



数值模拟技术在桥梁桥墩布置及跨度选择中的应用

张国瑞, 陈婷婷

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 桥区河段水沙条件复杂, 桥梁桥墩布置和桥梁跨度的选择会对主航槽演变、通航条件以及项目总投资造成一定的影响。利用数值模拟技术深入分析建桥前后桥区河段水流条件, 找出经济、合理的桥墩布置和桥梁跨度。分析表明: 1) 桥墩布置时应尽可能满足河床与航道变迁, 不形成碍航和通航控制河段。2) 桥梁跨度净宽应满足通航净宽和船舶通过能力等的要求。

关键词: 数值模拟技术; 桥墩布置; 桥梁跨度

中图分类号: U 612; U 443

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)08-0100-07

Application of numerical simulation technology in bridge pier layout and spanselection

ZHANG Guo-rui, CHEN Ting-ting

(Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: The water and sediment conditions in the river section of the bridge area are complex, and the choice of bridge pier layout and bridge span affects the evolution of the main navigation channel, navigation conditions, and the total investment in the project. This study employs numerical simulation technology to deeply analyze the water flow conditions in the bridge area before and after the construction of the bridge and determine an economical and reasonable bridge pier layout and bridge span. The analysis comes down to the following two observations: 1) The bridge pier layout should suit the changes in the riverbed and the channel as much as possible, thereby preventing the formation of a river section obstructing or restricting navigation. 2) The clear width of the bridge span should meet the requirements of navigation clear width and traffic capacity.

Keywords: numerical simulation technology; bridge pier layout; bridge span

随着铁路、公路建设需求量的增加, 涉河桥梁建设逐步增多。而桥墩布置和跨度选择又与通航、行洪、施工、工程投资等因素息息相关。跨度小, 涉水桥墩势必增多, 阻水率高且对通航、行洪影响大; 跨度大, 虽可以减少涉水桥墩数量, 进而减小对通航和行洪的影响, 但工程投资增加。同时受桥墩及施工临时涉水设施影响, 桥区河段水沙条件复杂, 甚至会造成局部主航道改道、水

流条件恶化, 进而引起河床及航道变迁, 影响船舶安全通航^[1]。如何选择合理的桥梁墩位布置和桥梁跨度就成为了桥梁设计中需重点考虑的问题。

本文采用二维数值模拟技术, 选一拟建桥梁为例, 模拟、分析桥区河段建桥前后的通航水流条件, 对桥墩布置和桥跨进行比较, 尽可能满足河床与航道变迁, 不形成碍航和通航控制河段, 也满足通航净宽和船舶通过能力等的要求。

1 桥梁基本情况

根据河段水流条件, 重点选取 $107.5\text{ m} + 4 \times 180\text{ m} + 107.5\text{ m}$ 五塔六跨矮塔斜拉桥(推荐桥式)和 $70\text{ m} + 6 \times 100\text{ m} + 70\text{ m}$ 钢-混叠合变截面连续箱梁桥(比较桥式)两种桥式方案, 对桥梁桥墩布置和桥梁跨度进行分析。

2 水文

桥区河段规划航道等级为V级, 代表船型采用GB 50139—2014《内河通航标准》V-(3)级代表船型, 尺度为 $55.0\text{ m} \times 8.6\text{ m} \times 1.3\text{ m}$ (总长×型宽×设计吃水), 设计最高通航水位采用10 a一遇的洪水位。

根据实测资料及工程河段防洪工程, 计算水面线中多级水位、流量作为拟定水位流量关系曲线的控制点, 拟定桥位处断面水位-流量关系曲线见图1。

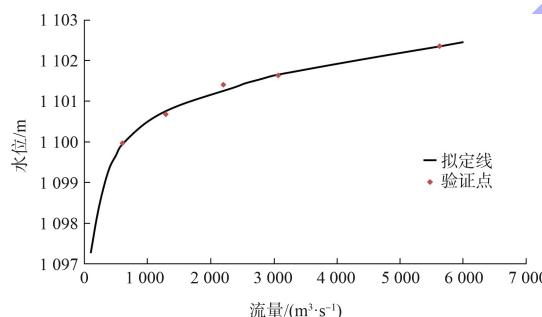


图1 拟建大桥桥位处水位-流量关系曲线

采用青铜峡站10 a一遇设计洪峰流量($5530\text{ m}^3/\text{s}$)为该大桥的设计最高通航流量, 工程河段水文特征值见表1。

表1 工程水文特征值

分类	流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	水位/m
最高通航流量($P=10\%$)	5 530	1 102.33
中水	2 200	1 101.26
低水	700	1 100.08

