

DOI: 10.11779/CJGE201909002

# 混凝土面板砂砾石坝漫顶溃坝模型研究

钟启明<sup>1, 2</sup>, 沈光泽<sup>1</sup>

(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:** 基于沟后面板砂砾石坝溃坝案例调研资料及溃坝离心模型试验的反馈分析, 提出了一个可描述混凝土面板砂砾石坝漫顶溃决过程的数学模型。该模型的特点是选择可反映高速水流作用下推移质与悬移质运动的坝料输移公式描述宽级配砂砾料的运动特征, 以及建立可模拟面板坝每块钢筋混凝土面板在各种变化荷载作用下破坏过程的表达式。选择沟后面板砂砾石坝溃坝案例对建立的模型进行验证, 计算结果与实测结果的对比表明: 溃口峰值流量、堆石体溃口的顶宽与底宽、折断的面板的数量和各面板的破坏长度、溃坝历时等输出参数的相对误差均控制在±15%以内; 由于溃坝过程中面板不断折断, 溃口流量过程呈锯齿状抬升。另外, 参数敏感性分析的结果表明坝料的冲蚀率和级配特征对溃坝流量过程具有重要的影响。

**关键词:** 混凝土面板砂砾石坝; 漫顶溃坝; 数学模型; 参数敏感性分析

**中图分类号:** TU441      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2019)09-1591-08

**作者简介:** 钟启明(1981—), 男, 安徽省明光市人, 教授级高级工程师, 主要从事土石坝防灾减灾工程领域的研究。

E-mail: qmzhong@nhri.cn。

## Numerical model for breach of concrete face sand-gravel dams due to overtopping

ZHONG Qi-ming<sup>1, 2</sup>, SHEN Guang-ze<sup>1</sup>

(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:** Based upon the data of field investigations and back analysis of centrifugal model tests for the beach case of the Gouhou concrete face sand-gravel dam (CFSGD), a numerical model for breach of CFSGD is developed. The major highlights of the model are the adoption of soil erosion equation which can consider the erosion of bed load and suspended load to depict the erosion process of sandy gravels with a wide range of gradation, and the establishment of analogy to simulate the failure process of concrete face slabs under varying loads during the dam breach. The analysis of the case study of the Gouhou dam breach is used to testify the proposed model, and the comparison between the calculated and measured results shows the relative errors of less than ±15% for the output of breach parameters, which contain the peak breach flow, breach top and bottom widths of the rockfill body, numbers of the failed concrete face slabs and their failure lengths, as well as the failure time of dam breach. Owing to the bending of concrete face slabs, the breach hydrograph has a serrated increase. In addition, the sensitivity analysis indicates that the soil erodibility and grain-size distribution significantly affect the prediction of the breach flow of the dam.

**Key words:** concrete face sand-gravel dam; overtopping-induced dam breach; numerical simulation; sensitivity analysis of parameters

## 0 引言

混凝土面板砂砾石坝是一种以河床砂砾石开挖料为主要筑坝材料, 以上游侧钢筋混凝土面板、趾板以及各类接缝止水结构为防渗系统的土石坝<sup>[1-2]</sup>。由于砂砾石广泛分布于河床和岸坡滩地, 开采施工成本低, 且压实后具有较高的强度和变形模量, 因此日益广泛地应用在高土石坝的建设中<sup>[3-5]</sup>。但天然砂砾石料级配不连续且离散性大, 导致其抗冲蚀能力较差<sup>[4]</sup>。1993年, 中国青海省沟后水库面板砂砾石坝(最大坝高71

m)发生溃坝事故, 给人民生命财产和生态环境带来了巨大的灾难<sup>[6-7]</sup>, 这也是中国唯一的采用现代工艺填筑的混凝土面板坝溃坝案例。目前, 中国规划建设的面板砂砾石坝已经达到250 m量级, 如新疆库玛拉克河上的大石峡面板砂砾石坝(最大坝高247 m), 以及位于黄河干流的青海茨哈峡面板砂砾石坝(最大坝高

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0404805); 国家自然科学基金项目(51779153); 江苏省自然科学基金项目(BK20161121); 中国博士后科学基金项目(2019M651888)

收稿日期: 2018-06-19

256 m)<sup>[4]</sup>。虽然当前土石坝的设计水平和施工工艺都有了长足的发展, 但近年来极端气候频发, 且很多高坝大库均位于高地震烈度区, 为了防微杜渐, 开展面板砂砾石坝漫顶溃坝的研究仍具有重要的理论与实际意义。

