

·灌溉水源与输配水系统·

文章编号: 1672-3317(2023) Supp.1-0135-06

## 基于二维水动力模型的溃坝洪水数值模拟研究

韩仲凯, 崔魁, 张维杰\*, 安凯军, 张钊  
(山东省水利科学研究院, 济南 250013)

**摘要:**【目的】研究水库溃坝洪水影响。【方法】以辛庄水库为例, 通过建立二维水动力模型, 模拟了不同溃决方案下溃坝洪水演进过程, 计算了下游高速铁路处淹没水深、流速、冲刷深度等, 分析了溃坝洪水对下游高速铁路的安全运行影响。【结果】水库未溃决时, 溢洪道最大下泄洪水能够正常通过铁路涵洞, 对下游工程影响较小; 水库大坝正面溃决的影响要比侧面溃决的影响大, 下游部分铁路路基顶面过水, 影响铁路正常运行; 大坝溃决后最大流速是未溃决时的2.15~2.48倍, 涵洞处最大冲刷深度是未溃决时的1.56倍。【结论】二维水动力模型可较好的模拟溃坝洪水演进过程和淹没范围, 研究成果可为水库溃坝洪水灾害预防提供参考和数据支撑。

**关键词:** 溃坝洪水; 二维水动力模型; 淹没水深; 冲刷深度

中图分类号: TV66

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023376

韩仲凯, 崔魁, 张维杰, 等. 基于二维水动力模型的溃坝洪水数值模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(Supp.1): 135-140.

HAN Zhongkai, CUI Kui, ZHANG Weijie, et al. Numerical Simulation on Influence of Dam-break Flood Based on Two-dimensional Hydrodynamic Model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(Supp.1): 135-140.

### 0 引言

据统计, 我国已建成水库 9.7 万座, 总库容 9 853 亿  $m^3$ <sup>[1]</sup>。水库工程的建设提高了我国防御洪水的能力, 优化了水资源时间空间配置, 具有防洪、城乡供水、农业灌溉、水产养殖、水利发电、生态环境保护等功能, 在促进我国经济高质量发展和维护社会和谐稳定方面发挥了重要作用。然而水库运行过程中, 受水库基数大、建设年代久远、维修加固不及时、超负荷运行等因素影响, 造成部分水库溃决。据统计<sup>[2-3]</sup>, 1954—2018 年我国共有 3 541 座水库发生溃坝, 平均每年 54.5 座, 占水库总数的 0.56‰; 小型水库溃坝 3 409 座, 占溃坝水库总数的 96.27%。近年来, 受强降水等极端天气影响, 水库溃坝的风险有增高的趋势。

相关专家学者对溃坝洪水进行了一些探索和研究。罗诗怡等<sup>[4]</sup>运用 FLUENT 软件二次开发程序计算分析了混凝土面板堆石坝逐渐溃决工况下, 坝址处水深、冲刷、水面流速、溃口下切速度、溃口底高程、溃口流量和水库水位的变化情况。班华珍<sup>[5]</sup>运用

HEC-RAS 模型对土石坝溃口流量、水位和溃坝洪水演进过程进行了计算分析, 结果表明溃口流量、水位受溃坝历时、溃口最终底高程等因素影响, 溃坝洪水淹没深度等水力特征随水库溃决程度的增加而增大。张松松等<sup>[6]</sup>运用 MIKE11 软件模拟计算了不同溃坝高度工况下, 溃口及下游溃坝洪水流量、水位演进过程。马利平等<sup>[7]</sup>模拟了溃坝洪水在河道中的演进过程, 绘制了洪水速度矢量图、水深及流量过程线, 结果表明下游洪峰流量与上下游密切相关, 并不是简单的叠加计算。徐子轩<sup>[8]</sup>运用水力学公式计算了均质土坝溃坝洪水及演进过程, 划定了淹没区域。杨忠勇等<sup>[9]</sup>运用 MIKE21FM 数学模型, 计算分析了上游 4 座水库 10 种溃决工况下, 溃坝洪水对下游城市的淹没影响, 结果表明溃坝水库容积是影响城市洪水淹没历时的主要因素。郑磊等<sup>[10]</sup>计算了均质土坝水库瞬时全溃时, 坝址处的最大溃坝流量以及下游变电站处的溃坝流量、水位。

