

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230223001

爬高型堰塞坝漫顶溃决机理研究*

赵天龙^{1,2}, 岳亮^{1,3}, 李方芳⁴, 付长静^{1,2}, 张川^{1,5}, 李泓鑫¹

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 中国水利水电第三工程局有限公司, 陕西 西安 710024; 4. 重庆市水利电力建筑勘测设计研究院有限公司, 重庆 401120; 5. 中建三局绿色产业投资有限公司, 湖北 武汉 430058)

摘要:我国西南地区频发的地质构造活动和极端自然灾害诱发了大量的堰塞坝,属于堰塞坝的高发地,其形成的堰塞坝具有突发性强、危险性大的特点,严重威胁所在流域人民的生命财产安全,深入研究爬高型堰塞坝溃决过程可为除险减灾提供科学理论支撑。为此,以土颗粒级配、背水面坡度、爬高型堰塞坝坝顶形状为影响堰塞坝漫顶溃决的主要因素,从漫顶溃决过程、溃口流量过程、溃口演变过程、溃后残留坝体及下游淤积情况等方面,分析了爬高型堰塞坝漫顶溃决演化过程。试验结果表明:随着土石料级配变宽,坝体整体稳定性增强溃决历时延长,洪峰流量减小,峰现时间较晚,残留溃口上宽小坝体体积小,距坝趾泥沙输移长度短且距坝趾1 m处泥沙厚度薄;背水坡面越陡,水流获得的动能越大,加速了整个坝体溃决过程,溃口扩展得到充足发育,洪峰流量增大,峰现时间提前,残留溃口上宽较大坝体体积小,距坝趾泥沙输移长度长且距坝趾1 m处泥沙厚度较厚;宽深比越大,则溃口相对位置越高,冲蚀阶段所具有的水头差大,加速了坝体冲刷进程,溃口扩展得到充分发育,残留溃口上宽尺度大坝体总量小,距坝趾泥沙输移距离远且距坝趾1 m处泥沙厚度较厚。

关键词:爬高型堰塞坝; 溃决过程; 漫顶溃决机理; 物理模型试验

中图分类号: TV698 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0910-11

Study on the Overtopping Breach Mechanism of Climbing-type Landslide Dams

ZHAO Tianlong^{1,2}, YUE Liang^{1,3}, LI Fangfang⁴, FU Changjing^{1,2}, ZHANG Chuan^{1,5}, LI Hongxin¹

(1. College of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory for Hydraulic and Waterway Engineering, of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Sinohtdro Bureau 3rd Co., Ltd. Xian 710024, China; 4. Chongqing Water Conservancy & Electric Power Construction Survey & Design Research Institute, Chongqing 401120, China; 5. China Construction Third Bureau Green Industry Investment Co., Ltd, Wuhan 430058, China)

Abstract: Frequent geological activities and extreme natural disasters in Southwest China have induced a large number of landslide dams, making the region a high-risk area for such formations. These

* 收稿日期: 2023-02-23; 修回日期: 2023-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(52279095, 52109149)、重庆市科委基础研究与前沿探索项目(cstc2021jcyj-msxmX0155)资助

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

E-mail: ztl1986@163.com

通信作者: 付长静(1987—), 女, 副教授, 硕导, 博士。主要从事岩土工程流固耦合计算方面的研究。

E-mail: 546684412@qq.com

dams are characterized by their sudden occurrence and high danger, posing serious threats to the lives and property of people in the affected river basins. An in-depth investigation into the breaching process of climbing-type landslide dams can provide essential theoretical support for hazard prevention and mitigation. This study focuses on the primary factors affecting the overtopping breach of climbing-type landslide dams, including soil particle gradation, backwater slope gradient, and dam crest shape. The overtopping breach evolution process of the dam was analyzed in terms of overtopping breach process, breach flow process, breach evolution process, residual dam structure, and downstream sedimentation. Experimental results indicated that as the gradation of soil and rock materials became broader, the overall stability of the dam increased, the breach duration extended, and the flood peak flow decreased. In addition, the peak occurrence was delayed, and the residual breach top width was smaller with a larger dam body volume. The sediment transport distance from the dam toe was shorter, and the sediment thickness at 1 meter from the dam toe was thinner. Conversely, a steeper backwater slope resulted in greater kinetic energy of the water flow, accelerating the breaching process. This resulted in a fully developed breach, an increase in flood peak flow, earlier peak occurrence, and a wider residual breach top with a smaller dam body volume. The sediment transport distance from the dam toe was longer, and sediment thickness at 1 meter from the dam toe was greater. Additionally, a larger width-to-depth ratio led to a higher relative breach position and a greater head difference during the erosion stage, accelerating the erosion process. This resulted in a fully developed breach, larger residual breach top width, smaller total dam body volume, a longer sediment transport distance from the dam toe, and greater sediment thickness at 1 meter from the dam toe.

Keywords: climbing-type landslide dam; breaching process; overtopping breach mechanism; physical model tests

0 引言

堰塞湖通常由地震或降雨导致山体滑坡、崩塌、泥沙流等堵塞河道而形成^[1-3]。全世界堰塞坝统计数据来看,我国形成的堰塞坝居多,占总比58%^[4]。我国西南地区地质、地貌条件特殊,是堰塞坝的易发地。郑鸿超等^[5]按碎屑体堆积模式将堰塞坝分为:爬高型、滑入型和折返性,爬高型堰塞坝坝体结构特征特殊,过流位置通常靠近细颗粒堆积区,一旦发生漫顶破坏,细颗粒区抵抗水流冲刷能力弱,水流迅速冲刷坝体,对下游造成严重洪涝灾害。因此,为了降低爬高型堰塞坝漫顶溃决的潜在风险,从堰塞坝溃决过程和溃决洪水方面探究堰塞坝漫顶溃决机理,有助于为后续除险减灾工作提供理论指导。

国内外学者主要从以下方面探究了堰塞坝漫顶溃决机理。王道正等^[6]对研究漫顶溃坝过程引入平均粒径 D_{50} 作为主要指标,开展了不同颗粒级配下堰塞坝溃决试验,分析总结了不同工况下堰塞坝破

