

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.012

宁聪,傅志敏,王志刚. HEC-RAS模型在二维溃坝洪水研究中的应用[J]. 水利水电工程学报, 2019(2): 86-92. (NING Cong, FU Zhimin, WANG Zhigang. Application of HEC-RAS for the research of 2D dam-break flood [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(2): 86-92. (in Chinese))

HEC-RAS 模型在二维溃坝洪水研究中的应用

宁 聪¹,傅志敏¹,王志刚²

(1. 河海大学 水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2. 黄河水利水电开发总公司,河南 济源 459017)

摘要:为准确模拟大坝失事后溃坝洪水的下游演进,运用 HEC-RAS 二维水动力学模型,修正面板坝溃口发展曲线,设计两种闸门开度的小井沟面板坝漫顶溃坝工况,模拟水库泄洪影响下溃坝洪水的下游演进并生成相应的洪水风险图、最大流速分布图、滞留时间图。研究结果展现了溃坝洪水在中下游平原丘陵地区的泛滥情况、洪水风险的分布差异以及水库泄洪对溃坝洪水的影响。分析得出不同闸门开度下溃坝洪水在中下游平原丘陵地区的淹没水深和范围差异明显,最大流速和洪水滞留时间区别不大,说明水库全力泄洪能有效降低溃坝洪水对下游人员聚居的平原地区的危害。研究成果对后续的人员疏散和损失估计具有重要参考意义。

关 键 词: 二维模型; 漫顶; 面板坝; HEC-RAS; 小井沟水库

中图分类号: TV133.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2019)02-0086-07

水库大坝作为水利枢纽的重要组成部分,在防洪,发电,灌溉等功能中发挥着重要作用。水库大坝失事将危及下游地区人民的生命财产安全与社会稳定^[1-2]。为了对水库溃坝进行有效的风险防范,需在溃后影响区域进行洪水模拟计算。目前主流的洪水数值模拟软件包括丹麦的 MIKE11/21,荷兰的 Delft3D 和美国的 HEC-RAS。其中 HEC-RAS 为美国陆军工程兵军团水文中心开发的免费河道水力计算软件,前人利用 HEC-RAS 在洪水数值模拟方面已进行大量工作。周毅^[3]利用 HEC-RAS 和 GIS 平台模拟了疏勒河地区 2000 年一遇洪水在下游区域的演进情况;贺娟等^[4]利用 HEC-RAS 对长河坝水电站进行了溃坝洪水模拟;吴博等^[5]利用 HEC-RAS 和 GIS 平台对小东川河流域的山洪淹没范围做出了较为准确的预测;孙锐娇等^[6]利用 HEC-RAS 模拟多种工况下某水库溃坝洪水演进。但上述研究均建立在 HEC-RAS 一维水动力学模型上,而 HEC-RAS 近期增加二维水动力学模型,其模型精度高,模型构建要求低,适用于洪水在山区河道冲刷和平原地区泛滥等多种场景。本文运用 HEC-RAS 的二维模型模拟不同工况下小井沟面板坝漫顶溃坝后洪水演进,其结果对水库防灾减灾以及风险防范工作具有重要意义。

1 研究方法

HEC-RAS 二维水动力学模型的原理是 Navier-Stokes 方程的二维简化形式——浅水方程。其假定水深尺度远小于另外两个平面尺度,计算式如下:

连续方程:

收稿日期: 2018-07-15

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401603);国家自然科学基金面上项目(51679151,51779154);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y717012,Y718007)

作者简介: 宁 聪(1994—),男,河南驻马店人,硕士研究生,主要从事洪水风险防范的研究。

E-mail: ningcong894@outlook.com 通信作者: 傅志敏(E-mail: zimingfier@163.com)

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot hV + q = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V = -g \nabla H + v_t \nabla^2 V - c_f V + fk \times V \quad (2)$$

扩散波格式的动量方程,其与连续方程组合的计算速度较完全的浅水方程的快且累计误差小,适用于河床坡降大的河流^[7]。计算式如下:

$$V = \frac{-(R(H))^{\frac{2}{3}}}{n} \frac{\nabla H}{|\nabla H|^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

