

连续跨河桥梁的河道水动力特性模拟

崔凌一¹, 刘丽红^{1*}, 高 玮², 王 芳³, 许成成¹

¹安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

²安徽省交通勘察设计院有限公司, 安徽 合肥

³山东省鲁南地质工程勘察院, 山东 济宁

收稿日期: 2025年9月30日; 录用日期: 2025年10月20日; 发布日期: 2025年11月3日

摘 要

本文以安徽省蚌埠市淮河干流的四座连续跨河桥梁为例, 使用HEC-RAS建立蚌埠闸下至临淮关上游10 km之间河段的一维水动力数值模型, 模拟计算三种设计工况下各桥梁的壅水值及流速值。结果表明: HEC-RAS一维水动力模型能很好地再现连续桥梁的水动力特性过程, 河道水位模拟值与实测值的水位误差在1 cm左右, 表明该模型能较好反映河道洪水的实际运动情况; 四座桥梁的壅水值都随河道流量的减小而减小, 三个模拟计算工况下桥梁壅水值在0 m~0.026 m范围内; 桥下断面平均流速均大于桥梁上游断面平均流速, 断面平均流速的增幅随河道流量的减小呈现出减缓的趋势, 断面平均流速增大值均在0.04 m/s以内。

关键词

HEC-RAS, 连续跨河桥梁, 数值模型, 水动力特性, 桥梁壅水高度, 断面平均流速

Hydrodynamic Characteristics of River with Continuous River-Crossing Bridges Simulation

Lingyi Cui¹, Lihong Liu^{1*}, Wei Gao², Fang Wang³, Chengcheng Xu¹

¹School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

²Anhui Provincial Transportation Survey and Design Institute Co., Ltd., Hefei Anhui

³Shandong Lunan Institute of Geological Engineering Survey, Jining Shandong

Received: September 30, 2025; accepted: October 20, 2025; published: November 3, 2025

*通讯作者。

文章引用: 崔凌一, 刘丽红, 高玮, 王芳, 许成成. 连续跨河桥梁的河道水动力特性模拟[J]. 土木工程, 2025, 14(11): 2569-2576. DOI: 10.12677/hjce.2025.1411276

Abstract

This article takes four consecutive river-crossing bridges along the main stream of the Huai River in Bengbu City, Anhui Province, as an example. It uses HEC-RAS to establish a one-dimensional hydrodynamic numerical model for the river section between the Bengbu Dam and the upstream of Linhuai Pass over a distance of 10 km, simulating and calculating the water blockage values and flow velocity values at each bridge under three design conditions. The results show that the HEC-RAS one-dimensional hydrodynamic model can effectively reproduce the hydrodynamic characteristics of continuous bridges. The simulated water level in the river channel shows an error of about 1 cm compared to the measured values, indicating that the model can accurately reflect the actual movement of river floods; the water blockage values at the four bridges decrease as the river flow diminishes, with water blockage values under the three simulated conditions ranging from 0 to 0.026 m; the average flow velocity under the bridge section is always greater than that of the upstream section, and the increase in average flow velocity shows a tendency to slow down as the river flow decreases, with increases in average flow velocity remaining within 0.04 m/s.

Keywords

HEC-RAS, Continuous River-Crossing Bridges, Numerical Model, Hydrodynamic Characteristic Bridge Backwater, Average Sectional Flow Velocity

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

跨河桥梁的桥墩对水流产生干扰,同时减小了桥下过流断面的面积,水流流线在桥梁的上游形成收缩,下游形成扩散,加上桥体本身的阻力等因素,形成桥梁上下游的水位差,即造成了桥梁壅水[1] [2]。另外涉水桥墩的建设会改变其周围河道断面的水流速度,造成水流对桥墩的冲刷,从而降低桥墩的耐久性[3] [4]。

