

引用格式: 杨蒙, 钟启明, 单熠博, 梅胜尧. 泄流槽断面型式对崩滑堰塞体溃决过程的影响分析[J]. 山地学报, 2022, 40(2): 265-275.

YANG Meng, ZHONG Qiming, SHAN Yibo, MEI Shengyao. Influence of the section type of spillway on the collapse process of landslide dam [J]. Mountain Research, 2022, 40(2): 265-275.

泄流槽断面型式对崩滑堰塞体溃决过程的影响分析

杨蒙¹, 钟启明^{1,2*}, 单熠博¹, 梅胜尧¹

(1. 南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 南京 210024; 2. 水利部水库大坝安全重点实验室, 南京 210029)

摘 要: 崩滑堰塞体可采用开挖泄流槽的方式除险。泄流槽的断面型式影响崩滑堰塞体溃决过程。对于不同类型堰塞体开挖何种型式泄流槽尚无定量性认识。本文采用可考虑堰塞湖的水动力条件、堰塞体的形态和结构材料特征的堰塞体溃决过程数学模型, 以唐家山、小岗剑和白格堰塞体为例, 研究不同的泄流槽断面型式对堰塞体溃决过程的影响。将泄流槽设置成不同的断面形式, 对比不同工况下的溃决过程, 结果表明: (1) 对于堰塞湖库容较大的堰塞体, 开挖泄流槽对堰塞体的溃决过程具有重大影响, 可明显减轻致灾后果, 且随着泄流槽深度的增加, 溃口洪峰流量不断降低, 峰值流量出现时间逐渐滞后; (2) 泄流槽底宽主要影响溃口峰值流量出现时间, 泄流槽底宽越大, 洪峰流量出现时间越早; (3) 泄流槽横断面边坡越陡峭, 洪峰流量越大, 且峰值流量出现时间越早; (4) 泄流槽纵断面底坡的变化对溃决过程的影响较小。另外, 由于考虑了颗粒的分布, 小岗剑堰塞体即使不开挖泄流槽, 在上游水动力条件的作用下不会发生溃决, 但仍存在溃决风险。因此, 在应急抢险中, 可根据当地的实际情况, 选择不同的泄流槽断面型式, 研究成果可为堰塞体应急排险的决策制定提供参考。

关键词: 堰塞体; 泄流槽; 断面型式; 数值模拟; 应急响应

中图分类号:

文献标志码: A

崩滑堰塞体大多形成于交通不便的山区, 并在短时间内发生漫顶溃决^[1]。堰塞体常用的工程除险方式主要包括: 上游来水分流、水泵或虹吸管抽水、修建泄水洞、开挖泄流槽等^[2-4]。其中, 开挖泄流槽的方法被证明是减轻堰塞体溃决灾害最有效的手段^[5]。

高效排泄溃决洪水并减轻对下游造成的灾损是设计泄流槽的重要考虑, 需充分考虑堰塞湖水位上涨速度和施工条件的限制, 以及堰塞体下游河道的过流能力, 对泄流槽断面方案进行优化。2008 年

“5·12”汶川地震形成的 37 处高危堰塞体均采用开挖泄流槽的方式进行除险^[4], 其中唐家山堰塞体的体量最大^[6]。为有效降低唐家山堰塞体高度和上游堰塞湖库容, 2008 年 5 月 26 日开始在堰塞体右侧开挖泄流槽, 挖掘的土石料总量为 13.5 万 m³^[7]。2018 年 10 月 10 日和 11 月 3 日, 在四川省与西藏自治区交界的白格村接连发生两次滑坡, 形成堰塞体堵塞金沙江^[8]。针对第二次白格堰塞体的几何特征以及上游来水量等因素综合考量,

收稿日期 (Received date): 2021-03-09; **改回日期** (Accepted date): 2022-04-06

基金项目 (Foundation item): 国家重点研发计划课题 (2018YFC1508604); 国家自然科学基金联合基金重点项目 (U2040221); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (Y319003, Y320005)。[National Key R&D Program of China (2018YFC1508604), National Natural Science Foundation of China (U2040221), Fundamental Research Funds for Central Public Research Institutes (Y319003, Y320005)]

作者简介 (Biography): 杨蒙 (1996-), 男, 山东东营人, 博士研究生, 主要研究方向: 堰塞体溃决灾害防控方法。[YANG Meng (1996-), male, born in Dongying, Shandong province, Ph.D. candidate, specialized in prevention and control method of landslide dam] E-mail: mengyang@nhri.cn

* **通讯作者** (Corresponding author): 钟启明 (1981-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向: 溃坝灾害模拟理论与防控方法。[ZHONG Qiming (1981-), male, Ph.D., senior engineer, specialized in simulation theory and prevention and control method of dam failure disaster] E-mail: qmzhong@nhri.cn

自 2018 年 11 月 8 日开始至 11 月 11 日,对堰塞体进行开挖泄流槽除险^[9]。

一般而言,一个实用高效的泄流槽应具备以下特点:(1)选择堰塞体顶部高程较低处开挖,且泄流槽断面开挖量应较小;(2)堰塞体溃决初期泄流槽能较快下切,保持泄流槽过流量的快速增长,有效降低堰塞湖水位;(3)溃决发展时期,溃口持续下切,但泄流槽侧壁由于洪水淘刷导致的坍塌展宽较小,溃决洪水能在下游河道中演进,溃口流量过程呈“矮胖型”而非“尖峰型”;(4)溃决结束时,溃口下切深度较大,能有效降低堰塞湖库容。

泄流槽的开挖对堰塞体溃决过程影响的相关研究主要基于物理模型试验、理论分析和数值模拟。模型试验一般选用梯形、三角形或复式(上部为梯形,梯形底部接三角形)断面泄流槽,针对试验中溃口流量的增长率以及洪水到达时间对泄流效率进行判断^[10]。离心模型试验可以利用其时空放大效应,对堰塞体漫顶溃决进行复原研究^[11];基于堰塞体三维激光扫描高精度 DEM 模型可以模拟水流在堰塞体上的流动状态^[12]。由于试验环境及设备的不同,试验得到的结果只能在一定程度上反映堰塞体的溃决情况,得到的试验结果也不尽相同。在不同的试验中,不同断面的泄流槽各有优势,难以形成一个基于同一认识下的统一结果。因此,理论分析与数值模拟的方法被广泛应用。