式中: H 为水面高程(m); h 为水深(m); V 为流速(m/s); R 为水力半径(m); q 为旁侧入流(m²/s); g 为重力加速度(m/s²); v_t 为水平方向运动黏度(m²/s); c_f 为河床底部糙率; f 为科里奥利系数; k 为垂直方向单位矢量; n 为糙率。

HEC-RAS 二维水动力学模型的数值计算混合了有限体积法和有限差分法。计算网格采用非结构化网格,非边界网格为正方形,边界网格为不规则多边形,每个网格的边类似河道断面,均能提取所在的地形。因而在较低的网格密度下,仍可以提取足够的地形细节,保证模型精度。

HEC-RAS 在溃坝计算上采用堰流方程计算溃口流量过程。但其堰流系数应取 1.76 ~ 1.98^[7]。计算式如下:

$$Q = CLH_1^{3/2} \quad (4)$$

式中: Q 为溃口流量(m³/s); L 为堰长(m); H_1 为堰上水头(m); C 为堰流系数。

HEC-RAS 溃口预测模块集成了一系列以往学者根据历史溃坝数据推导出的溃口尺寸回归方程,能够根据大坝相关参数预测溃口。本次模拟采用其中能够预测面板坝溃口的徐-张方程估计溃口最大尺寸和成形时间^[8]。计算式如下:

$$B_t/h_b = 1.062 \left(\frac{h_d}{h_r} \right)^{0.092} \left(\frac{V_w^{1/3}}{h_w} \right)^{0.508} \exp B_2 \quad (5)$$

$$T_f/T_r = 0.304 \left(\frac{h_d}{h_r} \right)^{0.707} \left(\frac{V_w^{1/3}}{h_w} \right)^{1.228} \exp B_5 \quad (6)$$

式中: B_t 为溃口顶宽(m); V_w 为溃坝时库容(m³); B_2 为综合系数,取 0.325; T_f 为溃口成形时间(h); T_r 为单位时间(1 h); B_5 为综合系数,取 -1.817; h_b 为最大溃口深(m); h_d 为坝高(m); h_r 为参考高度,取 15 m。

2 模型建构

2.1 工程概况

越溪河属岷江左岸一级支流,流域大致呈南北向的狭长形,东接沱江右岸支流釜溪河,西邻岷江。流域地势北高南低。由于河流穿行于深丘地区,河谷狭窄,河道成 V 型,滩多水急,河道平均比降达 7‰ 左右。礼佳以上至正江有约 9 km 长的峡谷段,岸陡水急,比降更大。越溪河上游植被良好,河源及山顶多成片幼林及灌木丛。

小井沟水库是一座大(2)型水库,防洪标准为 100 年一遇设计,2 000 年一遇校核。排洪工程建筑物级别 5 级,设计防洪标准为 10 年。小井沟水库拦河大坝位于越溪河上游,礼佳场上游小井沟峡谷河段上,地理位置在东经 104°10',北纬 29°24',坝址控制流域面积 587 km²,占全流域面积的 22%,河长 92 km,设计流域为西北东南向的狭长形。东高西低,东为荣、威高地西缘,分水岭高程为 700 ~ 800 m,西边分水岭为 500 ~ 600 m^[9]。

2.2 模型构建

2.2.1 地理建模 地理建模的地形数据来源于小井沟流域 10 m 分辨率 DEM。建模中的各种因素概化为 3

个模型要素,分别为上游水库、拦河坝和下游控制流域。上游水库在 HEC-RAS 中设为线性水库,输入小井沟水库库容曲线^[9],如图 1 所示。下游控制流域设为单个二维网格区域^[10-11],网格密度设为 5 m×5 m。河床主槽糙率取 0.027,漫滩糙率取 0.032。在设置网格边界时,保证计算区域囊括洪水可能淹没区域,考虑越溪河中下游多为平原和丘陵地区的特点,最终地理建模效果如图 2 所示。