关于桥梁壅水值的计算,在防洪评价工程中因理论经验公式具有参数少、计算简单快捷的优点,故普遍采用经验公式法进行计算[5]-[7]。近代以来随着计算机技术的快速发展,国内外水利工程方向的研究人员更倾向于采用数值模拟法,通过建立相应研究区域的水动力数值模型进行桥梁壅水的计算。而水动力数值模型的优势在于它不仅不仅可以计算桥梁壅水,还可以得到桥梁桥址附近的水流速度,从而能对桥下断面河流的水动力特性变化进行分析。现如今我国学者大多使用 HEC-RAS、MIKE21 等代表性软件建立一维或二维水动力模型,例如任梅芳[8]通过使用 MIKE21 建立南渡江流域六座连续跨河桥梁的二维水动力模型模拟桥前壅水值,并与三种理论经验公式计算结果进行对比,重点讨论了桥梁壅水值随不同工况下河道内流量减小的变化机理。Xianqi Z [9]侧重于研究桥墩数量对河道水流形态的影响,通过建立 MIKE21 二维水动力模型分析不同桥墩数量下桥梁壅水高度、墩前流速以及流场的变化机理。孟如真[10]在使用 HEC-RAS 模拟计算拟建大桥的桥梁壅水值时,设置了三个小流量洪水工况,最终得到的桥梁壅水结果趋近于零。

以上研究虽都通过建立水动力模型对连续跨河桥梁的桥前壅水值进行模拟计算,但均未考虑桥梁建设是否会对桥下断面的平均流速产生影响。另外在河道水流流量较小时,涉水桥墩的建设对河道水流水

动力特性的改变并不明显,而在大流量洪水条件下却十分显著[11]-[13]。因此有必要考虑大洪水流量下河道连续跨河桥梁对桥下断面河道水动力特性的影响。本文以淮河干流四座桥梁为例,通过采用 HEC-RAS 建立蚌埠闸至临淮关之间河段的一维水动力数值模型,模拟不同工况下各桥梁桥址处水动力特性的变化,为实际工程中桥梁的设计、桥下断面河床的冲刷以及工程建设范围内河道的防洪减灾提供一定的参考价值。

2. HEC-RAS 模型简介

HEC-RAS 是由美国陆军工程兵团工程水文中心(HEC)开发的河道水力计算程序,其核心算法是基于经典水文学与水力学理论构建。HEC-RAS 目前的模拟能力包括河道一维恒定流,一维/二维非恒定流和一维泥沙输移/水质模型[14]。此外还支持坝,堰,堤,桥梁,涵管,闸门等水工建筑物的水力建模模拟,特别适用于具有明确几何边界条件的天然河道水力特征分析[15]。在 HEC-RAS 软件中桥梁的水力计算有能量平衡法、动量平衡法、Yarnell 公式法和 WSPRO 等四种方法,在模拟时根据河道不同的情况可选用不同的方法。针对本文目标桥梁所在河段开展研究时发现:河道内水流状态稳定,且河道内未发现显著阻水障碍物。基于以上水力要素特征,本次水力计算采用简化处理方式,将设计洪峰流量概化为恒定流量进行模拟分析。HEC-RAS 在恒定流模拟时采用能量守恒方程进行计算,能量法基于伯努利能量方程,能够综合考虑断面间的水位差、流速变化及能量损失,适用于河道坡度平缓、水流状态稳定的河段。HEC-RAS 其一维能量方程式如下所示:

$$Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

$$h_e = h_f + h_j = L \cdot \overline{S_f} + C \left| \frac{a_2 v_2^2}{2g} - \frac{a_1 v_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

式中: Z_1 、 Z_2 为上下游断面河底高程, m; Y_1 、 Y_2 为上下游断面河道水深, m; v_1 、 v_2 为上下游断面平均流速, m/s; α_1 、 α_2 为动能校正系数; g 为重力加速度; h_e 为工程阻水造成的上下游断面间的水头损失,包括沿程水头损失 h_f 和局部水头损失 h_j , 以及由于涉水桥墩阻水造成的水头损失; $\overline{S_f}$ 为上下游断面之间沿程水头损失梯度; L 为流量加权系数; C 为断面扩张或收缩系数[16]。

