



# 弯曲分汊河段桥区通航水流条件 及通航孔调整净宽分析\*

胡宝瑶<sup>1</sup>, 江涛<sup>2</sup>, 邓涯<sup>3,4</sup>, 马爱兴<sup>3,4</sup>, 胡颖<sup>3,4</sup>

- (1. 江西省港口集团有限公司, 江西 南昌 330008;  
2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;  
3. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;  
4. 南京水利科学研究院, 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 建设于弯道、分汊的通航环境复杂河段的老旧桥梁在部分水情下海事安全风险较高。为研究调整通航孔对提高此类老旧桥梁通航安全性的作用, 以赣江丰城公路大桥为例, 建立全长 14.7 km 的二维水流数学模型, 对下游龙头山航电枢纽运行前后洪、中、枯各级流量下河道水流特性、桥孔内和桥区通航水流条件进行计算与分析, 并按照规范方法论证桥梁净宽尺度及其调整的可行性。研究成果可为类似弯曲分汊河段老旧桥梁通航环境改善提供借鉴。

**关键词:** 赣江; S 形弯道; 分汊河段; 通航孔; 调整; 通航水流条件

中图分类号: U 617.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0192-07

## Analysis of navigation flow conditions around bridge and clear width of navigable openings adjustment in curved branching river reach

HU Bao-yao<sup>1</sup>, JIANG Tao<sup>2</sup>, DENG Ya<sup>3,4</sup>, MA Ai-xing<sup>3,4</sup>, HU Ying<sup>3,4</sup>

- (1. Jiangxi Port Group Co., Ltd., Nanchang 330008, China; 2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;  
3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,  
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;  
4. Key Laboratory of Port, Waterway & Sedimentation Engineering Ministry of Communications, PRC,  
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The old bridges constructed in the curved branching reach under complicated navigation environment face great risks under some water conditions. To study the effect of navigable opening adjustment on the improvement of safe navigation, we take Fengcheng Highway Bridge in Ganjiang River as an example and establish a 2D hydrodynamic numerical model of 14.7 km long to calculate and analyze the river flow characteristics and navigation flow conditions in the openings and around the bridge under several scenarios from the drought season to the flood season before and after the operation of the downstream Longtoushan Navigation-power Junction. Based on the calculated results, we demonstrate the bridge clear width scale and the feasibility of its adjustment in accordance with the code. The research results may serve as a reference for the improvement of the navigation condition of other old bridges in the curved branching river.

**Keywords:** Ganjiang River; S-shaped curve; branching reach; navigable opening; adjustment; navigation flow condition

收稿日期: 2021-11-15

\*基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y220010、Y220011、Y221012、Y221013); 江西省交通运输厅科技项目(2018Z0003)

作者简介: 胡宝瑶(1972—), 男, 高级工程师, 从事内河港口与航道工程建设与管理工作。

我国部分通航河流上的老旧桥梁在建设初期并未进行充分的航道通航安全影响评价论证, 尤其是在弯道、分汊等河势与通航环境复杂河段。随着社会经济的不断发展, 沿线航道等级逐渐提升, 通航船舶日益大型化, 此类桥梁往往成为关键的制约性节点和海事风险的高发区域。因此, 复杂通航环境下老旧桥梁通航安全的改善一直是水运工程领域的关注热点之一。

在弯道河段, 河道主流受离心力的影响, 存在横向环流、二次流等复杂水流特性, 尤其在连续性弯道或 S 形弯道, 河道主流还存在由上一个弯道凹岸向下一个弯道凹岸偏移的趋势<sup>[1-2]</sup>, 在中枯水期尤为明显。因此如此复杂水流环境的弯道河段一般不建议作为跨河桥梁的选址<sup>[3-4]</sup>。但受限于时代背景或线位走向、区域规划等因素, 在弯道处也有建桥, 关于其通航净宽的论证研究也很丰富, 主要落脚于包含紊流<sup>[5]</sup>、水流与桥轴线法向交角等因素在内的净宽加宽值<sup>[6-8]</sup>。