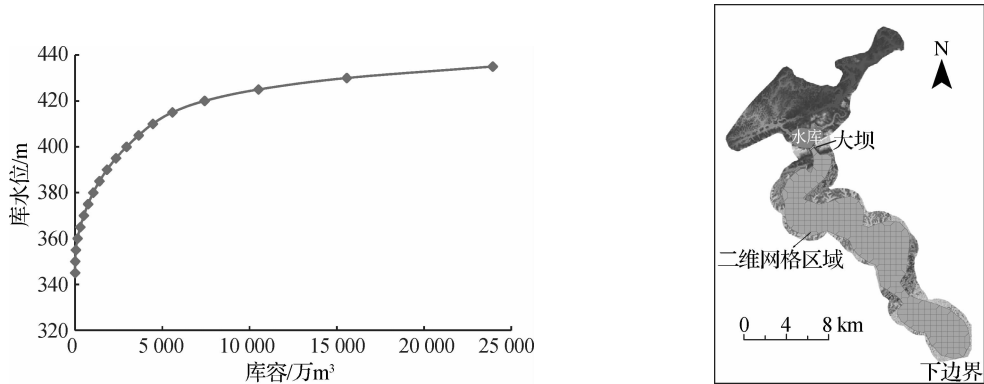


图 1 小井沟水库水位库容关系

Fig. 1 Relationship between water level and storage capacity

图 2 地理建模

Fig. 2 Geometric data

HEC-RAS 能够模拟水工建筑物的过流能力,在小井沟拦河坝坝体设置相应的泄洪洞和溢洪道,其上设置闸门,大坝相关参数如下:坝顶高程 431.60 m,坝底高程 344.00 m,坝顶长 263.00 m,坝顶宽 8.00 m,坝底宽 350.94 m,总库容为 1.66 亿 m³,死库容为 0.35 亿 m³。

2.2.2 溃坝参数 溃坝参数主要是溃口最大尺寸和成形时间。小井沟拦河坝作为一座面板坝,其溃口发展并非土石坝溃口的线性增长模式,而是伴随着洪水的淘蚀造成的上游面板阶段性折断呈现出分段逐级溃决的特点。上游面板从顶部开始,其后部由于洪水冲刷而被逐渐掏空,随后该部分面板折断。面板如此逐级折断且折断速度加快,直至发展成线性增长。根据面板坝分段逐级溃决特点在 HEC-RAS 中修正溃口发展曲线,使之契合面板坝的溃坝过程^[12-14],如图 3 所示。利用 HEC-RAS 自有的溃口预测模块,预测溃口最大尺寸如图 4 所示,具体参数如表 1 所示。

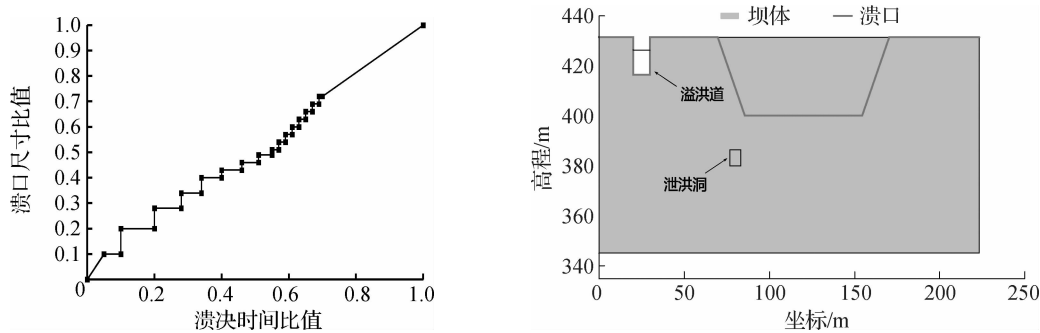


图 3 溃口发展曲线

Fig. 3 Breach progression curve

图 4 最大溃口尺寸

Fig. 4 Maximum breach dimensions

表 1 溃口参数								
Tab. 1 Breach parameters								
中心坐标/m	底宽/m	底部高程/m	左边坡坡度	右边坡坡度	堰流系数	成形时间/h	模式	起溃高程/m
120	69	400	0.5	0.5	2.6	0.47	漫顶	431.6