3. 研究区概况与数据来源

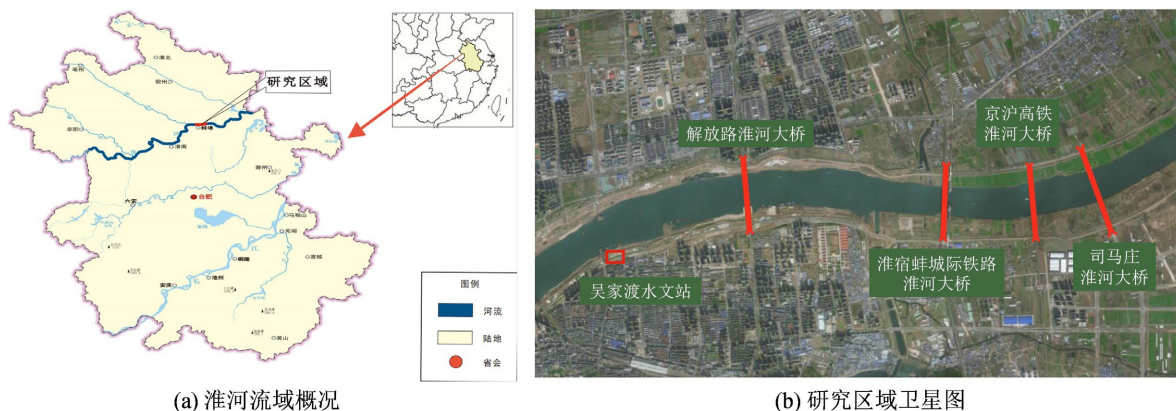


Figure 1. Conceptualized map and satellite image of the simulated river section
图 1. 研究区域概况图与卫星图

淮河发源于河南省南阳市桐柏县桐柏山太白顶西北侧河谷,淮河干流自西向东流经湖北、河南、安

徽、江苏四省，最终于江苏省扬州市三江营汇入长江水系，流域地跨湖北、河南、安徽、江苏、山东五省[17]。本文研究区域为蚌埠市龙子湖区内的淮河干流河段，位于北纬 32°56′，东经 117°23′，地处安徽省的北部，该河段概况与区域卫星图如图 1 所示。

本文利用 HEC-RAS 一维水动力模型，分别构建蚌埠龙子湖区内淮河干流蚌埠闸下至临淮关上游 10 km 河段内四座桥梁的数值模型。四座桥梁自上游往下分别为解放路淮河大桥、淮宿蚌城际铁路淮河大桥、京沪高铁淮河大桥和司马庄淮河大桥，其中司马庄淮河大桥为拟建大桥。模型中各桥梁的相关参数如表 1 所示。

Table 1. Parameters of bridges
表 1. 桥梁相关参数表

桥梁名称	桥型	跨河处桥梁全长/m	桥梁全宽/m	桥梁间距/m	涉河桥墩数	墩径/m
解放路淮河大桥	混凝土梁斜拉桥	820	19.5	-	12	3.1、10.5
淮宿蚌城际铁路淮河大桥	矮塔斜拉桥	868	12.5	1900	10	8.9
京沪高铁淮河大桥	连续梁桥	940	12.6	1142	15	7
司马庄淮河大桥	系杆拱桥	1042	42	858	14	8、14

4. HEC-RAS 模型建模

4.1. 河道桥梁概化

采用淮干航道整治实测河道地形资料，HEC-RAS 模型对蚌埠闸下至临淮关上游 10 km 之间的河段及桥梁进行概化处理，河道断面与桥梁位置概化图如图 2 所示。一维水动力模型共设置 15 个断面，其中 1 断面为模型上边界，11 断面为模型的下边界，2 断面吴家渡水文站为本模型的率定断面。另以其中解放路淮河大桥为例，3、4 断面进行桥梁上游与下游 30 m 处的水位高度、水流速度等水文特征参数模拟，3.5 断面设置与桥梁位置相距 0.001 m，用于模拟计算桥梁桥址处的相关水文特征参数，其他剩余三座大桥也采用相同的概化方式。