在汶川地震中产生的体量最大的堰塞湖——唐家山堰塞湖,因其具备详细的溃坝信息,而广泛利用理论分析与数值模拟对其进行反演分析。根据唐家山堰塞湖溢流的流量过程曲线^[13]以及应急排险的基础^[14]可以分析不同泄流槽的泄流效率。研究发现,泄流槽的断面形式对过流能力有很大的影响。对于断面面积相等的泄流槽,不同宽度和深度的泄流槽会使其溃口流量过程和溃口发展过程有所差异^[15-16]。增加泄流槽深度可明显提高泄流效率,但堰塞体下游将承受更大的风险;对于同样深度的梯形和复式泄流槽,后者的泄流过程更为平缓,最大洪峰流量减小,出现的时间滞后,堰塞湖下游承受的风险也将降低^[17]。不同梯形泄流槽断面对不同冲蚀性堰塞体的适用性也不尽相同。宽浅断面泄流槽适用于低冲蚀性堰塞体,窄深断面的泄流槽适用于高冲蚀性堰塞体;纵坡较陡峭的泄流槽有利于高冲蚀性、顶部宽大、下游坡平缓的堰塞体^[3]。此外,在保

持开挖量不变的情况下,增加泄流槽两侧开挖坡度,有利于降低溃口峰值流量;增大泄流槽纵坡坡比可提高泄流效率,有效降低溃口峰值流量^[18]。

从模型试验、理论分析和数值模拟的结论可以看出,大多数研究成果建议开挖复式泄流槽断面,但在实际施工过程中,此类泄流槽施工难度较大,不易执行。地质勘察资料表明^[19-20],堰塞体的颗粒分布呈明显的结构性特征,因此采用小尺度物理模型试验和均一化材料的数值分析均无法合理考虑堰塞体的特性。本文基于拥有实测资料的崩滑堰塞体溃决案例,利用堰塞体溃决过程数学模型^[24],基于堰塞体的颗粒分布特征、堰塞湖的水动力条件和堰塞体的形态特征,分别设置堰塞体是否开挖泄流槽,以及开挖不同深度、底宽、横断面和纵断面坡比的泄流槽工况,采用按时间步长迭代的数值计算方法模拟堰塞体溃决时的水土耦合过程,以此来研究不同的泄流槽断面型式对堰塞体溃决过程的影响。

1 崩滑堰塞体漫顶溃决机理及溃决过程数学模型

崩滑堰塞体因其发生区域的地质条件、地貌特征和运动状态的不同,堆积体的颗粒分布特征也存在巨大差异,根据颗粒分布特征可大体分为 3 类^[20-22]:第 1 类,由于岩体深部的滑塌,形成了由底部完整岩层和顶部岩石碎屑和细颗粒土体组成的堰塞体,其结构可由两层或多层组成;第 2 类,由于边坡的崩塌,堰塞体内部由两层组成,其中顶部为较大颗粒的碎石,底部为破碎程度较高的岩石碎屑;第 3 类,滑坡体经过长距离高速移动,滑坡体分解为较为松散的细颗粒,堰塞体由较多的此类细颗粒组成。

近年来,国内外学者对堰塞体的漫顶溃决机理进行了一系列的研究^[23-24],分析了溃口在纵横断面的演化过程,对堰塞体的漫顶溃决过程进行了总结:(1)漫顶水流对堰塞体下游坡面的溯源冲蚀;(2)溯源冲蚀逐渐向上游坝坡发展直至堰塞体顶部,期间堰塞体下游坝坡坡角减小,堰塞体顶部高程变化较小;(3)漫顶水流表现出沿程侵蚀的特征,堰塞体顶部高程快速降低,溃口处会发生较快速的下切和展宽,在溃决过程中还会发生溃口边坡的间歇性失稳(破坏面一般为平面),直至溃口冲蚀结束。不同于均质土坝,在溃决的过程中,堰塞体的下游坝坡坡角

逐渐变小,堰塞体的颗粒分布特征影响了溃口的最终深度。堰塞体漫顶溃决数学模型^[24]基于堰塞体的颗粒分布特征提出,同时考虑了堰塞湖的水动力条件和堰塞体的形态特征,模型由3个部分组成:水动力模块、材料冲蚀模块和溃口发展模块。采用按时间步长迭代的数值计算方法模拟堰塞体溃决时的水土耦合过程,计算流程图如图1所示。