坏模式和溃决特征。S.Lukas等^[7]研究了溃口发展过程、下泄流量与坝体材料之间的关系。T.T.S.W. Chaiyuth Chinnarasri^[8]采用非黏性泥沙颗粒研究堤坝漫顶的流动形态和破坏模式。坝体含水率方面:蒋先刚等^[9]开展不同初始含水率的试验,探究了初始含水率对溃决破坏的规律,得出初始含水率越高,坝体稳定性越差,溃决历时越短。S.L.Hunt^[10]开展了路堤溃口扩宽速率的研究,试验结果与建造路堤的含水量比较,得到含水率对扩宽速率的影响规律。入流流量对堰塞坝的影响:王子豪等^[11]考虑了上游洪峰对堰塞坝溃决的影响,提出最大溃口流量与上游洪峰流量的关系呈对数型。F.G.Xu等^[12]以汶川地震形成的伽担湾为原型,开展室内缩尺试验,提出上游来水量和坝体尺寸是溃决过程主要影响因素。杨阳等^[13]总结分析溃坝因素和溃口演变过程,提出“流深” d 的概念,建立模型试验通过与原型比较 d 的大小,来验证模型的合理性。背水面坡率的影响:黄卫等^[14]以黏性、宽级配砂砾为材料,研究了背水面坡率对堰塞坝溃决的影响。刘晓邦等^[15-16]开展七组 $7^{\circ}\sim 13^{\circ}$ 不同沟床坡度溃决试验,揭

示了溃口下切、展宽与不同沟床坡度之间影响规律。赵高文等^[17]在室内开展了背水面坡度为 9° 的堰塞坝漫顶试验,提出单向侧蚀、垂向下切的逐渐发育会导致边坡出现二次滑坡。泄流槽方面:王琳等^[18]基于水土耦合机制,提出DBIWHR2.0泄流槽自动优化模型。赵天龙等^[19]研究了离心状态下各型式泄流槽的下泄能力,提出复式断面泄流槽下泄效率高、能以较低的峰值流量下泄更多水量。石振明等^[20]以唐家山堰塞坝为例,在开挖量相同前提下,得到泄流槽两侧开挖坡度对下泄流量的影响规律。赵万玉等^[21]以唐家山为原型设计1:250的缩尺试验,对不同溃口型式优缺点比较分析,得到三角形、梯形、复式横断面泄流槽的泄流能力,针对唐家山堰塞坝排险提出复式槽可较好地应用实际工程。

基于上述国内外研究,前人主要集中研究坝体形状规则的堆积体,对于天然形成的堆积体研究较少,本文着重研究天然形成的爬高型堰塞坝,开展漫顶溃决试验并探究其溃决机理。

1 试验设计

天然堰塞坝与人工土石坝在坝体关键特征上具有明显不同,主要表现在坝体的几何形态、坝体结构和物质组成上。天然形成的堰塞坝几何形态不规则、坝体结构稳定性差别大、坝料通常是不均匀宽级配物质组成。滑入型堆积体近岸高,对岸低,过流位置一般在对岸,过流部位的坝体粗颗粒相对较多,抗冲蚀性相对较好;折返性堆积体两岸高,中间低,过流位置一般在坝体中间,过流部位的坝体上部多为细颗粒薄层,易被冲蚀,下部粗颗粒抗冲蚀性较好;爬高型堆积体近岸低,对岸高,过流位置一般在近岸,过流部位的坝体细颗粒相对较多,抗冲蚀性相对较差,如图1所示。

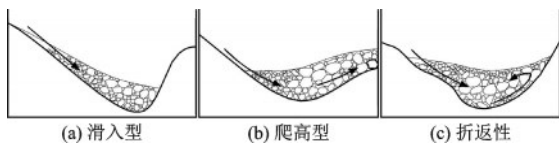


图1 天然堆积体堵江模式^[5]

Fig.1 Natural sediment blocking modes in rivers

从上述堰塞坝堆积结构特征分析,爬高型堰塞坝存在溃坝风险更大,鉴于此,本文开展爬高型堰塞坝漫顶溃决试验,探究爬高型堰塞坝漫顶溃决

机理。

1.1 试验设备

试验水槽选择重庆交通大学水利水运工程重点实验室航道厅精密水槽,如图2所示,试验水槽规格为 $12\text{ m}\times 0.4\text{ m}\times 0.4\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),水槽底部和侧面由钢化玻璃构成,水槽坡度可以在小范围内调节,供水系统搭载流量控制系统、变频器、水泵、电磁流量计。

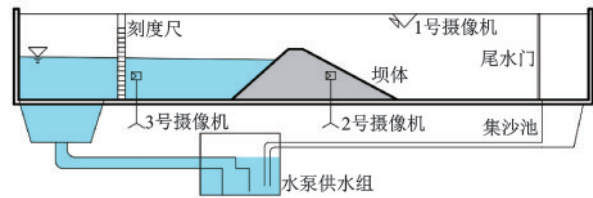


图2 试验水槽

Fig.2 Experimental tank

1.2 试验参数

根据实测资料^[22],2018年11月3日,白格村发生大面积滑坡,堆积体堵塞河道形成堰塞坝。试验选择“11·3”白格堰塞体为原型,其白格堰塞体的河床底高程为 $2\ 870\text{ m}$,堰塞体高 96 m ,顺河向顶宽 200 m ,顺河向长 $1\ 400\text{ m}$,横河向长 $400\sim 500\text{ m}$ 。鉴于实际堰塞湖沿河向较长,且堰塞体的冲刷破坏为水头与土体的相互作用而与堰塞长度关系不大^[23],结合试验水槽的规格和试验进程,本次试验设置堰塞体纵向几何比尺为1:1 000,垂向比尺为1:500,横向比尺为1:1 000,坝体长 1.4 m ,坝高 0.19 m ,坝顶宽 0.4 m ,各物理量的比尺见表1。

表1 比尺关系

Table 1 Scale relationship

| 名称 | 重力 | 纵向 | 垂向 | 横向 | 时间 |
|----|---------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------------|
| 比例 | $\lambda_g=1$ | $\lambda_L=1:1\ 000$ | $\lambda_z=1:500$ | $\lambda_H=1:1\ 000$ | $\lambda_t/(\lambda_H)^{0.5}$ |

模型试验受试验水槽规格的限制,水槽蓄水量和原型无法保持一致,未能全面考虑坝前库容和上游来水量等因素对溃决过程的影响,因此,试验开始前开展预试验,综合考虑不同坝高工况及试验耗时等问题,试验最终标定来水流量为 $0.7\text{ m}^3/\text{s}$ 。