沟后水库溃坝后, 国内多家科研单位围绕沟后面板砂砾石坝的坝料特性及溃决机理开展了大量的研究<sup>[8]</sup>; 随后, 南京水利科学研究院陈生水等利用离心机的“时空压缩效应”, 开展了面板砂砾石坝的漫顶溃决离心模型试验, 再现了面板砂砾石坝的漫顶溃决过程<sup>[9]</sup>。通过前人的研究发现: 当混凝土面板砂砾石坝发生漫顶溃决时, 漫顶水流首先对下游砂砾石堆积体进行冲蚀, 下游坝体高程虽然在不断降低, 但上游面板仍起着挡水作用, 此时漫顶水头并未因下游坝体高程降低而明显增加, 随着冲蚀的加剧, 面板的悬空长度逐渐增加, 随后在水荷载和自重荷载的共同作用下, 面板发生折断; 随着溃口宽度的逐渐增大, 相邻面板陆续折断, 并且随着溃口深度的增加, 单块面板可能发生数次折断; 这一过程循环往复, 直至库水位下降至无法使面板折断为止。

国内外关于混凝土面板堆石坝漫顶溃决数学模型的报道较少, 目前, 主要包括基于沟后面板砂砾石坝溃决案例反馈分析基础上提出的溃坝模型<sup>[10-11]</sup>, 以及Chiganne等<sup>[12]</sup>提出的简化溃坝模型和王廷等<sup>[13]</sup>建立的动床耦合分析模型。上述模型虽采用不同的冲蚀公式模拟水流对坝料的冲蚀过程, 但无法考虑宽级配砂砾石料在水流作用下的运动规律, 另外对于面板破坏过程的分析过于简化, 普遍采用分析单宽面板的受力状况模拟面板的破坏, 无法考虑面板的三维特征。

本文基于混凝土面板砂砾石坝的漫顶溃决机理和前人的研究成果, 重点考虑宽级配堆石料的物理力学特征和钢筋混凝土面板的结构特征, 揭示水土耦合条件下混凝土面板砂砾石坝的破坏规律及破坏过程, 建立可合理考虑宽级配堆石料的水流冲蚀特性、砂砾石料与混凝土面板相互作用机制的混凝土面板砂砾石坝漫顶溃坝过程数学模型。

## 1 溃坝数学模型

### 1.1 库水位变化及溃口流量

大坝漫顶溃决过程中, 上游库水位是一个动态变化的过程, 包括上游的入流和溃口及泄水建筑物的出流。在计算上游库水高程变化时, 需同时考虑入库流量、溃口流量、溢洪道和闸门下泄流量, 整个过程服从水量平衡方程:

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

式中  $A_s$  为水库库面面积;  $z_s$  为水库水位;  $Q_{in}$  为入库流量;  $Q_b$  为溃口流量;  $Q_{spill}$  为溢洪道出流量;  $Q_{sluice}$  为闸门下泄流量。

流经溃口的流量受面板形态的控制(如图 1), 本文采用如下的堰流公式进行计算:

$$Q_b = \sum_{i=1}^n c_d B_i H^{1.5} \quad (2)$$

式中,  $B_i$  为第  $i$  块面板的宽度,  $H$  为流经面板的水流深度,  $H = z_s - z_{fi}$ , 其中  $z_{fi}$  为第  $i$  块面板的顶部高程,  $c_d$  为修正系数, 此处取为  $1.7 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ <sup>[14]</sup>。

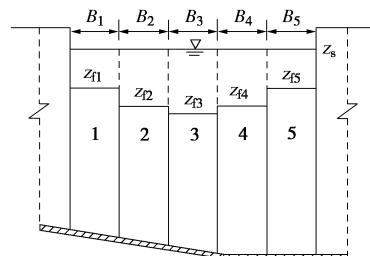


图 1 流经面板溃口的水流 (图中数字代表破坏的面板编号)

Fig. 1 Breach flow through concrete face slabs (Numbers denote serial numbers of failure concrete face slabs)

### 1.2 坝料冲蚀

面板砂砾石坝的坝料一般具有宽泛的级配, 图 2 为沟后面板坝的坝料级配曲线<sup>[8]</sup>。从图 2 中可以看出, 建坝料的最大粒径大于 70 mm, 而最小粒径小于 0.1 mm, 因此, 在漫顶水流作用下, 坝料可能以不同的运动形式存在(如推移质或悬移质)<sup>[15-17]</sup>。

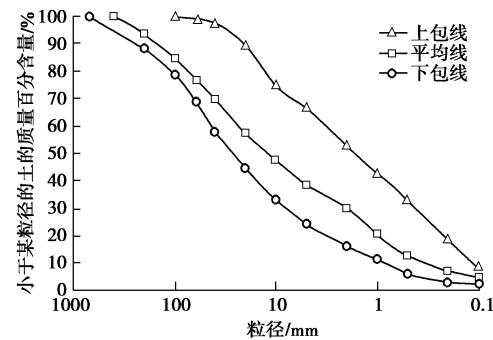


图 2 沟后面板砂砾石坝坝料级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curve of dam fillings for Gouhou concrete face sand-gravel dam