分汊河段由于主流分成两汊或多汊, 在中枯水期水流动力轴线出现较大的偏转<sup>[9-10]</sup>, 导致水流与桥轴线法向出现较大偏角, 航道范围内易形成横流, 影响通航安全<sup>[11]</sup>。此外, 未建设控制性倒流工程的分汊河段还可能存在周期性的主汊、支汊转换, 也不利于航道条件的稳定。因此, 也不是建桥的优良选址。许多学者对分汊河段桥梁净宽也开展了论证研究, 主要集中于加宽值的论证<sup>[12-15]</sup>。

可见, 弯道或分汊河段桥梁受复杂的水流环境, 导致桥区航道内水流与桥轴线法向交角较大、横流明显, 海事风险较高。因此, 在桥梁已建的情况下, 有必要针对改善桥区通航安全环境的措施进行探讨。

以修建于 20 世纪 90 年代初、位于弯道分汊河段的赣江丰城公路大桥为例, 通过建立 14.7 km 二维水流数学模型, 计算与分析河道水流特性、通航孔内和桥区内通航水流条件, 探讨调整通航孔对改善桥区通航环境的可行性, 为类似弯曲分汊河段老旧桥梁通航环境改善提供借鉴。

1 赣江丰城公路大桥概况

丰城赣江公路大桥位于江西丰城市境内, 于 1992 年 11 月建成通车, 全长 1.21 km, 设计四孔通航, 目前为中间的 1<sup>#</sup>(上行)、2<sup>#</sup>(下行)两孔通航, 通航孔跨径 70 m、墩宽 2.5 m, 见图 1。桥址处于赣江高等级航道樟树—南昌段, 航道规划等级为Ⅲ-(3)级, 通航代表船型为 1 000 吨级。

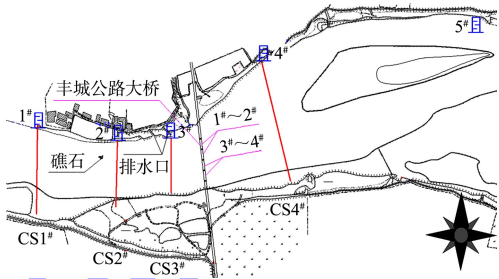


图 1 桥址附近河势及水文测验布置

受历史发展局限性所制, 在桥梁建设时期并未充分开展航道通航影响评价论证工作。桥址处于弯道河段中间, 下游水流分汊, 受左汊吸流影响, 在中洪水时期(5 000~8 000 m<sup>3</sup>/s), 1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>孔内桥轴线法线方向与水流交角较大(>5°), 实际桥跨 70 m 小于满足Ⅲ级航道跨河建筑物净宽要求的桥跨计算值(85 m 和 97 m)。同时, 桥址上游 670 m 有一礁石(高程 10.5~16.2 m)邻近主航道, 在中水时期(3 000 m<sup>3</sup>/s 左右)时隐时现, 极易造成船舶触礁; 桥址左侧上游 150、270 m 各有 1 处丰城电厂的排水口(流量 40、44 m<sup>3</sup>/s), 进一步增加了 1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>孔桥区附近水流条件的复杂性, 导致海事风险偏高, 近年来也造成多名船员伤亡和船舶翻沉事故。由于海事高发期主要在中水及中洪水期, 而下游龙头山枢纽为径流式电站, 且未竣工, 因此需开展丰城公路大桥通航孔调整相关研究。

2 二维水流数学模型的建立与验证

2.1 模型的建立

考虑到丰城公路大桥桥区附近 S 形弯道、下游两级三汊的河势特征, 以及龙头山枢纽(上距桥址 10.1 km)回水的影响, 所建立的二维水流数学模型上起丰城公路大桥上游 4.6 km(丰城铁路桥上

游 2.9 km), 下至龙头山枢纽, 全长 14.7 km, 模型范围见图 2。

根据地形特征对计算域进行网格剖分, 纵向、横向网格尺寸分别为 20、30 m, 丰城公路大桥桥

区内网格进行局部加密, 纵向和横向均为 5 m, 所有涉水桥墩均采用出水边界处理, 网格尺度在 0.5~1.0 m。整个计算网格结点约 111 605 个, 单元 221 388 个。