1.2.1 坝料级配

坝体材料级配参考白格堰塞坝原型级配^[24],材料密度为 $1\ 850\text{ kg}/\text{m}^3$,孔隙比 e 为 0.475 ,内摩

擦角为 30° ，取样材料的最大粒径分别为 80 mm (级配 1)、40 mm (级配 2)、20 mm (级配 3)，如图 3 所示。

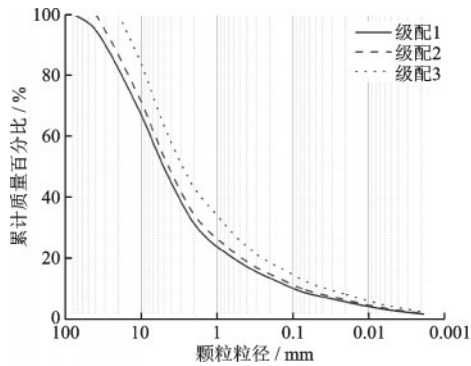


图3 不同粒径级配

Fig.3 Grading diagrams for different particle sizes

根据试验要求和标准检验筛将坝体材料筛成 10 种不同粒径材料，分别为小于 0.075、0.075~0.25、0.25~0.5、0.5~1、1~2、2~5、5~10、10~20、20~40、40~80 mm。

1.2.2 堰塞坝下游坡比

基于现场勘测的数据^[25]，通过对白格堰塞坝溃口处的上下游坡比计算，得到上游坡比为 1:2，下游坡比为 1:3，坡比对堰塞坝溃决的影响主要是指下游坝坡的变化对溃决的影响^[14]，因此上游坡比保持 1:2 不变，下游增设两组坡比 (1:2.5 和 1:3.5)，起滑段剖面如图 4 所示。

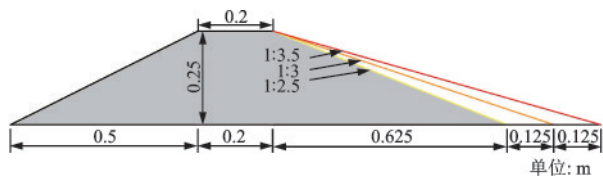


图4 堰塞坝起滑段剖面示意

Fig.4 Cross-section schematic diagram for landslide dam sliding section

1.2.3 坝顶形态

如图 5 所示，爬高型堰塞坝坝体有明显的近岸低、对岸高的特点^[5]。

搜集了白格堰塞坝、唐家山堰塞坝、叠系古镇堰塞坝、戈龙布滑坡堆积体、加郡古滑坡堆积体、金沙江虎跳峡滑坡堆积体的实测横河向剖面图，对六例典型堰塞坝坝顶形状进行数据拟合，拟合出具有一定代表性的爬高型堰塞坝坝顶形状。

为探究坝顶形状对堰塞坝溃决的影响，假定拟

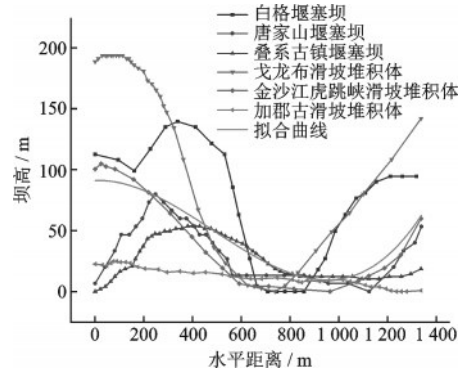


图5 爬高型堰塞坝坝顶拟合曲线

Fig.5 Fitting curves for climbing-type landslide dam crests

合的爬高型曲线起点和终点位置不变，通过改变宽深比大小以增设两组对照组，如图 6 所示。 B' 为右岸起滑点到溃口中心的水平距离， h 为溃口底部到起滑点的垂向距离，引入宽深比 B'/h 来描述相对溃口深度； B 为右岸起滑点到左岸边坡的水平距离，表示溃口上宽。

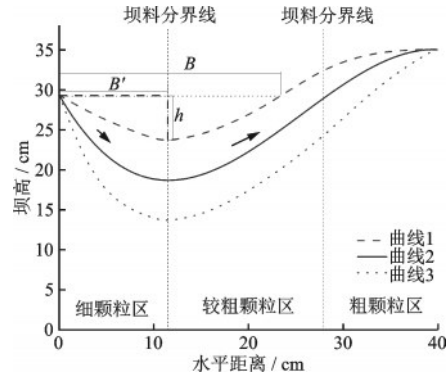


图6 坝顶形态特征

Fig.6 Dam crest morphological features

王玉峰等^[26]对汶川地震触发高速远程滑坡形成的碎屑流堆积形态开展了研究，以牛圈沟滑坡、谢家店子滑坡、文家沟滑坡为研究对象，提出了碎屑流运动的四个过程，详细阐述了碎屑流流动堆积区反粒序特征的形成机制。李坤等^[27]研究了不同分形粒径分布对颗粒流粒径分选的影响，指出堆积体上层由于反粒序机制，大颗粒相对增加，其他颗粒相对减小，其中，最小的颗粒近似为零；堆积体下层，最大颗粒相比其他颗粒明显减小，主要以细颗粒为主；堆积体前缘细颗粒含量较少，其余颗粒相对较多。

天然堆积的爬高型堰塞坝，其堆积体形态结构特征与碎屑流堆积体极为相似。由于崩滑碎屑体反粒序机制和颗粒滑动动力条件，形成近岸侧细颗

粒居多,对岸侧粗颗粒较多,这种坝料分布特征对堰塞坝漫顶溃决影响颇大。因此,模型试验填筑过程需要对坝料分区,大致分成细颗粒、较粗颗粒、粗

颗粒三个堆积区。结合王道正等^[6]坝体材料分组原则,各区主要粒径级配分布见表2,分区级配曲线如图7所示。

表2 坝体分区级配分配

Table 2 Grading distribution table of dam zones

| 级配分组 | 级配1 | | | 级配2 | | | 级配3 | | |
|-----------|-----|-------|-------|-----|------|-------|-----|------|-------|
| 粒组/mm | <10 | 10~40 | 40~80 | <5 | 5~20 | 20~40 | <2 | 2~10 | 10~20 |
| 细颗粒区占比/% | 50 | 30 | 20 | 50 | 30 | 20 | 50 | 30 | 20 |
| 较粗颗粒区占比/% | 30 | 40 | 30 | 30 | 40 | 30 | 30 | 40 | 30 |
| 粗颗粒区占比/% | 20 | 30 | 50 | 20 | 30 | 50 | 20 | 30 | 50 |