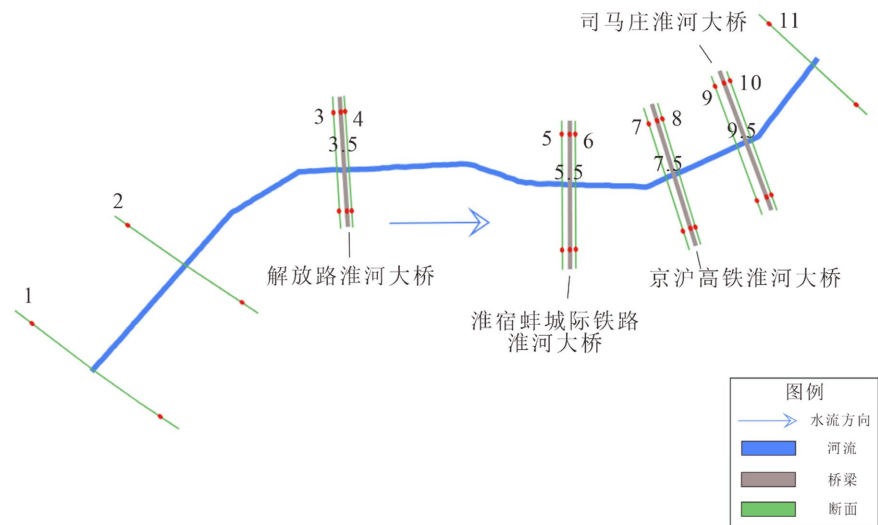


Figure 2. Generalized diagram of river section and bridge location
图 2. 河道断面与桥梁位置概化图

4.2. 模型率定与验证

选择 2020 大洪水年水文资料(流量为 8250 m³/s)和 2024 年 7 月 17 日 08 时的实测水文资料(数据链接: <http://www.bengshan.gov.cn/zfxgk/public/49611/52065805.html>)对模型糙率参数进行率定, 2 断面吴家渡水文站的模拟水位与实测水位的对比结果见表 2, 模拟水位与实测水位之间的误差均在 1 cm 左右, 该一维模型较好的再现了本河段洪水运动的实际情况, 最终确定 HEC-RAS 模型中主河槽糙率为 0.021, 滩地糙率为 0.031, 此模型可用于后续连续跨河桥梁不同工况下的水动力特性数值模拟。

Table 2. Simulation verification results table
表 2. 模型率定成果表

水文站	实测流量/(m ³ ·s ⁻¹)	实测水位/m	计算水位/m	绝对误差/m
吴家渡	8250	20.400	20.415	0.015
	6950	18.960	18.968	0.008

4.3. 模型计算工况

根据淮河流域的水文特征, 本文选用三种代表性的设计工况, 分别为淮河干流蚌浮段的防洪标准洪水(百年一遇)工况, 规划中等洪水工况以及常遇洪水工况。模型设计工况及边界条件具体如表 3 所示。

Table 3. Boundary conditions for the model
表 3. 模型边界条件控制表

设计工况	上边界流量/(m ³ ·s ⁻¹)	下边界水位/m
100 年一遇	13000	22.06
规划中等洪水	10500	21.58
常遇洪水	8000	20.50

5. 模拟结果分析

5.1. 水位模拟结果

不同工况下桥梁的壅水计算结果见表 4, 整体对比见图 3。由表 4 可知, 不同设计工况下河道内流量不同, 桥墩前的壅水值也不同。具体表现为随着洪水标准的增大、河道内流量的增加, 桥前壅水值逐渐增大。而在同种工况下, 各个桥梁由于所处位置、涉河桥墩数量以及桥墩大小的不同, 对应的桥梁壅水值也略有差异。100 年一遇洪水工况下, 桥前壅水值变化范围在 0.01 m~0.02 m 之间; 规划中等洪水工况下, 桥前壅水变化范围在 0.01 m~0.015 m 之间; 常遇洪水工况下, 桥前壅水变化范围在 0 m~0.012 m 之间。根据图 3 可知, 三个模拟计算工况下的最高壅水值均出现在淮宿蚌城际铁路淮河大桥, 最低值均出现在解放路淮河大桥。根据模拟结果并结合表 1 中桥梁距上游距离分析, 解放路淮河大桥与淮宿蚌城际铁路淮河大桥之间的距离为 1900 m, 因此解放路淮河大桥下游的三座连续桥梁对其产生的壅水影响可以忽略不计, 该桥梁在三个设计工况下的壅水值均在 1 cm 左右。闫杰超[18]在模拟分析桥梁群中桥梁间距因素对壅水影响时所得出的结论进一步验证了这一结果。而所研究的后三座桥梁之间桥梁间距在 1000 m 左右, 桥梁壅水值受到近距连续桥梁之间的影响, 由图 3 可知三座近距连续桥梁中淮宿蚌城际铁路淮河大桥的壅水值达 0.02 m, 故而多座近距连续桥梁会使上游桥梁的壅水值增大, 这一结果与闫杰超[18]关于桥梁座数影响壅水的结论一致。

