



九圩港铁路桥对通航与引排水影响的 数值计算与分析*

杭庆丰¹, 胡颖^{2,3}, 王昌平¹, 王书亮¹

(1. 江苏省水文水资源勘测局盐城分局, 江苏 盐城 224051;

2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024; 3. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 采用二维水动力数值模拟, 计算桥梁修建前后的水流条件的变化, 分析其对九圩港河道通航和引、排水的影响。计算结果表明: 桥梁建设没有恶化通航水流条件, 并满足通航净高要求, 但在水位较低时无法满足通航净宽要求; 桥梁建设引起的近岸流速的增大可能对近岸产生不利冲刷。采取疏浚清淤平顺岸线的改善措施以及护岸加固可以减小桥梁建设可能引起的不利风险。

关键词: 九圩港大桥; 数值模拟; 通航; 引排水影响

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)11-0134-06

Influence of Jiuweigang bridge construction on the navigation, water diversion and drainage based on 2D numerical simulation

HANG Qing-feng¹, HU Ying^{2,3}, WANG Chang-ping¹, WANG Shu-liang¹

(1. Yancheng Branch, Jiangsu Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Yancheng 224051, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;

3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper analyzes the influence on the functions for navigation, water diversion and drainage of Jiuweigang river caused by the construction of the proposed bridge by 2D numerical simulation model. The main conclusions are: 1) The impact of the bridge construction on the navigable flow conditions would be minimal and the navigable clearance height would meet the demand, but the navigable clearance width wouldn't meet the demand when the water level is low; 2) More attention should be paid to the safety of the right bank of the river for the increasing flow velocity. The impact of the piers should be decreased by some optimized improvement measures.

Keywords: Jiuweigang bridge; numerical simulation; navigation; impact of water diversion and drainage

九圩港是南通市重要的一级河道, 河道较顺直, 且河岸稳定, 在出江口门 1.3 km 处设有九圩港水闸(图 1), 兼具通航、引水、排涝和挡潮功能。

沪通铁路线路在九圩港水闸上游约 9 km 处跨越九圩港(图 1), 其中 2 个桥墩位于水中(图 2)。

拟建桥梁下游 88 m 和 61 m 处已有宁启线与宁启改线等 2 座铁路桥。3 座紧挨着的桥梁成了桥群, 将对河段通航和引排水产生影响, 因此在桥梁建设前需要论证其影响程度与范围。不过待宁启改线全面通车后, 宁启线铁路桥将予以拆除。

收稿日期: 2016-04-27

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51309160)

作者简介: 杭庆丰(1960—), 高级工程师, 从事水文测验与水文分析、水资源计量与管理工作。

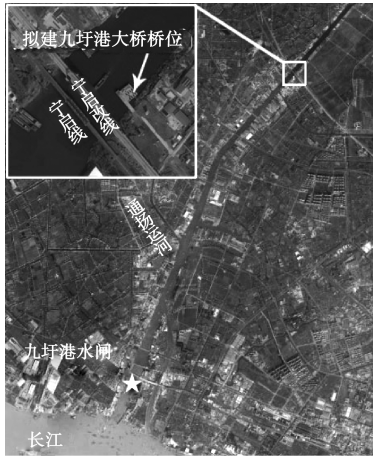


图 1 九圩港河道平面

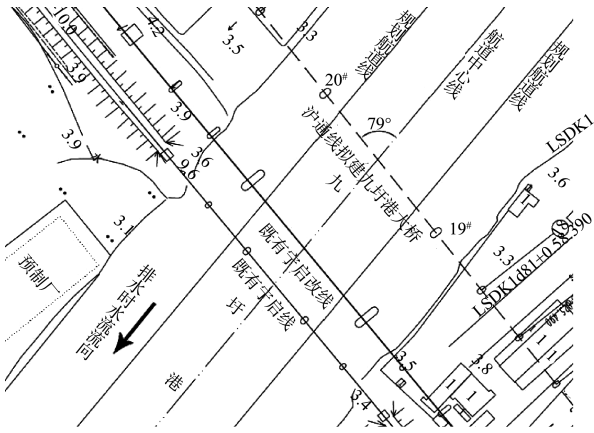


图 2 拟建九圩港大桥桥区段 (单位: m)

