

堰塞湖关键工程措施快速、定量分析方法研究

——以2018年“11.03”白格堰塞湖为例

王琳¹, 段庆伟², 刘立鹏², 蔡思敏¹, 孙平²

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西西安710048; 2. 中国水利水电科学研究院
岩土工程研究所, 北京100048)

摘要: 堰塞湖一旦失控溃决,将对下游造成极大威胁。其可供应急处置的时间极为有限,急需采取切实有效的应急处置技术,其中关键工程措施的选择尤为重要。在归纳总结国内外多座堰塞湖应急处置经验的基础上,选择基于物理机制的DB-IWHR溃决分析方法和参数化溃决分析方法结合白格堰塞湖实例开展关键工程措施对比论证。结果表明:物理机制分析方法能够快速、定量地确定堰塞湖关键工程措施——开挖引流槽。2018年“11.03”白格堰塞湖紧急开挖的一条长220 m、深15 m、顶宽42 m、底宽3 m的引流槽,可使堰塞湖库容由 $8.08 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减小至 $5.79 \times 10^8 \text{ m}^3$,溃决洪峰流量由 $39\,277.35 \text{ m}^3/\text{s}$ 减小至 $31\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。DB-IWHR物理机制分析方法快速实用,可在1 h内完成方案论证,适用于堰塞湖应急处置的快速、定量需求。通过与参数化溃决分析方法对比,表明物理机制分析方法具有更详细的结果,可为堰塞湖应急处置关键工程措施的确定提供科学支撑。

关键词: 堰塞湖;应急处置;关键工程措施;引流槽;DB-IWHR分析方法

中图分类号:TV122.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)05-0135-07

Analysis of key engineering measures for barrier lakes:

Taking the “11.03” Baige Barrier Lake in 2018 as an example

WANG Lin¹, DUAN Qingwei², LIU Lipeng², CAI Simin¹, SUN Ping²

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: Barrier Lakes, if out of control, will pose a great threat to the downstream. Due to the sudden occurrence, the time available for emergency disposal is extremely limited, so it is urgent to take effective emergency disposal, of which the selection of key engineering measures is particularly important. By summarizing the experiences from the emergency disposal of many barrier lakes at home and abroad, we carried out a comparative analysis of key engineering measures using physically-based DB-IWHR breach and typical parametric breach methods based on the case study of Baige Barrier Lake. The results show that physically-based breach method can quantitatively and quickly determine the key engineering measure for the barrier lakes, which is the excavation of overflow channels. The overflow channel excavated in the crest of “11.03” Baige Barrier Lake in 2018 is 220 m long, 15 m deep and 42 m wide at the top, 3 m wide at the bottom. Excavating the overflow channel decreases the storage capacity of the lake from $39\,277.35 \text{ m}^3/\text{s}$ to $31\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ and the breach volume of peak flood from $8.08 \times 10^8 \text{ m}^3$ to $5.79 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively. The DB-IWHR physically-based breach model is efficient and applicable, with this model the scheme demonstration can be done within 1 hour. It is suitable for the the emergency disposal of barrier lakes. By comparing with the three typical parametric breach methods, it is shown that the physically-based breach method has better performance and more detailed results, which can provide scientific support for the selection of emergency disposal for key engineering measures.

收稿日期:2020-02-05; 修回日期:2020-04-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1501103);国家自然科学基金项目(51909214,51879284);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项目(IWHR-SKL-201906)

作者简介:王琳(1989-),女,陕西西安人,博士,讲师,主要从事堰塞湖溃坝模拟及灾害应急处置研究。

Key words: barrier lake; emergency disposal; key engineering measures; overflow channel; dam break
- Institute of Water Resources and Hydropower Research (DB - IWHR) analysis