3 二维数值模拟分析

3.1 计算区域和网格设置

本研究计算河段总长约5.7 km, 进口距桥位约3.3 km, 桥区河段地形见图2。

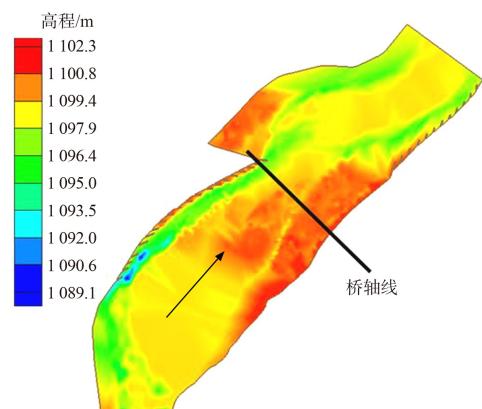


图2 桥区河段地形

计算区域的上下游边界不变, 两侧边界则根据水位情况作调整。为降低较多的单元水深过小成为干单元给计算带来的不稳定性风险, 计算时对各种工况分别设置水位边界。

3.2 模型验证

根据地形资料和流速、流向对计算河段模型进行低水工况下的水位、流速验证。

根据水位验证可知, 计算水位值接近实测水位值, 且最大误差不超过0.05 m, 符合精度要求, 见图3。

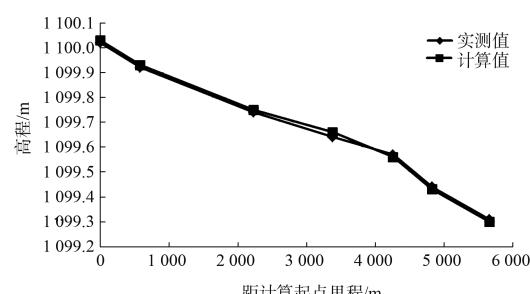


图3 沿程水面线计算值与实测值比较

流速验证采用浮标资料, 对桥轴线断面进行验证。取断面上5个实测点, 将实测值与计算得到的流速分布进行比较(图4), 各测点流速的计算值与实测值之差绝对值在0.01 m/s内, 其计算流速与实测流速分布趋势基本吻合, 可进行工程实际研究。

河床糙率依据实测水面线进行试算, 可知该河道糙率在低水时为0.020。高水工况下采用水文计算成果, 糙率取值为0.020~0.025。

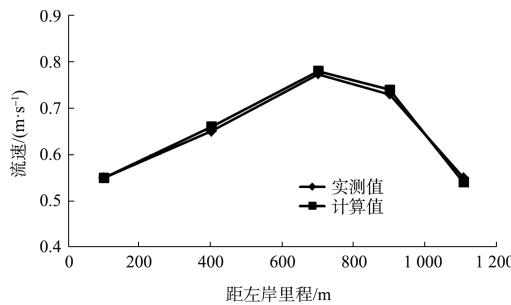


图 4 桥轴线流速分布验证

该验证表明，本研究所建立的平面二维水动力数值模型符合 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》的技术要求，有较好的精度和稳定性^[2]，能应用于该河段水流运动的数值模拟。

3.3 水流条件分析

重点选取大桥两种桥式在整治流量 $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$ 、中洪水流量 $Q=2200 \text{ m}^3/\text{s}$ 、最高通航流量 ($P=10\%$) $Q=5530 \text{ m}^3/\text{s}$ 共 3 种工况下的水流条件进行对比分析，据此来分析确定拟建桥梁桥墩布置和桥梁跨度。

