

DOI: 10.11779/CJGE2018S2017

堰塞坝漫顶溃决过程数值模拟及应用

沈光泽^{1, 2}, 盛金保^{1, 2}, 向 衍^{1, 2}, 钟启明^{1, 2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘 要: 堰塞坝作为自然形成的天然坝体, 其结构不稳定性强, 绝大多数的堰塞坝最终都将发生漫顶溃决, 一旦溃决, 将会对下游带来巨大的生命和财产损失。因此, 有必要合理预测堰塞坝的溃决流量过程, 为溃坝应急预案的编制提供理论与技术支撑。本文充分考虑堰塞坝的形态特征及坝料的物理力学特性, 建立了一个可合理模拟堰塞坝漫顶溃决过程的数学模型。该模型可较好地反映水动力条件下的溃口发展过程和下泄流量过程。选择西藏易贡堰塞坝溃坝案例对模型进行验证, 通过计算结果与实测资料的对比发现: 计算得到的溃口峰值流量、最终溃口宽度、峰值流量到达时间等参数的最大相对误差均在 $\pm 15\%$ 以内; 溃口流量过程与实测资料也吻合较好, 有效地验证了模型的合理性; 参数敏感性分析结果显示, 残留坝高、冲蚀模式(单侧与两侧冲蚀)、冲蚀系数等参数对溃坝过程均有重要影响。

关键词: 堰塞坝; 漫顶溃决; 数值模拟; 参数敏感性分析

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)S2-0082-05

作者简介: 沈光泽(1991-), 男, 黑龙江伊春人, 博士研究生, 主要从事大坝风险管理领域的研究。E-mail: gzshen@nhri.cn。

Numerical modeling of breach process of landslide dams due to overtopping and its application

SHEN Guang-ze¹, SHENG Jin-bao^{1, 2}, XIANG Yan^{1, 2}, ZHONG Qi-ming^{1, 2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: As a production of natural process, the landslide dam has poor structural stability, and most of which will finally fail due to overtopping, which will pose tremendous risks to the people and property in the inundated area. Therefore, it is of significant importance to predict the discharge hydrograph for the breach process of landslide dams so as to provide theoretical and technique supports to the dam emergency plan for dam breaching. In this study, based on the geometrical characteristics, physical and mechanical properties of a landslide dam, a numerical model for the breach process of the landslide dam due to overtopping failure is developed. This model can reasonably reflect the evolution and discharge hydrograph of the breach under the hydrodynamic condition. Meanwhile, the dam breach case of Yigong landslide dam is chosen as the representative to testify the proposed model. The comparison of the measured and calculated results shows that, the relative errors for the peak discharge, final breach widths, and time to peak are within $\pm 15\%$; furthermore, the breach discharge hydrograph is in accordance with the measured one. Thus, the rationality of the model is verified effectively. The sensitivity studies show that the dam breach process is sensitive to the residual dam height, the erosion mode (one- or two- sided breach), and the soil erodibility.

Key words: landslide dam; overtopping failure; numerical modeling; sensitivity analysis of parameters

0 引 言

堰塞坝作为自然作用的产物, 其几何特征、物质组成和工作条件与人工土石坝具有明显不同。在坝体形态上, 堰塞坝堆积体往往呈不规则形状, 沿河流运动方向大多较人工坝长, 且堰塞体内局部区域薄弱, 坝顶凹凸不平, 破坏一般首先在这些薄弱区域发生; 在坝体结构上, 因没有人工填筑过程, 大部分堰塞坝结构松散, 不均匀性强, 堰塞体土石料的级配变化范围大, 而且堰塞坝没有泄洪设施, 当上游持续来水使

得堰塞湖水位超过坝顶时, 很可能导致堰塞坝发生漫顶溃决^[1-4]。据世界范围内276座堰塞坝寿命的统计结果显示^[5], 9%的堰塞坝寿命小于1 h, 34%的小于1 d, 50%的小于7 d, 67%的小于30 d, 86%的小于1 a。一旦溃决, 就很可能给下游人民生命财产带来巨大灾难。因此, 有必要提出能合理模拟其漫顶溃决过程的数学