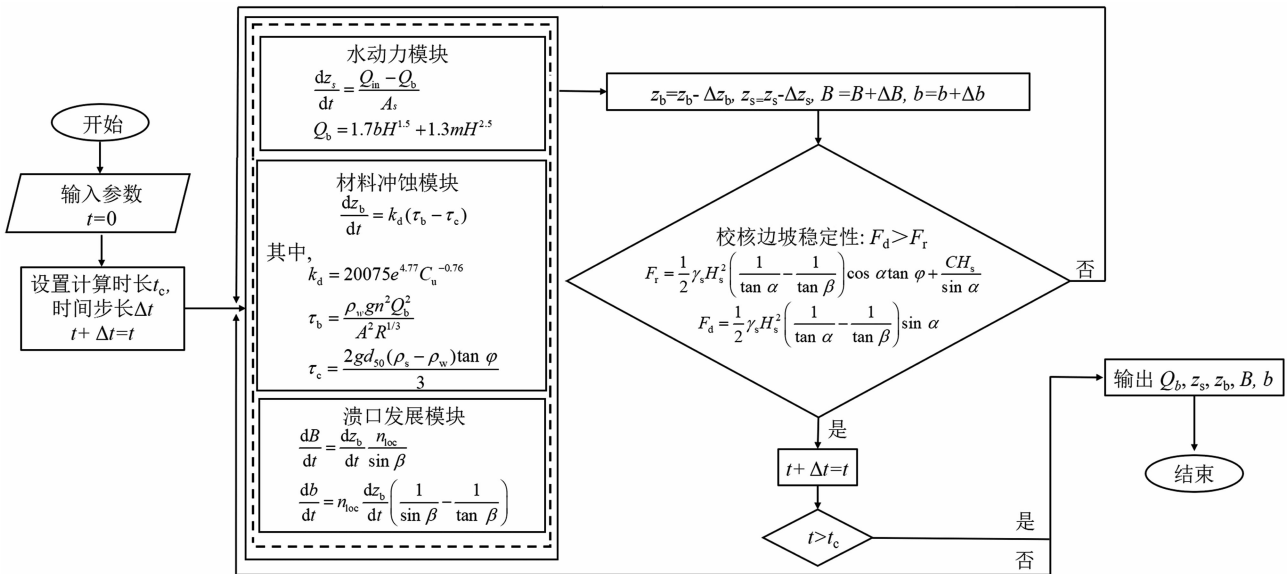
2 泄流槽断面型式对堰塞体溃决过程影响分析

分别选择唐家山、小岗剑和第二次白格^[8,25-26]3个拥有实测溃决过程资料的堰塞体案例,利用上

述数学模型,选择梯形横断面,分别从深度、底宽和边坡坡比3个方面设计泄流槽横断面,另外考虑不同的泄流槽纵坡,综合分析泄流槽断面型式对堰塞体溃决过程的影响,针对不同类型的堰塞体,提出高效的泄流槽断面型式,为堰塞体除险科学决策的制定提供科技支撑。

2.1 堰塞体参数

由地勘资料可以发现,唐家山属于第1类堰塞体,自上而下可以分为3层;小岗剑属于第2类堰塞体,自上而下可以分为2层;第二次白格属于第3类堰塞体,可按照1层处理。3个堰塞体的形态、水动力和力学指标参数取值见表1,各堰塞体分层情况与各层物理力学参数见表2。



注: z_b 为溃口的底部高程, z_s 为堰塞湖水位, t 为设定的计算时间, k_d 为堰塞体冲蚀系数, τ_b 为顶部溃口底床水流剪应力, τ_c 为土颗粒临界剪应力, m 为溃口边坡系数(水平/垂直), H 为堰塞体顶部溃口处水深($H=z_s-z_b$), Q_b 为溃口流量, Q_{in} 为入流量, A_s 为堰塞湖湖面积, B 为溃口顶宽, b 为溃口底宽, n_{loc} 为溃口位置参数($n_{loc}=1$ 表示溃口单侧发展, $n_{loc}=2$ 表示溃口两侧发展), F_d 为驱动力, F_r 为抵抗力, α 为失稳后溃口边坡的坡角, β 为溃口边坡坡角, φ 为土体的内摩擦角, C 为土体的黏聚力, γ_s 为土体的容重, H_s 为溃口边坡高度。

图1 崩滑堰塞体溃决过程数值模拟计算流程图

Fig. 1 Flow chart of the numerical model for landslide dam breaching

表1 堰塞体形态、水动力和力学指标参数取值

Tab. 1 Morphology, hydrodynamic, and mechanical parameters of the landslide dams

堰塞体 名称	高度/m	顶宽/m	长度/m	上游坡比 (垂直/水平)	下游坡比 (垂直/水平)	上游来流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)
唐家山	103	300	612	1:2.8	1:4.2	80	30	35
小岗剑	72	80	300	1:2.8	1:1.7	15	42	35
白格	96	270	600	1:2.7	1:5.5	700	3	38

表 2 堰塞体分层情况与各层物理力学参数取值

Tab.2 Stratification of the landslide dams and the physical/mechanical parameters of each layer

堰塞体 名称	分层	厚度/m	孔隙率	d ₅₀ /mm	密度/ (kg·m ⁻³)	冲蚀系数/ (mm ³ ·N ⁻¹ ·s ⁻¹)	临界切 应力/Pa
唐家山	1	20	0.87	10	1825	1770	740
	2	20	0.75	20	2216	700	1700
	3	63	0.59	60	2408	100	5000
小岗剑	1	32	0.94	60	2045	850	1168
	2	40	0.70	18	1813	300	200
白格	1	96	0.50	30	1584	1500	2380

2.2 泄流槽断面型式设置

对于唐家山、小岗剑、白格 3 个堰塞体,为了便于施工,均选择梯形横断面的泄流槽。工况 1 为实际施工情况,为与开挖泄流槽效果进行对比,工况 2 设置为不开挖泄流槽。此外,还设置了不同泄流槽深度(工况 3、4)和底宽(工况 5、6),不同泄流槽横断面边坡坡比(工况 7、8)和纵断面底坡坡比(工况 9、10)等工况。各个堰塞体的泄流槽断面型式参数见表 3。

2.3 模型合理性验证

在进行不同泄流槽断面型式对堰塞体溃决过程影响分析之前,先对实际工况下模型计算结果的合理性进行验证。选择反映堰塞体溃决特征的主要参数,如溃口峰值流量、溃口峰值流量出现时间、溃口最终顶宽、溃口最终底宽、下泄水流量及堰塞体残留高度,将唐家山、小岗剑、白格等 3 个堰塞体的模型计算结果与实测值进行统计,各参数的对比情况见表 4。

由表 4 的计算结果可见,对于唐家山堰塞体,各溃决参数的相对误差在 ±15% 以内,较好地体现了其溃决过程;对于小岗剑堰塞体,各溃决参数的相对误差在 ±50% 以内,其中误差较大的是溃口的顶宽和底宽 2 个参数,其他溃决参数的相对误差在 ±25% 以内,究其原因,与材料的复杂冲蚀特性相关;对于白格堰塞体,各溃决参数的相对误差在 ±25% 以内,也较好地反映了溃口的流量过程与形态演化规律。由于堰塞体复杂的结构特征和材料特性,一般对其溃决参数的预测精度都低于相同体量的土石坝,表 4 的对比结果显示,本文采用的数学模型可较好地反映堰塞体溃决过程。