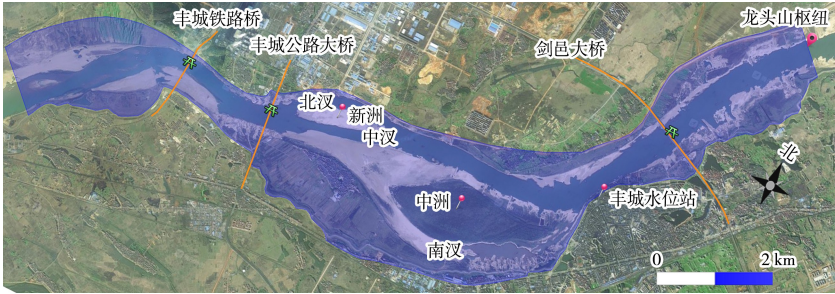


图 2 二维水流数学模型范围

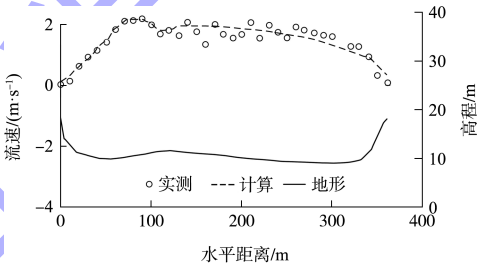
河道内糙率是个综合影响因素, 需要考虑河床组成、床面形态以及边滩上植被覆盖情况等。根据实测水文资料, 研究河段主槽内糙率在 0.018~0.022, 浅滩或边滩内的糙率在 0.025~0.035, 与赣江其他相似河段糙率的选取基本一致。

2.2 模型验证

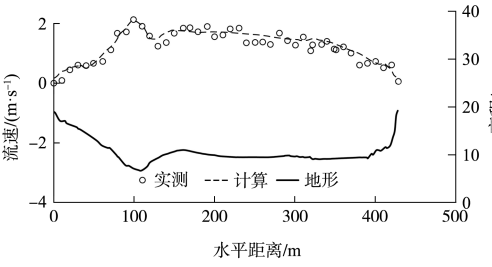
采用 2016 年 4 月 28 日赣江实测中洪水期水文资料进行验证, 测量期间上游来流较为平稳, 流量为 5 200 m<sup>3</sup>/s, 下游丰城水位站实测水位为 18.84 m。水文资料包括丰城公路大桥桥区范围及上下游的沿程 5 把水尺和 4 个断面流速分布, 验证结果见表 1 和图 3。

表 1 沿程水位验证结果

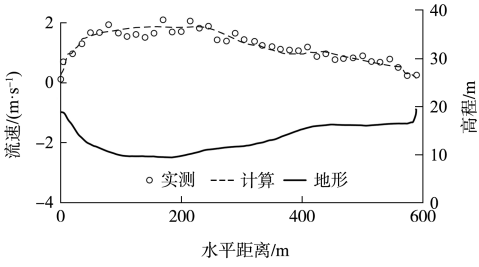
水尺	实测值	计算值	差值
1 <sup>#</sup>	19.58	19.60	0.02
2 <sup>#</sup>	19.56	19.58	0.02
3 <sup>#</sup>	19.52	19.54	0.02
4 <sup>#</sup>	19.49	19.48	-0.01
5 <sup>#</sup>	19.49	19.46	-0.03
丰城水位站	18.84	18.84	0.00



b) CS2<sup>#</sup>



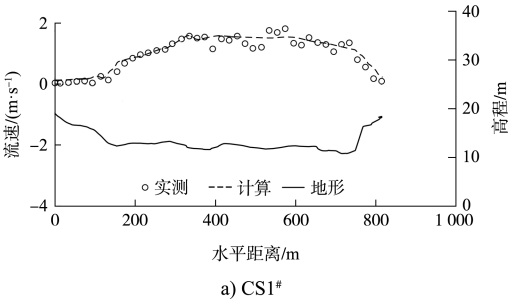
c) CS3<sup>#</sup>



d) CS4<sup>#</sup>

图 3 各测流断面流速分布验证

数学模型计算的沿程水位与实测资料基本一致, 误差在±3 cm 以内; 沿程 4 条断面流速分布与实测资料符合较好, 断面流量误差在±5% 以内, 均满足 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术