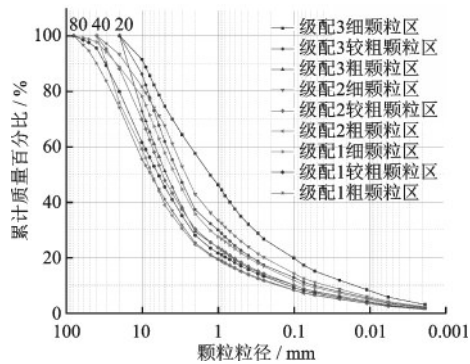


图7 各区土石料级配曲线

Fig.7 Gradation curves for soil and rock materials in each zone

表4 爬高型堰塞坝溃决试验方案

Table 4 Test schemes for climbing-type landslide dam breach

| 试验编号 | 级配 | 下游坝坡 | 坝顶形状曲线 |
|------|----|-------|--------|
| 1 | 1 | 1:2.5 | 1 |
| 2 | 1 | 1:3 | 3 |
| 3 | 1 | 1:3.5 | 2 |
| 4 | 2 | 1:2.5 | 3 |
| 5 | 2 | 1:3 | 2 |
| 6 | 2 | 1:3.5 | 1 |
| 7 | 3 | 1:2.5 | 2 |
| 8 | 3 | 1:3 | 1 |
| 9 | 3 | 1:3.5 | 3 |

1.3 试验方法及工况

采用正交试验法分析堰塞坝漫顶溃决过程,将土石料级配、背水面坡比及爬高型堰塞坝坝顶形状作为主要的研究参数,通过控制不同参数的变化来分析参数对堰塞坝漫顶溃决的影响。试验共设计3水平3因子见表3,正交试验表选择 L_93^3 。表4为本次试验的试验方案。

表3 试验参数正交设计水平

Table 3 Orthogonal design levels of test parameters

| 水平 | 级配 | 下游坝坡 | 坝顶形状曲线 |
|----|----|-------|--------|
| 1 | 1 | 1:2.5 | 1 |
| 2 | 2 | 1:3 | 2 |
| 3 | 3 | 1:3.5 | 3 |

2.1 漫顶溃决过程分析

试验过程大致分为四个阶段^[30],以第八组试验为例,对各阶段试验现象分析,试验八坝体溃决过

2 试验结果分析

按照设计要求堆积试验坝,在大坝上游贴刻度标尺以观察试验中水位变化情况,在刻度标尺、坝体侧面及坝体下游位置架立三台高清摄像机,通过电脑端控制上游来流量为恒定值0.7 L/s。各组试验以水流进入泄流槽为起始(三组摄像机同时开启直至破坏结束后关闭),1号机记录下游坝面溃口变化过程,2号机记录坝体侧面水流对坝体的冲刷过程,3号机记录坝前水位变化情况。

当水位逐渐上升至坝顶最低点后,水流开始漫顶,堰塞坝开始发生漫顶溃决破坏。各工况的试验结果见表5。

程如图8所示。

过流初始阶段:水流初次进入堰顶到水流流出堰顶,在此过程,水流主要浸湿堰顶土体,结构松散的坝体,会出现细微的沉降等现象。

溯源侵蚀阶段:以坝顶下游端为起点,直到侵

表5 正交试验结果

Table 5 Orthogonal test results

| 试验编号 | 洪峰流量 $Q(L/s)$ | 洪峰时间 T/s | 溃口上宽 B/m | 溃口下宽 b/m | 残余坝高 h/m |
|------|---------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 14.4 | 120 | 0.4 | 0.25 | 0.042 |
| 2 | 13.2 | 130 | 0.288 | 0.23 | 0.078 |
| 3 | 11 | 160 | 0.3 | 0.235 | 0.095 |
| 4 | 12.6 | 130 | 0.36 | 0.245 | 0.065 |
| 5 | 12.7 | 120 | 0.4 | 0.25 | 0.053 |
| 6 | 14.9 | 110 | 0.31 | 0.24 | 0.075 |
| 7 | 14 | 80 | 0.4 | 0.25 | 0.053 |
| 8 | 15 | 120 | 0.4 | 0.26 | 0.035 5 |
| 9 | 11.8 | 110 | 0.377 | 0.25 | 0.075 |

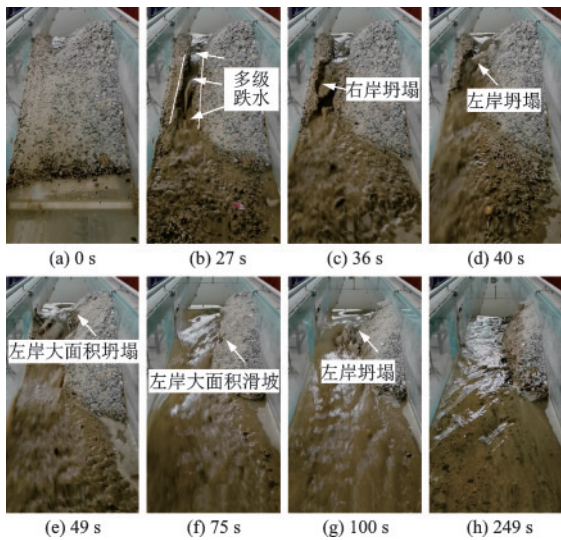


图8 坝体溃决过程(试验8)

Fig.8 Dam breaching process (Test 8)

蚀贯穿到坝顶上游端结束,在贯穿发展过程中,常形成跌坎出现跌水现象,如27s时出现多级跌水。跌水对泄流槽产生很强的冲击力,沿水流方向依次增强,冲刷过程坡面呈现上窄下宽的“喇叭形”。

溃口发展阶段:从上游坡面开始侵蚀为起点到溃口不再发展结束。侵蚀点到达上游坡面,形成连通的溃口,下泄流量明显增大,溃口快速发展,36、40、49s短时间内左右岸出现连续垮塌,垮塌位置均出现在“喇叭形”两侧,表明“喇叭形”附近水流冲刷能力强。70、75、100s左侧岸坡出现不同程度的滑坡和垮塌,后者大规模垮塌对下泄水流造成很大程度影响,短时间内出现上游水位激增,下泄流量突减情况。

