

·其他·

文章编号: 1672-3317(2023) Supp.1-0219-04

建闸后河道行洪对上游铁路桥安全运行影响研究

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

摘要: 利用 HEC-RAS 模型, 计算分析了下游拦河闸建设后, 河道行洪时, 闸门在全开、无法开启及溃决 3 种不同运行工况下, 上游铁路桥桥址处河道水位、流量、流速的变化情况, 进而计算出各工况下桥址处冲刷深度。结果表明, 与建闸前相比, 建闸后上游桥址处水位均有一定程度升高, 其中闸门无法开启时水位升高最大, 较建闸前升高 10.7%; 闸门溃决时, 桥址处最大流量增加 11.34%, 最大平均流速增加 11.11%, 河槽和河滩部位最大冲刷深度均有增加, 但都在允许冲刷深度范围内, 拦河闸不会对上游铁路桥安全运行产生不利影响。研究成果可对河道类似工程安全运行提供借鉴和参考。

关键词: HEC-RAS 模型; 拦河闸; 铁路桥; 冲刷深度

中图分类号: TV66

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023360

张维杰, 韩仲凯, 崔魁, 等. 建闸后河道行洪对上游铁路桥安全运行影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(Supp.1): 219-222.

ZHANG Weijie, HAN Zhongkai, CUI Kui, et al. Study on the Influence of River Sluice on the Safety Operation on Railway Bridge in the Upstream[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(Supp.1): 219-222.

0 引言

铁路作为一种载容量高、货运量大、计划性强、安全、准时、稳定的交通运输方式, 在改善人民出行条件、推动国民经济快速发展等方面扮演着重要角色^[1-2], 因而确保铁路尤其是易受河道行洪影响的跨河铁路桥的安全运行是非常关键和重要的。根据《铁路安全管理条例》(国务院令 639 号)第三十七条规定“任何单位和个人不得擅自在铁路桥梁跨越处河道上下游各 1 000 m 范围内围垦造田、拦河筑坝、架设浮桥或者修建其他影响铁路桥梁安全的设施。因特殊原因确需在前款规定的范围内进行围垦造田、拦河筑坝、架设浮桥等活动的, 应当进行安全论证”。关于河道中桥墩冲刷的研究已有一些成果, 如不同河床地形条件下、不同冰盖条件、不同水力条件下对桥墩冲刷影响等^[3-6], 但行洪条件下, 不同水闸运行方式对其影响的研究比较少见。本文运用 HEC-RAS 模型, 计算分析了河道行洪时拦河闸工程对上游 545.00 m 处跨河铁路桥的安全运行影响, 对可能产生的各种不利因素进行了综合分析论证, 研究成果可为河道类似

工程的安全运行提供了有力支撑。

1 工程概况

某铁路桥跨越河道处为(48.00+32.65+4×32.60+40.65+56.00) m 连续梁, 梁底最低标高 53.72 m, 河道范围内共设桥墩 7 个, 其中左右侧两边墩位于河道滩地上, 其余桥墩位于主河槽内。圆端形桥墩宽 3.20 m, 顺水流方向长 6.40 m, 桥墩承台顶位于河道断面线以下 0.50 m, 承台高 2.50 m, 承台底埋置深度为 3.00 m。桥址处主河槽宽 128.00 m, 两岸堤防顶高程 46.59 m。河道按 50 年一遇防洪标准筑堤, 铁路桥设计洪水标准为 100 年一遇。

拦河闸位于铁路桥下游 545.00 m 处, 采用液压翻板闸, 挡水高 4.80 m, 50 年一遇设计洪水流量 166.00 m³/s。拦河闸由上游连接段、闸室段及下游连接段组成, 顺水流方向总长 119.00 m。其中, 闸室段共 1 孔, 总净宽 60.00 m, 长 16.00 m, 共布置 10 扇液压翻板闸门。

2 计算模型

本研究采用由美国陆军工程兵团(USACE)水文工程中心(HEC)开发的河流模拟计算软件 HEC-RAS 来计算。其包含的水动力模型主要包括 3 个部分: 恒定流计算模块、非恒定流计算模块和泥沙输运/可动边界计算模块, 可模拟缓流、急流和混合