基金项目: 国家重点研发计划项目课题(2016YFC0401600); 国家自然科学基金项目(51539006, 51779153, 51509164, 51679151)
收稿日期: 2018-07-22

模型和相应数值计算方法, 为溃坝应急预案的编制提供理论与技术支持。

1 数学模型简介

堰塞坝漫顶溃决是一个复杂的水土耦合过程, 目前常用的模型主要有参数模型和基于物理过程的数学模型。参数模型是基于收集得到的溃坝案例数据进行统计回归, 直接得出相关参数的表达式^[6-7], 如溃口峰值流量、溃口最终宽度和溃坝历时等变量, 但大多无法考虑坝体材料的物理力学特性及上游水库的特征, 且无法获取溃口流量过程。近年来, 国内外学者建立了一系列模拟堰塞坝漫顶溃坝过程的数学模型^[8-12], 但这些模型在反映堰塞坝漫顶溃决机理方面还存在不同程度的问题。本文基于堰塞坝漫顶溃坝模型试验和现场实测结果, 考虑坝体形态特征及筑坝材料的物理力学特性, 建立了一个可模拟堰塞坝漫顶溃坝过程的数学模型, 模型各模块介绍如下。

1.1 溃口流量过程

堰塞坝溃决过程中, 堰塞湖水位是一个动态变化的过程, 需同时考虑入湖流量、溃口流量等因素, 整个过程服从水量平衡方程:

$$A_s \frac{dz_s}{dt} = Q_{in} - Q_b, \quad (1)$$

式中, t 为时间, z_s 为库水位, A_s 为水库库面面积, Q_{in} 为入库流量, Q_b 为溃口出流量。

溃口流量采用宽顶堰流公式进行计算^[13]:

$$Q_b = k_{sm} (1.7bH^{1.5} + 1.3mH^{2.5}) \quad (2)$$

式中, b 为溃口底宽, H 为溃口处水深, $H = z_s - z_b$, 其中 z_b 为溃口底部高程, m 为溃口边坡系数, k_{sm} 为尾水淹没修正系数。

1.2 冲蚀公式

坝料的冲蚀速率采用基于水流剪应力的冲蚀公式模拟^[14]:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = k_d (\tau_b - \tau_c) \quad (3)$$

式中, $d\varepsilon/dt$ 为冲蚀速率, k_d 为冲蚀系数, τ_b 为水流切应力, τ_c 为坝料临界剪应力。

溃坝水流的剪应力可采用下式计算:

$$\tau_b = \frac{\rho_w g n^2 Q_b^2}{A^2 R^{1/3}} \quad (4)$$

式中, ρ_w 为水的密度, A 为坝顶或下游坡溃口的过流面积, n 为曼宁糙率系数。

曼宁糙率系数可采用下式计算获取^[15]:

$$n = \frac{d_{50}^{1/6}}{A_n} \quad (5)$$

式中, d_{50} 为坝料平均粒径 (m), A_n 为经验系数, 模

型取值为 12^[15]。

冲蚀系数 k_d 采用 Chang 等^[16] 在汶川地震后依据现场实测资料拟合得出的经验公式计算:

$$k_d = 20075 e^{4.77 C_u^{-0.76}} \quad (6)$$

式中 e 为坝料的孔隙比, C_u 为坝料的不均匀系数, $C_u = d_{60}/d_{10}$ 。

考虑到堰塞坝材料宽级配的特征, 临界剪应力采用 Annandale^[17] 提出的针对粗颗粒材料的计算公式:

$$\tau_c = \frac{2}{3} g d_{50} (\rho_s - \rho_w) \tan \varphi \quad (7)$$

式中, ρ_s 为坝料的密度, φ 为坝料的内摩擦角。

1.3 溃口发展

假设溃口在发展过程中保持边坡坡角不变直至溃口边坡失稳, 溃口的发展情况如下图 1 所示, 溃口顶宽增量 ΔB 采用下式计算:

$$\Delta B = \frac{n_{loc} \Delta z_b}{\sin \beta} \quad (8)$$

式中, n_{loc} 为溃口位置参量 (溃口位于坝体中部取 2, 溃口位于坝肩取 1), β 为溃口边坡坡角。

溃口底宽增量 Δb 可采用下式计算:

$$\Delta b = n_{loc} \Delta z_b \left(\frac{1}{\sin \beta} - \frac{1}{\tan \beta} \right) \quad (9)$$