1 研究背景

堰塞湖在库水位渗透或漫顶冲刷作用下,极易发生失控性溃决。当堰塞湖溃决时,洪水淹没灾害随着溃口的发展和溃决洪水演进传播,会酿成巨大灾难^[1]。近20年来,我国堰塞湖的发生频率较高^[2],远远超出国外平均水平。2000年4月,易贡堰塞湖^[3-4]形成,溃决流量达到 $94\ 810\ \text{m}^3/\text{s}$ 。2008年5月汶川地震造成257处堰塞湖,唐家山^[5-7]和小岗剑^[8]堰塞湖是其中洪峰流量最大的两座,其流量分别达到 $6\ 500$ 、 $3\ 950\ \text{m}^3/\text{s}$ 。2014年8月云南省鲁甸县发生“8.03”红石岩堰塞湖^[9-10],最终通过开挖8 m宽引流槽,降低了下游黄角树和天花板水电站的风险。2018年发生的金沙江“10.10”和“11.03”白格堰塞湖^[11-18]溃决流量分别达到 $10\ 000$ 和 $31\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$,转移人员41 003人,直接经济损失达 68×10^8 元。

51%的堰塞湖会在形成后的7 d内溃决^[19]。堰塞湖的发生无法确定,若能采取快速的应急处置,可以降低灾害。即使发生溃决事件,通过提前预警、人口转移等方式可以做到零死亡。开挖引流槽是堰塞湖应急处置中最重要的关键工程措施。通过开挖引流槽将白格堰塞湖基本按照预定方案溃决,从而最大限度减少下游700 km地区的灾害损失,是有效降低灾害损失的典型案例^[16]。

《堰塞湖应急处置技术导则》(SL 451 - 2009)^[20]提出需对堰塞湖应急处置关键工程措施——开挖引流槽开展溃决洪水计算,以降低堰塞湖风险。目前,堰塞湖应急处置面临的问题是:降低溃决洪水风险的关键工程措施分析方法能否满足现有实际。

Costa等^[21]认为开挖引流槽可以提高堰塞体的稳定性,Schuster等^[22]总结20个历史溃决案例中所采取的降低堰塞湖溃决风险的工程措施,Satter等^[23]阐述了过去10年中大型堰塞湖的风险降低措施。但这些成果都是根据实践经验和工程实例,为降低堰塞湖的风险提供的定性方法。由于堰塞湖形成后地质条件恶劣,道路堵塞,专业人员很难在有限的时间内获取详细数据。因此,如何快速、定量地确定降低溃决洪水风险的关键工程措施迫在眉睫。

本文归纳总结国内外堰塞湖工程处置实例,基

于堰塞湖溃决洪水分析^[24-25],提出降低堰塞湖风险的关键工程措施——开挖引流槽的快速、定量分析方法,选择参数化溃决分析方法开展关键工程措施的对比论证,期望能为今后国内外堰塞湖应急处置提供技术参考。

2 堰塞湖应急处置工程措施

2.1 常用工程措施

部分堰塞湖形成后,河道依然保持原有的下泄路径,此时并无其他泄流通道,会造成堰塞湖内持续蓄水,在形成后几天内发生溃决,造成严重的次生灾害。若地震形成的连珠式堰塞湖发生连锁溃决,其破坏力将更为巨大。例如在绵远河,仅21 km河段,2008年汶川地震时形成了“黑洞岩—小岗剑(上)—小岗剑(下)—一把刀”4个自上而下的堰塞湖,一旦处理不慎,则会造成严重灾害^[8],故工程措施的选择尤为重要。目前主要有坝前排水、开挖引流槽及爆破3种处置方案。

2.1.1 坝前排水 抽水排险技术是在条件允许的前提下,通过水泵强排堰塞湖库水,达到降低堰塞湖水位、控制风险的目的。一般对库容较小的堰塞湖可采取此方法。2004年10月23日发生的日本新潟县地震,造成了严重的灾害损失,由于11月8日东竹泽堰塞湖的水位已从144.0 m上涨至150.5 m,故采取水泵强排水措施^[26]。至11月17日,堰塞湖最高水位达157.76 m,库容约 $2.50 \times 10^6\ \text{m}^3$,对下游的威胁增加。至12月20日,水位降至144 m,很好地控制了堰塞湖的溃决风险。安装排水管道实施强排水的措施较为经济且易于实行,但由于排水管的过水能力较小,且库内水体体积较大,也会造成一定风险,并可能会产生地基侵蚀问题,危及坝体安全。因此,东竹泽堰塞湖采取了临时调整水泵排水软管位置、修补复原坝基受侵蚀之处等措施,以确保排水的顺利进行。