本研究以山东省临沂市辛庄水库为研究对象, 运用二维水动力模型, 模拟分析了溃坝洪水对水库下游铁路运行的影响, 对类似工程溃坝洪水分析具有一定的借鉴和参考意义。

### 1 模型原理

#### 1.1 溃口出流模型

溃口处泥沙输移计算式<sup>[11-12]</sup>如下:

收稿日期: 2023-08-18 修回日期: 2023-08-18

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2018GSF117014); 山东省水利科学研究院自选课题项目(SDSKYZX202107); 山东省省级水利科研与技术推广项目(SDSLKY201806)

作者简介: 韩仲凯(1979-), 男, 高级工程师, 从事水工水力学相关科研和技术咨询工作, E-mail: 949618539@qq.com

通信作者: 张维杰(1990-), 男, 工程师, 硕士, 从事水工水力学相关科研和技术咨询工作, E-mail: skyzhangweijie@shandong.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

$$q_s = \alpha_s U^{\beta_s}, \quad (1)$$

式中： $q_s$ 为单宽输沙量； $\alpha_s$ 为冲刷侵蚀系数； $\beta_s$ 为冲刷侵蚀指数； $U$ 为溃口平均流速。

经溃坝试验和真实溃坝案例分析，坝体溃口处出流过程可近似按照宽顶堰流进行计算，公式如下：

$$q = k_b B H^{3/2}, \quad (2)$$

式中： $q$ 为溃口出流流量； $k_b$ 为经验系数； $B$ 为溃口平均宽度； $H$ 为坝前水头。

最大溃口宽度计算公式为：

$$B_m = 0.180 3KV_r^{0.32} H_b^{0.19}, \quad (3)$$

式中： $B_m$ 为最终溃口平均宽度； $K$ 为修正系数（漫顶溃决取 1.0）； $V_r$ 为有效下泄库容； $H_b$ 为溃决有效高度。

### 1.2 溃坝洪水演进模型

溃坝洪水演进过程采用二维非线性浅水方程模拟计算，其控制方程<sup>[13-14]</sup>如下：

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial E}{\partial y} = S, \quad (4)$$

$$Q = \begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$H = \begin{bmatrix} uh \\ uq_x + gh^2/2 \\ uq_y \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$E = \begin{bmatrix} vh \\ vq_x \\ vq_y + gh^2/2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh \partial z_b / \partial x \\ -gh \partial z_b / \partial y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \\ -C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中： $h$ 为水深； $q_x$ 为  $x$  方向的单宽流量； $q_y$ 为  $y$  方向的单宽流量； $u$ 为  $x$  方向的流速； $v$ 为  $y$  方向的流速； $g$ 为重力加速度； $z_b$ 为河床底面高程； $C_f$ 为谢才系数。

对计算区域采用非线性网格进行离散<sup>[15]</sup>。

## 2 建立模型

### 2.1 工程概述

辛庄水库位于山东省临沂市临港区，属滨海水系绣针河，控制流域面积 1.03 km<sup>2</sup>，水库采用 20 年一遇洪水设计，200 年一遇洪水校核。水库总库容 50.70 万 m<sup>3</sup>，校核洪水位 123.57 m，属小（2）型水库。水库大坝为土石坝，坝长 219.00 m，坝顶高程 124.45 m。开敞式溢洪道位于水库右侧，入口底宽 12.00 m，顶高程 122.20 m。水库大坝距离下游鲁南高速铁路临沂至曲阜段最小距离为 100.00 m，铁路靠近水库段建有