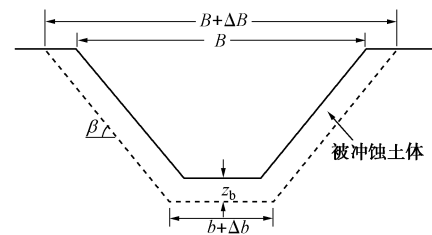


图 1 溃口顶宽和底宽发展过程

Fig. 1 Breach development process of top and bottom widths

1.4 沿河流运动方向坝体形状变化

由模型试验和现场实测数据发现^[18-19], 沿河流运动方向的坝坡在溃决过程中逐渐变缓, 模型假设坝体形状的变化如图 2 所示, 随着水流的冲蚀, 坝顶高程逐渐降低, 下游坡坡角逐渐减小, 直至溃坝结束。

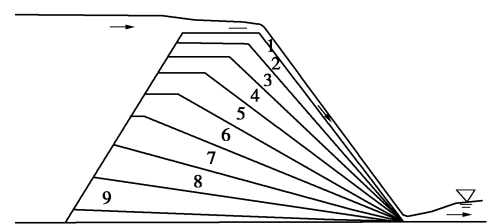


图 2 堰塞坝漫顶溃决过程中沿河流运动方向坝体形态变化

Fig. 2 Evolution of longitudinal breach profile of landslide dam due to overtopping failure (numbers denote time slots)

1.5 不完全溃坝与坝基冲蚀

不同的堰塞坝具有不同的几何尺寸、结构特征和

颗粒级配,在漫顶溃决时也具有不同的水力条件。因此溃坝后存在不完全溃坝或坝基冲蚀的情况。对于不完全溃坝,根据堰塞坝的结构特征和坝料分布规律设置残留坝高,控制溃口底部高程;对于坝基冲蚀,结合坝基材料的物理力学性质,采用冲蚀公式计算坝基的冲蚀过程。模型保证水量平衡关系,并采用尾水淹没修正系数考虑坝基冲蚀时尾水对于溃口流量过程的影响。

1.6 溃口边坡稳定性

在堰塞坝漫顶溃决过程中,随着坝顶与下游坡溃口的逐渐发展,溃口边坡可能会发生失稳,模型采用极限平衡法分析边坡稳定性,并假设破坏面为平面,当满足下式时,边坡失稳(如图3):

$$F_d > F_r \quad , \quad (10)$$

式中, F_d 为滑动力; F_r 为抗滑力。其中, F_d 与 F_r 分别表示为

$$F_d = W_s \sin \alpha = \frac{1}{2} \gamma_b H_s^2 \left(\frac{1}{\tan \alpha} - \frac{1}{\tan \beta} \right) \sin \alpha \quad , \quad (11)$$

$$F_r = W_s \cos \alpha \tan \varphi_2 + \frac{C_2 H_s}{\sin \alpha} = \frac{1}{2} \gamma_b H_s^2 \left(\frac{1}{\tan \alpha} - \frac{1}{\tan \beta} \right) \cdot \cos \alpha \tan \varphi_2 + \frac{C_2 H_s}{\sin \alpha} \quad . \quad (12)$$

