赵煜鑫. 宽吸力范围土体孔隙水分布和强度特性测量方法及演化规律研究. 博士学位论文. 北京: 北京交通大学. 2025]
- 40 Zhang J X. Study on water-vapor migration mechanism of unsaturated subgrade soil based on evolution of pore structure characteristics (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Chang'an University. 2024 [张建勋. 基于孔隙结构特征演变的路基非饱和土水-汽迁移机制研究. 博士学位论文. 西安: 长安大学. 2024]
- 41 Einstein H A. Formulas for the transportation of bed load. *T Am Soc Civ Eng*, 1942, 107: 561–577
- 42 Hu L, Zhong Q, Chen L, et al. From historical evolution to data-driven breakthroughs: Parameter-decoupled enhancement of the shields curve. *Nat Hazards*, 2026, 122: 28
- 43 Soulsby R L, Whitehouse R J S W. Threshold of sediment motion in coastal environments. In: *Proceedings of the Pacific Coasts and Ports 1997 Conference*. 1997. 149–154
- 44 Jewel A, Fujisawa K, Murakami A. Effect of seepage flow on incipient motion of sand particles in a bed subjected to surface flow. *J Hydrol*, 2019, 579: 124178
- 45 Lobkovsky A E, Jensen B, Kudrolli A, et al. Threshold phenomena in erosion driven by subsurface flow. *J Geophys Res*, 2004, 109: F04010

Erosion characteristics of landslide deposits and overtopping-induced breach mechanisms of landslide dam

HU Liang¹, ZHONG QiMing^{1,2}, CHEN LingChun¹, SHAN YiBo¹ & ZHANG LuCheng¹

¹ National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210098, China

² Key Laboratory of Reservoir and Dam Safety of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China

Landslide dams are formed by landslide masses blocking rivers and impounding water, and are highly prone to overtopping breaching, posing severe flood threats to downstream areas. However, the erosion characteristics of landslide deposits and the breach evolution mechanism of landslide dams remain unclear. In this study, flume model tests of landslide dam overtopping breaching were conducted to investigate the influences of gradation and relative density of landslide deposits on the breaching process. The experimental results show that variations in relative density mainly alter the breach development rate but exert little effect on breach morphology. The gradation of landslide deposits dominates the evolutionary process of breach morphology. With an increase in coarse particle content, the longitudinal breach morphology successively exhibits head-cut, scour pit, and linear patterns, while intermittent instability of the transverse breach slope presents toppling and shear failures in sequence. The peak breach flow is positively correlated with the uniformity coefficient of landslide deposits, and the breaching duration is negatively correlated with the mean particle size. Erosion rate tests reveal that the layered movement of bed load is the main cause for the inhibited erosion process of landslide deposits under high-velocity flow. Based on the mean particle size, bed shear stress, and critical incipient shear stress of particles, an erosion rate formula for landslide deposits considering the dynamic variation of the erosion coefficient is established, clarifying the erosion inhibition mechanism during landslide dam breaching. The research findings are of important theoretical significance for revealing the erosion characteristics of landslide deposits, as well as the evolution mechanisms of breach morphology and breach flow discharge.

landslide dam, overtopping, erosion characteristics, breach evolution, breach flow discharge, breach mechanisms

doi: [10.1360/SST-2025-0447](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0447)