2.1.2 开挖引流槽 引流槽除险是国内外堰塞湖除险最为常用的技术,其基本指导思想是控制堰塞湖在库容较小、水头较低的情况下泄流。一部分堰塞湖会实施人工溃决,使库水位迅速降低,险情基本解决。白格、易贡、唐家山、肖家桥堰塞湖的除险皆属此例。以白格堰塞湖为例,2018年11月3日,“10.10”白格滑坡的残余滑坡体再次下滑,堵塞引流槽后,在原残余体基础上形成“11.03”白格堰塞

湖,如果该堰塞湖蓄满,最大库容将达 $7.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,一旦溃决将会造成极其严重的损失。因此,应急救援指挥部启动了人工干预开挖引流槽的应急处置措施。至11月11日下午,引流槽开挖完成,引流槽长220 m,槽底高程2 952.52 m,顶宽42 m,底宽3 m,如图1所示。13日13:40,堰塞湖坝前最高水位为2 956.40 m,相应库容为 $5.79 \times 10^8 \text{ m}^3$;13日18:00,溃决洪峰流量为 $31\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右^[17]。



图1 2018年“11.03”白格堰塞湖引流槽泄洪图^[16]

2.1.3 爆破 对于滑坡区河段岸坡陡峭、河谷狭窄、大石块较多、引流槽较难开挖的堰塞湖可选择爆破施工形成引流槽。在汶川地震中出现的小岗剑堰塞湖就选用此方式。6月12日10:30实施爆破后,下游汉旺水文站13:17量测的最高洪峰约为 $3\,950 \text{ m}^3/\text{s}$,随后流量逐渐减小,成功降低了小岗剑堰塞湖所造成的风险^[8]。1964年塔吉克斯坦 Zeravshan 河 ($38.3^\circ\text{N}, 72.5^\circ\text{E}$) 被 $0.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的滑坡堵塞^[27],形成220 m高、1 800 m厚、400 m宽的堰塞体。采用爆破为主,辅以推土机清土的方式施工了一条深40~50 m的引流槽,使 Zeravshan 河维持滑坡前的水位。但在爆破时要特别注意爆炸数量以及位置的选取,应避免过度地加宽和加深引流槽而引起过大的洪峰流量,对下游造成二次灾害。

2.1.4 问题探讨 堰塞湖应急处置时,工程措施并不是割裂的,坝前抽水可延缓坝前水位的上升,为后续处置措施争取时间,再开挖引流槽以确保堰塞湖的安全控泄。1987年7月,意大利 Lombardia 地区 Zandila 山发生滑坡堵塞了 Val Pola 山谷,形成了体积约 $0.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的堰塞体,坝体长达1 200 m,横跨河谷,坝体沿河谷方向厚度达2 500 m(如图2所示)^[28]。滑坡发生后,立即采取了工程措施来增加坝体的稳定性并使堰塞湖保持较低水位。首先采用水泵抽水以减缓库水位上升速度,再从坝体顶部开挖了一条2 km长的引流槽,并在下游修建了拦砂坝

(如图3所示)。与此同时在稳定坡面一侧开挖隧洞,隧洞直径为5.0和4.2 m,长3 km,容许流量达 $540 \text{ m}^3/\text{s}$,由于后序的工程处置措施完备,并未引起较大的灾害^[28]。



图2 意大利 Val Pola 山谷滑坡及其堰塞湖^[28]



图3 意大利 Val Pola 堰塞体开挖溢流槽及下游拦砂坝^[28]