收稿日期: 2023-08-10 修回日期: 2023-08-11

基金项目: 山东省水利科学研究院自选课题(SDSKYZX202107)

作者简介: 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

通信作者: 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: 420224931@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

流三种流态^[7-9]。本次研究主要运用一维恒定流和非恒定流计算模块。

2.1 控制方程

恒定流计算基于一维能量守恒定律^[10-12]，采取直接逐进法计算水面线，即：

$$Y_1 + Z_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} = Y_2 + Z_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} + h_e, \quad (1)$$

式中： Y_1 、 Y_2 为上下游计算断面水深； Z_1 、 Z_2 为上下游主河槽底高程； a_1 、 a_2 为上下游计算断面流速系数； V_1 、 V_2 为上下游计算断面平均流速； h_e 为上下游断面间水头损失； g 为重力加速度。

非恒定流计算基于连续方程和动量方程^[10]，基本公式如下。

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

动量方程：

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{\partial P}{\rho \partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j}, \quad (3)$$

式中： ρ 为流体密度； t 为时间； u 为流体流速； f 为质量力； P 为流体压力； ν 为流体运动黏滞系数。

2.2 几何模型及基本参数

根据实测资料，本次构建河道几何模型总长 14.60 km、断面 152 个，包括桥梁以上河道长 11.77 km、断面 119 个，桥梁至拦河闸河道长 0.54 km、断面 7 个，拦河闸下游河道长 2.29 km、断面 26 个。计算断面最大间距 100.00 m，根据 HEC-RAS 软件计算原理，桥梁及拦河闸上下游处计算断面适当加密。铁路桥及拦河闸几何模型如图 1 所示。

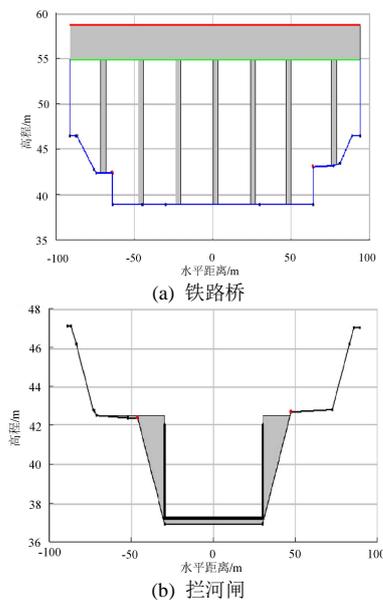


图 1 铁路桥和拦河闸模型

Fig.1 Model of railway bridge and river lock

研究段河道底坡 $i=1/5\ 000\sim 1/1\ 280$ 。河道中上游

为山洪河道，经实地勘察，根据天然河道糙率 n 值特性表^[13]，经分析论证，确定河道主河槽糙率为 0.025，滩地糙率为 0.03。根据《HEC-RAS 用户手册》^[14]，渐变段河道的扩张、收缩系数分别为 0.30 和 0.10。

2.3 计算工况和边界条件

铁路桥桥址以上流域内有康驿、新驿、黄庄 3 个雨量站，具有 1952—2019 年实测雨量资料，采用实测暴雨资料法计算桥址处设计洪水。经计算，铁路桥桥址处 50 年一遇 ($P=2\%$) 洪峰流量 1 684.00 m^3/s ，100 年一遇 ($P=1\%$) 洪峰流量 1 957.00 m^3/s ，设计洪水过程线见图 2。

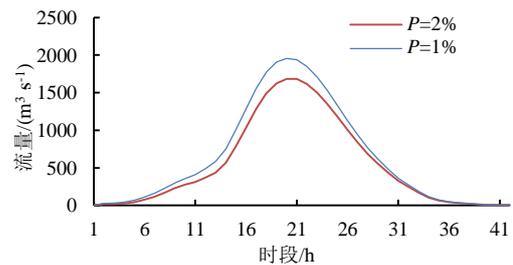


图 2 设计洪水过程线

Fig.2 Designed flood hydrograph

本次研究选取建闸前和建闸后闸门全开、闸门无法开启、闸门溃决共 4 种工况。考虑到洪水风险发生的可能性和严重性，为最大程度保障铁路桥安全运行，闸门溃决工况上游边界条件为设计洪水过程线，其余 3 种工况上游边界条件为最大洪峰流量；根据已有资料，已知拦河闸下游 2.29 km 处断面设计洪水位为 44.02 m，作为下游边界条件。