因此在桥梁工程建设时，不仅要对大洪水工况下桥梁断面处的水动力特征进行重点研究，同时需考虑拟建桥梁是否会使其上游近距连续桥梁的壅水高度增大，必要时应对已建桥梁附近的河床、岸坡重新进行冲刷淤积计算及岸坡稳定分析。

Table 4. Simulated values of water pressure for each bridge under different working conditions
表 4. 不同工况下各桥梁壅水模拟值

桥梁名称	设计工况	桥下断面处水位/m	桥梁下游处水位/m	桥前壅水值/m
解放路淮河大桥	100 年一遇	22.450	22.449	0.001
	规划中等洪水	21.873	21.872	0.001
	常遇洪水	20.736	20.736	0
淮宿蚌城际铁路淮河大桥	100 年一遇	22.161	22.141	0.02
	规划中等洪水	21.653	21.638	0.015
	常遇洪水	20.555	20.543	0.012
京沪高铁淮河大桥	100 年一遇	22.115	22.104	0.011
	规划中等洪水	21.619	21.611	0.008
	常遇洪水	20.528	20.522	0.006
司马庄淮河大桥	100 年一遇	22.083	22.064	0.019
	规划中等洪水	21.595	21.581	0.014
	常遇洪水	20.508	20.499	0.009

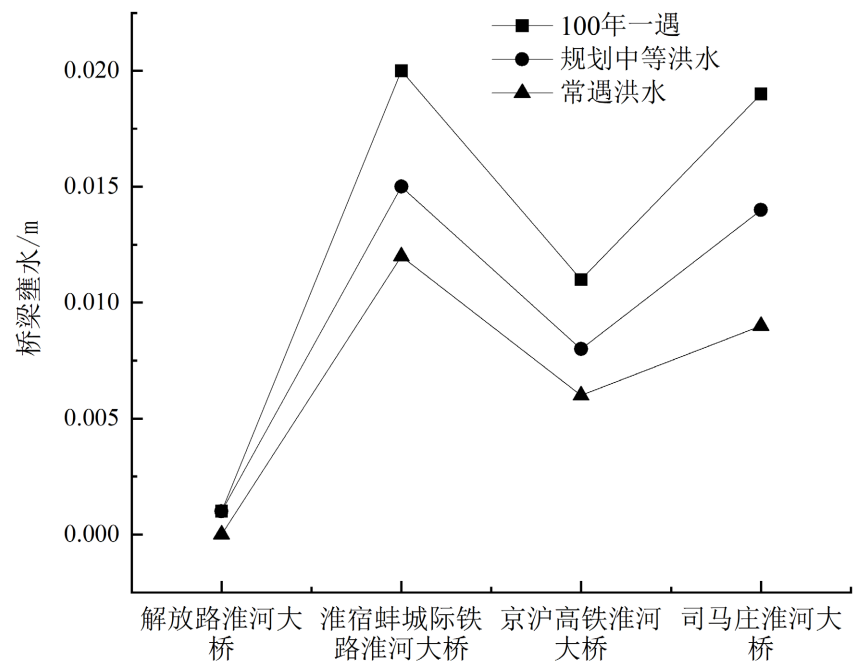


Figure 3. Comparison of water pressure values of each bridge under different working conditions
图 3. 不同工况下各桥梁壅水值对比

