金沙江上游“11.03”白格堰塞湖溃决洪水反演分析

陈祖煜^{1,2*}, 陈生水³, 王琳⁴, 钟启明³, 张强⁴, 金松丽^{1,2}

1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

3. 南京水利科学研究院, 南京 210029;

4. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048

* E-mail: chenzuyu@cashq.ac.cn

收稿日期: 2019-08-22; 接受日期: 2019-12-18; 网络版发表日期: 2020-05-26

国家重点研发计划(编号: 2018YFC1508605)、中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金(编号: IWHR-SKL-201906)、国家自然科学基金(批准号: 51909214, 51779153)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(编号: Y319003)资助项目

摘要 2018年11月3日, 西藏自治区和四川省交界处山体发生二次滑坡, 在原残余的“10.10”堰塞体上形成“11.03”白格堰塞湖并发生溃决。相应的库容为 $5.79 \times 10^8 \text{ m}^3$, 溃决洪峰流量达 $31000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。为直观揭示堰塞湖的溃决过程, 本文收集相应的地形、水文资料, 并对现场采集的堰塞体材料进行了颗粒级配、冲蚀和抗剪强度特性试验。在此基础上采用“水科院模型”和“南科院模型”对溃决洪水流量过程进行反演分析和参数敏感性分析。结果表明, 目前有关溃决洪水分析的基础理论、分析方法和程序可较合理地预测堰塞湖的溃决洪水过程。在输入的水力学和岩土力学参数中只有表征冲蚀率与剪应力关系的特征值对洪峰流量有较大影响。本研究成果可为今后同类堰塞湖应急抢险提供技术参考。

关键词 溃决洪水, 反演分析, 溃决模型, 白格堰塞湖

1 引言

2018年10月10日、11月3日, 西藏自治区昌都市江达县和四川省甘孜藏族自治州白玉县交界处, 金沙江右岸同一位置连续发生两次山体滑坡, 堵塞金沙江形成白格堰塞湖。两次堰塞湖分别在2018年10月12日和11月12日发生溃决, 溃决洪峰流量分别约为10000和 $31000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。其中“11.03”堰塞湖溃决洪水造成下游在建苏洼龙水电站基坑被淹, 云南省迪庆、丽江、大理等4州市11个县市区共计 5.4×10^4 人受灾, 直接经济损失

达 74.3×10^8 元。

堰塞湖形成且发生溃决前, 快速估算溃决洪水流量和洪水过程, 可合理制订救灾措施和人员迁移方案, 因此具有极其重要的意义。我国拥有众多的土石坝、尾矿坝、淤地坝, 滑坡堵江发生概率较高。提高溃决洪水分析精确程度, 并开发相应简便易行软件, 对于保护人民生命安全至关重要。早期相关研究多基于参数的经验公式^[1]。20世纪60年代, Fread和Lewis^[2], Singh等人^[3]提出建立在宽顶堰流量计算公式、冲蚀和岸坡崩塌模型基础上的溃决洪水数值分析方法。

引用格式: 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. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 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 (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 763–774, doi: [10.1360/SST-2019-0297](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0297)

Wu^[4]总结了随后出现的大量研究成果,在ASCE *Journal of Hydraulic Engineering*上全面回顾了当前的研究水平。中国水利水电科学研究院(简称水科院)和南京水利科学研究院(简称南科院)针对此方向开展了长期、深入的研究^[5~14],提出了对现有的溃决洪水分析方法的改进建议,并分别开发了DB-IWHR和DB-NHRI软件(以下简称“水科院模型”和“南科院模型”)。

尽管溃决洪水分析方法有了长足的进步,但是目前学术界仍未达到准确预报其洪峰过程的水平。其中一个主要原因是溃决过程往往稍纵即逝,实测的溃决洪水过程十分少见。因而,理论研究成果难有机会得到验证和完善,数学模型中的物理力学参数也难以通过对实测资料的反演获得较为符合实际的标定值。

