

土石坝漫顶溃决过程数值模拟研究

李景远, 周孝德, 吴巍, 郭梦京, 吴皎

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对水动力条件变化复杂、水土耦合作用强烈的土石坝溃决过程, 结合水库调洪演算、清水冲刷以及溃口冲刷侵蚀机理, 在 Breach 模型基础上建立了土石坝漫顶溃口流量过程计算物理模型。结果表明: 模型对 JP 水库大坝溃决过程的模拟, 很好地再现了溃决洪水流量过程线、溃口展宽和下切过程, 验证了模型的合理性和应用潜力。

关键词: 土石坝; 溃坝; 漫顶; 溃口扩展; 溃坝流量过程

中图分类号: TV122.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)04-0196-04

Research on numerical simulation of break process of overtopping failure for earth-rock dam

LI Jingyuan, ZHOU Xiaode, WU Wei, GUO Mengjing, WU Jiao

(State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aimed at the break process of earth-rock dam of complicated change of water dynamics condition and strong water soil couple effect and combined with reservoir flood regulation, clear water scouring and mechanics of breach erosion invasion, this paper set up a physically based numerical model to simulate the overtopping break process of earth dam on the base of breach model. This model was applied to the simulation of break process of JP reservoir dam, and reproduced the flood flow process of dam - break, breach width and progression process and verified the rationality and application potential of the model.

Key words: earth-rock dam; dam break; overtopping simulation; breach progression; flow process of dam break

1 研究背景

土石坝是指由当地土料、石料或土石混合料填筑而成的坝, 又称当地材料坝。由于土石坝溃坝模式、溃坝路径及影响因素的复杂性, 导致溃坝问题一直是大坝建设和管理的核心问题^[1-2]。土石坝溃坝的突发性及溃决机理的复杂性, 使得各国学者对土石坝的溃坝机理及溃口发展的研究给予了极大关注^[3]。统计显示, 1954 - 2006 年间我国发生的 3 498 座溃坝案例中, 漫顶依然是最主要的原因(占 47.85%)^[1]。所以, 深入开展土石坝漫顶溃口发展规律的研究, 对于提高土石坝溃坝致灾的预报精度, 科学合理制定溃坝应急预案非常重要。

国内最新试验成果表明: 坝体溃决以“多级陡坎”发展模式为主要特征; 坝顶初始溃口内水流的流态为“双螺旋流”; 粘性较大的土坝溃口边坡将发

生倾倒破坏, 而粘性较小的土坝溃口边坡将发生剪切破坏; 溃口形态以及溃口发展速度与坝体粘性有关^[4]。

本文以构建土石坝溃决过程数值模型为目的, 结合多组计算数据, 综合水力学、泥沙侵蚀输运以及土力学边坡稳定理论建立了土石坝的漫顶溃坝模型。模拟得出的各项溃坝数据与计算所得数据对比, 二者吻合较好, 从而验证了所建模型的可行性。

2 土石坝逐渐溃决模型

分析国内外学者的研究表明: 溃口模拟的主要模拟有 Breach 模型、Dambkr 模型、Hw 模型、Beed 模型等。在众多模型中, Breach 模型具有较为简单方便的特点, 并且在国内外许多工程中得到应用, 并取得了良好的效果。为建立正确描述土石坝漫顶破坏的溃口发展数值模型, 分析结合众多学者的研究成

果^[5],本文基于 Breach 模型,选定宽顶堰流计算公式作为溃后反应溃口出流过程的流量计算公式,在模型自身溃口扩展过程中加入经验公式对其进行修正。

2.1 溃口流量计算

漫顶溃坝初期,本文在 Breach 模型基础上,对溃坝流量采用宽顶堰流量计算公式(1)计算:

$$Q_c = \sigma_s \varepsilon_1 m n b' \sqrt{2g} H_0^{1.5} \quad (1)$$

式中: σ_s 为淹没系数; ε_1 为侧收缩系数; m 为宽顶堰流量系数(一般取 0.32 ~ 0.385)^[6], $n = 1$; b' 为净宽,此处取为坝顶长度; g 为重力加速度; H_0 为上游水位的高程与坝顶高程的差值,即,坝上水头。