溃口稳定阶段:指溃口不再发展,残留坝体处于稳定的状态。在溃口发展阶段结束的很长时间内,水位下降水头差较小,水流冲刷能力大幅

减弱,100~249s只能观察到河床上有细小颗粒在水流作用下做悬移质运动,河床表层的粗颗粒缓慢形成粗化层,保护河床不被侵蚀,水流变得清澈,达到冲淤平衡状态。

2.2 溃口流量过程分析

溃决流量是研究爬高型堰塞坝漫顶溃决过程重要的一个参数,可以反映堰塞坝漫顶溃决的过程特征。研究溃决过程中峰值流量和洪峰时间可以对下游应急救援等工作提供理论支撑,减小对下游的危害程度。坝前水位、坝体材料、溃口位置、溃口扩展速率、下游坝面坡率等多重因素影响爬高型堰塞坝溃决流量过程。通过水量平衡原理,对不同时刻上游水位变化列水量平衡方程,求得溃决流量计算公式^[23]:

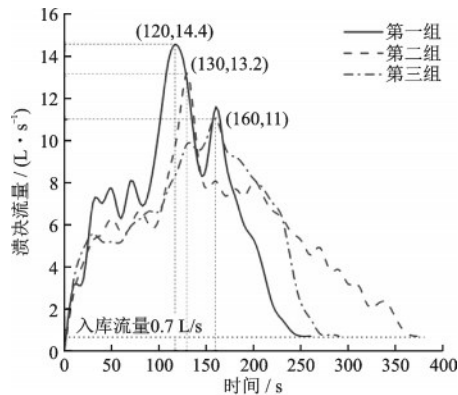
$$Q = \frac{(h_1 - h_2)(A_1 + A_2)}{2(t_2 - t_1)} + q \quad (1)$$

式中, h_1 、 h_2 、 A_1 、 A_2 分别是上游 t_1 、 t_2 时刻水库水位和湖面面积; q 为水库入流流量。

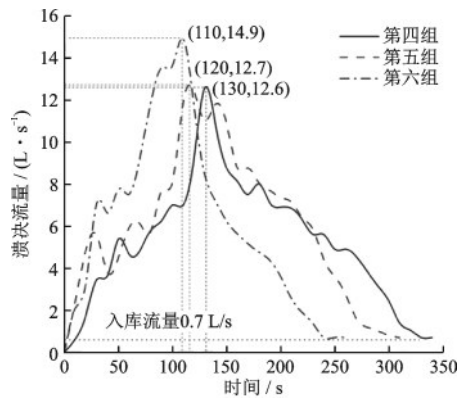
根据坝前监测水位的录像视频,以水流漫过坝顶为起点记为0s,此后每间隔10s读取一次水位数据,再采用差分法计算0~10s间隔的水位值,重复操作直到试验结束,利用水位-面积关系,求得相应时刻湖面面积,采用上述的公式计算溃决流量,溃口流量过程从以下三个角度分析。

(1) 土石料级配

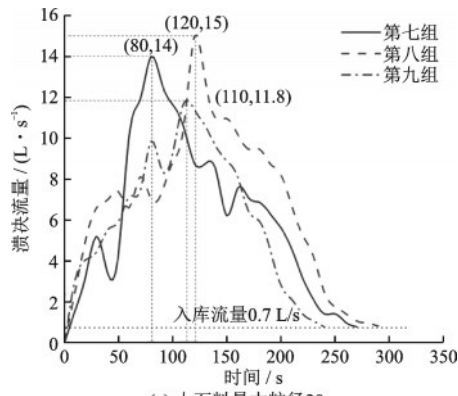
根据不同材料组成对试验组次分成三类如图9所示,分别求图a、b、c洪峰流量、洪峰时间的平均值,依次是(136.67, 12.8)、(120, 13.4)、(103.33, 13.6)。可以看出级配1的试验组次洪峰来临时间最长、洪峰流量最小,坝体冲刷过程中,粗颗粒形成



(a) 土石料最大粒径80 mm



(b) 土石料最大粒径40 mm



(c) 土石料最大粒径20 mm

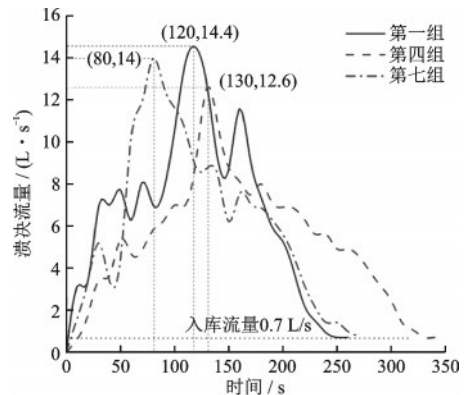
图9 不同坝体材料溃决流量过程

Fig.9 Breach flow process for different dam materials

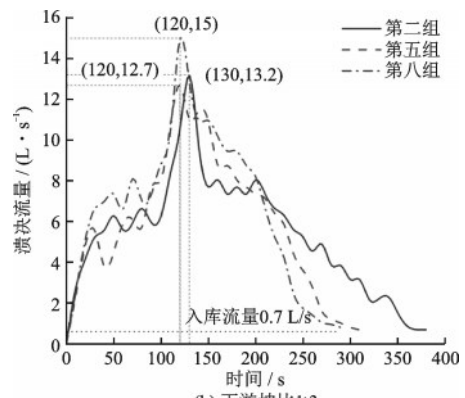
骨架,被冲刷的细颗粒会不定时堵塞骨架空隙,造成如图9(a)所示,25~100 s流量曲线连续波动的现象。综合分析土石料平均粒径对流量过程的影响,应是土石料平均粒径越大,坝体的整体稳定性越强并且抗冲刷性能越强,溃口发展就会比较缓慢,洪峰来临时间就会推迟,形成的洪峰流量相对较小。

(2) 背水面坡度

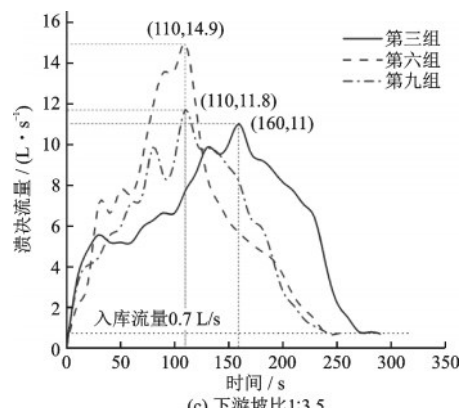
图10为不同下游坝坡溃决流量过程曲线。依据下游坡比把试验组次分成三类,分别计算其平均值(110, 13.67)、(123.33, 13.63)、(126.67, 12.57),可以观察到随着下游坡比越来越小,洪峰到达的时