5.2. 流速模拟结果

不同工况下各个桥梁的断面平均流速模拟成果如表 5 所示。通过对比桥梁上游断面与桥下断面的平

均流速差可知，水流经过桥址处的流速都会略微增大，桥下断面平均流速增幅均在 0.04 m/s 以内。由图 4 可知，随着防洪要求的提高，河道内流量的增大，断面平均流速差值呈增大趋势。三种工况条件下，断面平均流速的最高值均出现解放路淮河大桥，其中在 100 年一遇工况下断面平均流速差值达 0.04 m/s。在实际工程应用中，桥下断面水流速度的大幅增大，会使得桥梁处水流裹挟泥沙的能力也随之增大，这将会造成桥下断面河床的冲刷，因此在桥梁工程建设时应重点考虑大洪水流量条件下桥梁断面平均水流速度的变化。

Table 5. Simulated flow velocity in front of each bridge pier under different working conditions
表 5. 不同工况下各桥梁墩前流速模拟值

桥梁名称	设计工况	桥梁上游断面平均流速/(m·s ⁻¹)	桥下断面平均流速/(m·s ⁻¹)	断面平均流速差值/(m·s ⁻¹)
解放路淮河大桥	100 年一遇	1.38	1.42	0.04
	规划中等洪水	1.17	1.20	0.03
	常遇洪水	0.99	1.01	0.02
淮宿蚌城际铁路淮河大桥	100 年一遇	1.81	1.83	0.02
	规划中等洪水	1.56	1.57	0.01
	常遇洪水	1.38	1.38	0
京沪高铁淮河大桥	100 年一遇	1.67	1.68	0.01
	规划中等洪水	1.42	1.43	0.01
	常遇洪水	1.24	1.24	0
司马庄淮河大桥	100 年一遇	1.45	1.47	0.02
	规划中等洪水	1.24	1.25	0.01
	常遇洪水	1.08	1.09	0.01

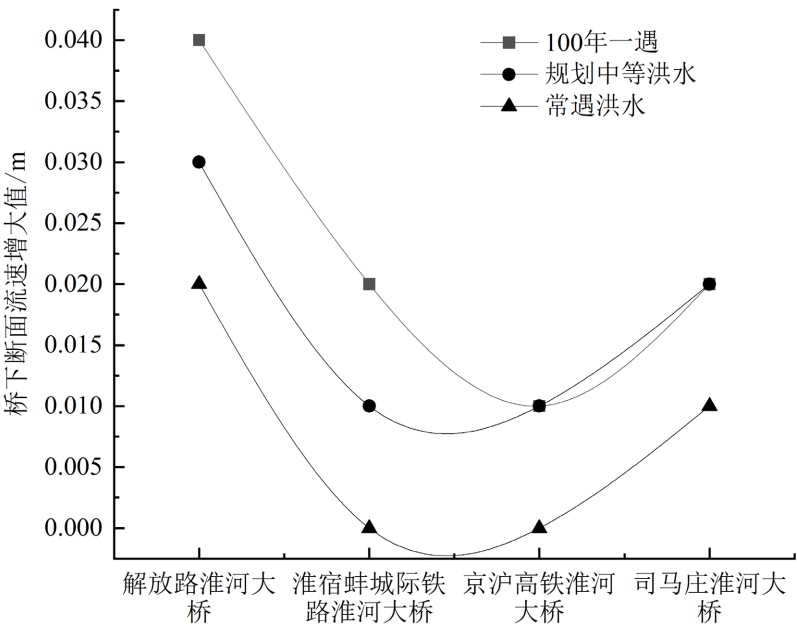


Figure 4. Comparison of average flow velocity increase at the bridge section
图 4. 桥下断面平均流速增值对比

6. 结论

(1) 本次研究选取淮河干流蚌浮段防洪标准洪水、规划中等洪水和常遇洪水三种设计工况下的水位流量数据对 HEC-RAS 一维水动力模型的边界条件进行设置, 采用实测洪水资料对河道糙率进行率定与验证。模拟水位与实测水位差在 1 cm 左右, 表明该河段模型仿真度较好。