跨河桥梁是交通工程建设中的重要渡河建筑物。桥墩位于河道中, 占河道的过水面积, 改变局部流态, 可能限制航道的船舶通过能力, 并造成桥基冲刷、岸滩冲淤等多种工程隐患^[1]。马进荣等^[2]指出高铁桥墩因尺度较大, 有明显水流控导作用, 对堤防安全容易造成直接威胁。余建星等^[3]从桥梁建筑、桥梁壅水与洪水侵桥 3 方面系统地研究了发生洪水灾害时大型桥梁防洪影响的评估分析方法。

桥墩影响计算的水力学计算公式有很多。王开等^[4]结合水工模型试验资料, 对比检验了不同桥墩壅水高度计算公式。张佰战等^[5]用量纲平衡方法导出桥墩局部冲刷新公式。吴雪茹^[6]通过分析计算公式中主要参数对一般冲刷的影响, 提出确定一般冲刷深度的建议。夏丽丽等^[7]发现利用经验公式计算桥位冲深时河槽和河滩的流量分配对结果有很大影响。但经验公式计算结果不能全

面反映桥墩对河道水流条件的影响, 因此, 一般视桥区河段的复杂程度, 采用水力学计算、二维水动力数值模拟或者物理模型试验^[8]等方式进行研究与分析。

九圩港拟建大桥处与下游宁启线和宁启改线形成桥群河段。通过数学模型, 计算分析建桥前后水流条件的变化, 能够更全面直观地反映桥梁建设给河道通航和引排水造成的影响, 给桥梁设计等相关部门提供参考依据, 从而保证河道通航安全、堤防稳固、河势稳定、行洪通畅等, 也为类似桥梁建设论证提供参考。

1 二维水流数学模型的建立

1.1 控制方程

由于河道水平尺度远大于垂向尺度, 选取沿水深平均的二维浅水流动质量和动量守恒控制方程组。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial (h\bar{v})}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\frac{\partial (h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial (h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial (h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} -$$

$$\frac{gh^2 \partial \rho}{2\rho_0 \partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \quad (2)$$

$$\frac{\partial (h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial (h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial (h\bar{v}^2)}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} -$$

$$\frac{gh^2 \partial \rho}{2\rho_0 \partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \quad (3)$$

式中: x 、 y 为直角坐标系坐标; t 为时间变量; η 为波面高程; d 为静水水深; $h = \eta + d$ 为总水深; u 、 v 为 x 、 y 方向上的流速; \bar{u} 、 \bar{v} 为 x 、 y 方向上的垂线平均速度; p_a 为大气压强; ρ 为水流密度; ρ_0 为水密度的参考; S 为点源处的流量大小; g 为重力加速度; u_s 、 v_s 为点源的流速; τ_{sx} 、 τ_{sy} 、 τ_{bx} 、 τ_{by} 为 x 、 y 方向上的表面风速和底部应力; f 为科氏参数 ($f = 2\omega \sin \phi$, ω 为地球旋转角速度, ϕ 为纬度); T_{xy} 、 T_{yy} 为横向应力。

1.2 控制条件

1) 边界条件。

数学模型通常使用开边界和闭边界两种边界

条件。上游入流开边界采用流量控制，下游出口边界采用水位控制。模型闭边界法向流速为0，并采用干湿判别的动边界。

2) 初始条件。

计算开始时，将计算区域内各点的水位、流速值设为计算的初始条件。

基于以上定解条件，采用有限体积法(FVM)求解基本方程的数值解。

1.3 研究区域网格剖分及地形

模型范围上至拟建桥位上游6 km处，下至下游约9 km处九圩港水闸，总长15 km。采用无结构三角形单元格，根据实测地形特征对计算域进行网格剖分(图3)。单元网格尺寸一般在10~20 m，桥墩附近网格尺寸加密至0.5 m，桥墩按出水边界处理。桥区地形等高线见图4。总体上，河道比较顺直，但在既有宁启线桥位下游，由于人工开挖，两岸地形形成一卡口。九圩港水闸在排涝和引水时，河道内水流方向相反。因此，文中计算河道引、排水与通航，均考虑2种流向。