“11.03”白格堰塞湖从形成到溃决经历了9天时间。现场人员在抢险救灾的过程中做好了充分准备,不仅实测了堰塞湖溃决时的泄流全过程,而且纪录了下游750 km 7个水文站的流量、水位过程。这一金沙江上游超过万年一遇的洪水实测资料,为深化河流动力学的理论研究和提高溃决洪水分析水平提供了极有价值的科学资料。相关的研究成果已有报道^[15~20]。本文介绍利用此实测资料,使用“水科院模型”和“南科院模型”对“11.03”堰塞湖溃决洪水进行反演分析的研究成果。

2 堰塞体地貌与物理力学特性

2.1 地形地貌

白格堰塞体位于金沙江上游,东经98°42′32.24″,北纬31°4′59.27″,金沙江流域为不对称的100~130 m宽“V”形河谷。左右两侧边坡坡度陡峭,约为40°~80°。

2018年11月3日,“10.10”白格滑坡的残余滑坡体再次下滑,在原残余堰塞体基础上形成“11.03”白格堰塞体。堰顶宽约195 m,长约273 m,堰顶高程约2967 m,平均较“10.10”堰塞体高大约30 m,堰塞体高出水面58.24 m,如果蓄满最大库容将达 $7.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。相应的库容水位关系曲线如图1所示。“11.03”白格堰塞湖基本概况如表1所示。

2.2 物质组成与力学特性

白格“11.03”堰塞体呈混色,主要为灰绿色、灰黄色、灰白色。堰塞体下滑推挤河床后的河床推挤物与

图1 “11.03”白格堰塞湖库容与水位关系曲线

Figure 1 Graph showing water-level elevation vs. storage capacity of the “11.03” landslide dam.

表1 “11.03”白格堰塞湖基本概况

Table 1 Main characteristics of the “11.03” landslide dam

类别	参数	数值
滑坡	滑坡高度 (m)	800
	滑坡顶高程 (m)	3670
	坡顶高程 (m)	3718
堰塞体	滑坡体方量 (m^3)	2.4×10^6
	顺河向长度 (m)	1400
	横跨河谷长度 (m)	600
	在堰塞体右部最低处表面测量坝顶/趾的高程 (m)	2989/2934
	在堰塞体左部最高处表面测量坝顶/趾的高程 (m)	3014/2897
	最高水位 (m)	2956.4
堰塞湖	可能的最大库容 (m^3)	7.9×10^8
	实际最大库容 (m^3)	5.79×10^8
	原河床高程 (m)	2861

滑体混杂堆积,颜色杂,河床物磨圆较好,以砂砾为主。堆积于左岸堰塞体下游表部,为黄褐色和灰绿色碎石土,表部碎石富集较明显。堰塞体表部后半部分(坝面顺河下游)由碎块石组成,细颗粒含量少,呈灰褐色,块径多为5~30 cm,大者可达200 cm,碎石(块径2~20 cm)含量约占40%,块石(块径大于20 cm)含量约占30%,砾石(粒径0.2~2 cm)约占15%,砂砾(粒径0.075~2 mm)约占10%,细粒土约占5%,为弱风化岩体中的粗颗粒经初步分选而成。堰塞体表部前半部分(坝面顺河上游),细颗粒含量多,粗颗粒含量少,呈灰褐、灰绿色,碎石约占20%,砾石约占40%,砂粒约占20%,粉黏粒约占

15%, 另夹少量块石. 在溃决后现场观测时发现, 裸露的表层沉积物被上部较粗的颗粒降解, 下部明显致密.

堰塞体材料颗粒分曲线如图2所示. 对白格“11.03”堰塞体残留土体进行固结排水试验, 其有效黏聚力分别为3.0和1.2 kPa, 有效内摩擦角分别为32.8°和30.6°(图3), 其物理力学指标见表2.

2.3 冲蚀特性

堰塞体材料的冲蚀特性是影响溃决洪水流量最重要的因素. 许多不同的冲蚀试验设备被开发用以测量土体材料冲蚀剪应力和冲蚀率^[21~25]. 作者团队研发了圆筒型冲蚀试验设备(CETA)以测量土体材料冲蚀特性. CETA设备如图4所示. 图5是白格堰塞体残留土体的冲蚀剪应力与冲蚀率的关系图, 其试验数据来自于CETA设备. 根据作者提出的双曲线模型测定的参数 $1/a$, $1/b$ 分别为0.9和2.5 mm/s.