综合考虑 Franca M J 做的实验与溃口流量观测站结果^[7],当水库上游水位降至坝顶高程时,溃口控制断面处的流量计算采用文献^[8] 进行计算:

$$Q_b = 1.71 B_m S_{sub} H_0^{1.5} + 1.2 \tan(90^\circ - \beta) S_{sub} H_0^{2.5} \quad (2)$$

$$S_{sub} = \begin{cases} 1, & H_2 - H_c \leq \frac{2}{3} H_0 \\ 1 - 2.783 \left(\frac{H_2 - H_c}{H_0} - 0.67 \right)^3, & \\ H_2 - H_c \geq \frac{2}{3} H_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: Q_b 为溃口控制断面流量; B_m 为溃口控制断面底宽; β 为溃口边坡与水平方向夹角; S_{sub} 为下游淹没修正系数。

2.2 溃口扩展模型

2.2.1 溃口的纵向下切 由洪水冲刷计算分析可知:由于土石坝溃坝引起的洪水冲刷过程,大坝溃口控制断面的冲刷发展过程具有明显的非平衡性和非饱和特点,洪水的冲刷能力与其含沙量状态几乎没

有关系^[9]。因此,本文采用文献^[7]在清水冲刷情况下推导的河道的非平衡非饱和冲刷率的试验结果进行冲刷率计算。

$$S_r = 0.218 \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \frac{J^{0.5}}{d^{0.25}} [\gamma h u J - 0.1 \frac{\gamma}{g} (\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d)^{1.5}] \quad (4)$$

式中: S_r 为控制断面单位面积输沙率; γ 为水的容重; γ_s 为泥沙的容重; h 为有效水深; d 为坝体代表粒径; u 为溃口平均流速试验中采用 d_{50} 。

$$\Delta Y = \Delta T S_r (1 - n_0) / \gamma_s \quad (5)$$

式中: ΔY 为 ΔT 时间内溃口控制断面底部由于水流侵蚀冲刷作用而下切的深度; n_0 为大坝土体的孔隙率。

2.2.2 溃口的横向扩展 随着溃口不断发展,其底部高程不断下切降低,溃口宽度 B 也逐渐发展扩大。针对漫顶导致的土石坝溃口横向扩展的模拟,本文基于 Breach 模型^[10]的溃口扩展控制方法,并在其基础之上引入新的控制条件进行溃坝模拟研究。

首先,在溃口纵向侵蚀未达到稳定阶段前采用 Breach 模型控制方法模拟溃口横向扩展,即假定溃口初始为矩形形状,溃口底宽 B_m 随水深的变化为:

$$B_m = \frac{2}{3} B_r (H - H_c) \quad (6)$$

$$B_u = B_m + 2 \Delta H_c \tan \alpha \quad (7)$$

式中: B_r 河道水力安全系数,取值 1.8 ~ 2.5, B_r 为溃口控制断面顶宽; α 为溃口边坡与竖直方向夹角,见图 1(a)。

当溃口下切深度 H_k^c 达到临界深度 H_k^c 时溃口两侧边坡发生坍塌,形成一个垂直角 α , 初始矩形溃口变成梯形溃口,如图 1(a)所示。

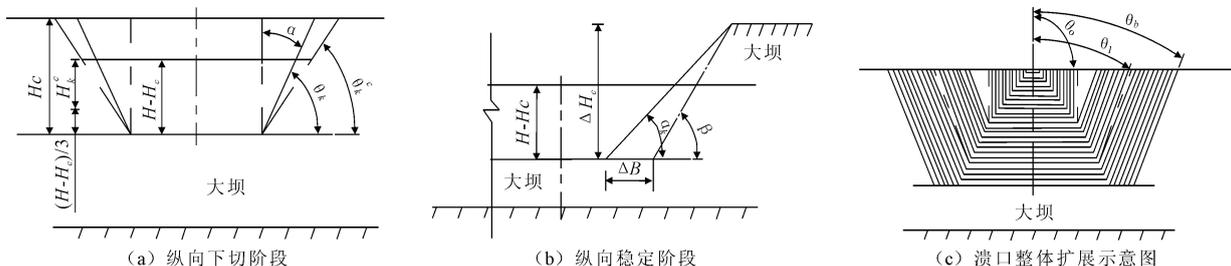


图 1 溃口横向扩展示意图

按下式确定:

$$H_k^c = \frac{4c \cos \alpha \sin \theta_k^c}{\gamma_s [1 - \cos(\theta_{k-1} - \varphi)]}, \quad k = 1, 2, 3 \quad (8)$$

