

•滑坡堰塞湖灾害机理与防控•

DOI:10.15961/j.jsuese.202100607



本刊网刊

基于物理模型试验的堰塞坝冲刷溃决过程研究

谢 忱^{1,2}, 李从江², 杨兴国², 范 刚², 李海波³, 周家文^{3*}

(1.四川省水利水电勘测设计研究院, 四川 成都 610072; 2.四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065;

3.四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘 要:中国是堰塞湖灾害最严重的国家之一, 堰塞湖对上游淹没区和下游溃决演进区的人民生命财产安全构成巨大威胁, 深入掌握堰塞坝冲刷溃决过程可为应急泄流道的设计和下游应急避险措施的制定等提供重要科技依据。以2018年金沙江白格滑坡堰塞湖为研究背景, 采用室内物理模型试验的手段对堰塞坝冲刷溃决过程进行了系统研究。结果表明: 堰塞坝冲刷溃决过程一般可分为4个阶段: 过流孕育阶段、溯源侵蚀阶段、溃决发展阶段及河床再平衡阶段, 其中: 当溯源冲刷的陡坎追溯至上游坡顶, 泄流槽进口断面在侵蚀作用下突然拓宽, 泄流槽将连通形成底坡 $i>0$ 的斜坡道, 进而导致水流流速和流量突然增大, 堰塞坝进入溃决快速发展的阶段。试验进一步探究了泄流槽开挖位置、开挖深度和宽度对溃决过程的影响。研究发现: 当泄流槽开挖宽度不变, 深度增大时, 洪峰流量降低、峰现时间延迟, 溃决流量过程线更为平坦; 当泄流槽开挖深度不变, 宽度增大时, 峰现时间延迟。最后, 对泄流槽的优化设计提出建议, 泄流槽位置宜布置在坝顶高程最低的垭口, 以减小洪峰流量, 缩短溃决历时; 开挖泄流槽时, 应优先考虑加大泄流槽深度, 最大限度地降低溃决时的堰塞湖水位。

关键词:滑坡堰塞湖; 物理模型试验; 冲刷溃决; 溃决流量; 泄流槽

中图分类号:TV65

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2021)06-0043-11

Erosion and Breach of Landslide Dam Based on Physical Model Tests

XIE Chen^{1,2}, LI Congjiang², YANG Xingguo², FAN Gang², LI Haibo³, ZHOU Jiawen^{3*}

(1.Sichuan Water Resources and Hydroelectric Investigation & Design Inst., Chengdu 610072, China; 2.College of Water Resource & Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China; 3.State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: China is one of the countries with the most serious disasters of dammed lakes, where the dammed lakes pose a great threat to the safety of people's lives and properties among the upstream inundated area and the downstream outburst flood routing area. A deep understanding of the scouring and breaching processes of landslide dam can provide important scientific and technological basis for the design of emergency discharge channel and the formulation of downstream emergency measures. According to the event of 2018 Baige landslide-dammed lake in the Jinsha River, the scouring and breaching processes of landslide dam were systematically studied by conducting the laboratory physical modeling tests. Test results showed that the erosion and breaching processes of landslide dam could be divided into four stages, i.e., flow incubation stage, retrogressive scouring stage, dam break development stage, and riverbed rebalancing stage. When the retrogressive erosion scarp was traced back to the upstream slope top and the inlet section of the discharge channel was eroded, the discharge channel would connect to form a ramp with the bottom slope $i>0$. Then the flow velocity and flow rate increase suddenly, and the dam break developed rapidly. The results also showed that when the excavation width of the chute remained constant and the depth increased, the peak flow would decrease, the peak time would be delayed

收稿日期:2021-06-28

基金项目:国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U20A20111); 四川省青年科技创新研究团队项目(2020JDTD0006); 四川省国际科技创新合作/港澳台科技创新合作项目(2021YFB0178)

作者简介:谢 忱(1996—), 女, 硕士生。研究方向: 堰塞湖溃决过程及机理。E-mail: 2364007190@qq.com

*通信作者:周家文, E-mail: jwzhou@scu.edu.cn

网络出版时间:2021-11-12 15:52:00

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20211111.2158.005.html

and the process of the burst flow became smoother; when the depth of the chute was fixed, the peak time would be delayed as the width increased. Finally, according to the testing results, some suggestions were put forward for the optimal design of the discharge channel: The location of the discharge channel should be arranged in the pass with the lowest crest elevation to reduce the peak flow and shorten the breaching time; when excavating the spillway, priority should be given to increasing its depth to minimize the water level of the dammed lake during dam breaching.

Key words: landslide-dammed lake; physical modeling test; scouring and breaching; discharge of breaching; discharge channel

堰塞湖是由山体滑坡、崩塌、泥石流等堵塞河道而形成的一种天然湖泊^[1-2]。堰塞湖溃决事件在世界各地时有发生,尤其在中国西南地区,堰塞湖灾害频发,严重威胁着沿岸上下游人民的生命财产安全^[3-5]。例如:2018年10月和11月,金沙江白格的同一位置先后2次发生大规模滑坡灾害,滑坡体堵江形成堰塞湖。其中,“11·3”白格堰塞湖最大库容高达 $7.90 \times 10^8 \text{ m}^3$,尽管及时开挖泄流槽,使堰塞湖在相对较低的水位下泄,但溃决洪峰流量仍达到了 $31\,000 \text{ m}^3/\text{s}$,在金沙江下游河段形成了超万年一遇的洪水。溃决洪水造成四川、云南境内多座桥梁被冲毁,西藏自治区、四川省、云南省10.2万人受灾,8.6万人紧急转移安置,沿江地区道路、桥梁、电力等基础设施损失严重^[6]。据统计,仅云南省直接经济损失高达74.3亿元^[7]。堰塞湖灾害的致灾后果与堰塞坝的冲刷溃决过程密切相关,深入研究堰塞坝的溃决过程及泄流槽优化设计方案,可为堰塞湖灾害的致灾风险评估及应急预案制定提供指导。

现场调查、数值模拟、试验研究是开展堰塞坝溃决过程及机理研究的重要途径^[8-9]。国内外众多学者通过现场调查建立了全球范围内的堰塞坝数据库,记录了堰塞坝成因、地形地貌特征、坝体物质结构组成、寿命、破坏模式等信息,为堰塞坝溃决研究提供了数据支撑^[10-13]。但由于现场地质条件复杂,危险性极高,溃坝过程中数据难以获取,给以现场调查为基础的堰塞坝溃决机理研究带来极大困难。数值模拟可以很好地再现典型堰塞坝的溃决过程,用于预测溃坝洪水过程和淹没范围分析^[14-15]。近年来,发展了大量基于物理过程的堰塞坝溃决数学模型,并成功应用于唐家山、小岗剑等堰塞湖的溃决反演分析^[16-17]。但由于堰塞坝溃决过程涉及复杂的水沙耦合本构模型,当前的数值模型难以实现堰塞坝冲刷溃决过程的精准模拟,在用于指导堰塞湖灾害现场的应急抢险及处置工作时有一定的局限性。

物理模型试验可操作性强、效果好,试验条件可控,方法灵活。根据相似理论设计的物理模型可在一定程度上反映堰塞坝原型的溃决过程;并且,利用监测的试验数据,对溃决过程进行定量分析,还能弥补现场监测条件不足的缺点。Wang等^[18]设计了一系列大型户外堰塞坝溃决模型试验,用于堰塞坝破坏的