a) CS1<sup>#</sup>

规范》<sup>[16]</sup> 要求。

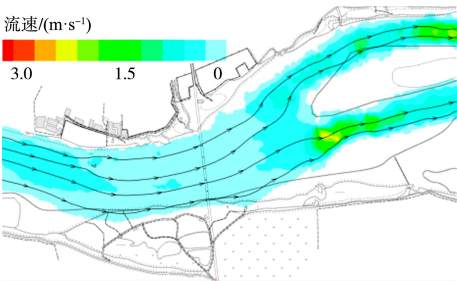
### 3 桥区通航水流条件分析

龙头山枢纽径流调节能力为日调节式, 目前尚未竣工, 考虑到未来枢纽回水的影响, 研究工况分为枢纽运行前的天然状态和枢纽运行后两大类, 6 个特征流量的选取见表 2, 其中天然状态下枢纽坝址水位按历史水位流量关系确定, 枢纽运行后按调度方式确定<sup>[17]</sup>。

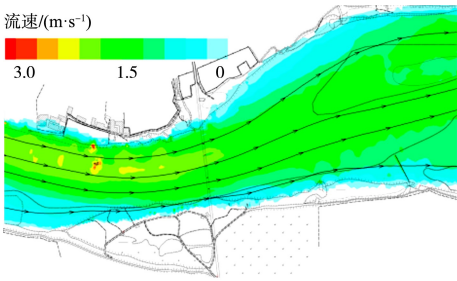
流量特征	流量/ ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	坝址水位/m	
		运行前	运行后
最小通航流量	388	12.70	—
多年平均流量	1 890	16.07	24.20
电站满发流量	3 640	18.23	24.20
2 a 一遇洪水流量	11 100	22.58	22.78
船闸最大通航流量	17 600	25.33	25.58
天然最大通航流量	19 900	26.17	26.42

#### 3.1 河道流场、流速与流线

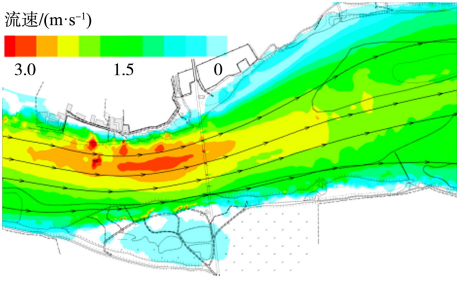
天然状态下, 丰城公路大桥桥区河段主流流速在  $0.5\sim3.0\text{ m/s}$  (最小通航流量  $388\text{ m}^3/\text{s}$  至天然最大通流量  $19\,900\text{ m}^3/\text{s}$ ), 其中中枯水期 ( $388\sim3\,640\text{ m}^3/\text{s}$ ) 桥区主流流速一般在  $0.5\sim1.5\text{ m/s}$ , 洪水期 ( $11\,100\sim17\,600\text{ m}^3/\text{s}$ ) 桥区主流流速达  $2.0\sim3.0\text{ m/s}$  (图 4)。