式中:下标 k 为图 1(c) 中所所示的 3 种溃口边坡的代码; θ 为溃口边坡与水平方向之间的夹角。在溃口控

制断面扩展的不同阶段,溃口控制断面形状参数 θ 、 α 由 Breach 原模型给定的公式^[11] 确定:

$$\theta = \theta_k^c, \quad H_k^c \leq H_k^c < H_{k+1}^c \quad (9)$$

$$\alpha = 0.5\pi - \theta \quad (10)$$

$$\theta_0^c = 0.5\pi \quad (11)$$

$$\theta_k^c = 0.5(\theta_{k-1}^c + \varphi), k = 1, 2, 3 \quad (12)$$

$$H_k^c = \Delta H_c - (H - H_c)/3 \quad (13)$$

当 H_k^c 达到所能容许的最大 H_k^c 时, ΔH_c 达到最大, 即纵向停止发展; 其次, 当 H_k^c 达到 H_k^c 时溃口在相邻阶段发生突变, 即所有与溃口发展阶段相关的参数发生改变, 具体表现为下标 k 加 1。

当溃口纵向下切停止后, 溃口顶部冲刷扩展停止, 底部横向扩展速度借鉴经验进行控制, 溃口顶部主要考虑由于失稳坍塌引起的扩展, 引入土力学刚体极限平衡法^[12]分析各时段边坡稳定性:

$$B_{m,i+1} = B_{m,i} + 2\Delta B \quad (14)$$

$$\Delta B = 0.8Y \quad (15)$$

$$H_c = \frac{2c\sin\beta\cos\varphi}{\rho g\sin^2\left(\frac{\theta - \varphi}{2}\right)} \quad (16)$$

式中: $B_{m,i+1}$ 和 $B_{m,i}$ 分别为时段末 ΔT 和时段初的溃口底部宽度; γ_w 为坝体材料湿容重; β 为溃口边坡与水平方向夹角, 见图 1(b), H_c 为溃口发生坍塌的临界深度。

3 实例验证

3.1 模拟计算步骤

假定当发生 0.01% 洪水时, 由于风浪作用, 大坝顶中部长为 1 m 的防浪墙发生破坏形成初始溃口, 设定时间步长 $\Delta t = 0.02$ h, 溃坝计算总长 $T = 39$ h, 联立土石坝逐渐溃决模型公式, 将相关参数代入模型进行计算。本文土石坝漫顶溃决的计算程序框图如图 2 所示。本文利用广泛应用的溃口发展模型四次抛物线模型和谢任之模型对 JP 水库进行模拟, 通过在相同条件下的模拟结果对比分析, 验证模型的合理性及合理性。

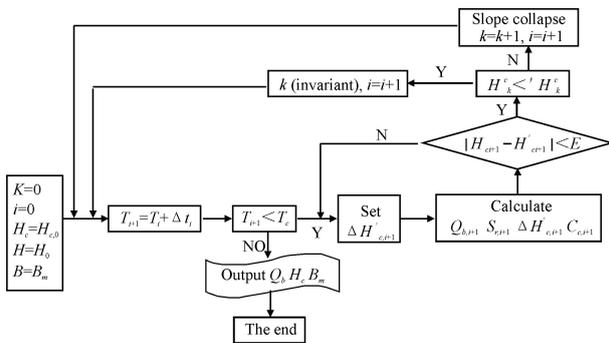


图 2 模拟流程图

3.2 实例工程情况

为了验证本文模型的合理可靠性, 针对漫顶引起

的土石坝溃坝问题, 进行了溃坝洪水过程计算。选取西安市黑河 JP 大坝, 坝顶高程为 600 m, 正常高水位为 594.0 m, 该坝最大坝高 130 m, 坝顶宽度 11 m, 坝项长 442 m, 坝体填筑材料为 $d_{50} = 60$ mm 的砂砾石, 内摩擦角 39.1° , 湿密度 2.32 t/m^3 。大坝上、下游坡降分别为 1: 2.2 和 1: 1.8, 水库蓄水库容约 2 亿 m^3 。计算时间步长 $\Delta t = 0.02$ h, 设定 $T_c = 4$ h。