2.2 关键工程措施——开挖引流槽

综上所述,在应急处置的工程措施中,无论是坝前排水或开挖引流槽,都须进行堰塞湖溃决洪水分析,其对关键工程措施方案的论证极为重要。目前应用最广泛的关键工程措施为开挖引流槽,基于经验,一般在结构较为松散的堰塞体上选择开挖浅而宽的引流槽,在稳定结构的堰塞体上选择开挖窄而深的引流槽,如图4所示。

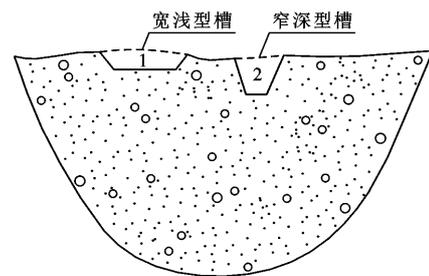


图4 堰塞湖引流槽开挖示意图

目前对开挖引流槽的方案论证多通过参数化方法,没有考虑基于物理机制的量化分析方法。堰塞湖形成后地质条件恶劣,道路堵塞,很难在有限的时间

间内获取详细的坝体数据。因此,如何快速、定量地确定降低溃决洪水风险的关键工程措施迫在眉睫。下文将介绍基于物理机制的DB-IWHR(dam break - Institute of Water Resources and Hydropower Research)溃决分析方法,根据此方法编制的程序可保证工程师在1 h内完成目标工况的计算,在堰塞湖应急处置时可快速应用。

3 堰塞湖关键工程措施快速、定量分析方法

3.1 基于物理机制的DB-IWHR溃决模型

DB-IWHR是本团队Chen等^[24]提出的基于物理机制的溃决洪水分析方法,此方法采用宽顶堰公式计算溃决流量,考虑土水作用机制,基于试验提出双曲线形式的冲蚀模型;在计算溃口扩展时,采用总应力法模拟溃口扩展^[3],并经过改进提出经验性的双曲线图表以快速模拟溃口发展^[25],模型参数可通过材料强度参数回归得到。DB-IWHR模型如下:

(1) 水量平衡。溃口流量可通过宽顶堰公式计算,溃口水量满足守恒原理,即溃口出流量等于水量的损失率,计算公式如下:

$$\begin{aligned} m_q m_b B \sqrt{2g(H-z)}^{3/2} &= -\frac{\Delta W}{\Delta t} + q \\ &= -\frac{\Delta W}{\Delta H} \frac{\Delta H}{\Delta t} + q \end{aligned} \quad (1)$$

式中: m_q 为流量系数,可取0.320~0.385; m_b 为侧向收缩系数,可取0.910~0.997; B 为溃口宽度,m; g 为重力加速度, m/s^2 ; H 为库水位高程,m; z 为溃口进口处底高程,m; W 为水库库容, m^3 ; t 为时间,s; q 为天然入库流量, m^3/s 。

(2) 冲刷。溃口冲刷的冲蚀率按双曲线模型确定,如公式(2)、(3):

$$\dot{z} = \frac{\Delta z}{\Delta t} = \Phi(\tau) = \frac{v}{a + bv} \quad (2)$$

$$v = k(\tau - \tau_c) \quad (3)$$

式中: \dot{z} 为冲蚀率, $10^{-3} mm/s$; τ 为剪应力,Pa; t 为时间,s; $\Phi(\tau)$ 为冲蚀率与剪应力的关系函数; v 为扣除临界剪应力后的剪应力,Pa; k 为为保证在剪应力的工作范围内按公式(2)计算的冲蚀率接近其渐近线 $1/b$ 的单位转换系数,可取100; a 、 b 为参数,宜通过冲刷试验确定,没有条件时也可参照类似工程确定。

(3) 双曲线溃口崩塌。当溃口不断被冲深时,会发生侧向崩塌,可通过溃口边坡稳定分析逐级确定

临界坡面和滑裂面,其计算简图如图5所示,逐级崩塌模式如公式(4)、(5):

$$B = B_0 + 2\Delta z + 2h \tan(\beta - \pi/2) \quad (4)$$

$$\beta = \beta_0 + \Delta\beta = \beta_0 + \frac{\Delta z}{m_1 \Delta z + m_2} \quad (5)$$