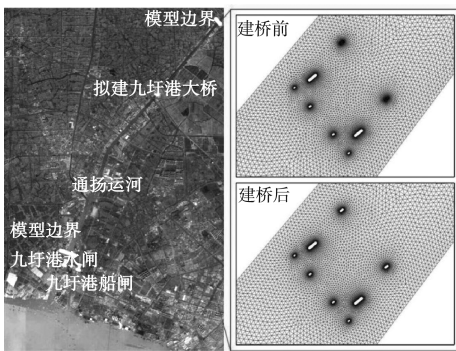


图3 数学模型网格剖分

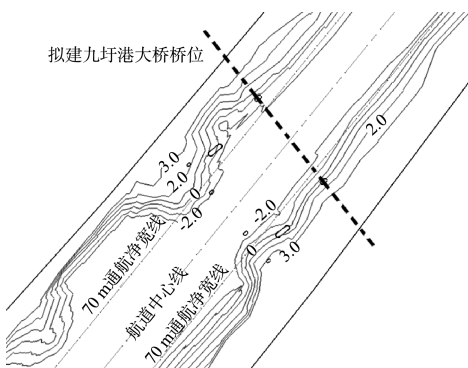


图4 拟建九圩港大桥桥区地形(单位:m)

1.4 模型参数率定

由于本河段为闸控河道，影响河道水流的主要因素是河道糙率。受水闸控制，正常情况下，水位保持稳定且流速非常小，缺乏实测资料，验证困难。根据经验，运河糙率一般在0.013~0.019。因此模型糙率选取0.013~0.019，河心部分糙率取0.013~0.017，近岸局部由于存在植物，糙率取0.017~0.019。

2 桥梁建设对通航和引排水影响

2.1 计算水流条件

1) 通航计算水流条件。

一般而言，河道内流速大小、桥墩附近的紊流大小、范围随来流量的增加而加大^[9]。作为不利考虑，模型采用桥位最高通航水位作为控制水流条件。根据南通市航道管理处关于通扬运河和通桥线的相关资料，拟建桥位所处航段最高通航水位为3.59 m。通过九圩港水闸闸上引/排水流量关系曲线取得下边界水位，通过试算确定桥位处达到最高通航水位时的九圩港水闸水位和流量，见表1。

表1 通航计算水流条件

工况	流量/(m ³ /s)	水闸处水位/m	桥区水位/m
排水	1 150	3.35	3.59(最高通航水位)
引水	1 050	3.97	3.59(最高通航水位)

2) 引排水计算水流条件。

根据《江苏省防洪规划》，排水方向拟选取20 a一遇和50 a一遇洪水条件作为洪水排涝工况计算条件。考虑不利情况，引水方向选取九圩港水闸与提水泵站最大设计引水流量作为引水工况计算条件。根据闸上引/排水流量关系曲线，确定不同流量条件下对应的九圩港水闸水位作为边界条件。得到洪水计算条件见表2。

表2 引排水计算水流条件

工况	流量/(m ³ /s)	水闸处水位/m	说明
排水	1 170	3.37	20 a一遇
排水	1 240	3.49	50 a一遇
引水	1 690	4.90	设计最大引水流量

由于数学模型未考虑通扬运河的分流、汇流影响, 模型计算流量偏大; 另一方面, 拟建铁路跨越的九圩港河段, 两岸高程一般在 3.2 m 左右, 选取的洪水流量实际发生时, 洪水已漫堤, 因而, 模型计算水位与流速对河道行洪及岸坡稳定均偏于不利。

2.2 桥墩阻水比

通过现有资料选取数值计算结果, 选取上述计算条件中的桥位处水位为特征水位, 计算不同水位下桥墩及承台阻挡水流所占面积(水流的法向投影面积)与河道在水流法向的过水面积的比值, 统计不同水位下桥墩阻水比, 统计结果见表 3, 不同特征水位阻水比在 5.5% 左右。

表 3 拟建九圩港大桥阻水比分析

桥位处水位/m	阻水比/%	说明
3.72	5.59	50 a 一遇水位
3.67	5.61	20 a 一遇水位
3.59	5.63	最高通航水位
2.40	5.58	九圩港正常水位