3 个涵洞，涵洞尺寸如表 1 所示。



图 1 工程位置

Fig.1 Project location

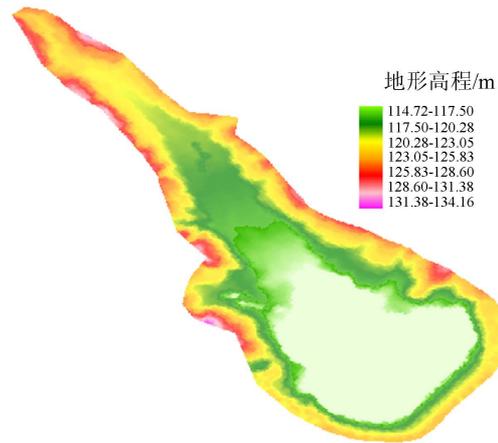


图 2 库区地形测绘图

Fig.2 Reservoir topographic map

表 1 铁路涵洞几何尺寸汇总

Table 1 Summary of railway culvert geometry m

编号	长度	宽度	高	底高程
涵洞 1	21.54	26.08	5.61	107.87
涵洞 2	21.30	17.63	5.56	104.89
涵洞 3	14.70	18.07	5.17	91.22

### 2.2 模型设置

#### 2.2.1 模拟范围及网格离散

根据库区地形测绘成果，确定本次模型计算区域为洪水可能造成的最大淹没范围，如图 3。计算区域采用非结构四边形网格划分，且充分考虑微地形影响，对计算区域采用平均尺度 3.0 m 网格进行离散，局部加密处理，共生成四边形网格单元 36 671 个，如图 4 所示。

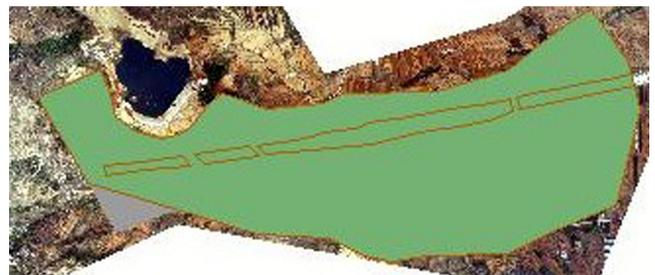


图 3 模拟范围

Fig.3 Simulation area

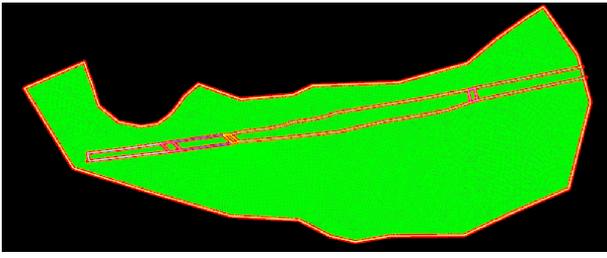


图4 计算区域网格划分

Fig.4 Calculate area meshing

2.2.2 溃坝方案确定

本次主要研究极端洪水条件下的水库溃坝影响，因此以校核洪水为基础，兼顾溃口位置对溃坝洪水的影响，制定了3种溃坝方案（图5）：

方案1：校核洪水条件下，大坝未溃决，研究溢洪道泄流对下游铁路的影响；

方案2：校核洪水条件下，大坝正面溃决，研究溃坝洪水对下游铁路的影响。

方案3：校核洪水条件下，大坝侧面溃决，研究溃坝洪水对下游铁路的影响。



图5 溃口位置

Fig.5 Levee breach location

2.2.3 边界条件及计算参数设定

根据实测库区地形图，对水库的水位-库容关系进行率定，率定后的水库特性曲线见图6。

采用200年一遇的入库洪水过程进行调洪演算，入库洪峰流量为47.05 m<sup>3</sup>/s，入库洪水总量29.00万m<sup>3</sup>，洪水历时3.42 h，洪峰出现在洪水历时1/3处。经计算，校核洪水时溢洪道最大泄量为28.82 m<sup>3</sup>/s，泄流过程如图7所示。