表 3 不同泄流槽断面型式参数

Tab.3 Morphological parameters of the spillways with

different section types

堰塞体 名称	工况 序号	深度/m	底宽/m	横断面 坡比	纵断面 坡比
唐家山	1	13.00	8.00	1:1.5	1:4.2
	2	—	—	—	—
	3	15.00	8.00	1:1.5	1:4.2
	4	17.00	8.00	1:1.5	1:4.2
	5	13.00	4.00	1:1.5	1:4.2
	6	13.00	16.00	1:1.5	1:4.2
	7	13.00	8.00	1:2.0	1:4.2
	8	13.00	8.00	1:2.5	1:4.2
	9	13.00	8.00	1:1.5	1:3.2
	10	13.00	8.00	1:1.5	1:5.2
小岗剑	1	8.00	30.00	1:2.0	1:1.7
	2	—	—	—	—
	3	9.00	30.00	1:2.0	1:1.7
	4	10.00	30.00	1:2.0	1:1.7
	5	8.00	20.00	1:2.0	1:1.7
	6	8.00	40.00	1:2.0	1:1.7
	7	8.00	30.00	1:2.5	1:1.7
	8	8.00	30.00	1:3.0	1:1.7
	9	8.00	30.00	1:2.0	1:1.5
	10	8.00	30.00	1:2.0	1:1.9
白格	1	13.48	3.00	1:1.3	1:5.5
	2	—	—	—	—
	3	18.48	3.00	1:1.3	1:5.5
	4	23.48	3.00	1:1.3	1:5.5
	5	13.48	1.00	1:1.3	1:5.5
	6	13.48	6.00	1:1.3	1:5.5
	7	13.48	3.00	1:1.6	1:5.5
	8	13.48	3.00	1:1.9	1:5.5
	9	13.48	3.00	1:1.3	1:5.0
	10	13.48	3.00	1:1.3	1:6.0

表 4 堰塞体溃决计算结果与实测值比较

Tab. 4 Comparison of calculated results and measured values of landslide dams

堰塞体名称	数值类别	峰值流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪峰时间/h	溃口顶宽/m	溃口底宽/m	下泄水量/(10^8 m^3)	残余高度/m
唐家山	计算值	6082.41	46.31	185.70	72.75	1.788	65.31
	实测值	6500.00	49.92	186.20	83.80	1.700	60.00
	相对误差	-6.42%	-7.23%	-0.27%	-13.19%	5.18%	8.85%
小岗剑	计算值	2267.00	2.25	210.35	108.74	0.079	46.60
	实测值	3000.00	3.00	142.00	80.00	0.105	40.00
	相对误差	-24.43%	-25.00%	48.13%	35.93%	-24.76%	16.50%
白格	计算值	25032.00	30.41	220.97	88.00	5.153	42.83
	实测值	31000.00	37.25	264.10	107.80	6.870	57.10
	相对误差	-19.25%	-18.36%	-16.33%	-18.37%	-24.99%	-24.99%

2.4 不同泄流槽计算结果对比分析

本节主要利用经过验证的堰塞体溃决模型计算不同泄流槽断面型式(包括不开挖泄流槽)下(工况 2~10)3 个堰塞体的溃决参数,并对比其与实际工况计算结果的差异,分析泄流槽对溃决过程的影响。为了便于比较,对于不开挖泄流槽的工况,计算从水流漫溢过堰塞体顶部开始;对于开挖泄流槽的工况,计算从水位抬升至泄流槽底板开始。选择与表 4 同样的溃决特征参数,对计算结果进行统计分析。不同工况下唐家山、小岗剑、白格 3 个堰塞体的计算结果如表 5、6、7 所示。

由表 5 可见,对于唐家山堰塞体,若不开挖泄流槽(工况 2),溃口峰值流量增加 167.85%,且溃口峰值流量出现时间提前 62.86%,下泄水量增大 56.38%,致灾后果将明显加重,因此开挖泄流槽的作用非常明显。增加泄流槽深度(工况 3、4)可以明显降低溃口峰值流量,迟滞峰值流量出现时间,减小下泄水量,且残留堰塞体高度变化不大(意味着溃决后残留的库容基本相当),能起到明显的减灾效果,因此在条件允许的情况下尽可能开挖深槽。改变泄流槽底宽(工况 5、6)对于唐家山堰塞体溃决过程有一定的影响,但影响程度明显低于泄流槽深度,其影响主要在于溃口峰值流量出现时间,泄流槽底宽越大,洪峰流量出现时间越早。改变泄流槽横断面边坡坡比(工况 7、8)对唐家山堰塞体溃决过程具有一定影响,泄流槽边坡越陡峭,洪峰流量越大,且峰值流量出现时间越早;改变纵断面底坡坡比(工况 9、10)对唐家山堰塞体溃决过程也具有一定影

响,但整体影响较小;对于工况 7~10,由于堰塞体溃决对泄流槽断面坡度的重塑作用较强(横断面溃口边坡失稳和纵断面坡度变缓),初始泄流槽纵横断面坡度对溃决过程的影响相对较小。

由表 6 可以看出,对于小岗剑堰塞体,若不开挖泄流槽(工况 2),堰塞体不会发生溃决,究其原因,应为其结构型式和上层粗大的颗粒抗冲蚀能力较强所致,另外,由于上游来流量较少(仅 $15 \text{ m}^3/\text{s}$),水流的冲蚀能力较弱,因而堰塞体未溃决,但后期如果上游来流突然增加,仍有溃决的风险。与唐家山类似,增加泄流槽深度(工况 3、4)可以明显降低溃口峰值流量,迟滞峰值流量出现时间,减小下泄水量,起到明显的减灾效果。改变泄流槽底宽(工况 5、6)对于小岗剑堰塞体溃决过程的影响较为微弱,主要原因在于上层材料的抗冲蚀能力较强,且堰塞湖的水动力条件较弱。改变泄流槽横断面边坡坡比(工况 7、8)和纵断面底坡坡比(工况 9、10)对小岗剑堰塞体溃决过程的影响与唐家山基本一致,泄流槽横断面边坡越陡峭,洪峰流量越大,且峰值流量出现时间越早;泄流槽纵断面坡度对溃决过程的影响相对较小。

由表 7 可见,对于白格堰塞体,若不开挖泄流槽(工况 2),溃口峰值流量剧烈增大,峰值流量出现时间明显提前,下泄水量大幅增加,致灾后果将明显加重,开挖泄流槽作用明显。与唐家山和小岗剑类似,增加泄流槽深度(工况 3、4)可以明显降低溃口峰值流量,迟滞峰值流量出现时间,减小下泄水量,起到明显的减灾效果。与唐家山类似,改变泄流槽底宽