3.3 结果分析

按以上基本条件, 采用本文给定的溃口控制条件的 Breach 改进模型, 对 JP 水库进行模拟计算, 得到了 JP 大坝溃坝。

洪水流量过程线以及溃口随时间发展规律等重要成果, 主要模拟计算成果如下:

(1) 溃口最终底高程约为 528.8 m (图 3), 洪峰流量时为 586.6 m。

(2) 最终溃口口门顶宽 (B_u) 和底宽 (B_m) 分别为 301、209 m (约为 1.43: 1) (图 4), 介于 1.08 ~ 1.74 之间, 溃口最终为正梯形, 洪峰流量时口门顶宽 (B_u) 和底宽 (B_m) 分别为 192、144 m。

(3) 由图 5 的溃坝水位过程线可知, 大坝溃决 3 h 后水库水位基本稳定在 532.5 m, 此时对应的水库下泄库容达到总下泄库容的 97.7%。

(4) 溃坝 19.25 h 时溃口流量最大为 84267.23 m^3/s (图 6)。

为验证模型的合理性, 本文在相同条件下采用广泛应用的溃口发展模型四次抛物线模型^[13]和谢任之斜底无阻力逐渐溃坝模型^[14]对 JP 水库进行模拟计算。采用四次抛物线模型 (采用铁道科学研究院推进最大流量公式) 对 JP 水库模拟计算得: 溃口洪峰流量时底高程为 585.0 m, 溃口口门底宽度为 139.5 m; 溃坝 18h 时溃口流量最大为 81 381.86 m^3/s 。采用谢任之模型对 JP 水库进行模拟计算得: 溃口洪峰流量时底高程为 585.9 m, 溃口口门底宽度为 156 m; 溃坝 19.4 h 时溃口流量最大为 82 967.92 m^3/s 。

洪峰流量时本文模型溃口底宽 ($B_m = 144$ m, $H_m = 586.6$ m) 与谢任之模型计算结果 ($B_m = 156$ m, $H_m = 585.9$ m) 相比较偏小, 与四次抛物线模型 ($B_m = 139.5$ m, $H_m = 585$ m) 相比略微偏高, 但是相差不大。由 3 种模型的溃口溃口流量过程线 (图 7) 可知: 大坝在溃坝初期, 溃坝流量增长较慢, 随着溃口边坡失稳溃口形状扩大, 溃口洪水流量迅速增加, 并在溃坝约 1 h 后达到最大值, 随后库水位迅速下降, 最终溃口流量逐渐趋近于上游来水流量; 溃坝最

大流量及溃坝历时 - 谢任之模型 ($82\ 967.92\ \text{m}^3/\text{s}$, $19.03\ \text{h}$), 四次抛物线模型 ($81\ 381.86\ \text{m}^3/\text{s}$, $18\ \text{h}$), 本文模型 ($87\ 467.85\ \text{m}^3/\text{s}$, $19.03\ \text{h}$)。从计算结果来看, 三组模型所得结果相近; 在溃口宽度方向发生

突变前, 溃口流量变化率较小, 即溃口深度和宽度方向相比, 洪峰泄量受溃口深度变化的敏感性较小, 这一结果与谢任之模型所得溃口流量变化规律相反, 但更符合实际^[14]。