a)  $Q=388\text{ m}^3/\text{s}$



b)  $Q=3\,640\text{ m}^3/\text{s}$

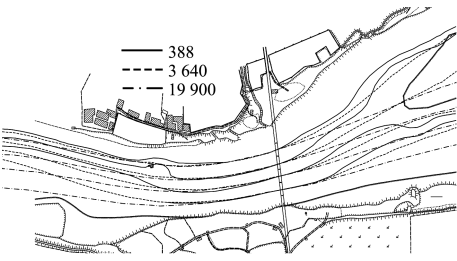


c)  $Q=11\,000\text{ m}^3/\text{s}$

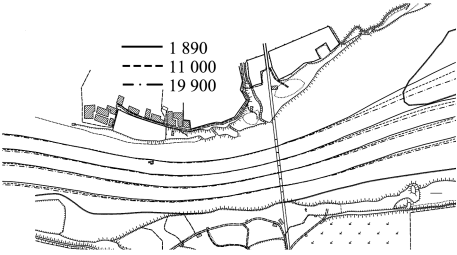
图 4 天然状态不同流量下河道流速分布

桥区河段呈 S 形弯曲, 主流自上游北侧凹岸向桥址南侧凹岸偏移, 受下游两级三汊河势影响, 中枯水期三汊分流、主流居中, 桥轴线法向与水流交角相比上游加大, 其中 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>孔受北汊吸流影响, 交角明显大于南侧的 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>孔; 随着流量增加, 下游水位漫滩、主流趋直, 桥区流线曲率半径增大、平顺, 见图 5a)。

下游龙头山枢纽运行后, 桥区位于枢纽回水区段, 在中枯水期枢纽高水位运行下中洲、新洲基本淹没, 河道水流流速一般在  $0.25\sim0.50\text{ m/s}$ , 下游流线也较为平顺; 在洪水期, 枢纽由控泄逐渐过渡为畅泄, 桥区水流接近于天然状态, 见图 5b)。



a) 天然状态



b) 枢纽运行后

图 5 天然状态与枢纽运行后桥区流线特征 (单位:  $\text{m}^3/\text{s}$ )

#### 3.2 通航孔内通航水流条件

根据桥区河道水流特性计算结果, 选取桥



1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>孔中心点, 对各流量下通航水流特性(纵、横向流速和交角)进行分析, 结果见图 6。

1)天然状态下。随着河道流量增加, 孔中心处纵、横向流速相应地呈增大趋势, 南侧 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>孔增幅较小。在天然最大通航流量下 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>孔纵、横向流速值分别为 2.93、3.02 m/s 和 0.31、0.19 m/s, 而 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>孔内纵、横向流速值分别为 2.73、2.53 m/s 和 0.01、0.08 m/s, 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>孔内更小。

1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>孔内水流与桥轴线法向交角则表现为随着流量增加而减小, 同样, 南侧 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>孔减幅较小。设计流量下 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>孔内交角分别为 17.8°和 14.6°, 而 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>孔内分别为 9.4°和 4.9°, 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>孔内更小; 在洪水期, 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>孔交角基本在 7.5°以下, 而 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>孔基本在 8°以上。

整体而言, 4 个孔内的纵、横向流速和交角基本表现为由北向南依次减小的规律, 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>孔内通航水流条件优于 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>孔。

2)龙头山枢纽运行后。不同流量下 4 个通航孔内纵、横向流速变化趋势和幅度与天然状态相比基本相似; 孔内交角无明显增大或减小趋势, 与天然状态下递减趋势不同, 基本维持在平均值上下小幅波动变化。