前兆性分析预测和溃决过程机理研究;Zhou等^[19]通过堰塞坝溃决的水槽模型试验,提出一种能反映纵向演化的堰塞坝溃决模型;更多的研究者采用堰塞湖溃决模型试验,研究通过人工干预措施降低堰塞湖溃决风险的方法^[20-21]。开挖泄流槽是降低溃决风险的主要措施之一,目前,关于泄流槽优化设计的研究较少,赵万玉^[22]、赵天龙^[23]等研究了包括梯形、三角形和复式断面形式泄流槽对堰塞坝溃坝过程的影响;石振明等^[24]提出一个考虑不同泄流槽设计的堰塞坝溃决机理分析方法,并应用于唐家山堰塞坝案例分析。这些研究为堰塞湖应急抢险工作提供了一定的参考,现阶段仍需要更深入的研究为人工干预控制溃决提供理论指导。

以2018年金沙江白格滑坡堰塞湖为研究背景,通过物理模型试验手段对堰塞坝冲刷溃决过程进行系统研究,同时分析了泄流槽的位置、初始深度和初始宽度对堰塞坝溃决的影响,从而对泄流槽的优化设计提出建议,以期对堰塞湖灾害的致灾影响评价及应急抢险工作提供一定的参考。

1 物理模型试验设计

堰塞坝冲刷溃决物理模型试验在四川大学水工试验场内的混凝土水槽中进行。试验水槽长23.0 m,宽2.5 m,高2.0 m,水槽分为上游库区段、堰塞体模型段、洪水演进段、泥沙沉淀处、尾水出口5个部分,尾水最终流入地下水库便于循环利用。试验槽内填筑一定厚度的不规则水泥坡面,形成沟谷地形,更接近真实河道。堰塞坝冲刷溃决物理模型试验设计及监测设备布置如图1所示。

图1(a)中:C1~C3为摄像机,全方位记录整个溃坝过程;E为自动水位计,用于监测库区水位的实时变化;V为流速仪,记录溃口水流的流速变化过程;W为水分计,用于测定坝体不同部位的含水率。

试验以2018年“11·3”金沙江白格滑坡堰塞坝为原型。“11·3”白格堰塞坝顺河长800 m,宽400~500 m,最小坝高96 m。堰塞坝过流时,来流量约 $700 \text{ m}^3/\text{s}$,堰塞坝上游最高水位2 956.4 m,蓄水量约5.78亿 m^3 ^[25]。试验坝参照白格堰塞坝坝口处的典型断面进行设计,几何比尺为250:1,坝体模型几何形态如图2所示,坝长3.2 m,坝顶宽1.6 m,坝高0.4 m。

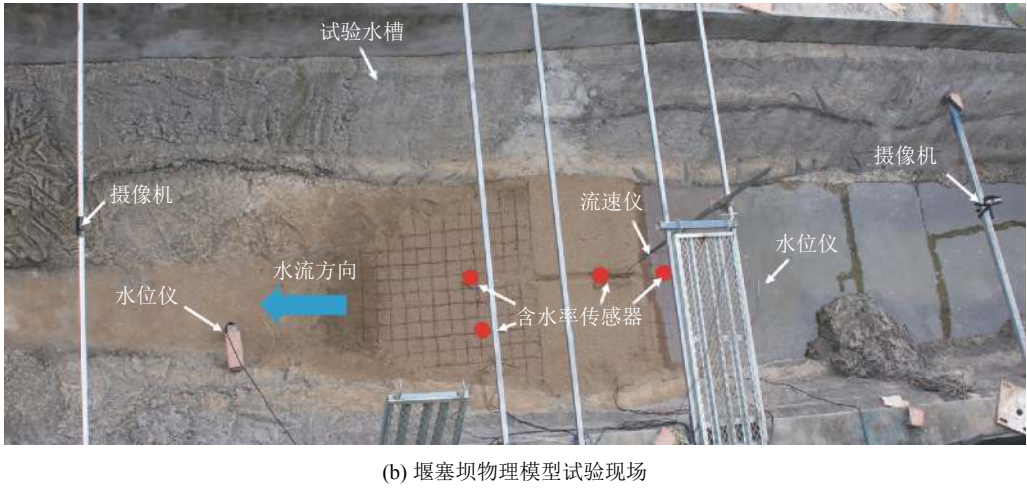
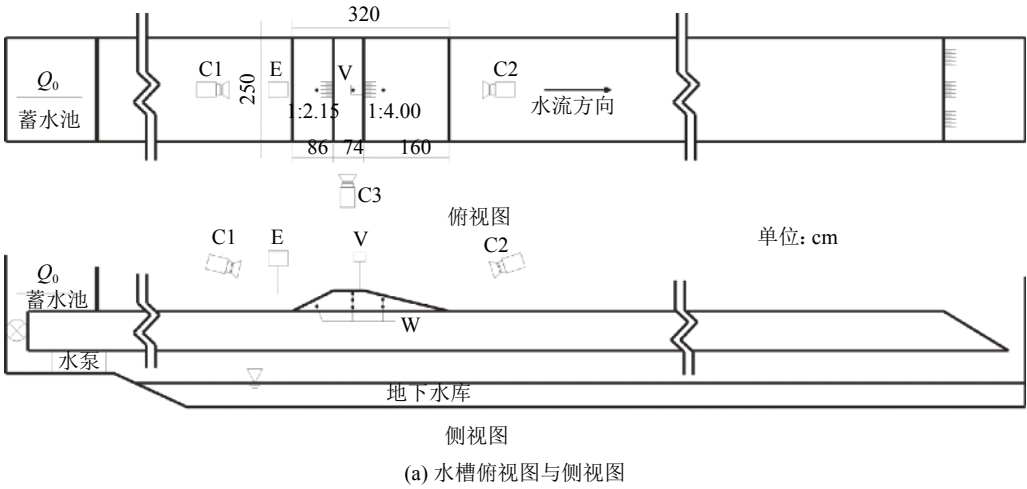


图 1 堰塞坝物理模型试验设备布置

Fig. 1 Layout of physical model test equipments for landslide dam

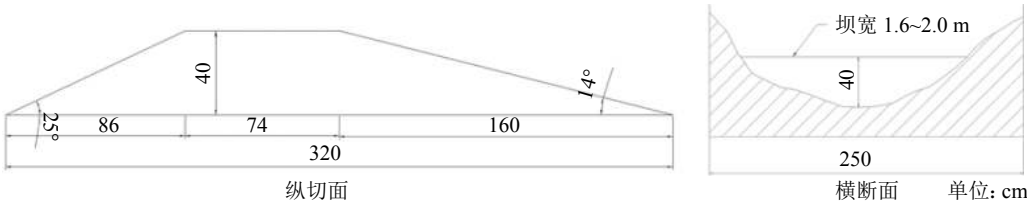


图 2 堰塞坝几何形态设计情况

Fig. 2 Shape and size design of the modeling landslide dam

堰塞体物质组成是影响试验结果的重要因素, 白格堰塞湖的堆积物质颗粒组成偏细, 若模型坝的

材料按照相同的几何比尺缩小泥沙颗粒粒径, 颗粒的黏性会发生巨大改变, 影响抗冲刷性能和坝体稳

定性。本文主要研究坝体溃决过程,为使模型泥沙颗粒的内摩擦系数与原型颗粒相近,放宽相似条件。选取的土料最大粒径为10 mm,中值粒径 $d_{50}=2$ mm,颗粒级配曲线如图3所示,与白格现场颗粒级配^[15]有很大的相似性。坝体溃决过程与堰塞体堆积结构有着密切关系,现场调查发现,坝体材料堆积物质总体由细颗粒组成,分布较均匀^[26],故在试验中采用上述调配好的土料均匀填筑。