式中: B_0 为溃口的初始宽度,m; β_0 为初始溃口倾角, $(^\circ)$,可选择 $\beta_0 = \pi$ (天然休止角); β 为溃口倾角, $(^\circ)$; h 为水深,m,在数值计算中,可近似取前一积分步的值。

$1/m_1$ 和 $1/m_2$ 分别表示双曲线的初始切线和渐近线, m_1 、 m_2 值可根据经验公式(6)、(7)确定:

$$m_1 = 0.0073c + 0.072 \quad (6)$$

$$m_2 = 0.0332 \tan\varphi + 0.0086 \quad (7)$$

式中: c 为凝聚力,kPa; φ 为摩擦角, $(^\circ)$ 。

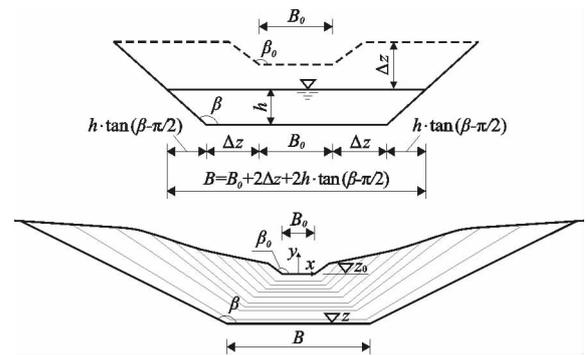


图5 溃口边坡稳定计算简图

3.2 “11.03”白格堰塞湖引流槽开挖对比分析

3.2.1 物理机制溃决分析 2018年10月10日22:06,西藏自治区昌都市和四川省甘孜自治州交界处的金沙江河道右岸发生山体滑坡,堵塞了金沙江干流,形成白格堰塞湖。至11月3日,由于原处滑坡再次发生崩塌,覆盖残余坝体,形成“11.03”白格堰塞湖。堰塞体的堰顶宽约为195 m,长约273 m,堰顶高程约2 966.5 m,堰塞体高出水面58.24 m,如果蓄满,最大库容将达 $7.9 \times 10^8 m^3$ 。“11.03”白格堰塞湖基本概况如表1所示。开挖引流槽成为降低白格堰塞湖风险的关键工程措施。11月8日,现场抢险挖掘机抵达堰塞体坝顶,通过3天的施工,一条长220 m,顶宽42 m,底宽3 m,最大深度15 m的倒梯形导流槽施工完成。堰塞体堰口高程降低至2 952.52 m。11月12日凌晨04:45,引流槽开始进水,整个引流槽泄水道在10:50被淹没;13日8:00,通过引流槽的流量增大;13日12:00,溃决冲蚀迅速加快;13日13:40,堰塞湖库容达 $5.79 \times 10^8 m^3$,相应的最高水位为2 956.40 m;13日18:00溃决洪峰

流量达到 $31\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$;14 日 8:00,退至基流^[29-30]。堰塞体过流后形成新河道,平面上呈向右岸凸出的弧形,开口宽 $180\sim 240\ \text{m}$ ^[16]。

图 6 所示为“11.03”白格堰塞湖水位、溃口流量、溃口宽度的计算结果与实测数据对比。根据实测结果,在 13 日 18 时,溃口最大洪峰达到 $31\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$,溃决库容达到 $5.79 \times 10^8\ \text{m}^3$ 。反演分析结果为 13 日 18:40 最大洪峰流量达到 $33\ 438.30\ \text{m}^3/\text{s}$,溃决库容达到 $5.21 \times 10^8\ \text{m}^3$ 。若不开挖引流槽,则在水位达到堰顶高程 $2\ 966.5\ \text{m}$ 时堰塞湖将溃决,库容将达到 $8.08 \times 10^8\ \text{m}^3$,峰值预测为 $39\ 277.35\ \text{m}^3/\text{s}$,开挖引流槽可使洪峰流量减少 26.7% ,洪量减少 39.5% 。运用基于物理机制的分析方法可快速、定量地评价堰塞湖关键工程措施,并快速确定引流槽开挖方案。