3 堰塞湖溃决过程

“11.03”堰塞体堰顶高程2967 m, 高出水面58.24 m, 如果蓄满最大库容将达到 $7.9 \times 10^8 \text{ m}^3$. 在比较了爆破、水冲、人工开挖、机械开挖形成泄流槽的可行性和安全性后, 经过专家组的慎重研判、商讨, 最终决定采用机械开挖形成泄流槽的方式干预处置堰塞湖. 调用工程机械18台, 其中挖掘机13台, 装载机5台, 11月8日, 现场机械到达堰塞体顶部. 11月11日下午泄流槽开挖完成. 倒梯形泄流槽长220 m, 底坎高程2952.52 m, 顶宽42 m, 底宽3 m, 最大深度为15 m. 11月12日凌晨04:45, 泄流槽开始进水, 10:50整个泄流槽被淹没; 13日8:00泄流槽过流流量明显增大, 13日

图2 白格堰塞体残留土体颗粒分曲线图

Figure 2 Grain size distributions for the two samples of Baige landslide dam deposit material matrix.

12:00冲蚀迅速加快; 13日13:40过流流量超过堰塞湖入湖流量, 堰塞湖最高水位达2956.40 m, 相应库容 $5.79 \times 10^8 \text{ m}^3$; 13日18:00溃决洪峰流量为 $31000 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右; 14日8:00溃口处流量退至基流, 如图6所示.

4 溃决洪水分析: 原理和方法

4.1 基础框架

溃决洪水分析的基础理论框架包括以下3方面.

(1) 水量平衡条件: 单位时间库容的损失等于泄流槽按宽顶堰公式计算的流量. 大多数溃决洪水分析文献采纳了这一基本方程式^[26~30].

(2) 土体冲蚀模型: 溃决时, 泄流槽槽底在高速水流冲蚀下被不断刷深, 水位和槽底高程同步下降. 建立冲蚀剪应力与槽底冲蚀率之间的本构关系, 是溃决洪水分析的一个重要命题^[6].

(3) 溃口崩塌模型: 泄流槽下切将导致泄流槽两侧崩塌, 溃口不断增大. 传统方法采用边坡稳定楔形体

图3 白格堰塞体残留土体三轴固结排水剪切试验结果. (a) SY1; (b) SY2

Figure 3 Consolidated drained triaxial shear test results for two samples of Baige landslide dam material. (a) SY1; (b) SY2.

表 2 白格堰塞体残留土体物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical properties for two samples of matrix from Baige landslide dam material

样品编号	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	中值粒径 d_{50} (mm)	比重 G_s (g/cm ³)	含水率 w (%)	干密度 ρ_d (g/cm ³)	压实度 K	黏聚力 c (kPa)	摩擦角 φ (°)
SY1	75.4	4.9	5.10	2.72	9.0	2.03	0.95	3.0	32.8
SY2	189.1	8.9	4.39	2.68	9.2	2.04	0.95	1.2	30.6

图 4 (网络版彩图)圆筒型冲蚀试验设备(CETA)
Figure 4 (Color online) Photograph of the Cylindrical Erosion Test Apparatus (CETA) used for erosion rate testing.

法,从岩土力学角度分析,尚可进一步改进.此外,随着冲蚀加剧,泄流槽还有可能在纵向(平行水流方向)发生滑坡,被称为溯源崩塌.

表征以上3个条件的数值计算方程式是积分可解的,但由于高度非线性,需通过迭代获得收敛解答.程序处理实际问题的鲁棒性是值得关注的一个问题.

以下介绍“水科院模型”和“南科院模型”在处理上述问题方面依据实际情况所做的改进.

4.2 “水科院模型”

DB-IWHR是水科院在对唐家山、易贡、小岗剑、红石岩等堰塞湖工程案例进行反演分析的基础上,完善和改进了溃决洪水计算理论和方法后,提出的基于物理机制的溃决洪水分析方法^[5~10].图7总结了其主要框架.主要的改进点如下.

(1) 流量平衡条件采用图7中式(1)描述.鉴于泄流槽的流速远大于入流速度,水流进入泄流槽后水面将突然跌落,堰后水深 h 应用经验公式(2)确定.跌落系数 m 建议在0.6~0.8之间.可通过敏感性分析分析不同 m 值对计算结果的影响.结果表明, m 假定值对洪峰的计算值影响较小^[5].