3 结果与分析

3.1 模型验证

铁路桥防洪评价报告中，采用丹麦水资源及水环境研究所 MIKE 软件中的一维河网 MIKE11 模块计算了建闸前桥址处洪水位，该计算成果已经批复并应用，可用于本次模型验证，本次计算结果如表 1 所示。

表 1 桥址断面设计洪水计算 (建闸前)

Table 1 Design flood calculation of bridge site section

(Pre-gate construction)

阶段	洪水频率(P)	洪峰流量/ $(\text{m}^3 \text{ s}^{-1})$	水位/m	河底高程/m	水深/m
防洪评价报告	2%	1 684	44.77	38.85	5.92
	1%	1 957	45.23	38.85	6.38
复核	2%	1 684	44.75	38.85	5.90
	1%	1 957	45.21	38.85	6.36

计算结果表明，建闸前，桥址处 50 年一遇设计洪水位为 44.75 m，较防洪评价报告中计算成果 44.77 m 低 0.02 m；100 年一遇设计洪水位为 45.21 m，较防洪评价报告中计算成果 45.23 m 低 0.02 m。两次计算结果基本一致，表明本计算模型具有较好的准确可靠性。

3.2 水力特性分析

与 50 年一遇设计洪水相比，100 年一遇设计洪水的水位、流速等水力要素更大，对铁路桥的安全运行影响也更严重。

因此，在建闸后闸门正常启闭、闸门无法开启、闸门溃决 3 种计算工况中，仅对百年一遇设计洪水进行计算分析，结果如表 2 所示。

表 2 桥址处百年一遇设计洪水计算

Table 2 Design flood calculation of a-hundred-year return period at the bridge site

工况	最高水位/m	最大过水断面总净宽/m	河底高程/m	最大水深/m	最大平均水深/m	最大流量/(m ³ s ⁻¹)			最大平均流速/(m s ⁻¹)
						总断面	主河槽	两岸滩地	
建闸前	45.21	146.30	38.85	6.36	5.31	1 957.00	1 879.16	77.84	2.52
闸门全开	45.33	147.00	38.85	6.48	5.41	1 957.00	1 874.56	82.44	2.46
闸门无法开启	45.97	150.61	38.85	7.12	5.92	1 957.00	1 850.98	106.02	2.20
闸门溃决	45.71	149.08	38.85	6.86	5.71	2 178.90	2 091.69	87.21	2.80

由表 2 可知，与建闸前相比，下游拦河闸建设后，上游桥址处水位升高，水面宽度和过流面积增大；闸门全开、无法开启两工况下，桥址处流速有所减小，主河槽过流量减小，两岸滩地过流量增大；闸门溃决工况下，桥址处最大流量和流速均增大。

在各计算工况中，闸门无法开启时桥址处水位最高，达到 45.97 m，较建闸前水位 45.21 m 升高 0.76 m（增幅 1.68%），未超过两岸堤防顶高程 46.59 m，与铁路桥梁底最低标高 53.72 m 间的桥下最小净空为 7.75m，满足《铁路桥涵设计规范》（TB 10002-2017）中桥下最小净空不小于 1.50 m 的要求；闸门溃决时，桥址处最大流量和最大平均流速最大，其中最大流量 2 178.90 m³/s 较建闸前增加 221.90 m³/s，增幅 11.34%；最大平均流速 2.80 m/s 较建闸前增加 0.28 m/s，增幅 11.11%。闸门溃决时，拦河闸及桥址处水位、流量变化如图 3—图 5 所示。