2.3 对河道通航功能的影响

1) 对通航水流条件的影响。

桥梁修建对桥区通航水流条件的影响主要表现在桥墩绕流产生的紊流, 减少了桥区船舶安全通航的水域范围。对船舶航行安全而言, 可用横向流速大小及其范围来表征。

排水方向设计最高通航水位时, 建桥前桥位附近主流流速为 2.0~2.4 m/s; 引水方向设计最高通航水位时, 建桥前桥位附近主流流速为 1.8~2.2 m/s。桥梁建成后, 对流速影响主要集中在桥墩附近, 而规划航道内流速增幅不超过 0.05 m/s。规划航道线内横流主要由拟建九圩港大桥下游地形突出形成的卡口(图 5)以及位于航道线内的宁启线的桥墩引起。而拟建桥墩引起的横流, 集中在桥墩附近(表 4), 自内向外逐渐减小, 而规划航道线以内横流大小一般不超过 0.1 m/s(图 5b))。可见, 拟建桥梁没有恶化航道的通航水流条件, 不会对船舶航行安全产生影响。

表 4 设计最高通航水位下建桥后横流宽度值统计

方向	横向流速/ (m/s)	沿航宽方向的 横流宽度/m		沿桥轴线方向的 横流宽度/m	
		19#右侧	20#左侧	19#右侧	20#左侧
排水 方向	0.1	5.7	9.0	6.3	8.1
	0.2	3.3	5.4	4.3	4.6
	0.3	2.0	3.7	3.0	3.2
引水 方向	0.1	4.7	7.5	4.1	8.2
	0.2	2.5	2.7	2.5	2.9
	0.3	1.6	1.3	1.5	1.6

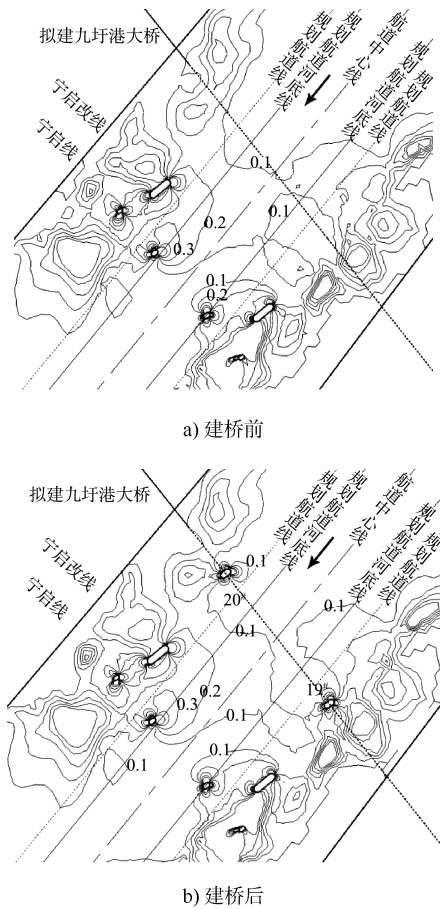


图 5 拟建九圩港大桥建桥前、后桥区横流大小分布(单位:m/s)

2) 对通航尺度的影响。

根据《江苏省干线航道网规划》, 九圩港规划为 III 级航道, 九圩港航道尺度为 3.2 m×45 m×480 m(航深×航宽×转弯半径)。综合规范、区域性航道网规定及当地航道部门要求, 研究河段通航净高和净宽需分别达到 7 m 和 70 m。

①通航净高: 九圩港大桥设计最高通航水位为 3.59 m, 要求通航净高为 7 m, 则最低梁底高

程应不低于 10.59 m。根据桥梁设计图, 拟建桥梁 70 m 通航净宽内梁底高程分别为 12.04 m (19#墩侧) 和 12.81 m (20#墩侧), 均高于最低梁底高程 10.59 m, 通航净高满足要求。

②通航净宽: 拟建桥轴线与水流法向夹角为 22°, 19#、20#主墩位于河道中, 间距 97 m, 净宽为 90.6 m。最高通航水位 3.59 m 时, 通航孔满足航深 3.2 m 且横向流速不大于 0.3 m/s 的航宽分别达到 84.9 m (排水)、87.7 m (引水), 均大于规划要求的 70 m 通航净宽; 最低通航水位 1.25 m 时, 规定要求的 70 m 通航净宽线范围内局部区域不满足 3.2 m 航深。