(a) 下游坡比1:2.5



(b) 下游坡比1:3



(c) 下游坡比1:3.5

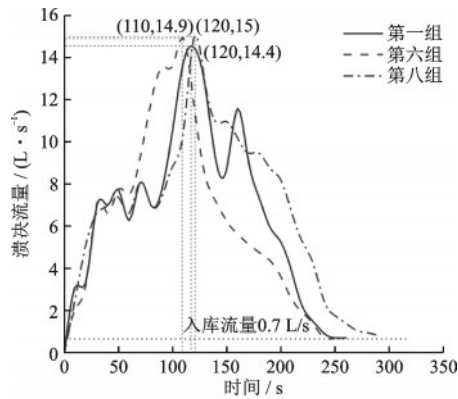
图10 不同下游坝坡溃决流量过程

Fig.10 Breach flow process for different downstream dam slopes

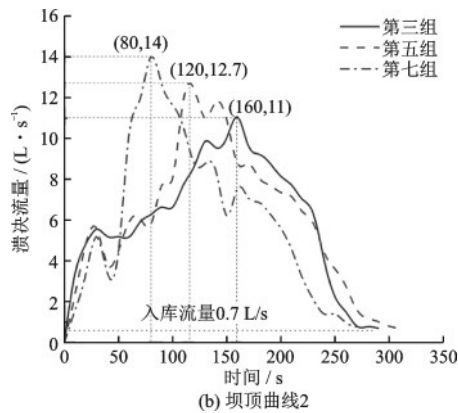
间越来越长、洪峰流量呈递减趋势。试验表明:背水面坡率越大水流冲刷速率越快,溃决过程出现更早,峰值流量也相对较大。究其原因主要是水流经过泄流槽在坝顶下游端得到加速,水流加速的大小主要取决于背水面坡度的大小,坡率较大的背水面水流获得速度更大,即水流的动能更大。进而加快了溃口处垂向冲深及横向发展,导致溯源侵蚀阶段更容易形成较大落差发生跌坎水流冲刷。

(3) 坝顶曲线

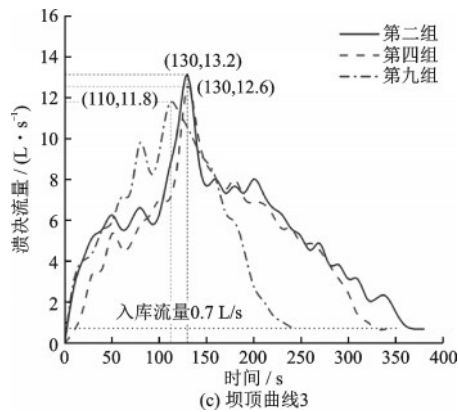
图11为不同坝顶曲线溃决流量过程。以坝顶



(a) 坝顶曲线1



(b) 坝顶曲线2



(c) 坝顶曲线3

图 11 不同坝顶曲线溃决流量过程

Fig.11 Breach flow process for different dam crest curves

形状对试验组次分组,得到其洪峰时间和洪峰流量的平均值为(116.67, 14.77)、(120, 12.57)、(123.33, 12.53)。从图中可以看出,爬高型堰塞坝两岸越陡峭,即宽深比越小,溃口的位置相对较低,溯源冲刷阶段水流获取的动能小,水流流速较缓,坝体冲刷速率慢,堰塞坝溃决过程所需的时间较长,洪峰峰值偏低。

2.3 溃口上宽发展过程分析

试验设计三种坝顶形状,对应的初始溃口上宽也为三种,分别为0.21、0.252、0.288 m。图 12 为溃口上宽发展过程。

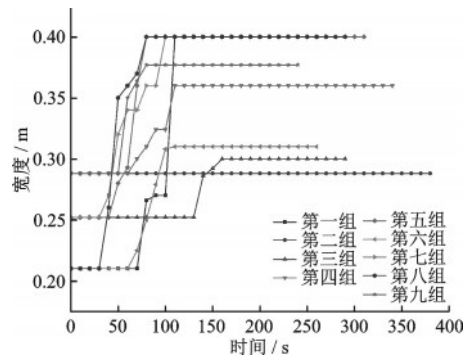


图 12 溃口上宽发展过程

Fig.12 Development process of breach top width

表 6 反映不同因素下残留坝体与各因素的关系。可以看出,溃口上宽的发育受到坝料级配、背水坡面坡度、坝顶形状的影响。随级配变窄,溃口上宽在溃决过程中发育越充分;随着背水坡面坡度变大,溃口上宽扩展宽度随之增大;随坝顶形状(宽深比)的变小,上下游水头差减小,水流冲刷能力减弱,溃决过程中溃口上宽发育较缓,最终溃口上宽尺度较小。

表 6 不同因素下残留溃口均值

Table 6 Mean values of residual breach under different factors

| 分组 | 溃口上宽/m | 溃口下宽/m | 残余坝高/m |
|------|--------|--------|--------|
| 级配 | 1 | 0.329 | 0.072 |
| | 2 | 0.357 | 0.064 |
| | 3 | 0.392 | 0.055 |
| 下游坡比 | 1:2.5 | 0.387 | 0.053 |
| | 1:3 | 0.363 | 0.056 |
| | 1:3.5 | 0.329 | 0.082 |
| 坝顶形状 | 1 | 0.370 | 0.051 |
| | 2 | 0.367 | 0.067 |
| | 3 | 0.342 | 0.073 |

2.4 溃后残留坝体过程分析

图 13 描述了九组试验溃后残留的坝体。结合图 8 和表 6 可以看出,不同粒径土石料颗粒被水流冲刷起动所需要的水动力条件不同,颗粒粒径越小,土石料抗冲刷性能越差,坝体残余的溃口口径越大;不同背水面坡度对其溃决过程产生的影响显著,背水面坡度较大的堰塞坝相对于坡度较小的更易发生溃决,其主要原因在于较小的背水面坡度不利于溯源冲刷阶段跌坎水流的发展,进而对于坝体的冲刷相对较缓,即溃口处的垂向冲深和侧向发展