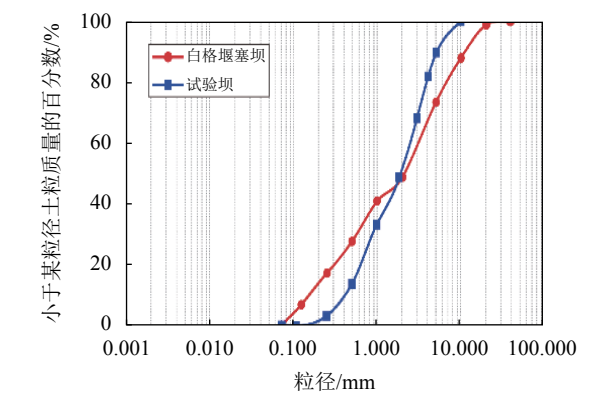


图3 堰塞坝材料颗粒级配分布

Fig. 3 Particle size distribution of the landslide dam's material

堰塞湖的库容和上游来水量同样是影响溃决流量过程的重要参数,试验水槽的空间有限,蓄水量无法与白格原型保持严格一致,试验坝坝前最高水位达0.4 m(最大坝高),最大库容达2.3 m³。入库水流采用水泵定流量输送, $Q_{in}=1.3$ L/s。

试验对堰塞坝在开槽情况下的漫顶溃决过程展开研究。白格堰塞坝设计的泄流槽布置在堆积体内部偏左侧,开挖长度220 m,泄流槽断面呈梯形,底宽5 m,平均深度11.5 m,最大深度15 m,两侧坡比1:1.3^[26]。按照几何比尺换算,模型试验泄流槽设计尺寸应为底宽2.0 cm,平均深度4.6 cm,最大深度6.0 cm,横截面积约36.7~58.8 cm²。试验的泄流槽采用了和白格相似的梯形断面,两侧坡比设置为1:0.6,泄流槽底宽设置为3 cm,深度设置为5 cm,截面积30 cm²,具备了一定的初始过流能力。在此基础上,针对泄流槽的初始宽度、深度及开口位置进行单一因素变化的试验,以探究泄流槽初始设计对堰塞坝溃决过程的影响。表1为试验工况设置,其中,泄流槽开挖最大截面积为90 cm²(底宽3 cm、高10 cm)。

试验开始前,架设和调试监测仪器。堰塞坝体分层铺设,筑坝时,将混合均匀的坝料从一定高度抛下自然堆放,不进行压实;坝体经人工修坡成指定尺寸,并在坝面绘制10 cm×10 cm的观测网格,坝顶开挖泄流槽。最后,启动监测仪器,放水入库,开始试验。

表1 试验工况设置
Tab. 1 Experimental setup

工况 编号	泄流槽设计			泄流槽开挖示意
	深度 H/cm	宽度 B/cm	位置	
1	0	0	中间	
2	5	3	中间	
3	10	3	中间	
4	5	6	中间	
5	5	9	中间	
6	5	3	一侧	

注: 1、2、3组控制变量为 H ; 2、4、5组控制变量为 B ; 2、6组对比位置。

2 试验结果

2.1 溃坝过程分析

基于不同工况下的大量试验观测结果,可将堰塞坝冲刷溃决过程划分成4个阶段:过流孕育阶段、溯源侵蚀阶段、溃决发展阶段及河床再平衡阶段。

1)过流孕育阶段从上游湖水进入泄流槽为起始,到泄流槽全线过流为结束。如图4所示,上游库区因恒定的入流量输入,库容不断增加,水位不断上涨,在势能的驱动下,水流缓慢地进入泄流槽底坎,逐步向下游推进,直至整个泄流槽连通。此外,坝趾附近有明显渗流,夹带细颗粒流出。在水位上升过程中,下游坡面的渗流溢出点不断上移,表明浸润线在逐渐上升,渗流量也随之增加。

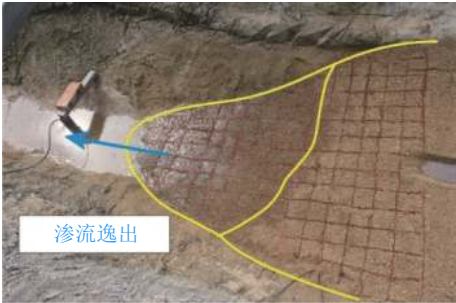


图4 下游坝面渗流情况

Fig. 4 Seepage flow at downstream dam surface

2)溯源侵蚀阶段以下游坡面侵蚀为起始,到上游坝坡开始侵蚀为结束。如图5所示,水流通过泄流槽后在下游坡面处发生加速,增大的流速增强了水流的挟沙能力,坡顶下游端(A点)首先受到冲蚀,下游坡面斑驳,形成多条沟壑。侵蚀速率在下游坝坡上沿水流方向递减,这个现象与Zhou等^[19]在试验中的结论一致。侵蚀点随着侵蚀的发展呈不断向上游方向移动的趋势,即溯源侵蚀现象。陡坎(侵蚀点)上游

以底部下切为主,总侵蚀量较小,流态稳定。陡坎(侵蚀点)下游水流湍急、侵蚀能力变强,高速水流卷起细颗粒和部分粗颗粒向下游输移,泄流槽底部冲刷下切的同时侧壁的坡脚被掏蚀;由于坝体物质黏性不高,泄流槽侧向斜坡容易失稳,不断出现小规模坍塌。随着持续的水流侵蚀,陡坎不断地向上游推进,直到侵蚀点推移至上游坡顶B点,整个坝体被贯穿。

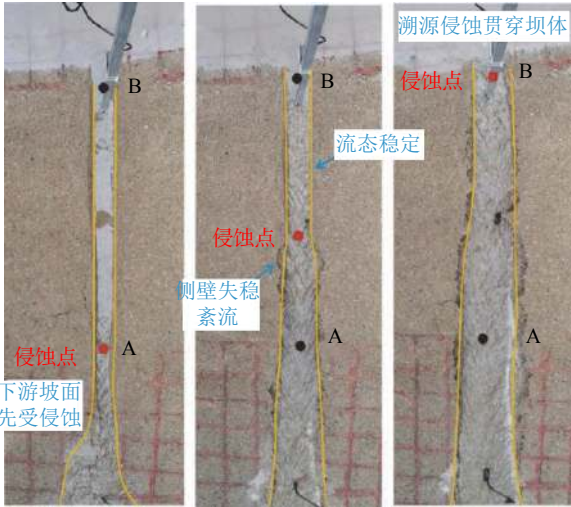


图 5 溯源侵蚀过程

Fig. 5 Process of traceability erosion

由于试验规模不大,根据相似比换算下来的陡坎高度较小,故“陡坎”呈现并不明显,而是以急陡坡的形式表征。但在实际发生的堰塞湖溃决现场,其跌坎发育突出,并常出现多级陡坎。陡坎上游冲刷缓慢,下游泄流槽下切和侧蚀都较突出,泄流槽扩展现象非常明显;泄流槽断面的变化使溃口的形状近似于上窄下宽的“喇叭形”。