式中 H_s 为溃口边坡高度; W_s 为破坏体重量; γ_b 为土体重度。

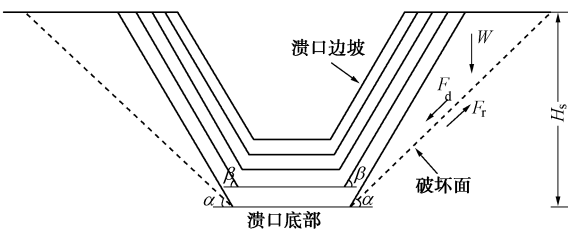


图3 溃口边坡稳定性分析

Fig. 3 Breach side slope stability analysis

1.7 模型计算流程

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口流量过程之间的耦合关系,具体求解过程如图4。

2 算例分析

2.1 参数选取

选择 2000 年西藏波密山体滑坡形成的易贡堰塞坝的溃坝过程验证模型的合理性。模型的参数选择主要基于现场实测资料和相关模型试验^[20-22]。根据现场实测资料,设置残留坝高为 23.59 m;另外,模型选择两侧冲蚀的溃决模式。各计算参数取值见表1。

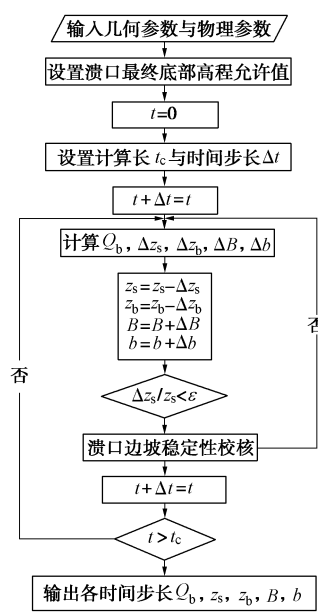


图4 模型计算流程图

Fig. 4 Flow chart of model

表1 易贡堰塞坝泄流过程计算参数

Table 1 Conditions of overtopping failure case for Yigong

landslide dam	
参数	参数取值
坝高/m	80
坝顶宽/m	200
上游坡角/(°)	5
下游坡角/(°)	8
坝轴线长度/m	1000
初始溃口深度/m	1
初始溃口底宽/m	5
初始溃口坡比/(垂向/横向)	0.5
初始上游水位/m	79.69
库面面积/(km ²)	A_s-h
坝料粒径 d_{50} /mm	8
坝料颗粒相对密度 G_s	2.65
孔隙率	0.4
黏聚力 c /kPa	13
内摩擦角 φ /(°)	37
抗冲蚀系数 k_d /(mm ³ ·N ⁻¹ ·s ⁻¹)	2.4
坝料颗粒临界剪应力 τ_c /Pa	42.6

2.2 计算结果分析

模型计算结果与实测值对比情况见表2。溃口流量过程的计算值与实测值对比情况如图5所示,由于溃口发展过程无实测值,本文提供了溃口顶宽、底宽和溃口深度发展过程的计算值(如图6),并与溃口最终实测尺寸进行比较。通过表2可以看出各参数的相对误差均小于±15%;通过图5可以看出,模型较好地反映了易贡堰塞坝的泄流全过程,计算获取的溃口流量过程与实测值基本一致。综上所述,本文模型的计算结果可较好地模拟易贡堰塞坝的泄流过程。

2.3 参数敏感性分析

为了更进一步分析计算参数对模型计算结果的影

响, 对残留坝高、冲蚀模式(单侧冲蚀与两侧冲蚀)、冲蚀系数等重要参数分别进行敏感性分析。

表 2 易贡堰塞坝泄流过程计算值与实测值对照表

Table 2 Comparison of calculated and measured data for Yigong landslide dam				
参数	$Q_p/(m^3 \cdot s^{-1})$	B_f/m	b_f/m	T_p/h
实测值	94013	—	430	7.0
计算值	91693.73	538.51	437.19	6.24
相对误差/%	-2.47	—	+1.67	-10.84

注: Q_p 为溃口峰值流量, B_f 为溃口最终顶宽, b_f 为溃口最终底宽, T_p 为峰值流量出现时间。

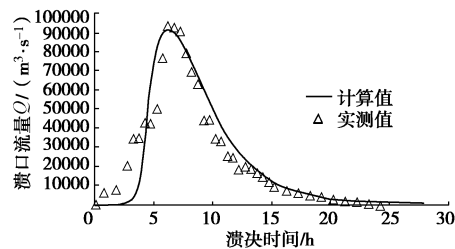


图 5 易贡堰塞坝泄流溃口流量过程比较

Fig. 5 Comparison of measured and calculated breach hydrographs for Yigong landslide dam