(2) 采用图7中式(3)双曲线土体冲蚀模型.该模型

图 5 白格堰塞体冲蚀剪应力与冲蚀率关系图
Figure 5 Graph of shear stress vs. erosion rate for Baige landslide dam deposits.

在剪应力趋无限值时将逼近一个渐近线,其值为 $1/b$.该模型认为土体材料抵抗冲蚀时,不应有无限“强度”. $1/b$ 代表“可能最大冲蚀率”.

(3) 采用岩土工程中已被广泛接受的圆弧滑动面分析方法模拟溃口崩塌.近期的研究表明,在可接受的精度范围内,可用一个双曲线模型来计算梯形侧面倾角增量 $\Delta\beta$,使用式(4)即可确定.其中 $1/m_1$ 和 $1/m_2$ 分别表示双曲线的初始切线和渐近线.文献[9]提供了相应的图表以确定两个参数.在DB-IWHR程序中,用户输入土料的材料重度 γ 和强度参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ ,通过内插获取双曲线模型参数 m_1 和 m_2 .

“水科院模型”给定初始流速 V_0 和流速增量 ΔV 进行数值积分.一旦给定流速 V ,可直接求出 ΔH , Δz 和 Δt .这一新算法和常规通过给定的初始时间 t_0 和时间步长 Δt 方法相比,避免了非线性迭代,大大增强了鲁棒性.

4.3 “南科院模型”

南科院主要针对我国面广量大的土石坝工程,研究对象包括均质坝、心墙坝、面板坝和堰塞湖的漫顶与渗透破坏溃决机理及溃决过程数值模拟^[11~14].随后,

图 6 “11.03”堰塞湖溃口处实测数据. (a) 堰塞湖水位; (b) 溃决流量; (c) 溃口宽度

Figure 6 Measured hydrologic data from the “11.03” dam breach. (a) Water level vs. time; (b) discharge vs. time; (c) width.

历时十余年的研究攻关, 建立了DB-NHRI系列溃决模型. 图8总结了DB-NHRI系列堰塞体漫顶溃决模型的主要框架. 模型的主要特点如下.

(1) 采用宽顶堰公式计算溃决流量, 采用水量平衡方程处理堰塞湖溃决过程中的水位变化. 堰塞湖漫顶溃决过程中, 上游水位是一个动态变化的过程, 在计算水位高程变化时, 同时考虑不同高程处的湖面面积、入湖流量及溃决出流量, 使得整个过程服从水量平衡方程.

(2) 选择基于水流剪应力原理的冲蚀公式模拟坝料的冲蚀. 当堰顶溃口水深与下游坡溃口水深确定后, 可计算获得溃决水流的剪应力 τ_b , 冲蚀系数 k_d 与坝料临界剪应力 τ_c 可通过试验测定; 当冲蚀系数和坝料临界剪应力无法通过试验获取时, 可采用考虑宽级配坝料

特征的经验公式计算^[14].

(3) 假设溃口的纵向下切与横向扩展速度一致. 当溃口处水深小于溃口深度时, 按理论分析, 溃口水流仅能冲蚀水面线以下的土体材料; 但堰塞体多由散粒材料构成, 且未经碾压, 当水面以下土体被冲蚀后, 上部土体会发生滑落, 因此模型的假设可以成立.

(4) 通过模型试验和现场实测数据发现, 一般堰塞体沿河流运动方向较长, 在漫顶溃决过程中下游坡逐渐变缓. 模型假设堰塞体在水流冲蚀作用下, 堰顶高程逐渐降低, 下游坡坡角逐渐减小, 直至溃决结束; 下游坡坡角的变化可通过堰顶与下游坡溃口深度的变化推导获取. 另外, 随着溃决过程加剧, 溃口边坡可能会发生失稳, 模型采用极限平衡法分析溃口边坡的稳定性.

(5) 不同的堰塞体具有不同的几何形态、结构特

图 7 (网络版彩图)溃决洪水分析“水科院模型” (图中相关符号意义参见文献[5~10])
Figure 7 (Color online) Dam breach analytical approaches for DB-IWHR (the significance of parameters in the figure see refs. [5~10]).