2.4 对河道引排水功能的影响

1) 桥梁建设引起桥位上游水位壅高, 最大壅高位于桥墩墩前位置 (表 5), 而对近岸水位影响较小。排水方向时, 不同洪水频率下桥位上游壅水长度在 1 200 m 以内, 但近岸水位最大抬升一般不超过 0.02 m; 引水方向, 桥位上游壅水长度为 1 450 m (设计最大引水流量), 近岸水位壅高不超过 0.01 m。

表 5 建桥后桥位上游壅水长度和墩前最大壅水高度统计

水流条件	桥位上游壅水长度/m	墩前最大壅水高度/m		水流方向
		19#桥墩	20#桥墩	
20 a 一遇	1 150	0.17	0.17	排水方向
50 a 一遇	1 197	0.19	0.18	排水方向
设计流量	1 450	0.24	0.17	引水方向

2) 桥梁建成后, 受桥墩的挤压作用, 桥墩两侧的水流流速增大, 且右岸流速增幅较左岸大 (图 6, 以 50 a 一遇为例)。近岸流速增大区域主要集中在桥位附近的上下游 (表 6), 桥位处近岸流速增幅最大, 向上下游逐渐减小。

表 6 建桥后近岸流速增幅范围及最大值

洪水标准	流速增大范围/m		近岸流速增幅/(m/s)		水流流向
	左岸	右岸	左岸	右岸	
20 a 一遇	-35~127	-53~58	0.08	0.22	排水方向
50 a 一遇	-52~144	-74~70	0.09	0.28	排水方向
设计最大引水流量	-57~248	-68~304	0.07	0.08	引水方向

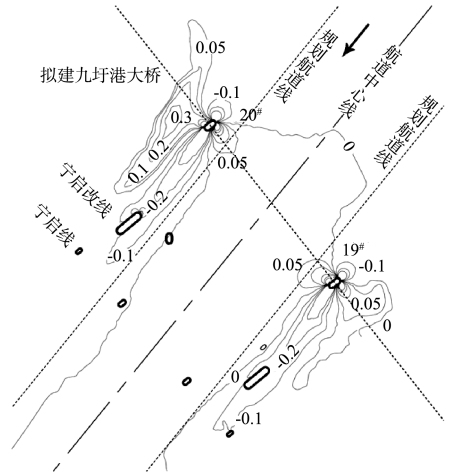


图 6 拟建九圩港大桥建桥前、后桥区流速变化 (单位:m/s)

总体上看, 建桥引起的水位壅高不会对堤防产生影响, 而右岸的流速增大可能对右岸产生不利掏刷, 需引起重视。

3 通航改善措施

3.1 改善措施简介

根据前文分析, 桥梁建设对通航的不利影响主要为低水位时通航净宽内航深不足, 因此建议通过疏浚清淤、清除卡口的方法, 不仅使航深达到要求, 同时平顺岸线、改善地形造成的不利流态。

桥区通航改善措施主要包括 3 方面: 1) 通航净宽 70 m 范围内进行疏浚; 2) 切除既有宁启线附近的卡口, 平顺衔接上下游地形, 消除不利流态; 3) 结合后期九圩港 III 级航道的建设对宁启铁路进行拆除, 减小规划航道内的横流大小与范围。改善措施实施后地形见图 7。

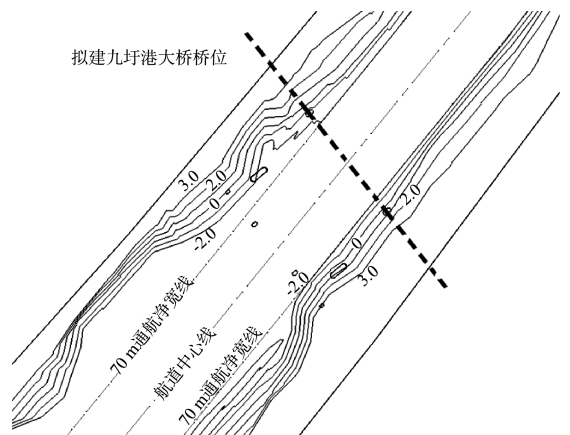


图 7 拟建九圩港大桥桥区改善措施实施后地形 (单位:m)