量为 2 352.36 m³/s，较桥址处最大流量 2 178.90 m³/s 大 173.46 m³/s。在闸门溃决的瞬间，由于河道有效过流面积的突然增大，河道流量瞬增，水位骤降，二者向相反方向变化；之后水位、流量均逐渐减小，变化趋于一致。

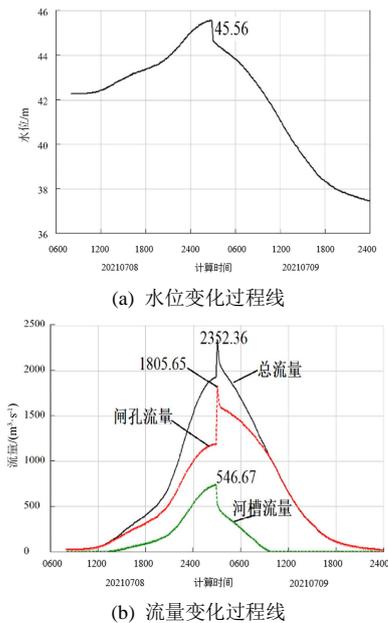
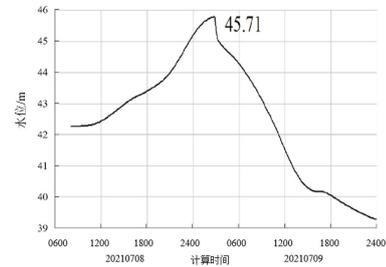


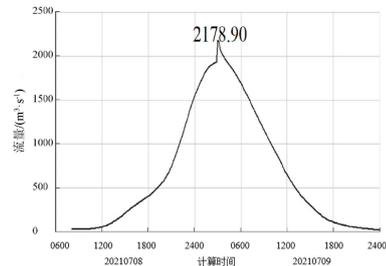
图 3 闸址处水位和流量变化过程线（闸门溃决时）

Fig.3 Water level and flow curve at gate site (when the gate breaks)

从图 3—图 5 可知，桥址处水位、流量变化趋势与闸址处相一致，时间略有滞后；闸址处最大流



(a) 水位变化过程线



(b) 流量变化过程线

图 4 桥址处水位和流量变化过程线（闸门溃决时）

Fig.4 Water level and flow change process line at bridge site (when the gate breaks)

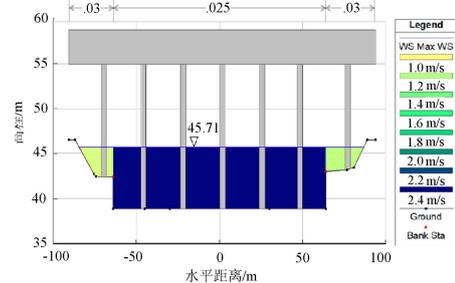


图 5 闸门溃决时桥址处设计洪水计算成果

Fig.5 Calculation results of design flood at bridge site when gate break

3.3 桥址河床冲刷计算

桥址处为黏性土河床，河槽部分冲刷计算根据铁路工程水文勘测设计规范中的公式^[15]来计算。桥址处河床冲刷计算结果如表 3 所示。

表3 桥址处冲刷深度计算成果汇总

Table 3 Summary of calculation results of scour depth at bridge site

计算工况	河槽部分/m				河滩部分/m			
	一般冲刷线高程	一般冲刷深度	局部冲刷深度	总冲刷深度	一般冲刷线高程	一般冲刷深度	局部冲刷深度	总冲刷深度
建闸前	38.70	0.15	1.35	1.50	42.74	0	0.51	0.51
闸门全开	38.84	0.01	1.35	1.36	42.82	0	0.50	0.50
闸门无法开启	39.55	0	1.34	1.34	43.19	0	0.49	0.49
闸门溃决	38.76	0.09	1.42	1.51	43.18	0	0.56	0.56

由表3可知,与建闸前相比,闸门全开、无法开启工况下,桥址处河槽和河滩部分冲刷深度均减小,闸门溃决工况下河槽和河滩部分冲刷深度增大。其中,河槽部分总冲刷深度最大为1.51 m,较建闸前增加0.01 m;滩地部分总冲刷深度最大为0.56 m,较建闸前增加0.05 m。桥址处最大冲刷深度小于桥墩承台底埋深3.0 m,在允许冲刷深度范围内。