征、颗粒分布及堰塞湖的水动力条件。对于体型较大、拥有较多大颗粒的堰塞体，溃决后可能存在残留体；对于不完全溃决，模型根据堰塞体的结构特征设置残留体高，控制溃口底部高程。

(6) 模型采用按时间步长迭代的数值计算方法，模拟溃口发展过程与溃决流量过程之间的耦合关系，可输出每个时间步长结束时的溃决流量、溃口顶宽、溃口底宽、溃口底高程和堰塞湖水位等计算参数。

5 堰塞湖溃决洪水反演分析

5.1 “水科院模型”

表3为“水科院模型”的输入参数。这些参数在Excel表格中可直接输入，可保证工程师在1 h内完成目标工况计算，在堰塞湖应急处置时可快速应用，直观实用。

图9显示堰塞湖水位、溃决流量、溃口宽度的实测值和计算值。反演分析较合理地再现了实测数据。13日18:00，溃决最大洪峰31000 m³/s。反演分析结果显示在13日18:28，最大洪峰流量到达31041.09 m³/s，溃决库容达到5.44×10⁸ m³。若不开挖泄流槽，则在堰顶2967 m

时堰塞湖将溃决，库容达到8.69×10⁸ m³，峰值预测为41623.48 m³/s，开挖泄流槽可使洪峰流量减少34%，洪量减少60%。

5.2 “南科院模型”

本次反演分析自水位达到泄流槽底开始，计算时长设定为56 h，表4给出了本次反演分析采用的“南科院模型”的输入参数。图10给出了堰塞湖水位、溃决流量、溃口宽度的实测值和计算值。反演分析的结果较合理地再现了白格堰塞湖的溃决过程，反演分析结果显示：2018年11月13日18:13，溃决出现峰值流量，最大洪峰流量达到28613.1 m³/s。

5.3 敏感性分析

由于输入数据中涉及大量的不确定性，溃决分析结果不可能十分精确。因此，研究不同输入值的影响是溃决计算的一部分。表5为“水科院模型”改变水力参数C和m、冲蚀参数a和b以及溃口扩展参数的溃决流量过程结果汇总。表5重复了本文作者以前案例研究论文中的发现^[5]。参数 $\dot{z}_{\max} = 1/b$ (最大可能的冲蚀率)，是对洪峰计算值最有影响的输入参数。本工程反演如果b的输入

图 8 (网络版彩图)溃决洪水分析“南科院模型”(图中相关符号意义参见文献[10~14])
Figure 8 (Color online) Dam breach analytical approaches for DB-NHRI (the significance of parameters in the figure see refs. [10~14]).

表 3 白格堰塞湖“11.03”溃决过程反演分析“水科院模型”输入参数^{a)}
Table 3 Back analysis inputs for “11.03” dam breach, the target case from DB-IWHR^{a)}

类别	名称	符号	默认值
堰塞湖与堰塞体特征	库容	$H_1, W_1, H_2, W_2, H_3, W_3, H_t$	2905.75
	初始水位	H_0	2956.40 m
	入流量	q	850 m ³ /s
	初始底高程	z_0	2952.52 m
	溃口(导流槽)初始宽度	B_0	42
水力学参数	宽顶堰系数	C	1.43
	跌落系数	m	0.8
	启动流速	V_c	4 m/s
	冲蚀参数	a, b	1.1, 0.00038
岩土力学参数	容重	γ	2.03 g/cm ³
	黏聚力, 摩擦角	c, φ	3 kPa, 32.8°
	初始溃口倾角	β_0	129°

a) 库容关系曲线由相应3组库水位高程和库容 $H_1, W_1, H_2, W_2, H_3, W_3, H_t$ 内插决定, H_t 为相对高程起点。

值介于0.0003和0.0005之间, 这意味着 $z_{\max}$ 从3.33 mm/s 降至2 mm/s, 溃决洪峰流量变化为(38406.53–25242.83)/ 31000=42.4%。这一结果与目前已知的溃决流量分析精 度水平一致, 峰值流量的变化在50%以内^[30]。表5结果

图 9 水科院模型“11.03”白格堰塞湖溃决计算结果与实测数据对比. (a) 堰塞湖水位; (b) 溃决流量; (c) 溃口宽度
Figure 9 Graphs showing measured and calculated curves for “11.03” dam breach from DB-IWHR. (a) Water level vs. time; (b) discharge vs. time; (c) width vs. time.