为了考虑砂砾石材料的运动特征, 采用可考虑推移质与悬移质运动特征的非平衡全沙输移公式模拟溃口水流作用下的坝料冲蚀<sup>[18]</sup>:

$$\frac{\partial (AC_t)}{\partial t} + \frac{\partial (Q_b C_t)}{\partial x} = -\frac{Q_b}{L_s} (C_t - C_{t*}) \quad (3)$$

式中  $A$  为溃口过水断面面积(如图 3);  $C_t$  为溃坝水

流的含沙浓度;  $t$  为时间;  $x$  为坝体纵断面方向;  $C_{t*}$  为平衡输沙时水流的含沙浓度;  $L_s$  为水流由非平衡输沙状态转换到平衡输沙状态时的距离, 本文采用  $L_s=6B$ <sup>[19]</sup>, 其中  $B$  为溃口处水面顶部宽度 (如图 3)。

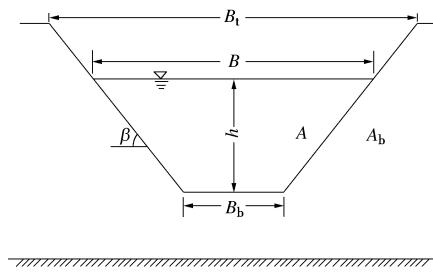


图 3 溃口断面特征参数

Fig. 3 Breach cross section with definition of variables

式 (3) 中,  $C_{t*}$  可表示为推移质浓度与悬移质浓度之和:

$$C_{t*} = \frac{q_{b*}}{Q_b} + C_* \quad , \quad (4)$$

式中,  $q_{b*}/Q_b$  为水流中推移质的浓度, 其中  $q_{b*}$  为水流中推移质的单宽输移率,  $C_*$  为水流中悬移质的浓度。

水流中悬移质部分的浓度可用下式计算<sup>[20]</sup>:

$$C_* = \frac{1}{20} \left( \frac{U^3}{gR\omega_s} \right)^{1.5} \left/ \left[ 1 + \left( \frac{1}{45} \frac{U^3}{gR\omega_s} \right)^{1.15} \right] \right. \quad , \quad (5)$$

式中,  $U$  为水流流速,  $g$  为重力加速度,  $R$  为溃口处的水力半径,  $\omega_s$  为坝料颗粒沉降速度, 可使用参考文献[21]提出的可考虑坝料颗粒形状的沉降速度公式计算。

水流中推移质的单宽输移率可用下式计算<sup>[19-22]</sup>:

$$q_{b*} = 0.0053 \left( \frac{\tau'_b}{\tau_c} - 1 \right)^{2.2} \sqrt{\left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g d_{50}^3} \quad . \quad (6)$$

式中  $\tau'_b$  为颗粒剪应力,  $\tau'_b = (n'/n)^{3/2} \tau_b$ , 其中  $n' = d_{50}^{1/6}/20$ ,  $d_{50}$  为坝料的平均粒径,  $n$  为溃口处的糙率系数;  $\tau_b$  为溃口底部的水流切应力, 可采用曼宁公式计算;  $\rho_w$  为水的密度;  $\rho_s$  为坝料的密度。

由于纵断面方向的溃口相对较短, 且溃坝水流流速较大, 因此忽略溃口流量在纵断面方向的变化, 假定溃口流量  $Q_b$  在纵断面方向上保持一致; 另外, 假设溃口水流在每个时间步长内浓度不变, 且  $C_{t*}$  和  $L_s$  为常数。则式 (3) 可简化为

$$\frac{\partial}{\partial x} (Q C_t) = -\frac{Q}{L_s} (C_t - C_{t*}) \quad . \quad (7)$$

对上式进行积分求解可以得到

$$C_t = C_{t*} + e^{-\frac{x}{L_s} + M} \quad , \quad (8)$$

式中,  $M$  为常数。在  $x$  方向选取长度为  $\Delta x$  的一段作为研究对象, 假设水流从左侧流入右侧流出, 则

$$C_{t,in} = C_{t*} + e^{-\frac{x}{L_s} + M} \quad , \quad (9)$$

$$C_{t,out} = C_{t*} + e^{-\frac{x+\Delta x}{L_s} + M} \quad , \quad (10)$$

式中,  $C_{t,in}$  与  $C_{t,out}$  分别为坝顶溃口入口与出口处的水流含沙浓度。

将式 (10) 减去式 (9), 可得

$$\begin{aligned} C_{t,out} - C_{t,in} &= e^{-\frac{x+\Delta x}{L_s} + M} - e^{-\frac{x}{L_s} + M} \\ &= e^{-\frac{x}{L_s}} \cdot e^{-\frac{\Delta x}{L_s}} - e^{-\frac{x}{L_s} + M} \\ &= (C_{t,in} - C_{t*}) e^{-\frac{\Delta x}{L_s}} - (C_{t,in} - C_{t*}) \quad , \end{aligned} \quad (11)$$