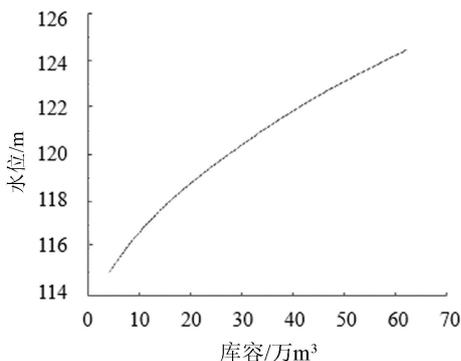


图6 水位-库容关系曲线

Fig.6 Water-storage relationship curve

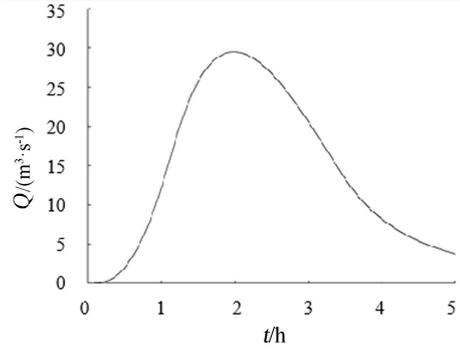


图7 溢洪道泄流过程线

Fig.7 Spillway discharge process line

校核洪水入库后，设定洪水距坝顶0.5 m时大坝溃决，溃口至高程115.00 m处停止冲刷，计算确定水库最终溃口宽度为20.0 m，此时溃口及溢洪道出流过程见图8。计算区域内，各研究方案上下游边界设定如表2。

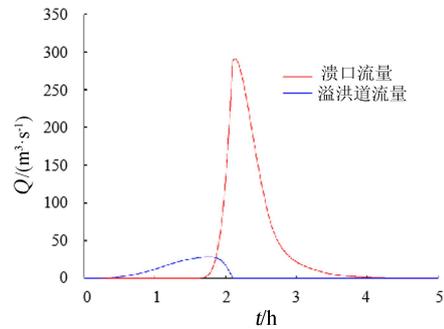


图8 溃坝洪水出流过程线

Fig.8 Flood discharge process line of break dam

表2 研究方案边界条件设定

Table 2 The boundary condition setting of the study scheme

研究方案	方案1	方案2	方案3
上游边界	溢洪道泄流过程	溃坝洪水出流过程	溃坝洪水出流过程
下游边界	自由出流	自由出流	自由出流

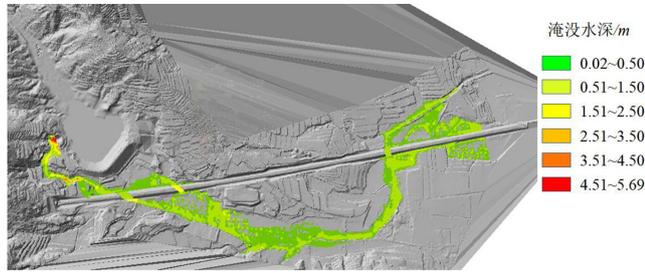
根据现场实际情况及溃坝洪水演进计算参数选取经验，选取糙率为0.035，克朗数为0.800。

3 模拟结果分析

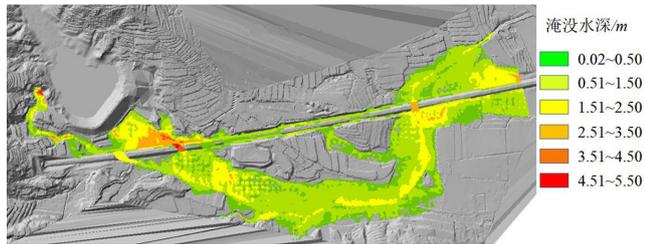
图9为不同研究方案下最大淹没水深分布图。由图9可知，大坝未溃决、溢洪道泄流条件下，下泄洪水对铁路路基影响较小，水流平稳通过铁路，大部分水流沿河道下泄通过1号涵洞，少部分水流沿铁路路基从2号涵洞流回河道，淹没水深大多在1.5 m以下；在河道尾端，部分水流通过3号涵洞沿河道运动，另一部分水流沿铁路路基低洼处运动。

大坝溃决后，部分铁路路段过水，正面溃决对铁路的影响要比侧面溃决的影响大。大坝正面溃决时，1号涵洞只承担了溢洪道泄流任务，溃坝洪水流向地势低洼的右侧，部分水流沿着路基流向下游，另一部分通过2号涵洞流回河道；水流沿路基向下游运动的