表 4 白格堰塞湖“11·03”溃决过程反演分析“南科院模型”输入参数
Table 4 Back analysis inputs for “11.03” dam breach, the target case from DB-NHRI

类别	名称	符号	默认值
堰塞湖与堰塞体特征	库面面积	A_s	A_s-h
	初始库水位	z_s	2956.40 m
	入库流量	Q_{in}	$850\text{ m}^3/\text{s}$
	堰塞体高度	H_d	105 m
	堰塞体顶宽	H_w	270 m
	堰塞体轴线长度	H_l	600 m
	堰塞体上游坡比	S_{up}	1:2.7
	堰塞体下游坡比	S_{down}	1:5.5
	堰塞体顶高程	H_c	2967 m
	溃口初始底高程	z_b	2952.52 m
	溃口(泄流槽)初始宽度	b	3 m
	溃口(泄流槽)边坡	M	1:1.5
水力学参数	宽顶堰系数	c_1, c_2	1.7, 1.1
	淹没系数	k_{sm}	1.0
	曼宁系数	n	0.033
	冲蚀系数	k_d	$1.2\text{ cm}^3/(\text{N s})$
岩土力学参数	平均粒径	d_{50}	4 mm
	黏聚力	c	3.0 kPa
	内摩擦角	φ	32.8°

图 10 南科院模型“11.03”白格堰塞湖溃决过程反演分析结果与实测数据对比。(a) 堰塞湖水位; (b) 溃决流量; (c) 溃口宽度
Figure 10 Graphs showing measured and calculated curves for “11.03” dam breach from NHRI-DB. (a) Water level vs. time; (b) discharge vs. time; (c) width vs. time.

表 5 不同案例特征值汇总

Table 5 Summaries of measured and calculated peak flows and results of the sensitivity study

参数类别				到达时间 t_m	流量 Q_m (m ³ /s)	流速 V_m (m/s)	宽度 B (m)
实测数据				18:00	31000.00	7.00	219
反演分析				18:28	31041.09	8.03	226.70
未开挖泄流槽				18:54	41623.48	8.52	256.79
水力学参数	$m=0.8$	$m=0.6$		18:21	32317.52	11.71	213.51
		$m=0.7$		18:11	32919.70	9.89	219.55
	$C=1.43$	$C=1.67$		18:04	32501.42	9.14	219.53
		$C=1.31$		18:45	30360.77	7.44	231.01
敏感性分析	冲蚀系数	$a=1.0$					
		$a=1.1$	$b=0.0005$	19:13	25242.83	7.68	212.58
		$b=0.00038$	$a=0.9$				
			$b=0.0003$	17:48	38406.53	8.41	242.48
溃口扩展参数	$c=3$ kPa $\varphi=32.8^\circ$	$c=16$ kPa $\varphi=45^\circ$		18:50	31063.76	8.45	207.64
		$c=10$ kPa $\varphi=25^\circ$		17:56	31955.35	7.61	272.60

表明,其他参数输入值对计算结果的影响并不敏感。

6 结论

2018年11月3日发生在金沙江上游的第二次白格堰塞湖溃决形成了超万年一遇的洪水,本文通过对“11.03”白格堰塞湖溃决洪水的反演分析和参数敏感性分析,得到以下结论。

(1) 本文收集了白格堰塞体的形态、水文资料等数据,并现场采集了堰塞体残留土体材料开展了颗粒级配、冲蚀特性和抗剪强度的特性试验,发现白格堰塞体土体材料总体由细颗粒组成,可能最大冲蚀率为2.5 mm/s,材料抗冲性较差。

(2) 运用“水科院模型”和“南科院模型”反演分析“11.03”白格堰塞体溃决洪水过程,分别采用标定后的输入参数(表3和4),计算的洪峰流量分别为31041.09和28613.1 m³/s,与实测值31000 m³/s接近。其他特征参数