4 结论

1) HEC-RAS 计算模型具有较好的可靠性,可用于河道水流对铁路桥的安全运行影响分析。

2) 下游拦河闸建设后,河道行洪时,闸址处河道有效过流面积减小,导致上游桥址处水位升高。闸门无法开启时桥址处水位最高,但未超过两岸堤防顶高程,与铁路桥梁底间的桥下最小净空满足规范要求。

3) 闸门溃决计算分析表面,桥址处最大流量和最大平均流速均增大,增幅超过11.00%;河道有效过流面积突然增大,河道流量瞬增,水位骤降,之后两者逐渐减小,变化趋于一致。

4) 计算了桥址处河床的冲刷深度,与建闸前相比,闸门全开、无法启闭时桥址处河槽和河滩部分冲刷深度均减小,闸门溃决时河槽和河滩部分冲刷深度增大,最大冲刷深度在允许范围内,拦河闸不会对上游铁路桥安全运行产生不利影响。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 任逸飞. 基于大客流优先分配法的高速铁路列车停站方案优化[D]. 南昌: 华东交通大学, 2022.
- [2] 秦志龙. 交通基础设施建设对中国农业生产的影响研究[D]. 成都: 西南财经大学, 2022.
- [3] 章飞凡. 不同河床地形对下游桥墩局部冲刷影响试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- [4] 王军, 苏奕垒, 侯智星, 等. 冰盖条件下桥墩局部冲刷研究进展[J]. 水利学报, 2020, 51(10): 1 248-1 255.
- [5] 门昭宇. 斜交桥墩的局部冲刷试验及数值模拟研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [6] 王顺意, 牟力, 魏凯, 等. 不同水力条件下圆柱桥墩局部冲刷试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(3): 425-431.
- [7] 余世娇, 吴名剑, 李刚. HEC-RAS 二维模型在兰州黄河库区河道中的应用[J]. 人民黄河, 2021, 43(S2): 8-10.
- [8] 李磊, 李玉玉, 孙艳, 等. Hec-Ras 软件在桥梁防洪评价中的应用[J]. 水力发电, 2008, 34(3): 103-105.
- [9] 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]. 水利水运工程学报, 2019(2): 86-92.
- [10] 叶培, 刘小兵, 曾永忠. 基于 HEC-RAS 模型的克什米大桥防洪评价中的壅水计算[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(6): 9-13.
- [11] 全强, 孙立新, 王雯雯. HEC-RAS 模型在山区中小河流水面线计算中的应用研究[J]. 内蒙古水利, 2021(10): 9-10.
- [12] 蒋楠, 高成. 基于 MIKE 和 HEC-RAS 模型模拟锦江水面线比较研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(4): 26-30.
- [13] 李家星, 赵振兴. 水力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2001.
- [14] Hydrologic Engineering Center. River analysis system hydraulic reference manual[M]. 2016.
- [15] 国家铁路局. 铁路工程水文勘测设计规范: TB 10017—2021[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2021.

Study on the Influence of River Sluice on the Safety Operation on Railway Bridge in the Upstream

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

(Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250013, China)

Abstract: Based on the HEC-RAS model, the changes of water level, water flow and flow velocity at the upstream railway bridge site were calculated and analyzed under the conditions of gate fully-open, closed and collapsed. and Then the scour depth at the bridge site under each condition was calculated. The results showed that, compared to before the construction of the gate, the water level at the upstream bridge site increased after the gate was built, with the highest water level increased occurring when the gate cannot be opened, which was 10.7% higher than before the gate was built. When the gate breaking, the maximum water flow at the bridge site increases by 11.34%, the maximum average velocity increased by 11.11%, and the maximum scour depth of the river channel and beach increases, but it is allowable. The river sluice will not adversely affect the safe operation of the upstream railway bridge. The research results have great reference significance for similar engineering analysis.

Key words: HEC-RAS model; river sluice; railway bridge; scouring depth

责任编辑: 赵宇龙