则

$$C_{t,out} = C_{t*} + (C_{t,in} - C_{t*}) e^{-\frac{\Delta x}{L_s}} \quad . \quad (12)$$

另外, 当计算下游坡出口的浓度时 (如图 4), 将式 (12) 中的  $\Delta x$  替换为  $\Delta s$ , 其中  $\Delta s$  为纵断面方向下游坡溃口的长度, 将坝顶溃口出口处的水流含沙浓度代入式 (12), 便可计算出下游坡出口处的水流含沙浓度。

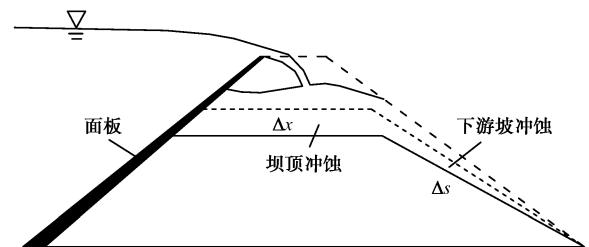


图 4 坝体纵断面坝顶与下游坡的冲蚀

Fig. 4 Erosion distribution along dam crest and downstream slope

则溃口坝料体积变化率可表示为

$$(1-p') \frac{dV_b}{dt} = Q_b \cdot (C_{t,in} - C_{t,out}) \quad , \quad (13)$$

式中,  $dV_b/dt$  为溃口坝料体积变化率,  $p'$  为坝料孔隙率。

随后将每个时间步长的坝料体积变化分解到坝顶和下游坡的溃口上, 计算得出堆石体溃口的发展过程。

### 1.3 堆石体溃口的发展

对于坝顶溃口的发展, 可以假设其为一个连续的过程, 并且溃口边坡在失稳之前保持不变 (如图 5)。溃口顶宽的增量可表示为

$$\Delta B_t = \frac{n_{loc} \Delta z_b}{\sin \beta} \quad . \quad (14)$$

式中  $\Delta B_t$  为溃口顶宽的增量;  $n_{loc}$  为溃口位置参数 (其中  $n_{loc}=1$  或 2 分别代表溃口位于坝顶中部或坝肩);  $\Delta z_b$  为溃口深度的增量;  $\beta$  为溃口边坡的坡角。



面面积;  $h_0$  为截面有效高度, 即受拉钢筋的重心至截面受压边缘的距离;  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度。

则, 第  $i$  块面板折断的条件为

$$\left. \begin{array}{l} M_i > M_{ui}, \\ B_i > w_i. \end{array} \right\} \quad (24)$$

### 1.5 数值计算方法

模型采用按时间步长迭代的数值计算方法模拟溃坝过程的水土耦合作用, 并在每个计算步长结束时对各面板是否折断与溃口边坡是否失稳进行判断, 计算流程如图 8 所示。

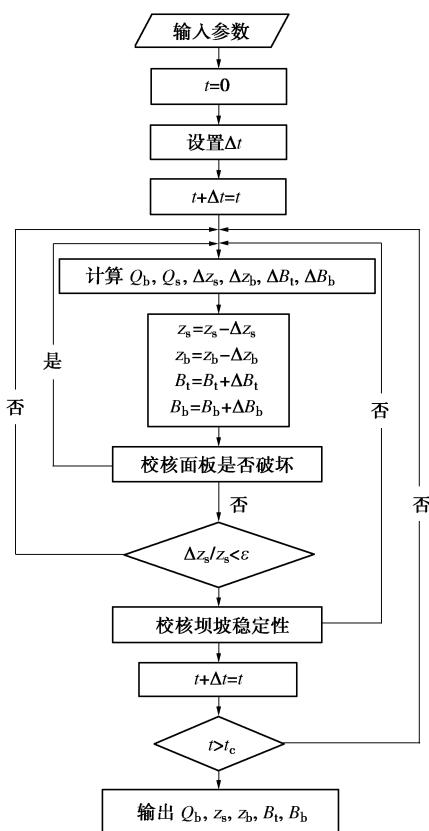


图 8 模型计算流程图

Fig. 8 Flow chart of numerical model

## 2 模型验证

本文选择沟后水库混凝土面板堆石坝溃决案例验证模型的合理性。沟后水库位于中国青海省海南藏族自治州共和县北 13 km 的恰卜恰河上, 总库容  $3.30 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 水库正常蓄水位、设计洪水位、校核洪水位均为 3278.00 m, 死水位 3241.00 m。水库大坝为面板堆石坝, 最大坝高 71.0 m, 坝顶高程 3281.00 m, 坝顶长 265.0 m, 顶宽 7.0 m, 上游坡坡比 1:1.6, 下游坡坡比 1:1.5, 坝顶有 5 m 高的混凝土防浪墙 (防浪墙顶高程 3282.00 m), 面板顶部高程 3277.20 m。大坝的典型断面如图 9 所示。