3)溃决发展阶段以上游坝坡开始侵蚀为起始,到溃口形态基本不再变化为结束,是溃口快速扩展、溃决流量最大的阶段。当溯源冲刷的陡坎追溯到上游坡顶B点,整个坝体被贯穿,泄流槽连通为整体,水流流速和流量突然增大。产生此现象主要是由于在侵蚀点到达上游坝顶之前,泄流槽上游断面对水流起到控制作用,流量增加缓慢;当上游断面受到侵蚀,整个溃决过程变得不可控,故水流流速与流量显著增大。在此阶段,水流冲刷能力强,泄流槽被水流快速下切,流深和流速都随之增加。流量进一步增加也促进了侵蚀能力的增强,反过来导致溃口进一步扩展。这个阶段,由于水流的侧蚀作用,泄流槽侧壁出现频繁的大范围、大体量滑塌,坍塌下来的泥沙迅速被水流冲向下游,致使溃口快速拓宽。在溃口急剧拓展的过程中,出现了洪峰流量,之后由于水位的大幅降低,下泄流量逐步消减,溃口发展速度减缓,最终逐步趋于稳定。

溃决发展阶段,较大的水流量涌进溃口,由于过水断面被束窄,水流对泄流槽入口的坡脚冲刷掏蚀导致泄流槽上游段展宽,形成的流道形态呈中间窄、两头宽的哑铃形,控制断面在泄流槽中段。

4)河床再平衡阶段(图6),即溃口形态不再变化,坝体趋于稳定。在溃决发展阶段结束的很长一段时间内,河床上仍进行着泥沙输移。少量的细小颗粒在水流的带动下做推移质运动,坝前水位仍在减小,但减小的幅度肉眼难以观察。细小颗粒被携带运输后,粗颗粒在河床表面形成粗化层,保护河床不被冲刷。当水流的冲刷能力和粗化层的抗冲刷能力相当,泄流槽达到冲淤平衡,坝体最终稳定,溃决过程结束。

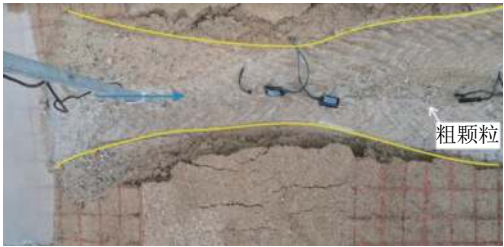


图 6 河床再平衡阶段

Fig. 6 Riverbed rebalance stage

金沙江白格“11·3”堰塞体溃决保留了详细的现场观测记录和视频资料^[26],和本次试验溃决过程所体现的4个阶段相一致。

以第2组试验 $H=5\text{ cm}$ 、 $B=3\text{ cm}$ 的流量过程为例,对溃决过程做进一步的说明。如图7所示:蓄水时期,上游水位不断上涨,水位达到一定高度时,渗透流量稳定在 0.5 L/s 左右。溃决过程中,当出库流量超过入库流量 1.3 L/s 时,出现了最大水位,此后水位回落,最终趋于定值。如前所述,溯源侵蚀阶段结束后,由于泄流槽底部连成顺直的斜坡道,流量会迅速增加,溃决加速;溃决发展阶段,溃决流量值有波动,对应

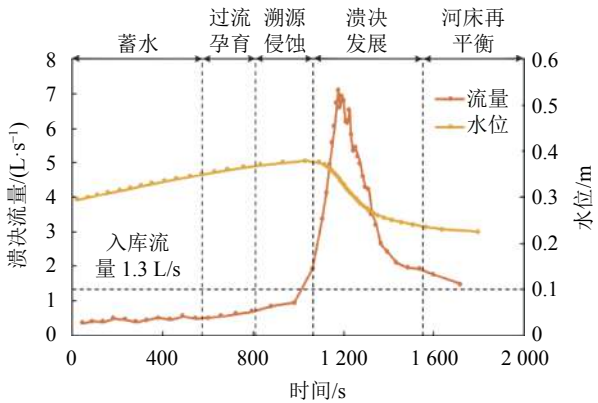
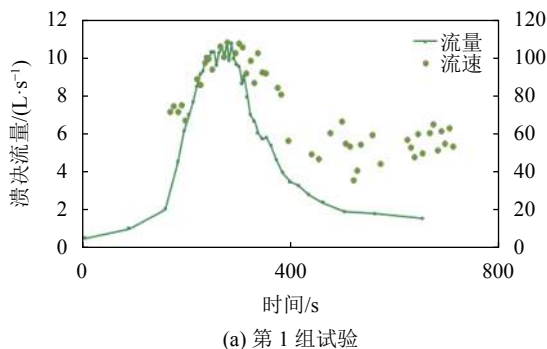


图 7 溃决过程中的上游库水位变化情况和溃决流量过程
Fig. 7 Change of upstream reservoir water level and the process of dam-break flow in the process of dam breaching

试验过程中侧壁坍塌现象,较大的水流量冲刷掏蚀泄流槽侧壁坡脚,导致侧壁滑塌;滑入流道中的堆积物阻碍了水流,流量骤减。随着堆积物在水流中的推移,堰塞坝侧壁展宽,流量突增,即体现为图7中的流量值波动。溃决过程结束后,上游水位和残留坝体高度相符,溃决流量和入库流量相一致。



2.2 流速和坝体含水率

流速在一定程度上表征水流的冲刷能力,图8为第1、5组试验测得的溃口流速变化过程,因其现象明显,故不再展示其他组别。由图8可知,流速和流量同步变化,总体上呈先增加,在溃决发展阶段达到最大值,然后开始减小,最终达到相对稳定的状态。

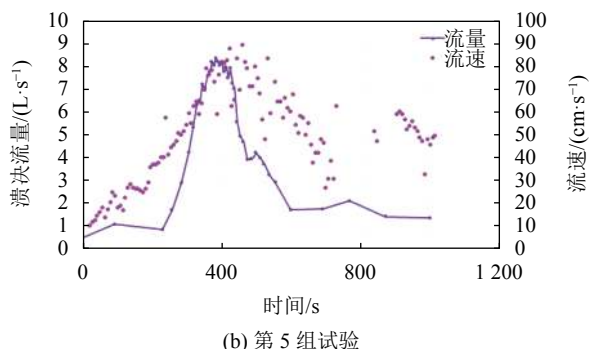


图 8 第1组与第5组试验溃决流量变化过程

Fig. 8 Change process of dam-break flow in the test 1 and test 5

在整个蓄水和溃决过程用水分计测量堰塞体不同部位的含水率,选取一组典型的含水率监测值进行说明。图9为第4组试验堰塞体不同监测部位含水率随时间的变化过程,1~6为监测点编号。16点43分,堰塞湖开始蓄水,上游蓄水浸润堰塞坝,不断渗透逐渐饱和坝体。坝体内部的初始含水率在13%左右,监

测部位通过渗流时,含水率短时间内迅速增长,土体达到饱和状态。如图9所示:监测点6的含水率增长早于监测点5和4,监测点5含水率增长早于监测点3和1;表明坝体材料上游比下游先饱和,低位置堰塞坝土体比高位置土先饱和,揭示了浸润线呈迎水面向背水面推移,底层向顶层推移的趋势。