3.3.1 工程前河段水流条件

根据建桥前 3 种工况下流场计算结果(图 5)进行分析可知：

1) 在 $Q=700$ 、 2200 、 $5530 \text{ m}^3/\text{s}$ 条件下，计算河段水面平均比降分别为 0.27% 、 0.30% 、 0.31% 。

2) 计算区域内受左岸已建河道防洪工程的影响，主航槽经过桥轴线后由左岸逐渐向右岸过渡。 $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$ 时主航槽内水深基本大于 1.3 m ；随着流量的增大，主航槽内水深增加，中洪水 $Q=2200 \text{ m}^3/\text{s}$ 、最高通航流量 ($P=10\%$) $Q=5530 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，主航槽内水深均大于 3.0 m ，水深条件较好。

3) 由于河道中水流主要受控于计算区域的平面与纵向、横向地形，河道主航槽内河道平面流速呈中心流速大、两边岸流速小的抛物线形分布趋势；局部地形变化较大的区域，水流流态影响明显。

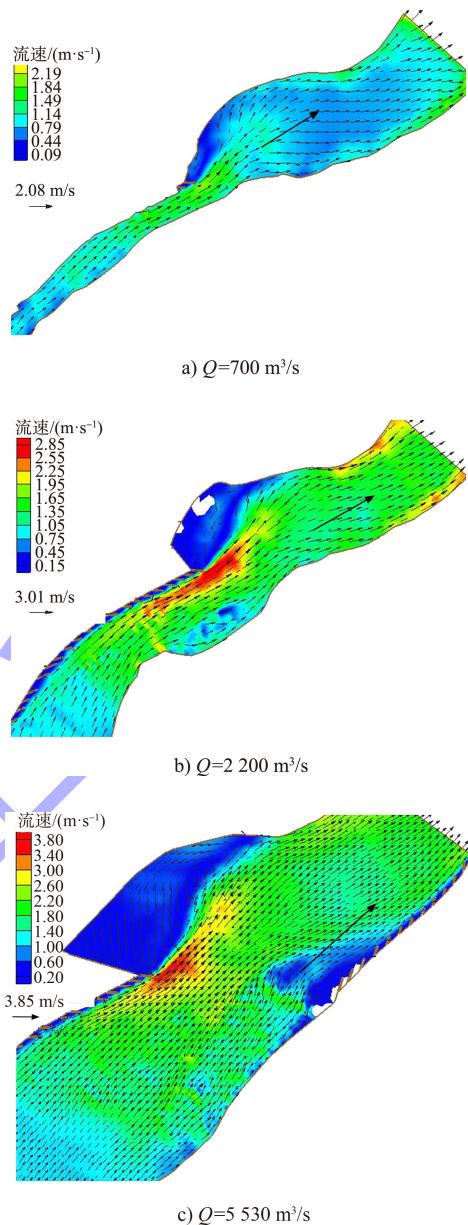


图 5 建桥前流场

拟建大桥桥区河段通航孔范围内， $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$ 时最大横向流速为 0.31 m/s ，对应水流流速 1.31 m/s ，水流流向与桥轴线法线方向交角 12.20° 。 $Q=2200 \text{ m}^3/\text{s}$ 时最大横向流速为 0.43 m/s ，对应水流流速 2.27 m/s ，水流流向与桥轴线法线方向交角 10.83° 。 $Q=5530 \text{ m}^3/\text{s}$ 时最大横向流速为 0.44 m/s ，对应水流流速 2.82 m/s ，水流流向与桥轴线法线方向交角 8.92° 。