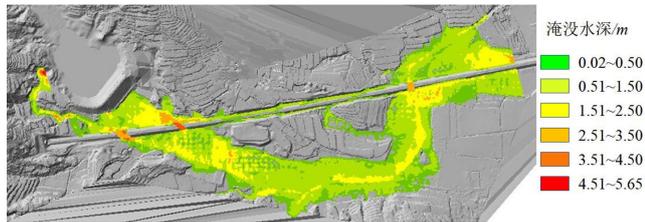
过程中, 北侧水流会翻过铁路路基, 造成部分路段过水, 最大过水深度为 0.62 m, 过流时间 32 min。大坝侧面溃决时, 溃坝洪水部分通过 1 号涵洞, 1 号涵洞过流量明显增大; 水流沿路基向下游运动的过程中, 局部路段出现短时零星过水现象, 最大过水深度 0.17 m, 过流时间 15 min。



(a) 方案 1



(b) 方案 2



(c) 方案 3

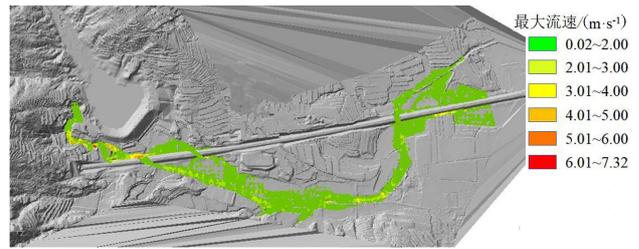
图 9 不同方案下最大淹没水深分布

Fig.9 Distribution of maximum inundation depth under different schemes

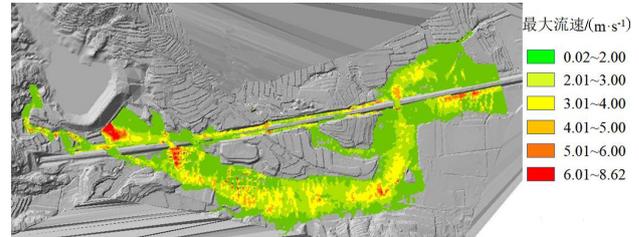
图 10 为各方案下最大流速分布, 图 11 为洪峰发生时流速等值面。由图 10、图 11 可知, 大坝未溃决、溢洪道泄流条件下, 流速大多未超过 2 m/s, 最大流速出现在溢洪道至 1 号涵洞区间内; 洪峰发生时 ( $t=2$  h), 涵洞 1 上游存在一个流速较大的区域, 平均流速超过 4 m/s, 通过涵洞 1 的平均流速约为 1.5 m/s, 而此时涵洞 2 附近的平均流速为 0.3 m/s。

大坝溃决后, 最大流速出现在溃口附近, 与正面溃决相比, 侧面溃决最大流速要大, 铁路路基漫顶流速要小。正面溃决时, 溃口处最大流速为 8.6 m/s; 洪峰发生时, 通过涵洞 1 的流速为 1.3 m/s, 通过涵洞 2 的流速为 3.2 m/s, 路基漫顶处的平均流速为 1.6 m/s。侧面溃决时, 溃口处最大流速为 9.9 m/s, 路基两侧流速也在 3.0 m/s 左右, 水流对路基造成较强冲刷; 洪峰发生时, 通过涵洞 1 的流速为 1.6 m/s, 通过涵洞 2