表 5 唐家山堰塞体计算结果统计
Tab.5 Comparison of calculated results of Tangjiashan landslide dam under different conditions

工况 序号	深度/ m	底宽/ m	横断面 坡比	纵断面 坡比	结果 比较	峰值流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪峰 时间/h	溃口 顶宽/m	溃口 底宽/m	下泄水量/ (10^8 m^3)	残余 高度/m
1	13.0	8.0	1:1.5	1:4.2	实际值	6082.41	46.31	185.77	72.75	1.788	65.31
2	-	-	-	-	计算值	16291.79 (167.85%)	17.20 (-62.86%)	240.92 (29.69%)	88.77 (22.02%)	2.796 (56.38%)	61.49 (-5.85%)
3	15.0	8.0	1:1.5	1:4.2	计算值	4480.04 (-26.34%)	60.23 (30.06%)	175.35 (-5.61%)	65.25 (-10.31%)	1.607 (-10.12%)	66.28 (1.49%)
4	17.0	8.0	1:1.5	1:4.2	计算值	3106.39 (-48.93%)	83.48 (80.26%)	163.59 (-11.94%)	57.18 (-21.40%)	1.419 (-20.64%)	67.51 (3.37%)
5	13.0	4.0	1:1.5	1:4.2	计算值	6152.18 (1.15%)	59.17 (27.77%)	182.57 (-1.72%)	68.17 (-6.30%)	1.802 (0.78%)	64.84 (-0.72%)
6	13.0	16.0	1:1.5	1:4.2	计算值	6160.34 (1.28%)	38.18 (-17.56%)	193.12 (3.96%)	82.32 (13.15%)	1.764 (-1.34%)	66.04 (1.12%)
7	13.0	8.0	1:2.0	1:4.2	计算值	5304.97 (-12.78%)	56.31 (21.59%)	218.14 (17.42%)	76.25 (4.81%)	1.705 (-4.64%)	67.52 (3.38%)
8	13.0	8.0	1:2.5	1:4.2	计算值	4624.93 (-23.96%)	67.07 (44.83%)	247.24 (33.09%)	79.96 (9.91%)	1.625 (-9.12%)	69.54 (6.48%)
9	13.0	8.0	1:1.5	1:3.2	计算值	6528.22 (7.33%)	47.24 (2.01%)	194.12 (4.49%)	78.89 (8.44%)	1.817 (1.62%)	64.56 (-1.15%)
10	13.0	8.0	1:1.5	1:5.2	计算值	5650.15 (-7.11%)	46.62 (0.67%)	178.29 (-4.03%)	67.74 (-6.89%)	1.756 (-1.79%)	66.13 (1.26%)

注:括号内数值为计算值与实际值的相对误差。

表 6 小岗剑堰塞体计算结果统计
Tab.6 Comparison of calculated results of Xiaogangjian landslide dam under different conditions

工况 序号	深度/ m	底宽/ m	横断面 坡比	纵断面 坡比	结果 比较	峰值流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪峰 时间/h	溃口 顶宽/m	溃口 底宽/m	下泄水量/ (10^8 m^3)	残余 高度/m
1	8.0	30.0	1:2.0	1:1.7	实际值	2267.00	2.24	210.35	108.74	0.079	46.60
2	-	-	-	-	计算值	-	-	-	-	-	-
3	9.0	30.0	1:2.0	1:1.7	计算值	1825.75 (-19.46%)	2.73 (21.88%)	202.46 (-3.75%)	102.83 (-5.43%)	0.073 (-7.59%)	47.09 (1.05%)
4	10.0	30.0	1:2.0	1:1.7	计算值	1388.83 (-38.74%)	3.80 (69.64%)	193.10 (-8.20%)	96.25 (-11.49%)	0.068 (-13.92%)	47.78 (2.53%)
5	8.0	20.0	1:2.0	1:1.7	计算值	2284.63 (0.78%)	2.46 (9.82%)	202.66 (-3.66%)	97.89 (-9.98%)	0.080 (1.27%)	45.81 (-1.70%)
6	8.0	40.0	1:2.0	1:1.7	计算值	2216.71 (-2.22%)	2.23 (-0.45%)	217.98 (3.63%)	119.47 (9.87%)	0.077 (-2.53%)	47.37 (1.65%)
7	8.0	30.0	1:2.5	1:1.7	计算值	1704.87 (-24.80%)	2.86 (27.68%)	225.58 (7.24%)	109.85 (1.02%)	0.074 (-6.33%)	48.85 (4.83%)
8	8.0	30.0	1:3.0	1:1.7	计算值	1261.71 (-44.34%)	3.82 (70.54%)	237.90 (13.10%)	110.25 (1.39%)	0.069 (-12.66%)	50.94 (9.31%)
9	8.0	30.0	1:2.0	1:1.5	计算值	2245.55 (-0.95%)	2.38 (6.25%)	213.80 (1.64%)	112.06 (3.05%)	0.079 (0.00%)	46.56 (-0.09%)
10	8.0	30.0	1:2.0	1:1.9	计算值	2276.49 (0.42%)	2.12 (-5.36%)	207.03 (-1.58%)	105.69 (-2.80%)	0.078 (-1.27%)	46.67 (0.15%)

注:括号内数值为计算值与实际值的相对误差。

表 7 白格堰塞体计算结果统计
Tab. 7 Comparison of calculated results of Baige landslide dam under different conditions