如洪峰到达历时,溃口宽度也和实测值基本相符。

(3) 白格堰塞湖在应急处置中68 h内紧急开挖了一条深15 m,宽22 m,长220 m的泄流槽,使堰塞体高度减少了15 m,减小了近 2×10^8 m³库容,溃决洪峰流量由41623.48 m³/s减小至31000 m³/s,大大降低了溃决洪水对下游的威胁。

(4) 通过对“水科院模型”开展敏感性分析,表明在输入的水力学和岩土力学参数中,只有表征冲蚀率与剪应力关系的特征值对洪峰流量有较大影响,相应误差在50%以内。双曲线冲蚀模型中参数1/a和1/b具有“土体不应有无限大的冲蚀率”的重要物理意义。在堰塞湖应急处置时,可依据现场工程师的经验或试验快速获取。

(5) 目前有关溃决洪水分析的基础理论、分析方法和程序可以比较合理地预测堰塞湖溃决洪水过程,本文整理了白格堰塞湖的相关数据和反演分析资料,相关成果可为今后同类堰塞湖应急抢险时预测溃决洪水及科学理论研究提供参考。

参考文献

- Xu Y, Zhang L M. Breaching parameters for earth and rockfill dams. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2009, 135: 1957–1970
- Fread D L, Lewis J M. FLDWAV: A generalized flood routing model. In: *Proceedings of the National Conference on Hydraulic Engineering*. New York: ASCE, 1988. 668–673
- Singh V P, Scarlatos P D, Collins J G, et al. Breach Erosion of Earthfill Dams (BEED) model. *Nat Hazards*, 1988, 1: 161–180
- Wu W. Simplified physically based model of earthen embankment breaching. *J Hydraul Eng*, 2013, 139: 837–851
- 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
- Wang L, Chen Z Y, Wang N, et al. Modeling lateral enlargement in dam breaches using slope stability analysis based on circular slip mode. *Eng Geol*, 2016, 209: 70–81
- Chen S J, Chen Z Y, Tao R, et al. Emergency response and back analysis of the failures of earthquake triggered cascade landslide dams on the Mianyu River, China. *Nat Hazards Rev*, 2018, 19: 05018005
- Zhou X B, Chen Z Y, Yu S, et al. Risk analysis and emergency actions for Hongshiyuan barrier lake. *Nat Hazards*, 2015, 79: 1933–1959
- Chen Z Y, Ping Z Y, Wang N X, et al. An approach to quick and easy evaluation of the dam breach flood. *Sci China Tech Sci*, 2019, 62: 1773–1782
- Chen Z Y, Zhang Q, Chen S J, et al. Evaluation of barrier lake breach floods: Insights from recent case studies in China. *Wiley Interdiscip Rev-Water*, 2020, 7: e1408
- Chen S S, Fang X S, Zhong Q M. Centrifugal model tests and numerical simulations for break of earth-rock dams due to overtopping (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2014, 36: 911–931 [陈生水, 方绪顺, 钟启明, 等. 土石坝漫顶溃决过程离心模型试验与数值模拟. *岩土工程学报*, 2014, 36: 911–931]
- Zhong Q M, Chen S S, Deng Z. Breach mechanism and numerical modeling of barrier dam due to overtopping failure (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过程模拟. *中国科学: 技术科学*, 2018, 48: 959–968]
- Zhong Q M, Chen S S, Mei S A, et al. Numerical simulation of landslide dam breaching due to overtopping. *Landslides*, 2018, 15: 1183–1192
- Zhong Q M, Chen S S, Deng Z, et al. Prediction of overtopping-induced breach process of cohesive dams. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2019, 145: 04019012