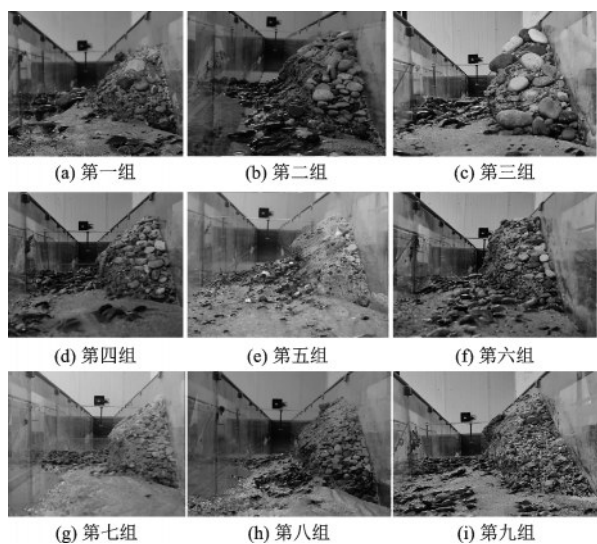


图 13 溃后残留坝体

Fig.13 Residual dam after breaching

也相对缓慢,从溃决时间角度来看,背水面坡度变小导致洪峰流量出现的时间更晚,相应地溃决历时延长,溃后残留坝体总量小,溃口口径小;随坝顶形状由1变化到3,相应地溃口宽深比变得越小,溃口相对位置变得越低,坝前水位和库容随之减小,发生漫顶时洪水总量就会越小,导致洪峰流量向下游演进的衰减程度变大,水流的冲刷能力相对较弱,溃后残余坝体相对较多,最终溃口口径相对较小。

2.5 下游淤积情况分析

堰塞坝漫顶溃决被冲刷的土石料淤积在下游河道,泥沙淤积长度和厚度主要取决于水流动力条件、泥沙抗冲刷能力等因素。为了探究在不同材料、不同背水面坡率及不同坝高因素下,下游泥沙颗粒最终运移情况开展9组试验分析。分别测量下游1 m处泥沙淤积厚度和总长度。通过测量不同位置数据来分析泥沙输移规律。

图14直观地描述了下游泥沙淤积情况。从图中可以看出,第5、7、8组泥沙输移距离较长,距坝趾1 m处泥沙淤积厚度较厚。究其原因主要是土石料级配、坝高起到主要影响,1~3组最大颗粒粒径在80 mm,距坝趾输移长度偏短、1 m处厚度均偏低,说明水流对于宽级配大颗粒材料的冲刷能力较弱,冲刷后大部分材料集中在坝址处;4~6组最大颗粒粒径在40 mm,其中第5组距坝趾输移长度和1 m处厚度相对其他两组较大,其原因在于第5组坝顶形状(宽深比)和背水面坡比都处于最优值,利于泥沙推移质运动的发生;7~9组最大颗粒粒径在

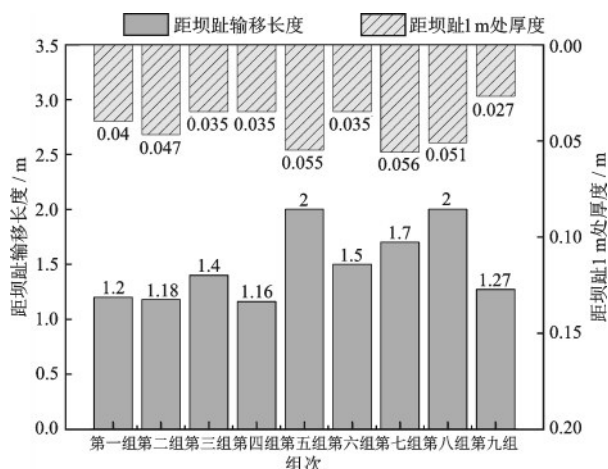


图 14 下游泥沙淤积情况

Fig.14 Illustrative diagram of downstream sediment deposition

20 mm,距坝趾输移长度偏远、1 m处厚度偏大,细颗粒对水流的消能作用较差,被水流冲刷的距离越远,下游被泥沙覆盖的面积就越多。总的看来,在爬高型堰塞坝漫顶溃决过程中,宽级配材料对泥沙输移起到抑制作用,有助于下游防洪排险和为防灾减灾工作提供部署时间。

3 结论

本文主要从漫顶溃决过程、溃口流量过程、下游淤积情况对试验结果分析,得到以下结论:

(1)爬高型堰塞坝呈近岸侧低对岸侧高发生溃决的部位主要在近岸侧,其他类型堰塞坝溃决位置具有不确定性;近岸侧细颗粒居多,在冲刷过程中近岸侧下切冲蚀发展较快,横向扩展以向对岸侧展宽为主;与其他类型堰塞坝漫顶溃决过程相比,爬高型堰塞坝溃决初期溃口冲蚀强度较高,溃口发展速度较快,流量峰值出现时间较早,溃坝风险高于其他类型的堰塞坝。

(2)溃后残留溃口口径大小取决于土石料级配、背水面坡度、坝顶形状等因素的影响;与土石料级配呈负相关、与背水面坡度呈正相关、与坝顶形状(宽深比)呈正相关。

(3)土石料级配越宽,其大颗粒土石料在坝体中承担骨料,增强坝体整体稳定性,另外,在河床演化中形成粗化区,致使坝体、河床抗冲刷能力增强,漫顶溃决历时延长,削弱了峰值流量,延长了峰现时间;背水面坡度越陡,水流在坝顶下游端势能转化成动能的过程中,获得的动能越多,增大的水流

流速加快了溃口垂向和横向发展,在溯源冲蚀阶段更易形成跌水,加快溃决进程;坝顶曲线宽深比越小,溃口的位置相对较低,在溃决中形成的水头差小,溃口发展迟缓,峰值流量偏小,峰现时间延长。

(4)下游泥沙淤积主要取决于水流动力条件和泥沙抗刷能力等因素。泥沙冲刷的距离随着土石料级配变窄、背水坡面越陡、溃口高度增加而变远,同时,距坝趾相同截面泥沙淤积厚度越薄。

参考文献:

- [1] Hai B L, Shun C Q, Hao C, et al. Mass movement and formation process analysis of the two sequential landslide dam events in Jinsha River, Southwest China [J]. *Landslides*, 2019, 16(11): 2247-2258.
- [2] 张健楠, 马煜, 张惠惠, 等. 四川省都江堰市大干沟地震泥石流[J]. *山地学报*, 2010, 28(5): 623-627.
Zhang J N, Ma Y, Zhang H H, et al. Study on earthquake debris flow in dagan gully, Dujiangyan, Sichuan [J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28 (5) : 623-627. (in Chinese)
- [3] 陈晓清, 崔鹏, 赵万玉, 等. “5·12”汶川地震堰塞湖应急处置措施的讨论: 以唐家山堰塞湖为例[J]. *山地学报*, 2010, 28(3): 350-357.
Chen X Q, Cui P, Zhao W Y, et al. A Discussion of emergency treatment of dammed lake caused by “5·12” Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28(3): 350-357. (in Chinese)
- [4] 彭铭, 王开放, 张公鼎, 等. 堰塞坝溃坝模型实验研究综述[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(5): 1007-1015.
Peng M, Wang K F, Zhang G D, et al. Review of model experimental studies on break of landslide dams [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28 (5) : 1007-1015. (in Chinese)
- [5] 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.
Zhao 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. (in Chinese)
- [6] 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 Z D, Chen X Q, Luo Z G, 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)
- [7] Lukas S, Willi H H. Modelling dike breaching due to overtopping [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2009, 47(5): 585-597.
- [8] Chaiyuth Chinnarasri T T S W. Flow patterns and damage of dike overtopping [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2003, 18(4): 301-309.
- [9] 蒋先刚, 吴雷. 不同初始含水量条件下的堰塞坝溃决机理[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(1): 185-193.
Jiang X G, Wu L. Influence of initial soil moisture on breaching mechanism of natural dam [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50 (1) : 185-193. (in Chinese)
- [10] Hunt S L, Hanson G J, Cook K R, et al. Breach widening observations from earthen embankment tests [J]. *Transactions of the ASAE*, 2005, 48(3): 1115-1120.
- [11] 王子豪, 陈昊, 何利君, 等. 上游洪峰流量对堰塞坝漫顶溃决影响试验研究[J]. *人民黄河*, 2015, 37(5): 38-41.
Wang Z H, Chen H, He L J, et al. Experimental study on reservoir inflow affected to overtopping outburst of barrier dam [J]. *Yellow River*, 2015, 37(5) : 38-41. (in Chinese)
- [12] Xu F G, Yang X G, Zhou J W, Hao M H. Experimental Research on the Dam-Break Mechanisms of the Jidanwan Landslide Dam Triggered by the Wenchuan Earthquake in China [J]. *The Scientific World Journal*, 2013, 2013: 272363.
- [13] 杨阳, 曹叔尤. 堰塞坝漫顶溃决与演变水槽试验指标初探[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2015, 47(2): 1-7.
Yang Y, Cao S Y. Preliminary study on similarity criteria of the flume experiment on the breach process of the landslide dams by overtopping [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2015, 47 (2) : 1-7. (in Chinese)
- [14] 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 W, Qi Z J, Duan W G, 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)
- [15] 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[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(12): 59-66.
Liu B X, Zhu X H, Guo J, et al. Experimental research

- on longitudinal breaching of landslide dam under different bed slopings[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020,37(12):59-66. (in Chinese)
- [16] 刘邦晓,朱兴华,郭剑,等.不同沟床坡度堰塞坝溃口展宽历程试验研究[J].工程地质学报,2020,28(6):1272-1280.
- Liu B X, Zhu X H, Guo J, et al. Experimental research on breach broadening process of landslide dam under different channel bed slopes[J]. Journal of Engineering Geology, 2020,28(6):1272-1280. (in Chinese)
- [17] 赵高文,姜元俊,杨宗信,等.单向侧蚀与下蚀共同作用下堰塞坝的演化特征[J].岩石力学与工程学报,2019,38(7):1385-1395.
- Zhao G W, Jiang Y J, Yang Z J, et al. Evolutional characteristics of landslide dams under the combination of unidirectional lateral-erosion and undercutting-erosion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019,38(7):1385-1395. (in Chinese)
- [18] 王琳,武钰森,段庆伟,等.堰塞湖泄流槽开挖措施快速优化研究[J].水力发电学报,2022,41(4):104-112.
- Wang L, Wu Y M, Duan Q W, et al. Study on efficient optimization of spillway construction for barrier lakes [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(4):104-112. (in Chinese)
- [19] 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 T L, Chen S S, Fu C J, 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)
- [20] 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[J].工程地质学报,2016,24(5):741-751.
- Shi Z M, Zheng H C, Peng M, et al. Breaching mechanism analysis of landslide dams considering different spillway schemes—a case study of Tangjiashan Landslide dam [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(5):741-751. (in Chinese)
- [21] 赵万玉,陈晓清,高全,等.不同横断面泄流槽的堰塞湖溃决实验研究[J].泥沙研究,2011,36(4):29-37.
- Zhao W Y, Cehn X Q, Gao Q, et al. Experimental study of dam-break of earthquake barrier lake with different cross sections of drainage channel[J]. Journal of Sediment Research, 2011,36(4):29-37. (in Chinese)
- [22] 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. (in Chinese)
- [23] 邓明枫,陈宁生,邓虎,等.堰塞坝漫顶溃决过程与机理试验研究[J].成都理工大学学报(自然科学版),2011,38(3):359-365.
- Deng M F, Chen N S, Deng H, et al. Experimental study on the overtopping outburst process and mechanism of the barrier dam[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2011,38(3):359-365. (in Chinese)
- [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. (in Chinese)
- [25] 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[J].工程科学与技术,2020,52(2):29-37.
- Zhong Q M, Chen S S, Shan Y B, et al. Numerical modeling of breaching process of Baige Dammed Lake on Jinsha River [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020,52(2):29-37. (in Chinese)
- [26] 王玉峰,程谦恭,朱圻.汶川地震触发高速远程滑坡-碎屑流堆积反粒序特征及机制分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(6):1089-1106.
- Wang Y F, Chen Q G, Zhu Q, et al. Inverse grading analysis of deposit from rock avalanches triggered by Wenchuan Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1089-1106. (in Chinese)
- [27] 李坤,王玉峰,程谦恭,等.分形粒径分布对颗粒流粒径分选的影响规律[J].岩石力学与工程学报,2021,40(2):330-343.
- Li K, Wang Y F, Chen Q G, et al. Effects of fractal particle size distribution on segregation of granular flows [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021,40(2):330-343. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)