工况 序号	深度/ m	底宽/ m	横断面 坡比	纵断面 坡比	结果 比较	峰值流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪峰 时间/h	溃口 顶宽/m	溃口 底宽/m	下泄水量/ (10^8 m^3)	残余 高度/m
1	13.48	3.0	1:1.3	1:5.5	实际值	25 032.00	30.41	220.97	88.00	5.153	42.83
2	-	-	-	-	计算值	81 229.20 (224.50%)	16.26 (-46.53%)	380.99 (72.42%)	138.94 (57.89%)	7.261 (40.91%)	5.33 (-87.56%)
3	18.48	3.0	1:1.3	1:5.5	计算值	13 455.07 (-46.25%)	43.39 (42.68%)	188.41 (-14.74%)	65.25 (-25.85%)	4.014 (-22.10%)	46.74 (9.13%)
4	23.48	3.0	1:1.3	1:5.5	计算值	9151.75 (-63.44%)	52.78 (73.56%)	170.11 (-23.02%)	53.15 (-39.60%)	2.788 (-45.90%)	49.22 (14.92%)
5	13.48	1.0	1:1.3	1:5.5	计算值	26 254.34 (4.88%)	35.75 (17.56%)	221.56 (0.27%)	86.70 (-1.48%)	5.182 (0.56%)	42.06 (-1.80%)
6	13.48	6.0	1:1.3	1:5.5	计算值	24 069.06 (-3.85%)	25.84 (-15.03%)	221.80 (0.38%)	90.80 (3.18%)	5.123 (-0.58%)	43.60 (1.80%)
7	13.48	3.0	1:1.6	1:5.5	计算值	22 993.60 (-8.14%)	31.73 (4.34%)	251.88 (13.99%)	90.18 (2.48%)	5.042 (-2.15%)	45.47 (6.16%)
8	13.48	3.0	1:1.9	1:5.5	计算值	21 257.80 (-15.08%)	32.98 (8.45%)	276.02 (24.91%)	92.49 (5.10%)	4.938 (-4.17%)	47.73 (11.44%)
9	13.48	3.0	1:1.3	1:5.0	计算值	26 407.68 (5.50%)	30.09 (-1.05%)	227.21 (2.82%)	91.72 (4.23%)	5.196 (0.83%)	41.80 (-2.40%)
10	13.48	3.0	1:1.3	1:6.0	计算值	23 842.84 (-4.75%)	30.79 (1.25%)	215.45 (-2.50%)	84.81 (-3.63%)	5.112 (-0.80%)	43.74 (2.12%)

注:括号内数值为计算值与实际值的相对误差。

(工况 5、6)对于白格堰塞体溃决过程影响较小,其影响主要在于溃口峰值流量出现时间,泄流槽底宽越大,洪峰流量出现时间越早。改变泄流槽横断面边坡坡比(工况 7、8)和纵断面底坡坡比(工况 9、10)对白格堰塞体溃决过程的影响与唐家山和小岗剑基本一致。

溃口洪水流量过程是开展洪水演进和致灾后果评价的边界条件,为了更直观地展示堰塞体的溃决过程,图 2 以唐家山堰塞体的溃决过程为例,给出了不同工况下溃口流量过程线。

3 讨论

3.1 有无泄流槽的影响

对于唐家山和白格堰塞体,不开挖泄流槽对堰塞体溃决过程有极大的影响,溃口峰值流量显著增大且峰值流量出现时间提前,对下游造成严重的灾难;其他学者也通过研究获得了类似的认识,认为泄

流槽开挖是减轻堰塞体溃决灾害最有效的手段^[10,18]。小岗剑因其自身的结构形式,上层粗大颗粒的抗冲蚀能力较强,加之上游来流量小的情况,在不开挖泄流槽的情况下未发生溃决,但在流域遭遇暴雨等条件下仍有溃决风险。

3.2 泄流槽开挖深度和底宽影响

在抢险时间允许的条件下,增加泄流槽的开挖深度可以减小堰塞湖的库容,从而产生减轻堰塞体溃决危害的效果。通过对比计算结果发现,增加泄流槽深度使得溃口峰值流量显著减小,且迟滞溃口峰值流量出现时间,能起到明显的减灾效果。另外,增加堰塞体泄流槽的初始底宽,对溃口峰值流量的影响较为微弱,其影响主要在于溃口峰值流量出现时间,即泄流槽底宽越大,峰值流量出现时间越早。因此,在开挖量一定的条件下增加泄流槽深度比增加底宽的减灾效果更明显。