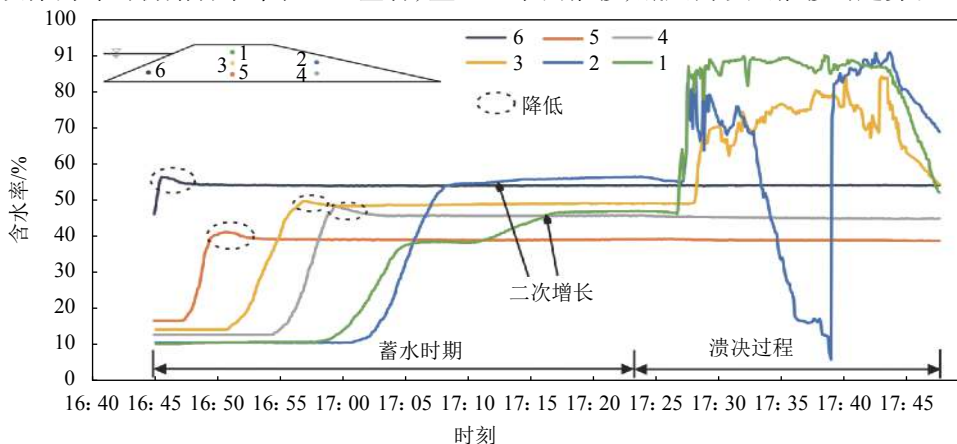


图 9 蓄水和溃决过程中监测点含水率的变化

Fig. 9 Change of water content at the test point during impoundment and dam breaching

由图9可知:含水率增长后略微降低,随即保持不变,这是因为堰塞坝的堆积物质松散,在渗流到达后,含水率显著增加;但受静水压力作用,土体被压实,内部空隙减少,空隙中水分随之流失,含水率减少;土体压实后,含水率保持不变。图9中监测点1和2含水率增长后出现二次增长,是因为堰塞坝体发生内部侵蚀,渗流带走部分细颗粒,内部空隙增加,含水率随之增长;且测点1和2传感器埋置在坝顶表面和下游面附近,位于渗流逸出位置,极易发生渗流潜

蚀破坏。

冲刷溃决前整个坝体处于饱和状态。17点23分,堰塞湖开始溃决,当坝体冲蚀发展到水分仪所在位置,水分仪暴露在流水中,含水率接近100%。图9中:测点1、2、3传感器依次被冲出,再次说明坝体侵蚀是从坝顶开始,水流漫过坝顶后先在坝体背水坡发生侵蚀,侵蚀点从背水坡向上游移动;测点4、5、6传感器数据不变,表明其一直埋置在堰塞坝体中,即残留坝体高度大于10 cm小于20 cm。

3 泄流槽的设置对溃决过程的影响分析

堰塞坝冲刷溃决是一个多过程的复杂物理现象,多种影响因素相互作用,最终决定了堰塞坝溃决流量、溃决时长和溃口形态等。开挖泄流槽作为一种处置堰塞湖的工程措施,能有效干预堰塞坝的溃决,降低溃坝的洪峰流量。作者通过探索泄流槽的开挖位置、深度、宽度3种因素对溃决过程的影响,从而对泄流槽的优化设计提出建议。

3.1 开槽位置对溃决过程的影响

堰塞体由滑坡、泥石流从一定高度俯冲而下,堆积河道形成,由于未经碾压,坝体材料较为松散,易发生沉降。试验中用的砂土未经压实,孔隙率大,密实度小,结构不稳定,在水流的浸润作用下,砂土材料含水量增加,受静水压力作用,土体被压实,产生沉降。由于水槽内沟谷地形的限制,坝体两侧的填土少,中间填土多,导致坝体中部沉降量较两侧更为突出,因此,在水位上升过程中,坝体中部逐渐凹陷,不均匀沉降导致坝顶出现沉降裂缝,如图10所示。

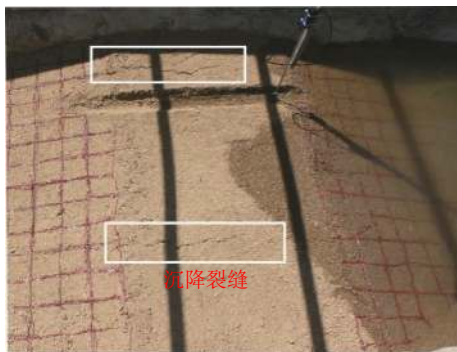
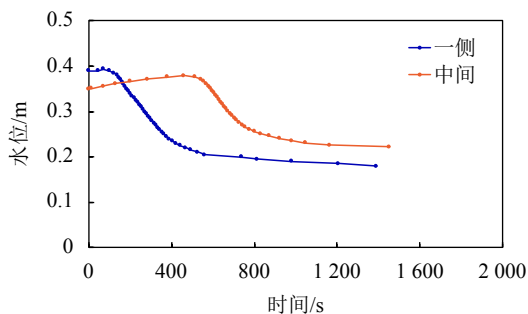


图10 坝顶出现沉降裂缝

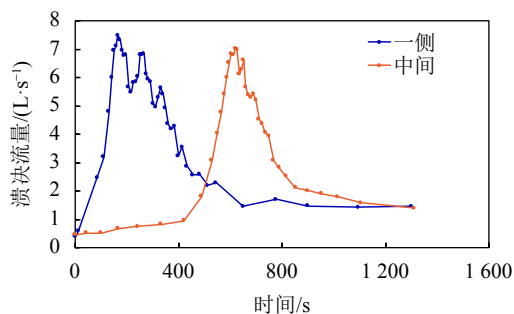
Fig. 10 Settlement cracks on the crest of the dam

图11为第2、6组试验的库区水位变化过程和溃决流量过程。试验坝泄流槽尺寸均为 $H = 5\text{ cm}$ 、 $B = 3\text{ cm}$,第2组试验开槽位置在坝体中部,起始过流水位为 0.35 m ;第6组试验开槽位置在坝体一侧,起始过流水位为 0.39 m 。尽管泄流槽尺寸相同,但受不均匀沉降影响,开在中间的泄流槽底坎较开在一侧的泄流槽底坎更低,故在更低的水位开始过流。

第6组试验出现了非预期情况(图12)。泄流槽开始过流后,初期泄流效率低,上游水位持续上涨,乃至高出了坝中部的坝顶高程,坝中间位置同时开始过流。侧边泄流槽发育较为完善,坝中间的过流不再形成新流道,而是因势利导在下游坡顶附近汇入侧边泄流槽,形成“Y”字分岔型流道。“Y”字流道夹角的沙堆被水流侵蚀削减,经历多次滑塌后,沙堆范围不断缩小最终瓦解。图11的溃决流量曲线出现多个次级“峰值流量”的情况即对应此现象:“Y”字流道



(a) 不同开槽位置的库区水位变化过程



(b) 不同开槽位置的溃决流量过程

图11 不同开槽位置的库区水位变化过程及溃决流量过程

Fig. 11 Change of upstream reservoir water level and the process of dam-break flow in the process of dam breaching for the discharge groove at different location