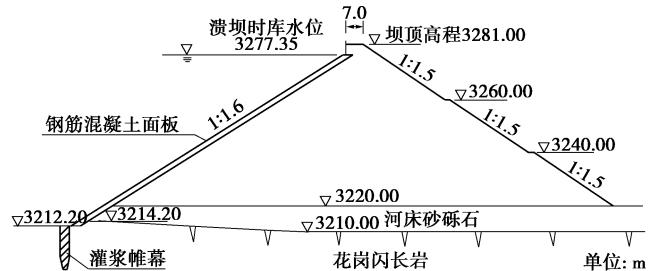


图 9 沟后面板砂砾石坝典型断面

Fig. 9 Typical cross section of Gouhou concrete face sand-gravel dam

1993 年 8 月 27 日晚间, 沟后面板砂砾石坝发生溃坝事故。调查资料显示<sup>[8]</sup>, 大坝溃决的原因主要是暴雨导致库水位迅速上涨, 坝顶防浪墙与混凝土面板的水平接缝发生渗漏 (如图 10), 导致坝顶湿陷和坝体下游坡发生后退型滑坡, 防浪墙倒塌而形成初始溃口, 随后库水漫顶导致大坝溃决。溃坝下泄水量约 261 万  $\text{m}^3$ , 溃口峰值流量约  $3800 \text{ m}^3/\text{s}$ , 溃坝历时约 2.3 h。堆石体溃口的最终顶宽与底宽分别约为 138 m 与 61 m, 溃口深度约为 60 m (如图 11); 溃口处共计有 9 块面板折断, 每块面板的宽度均为 14 m, 面板溃口的最终顶宽与底宽分别为 126 m 与 28 m (如图 11)。

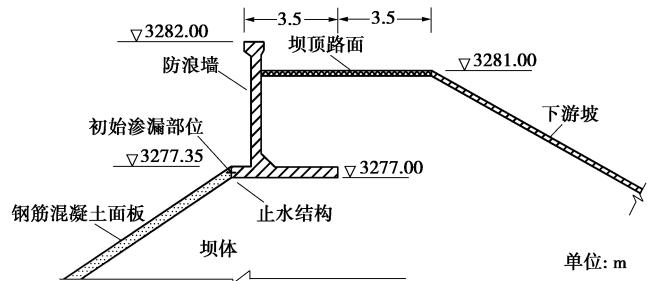


图 10 沟后面板砂砾石坝初始渗漏部位示意图

Fig. 10 Schematic of the initial breach location of Gouhou dam

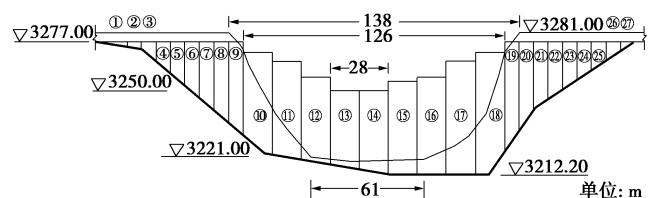


图 11 沟后面板砂砾石坝最终溃口形状(图中数字为面板标号)

Fig. 11 Final breach shape of Gouhou concrete face sand-gravel dam (numbers denote serial numbers of concrete face slabs)

### 2.1 输入参数

模型计算时, 选取坝基高程 3210.00 m 为起始点, 则坝高为 71 m, 溃坝时的初始库水位为 67.35 m (对应高程为 3277.35 m), 由于溃坝历时较短, 本次计算不考虑水库的入库流量; 由于漫顶溃决时的初始溃口是由于防浪墙倒塌造成, 因此计算时假设初始溃口的深度设定为自坝顶而下 4 m (对应高程为 3277.00 m),

初始溃口底宽假设为 8 m, 水库的库水位与库面面积的关系曲线如图 12。依据上述数学模型, 结合溃坝现场调查资料及坝料试验结果<sup>[6, 8, 24]</sup>, 并参考相关文献研究成果<sup>[25]</sup>, 本次计算的参数取值列于表 1。

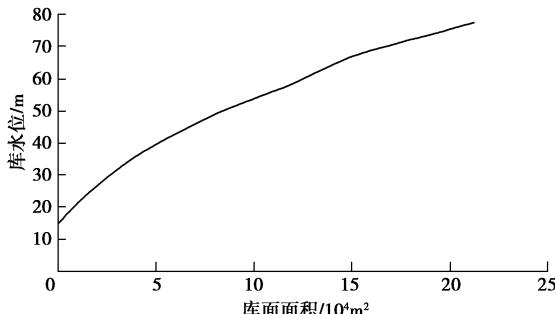


图 12 沟后水库水位 - 库面面积关系曲线

Fig. 12  $A_s-h$  curve for Gouhou reservoir

表 1 沟后面板砂砾石坝溃坝分析输入参数

Table 1 Input parameters for failure case of Gouhou concrete face sand-gravel dam