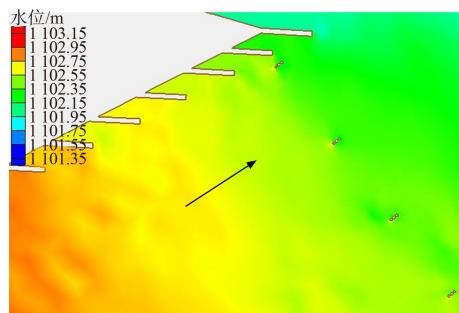
随着流量的增加，水流流向与拟建大桥轴线法线夹角逐步变小，横向流速变小。

3.3.2 工程后河段水流条件

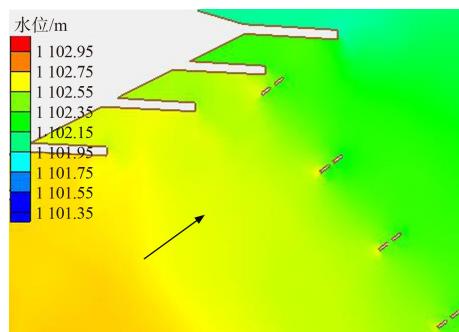
在计算域内布置桥墩后, 对桥区河段进行二维数值模拟计算, 分析河段水流条件。

3.3.2.1 建桥对水位的影响

从水位分布来看, 由于桥墩的阻水作用, 引起桥墩上侧壅水, 桥墩一定距离以外壅水值减小、水深加大; 桥墩顺水流方向水位降低、水深减小, 见图 6。



a) 推荐桥式



b) 比较桥式

图 6 $Q=5\,530\text{ m}^3/\text{s}$ 时桥墩附近水位分布

比较建桥前后河道沿程水位的变化可知, 建桥后全河段范围内水位变化相对较小。 $Q=700$ 、 $2\,200$ 、 $5\,530\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 建桥后与建桥前相比, 推荐桥式下水位最高壅高值分别为 0.02 、 0.06 、 0.06 m ; 比较桥式下水位最高壅高值分别为 0.04 、 0.07 、 0.10 m 。水位壅高主要是桥墩涉水、束窄河床、壅高水面。

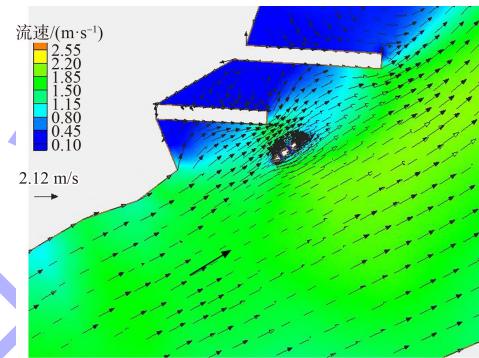
工程后, 受水流绕流的影响, 在桥墩上游形成壅水、下游水面下降, 桥墩处流态相对紊乱, 但这种壅水现象在一定范围内逐渐消失。所以拟

建桥梁对水位影响变化较小。

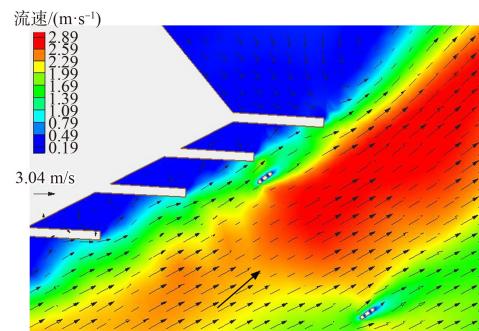
经分析, 比较桥式比推荐桥式跨度小、涉河桥墩多, 对水位影响相对较大。

3.3.2.2 建桥对流速、流场的影响

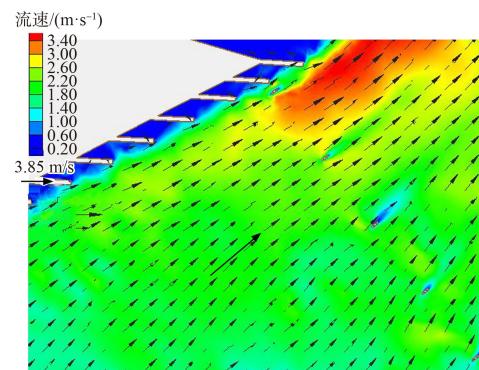
从全局来看, 由建桥引起的流速变化主要发生在桥墩附近。由于桥墩的阻水作用, 桥墩周围引起绕流运动, 桥墩迎水面和背水面流速均减小, 左右流速有所增大, 在主航槽基本恢复到工程前的情形。故该拟建桥工程对河流的影响具有局部性质, 见图 7。