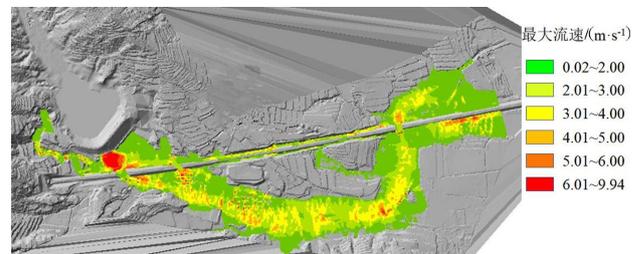
的流速为 2.7 m/s, 路基漫顶处的平均流速为 0.6 m/s。



(a) 方案 1



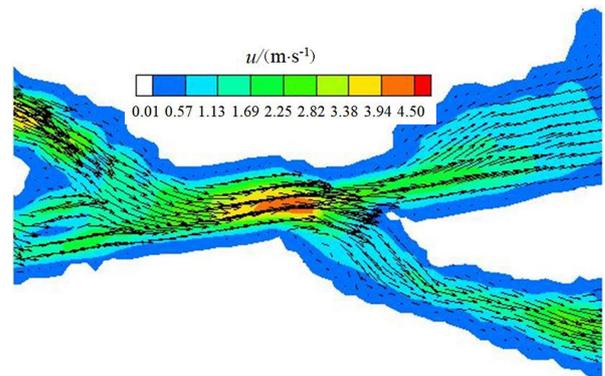
(b) 方案 2



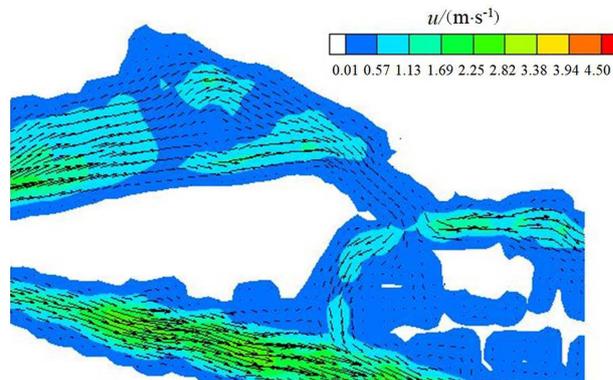
(c) 方案 3

图 10 不同方案下最大流速分布 (单位: m/s)

Fig.10 Maximum velocity distribution under different schemes



(a) 方案 1 (涵洞 1)



(b) 方案 1 (涵洞 2)

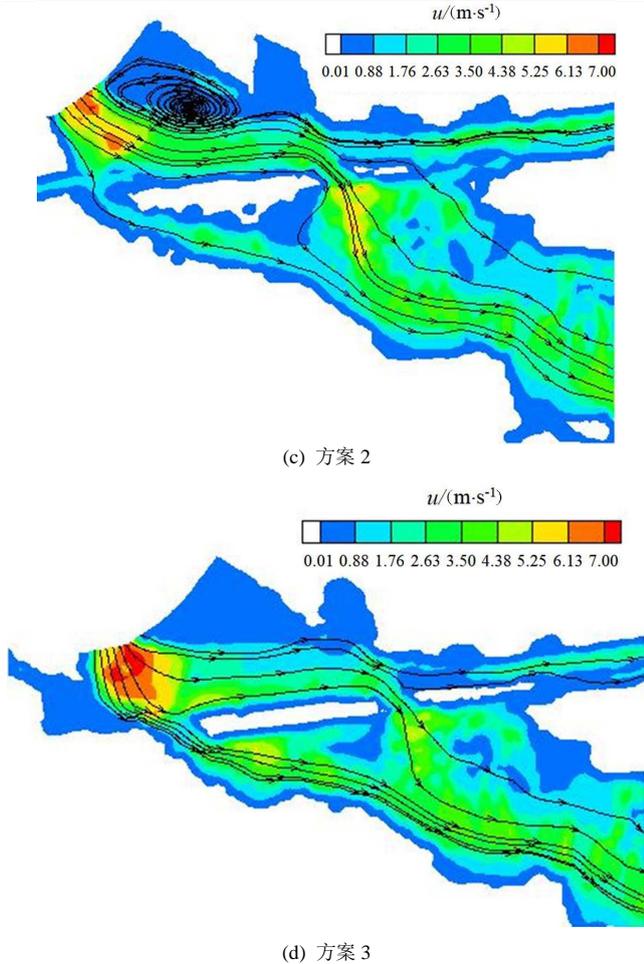


图 11 不同方案下洪峰时流速等值线图

Fig.11 Isogram of peak flow velocity under different schemes

#### 4 洪水冲刷分析

根据模拟结果，采用非黏性土河床河槽的一般冲刷公式<sup>[16-17]</sup>进行涵洞处泥沙的冲刷分析计算。冲刷公式如下：

$$h_p = 1.04 \left( A_d \frac{Q_2}{Q_c} \right)^{0.90} \left[ \frac{B_c}{(1-\lambda)\mu B_{cg}} \right]^{0.66} h_{cm}, \quad (9)$$