参数	取值
坝高/m	71.0
坝长/m	265.0
坝顶宽/	7.0
上游坡比(垂直/水平)	0.625
下游坡比(垂直/水平)	0.667
水库库面面积/m <sup>2</sup>	$A_s-h$
初始库水位/m	66.35
初始溃口深度/m	4.0
初始溃口底宽/m	8.0
$z_f/m$	66.00
入库流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0.0
$d_{50}/mm$	12.0
$E_1$	0.3
$E_2$	0.0047
$\gamma_d/(N\cdot m^{-3})$	$2.60 \times 10^4$
$c/kPa$	60
$\phi/(^\circ)$	40
$f_y/(N\cdot m^{-2})$	$3.0 \times 10^8$
$h_0/m$	0.175
$f_d/(N\cdot m^{-2})$	$9.6 \times 10^6$
$A_t/m^2$	0.018
$\rho_m/(kg\cdot m^{-3})$	2600.0
$p'$	0.23
时间步长/s	1.0

## 2.2 计算结果分析

表 2 给出了计算获得的溃口峰值流量 ( $Q_p$ )、堆石体溃口最终顶宽 ( $B_t$ )、堆石体溃口最终底宽 ( $B_b$ )、堆石体溃口最终深度 ( $B_d$ )、面板溃口最终顶宽 ( $B'_t$ )、面板溃口最终底宽 ( $B'_b$ )、溃口峰值流量出现时间 ( $T_p$ ) 及溃坝历时 ( $T_f$ ) 与实测值的比较结果。另外, 计算获

得的溃口流量过程与堆石体溃口发展过程如图 13, 14。

表 2 沟后面板坝溃坝案例实测结果与计算值比较

Table 2 Comparison between measured and calculated data for failure case of Gouhou concrete face sand-gravel dam

参数	实测值	计算值	相对误差/%
$Q_p/(m^3\cdot s^{-1})$	3800	4023.2	+5.9
$B_t/m$	138	122.3	-11.4
$B_b/m$	61	64.8	+6.2
$B_d/m$	60	54.7	-8.8
$B'_t/m$	126	112.0	-11.1
$B'_b/m$	28	28	0
$T_p/h$	—	1.56	—
$T_f/h$	2.33	2.51	+7.7

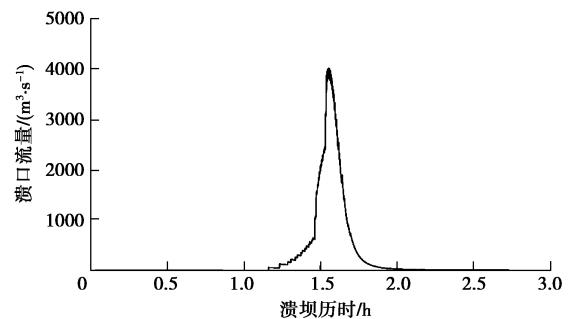


图 13 沟后面板坝溃口流量过程计算值

Fig. 13 Calculated breach hydrograph for Gouhou concrete face sand-gravel dam

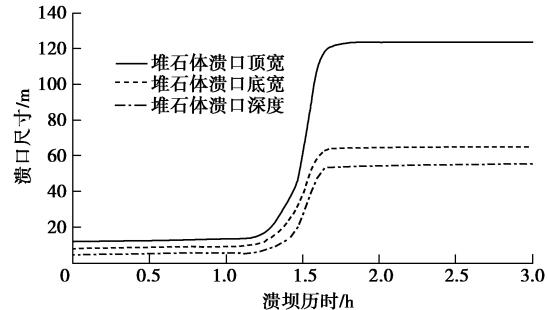


图 14 沟后面板坝堆石体溃口发展过程

Fig. 14 Breach development of sandy gravels for Gouhou concrete face sand-gravel dam

表 3 给出了沟后面板坝溃坝过程中每块面板折断情况的实测结果与计算值的比较。计算值包括每块面板的折断次数、最终折断长度, 实测值主要是每块面板的最终折断长度。

通过表 2, 3 可以看出, 计算获得的溃坝主要特征参数与实测值的相对误差控制在  $\pm 15\%$  以内。图 13 显示, 溃口流量过程呈锯齿状, 究其原因, 应为面板每次折断后, 流量突然增大所致。综合可知, 计算结果与实测值吻合较好, 验证了模型的合理性。值得一提的是, 溃坝后 1.09 h, 标号为 14 (如图 11) 的面板首先发生破坏, 折断长度为 3.1 m。随后, 相邻的面板陆续发生折断, 溃口流量迅速增大 (如图 13)。

表3 面板折断情况实测结果与计算值比较

Table 3 Comparison between measured and calculated breach evolution for each concrete face slab

