

坝体土料黏粒质量分数对均质土坝漫顶溃决过程的影响

曹伟^{1,2}, 陈生水^{1,2}, 钟启明^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所, 江苏 南京 210029;

2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 为了研究坝体土料黏粒质量分数对均质土坝漫顶溃决过程的影响, 建立了描述均质土坝溃坝溃口发展规律的溃坝数值模型, 对实体溃坝案例进行了反馈分析, 验证了模型的合理性, 并利用该模型重点研究了坝体土料黏粒质量分数对均质土坝溃口发展规律和洪水流量过程的影响。结果表明: 坝体土料的黏粒质量分数对均质土坝的溃口发展规律、最终溃口形状以及溃口洪水流量过程具有明显影响, 土体黏粒质量分数越高, 其临界起动流速越大, 冲蚀率越小, 均质土坝溃口的发展速率越慢, 溃口边坡的失稳坍塌临界深度越大, 从而导致最终溃口形状也越小, 相应地溃口洪峰流量及最大下泄水量也越小, 溃口洪峰流量出现的时间越迟。

关键词: 均质土坝; 漫顶溃决; 黏粒质量分数; 临界起动流速; 单宽冲蚀率

中图分类号: TV443⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2013)01-0037-04

Influence of clay content on overtopping breach process of homogeneous earth dam//CAO Wei^{1,2}, CHEN Shengshui^{1,2}, ZHONG Qiming^{1,2} (1. Dam Safety Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to study the influence of clay content on the overtopping breach process of a homogeneous earth dam, a numerical model describing the principle of the breach development of the homogeneous dam was developed. The back analysis of a breach case showed that the model was reasonable. The model was employed to study the influence of clay content on the dam breach and the hydrograph of flood flow. The results show that the clay content has a significant influence on the dam breach, the breach shape, and the hydrograph of flood flow. The higher the clay content is, the larger the critical incipient velocity and the critical collapse depth of the breaches are, the smaller the erosion rate, the breach development rate, the breach shape, and the hydrograph of flood flow are, and the later the time for the peak discharge is.

Key words: homogeneous earth dam; overtopping breach; clay content; the critical incipient velocity; the erosion rate

我国已溃决的3 500多座水库大坝中, 因库水漫顶而溃决的近50%^[1]。国内外学者针对土坝的溃决机理与溃坝过程开展了卓有成效的试验研究和数值模拟^[2-5], 以期为溃坝后下游洪水演进和致灾后果计算分析提供较为合理的溃坝洪水流量过程, 但目前国内外所开展的溃坝试验, 坝体材料大多为非黏性土料, 重点在于比较土石料的密度、粒径以及级配对溃口发展规律及溃口流量过程的影响。事实上, 为降低坝体的透水性, 土石坝特别是均质土坝坝体土料一般都含有一定的黏粒, 张建云等^[6]进行了多组均质土坝大比尺漫顶溃决试验, 发现坝体土料

黏粒质量分数对溃口的发展规律和洪水流量过程具有重要影响, 但对其影响规律和机理迄今还没有进行过深入研究。为此, 本文建立了反映均质土坝溃坝溃口发展规律的溃坝数值模型, 重点研究坝体土料黏粒质量分数对均质土坝溃口的发展规律和洪水流量过程的影响机理。

1 均质土坝漫顶溃坝数值模型

均质土坝发生漫顶溃决时坝体土颗粒的受力情况如图1所示, 其起动的临界条件为

$$F_a + W' \sin \theta = F_f + F_b \sin \theta \quad (1)$$

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201001034); 国家自然科学基金(51109141, 90815024); 国家自然科学基金青年科学基金(51209140); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y312001)

作者简介: 曹伟(1984—), 男, 安徽淮北人, 博士研究生, 主要从事土石坝溃坝数值模拟研究。E-mail: jeffshiwo@yahoo.com.cn

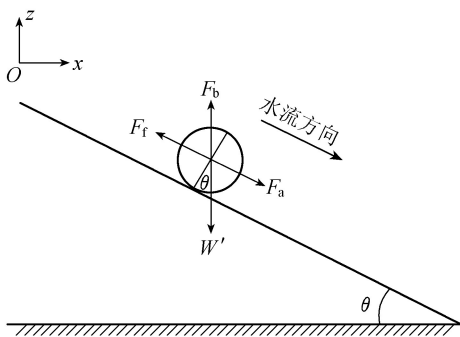


图1 坝体土颗粒在坝坡上的受力示意图

其中
$$F_a = \frac{\pi}{8g} C_a d_{50}^2 \rho_w g v^2 = \frac{\pi}{20g} d_{50}^2 \rho_w g v^2 \quad (2)$$