3.3 泄流槽横纵断面坡比的影响

对于 3 类堰塞体,改变横纵断面坡度对溃决过

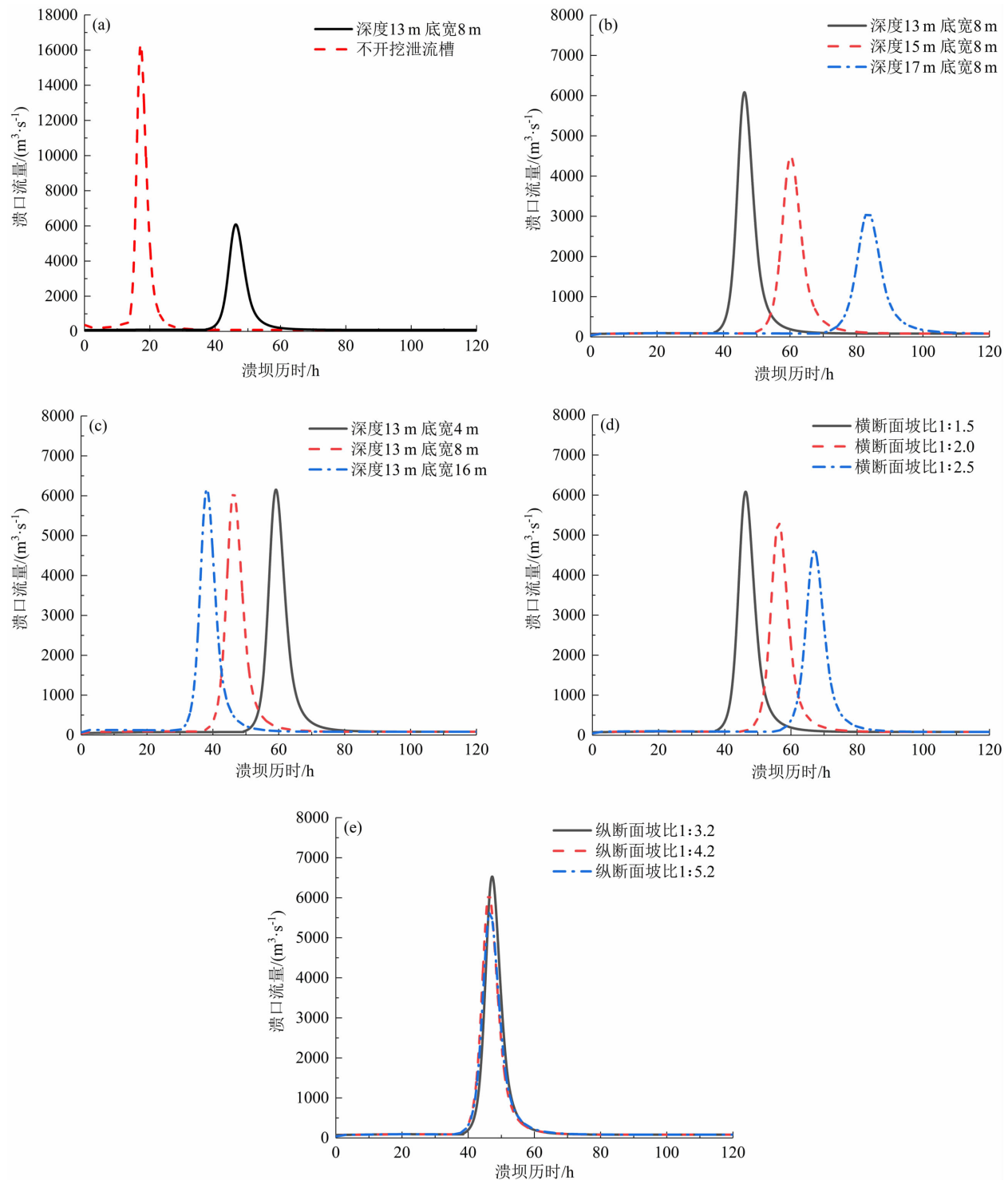


图2 不同泄流槽断面型式下唐家山堰塞体溃口流量过程图:

(a) 是否开挖泄流槽;(b) 不同深度泄流槽;(c) 不同底宽泄流槽;(d) 不同横断面坡比

Fig.2 Breach hydrographs of Tangjiashan landslide dam with different spillway section types:

(a) with and without spillways; (b) spillways with different depths; (c) spillways with different bottom widths;

(d) spillways with different slope ratios in cross section; (e) spillway with different slope ratios in longitudinal section

程的影响基本一致。泄流槽横断面边坡越陡峭,溃口峰值流量越大,溃口峰值流量出现时间也越早;纵断面坡度的改变对溃决过程的影响较小。但有学者

指出,在特定的情况下,改变纵断面坡度比增加泄流槽深度对堰塞体的溃决的影响更大^[4],因其泄流槽开挖的体积是恒定的,与本文计算方法略有不同。

对于纵断面坡度对堰塞体溃决过程的影响仍需进一步探索。

本文基于梯形的泄流槽形状进行计算分析。不少学者认为在相同的条件下,复式泄流槽效果更好^[17],但也有学者认为复式泄流槽断面需要确定的参数较多,在实际工程中不实用^[14]。在开挖泄流槽时,应该根据堰塞体的物质组成、现场交通条件、施工设备等实际情况综合评定,其具体的适用性仍需进一步研究探索。

4 结论

基于堰塞体颗粒分布特征,并考虑堰塞湖水动力条件和堰塞体的形态特征,利用提出的堰塞体漫顶溃决数学模型,分别计算了唐家山、小岗剑和白格堰塞坝的溃决过程,计算结果验证了模型的合理性。将泄流槽横断面形状设置为梯形,分别从泄流槽是否开挖、深度、底宽、横断面坡比和纵断面坡比等角度,综合模拟分析了泄流槽断面型式对堰塞体溃决过程的影响,得出如下结论:

(1)对于上游堰塞湖库容较大的堰塞体,开挖泄流槽可明显降低堰塞体溃决的致灾后果,但对于底部为细颗粒、顶部为大颗粒,且水动力条件较弱的堰塞体,不开挖泄流槽可能无法导致其溃决,但仍存在溃决风险。

(2)增加泄流槽深度可有效减小溃口洪峰峰值流量,迟滞洪峰到达时间,减小下泄水量,在相同开挖量及施工条件允许的情况下,可作为一个优选的泄流槽断面型式。

(3)泄流槽底宽对堰塞体溃口峰值流量和下泄水量影响较小,主要影响溃口峰值流量出现时间,泄流槽底宽越大,洪峰流量出现时间越早。

(4)泄流槽横断面边坡的变化对堰塞体溃决过程具有一定影响,边坡越陡峭,溃口洪峰流量越大,峰值流量出现时间越早。另外,泄流槽纵断面底坡的变化对堰塞体溃决过程的总体影响较小。

参考文献 (References)

- [1] SHEN Danyi, SHI Zhenming, PENG Ming, et al. Longevity analysis of landslide dams [J]. *Landslides*, 2020, **17**(8): 1797 – 1821. DOI: 10.1007/s10346-020-01386-7
- [2] SCHUSTER R L, EVANS S G. Engineering measures for the hazard

reduction of landslide dams [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

- [3] 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 Ning, CHENG Zunlan, CUI Peng, et al. Dammed lake and risk management [M]. Beijing: Science Press, 2013]
- [4] PENG M, ZHANG L M, CHANG D S, et al. Engineering risk mitigation measures for the landslide dams induced by the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Engineering Geology*, 2014, **180**: 68 – 84. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.03.016
- [5] BONNARD C. Technical and human aspects of historic rockslide – dammed lakes and landslide dam breaches [M]// EVANS S G, HERMANN S R L, STORM A, et al. Natural and Artificial Rockslide Dams, Lecture Notes in Earth Sciences. Berlin: Springer, 2011:101 – 122.
- [6] CUI Peng, ZHU Yingyan, HAN Yongshun, et al. The 12 May Wenchuan earthquake – induced landslide lakes: Distribution and preliminary risk evaluation [J]. *Landslides*, 2009, **7**(6): 209 – 223. DOI: 10.1007/s10346-009-0160-9
- [7] LIU Ning, CHEN Zuyu, ZHANG Jianxin, et al. Draining the Tangjiashan barrier lake [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, **136**(11): 914 – 923. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000241
- [8] 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 Qiming, CHEN Shengshui, SHAN Yibo. Numerical modeling of breaching process of Baige dammed lake on Jinsha River [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, **52**(2): 29 – 37] DOI: 10.15961/j.jsuese.201900830
- [9] CAI Yaojun, CHENG Haiyun, WU Shuaifeng, et al. Breaches of the Baige barrier lake: Emergency response and dam breach flood [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2020, **63**(7): 1164 – 1176. DOI: 10.1007/s11431-019-1475-y
- [10] 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. [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] DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2011.04.009
- [11] 赵天龙,陈生水,付长静,等.堰塞坝泄流槽断面型式离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(10): 1943 – 1948. [ZHAO Tianlong, CHEN Shengshui, FU Changjing, et al. Centrifugal model tests on section form of drainage channel of barrier dams [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(10): 1943 – 1948] DOI: 10.11779/CJGE201710025
- [12] 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.