a) $Q=700\text{ m}^3/\text{s}$, 推荐桥式



b) $Q=2\,200\text{ m}^3/\text{s}$, 推荐桥式



c) $Q=5\,530\text{ m}^3/\text{s}$, 推荐桥式

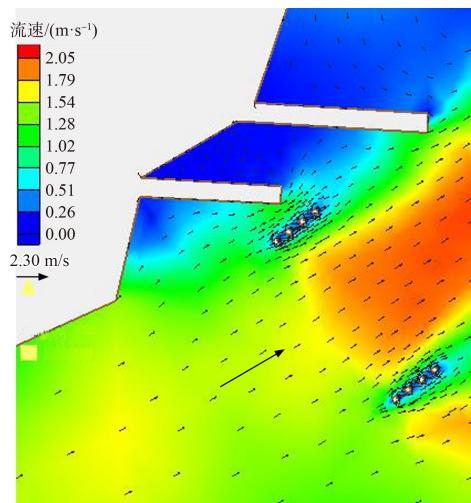
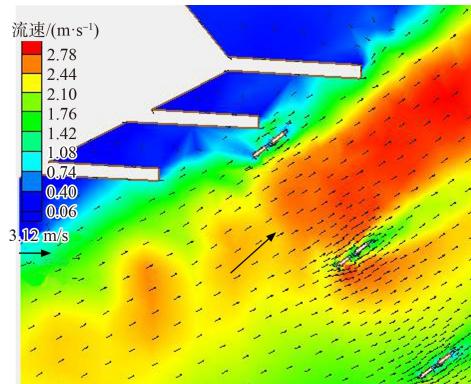
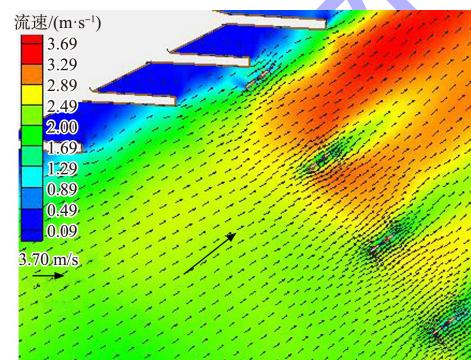
d) $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$, 比较桥式e) $Q=2 200 \text{ m}^3/\text{s}$, 比较桥式f) $Q=5 530 \text{ m}^3/\text{s}$, 比较桥式

图 7 桥墩附近流场

根据计算成果, 推荐桥式方案下, $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$ 时桥轴线上游 3 倍船长范围内水流流速从 $1.31 \sim 1.73 \text{ m/s}$ 变化到 $1.32 \sim 1.82 \text{ m/s}$, $Q=2 200 \text{ m}^3/\text{s}$ 时桥轴线上游 3 倍船长范围内水流流速从 $1.94 \sim 2.70 \text{ m/s}$ 变化到 $1.97 \sim 2.72 \text{ m/s}$, $Q=5 530 \text{ m}^3/\text{s}$ 时桥轴线上游 3 倍船长范围内水流流速从 $2.08 \sim 3.13 \text{ m/s}$ 变化到 $2.02 \sim 2.99 \text{ m/s}$ 。

3.13 m/s 变化到 $2.11 \sim 3.15 \text{ m/s}$ 。

比较方案下, $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$ 时桥轴线上游 3 倍船长范围内水流流速从 $1.31 \sim 1.73 \text{ m/s}$ 变化到 $1.32 \sim 1.82 \text{ m/s}$, $Q=2 200 \text{ m}^3/\text{s}$ 时桥轴线上游 3 倍船长范围内水流流速从 $1.94 \sim 2.70 \text{ m/s}$ 变化到 $1.86 \sim 2.71 \text{ m/s}$, $Q=5 530 \text{ m}^3/\text{s}$ 时桥轴线上游 3 倍船长范围内水流流速从 $2.08 \sim 3.13 \text{ m/s}$ 变化到 $2.02 \sim 2.99 \text{ m/s}$ 。

建桥后虽然桥墩占据有效过水面积, 但对水流条件的影响具有局部性质, 桥墩对流速影响范围较小, 建桥对河势的影响主要在桥墩附近, 桥梁建设对整个桥区河段的河床演变影响较小。