$$F_b = \frac{\pi}{8g} C_b d_{50}^2 \rho_w g v^2 = \frac{\pi}{80g} d_{50}^2 \rho_w g v^2 \quad (3)$$

$$F_f = \tan\varphi (W' - F_b) \cos\theta + c \quad (4)$$

式中: F_a 为水流对土颗粒的拖曳力; W' 为土体颗粒的浮重力; θ 为坝坡坡角; F_f 为土颗粒受到的摩擦力; F_b 为水流对土颗粒的上举力; C_a 为拖曳力系数, 一般取 0.4; d_{50} 为土颗粒粒径; ρ_w 为水的密度; g 为重力加速度; v 为水流流速; C_b 为上举力系数, 一般取 0.1; φ 为土颗粒间的内摩擦角; c 为土体的黏聚力。

由式(1)~(4)可得到坝体土颗粒临界起动流速为

$$v_j = \left[\frac{40gd_{50}(\rho_s g - \rho_w g)(\tan\varphi \cos\theta - \sin\theta)}{3\rho_w g(\tan\varphi \cos\theta - \sin\theta + 4)} + \frac{80gc}{\rho_w g(\tan\varphi \cos\theta - \sin\theta + 4)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中: ρ_s 为土颗粒的密度。

当土颗粒在溃坝水流作用下起动后, 坝顶溃口和坝体下游坝坡发生冲蚀, 下游坝坡的单宽冲蚀率 q_u 可采用式(6)计算:

$$q_u = 0.25 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{\frac{1}{5}} \sec\theta \frac{v_*(v_0^2 - v_j^2)}{g \left(\frac{\rho_s g}{\rho_w g} - 1 \right)} \quad (6)$$

其中

$$v_0 = \bar{v} \left(\frac{d_{90}}{H - H_0} \right)^{\frac{1}{6}}$$

$$v_* = \sqrt{g(H - H_0)J} = \bar{v} N \sqrt{g(H - H_0)}^{-\frac{1}{3}}$$

$$\bar{v} = \frac{q_0}{H - H_0}$$

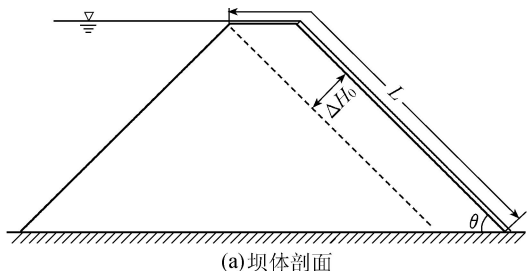
式中: d_{90} 、 d_{30} 分别为占筑坝材料总量 90%、30% 的颗粒粒径; v_0 、 v_* 、 $\bar{v}$ 分别为溃坝水流的底流速、摩阻流速和平均流速; J 为水力坡降; N 为糙率系数; H 为溃口水位高程; H_0 为溃口底部高程; q_0 为单宽流量。

如图2所示, 当漫顶溃坝发生后, 水流沿着初始溃口冲蚀下游坝坡, 溃口流量可采用宽顶堰公式计算:

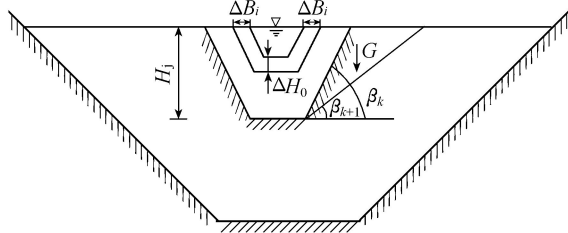
$$Q_r = MB\sqrt{2g}(H - H_0)^{\frac{3}{2}} +$$

$$2M\sqrt{2g}(H - H_0)^{\frac{5}{2}} \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \quad (7)$$

式中: M 为流量系数, 此处可取 0.5^[7]; B 为溃口宽度, 假设初始溃口宽度为 $2R$ (R 为初始渗透通道半径)。



(a) 坝体剖面



(b) 溃口断面

图2 土坝漫顶破坏溃口发展示意图

时间段 Δt 内水流下切深度增量为

$$\Delta H_0 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i Q_u}{\bar{B}_i L (1 - e)} \quad (8)$$