$$Q_2 = \frac{Q_c}{Q_c + Q_{t1}} Q_p, \quad (10)$$

$$A_d = \left( \frac{\sqrt{B_z}}{H_z} \right)^{0.15}, \quad (11)$$

式中， $h_p$ 为桥下一般冲刷后的最大水深； $Q_p$ 为设计流量； $Q_2$ 为桥下河槽部分通过的设计流量； $Q_c$ 为天然状态下河槽部分设计流量； $Q_{t1}$ 为天然状态下桥下河滩部分设计流量； $B_c$ 为天然状态下河槽宽度； $B_{cg}$ 为桥长范围内河槽宽度； $B_z$ 为造床流量下的河槽宽度， $\lambda$ 为设计水位下桥墩阻水总面积与过水面积的比值； $\mu$ 为桥墩水流侧向压缩系数； $h_{cm}$ 为河槽最大水深； $A_d$ 为单宽流量集中系数； $H_z$ 为造床流量下的河槽平均水深。计算结果见表 3。

涵洞处最大冲刷深度为 0.72 m。其中，大坝未溃决、溢洪道泄流条件下，最大冲刷深度 0.46 m 出现在涵洞 1 处；大坝正面溃决时，最大冲刷深度 0.72 m 出现在涵洞 2 处；大坝侧面溃决时，最大冲刷深度 0.70 m 发生在涵洞 1 处。

表 3 涵洞冲刷计算成果汇总

Table 3 Summary of calculation results of culvert erosion

研究方案	方案 1			方案 2			方案 3		
	涵洞 1	涵洞 2	涵洞 3	涵洞 1	涵洞 2	涵洞 3	涵洞 1	涵洞 2	涵洞 3
平均水深/m	1.26	2.27	1.41	1.72	4.47	2.88	3.32	4.03	2.90
最大水深/m	1.36	2.27	1.45	1.81	4.80	3.09	3.57	4.28	3.09
平均流速/(m s <sup>-1</sup> )	1.06	0.41	0.61	1.34	3.02	2.28	2.22	2.55	2.27
最大流速/(m s <sup>-1</sup> )	2.12	0.66	0.91	2.58	3.52	2.81	6.39	3.09	2.79
冲刷深度/m	0.46	0.27	0.34	0.49	0.72	0.60	0.70	0.60	0.58

#### 5 结论

1) 采用二维水动力模型和实测地形相结合，可较好地模拟溃坝洪水演进过程，并实现溃坝洪水淹没范围的二维展示。

2) 大坝未溃决、溢洪道正常泄流时，水流平稳通过铁路，未出现洪水翻过路基的情形，下泄洪水对铁路路基影响较小；大坝溃决后，正面溃决对铁路的影响比侧面溃决的影响大，部分铁路路基漫水，最大漫水深度为 0.62 m，影响铁路正常运营。