枢纽运行前、后差异主要在于中洪水期受枢纽回水影响, 河道流速和流线曲率均有大幅减小, 洪水期基本恢复到天然状态。

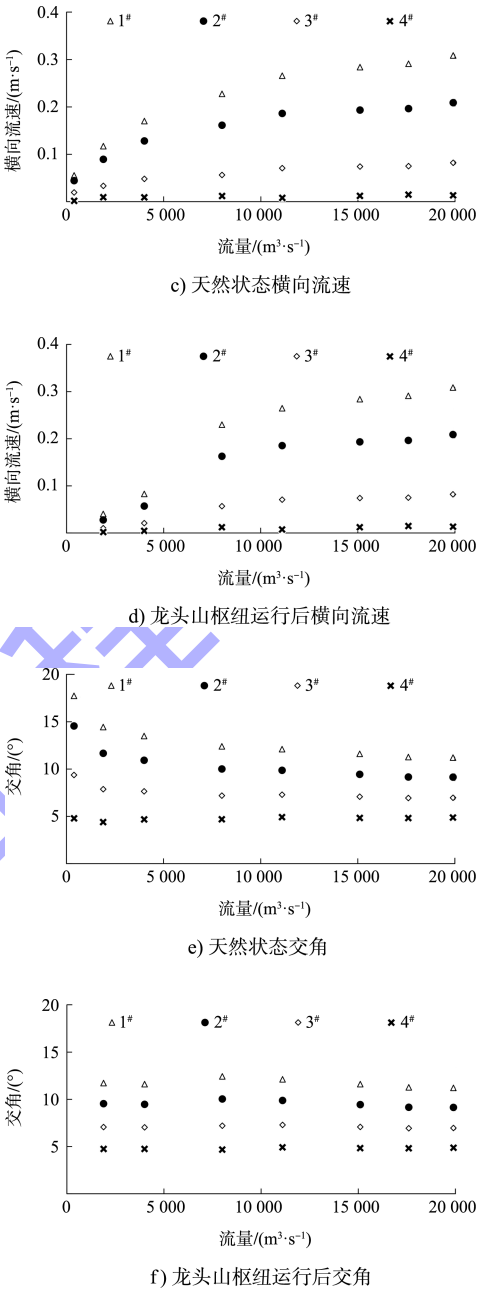
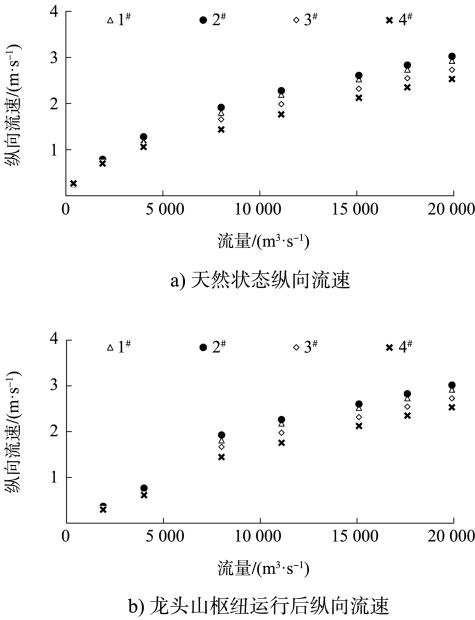


图 6 天然状态与枢纽运行后桥孔内通航水流特性

3.3 桥区范围内通航水流条件

考虑到桥区河段弯曲、分汊, 河势较为复杂, 以南侧 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>孔为例, 进一步对桥区内的通航水流特性进行分析, 结果见图 7。

在枢纽运行前后的各流量级下, 南侧 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>孔所在中心线(上游 4 倍船长、下游 2 倍船长, 代表性船队尺度为长 160.0 m、宽 10.8 m、吃水 2.0 m)沿程纵向流速先增后减, 峰值在桥址上游 200 m, 分别为 2.95 和 2.63 m/s; 横向流速和交角均表现为两头大、中间小的特征, 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>孔横向流速分别

小于 0.35、0.21 m/s, 桥址上游 500 m 至下游 100 m 范围内交角不大于 10°; 枢纽运行前后差异也主要在中枯水期对横流和交角的改善上。

4 通航孔调整

根据《丰城赣江公路大桥改善通航条件研究报告》<sup>[18]</sup>, 1#~4#通航孔最小净高为 10.5 m, 满足Ⅲ-(3)级净高不小于 10.0 m 的要求, 4 孔内航道水深在 3.5~8.0 m, 水深条件良好。因此, 对通航孔调整的分析主要是结合航道水流条件分析桥梁的净宽满足情况。

在前文通航水流条件计算与分析的基础上, 对相对较优的 3#、4#孔通航净宽按照 GB 50139—2014《内河通航标准》附录 C 进行计算与分析, 横流引起的净宽增加值和交角取值跟据桥区通航水流特性计算结果确定(图 7)。

由于桥区河势弯曲, 横流和交角均为两头大、中间小, 因此对原航线进行首尾优化(图 8)。在净宽增加值计算时, 选取桥位上游 2 倍船长至下游 1 倍船长范围内的最大值。天然状态下, 3#和 4#孔的横向流速取值分别为 0.15、0.1 m/s, 交角为 17.2°、15.8°; 枢纽运行后, 横流取值与运行前一致, 交角为 9.3°和 11.8°。