式中: $\bar{B}_i$ 为溃口底部平均宽度; L 为坝顶及下游坝坡的长度; e 为筑坝材料的孔隙率; Q_u 为溃口断面冲蚀率; n 为时间步长迭代的次数。

水流对坝体溃口两侧的直接冲刷形成的溃口宽度增量 ΔB 可表达为

$$\Delta B = \sum_{i=1}^n (\Delta B_i + \Delta B_i) = \sum_{i=1}^n 2\Delta B_i = 2\Delta H_0 \quad (9)$$

溃口受到水流的连续冲蚀发生垂向下切和横向扩展, 边坡也随水流冲蚀变得越来越陡, 当垂向下切深度达到临界深度时, 溃口边坡发生间歇性失稳坍塌。临界深度 H_j 可采用极限平衡方程导出^[8]:

$$H_j = \frac{4c \sin\beta_k \cos\varphi}{\rho_s g [1 - \cos(\beta_k - \varphi)]} \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (10)$$

式中: β_k 为溃口边坡临界坡角。

时间段 Δt 内水库水位变化量为

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n \left| \frac{(Q_{in} - Q_r) \Delta t_i}{S_w} \right| \quad (11)$$

式中: Q_{in} 为入库流量; S_w 为库水位 H 时的水库面积。

2 均质土坝溃坝数值模型验证

利用上述溃坝数学模型和分时段迭代计算方法,

对滁洲大洼水库实体坝溃坝案例进行反馈分析。该坝筑坝材料主要为粉质黏土,总长 120 m,坝顶高程 45.7 m,顶宽 3.0 m,最大坝高 9.7 m,正常蓄水位 44.37 m,上游坡比 1 : 2,下游坡比 1 : 2.5,选取的计算参数见表 1。设定计算时间为 1 h,时间步长为 0.02 h。计算得出的 3 种不同黏粒质量分数的均质土坝的溃口洪峰流量、出现历时以及最终溃口形状与试验实测结果对比见表 1 和表 2。可以看出,数值计算结果与试验实测结果接近,从而验证了模型的合理性,同时也发现土体黏粒质量分数对均质土坝漫顶溃决过程具有明显影响。

表 1 大洼水库均质土坝不同黏粒质量分数计算结果

黏粒质量分数/% ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪峰流量/ 量出现 历时/min	洪峰流	最大下泄 水量/ 10^4m^3	最终 溃口 顶宽/m	最终 溃口 底宽/m	最终 溃口 深度/m
11.5	46.38	12.46	6.45	15.78	11.23	5.20
17.8	4.14	13.06	0.58	6.87	4.58	2.28
33.0	2.48	14.06	0.24	1.51	1.07	0.75

表 2 大洼水库均质土坝不同黏粒质量分数溃坝试验实测结果^[6]

黏粒质量分数/%	洪峰流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	最终溃口 顶宽/m	最终溃口 底宽/m	最终溃口 深度/m
11.5	47.02	15.5	12.1	4.4
17.8	3.70	2.1	7.1	1.7
33.0	1.07	1.3	0.9	1.1

3 坝体土料黏粒质量分数对均质土坝漫顶溃坝过程的影响

3.1 黏粒质量分数对黏聚力和内摩擦角的影响

滁洲大洼水库实体坝溃坝试验采用的土料黏粒质量分数分别为 11.5%、17.8% 和 33.0%,室内三轴试验测得的黏聚力分别为 9.3 kPa、13.0 kPa 和 39.5 kPa,内摩擦角分别为 28.25°、16.00° 和 14.40°。可以看出,随着黏粒质量分数的增加,坝体土料的黏聚力呈增大趋势,内摩擦角呈减小趋势,且相关性均较好。同时黏聚力增大的幅度要明显大于内摩擦角减小的幅度,这说明黏聚力相对内摩擦角来说,对黏粒质量分数的变化更加敏感。

3.2 黏粒质量分数对临界起动流速和单宽冲蚀率的影响

利用式(5)和式(6)可计算得出坝体土料黏粒质量分数分别为 11.5%、17.8% 和 33.0% 时对应的土颗粒临界起动流速为 0.42 m/s、0.53 m/s 和 0.88 m/s,相应的单宽冲蚀率分别为 8.000 m^2/s 、0.140 m^2/s 和 0.007 m^2/s 。可以看出,随着黏粒质量分数的提高,土颗粒临界起动流速也随之增大,单位时间内单宽冲蚀率减小。值得指出的是,黏粒质量分数对单宽冲蚀率的影响比对临界起动流速的影