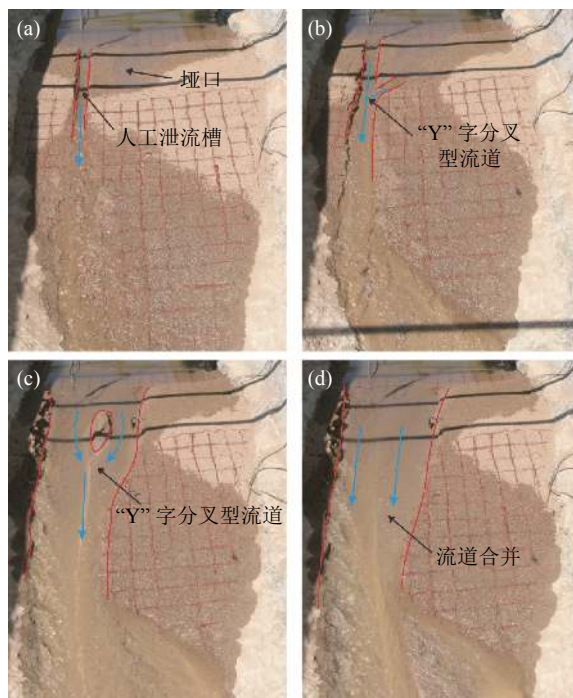


图12 泄流槽开在一侧的试验溃决过程

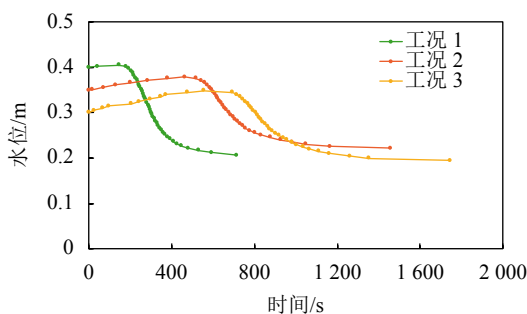
Fig. 12 Dam breaching process for the discharge groove setting at one side

夹角的沙堆不断崩塌,崩塌的颗粒又被水流冲走,过流断面经历了先阻塞后扩充的变化,使得下泄流量

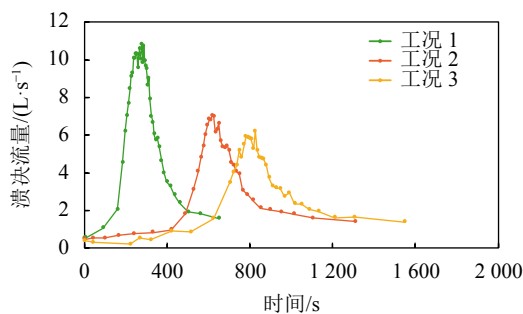
突然减小又突然增大,因而出现了锯齿状的曲线。第6组试验相当于2个流道同时扩展,溃决速度加快,因而比第2组溃决流量大,峰现时间提前。

3.2 开槽深度对溃决过程的影响

泄流槽的开挖降低了坝体最低高程,泄流槽的开挖深度决定了堰塞坝的最小坝高,这往往决定了堰塞湖的初始库容和水力势能。图13(a)为第1、2、3组试验的库区水位变化过程,图13(b)为第1、2、3组试验的溃决流量过程,其中:第1组没有开挖泄流槽,堰塞坝自然溢流;2、3组试验的泄流槽深度分别为5、10 cm。



(a) 不同开槽深度的库区水位变化过程



(b) 不同开槽深度的溃决流量过程

图 13 不同开槽深度的库区水位变化过程及溃决流量过程
Fig. 13 Change of upstream reservoir water level and the process of dam-break flow in the process of dam breaching for the discharge groove at different depth

从图13(a)可以看出:3组试验从不同的水位高开始溢流,初始溢流水位分别为0.40、0.35、0.30 m;3组水位都经历了先增涨后消减的过程,最终趋于不变;第1、2、3组试验最高水位分别为0.41、0.38、0.35 m,随着泄流槽开挖深度的增加,最高水位相应减小。

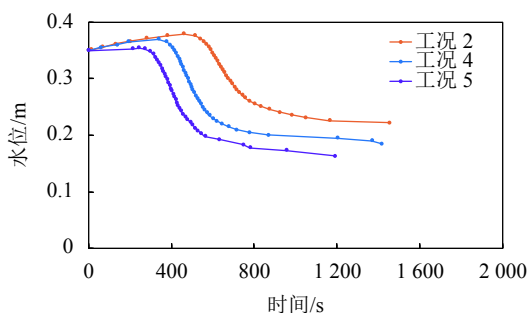
从图13(b)可以看出:第1组的溃决流量随时间增加后迅速减小,曲线呈“高瘦型”;第2、3组的溃决流量随时间增加后减小得更缓慢,曲线呈“矮胖型”;开挖泄流槽会降低峰值流量,延迟峰现时间,坦化溃决流量过程线。第1、2、3组试验的洪水峰值流量分别为10.8、7.0、6.2 L/s,峰现时间分别为278、619、826 s;随着泄流槽开挖深度的增加,溃决流量相应减小,洪

峰流量出现时间越晚。

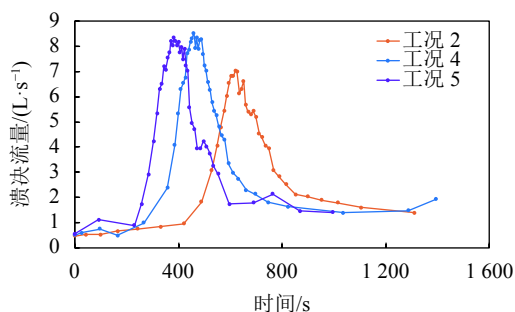
开挖泄流槽降低了初始过流水位,堰塞湖库水提前下泄,相应地,堰塞湖蓄水量会大幅减小,下泄流量随之减小。溃决初期,泄流槽产生溯源冲刷,逐渐拓展形成与下游河床衔接的斜坡道;当泄流槽开挖得越深,斜坡道上游断面的底高程越小,斜坡道的水力坡降越小,水流流速也越小,冲刷能力弱,坝体溃决过程较慢,峰值流量到达时间延迟。

3.3 开槽宽度对溃决过程的影响

泄流槽的宽度影响了初期排泄效率,导致溃口流量、溃口演化等方面表现出明显差异。图14(a)为第2、4、5组试验的库区水位变化过程,图14(b)为第2、4、5组试验的溃决流量过程;3组试验的泄流槽宽度分别为3、6、9 cm,泄流槽深度均为5 cm。



(a) 不同开槽宽度的库区水位变化过程



(b) 不同开槽宽度的溃决流量过程

图 14 不同开槽宽度的库区水位变化过程及溃决流量过程
Fig. 14 Change of upstream reservoir water level and the process of dam-break flow in the process of dam breaching for the discharge groove at different width

3组试验从相同水位0.35 m开始过流,第2、4、5组最高水位分别为0.38、0.37、0.35 m,峰现时间分别为619、458、382 s。根据结果可以发现:泄流槽开挖得越窄,水流受到泄流槽边壁的限制作用越强,泄流量增加缓慢,峰值流量到达时间延迟;同时,因为初期泄流量小,上游水位持续增高,最高水位也越大。