溃坝事故中往往存在各种突发状况,如泄洪建筑物可能无法工作而使溃坝危害增大。本次模拟中的闸门分别取完全关闭和最大开度两种工况。闸门完全关闭模拟溃坝洪水到来时,闸门因故障不能开启导致水库无法泄洪的场景;闸门最大开度则模拟溃坝洪水到来时,泄水建筑物最大能力泄洪的场景。对两种工况下溃坝洪水演进结果差异进行对比,考量水库泄洪对溃坝危害的影响,计算工况为:工况 1,逐渐溃,溃口底宽 69 m,底部高程 400.00 m,起溃水位 431.60 m,闸门完全关闭;工况 2,闸门最大开度,其余同工况 1。

2.2.3 边界条件 上游边界条件为水库入流,取小井沟水库 2 000 年一遇设计洪水过程线^[9],如图 5 所示。下游边界条件取越溪河下游天然河床比降 0.42‰。水库初始水位设为校核洪水位 430.75 m,模拟入库洪水到来后水库水位壅高过坝顶造成漫顶溃坝的场景。此外,鉴于越溪河河床平均比降较大,本次计算选用扩散波格式的浅水方程加快计算速度。

2.3 结果分析

洪水水深、流速和滞留时间是衡量溃坝洪水影响的 3 个主要指标。其中依据洪水水深差异可以划定不同的风险等级^[15],洪水风险分级见表 2^[15]。此外,根据洪水流速大小同样能够给出相应的预期损害^[16],如表 3 所示。

表 2 洪水风险等级
Tab.2 Flood hazard classification

等级	水深/m	风险等级
H1	≤0.5	很低
H2	>0.5~1.0	底
H3	>1.0~2.0	中等
H4	>2.0~5.0	高
H5	>5.0	极高

表 3 洪水流速等级
Tab.3 Flood velocity classification

分类	流速/(m·s ⁻¹)	损害等级
1	≤0.2	极低
2	>0.2~0.5	低
3	>0.5~1.0	中
4	>1.0	高

HEC-RAS 能够输出溃坝洪水下游演进各时刻的水深和流速分布图、模拟时段内的洪水滞留时间、抵达时间和退水时间分布图等。计算完成后导出最大水深和流速分布图(将各淹没处的最大水深或流速叠加),以及阈值 1.5 m 的洪水滞留时间分布图,在 GIS 软件中加以处理^[17],获得溃坝洪水风险分布、最大流速分布和溃坝洪水滞留时间分布(见图 6~8)。

由图 6 可知,越溪河上游为深 V 河谷,溃坝洪水没有向两岸明显的泛滥。中下游为平原丘陵地区,河道蜿蜒曲折,两岸地势平缓,洪水壅出河道淹没周边地区。而人员聚居区多集中在中下游河道两岸地势平坦地带,在这一区域,工况 1 洪水淹没范围较工况 2 大,洪水风险等级约在 H5,也比工况 2 的风险等级(约 H4)高一级。说明水库全力泄洪能够有效削弱溃坝洪水在溃后影响区域造成的洪水风险。