面板 标号	面板折断次 数计算值	最终垂向折断 长度计算值/m	最终垂向折断 长度实测值/m	相对 误差/%
10	0	0	5	-100.0
11	2	5.3	10	-47.0
12	24	22.6	20	+13.0
13	24	22.9	27	-15.2
14	31	25.6	27	-5.2
15	31	25.6	21	+21.9
16	24	22.9	18	+27.2
17	14	13	10	+30.0
18	2	5.3	5	+6.0

### 2.3 参数敏感性分析

由于坝料的抗冲蚀特性对溃坝过程具有重要影响, 体现坝料冲蚀率的参数为  $1/L_s$ , 本节将对此参数的敏感性进行分析; 另外, 由于砂砾石料的宽级配特征, 也对平均粒径  $d_{50}$  进行参数敏感性分析。分别将计算参数变为原先的 0.5 倍或 2 倍, 分析 2 个参数对溃坝过程的影响。计算结果见表 4, 5。

表4 坝料冲蚀率对溃坝过程影响分析

Table 4 Sensitivity analysis results of erodibility of dam materials

计算参数	1/L <sub>s</sub> 放缩倍数		
	0.5	1.0	2.0
$Q_p/(m^3 \cdot s^{-1})$	2315.9	4023.2	6293.3
	-42.4%	—	+56.4%
$B_t/m$	113.8	122.3	141.3
	-7.0%	—	+15.5%
$B_t'/m$	98.0	112.0	126.0
	-12.5%	—	+12.5%
$T_p/h$	3.28	1.56	0.72
	+110.3%	—	-53.8%

表5 坝料级配特征对溃坝过程影响分析

Table 5 Sensitivity analysis results of characteristics of gradation of dam materials

计算参数	$d_{50}$ 放缩倍数		
	0.5	1.0	2.0
$Q_p/(m^3 \cdot s^{-1})$	4874.5	4023.2	3426.7
	+21.2%	—	-14.8%
$B_t/m$	130.5	122.3	112.5
	+6.7%	—	-8.0%
$B_t'/m$	126.0	112.0	98.0
	+12.5%	—	-12.5%

表4 计算结果表明, 对于坝料冲蚀率, 漏口峰值流量出现时间最为敏感, 堆石体和面板漏口最终宽度的敏感性最差, 漏口峰值流量的敏感性居中。由表5可以看出, 对于平均粒径漏口峰值流量出现时间最为敏感, 堆石体和面板漏口最终宽度的敏感性最差, 漏口峰值流量的敏感性居中。

## 3 结 论

本文基于混凝土面板砂砾石坝的溃决机理, 建立

了一个可描述混凝土面板砂砾石坝漫顶溃决的数学模型, 并采用沟后面板坝的溃决案例验证了模型的合理性。该模型的主要特点如下:

(1) 模型基于水量平衡原理和面板挡水特征, 计算溃坝过程中的库水位变化与溃口流量过程, 选择可考虑宽级配特征的坝料输移方程模拟砂砾石料的冲蚀过程, 并采用极限平衡法分析溃口边坡的稳定性。

(2) 建立了基于力矩平衡的动水压力作用下的面板破坏方程, 设定当动水压力和面板自重产生的弯矩大于面板的极限弯矩时, 面板发生折断, 以此模拟溃坝水流作用下每块面板的破坏过程, 并获取各块破坏面板的折断长度和折断次数。

(3) 模型采用按时间步长迭代的数值计算方法模拟水土耦合过程, 在每个时间步长的结束对溃口的发展过程、坍塌及面板的折断情况进行模拟分析。

(4) 选择沟后面板砂砾石坝溃坝案例来验证模型的合理性, 模型计算结果与实测值的对比表明, 溃坝输出参数的相对误差控制在±15%以内, 验证了模型的合理性。

(5) 参数敏感性分析结果表明, 漏口峰值流量出现时间对于坝料冲蚀率和平均粒径的选择最为敏感, 漏口宽度对于坝料冲蚀率和平均粒径的敏感性最差, 漏口峰值流量对于坝料冲蚀率和平均粒径的敏感性居中。

## 参 考 文 献:

- [1] 顾淦臣, 束一鸣, 沈长松. 土石坝工程经验与创新[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. (GU Gan-chen, SHU Yi-ming, SHEN Chang-song. Practice and innovation of earth-rock dam engineering[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. (in Chinese))
- [2] MODARES M, QUIROZ J E. Structural analysis framework for concrete-faced rockfill dams[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(1): 04015024.
- [3] 陈生水. 复杂条件下特高土石坝建设与长期安全保障关键技术研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(10): 1040 - 1048. (CHEN Sheng-shui. Research progresses in key technologies for construction and long-term safety protection of extra high earth-rock dams under complicated conditions[J]. Science China: Technologies Sciences, 2018, 48(10): 1040 - 1048. (in Chinese))
- [4] 陈生水, 阎志坤, 傅中志, 等. 特高面板砂砾石坝结构安全性论证[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 1949 - 1958. (CHEN Sheng-shui, YAN Zhi-kun, FU Zhong-zhi, et al. Evaluation of safety performance of extremely high