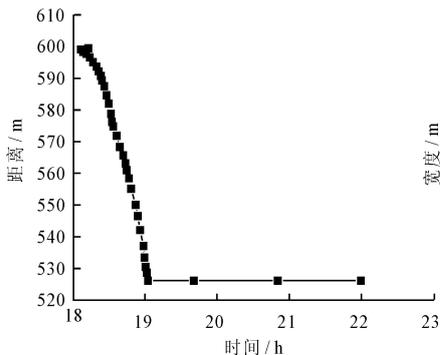


图3 溃口底高程 - 时间曲线

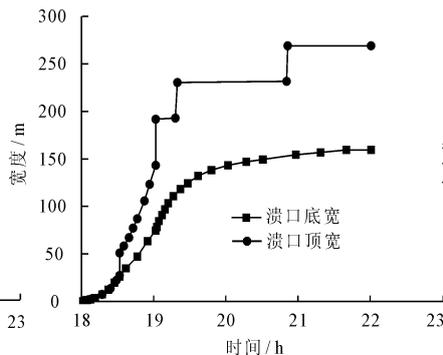


图4 溃口宽度 - 时间曲线

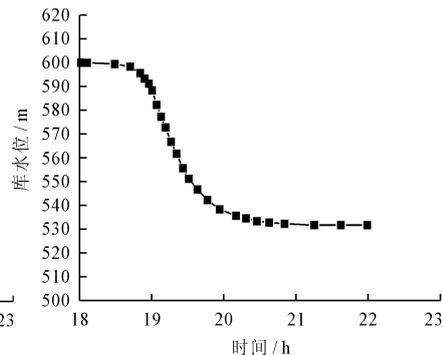


图5 水位 - 时间曲线

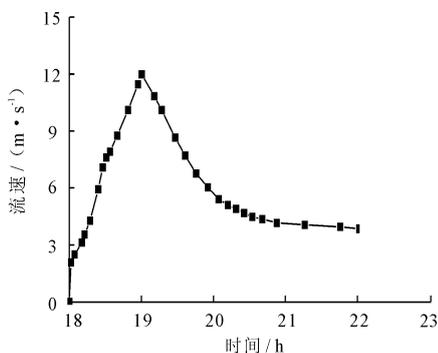


图6 溃口平均流速曲线

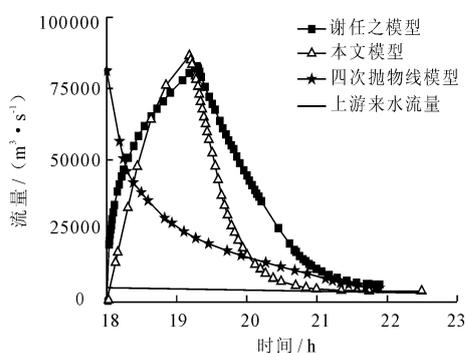


图7 溃口流量过程线

综上所述, 通过与已有模型计算结果比较, 在一定程度上表明本文模型能够更合理、可靠的反映土石坝溃坝溃口发展的真实过程。

4 结 语

本文在 Breach 模型的基础上, 引入土坡稳定公式以及清水条件下得到的河道冲刷公式作为溃口发展控制的新条件, 建立 Breach 溃口改进模型, 并应用于 JP 水库模拟, 在相同条件下本文采用广泛应用的四次抛物线模型和谢任之模型对 JP 水库进行模拟与本文模型进行对比分析确定本文模型的合理性, 本文主要结论如下:

(1) 按照本文建立的 Breach 溃口改进模型对 JP 水库模拟知: JP 水库发生溃决后, 溃坝 19.25 h 时溃口流量最大为 $84\ 267.23\ \text{m}^3/\text{s}$; 溃口最终口门顶宽、底宽以及底高程约为 301、209、528.8 m; 大坝溃决 3 h 后水库水位基本稳定在 532.5 m, 此时对应的水库下泄库容达到总下泄库容的 97.7%。

(2) 采用四次抛物线模型对 JP 水库模拟计算得: 溃口洪峰流量时底高程为 585.0 m, 溃口口门底宽度为 139.5 m; 溃坝 18h 时溃口流量最大为 $81\ 381.86\ \text{m}^3/\text{s}$ 。采用谢任之模型对 JP 水库进行模拟计算得: 溃口洪峰流量时底高程为 585.9 m, 溃口口门底宽度为 156 m; 溃坝 19.4 h 时溃口流量最大为 $82\ 967.92\ \text{m}^3/\text{s}$ 。

(3) 分析 3 种模型的计算结果 - 溃坝后的溃口底高程与宽度、溃坝最大流量及溃坝历时等计算结果表明, 计算方面 3 组模型所得结果相近, 在一定程度上表明本文模型能够更合理地反映土石坝溃坝溃口发展的真实过程。

(4) 由于验证所选实例缺乏实测数据, 仅采用已有模型计算结果进行验证, 由于溃坝模型的不确定性使得验证结果可靠性降低, 因此所建模型仍有待进一步深入验证。

隧洞 TBM 施工掘进速度,通过与实测数据比较发现,二者的相对误差值为 0.23% ~ 5.38%,平均值为 2.85%,说明预测模型用于施工进度预测和控制管理是可靠的。

参考文献:

- [1] 王梦恕,李典璜,张镜剑,等. 岩石隧道掘进机(TBM)施工及工程实例[M]. 北京:中国铁道出版社,2004.
- [2] Voerckel M. Tunnelling with TBM, state of the art and future development. Progress in Tunnelling after 2000, Proceedings of the AITES - ITA 2001 World Tunnel Congress Milan - Italy 10th - 13th June 2001, Volume II, 493 - 500.
- [3] 尹俊涛,尚彦军,傅冰骏,等. TBM 掘进技术发展及有关工程地质问题分析和对策[J]. 工程地质学报,2005,13(3):389 - 397.
- [4] Sanio H P. Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1985,22(3):153 - 161.
- [5] 何於琏. TBM 施工进度的科学预测方法[J]. 铁道工程学报,1999(2):94 - 98.
- [6] 温森,赵延喜,杨圣奇. 基于 Monte Carlo - BP 神经网络 TBM 掘进速度预测[J]. 岩土力学,2009,30(10):3127 - 3132.
- [7] Rostami J, Ozdemir L. A new model for performance pre-

dition of hard rock TBM [C]//. Proceedings of Rapid Excavation and Tunneling Conference. Las Vegas; Bowerman L D, 1993.

- [8] Rostami J, Ozdemir L, Nilson B. Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance prediction models [C]//. Proceedings of the Annual Conference of the Institution of Shaft Drilling Technology, Las Vegas, 1996.
- [9] Sapigni M, Berti M, Bethaz E, et al. TBM performance estimation using rock mass classifications [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(6):771 - 788.
- [10] 王旭,李晓,李守定. 关于用岩体分类预测 TBM 掘进速率 AR 的讨论[J]. 工程地质学报,2008,16(4):470 - 475.
- [11] 袁志发,孟德顺. 多元统计分析[M]. 陕西:天则出版社,1991.
- [12] 黄炎和,林敬兰,蔡志发,等. 影响福建省水土流失主导因子的研究[J]. 水土保持学报,2000,14(2):36 - 40 + 54.
- [13] 黄平华. 岩石掘进机(TBM)刀具消耗预测研究[J]. 隧道建设,2008,28(3):373 - 375.
- [14] 宋克志,孙谋. 复杂岩石地层盾构掘进效能影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(10):2092 - 2096.
- [15] 卢瑾,高捷,梅稚平. 岩石力学参数对 TBM 掘进速率的影响分析[J]. 水电能源科学,2010,28(7):44 - 46.

(上接第 199 页)

参考文献:

- [1] 解家毕,孙东亚. 全国水库溃坝统计及溃坝原因分析[J]. 水利水电技术,2009,40(12):124 - 128.
- [2] 徐耀,张利民. 土石坝溃口发展模式研究[J]. 中国防汛抗旱,2007(Z1):18 - 21 + 71.
- [3] 解家毕,孙东亚. 水库大坝溃决模拟方法研究进展[J]. 中国防汛抗旱,2007(Z1):13 - 17 + 56.
- [4] 张建云,李云,宣国祥,等. 不同粘性均质土坝漫顶溃决实体试验研究[J]. 中国科学(E 辑),2009,39(11):1881 - 1886.
- [5] 陈生水,钟启明,任强. 土石坝漫顶破坏溃口发展数值模型研究[J]. 水利水运工程学报,2009(4):53 - 58.
- [6] 黄金池,何晓燕,张葆蔚. 土石坝溃口流量计算模型比较研究[J]. 中国防汛抗旱,2007(Z1):8 - 12.
- [7] Franca M J, Almeida A B, A computational model of rock-fill dam breaching Caused by overtopping (RoDaB) [J].

Journal of Hydraulic Research,2004,42(2):197 - 206.

- [8] 王立辉,潘存鸿,鲁海燕,等. 堆石坝溃口流量过程计算[J]. 水电能源科学,2010,28(9):48 - 51.
- [9] 王兆印,黄金池,苏德惠. 河道冲刷和清水水流河床冲刷率[J]. 泥沙研究,1998(1):1 - 11.
- [10] Fread D L, 刘晓伟. 土坝失事洪水演算模型——Breach 模型[J]. 水文科技情报,1991(4):48 - 50
- [11] Fread D L. A breach erosion model for earthen dams, National weather service (NWS) report[R]. Nation Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, 1984.
- [12] 蒋跃楠,吴继敏. 基于能量原理的均质土坡临界坡高计算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2011,39(6):693 - 697.
- [13] 李炜. 水力计算手册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006:441 - 459.
- [14] 谢任之. 溃坝水力学[M]. 济南:山东科学技术出版社,1993.