3.2.2 参数化溃决分析 将上述基于物理机制的溃决分析方法与参数化溃决分析方法进行比较,选取美国垦务局(Bureau of Reclamation, U. S. USBR)^[31]、Froehlich^[32]和 Xu 等^[33]3 组典型的参数化模型(下文分别称为 USBR 模型、Froehlich 模型、Xu 模型)分析评价引流槽的开挖措施方案。这 3 个模

型均可计算溃决流量、最终溃口宽度和溃决时间,其他参数化模型无法计算以上 3 个结果,3 个参数化溃决模型及本文 DB-IWHR 模型对白格堰塞湖溃决的计算结果如表 2 所示。

表 1 “11.03”白格堰塞湖基本概况

类别	参数	数值
滑坡体	滑坡高度/ m	800
	滑坡体高程/ m	3670
	坡顶高程/ m	3718
	滑坡体方量/ m^3	2.4×10^6
堰塞体	在堰塞体左部最高处表面测量坝顶、趾的高程/ m	3014、2897
	在堰塞体右部最低处表面测量坝顶、趾的高程/ m	2989、2934
	顺河向长度/ m	1400
堰塞湖	横河向长度/ m	600
	最高水位/ m	2956.4
	溃决库容/ m^3	5.79×10^8
	河床底高程/ m	2861

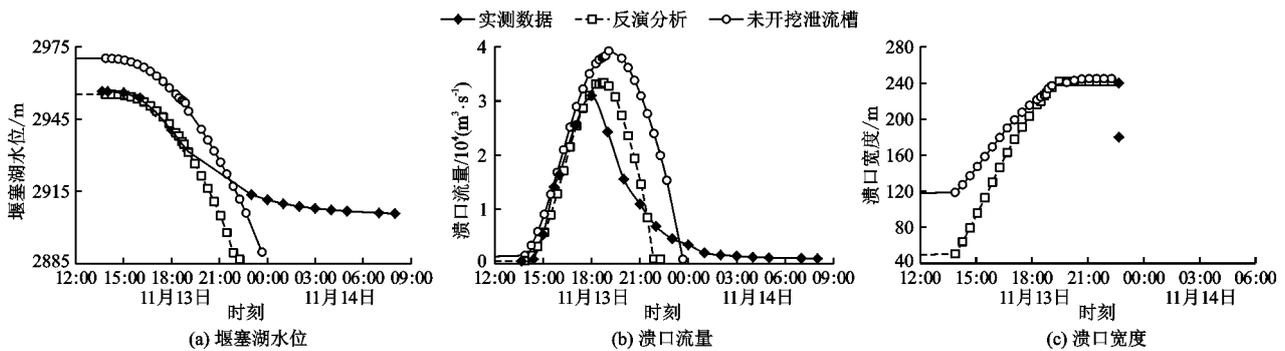


图 6 “11.03”白格堰塞湖溃决计算结果与实测数据对比

表 2 “11.03”白格堰塞湖计算结果对比

计算模型	溃决流量 $Q / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	Q 误差率/ %	溃口宽度 B / m	B 误差率/ %	到达溃决洪峰时间 T / h	T 误差率/ %
实测数据	31000.00		180~240		4.33	
USBR 模型	27196.02	-12.27	151.68	-36.80	1.67	-61.43
Froehlich 模型	19000.84	-38.71	250.18	4.24	2.80	-35.33
Xu 模型	62514.09	101.66	210.01		18.17	319.63
DB-IWHR 模型	33438.30	7.87	245.01	2.08	5.01	15.70

针对溃决流量, USBR 模型计算的结果为 $27\ 196.02\ \text{m}^3/\text{s}$,与白格堰塞湖实际溃决流量 $31\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 的误差为 -12.27% ,在误差范围内。Froehlich