- slab-faced gravel dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(11): 1949 – 1958. (in Chinese))
- [5] GURBUZ A, PEKER I. Monitored performance of a concrete-faced sand-gravel dam[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, **30**(5): 04016011.
- [6] 汝乃华, 牛运光. 大坝事故与安全·土石坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (RU Nai-hua, NIU Yun-guang. Embankment dam · incidents and safety of large dams[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2001. (in Chinese))
- [7] ZHONG Q M, CHEN S S, DENG Z. A simplified physically-based breach model for a high concrete-faced rockfill dam: a case study[J]. Water Science and Engineering, 2018, **11**(1): 46 – 52.
- [8] 国家防汛抗旱总指挥部办公室, 水利部科学技术司. 沟后水库砂砾石面板坝: 设计、施工、运行与失事[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. (Office of the State Flood Control and Drought Relief Headquarters, Department of Science and Technology of Ministry of Water Resources. Gouhou concrete-faced rockfill dam-design, construction, operation, and failure[M]. Beijing: China Water and Power Press, 1996. (in Chinese))
- [9] 陈生水. 土石坝溃决机理与溃决过程模拟[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 and Power Press, 2012. (in Chinese))
- [10] 胡去劣, 俞 波. 面板坝溃决过程模拟计算[J]. 水动力学研究与进展, 2000, **15**(2): 16 – 176. (HU Qu-lie, YU Bo. Numerical simulation for concrete rockfill dam failure[J]. Journal of Hydrodynamics, 2000, **15**(2): 169 – 176. (in Chinese))
- [11] 陈生水, 曹 伟, 霍家平, 等. 混凝土面板砂砾石坝漫顶溃决过程数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(7): 1169 – 1175. (CHEN Sheng-shui, CAO Wei, HUO Jia-ping, et al. Numerical simulation for overtopping-induced break process of concrete-faced sandy gravel dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(7): 1169 – 1175. (in Chinese))
- [12] CHIGANNE F, MARCHE C, MAHDI T F. Evaluation of the overflow failure scenario and hydrograph of an embankment dam with a concrete upstream slope protection[J]. Natural Hazards, 2014, **71**(1): 21 – 39.
- [13] 王 廷, 沈振中. 一种模拟面板砂砾石坝漫顶溃决的动床耦合分析模型[J]. 水力学报, 2015, **46**(6): 699 – 706. (WANG Ting, SHEN Zhen-zhong. Discrimination method of bed forms based on the law of resistance[J]. Chinese Journal of Hydraulic Engineering, 2015, **46**(6): 699 – 706. (in Chinese))
- [14] SINGH V P. Dam breach modeling technology[M]. Dordrecht: Kluwer Academic, 1996.
- [15] CAO Z X. Non-capacity transport of non-uniform bed load sediment in alluvial rivers[J]. Journal of Mountain Science, 2016, **13**(3): 377 – 396.
- [16] JUEZ C, SOARES-FRAZAO S, MURILLO J, et al. Experimental and numerical simulation of bed load transport over steep slopes[J]. Journal of Hydraulic Research, 2017, **55**(4): 455 – 469.
- [17] TAN G M, FANG H W, DEY S, et al. Rui-Jin Zhang's research on sediment transport[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, **144**(6): 02518002.
- [18] WU W M. Simplified physically based model of earthen embankment breaching[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, **139**(8): 837 – 851.
- [19] WU W M. Computational river dynamics[M]. London: Taylor and Francis, 2007.
- [20] GUO J K. Logarithmic matching and its application in computational hydraulics and sediment transport[J]. Journal of Hydraulic Research, 2002, **40**(5): 555 – 565.
- [21] WU W M, WANG S S Y. Formulas for sediment porosity and settling velocity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, **132**(8): 858 – 862.
- [22] HE Z G, WU T, WENG H X, et al. Numerical simulation of dam-break flow and bed change considering the vegetation effects[J]. International Journal of Sediment Research, 2017, **32**(1): 105 – 120.
- [23] SL 191—2008 水工混凝土结构设计规范[S]. 2008. (SL 191 —2008 Design code for hydraulic concrete structure[S]. 2008. (in Chinese))
- [24] 李 雷, 盛金保. 沟后坝砂砾料的工程特性[J]. 水运科学研究, 2000(3): 27 – 32. (LI Lei, SHENG Jin-bao. Engineering behavior of gravel materials of Gouhou dam[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 2000(3): 27 – 32. (in Chinese))
- [25] XU Y, ZHANG L M. Breaching parameters for earth and rockfill dams[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(12): 1957 – 1969.