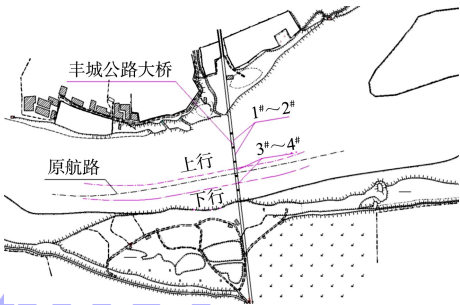


图 8 桥区原航线与优化后航线

经计算, 天然状态下 3#和 4#孔的桥跨要求值分别为 68.2 和 67.5 m, 枢纽运行后桥跨要求值分别为 64.9 和 65.8 m, 均小于桥梁实际跨度 70 m, 也远小于 1#、2#孔的要求值(85 和 97 m), 满足单向通航净宽要求。

可见, 丰城公路大桥通航孔由北侧 1#、2#调整为南侧 3#、4#, 通航水流条件明显改善, 净宽也满足相关标准要求, 可改善桥区的通航环境、降低海事风险。

5 结论

1) 建设于 S 形弯道、多汊复杂河段的老旧桥梁, 在中枯水下水流与桥轴线法向交角均较大, 通航安全风险较高, 在下游枢纽回水作用下将有所改善。

2) 各级流量下, 弯道凹岸侧下接主汊的南侧 3#、4#孔内的横流和交角, 均明显小于北侧下连左支汊的 1#、2#孔, 枢纽运行后交角小幅变化。

3) 受弯曲河势影响, 桥区范围内横流、交角沿程变化均表现为两头大、中间小, 桥梁净宽计算时应结合弯道航线布置, 合理确定横流和交角取值。

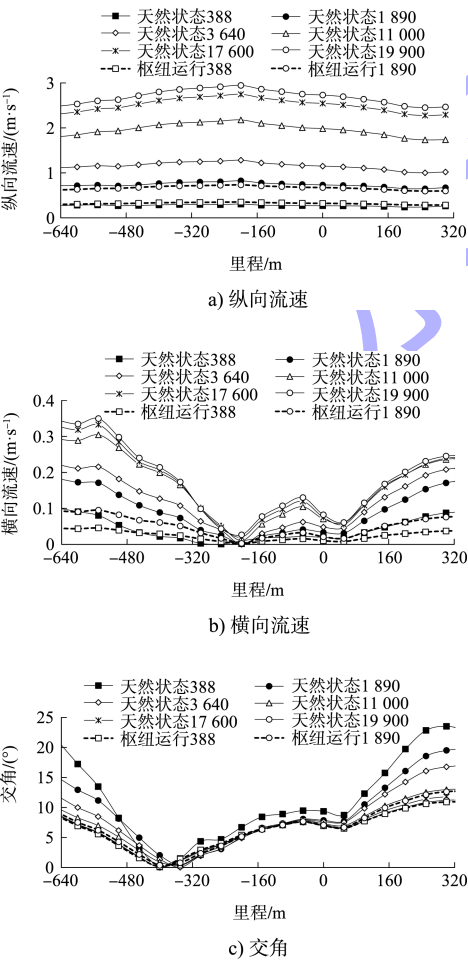


图 7 3#孔天然状态与枢纽运行后桥区通航水流特性

4) 丰城公路大桥通航孔调整为凹岸侧 3<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>孔后, 桥区通航水流条件明显改善, 净宽尺度也满足相关标准要求, 说明该调整方案可行。

参考文献:

[1] KOEN B, VRIEND H J. Nonlinear modeling of mean flow redistribution in curved open channels[J]. Water resources research, 2003, 39( 12): 1375.

[2] BLANCKAERT K, CONSTANTINESCU G, UIJTTEWAAL W, et al. Hydro-and morphodynamics in curved river reaches-recent results and directions for future research[J]. Advances in geosciences, 2013, 37: 19-25.

[3] 李一兵, 王育林. 弯曲航道过河建筑物跨度的计算方法探讨[J]. 水道港口, 1997( 4): 16-23.

[4] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139-2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

[5] 林珊, 陈明栋, 陈明. 桥墩紊流宽度研究综述[J]. 水利水运工程学报, 2011( 2): 105-110.

[6] 陈相宇. 内河弯道水流特性及安全通航对策研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2020.