响明显,当黏粒质量分数达到某一较高数值时,在水流流速相同的情况下单宽冲蚀率变得很小,且随着黏粒质量分数的增加,单宽冲蚀率几乎不变。

3.3 黏粒质量分数对溃口边坡失稳坍塌的临界深度 H_j 的影响

从图 2 可以看出:

$$\sin \beta_k = \frac{H_j}{\sqrt{H_j^2 + \Delta B_i^2}} \tag{12}$$
$$\cos(\beta_k - \varphi) = \frac{\Delta B_i}{\sqrt{H_j^2 + \Delta B_i^2}} \cos \varphi + \frac{H_j}{\sqrt{H_j^2 + \Delta B_i^2}} \sin \varphi \tag{13}$$

将式(12)(13)代入式(10)中,可以计算得到土体 3 种黏粒质量分数所对应的均质土坝溃口边坡失稳坍塌的临界深度 H_j 分别为 2.2 m、5.3 m 和 8.2 m。可以发现,随着黏粒质量分数的增加,均质土坝溃口边坡发生失稳坍塌的临界深度也增大。

4 实例分析

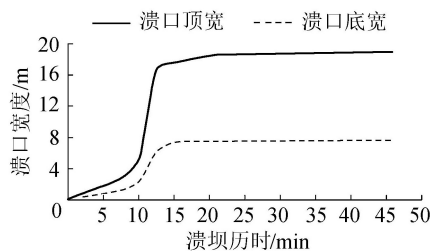
某均质土坝长 120 m,坝高 10 m,上游坡比 1 : 2,下游坡比 1 : 2.5,坝体土料塑性指数为 10.7,孔隙比 0.9,干密度 1.57 g/cm^3 ,含水率 20.08%,黏聚力 8.0 kPa,内摩擦角 28.0°。我国均质土坝土料黏粒质量分数范围通常为 10% ~ 30%,所以计算时坝体土料的黏粒质量分数分别选为 10%、20% 和 30%,计算得出的溃口发展规律、最终溃口形状以及溃口洪水流量过程和最大下泄水量分别见表 3、图 3 和图 4。

表 3 均质土坝不同黏粒质量分数计算结果对比

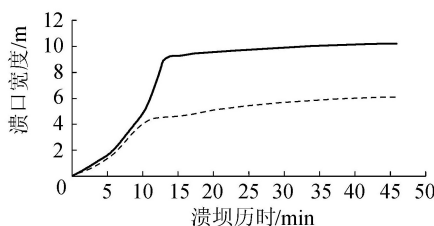
黏粒质量分数/%	洪峰流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) 出现 历时/min	洪峰流量	最大下泄水量/ 10^4m^3	最终溃口 顶宽/m	最终溃口 底宽/m	最终溃口 深度/m	临界深度/m
10	46.38	11.46	6.62	18.87	7.58	5.20	1.27
20	11.44	12.06	1.19	10.20	6.04	3.20	6.07
30	3.84	14.59	0.38	2.78	1.72	0.94	8.07

从表 3 可以发现,坝体土料的黏粒质量分数对均质土坝的溃口发展规律、最终溃口形状以及溃口洪水流量过程具有明显影响,主要表现为:

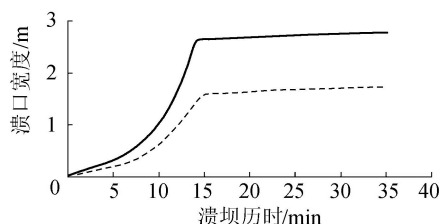
a. 坝体土料黏粒质量分数越高,均质土坝溃口的发展速率越慢,最终溃口形状也越小。坝体土料黏粒质量分数为 30% 的均质土坝最终溃口顶宽、底宽和深度分别是黏粒质量分数为 10% 的均质土坝的 6.8 倍、4.4 倍和 5.5 倍。主要原因是坝体土料黏粒质量分数越高,其抗冲蚀能力越强,特别是溃口边坡发生失稳坍塌的临界深度也明显增大。从表 3 可以看出,土体黏粒质量分数为 30% 和 20% 的均质土坝溃口边坡发生失稳坍塌的临界深度分别为 8.07 m 和 6.07 m,但计算得出的最终溃口深度仅为