除此之外, 考虑建桥后桥墩附近以及右岸流速的增大可能造成的不利冲刷, 建议在桥位上下游各 100 m 的范围内进行护岸加固, 并对桥墩采取一定的防护措施。

3.2 改善措施效果分析

改善措施实施后, 可满足 3.2 m 航深要求。以排水方向最高通航水位条件为例, 桥区横流大小及范围得到有效改善: 规划航道内原 0.1~0.3 m/s 的横流区消失(图 8), 拟建九圩港大桥主桥墩附近横流宽度明显减小。总体上规划航道内横流小于 0.1 m/s。改善措施的实施, 减小了航道内的横流大小与范围, 明显改善了桥区水流流态。

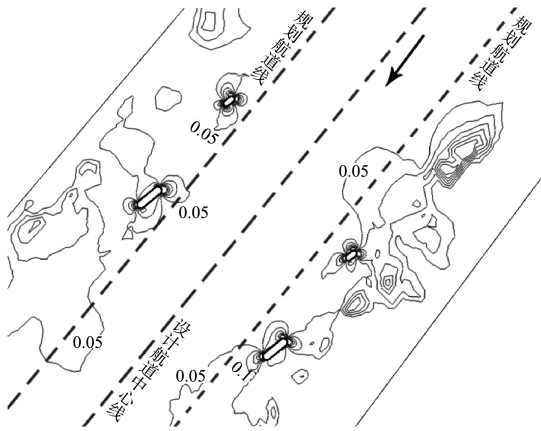


图 8 宁启线拆除后桥区横流分布 (单位: m/s)

4 结论

九圩港河道兼具通航、排涝、引水等功能。河道内正常水位到 50 a 一遇洪水位, 拟建沪通铁路九圩港大桥桥墩的阻水比在 5.58%~5.63%, 明显占用了河道过水面积。本文考虑引水和排水时河道流向的不同, 计算了典型流量下建桥前、后水流条件的变化, 分析建桥对河段通航、引排水的影响。计算结果表明:

1) 建桥对流速的影响以及引起的横流主要集中在桥墩附近, 建桥引起的规划航道线以内流速增幅一般不超过 0.05 m/s, 横流大小不超过 0.1 m/s, 拟建桥梁不会恶化航道的通航水流条件。

2) 桥梁建设满足通航净高要求, 但在水位较低的情况下, 不能满足 70 m 通航净宽的要求, 需要通过疏浚开挖等通航改善措施使得航道达到要求。

3) 建桥引起的水位壅高不会对引水灌溉和排水行洪产生明显影响, 但右岸的流速增大可能对近岸产生不利淘刷, 建议对近岸进行护岸加固以减少不利影响。

4) 通过疏浚清淤、平顺水流的通航改善措施, 可明显减小航道内尤其是位于宁启线附近的横流流速, 改善航道流态, 提高船舶航行安全。

参考文献:

- [1] 缪吉伦, 张晓明, 王召兵. 桥梁建设对内河通航条件影响研究[J]. 水运工程, 2004(9): 66-69.
- [2] 马进荣, 李宗骏. 铁路跨河桥梁工程防洪评价常见问题探讨[J]. 水利水运工程学报, 2015(6): 76-81.
- [3] 余建星, 王宏伟, 王永功, 等. 大型桥梁防洪影响评估方法研究[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(4): 135-140.
- [4] 王开, 傅旭东, 王光谦. 桥墩壅水的计算方法比较[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(6): 53-55.
- [5] 张佰战, 李付军. 桥墩局部冲刷计算研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(2): 48-51.
- [6] 吴雪茹. 桥墩一般冲刷计算研究[J]. 水运工程, 2007(5): 27-30.
- [7] 夏丽丽, 吴敦银. 防洪评价中跨河桥梁壅水和冲刷计算探讨[J]. 江西水利科技, 2010, 36(4): 251-255.
- [8] 曹民雄, 甘小荣, 周丰年, 等. 潮汐河段桥墩对水流影响的数值计算与分析[J]. 人民长江, 2006, 37(4): 81-84.
- [9] 李鹤高, 林钢. 桥墩周围紊流区宽度研究[J]. 水运工程, 2009(8): 102-106.

(本文编辑 武亚庆)