泄流槽的开挖宽度影响着初期泄流效率,进而从一个初始状态影响到后续的动态演变过程,其带来的影响是复杂的、两面性的。泄流槽开挖越窄,初

期泄流效率越低,这将导致水位持续上升,最高水位更大;泄流槽开挖越宽,泄流槽对过流的引导和限制作用减弱。因此,泄流槽开挖宽度应综合考虑洪峰流量、残留坝体高度等因素,选择一个综合效益更好的泄流槽宽度。

由14(a)可知:第2、4、5组试验的溃后水位分别为0.22、0.18、0.16 m,溃后水位越高,表明堰塞体残余坝高越大,堰塞湖在溃决稳定后仍有较大的拦蓄水量,隐藏着较大风险。从预防堰塞湖二次溃决风险的角度考虑, $B=3$ cm具有较大的隐患。第4、5组试验的洪水峰值流量分别为8.3、8.5 L/s,2组数据相差不大,考虑开挖量和经济效益,选 $B=6$ cm的泄流槽具有兼顾降低二次溃决风险和减小溃决流量的综合效益。

3.4 泄流槽优化设计建议

试验结果显示,人工开挖泄流槽后堰塞坝的溃坝洪峰流量相比自然溃决减少了21%~43%,表明开挖泄流槽对于降低堰塞湖的溃决风险是可行的。泄流槽的开挖位置及形状尺寸对堰塞坝溃坝过程起着至关重要的作用,是泄流槽优化设计中需要重点考虑的因素。

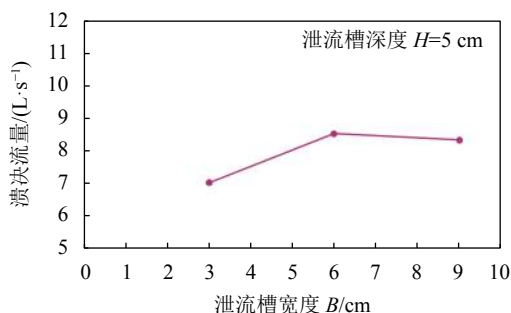
1) 泄流槽位置的选择

试验中,泄流槽设在一侧的试验工况忽略了水槽沟谷地形的特质,没有考虑不均匀沉降带来的影响,导致水流没有按照预期设置的泄流槽发展;泄流槽设在中间的试验工况利用水槽天然地形的优势,将泄流槽设置在坝体中部凹陷处,在相同的开挖量下,泄流量减小,溃决时长更短,大大降低了堰塞湖的溃决风险。在堰塞湖灾害的现场应急处置工作中,泄流槽位置的选择要因地制宜,最好选择在坝顶高程最低的垭口。通常情况下,堰塞坝地形起伏大,往往存在一个相对高程较低的垭口,适宜作为泄流槽的进口位置^[27]。对于高速滑坡-堰塞坝,滑坡体俯冲而下,高速撞击对岸山体后逆坡爬高,最终折返回河道,滑坡体主要在对岸一侧堆积,因而垭口一般在滑坡一侧;对于低速滑坡-堰塞坝,滑坡体主要在本岸一侧堆积,垭口一般在对岸。例如:白格“10·10”堰塞湖为高速滑坡形成,天然泄流槽位于本岸坡脚^[28];白格“11·3”堰塞体主要堆积在“10·10”堰塞体自然溢流后形成的流道中,是堆积体厚度相对较薄的部位,第2次溢流很可能发生在此处。因此,将引流槽布置于此,以减小洪峰流量^[28]。

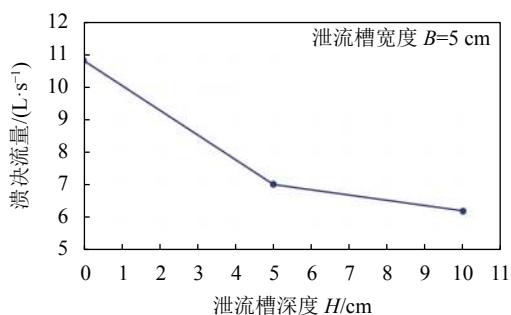
2) 泄流槽的尺寸设计

泄流槽尺寸的选择直接关系到堰塞湖的泄流能力。实际发生的堰塞湖在应急处置过程中,泄流槽的开挖受时间和施工条件限制,应选取开挖量尽可能小的断面尺寸,并保证具有一定的初始过流能力,以

使在水流冲刷作用下,不断深切拓宽,加快泄流速度,尽量提前降低库水位;同时,也要防止冲刷过快、后期流量失控而导致堰塞坝整体溃决^[29-30]。为便于施工,实际抢险中泄流槽的断面形式大多采用梯形,泄流槽的底宽受开挖机械性能的限制,一般取为定值(不同施工机械选取的底宽略有不同,如白格堰塞湖应急泄流槽底宽为3 m^[28])。对比不同工况下的溃决流量,如图15所示。研究表明,加大泄流槽深度对降低洪峰流量有显著作用,泄流槽宽度对洪峰的影响相对偏小,且现阶段最优宽度尚难估定。因此,建议在开挖量相同时,优先考虑加大泄流槽深度,最大限度地降低堰塞湖水位。然而,增大开挖深度必然会导致开挖量的急剧增加;实际抢险过程中,泄流槽深度的确定需要综合考虑堰塞湖冲刷溃决风险情况及有效施工时间、功效等,如:白格堰塞湖应急抢险过程中,最终确定泄流槽的深度为13 m。



(a) 不同开槽宽度的溃决流量对比



(b) 不同开槽深度的溃决流量对比

图 15 不同工况溃决流量对比

Fig. 15 Comparison of dam-break flow under different conditions

堰塞坝的物质组成和结构与形成堰塞坝的岩土体材料特性和运动过程密切相关,某些堰塞坝坝体可能并非均匀的细颗粒材料,如唐家山堰塞坝。在此需要强调,所给出建议仅适用于类似于白格的坝体结构均匀、坝体材料以细颗粒材料为主的堰塞坝。

4 结论

以2018年金沙江白格滑坡-堰塞湖灾害为研究对象,开展堰塞坝溃决物理模型试验,研究了不同泄

流槽的位置、初始深度和初始宽度对堰塞坝溃决的影响, 以期对堰塞湖应急处置提供科学依据。试验结果表明溃决过程包括4个阶段: 过流孕育阶段、溯源侵蚀阶段、溃决发展阶段和河床再平衡阶段。当泄流槽全线过流时, 从下游坡面开始发生溯源侵蚀, 下泄流量逐渐增大, 溃口形状发展成上窄下宽的“喇叭形”。当溯源冲刷的陡坎追溯到上游坡顶, 泄流槽进口断面在侵蚀作用下突然拓宽, 泄流槽将连通形成底坡 $i>0$ 的斜坡道, 进而导致水流流速和流量突然增大, 溃口形态转变为中间窄两头宽的“哑铃型”, 堰塞坝进入溃决快速发展的阶段, 直至下泄流量逐渐恢复至上游来流水平, 溃口形态不再变化为止。

坝体内土壤含水率变化过程间接反映了坝体的渗流过程。在堰塞坝溃决前, 堰塞坝土料处于饱和状态, 越靠近上游和高程越低的位置更快饱和。土体饱和后的含水率上升现象揭示了坝体内部的渗流破坏和细颗粒流失, 但漫顶仍是导致堰塞坝溃决的主要原因。