(a) 黏料质量分数为10%



(b) 黏料质量分数为20%



(c) 黏料质量分数为30%

图3 不同黏粒质量分数对溃口发展规律的影响

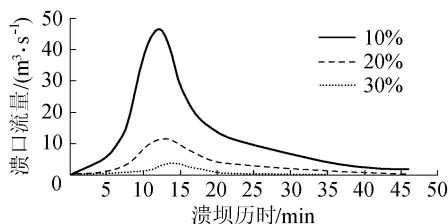


图4 不同黏粒质量分数对溃口洪水流量过程的影响

0.94 m 和 3.20 m, 即在坝体土料黏粒质量分数为 30% 和 20% 的均质土坝的溃坝过程中, 溃口边坡没有出现因失稳坍塌引起的溃口突然增大现象, 仅发生溃坝水流对溃口的冲刷。

b. 坝体土料黏粒质量分数越高, 溃口洪峰流量越小, 出现得越迟, 最大下泄水量越小。坝体土料黏粒质量分数为 30% 和 20% 的溃口洪峰流量是黏粒质量分数为 10% 的溃口洪峰流量的 8.3% 和 25%, 前者的最大下泄水量是后者的 5.7% 和 18%。

5 结 论

a. 坝体土料的黏粒质量分数对均质土坝的溃口发展规律、最终溃口形状以及溃口洪水流量过程具有明显影响。坝体土料黏粒质量分数越高, 均质土坝溃口的发展速率越慢, 最终溃口形状也越小, 相应的溃口洪峰流量及最大下泄水量也越小, 溃口洪峰流量出现的时间越迟。

b. 在均质土坝允许的坝体土料黏粒质量分数

范围内, 随着黏粒质量分数的提高, 土颗粒临界起动流速也随之增大, 单位时间内单宽冲蚀率减小。黏粒质量分数对单宽冲蚀率的影响比对起动流速的影响明显, 当黏粒质量分数达到某一较高数值时, 在水流流速相同的情况下单宽冲蚀率变得很小, 且随着黏粒质量分数的提高, 单宽冲蚀率几乎不变。

c. 均质土坝溃坝过程中, 溃口边坡的失稳坍塌临界深度与坝体土料的黏粒质量分数密切相关, 黏粒质量分数越高, 溃口边坡的失稳坍塌临界深度越大, 从而使得最终溃口形状越小, 相应的溃口洪峰流量及最大下泄水量也越小, 溃口洪峰流量出现的时间越迟。

参考文献:

- [1] 水利部大坝安全管理中心. 全国水库垮坝登记册[G]. 北京: 中华人民共和国水利部, 1981.
- [2] 李云, 李君. 溃坝模型试验研究综述[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 304-310. (LI Yun, LI Jun. Review of experimental study on dam-break[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 304-310. (in Chinese))
- [3] 朱勇辉, 廖鸿志, 吴中如. 国外土坝溃坝模拟综述[J]. 长江科学院院报, 2003, 4(2): 26-29. (ZHU Yonghui, LIAO Hongzhong, WU Zhongru. Review on oversea earth-dam-break modeling[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 4(2): 26-29. (in Chinese))
- [4] 朱勇辉, 廖鸿志, 吴中如. 土坝溃决模型及其发展[J]. 水力发电学报, 2003, 4(2): 31-37. (ZHU Yonghui, LIAO Hongzhong, WU Zhongru. The earth-dam-break model and its development[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2003, 4(2): 31-37. (in Chinese))
- [5] 穆罕默德 A. 大坝溃口形成预测精度的改进[J]. 水利水电快报, 2007, 28(7): 21-25. (MOHAMMED A. The improvement of forecast precision on dam breach[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2007, 28(7): 21-25. (in Chinese))
- [6] 张建云, 李云, 宣国祥, 等. 不同黏性均质土坝漫顶溃决实体试验研究[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(11): 1881-1886. (ZHANG Jianyun, LI Yun, XUAN Guoxiang, et al. Overtopping breaching of cohesive homogeneous earth dam with different cohesive strength. [J] Sci China Ser E: Tech Sci, 2009, 39(11): 1881-1886. (in Chinese))
- [7] 李家星, 赵振兴. 水力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2001.
- [8] SINGH V P. Dam breach modeling technology [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1996.

(收稿日期: 2012-04-23 编辑: 周红梅)