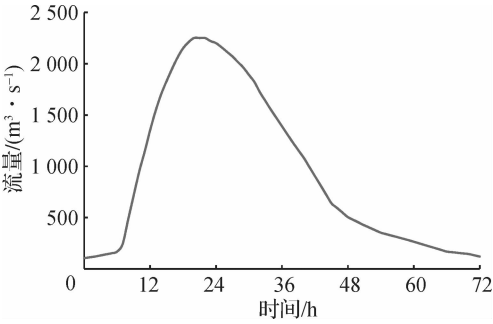


图 5 设计洪水过程线
Fig.5 Design flood hydrograph

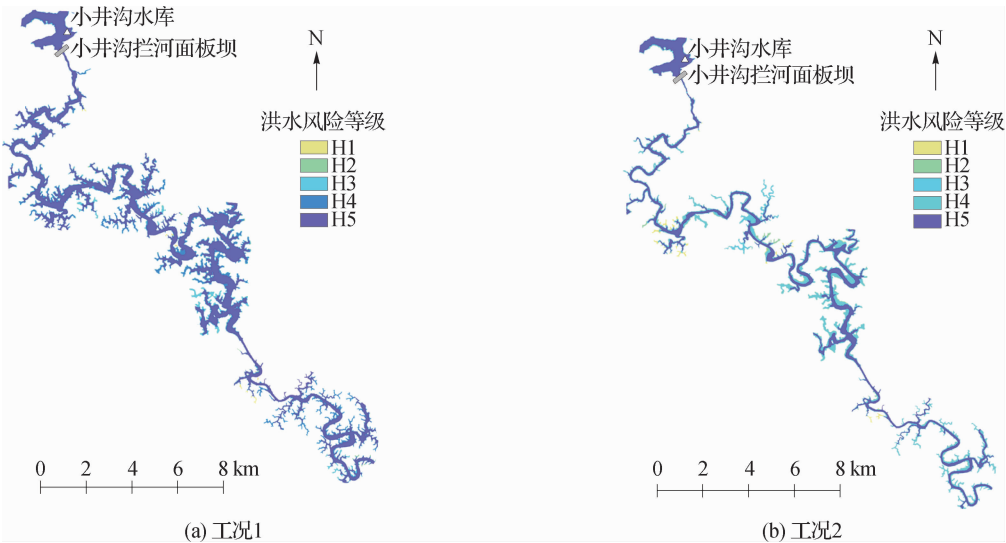


图 6 溃坝洪水风险分布
Fig. 6 Hazard of dam-break flood

由图 7 可知,上游越溪河河道临近水库,洪水演进快,主槽中流速在 10 m/s 以上。中下游越溪河河道主槽流速衰减到 5 ~ 10 m/s,河岸漫滩在 2 ~ 5 m/s。在人员聚居的两岸淹没区域,两种工况的最大流速均小于 1 m/s,影响程度为中等。可见两种工况下溃坝洪水流速不是对下游地区造成危害的主要因素。

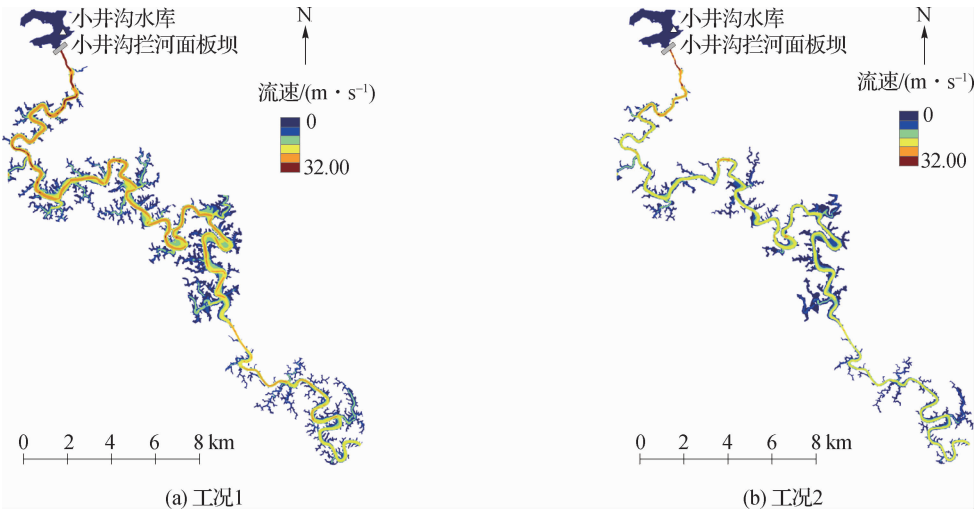


图 7 溃坝洪水最大流速分布
Fig. 7 Maximum flow velocity of dam-break flood

洪水水深超过 1.5 m 预期会造成严重的生命财产损失^[16]。由图 8 可知,两种工况下河道两岸淹没区域洪水滞留时间均在 24 h 以下,且自河岸向外逐步衰减。紧临河岸的淹没区域洪水滞留时间在 12 ~ 24 h,在稍远区域滞留时间下降到了 2 ~ 8 h,局部地区更短。工况 2 两岸淹没范围小且紧临河岸,在这一区域,两种工况下洪水滞留时间并无显著差异。