3) 大坝溃决最大流速是未溃决时的 2.15~2.48 倍。其中，未溃决时最大流速出现在溢洪道至 1 号涵洞区

域内，溃决后最大流速出现在溃口附近。

4) 涵洞处最大冲刷深度产生于大坝正面溃决时，出现在涵洞 2 处，深度是未溃决时涵洞处最大冲刷深度的 1.56 倍。

5) 为进一步降低水库溃坝影响，建议采取以下措施：进一步完善水库溢洪道消能防冲措施，拓宽铁路路基两侧排水沟，对涵洞采取防冲设计，减轻或消除下泄水流的冲刷危害；建设、完善防汛预警系统，水库运管方与铁路运营方建立信息共享机制，实时掌握水库运行状况；制定可行的应急预案和度汛方案，并定期组织演练。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 2021年全国水利发展统计公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2022.
- [2] 李宏恩, 马桂珍, 王芳, 等. 2000—2018年中国水库溃坝规律分析与对策[J]. 水利水运工程学报, 2021(5): 101-111.
- [3] 李昌文, 黄艳, 严凌志. 变化环境下长江流域超标洪水灾害特点研究[J]. 人民长江, 2022, 53(3): 29-43.
- [4] 罗诗怡, 谢新生, 刘路, 等. 大桥水库大坝逐渐溃决的数值模拟[J]. 人民黄河, 2017, 39(5): 45-50, 68.
- [5] 班华珍. 土石坝水库溃决模拟及洪水风险研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
- [6] 张松松, 张卫, 国林, 等. 大新水库不同溃坝高度的洪水演进过程模拟研究[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(6): 16-24, 30.
- [7] 马利平, 侯精明, 刘昌军, 等. 清水沟水库溃坝对主河道行洪过程影响数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(1): 130-136.
- [8] 徐子轩. 井坑塘水库溃坝对下游农业的影响分析[J]. 山西农经, 2019(14): 39, 47.
- [9] 杨忠勇, 郭红民, 曹光春. 梯级水库溃坝洪水对下游城市的淹没过程分析[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(9): 47-51, 78.
- [10] 郑磊, 陈静. 小型水库溃坝对下游输变电工程的影响分析[J]. 工程建设与设计, 2019(17): 85-88.
- [11] 姜晓明, 张丹, 张大伟, 等. 水库溃坝对下游大型调水工程的影响分析[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(S1): 199-202.
- [12] 张大伟. 土石坝漫顶溃决过程模拟[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(1): 80-83.
- [13] HOU J M, LIANG Q H, SIMONS F, et al. A stable 2D unstructured shallow flow model for simulations of wetting and drying over rough terrains[J]. Computers & Fluids, 2013, 82: 132-147.
- [14] 侯精明, 马勇勇, 马利平, 等. 无高精度地形资料地区溃坝洪水演进模拟研究—以金沙江叶巴滩-巴塘段为例[J]. 人民长江, 2020, 51(1): 64-69.
- [15] 张大伟, 权锦, 马建明, 等. 基于Godunov格式的流域地表径流二维数值模拟[J]. 水利学报, 2018, 49(7): 787-794, 802.
- [16] 彭程, 王昊, 胡传琦. 复杂承台群桩基础桥墩局部冲刷及冲坑形态研究[J]. 人民长江, 2023, 54(5): 237-245.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程水文勘测设计规范: JTG C30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.

## Numerical Simulation on Influence of Dam-break Flood Based on Two-dimensional Hydrodynamic Model

HAN Zhongkai, CUI Kui, ZHANG Weijie\*, AN Kaijun, ZHANG Zhao

(Water Resources Research Institute of Shandong Province, Ji'nan 250013, China)

**Abstract:** 【Objective】 The purpose of the paper is to study the effect of dam-break flood. 【Method】 Taking Xinzhuang reservoir as an example, a two-dimensional hydrodynamic model was established to simulate the evolution process of dam-break flood under different schemes, and the water depth, velocity and erosion depth of downstream high-speed railway were calculated, so as to analyze the impact of dam-break flood on the safe operation of downstream high-speed railway. 【Result】 The results showed that the maximum discharge flood of the spillway could pass through the railway culvert normally when the reservoir was not breached, and it had little impact on downstream project. The impact of dam break on the front was greater than that on the side, the top surface of partial railway embankment overflowed and affected the normal operation of railway. Compared with the normal condition, the maximum flow velocity was 2.15~2.48 times and the maximum scouring depth at the culvert is 1.56 times. 【Conclusion】 The two-dimensional hydrodynamic model can be used to simulate the evolution process and submerged area of dam-break flood, and the research results can provide reference and data support for the prevention of dam-break flood.

**Key words:** dam-break flood; two-dimensional hydrodynamic model; submerged depth; erosion depth

责任编辑: 赵宇龙