(2) 通过三种工况下多连续桥梁的模拟分析可知, 随防洪要求的提高, 河道内流量的增加, 桥址处会出现不同程度的水位壅高以及流速增大的水文特性。随河道流量增大桥梁壅水高度增大较为明显, 桥址处水流速度的变化幅度相对平缓。100 年一遇工况下, 桥梁壅水高度最高达 0.02 m, 桥梁断面平均流速增值最高为 0.04 m/s。另外桥梁间距越大, 桥群阻水效应越小, 而下游桥梁的建设会使上游近距连续桥梁的壅水值增大。

(3) 本次对淮河干流多连续桥梁河道水动力特性模拟过程中, 采用 HEC-RAS 模型深入分析了桥前壅水高度和桥下断面流速的变化特性, 下一步拟开展桥梁的桥墩形状、间距及数量对桥梁壅水的影响研究。

基金项目

矿井水害探查与预警工程研究中心开放基金(高潜水位采煤沉陷区水资源循环模拟研究), 编号: 2024-CIERC-08。

参考文献

- [1] 石喜, 谭春彬, 贡力, 等. 河道斜交桥梁壅水及流场特性分析[J]. 泥沙研究, 2024, 49(2): 64-71.
- [2] 吴时强, 薛万云, 吴修锋, 等. 城市行洪河道桥群阻水叠加效应量化研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 96-102.
- [3] 王路, 刘宏伟, 魏凯, 等. 跨河桥梁基础冲刷研究综述[J]. 长江科学院院报, 2025, 42(7): 94-103.
- [4] 雷婷, 任建民, 陶虎, 等. 桥墩基础局部冲刷计算方法的对比研究[J]. 泥沙研究, 2020, 45(5): 61-68.
- [5] 孙治平, 赵志宏, 刘子金, 等. 基于 MIKE21 的跨河桥梁壅水数值模拟分析[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(6): 129-136.
- [6] 骆文广, 陆晶, 赖昊, 等. 近距多座并行桥梁墩前壅水研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(4): 6-13.
- [7] 蒋卫威, 鱼京善, 王纤阳, 等. 基于三维水动力模型与经验公式的桥梁壅水模拟与计算[J]. 水利水电技术, 2020, 51(9): 97-104.
- [8] 任梅芳, 徐宗学, 苏广新. 基于二维水动力模型与经验公式的桥梁壅水计算及其对比分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(5): 78-87.
- [9] Zhang, X., Lu, Y., Wu, X., Wang, T. and He, S. (2023) Simulation Study on the Influence of the Number of Bridge Piers on the Flow Regime of the Lower Yellow River. *Arabian Journal of Geosciences*, 16, Article No. 115. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11197-4>
- [10] 孟如真, 胡阳, 王志华, 等. 基于 MIKE21、HEC-RAS 及经验公式的桥梁壅水模拟及对比分析[J]. 城市道桥与防洪, 2022(10): 221-226, 25.
- [11] 黄靖轩, 陶涛, 孙小双, 等. 桥墩阻水比对弯道河流流速分布的影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(22): 9781-9789.
- [12] 陈隆吉, 李达, 侯玮, 等. 淮河干流洪峰流量变化特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(1): 171-179.
- [13] 贲鹏, 倪晋, 彭亮. 淮河干流蚌埠至浮山段河道整治效果及浮山以下河道整治必要性[J]. 中国防汛抗旱, 2025, 35(1): 36-40, 46.
- [14] 何家伟. HEC-RAS 模型在桥墩壅水计算中的应用[J]. 水利技术监督, 2022(2): 163-165, 210.
- [15] 李雨竹, 程磊, 程旭, 等. 基于 HEC-RAS 模型的城集镇洪灾淹没分析研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(12): 1536-1545.
- [16] 袁玉, 巴欢欢, 胡学东, 等. 基于 HEC-RAS 的水库坝址上下游桥梁工程壅水计算分析[J]. 水利水电快报, 2023, 44(1): 77-80, 86.
- [17] 何刚, 何训喜. 淮河流域水资源-经济-社会-环境耦合协调研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(11): 4484-4493.
- [18] 闫杰超. 输水明渠桥梁群壅水影响数值模拟分析[J]. 水利水电快报, 2023, 44(12): 76-81, 87.