模型和 Xu 模型计算的溃决流量分别为 $19\ 000.84$ 和 $62\ 514.09\ \text{m}^3/\text{s}$,误差分别为 -38.71% 和 101.66% 。USBR 模型和 Froehlich 模型溃决计算结果的误差均

在50%以内,被认为是可接受的^[34], USBR模型模拟计算溃决流量明显优于其他两个模型。而DB-IWHR计算的溃决流量为33 438.30 m³/s,误差只有7.87%。

针对溃口最终宽度,实测的溃口宽度为180~240 m, USBR模型计算的溃口平均宽度为151.68 m,相对于最大实际宽度的误差为-36.80%, Froehlich模型计算的溃口宽度为250.18m,误差为4.24%。Xu模型计算的宽度为210.01 m,在实际溃口宽度范围内。USBR模型和Froehlich模型的误差均可接受, Xu模型模拟计算的溃口宽度明显优于其他两个模型。DB-IWHR计算的溃口宽度为245.01 m³/s,误差仅为2.08%。

针对到达溃决洪峰时间, USBR模型计算的到达洪峰时间为1.67 h,与实际的误差为-61.43%, Froehlich模型和Xu模型模拟计算的到达洪峰时间分别为2.80和18.17 h,误差分别为-35.33%和319.63%,只有Froehlich模型模拟计算的到达溃决洪峰的时间可以接受。DB-IWHR计算的到达洪峰时间为5.01 h,误差为15.70%。

综上所述,在模拟溃决洪峰流量时, USBR模型明显优于其他两个模型;模拟溃口宽度时, Xu模型明显优于其他两个模型;在模拟到达洪峰时间时,只有Froehlich模型计算的误差可以接受。由表2可知,本文基于物理机制快速、定量分析的计算结果明显优于所比较的3个参数化溃决模型。此外,基于物理机制的溃决模型可以给出更详细的结果,例如溃决过程的变化过程线、溃口水位的下降过程和溃口发展过程(如图6所示)。

4 结论

(1)通过归纳总结国内外多座堰塞湖应急处置经验,在确定堰塞湖应急处置工程措施时,关键工程措施方案的论证极为重要,引流槽是目前应用最为广泛的关键工程措施。

(2)以“11.03”白格堰塞湖为例,运用本研究团队开发的基于物理机制的DB-IWHR模型开展了堰塞湖关键工程措施——开挖引流槽量化分析,发现其反演分析的溃决数据与实测溃决数据较为吻合,并可在1 h内完成方案论证,适用于堰塞湖应急处置的快速、定量需求,可用于降低堰塞湖溃决洪水风险的关键工程措施——开挖引流槽的方案论证。

(3)通过白格堰塞湖关键工程措施——开挖引流槽的方案对比论证,表明在应急处置中紧急开挖

的一条长220 m、深15 m、顶宽42 m、底宽3 m的引流槽进行泄洪,可使堰塞湖库容由 8.08×10^8 m³减小至 5.79×10^8 m³,溃决洪峰流量由39 277.35 m³/s减小至31 000 m³/s,从而降低了堰塞湖溃决洪水对下游的威胁。