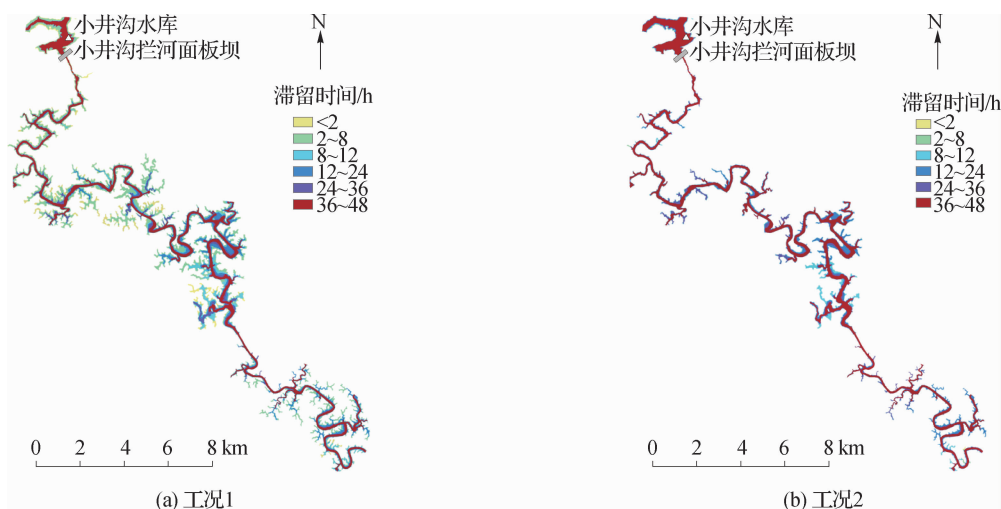


图8 溃坝洪水滞留时间(阈值 1.5 m)

Fig.8 Duration of dam-break flood (threshold of 1.5 m)

综上所述,水库全力泄洪主要能够削减洪水在中下游河道两岸淹没区域的水深和淹没范围,从而降低溃后影响区域洪水危害,同时为下游地区人员转移疏散争取时间。此外,结果也表明了水库日常检查的重要性,尤其是带闸门的泄洪建筑物,必须充分保证工作状态和泄洪能力,为防范事故发生提供安全保障。

3 结 语

本文采用 HEC-RAS 模拟不同工况下小井沟拦河面板坝漫顶溃坝后洪水下游演进。结果表明,HEC-RAS 二维模型适用于模拟溃坝洪水向河道两岸平原丘陵地区泛滥的,并能够将模拟结果输出为可视化图层。若将结果图层与社会行政,经济区划图叠加制作信息更丰富的洪水风险图,可为后续防洪应急预案的编制和财产损失的估算提供有力支持;其次,通过模拟了闸门不同开度下溃坝洪水的演进过程,表明了溃坝事故发生时水库全力泄洪对溃坝洪水危害的削弱作用。

参 考 文 献:

- [1] 张士辰, 王晓航, 厉丹丹, 等. 溃坝应急撤离研究与实践综述[J]. 水科学进展, 2017, 28(1): 140-148. (ZHANG Shichen, WANG Xiaohang, LI Dandan, et al. Overview on research and practice of dam failure emergency evacuation [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(1): 140-148. (in Chinese))
- [2] XIONG Y. A dam break analysis using HEC-RAS[J]. Journal of Water Resource and Protection, 2011, 3(6): 370-379.
- [3] 周毅. 基于 GIS 的溃坝洪水模拟与方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010. (ZOU Yi. Dam-break flood simulation and method research based on GIS[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese))
- [4] 贺娟, 王晓松. 基于 HEC-RAS 及 HEC-GeoRAS 的溃坝洪水分析[J]. 水利水运工程学报, 2015(6): 112-116. (HE Juan, WANG Xiaosong. Analysis of dam-break flood based on HEC-RAS and HEC-GeoRAS[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015 (6): 112-116. (in Chinese))
- [5] 吴博, 王旭兆, 臧红飞, 等. 基于 HEC-RAS 和 GIS 的小东川河流域沿河村落山洪淹没范围确定[J]. 水电能源科学, 2016(9): 52-55. (WU Bo, WANG Xuzhao, ZANG Hongfei, et al. Mountain torrents inundated area confirmation of villages in Xiaodongchuan River Basin based on HEC-RAS and GIS[J]. Water Resources and Power, 2016(9): 52-55. (in Chinese))
- [6] 孙锐娇, 杜伟超, 谢谟文. 基于 HEC-RAS 与 ArcGIS 的水库溃坝风险分析[J]. 测绘地理信息, 2017, 42(3): 98-101. (SUN Ruijiao, DU Weichao, XIE Mowen. Risk analysis of reservoir dam-break based on HEC-RAS and ArcGIS[J]. Journal of Geomatics, 2017, 42(3): 98-101. (in Chinese))