- [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] DOI: 10.15961/j.jsuese.201800317
- [13] 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 Xiaoqing, CUI Peng, ZHAO Wanyu, et al. A discussion of emergency treatment of dammed lake caused by “5·12” Wenchuan Earthquake [J]. *Mountain Research*, 2010, **28**(3): 350 - 357] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2010.03.010
- [14] 赵万玉, 陈晓清, 高全. 地震堰塞湖人工排泄断面优化初探[J]. *灾害学*, 2010, **25**(2): 26 - 29. [ZHAO Wanyu, CHEN Xiaoqing, GAO Quan. Preliminary discussion on optimizing artificial drainage sections of earthquake dammed lakes [J]. *Journal of Catastrophology*, 2010, **25**(2): 26 - 29] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2010.02.005
- [15] 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. [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] DOI: 10.15961/j.jsuese.2009.03.028
- [16] YANG Xingguo, YANG Zhaohui, CAO Shuyou, et al. Key techniques for the emergency disposal of quake lakes [J]. *Natural Hazards*, 2010, **52**(1): 43 - 56. DOI: 10.1007/s11069-009-9350-y
- [17] 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 Shengshui, ZHAO Tianlong, ZHONG Qiming. Dam - break numerical model for a barrier dam and its application [J]. *Hydro - Science and Engineering*, 2015(3): 1 - 8] DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2015.03.001
- [18] 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 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] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2016.05.003
- [19] ZHANG Limin, XIAO Te, HE Jian, 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. DOI: 10.1007/s10346-019-01247-y
- [20] FAN Xuanmei, DUFRESNE A, SUBRAMANIAN S S, et al. The formation and impact on landslide dams - state of the art [J]. *Earth - Science Reviews*, 2020, **203**: 103116. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103116
- [21] FAN Xuanmei, XU Qiang, VAN WESTEN C J, et al. Characteristics and classification of landslide dams associated with the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Geoenvironmental Disasters*, 2017, **4**(1): 12. DOI: 10.1186/s40677-017-0079-8
- [22] 钟启明, 钱亚俊, 单熠博. 崩滑堰塞湖的形成—孕灾—致灾机理与模拟方法[J]. *人民长江*, 2021, **52**(2): 90 - 98. [ZHONG Qiming, QIAN Yajun, SHAN Yibo. Mechanism and simulation method of disaster forming, disaster - pregnant and disaster - causing for landslide dammed lakes [J]. *Yangtze River*, 2021, **52**(2): 90 - 98] DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.02.015
- [23] ZHONG Qiming, CHEN Shengshui, MEI Shiang, et al. Numerical simulation of landslide dam breaching due to overtopping [J]. *Landslides*, 2018, **15**(6): 1183 - 1192. DOI: 10.1007/s10346-017-0935-3
- [24] ZHONG Qiming, CHEN Shengshui, SHAN Yibo. Prediction of the overtopping - induced breach process of the landslide dam [J]. *Engineering Geology*, 2020, **274**: 105709. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105709
- [25] CHANG D S, ZHANG L M. Simulation of the erosion process of landslide dams due to overtopping considering variations in soil erodibility along depth [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, **10**(4): 933 - 946. DOI: 10.5194/nhess-10-933-2010
- [26] CHEN Zuyu, MA Liqiu, YU Shu, et al. Back analysis of the draining process of the Tangjiashan barrier lake [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, **141**(4): 05014011. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000965

Influence of the Section Type of Spillway on the Collapse Process of Landslide Dam

YANG Meng¹, ZHONG Qiming^{1,2*}, SHAN Yibo¹, MEI Shengyao¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;

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

Abstract: Landslide dam can be safely removed by excavating spillways. The section type of a spillway governs the collapse process of a landslide dam. There is no quantitative understanding of which type of spillway is properly excavated for different types of landslide dams. In this study, a mathematical model was introduced for simulating the collapse process of landslide dams with varied dimensions of cross-sections. It was done in consideration of hydrodynamic conditions of dammed lakes, as well as their shapes, structures, and geo-material properties. Three real cases of landslide dam failures at Tangjiashan, Xiaogangjian and Baige in southeast China was modelled for comparison and justification purpose by applying the collected in-situ measurement coefficients into the model to study the influence of different shapes of spillways on the collapse process of dam bodies.

In the simulation, it set the spillway into different cross sections, and compared the collapse process under different working conditions. The results are as follows: (1) For dammed lakes with large storage capacity, the excavations of spillways had a great influence on the collapse process of dammed lakes, obviously reducing disaster-causing consequences. With the increase in the depth of a spillway, the peak discharge at breach decreased continuously, and the time of peak discharge gradually delayed; (2) The width at the bottom of a spillway mainly affected the occurrence time of peak flow at breach. The larger the width of the bottom of a spillway, the earlier the occurrence time of the peak flow had; (3) The steeper the cross-section slope of a spillway, the greater the peak discharge was, and the earlier the peak discharge occurred; (4) The change in the bed slope in the longitudinal section of a spillway had little influence on collapse processes. In addition, in consideration of the distribution of geo-particles of a landslide dam, in case the dam body at Xiaogangjian never excavate a spillway, it would not collapse under the of upstream hydrodynamic actions, but still a risk of collapse. Therefore, in emergency rescue, different types of spillways are expected to choose according to local actual situation. This research results can provide reference for decision-making of emergency rescue of landslide dams.

Key words: landslide dam; spillway; section type; numerical simulation; comparative analysis; emergency rescue