[7] 黄丽芬. 研究分汊河口新建桥梁通航净宽的取值[J]. 珠江水运, 2015( 12): 65-67.

[8] 程永舟, 胡旭跃, 沈小雄, 等. 弯曲河道上桥梁通航净宽的计算方法探讨[J]. 水运工程, 2005( 1): 58-61.

[9] 张国根. 秦淮河弯曲航道跨河桥梁净宽尺度探讨[J]. 中国水运, 2016( 11): 56-57.

[10] 姚仕明, 张超, 王龙, 等. 分汊河道水流运动特性研究[J]. 水力发电学报, 2006( 3): 49-52, 57.

[11] OROUJI H, HADDAD O B, FALLAH-MEHDIPOUR E, et al. Flood routing in branched river by genetic programming [J]. Water management, 2014, 166( WM2): 115-123.

[12] 胡鹏, 裴金林, 陆建萍, 等. 分汊河道通航条件及航路布置方案[J]. 水运工程, 2014( 12): 92-95.

[13] 许锡宾, 曹毅, 许光祥. 弯曲分汊河道航电枢纽布置及通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2014( 1): 152-158.

[14] 黄丽芬. 研究分汊河口新建桥梁通航净宽的取值[J]. 珠江水运, 2015( 12): 65-67.

[15] 李文艳, 黄力, 李歌清, 等. 山区航道跨河桥梁通航净空尺度研究[J]. 水运工程, 2021( 7): 142-148.

[16] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.

[17] 南京水利科学研究院. 赣江、信江中下游桥区通航条件及船舶尺度研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2019.

[18] 江西省航务勘察设计院. 丰城赣江公路大桥改善通航条件研究报告[R]. 南昌: 江西省航务勘察设计院, 2016.

( 本文编辑 郭雪珍)

( 上接第 80 页)

参考文献:

[1] 左书华, 李蓓, 杨华. 岛群环境下峡道泥沙问题研究进展[J]. 海洋地质动态, 2008, 24( 12): 5-10.

[2] 任美镠, 张忍顺. 潮汐汉道的若干问题[J]. 海洋学报( 中文版), 1984( 3): 352-360.

[3] 蒋国俊. 舟山群岛峡道水动力及沉积特性[J]. 浙江大学学报( 理学版), 2001( 1): 82-91.

[4] 陈可锋, 曾成杰, 王乃瑞, 等. 南黄海大型潮汐水道动力地貌环境对人类活动响应: 以小庙洪水道为例[J]. 水科学进展, 2020, 31( 4): 514-523.

[5] 高抒. 潮汐汉道形态动力过程研究综述[J]. 地球科学进展, 2008, 23( 12): 1237-1248.

[6] 蒋国俊, 金如义, 顾建明, 等. 舟山马岙峡道的水文泥沙特性和峡道效应[J]. 海洋通报, 2001( 1): 15-22.

[7] 蒋国俊, 姚炎明. 虾峙门水道口门区动力和动力沉积特性[J]. 海洋通报, 1998( 4): 46-54.

[8] 陈沈良. 崎岖列岛海区的水文泥沙及其峡道效应[J]. 海洋学报( 中文版), 2000( 3): 123-131.

[9] 卢惠泉, 蔡锋, 孙全. 福建海坛海峡峡道动力地貌研究[J]. 台湾海峡, 2009, 28( 3): 417-424.

[10] 周起舞, 蔡体录, 柴加龙, 等. 淤泥质峡道海岸港口淤积计算研究[J]. 海洋通报, 1995( 3): 58-66.

[11] 左书华, 李蓓, 张征, 等. 多岛屿、多汉道环境下大型深水港建设中的水沙问题[J]. 水运工程, 2011( 1): 164-170.

[12] 《中国海湾志》编纂委员会. 中国海湾志( 第五分册): 上海市和浙江省北部海湾[M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 126-127.

[13] DHI. MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM Mud Transport Module Scientific Documentation[M]. Copenhagen: DHI, 2012.

[14] 章卫胜, 王金华, 张金善. 浙江省舟山市虾峙一级渔港扩建工程潮流泥沙数学模型研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2017.

( 本文编辑 王传瑜)