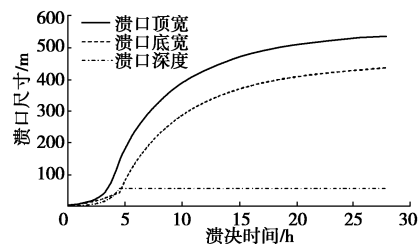


图 6 易贡堰塞坝泄流溃口发展过程计算值

Fig. 6 Calculation of Breach width evolution process for Yigong landslide dam

残留坝高分别取最终溃口底部高度为 33.6, 13.6, 0 m, 计算结果见表 3。由表 3 可以看出: 残留坝高对于溃坝过程具有重要的影响, 随着残留坝高的逐渐减小, 溃口峰值流量逐渐增加, 峰值流量到达时间逐渐提前。

表 3 残留坝高敏感性分析

Table 3 Sensitivity analysis results of final residual dam height						
残留坝高 /m	$Q_p/(m^3 \cdot s^{-1})$	误差 /%	B_f/m	误差 /%	T_p/h	误差 /%
33.6	67245.85	-26.66	527.99	-1.95%	6.40	2.62
23.6	91693.73	—	538.51	—	6.24	—
13.6	116114.03	26.63	552.94	2.68	6.20	-0.6
0	160073.63	74.57	623.83	15.84	6.15	-1.46

冲蚀模式选取单侧冲蚀和两侧冲蚀, 对比情况见表 4。由表 4 可以看出: 单侧冲蚀较两侧冲蚀的峰值流量和最终溃口顶宽偏小, 但峰值流量出现时间滞后。

表 4 冲蚀模式参数敏感性分析

Table 4 Sensitivity analysis results of erosion mode						
溃决模式	$Q_p/(m^3 \cdot s^{-1})$	误差 /%	B_f/m	误差 /%	T_p/h	误差 /%
单侧冲蚀	64916.86	-29.20	387.45	-28.05	6.68	7.03
两侧冲蚀	91693.73	—	538.51	—	6.24	—

冲蚀系数分别选取 k_d 的 0.5, 2 倍, 通过计算分析冲蚀系数对溃坝的影响。由表 5 可以看出: 随着冲蚀系数的增大, 溃口峰值流量和最终溃口顶宽逐步增大, 到达峰值流量的时间逐步提前。

表 5 冲蚀系数参数敏感性分析

Table 5 Sensitivity analysis results of soil erodibility						
K_d 的倍数	$Q_p/(m^3 \cdot s^{-1})$	误差 /%	B_f/m	误差 /%	T_p/h	误差 /%
0.5	67337.67	-26.56	382.11	-29.04	10.75	72.16
1.0	91693.73	—	538.51	—	6.24	—
2.0	124833.75	36.14	754.53	40.11	3.77	39.64

3 结 语

本文基于堰塞坝的形态特征及筑坝材料的物理力学特性, 建立了一个可模拟堰塞坝漫顶溃坝过程的数学模型。利用该模型对易贡堰塞坝进行模拟, 能够较准确地模拟溃口流量、溃口宽度、溃口下切深度随时间的发展过程; 模型计算得出的溃口峰值流量、溃口最终顶宽、到达峰值流量时间与实测值比较具有较好的吻合性。通过参数敏感性分析发现, 残留坝高、冲蚀模式(单侧冲蚀与两侧冲蚀)、冲蚀系数均对溃坝过程具有重要的影响。

参考文献:

[1] 陈生水. 土石坝溃决机理与溃坝过程模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (CHEN Sheng-shui. Breach mechanism and simulation of breach process for earth-rock dams[M]. Beijing: China Water Power Press, 2012. (in Chinese))

[2] 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 Sheng-shui, ZHAO Tian-long, ZHONG Qi-ming. Dam-break numerical model for a landslide dam and its application[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(3): 1 - 8. (in Chinese))