开挖泄流槽是堰塞湖应急处置最常用的工程措施, 作者进一步探究了泄流槽开挖位置、开挖深度和宽度对溃决过程的影响。结果表明: 当泄流槽开挖宽度不变, 深度增大时, 洪峰流量降低, 峰现时间延迟, 溃决流量过程线坦化; 泄流槽开挖深度相同时, 随宽度增大峰现时间延迟。据此提出了建议: 泄流槽位置宜布置在坝顶高程最低的垭口, 以减小峰值流量, 缩短溃决历时; 泄流槽断面面积相同的时候, 优先加大泄流槽深度, 最大限度地降低堰塞湖水位。

参考文献:

- [1] Chen Xiaoqing, Cui Peng, Zhao Wanyu, et al. A discussion emergency treatment of dammed lake caused by “5.12” Wenchuan Earthquake[J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28(3): 350–357. [陈晓清, 崔鹏, 赵王玉, 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.]
- [2] Li H B, Qi S C, Chen H, 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
- [3] Wang Lin, Li Shouyi, Yu Mu, et al. Key techniques for the emergency disposal of Hongshiyan landslide dam[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2015, 13(4): 284–289. [王琳, 李守义, 于沭, 等. 红石岩堰塞湖应急处置的关键技术[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2015, 13(4): 284–289.]
- [4] Jin Xingping. Reviews and reflections on emergency response countermeasures for barrier lakes in Jinsha River and Yarlung Zangbo River[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(3): 5–9. [金兴平. 金沙江雅鲁藏布江堰塞湖应急处置工作实践与思考[J]. *人民长江*, 2019, 50(3): 5–9.]
- [5] Cui Peng, Guo Jian. Evolution models, risk prevention and control countermeasures of the valley disaster chain[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(3): 1–14. [崔鹏, 郭剑. 沟谷灾害链演化模式与风险防控对策[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(3): 1–14.]
- [6] Deng Jianhui, Gao Yunjian, Yu Zhiqiu, et al. Analysis on the formation mechanism and process of Baige landslides damming the upper reach of Jinsha River, China[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(1): 9–16. [邓建辉, 高云建, 余志球, 等. 堰塞金沙江上游的白格滑坡形成机制与过程分析[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(1): 9–16.]
- [7] Wang Lichao, Wen Mingsheng, Feng Zhen, et al. Researches on the Baige landslide at Jinshajiang River, Tibet, China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(1): 1–9. [王立朝, 温铭生, 冯振, 等. 中国西藏金沙江白格滑坡灾害研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(1): 1–9.]
- [8] Fan X M, Zhan W W, Dong X J, et al. Analyzing successive landslide dam formation by different triggering mechanisms: The case of the Tangjiawan landslide, Sichuan, China[J]. *Engineering Geology*, 2018, 243: 128–144.
- [9] Parvaiz I, Champatiray P K, Bhat F A, et al. Earthquake-induced landslide dam in the Kashmir Himalayas[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(2): 655–660.
- [10] Costa J E, Schuster R L. Documented historical landslide dams from around the world[R]. Vancouver: US Geological Survey, 1991: 91–239.
- [11] Shan Yibo, Chen Shengshui, Zhong Qiming. A rapid evaluation method of landslide dam stability[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(9): 1847–1859. [单熠博, 陈生水, 钟启明. 堰塞体稳定性快速评价方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(9): 1847–1859.]
- [12] Nian Tingkai, Wu Hao, Chen Guangqi, et al. Research progress on stability evaluation method and disaster chain effect of landslide dam[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(8): 1796–1812. [年廷凯, 吴昊, 陈光齐, 等. 堰塞坝稳定性评价方法及灾害链效应研究进展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(8): 1796–1812.]
- [13] Shi Zhenming, Ma Xiaolong, Peng Ming, 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. [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.]
- [14] Zhong Q M, Chen S S, Mei S A, et al. Numerical simulation of landslide dam breaching due to overtopping[J]. *Land-*

- slides,2018,15(6):1183–1192.
- [15] Zhang L M,Xiao T,He J,et al.Erosion-based analysis of breaching of Baige landslide dams on the Jinsha River, China,in 2018[J].*Landslides*,2019,16(10):1965–1979.
- [16] 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 Science*,2010,10(109):933–946.
- [17] Li Xiangnan,Chen Zuyu.Comparison of two models for back analysis of dam breach of Tangjiashan Barrier Lake[J].*Advances in Science and Technology of Water Resources*,2017,37(2):20–26[李相南,陈祖煜.两种溃坝模型在唐家山堰塞湖溃决模拟中的对比[J].*水利水电科技进步*,2017,37(2):20–26.]
- [18] Wang F,Dai Z,Mitani Y,et al.Experimental study to identify premonitory factors of landslide dam failures[J].*Engineering Geology*,2018,232:123–134.
- [19] Zhou 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.
- [20] Zhou G D,Cui P,Chen H Y,et al.Experimental study on cascading landslide dam failures by upstream flows[J].*Landslides*,2013,10(5):633–643.
- [21] Peng M,Zhang L M.Analysis of human risks due to dam break floods—Part 2:Application to Tangjiashan landslide dam failure[J].*Natural Hazards*,2012,64(2):1899–1923.
- [22] Zhao Wanyu,Chen Xiaoqing,Gao Quan,et al.Experimental study of dam-break of earthquake barrier lake with different cross sections of drainage channel[J].*Journal of Sediment Research*,2011(4):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[J].*泥沙研究*,2011(4):29–37.]
- [23] 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.[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.]
- [24] Shi Zhenming,Zheng Hongchao,Peng Ming,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.[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.]
- [25] Chen Zuyu,Chen Shengshui,Wang Lin,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.[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*,2020,50(6):763–774.]
- [26] Cai Yaojun,Luan Yuesheng,Yang Qigui,et al.Study on structural morphology and dam-break characteristics of Baige barrier dam on Jinsha River[J].*Yangtze River*,2019,50(3):15–22.[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.]
- [27] Zhou Hongwei,Yang Xingguo,Li Hongtao,et al.Risk-elimination techniques and management of earthquake lakes[J].*Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*,2009,41(3):96–101.[周宏伟,杨兴国,李洪涛,等.地震堰塞湖排险技术与治理保护[J].*四川大学学报(工程科学版)*,2009,41(3):96–101.]
- [28] Li Qinjun,Xiong Xinyu.Design of emergency engineering measures for Baige barrier lake[J].*Express Water Resources & Hydropower Information*,2019,40(3):8–10.[李勤军,熊新宇.白格堰塞湖应急处置工程措施方案设计[J].*水利水电快报*,2019,40(3):8–10.]
- [29] Yang Xingguo,Li Haibo,Liao Haimei,et al.Emergency treatment and optimization technology of discharge chute design for landslide-dammed lake[J].*Advanced Engineering Sciences*,2018,50(3):95–104.[杨兴国,李海波,廖海梅,等.滑坡-堰塞湖应急处理与引流泄水优化技术[J].*工程科学与技术*,2018,50(3):95–104.]
- [30] 梁军.地震堰塞湖的形成及其治理方法[M]//宋胜武.汶川大地震工程震害调查分析与研究.北京:科学出版社,2009:1056–1061.

(编辑 李轶楠)

引用格式: Xie Chen,Li Congjiang,Yang Xingguo,et al.Erosion and breach of landslide dam based on physical model tests[J].*Advanced Engineering Sciences*,2021,53(6):43–53.[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.]