- [7] BRUNNER G W. HEC-RAS river analysis system; hydraulic reference manual version 5.0[M]. U S; Hydrologic Engineering Center of US Army Corps of Engineers, 2016.
- [8] ZHANG L M, XU Y, JIA J S. Analysis of earth dam failures: a database approach[J]. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2009, 3(3): 6.
- [9] 傅志敏, 袁大钊, 杨伟, 等. 自贡市小井沟水利工程 2017 年度防洪抢险应急预案[R]. 南京: 河海大学, 2017. (FU Zhimin, YUAN Dazhao, YANG Wei, et al. Emergency plan for flood control and emergency work in Xiaojingou hydraulic engineering in Zigong City in 2017[R]. Nanjing: Hohai University, 2017. (in Chinese))
- [10] BLADÉ E, GÓMEZ VALENTÍN M, DOLZ J, et al. Integration of 1D and 2D finite volume schemes for computations of water flow in natural channels[J]. Advances in Water Resources, 2012, 42: 17-29.
- [11] BRUNNER G W, CEIWR-HEC. HEC-RAS river analysis system; 2D modeling user's manual version 5.0[M]. U S; Hydrologic Engineering Center of US Army Corps of Engineers, 2016.
- [12] 刘路, 谢新生, 李饶. 基于 HEC-RAS 的面板坝溃口模拟研究[J]. 人民黄河, 2014, 36(6): 113-115. (LIU Lu, XIE Xinsheng, LI Rao. Breach research of concrete-faced rock-fill dam based on HEC-RAS [J]. Yellow River, 2014, 36(6): 113-115. (in Chinese))
- [13] 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, 29(4): 53-58. (CHEN Shengshui, ZHONG Qiming, REN Qiang. Numerical model study on break development due to overtopping failure for earth-rock dam[J]. Hydro-Science and Engineering, 2009, 29(4): 53-58. (in Chinese))
- [14] 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 Shengshui, CAO Wei, HUO Jiaping, 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))
- [15] QUIROGA V M, KURE S, UDO K, et al. Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood; Application of the new HEC-RAS version 5[J]. RIBAGUA - Revista Iberoamericana del Agua, 2016, 3(1): 25-33.
- [16] KRAUSMANN E, CRUZ A M, SALZANO E. Natech risk assessment and management: reducing the risk of natural-hazard impact on hazardous installations[M]. Amsterdam: Elsevier, 2016.
- [17] GOODELL C, WARREN C. Flood inundation mapping using HEC-RAS[J]. Obrasy Projectos, 2006(1): 18-23.

Application of HEC-RAS for the research of 2D dam-break flood

NING Cong¹, FU Zhimin¹, WANG Zhigang²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yellow River Water Resources and Hydropower Development Corporation, Jiyuan 459017, China)

Abstract: In order to accurately simulate the downstream flood routing of the dam-break flood after dam breach, the two-dimensional (2D) hydrodynamic model with HEC-RAS software is used to modify the breach progression curve of the rock-fill dam with face slab and design the working conditions of the overtopping of the Xiaojinggou concrete-faced slab dam with two gate openings. And the model is also used to simulate the downstream flood routing of the dam-break flood under the influences of reservoir flood discharge and generate the corresponding flood risk maps, the maximum velocity distribution maps and the flood detention time maps. The simulation results show that the submerged depth and scope of the dam-break flood in the plain and hilly areas of the middle and lower reaches vary greatly under different gate openings, and the maximum flow velocity and the flood detention time have little difference. From the simulation and analysis results it is found that the reservoir flood discharge can effectively reduce the threats of the dam-break flood to the people's lives and property in the downstream plain areas. The simulated results have important reference values for the evacuation and loss assessment of the dam-break flood.

Key words: 2D model; overtopping; rock-fill dam with face slab; HEC-RAS; Xiaojinggou reservoir