[3] 任 强, 陈生水, 钟启明, 等. 堰塞坝的形成机理与溃决风险[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(5): 30 - 34. (REN Qiang, CHEN Sheng-shui, ZHONG Qi-ming, et al. Formation mechanism and breaching failure risk of landslide dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(5): 30 - 34. (in Chinese))

- [4] 严祖文, 魏迎奇, 蔡红. 堰塞坝形成机理及稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, **20**(4): 55 - 59. (YAN Zu-wen, WEI Ying-qi, CAI Hong. Formation mechanism and stability analysis of landslide dam[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, **20**(4): 55 - 59. (in Chinese))
- [5] 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与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. (SHI Zhen-ming, MA Xiao-long, 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. (in Chinese))
- [6] 谢亚军, 朱勇辉, 国小龙. 土坝溃决研究进展及存在问题[J]. 长江科学院院报, 2013, **30**(4): 29 - 33. (XIE Ya-jun, ZHU Yong-hui, GUO Xiao-long. Advances and problems in earth-dam failure research[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, **30**(4): 29 - 33. (in Chinese))
- [7] ASCE/EWRI Task Committee on Dam/Levee Breach. Earthen embankment breaching[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, **137**(12): 1549 - 1564.
- [8] DAVIES T R, MANVILLE V, KUNZ M, et al. Modeling landslide dambreak flood magnitudes: case study[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, **133**(7): 713 - 720.
- [9] 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.
- [10] SHI Z M, GUAN S G, PENG M, et al. Cascading breaching of the Tangjiashan landslide dam and two smaller downstream landslide dams[J]. Engineering Geology, 2015, **193**: 445 - 458.
- [11] CHEN Z Y, MA L Q, YU S, et al. Back analysis of the draining process of the Tangjiashan landslide lake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, **141**(4): 05014011.
- [12] WANG L, CHEN Z Y, WANG N X, et al. Modeling lateral enlargement in dam breaches using slope stability analysis based on circular slip mode[J]. Engineering Geology, 2016, (209): 70 - 81.
- [13] SINGH V P. Dam breach modeling technology[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [14] US Dept of Agriculture, Natural Resources Conservation Service[R]. Washington DC: National Engineering Handbook, 1997.
- [15] WU W M. Simplified physically based model of earthen embankment breaching[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, **139**(8): 837 - 851.
- [16] CHANG D S, ZHANG L M, XU Y, et al. Field testing of erodibility of two landslide dams triggered by the 12 May Wenchuan earthquake[J]. Landslides 2011, **8**(3): 321 - 332.
- [17] ANNANDALE G W. Scour technology-mechanics and engineering practice[M]. New York: Mcgraw-Hill, 2006.
- [18] NIU Z P, XU W L, LI N W, et al. Experimental investigation of the failure of cascade landslide dams[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, **24**(3): 430 - 441.
- [19] 张婧, 曹叔尤, 杨奉广, 等. 堰塞坝泄流冲刷试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, **42**(5): 191 - 196. (ZHANG Jing, CAO Shu-you, YANG Feng-guang, et al. Experimental study on outlet and scour of blocked dam[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, **42**(5): 191 - 196. (in Chinese))
- [20] 刘宁, 杨启贵, 陈祖煜. 堰塞湖风险处置[M]. 武汉: 长江出版社, 2016. (LIU Ning, YANG Qi-gui, CHEN Zu-yu. Hazard mitigation for landslide lakes[M]. Wuhan: Changjiang Press, 2016. (in Chinese))
- [21] 王琳. 堰塞湖溃决洪水分析方法及侵蚀试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017. (WANG Lin. Study on flood analysis method and erosion test of landslide lake[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017: 33 - 48. (in Chinese))
- [22] 邢爱国, 徐娜娜, 宋新远. 易贡滑坡堰塞湖溃坝洪水分析[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(1): 78 - 83. (XING Ai-guo, XU Na-na, SONG Xin-yuan. Numerical simulation of lake water down-stream flooding due to sudden breakage of Yigong landslide dam in Tibet[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(1): 78 - 83. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)