- 15 Zhou X B, Du X H, Yao Y. Research and analysis on baige landslide dam break flood in Jinsha River (in Chinese). *Water Power*, 2019, 45: 8–12 [周兴波, 杜效鹤, 姚虞. 金沙江白格堰塞湖溃坝洪水分析. *水力发电*, 2019, 45: 8–12]
- 16 Zhong, Q M, Chen, S S, Wang, L, et al. Back analysis of breaching process of Baige landslide dam. *Landslides*, 2020, doi: 10.1007/s10346-020-01398-3
- 17 Xu Q, Zheng G, Li W L, et al. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018 (in Chinese). *J Eng Geol*, 2018, 26: 129–146 [许强, 郑光, 李为乐, 等. 2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究. *工程地质学报*, 2018, 26: 129–146]
- 18 Deng J H, Gao Y J, Yu Z Q, et al. Analysis on the formation mechanism and process of Baige landslides damming the upper reach of Jinsha River, China (in Chinese). *Adv Eng Sci*, 2019, 51: 13–20 [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. *工程科学与技术*, 2019, 51: 13–20]
- 19 Zhang Z, He S, Liu W, et al. Source characteristics and dynamics of the October 2018 Baige landslide revealed by broadband seismograms. *Landslides*, 2019, 16: 777–785
- 20 Zhang L, Xiao T, He J, et al. Erosion-based analysis of breaching of Baige landslide dams on the Jinsha River, China, in 2018. *Landslides*, 2019, 16: 1965–1979
- 21 Hanson G J, Temple D M. Performance of bare-earth and vegetated steep channels under long-duration flows. *Trans ASAE*, 2002, 45: 695–701
- 22 Grissinger E H, Little W C, Murphey J B. Erodibility of streambank materials of low cohesion. *Trans ASAE*, 1981, 24: 0624–0630
- 23 Moore W L, Masch Jr. F D. Experiments on the scour resistance of cohesive sediments. *J Geophys Res*, 1962, 67: 1437–1446
- 24 Briaud J L, Ting F C K, Chen H C, et al. SRICOS: Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers. *J Geotechn Geoenviron Eng*, 1999, 125: 237–246
- 25 Wan C F, Fell R. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2004, 130: 373–380
- 26 Chang D S, Zhang L M. Simulation of the erosion process of landslide dams due to overtopping considering variations in soil erodibility along depth. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2010, 10: 933–946
- 27 Fread D L. Dam breach erosion modeling. In: Bowles D S, ed. *Delineation of Landslide, Flash Flood, and Debris Flow Hazards in Utah*. Technical Report. Utah Water Research Laboratory, 1985. 281–310
- 28 Huang J C. Numerical modeling of flow through breach of landslide dams (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2008, 39: 1235–1240 [黄金池. 堰塞体漫顶溃口流量变化过程的数值模拟. *水利学报*, 2008, 39: 1235–1240]
- 29 Zhong Q M, Chen S S, Zhao L Z, et al. Numerical simulation of overtopping failure process of a barrier dam (in Chinese). *J Hohai Univ (Nat Sci)*, 2012, 40: 405–411 [钟启明, 陈生水, 赵联桢, 等. 堰塞体漫顶溃决过程数值模拟. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40: 405–411]
- 30 Morris M W. IMPACT Project: Final Technical Report-January 2005. IMPACT Project, HR Wallingford, 2005. <http://www.impact-project.net>

Back analysis of the breach flood of the “11.03” Baige barrier lake at the Upper Jinsha River

CHEN ZuYu^{1,2}, CHEN ShengShui³, WANG Lin⁴, ZHONG QiMing³,
ZHANG Qiang⁴ & JIN SongLi^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China;

² China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

³ Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

⁴ College of Water Resources and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

A second landslide took place in China on 3 November 2018 at the provincial boundary between Sichuan and Tibet. This landslide blocked the reach of the Jinsha River and created a barrier lake with a $5.79 \times 10^8 \text{ m}^3$ storage reservoir and a $31000 \text{ m}^3/\text{s}$ peak breach flood. To reveal the beach formation process of the barrier lake, this paper gathers the lake's geography and hydrology information and conducts material property tests including gradation, soil erosion, and shear strength experiments. Back analyzes on the dam breach hydrograph were conducted in tandem with the parametric sensitivity studies based on the tested knowledge using the DB-IWHR and DB-NHRI respectively. The measured results show that the theory, methods, and tools currently available for dam beach analysis can accurately predict the flood of a dam breach. Among the feedback regarding the hydraulic and geotechnical parameters, only those related to the relationship between the rate of erosion and shear stress are more important to the measured peak flow. The results from this study may provide a reference in the event of an emergency to other barrier lakes.

dam breach flood, back analysis, dam breach model, Baige barrier lake

doi: [10.1360/SST-2019-0297](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0297)