(4)选择3组典型的参数化模型分析评价关键工程措施——引流槽的开挖措施方案,在模拟溃决洪峰流量时, USBR模型明显优于其他两个模型;模拟溃口宽度时, Xu模型明显优于其他两个模型;在模拟到达洪峰时间时,只有Froehlich模型计算的误差可以接受。但参数化模型无法模拟溃决相关参数的变化发展过程。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 崔鹏,邹强. 山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法[J]. 地理科学进展,2016,35(2):137-147.
- [3] WANG Lin, CHEN Zuyu, WANG Naixin, et al. Modeling lateral enlargement in dam breaches using slope stability analysis based on circular slip mode [J]. Engineering Geology, 2016, 209: 70-81
- [4] XU Qiang, SHANG Yanjun, ASCH T V, et al. Observations from the large, rapid Yigong rock slide-debris avalanche, southeast Tibet [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(5): 589-606.
- [5] LIU Ning, CHEN Zuyu, ZHANG Jianxin, et al. Draining the Tangjiashan Barrier Lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136(11): 914-923.
- [6] ZHONG Qiming, WU Weiming, CHEN Shengshui, et al. Comparison of simplified physically based dam breach models[J]. Natural Hazards, 2016, 84(2): 1385-1418.
- [7] ZHONG Qiming, CHEN Shengshui, MEI Shiang, et al. Numerical simulation of landslide dam breaching due to overtopping [J]. Landslides, 2018, 15: 1183-1192.
- [8] CHEN Shujing, CHEN Zuyu, Tao Ran, et al. Emergency response and back analysis of the failures of earthquake triggered cascade landslide dams on the Mianyuan River, China [J]. Natural Hazards Review, 2018, 19(3): 05018005.
- [9] ZHOU Xingbo, CHEN Zuyu, YU Shu, et al. Risk analysis and emergency actions for Hongshiyuan Barrier Lake [J]. Natural Hazards, 2015, 79(3): 1933-1959.
- [10] 王琳,李守义,于湫,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.
- [11] 周兴波,杜效鹤,姚虞. 金沙江白格堰塞湖溃坝洪水

- 分析[J]. 水力发电, 2019, 45(3): 8-12.
- [12] 王文科, 黄先龙. 2018年“11·3”金沙江白格堰塞湖应急处置与思考[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(12): 1-9.
- [13] 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[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1534-1551.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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: 1-13.
- [18] ZHONG Qiming, CHEN Shengshui, WANG Lin, et al. Back analysis of breaching process of Baige landslide dam [J]. Landslides, 2020, 17: 1681-1692.
- [19] 马立秋, 陈祖煜. 堰塞坝溃决洪水分析[R]. 中国水利水电科学研究院博士后出站报告, 2014.
- [20] 中华人民共和国水利部. 堰塞湖应急处置技术导则: SL 451-2009 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [21] COSTA J E, SCHUSTER R L. The formation and failure of natural dams[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100(7): 1054-1068.
- [22] SCHUSTER R L, EVANS S G. Engineering measures for the hazard reduction of landslide dams [M]. Natural and Artificial Rockslide Dams, Berlin Heidelberg: Springer, 2011.
- [23] SATTER A, KONAGAI K. Recent landslide damming events and their hazard mitigation strategies [M]. In: Moustafa, Abbas (Ed.), Advances in Geotechnical Earthquake Engineering - Soil Liquefaction and Seismic Safety of Dams and Monuments. Croatia: Intech, 2012.
- [24] 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.
- [25] CHEN Zuyu, PING Ziyi, WANG Naixin, et al. An approach to quick and easy evaluation of the dam breach flood [J]. Science China Technical Sciences, 2019, 62: 1773-1782.
- [26] 刘 蓓. 日本2004年中越地震堰塞湖的治理[J]. 水利水电技术, 2008, 39(7): 100-102.
- [27] EVANS S G, HERMANN S R L, STROM A, et al. Natural and artificial rockslide dams [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2011.
- [28] CROSTA G B, CHEN H, LEE C F. Replay of the 1987 Val Pola landslide, Italian alps [J]. Geomorphology, 2004, 60(1-2): 127-146.
- [29] 廖鸿志. 2018年10月“两江”堰塞湖应急处置工作回顾[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(12): 3-5.
- [30] 金兴平. 金沙江雅鲁藏布江堰塞湖应急处置回顾与思考[J]. 人民长江, 2019, 50(3): 5-9.
- [31] Bureau of Reclamation (USBR) U. S. Downstream hazard classification guidelines, ACER technical memorandum No. 11 [R]. Bureau of Reclamation, U. S. Department of the Interior, Denver. 1988.
- [32] FROELICH D C. Peak outflow from breached embankment dam [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1995, 121(1): 90-97.
- [33] XU Yuanhua, ZHANG Limin. Breaching parameters for earth and rockfill dams [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12): 1957-1969.
- [34] WU Weiming. Simplified physically based model of earthen embankment breaching [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(8): 837-851.