经分析, 比较桥式比推荐桥式跨度小、涉河桥墩多, 对流速流场影响相对较大。

4 最小通航净空宽度计算

通过水流条件分析, 随着流量的增加, 桥墩对水流条件的影响增大, 最不利工况为 $Q=5 530 \text{ m}^3/\text{s}$ 。此工况下, 各桥式方案桥轴线上游 3 倍船长通航水域范围内水上过河建筑物轴线的法线方向与水流流向的交角均大于 5° , 且横向流速大于 0.3 m/s , 根据 GB 50139—2014《内河通航标准》规定, 最小通航净宽在规范标准值基础上加宽确定。各桥位方案的最小通航净宽见表 2。

表 2 $Q=5 530 \text{ m}^3/\text{s}$ 时最小通航净宽

桥式	横向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	夹角/($^\circ$)	通航净宽/m	
			单向加宽值/m	单向 双向
推荐桥式	0.45	12.68	17.5	57.5 115.0
比较桥式	0.45	11.60	17.5	57.5 115.0

5 桥墩紊流宽度分析

参照 JTS 180-4—2015《长江干线通航标准》中 C. 0.3 条规定, 通航净宽应考虑承台与桥墩紊流影响而加大, 其增加值可按以下公式计算^[3]:

$$E_1 = 0.88K_1v^{0.75}b^{0.56}h^{0.44} \quad (1)$$

本次评价在以上紊流宽度标准值基础上, 考虑一定的富余确定紊流宽度设计值:

$$E_2 = K_2 E_1 \quad (2)$$

式中: E_1 为桥墩紊流宽度标准值 (m); E_2 为桥墩

紊流宽度设计值(m); K_1 为与桥墩形状相关的系数; K_2 为桥墩紊流宽度扩大系数, 取值范围1.5~2.0; v 为墩前水流速度(m/s); b 为墩形计算宽度(m), 取桥墩投影到航道中心线法向的宽度; h 为桥墩附近水深(m)。

考虑通航安全及最不利工况, 按照最高通航水位($Q=5\ 530\ m^3/s$), 根据主墩位置及计算成果, 代入式(1)(2)得出两种桥式的桥墩紊流宽度, 见表3。两种桥式方案在考虑紊流宽度后, 计算的通航净空宽度见表4。

表3 桥墩紊流宽度

桥式	墩柱轴线与水流夹角/(°)	计算宽度/m	墩前流速/(m·s⁻¹)	墩前水深/m	紊流宽度/m		
					标准值	设计值	取值
推荐	12.68	3.5	3.8	6.63	17.98	26.97	27
比较	11.60	2.5	3.7	6.55	14.97	22.45	23

表4 通航净空宽度

桥式方案	单向通航净宽	双向通航净宽	紊流宽度	单孔单向通航净宽	单孔双向通航净宽
推荐	57.5	115	27	84.5	142
比较	57.5	115	23	80.5	138

6 桥墩布置及桥跨方案比较

6.1 净宽满足性

比较确定的最小通航净宽与桥孔净宽, 见表5。

表5 通航净宽尺度比较

桥型方案	桥墩跨度/m	桥孔净宽/m	计算通航净宽/m	是否满足要求	备注
推荐桥式	180	176.5	142.0	是	单孔双向
比较桥式	100	97.5	80.5	是	单孔单向

推荐桥式(五塔六跨矮塔斜拉桥)的桥孔净宽满足单孔双向最小通航净宽要求, 且有一定富余; 比较桥式(钢-混叠合变截面连续箱梁桥)主跨净宽小于单孔双向通航净宽计算值, 采取分孔通航的方式, 满足单孔单向通航计算值。

6.2 对河床与航道变迁的适应性

6.2.1 河床演变引起航道变迁的适应性

随着河道整治工程的修建和完善, 桥区河段河床冲淤变化不明显、滩槽相对稳定。

推荐桥式方案主跨为180 m, 主通航孔桥墩布置在现有主航槽和规划航槽以外, 对河段航槽布置影响小, 不会对过往船舶造成影响; 另外, 桥墩布置在河段整治工程影响线^[4-5]以外, 避免了整治工程引起的水流变化对桥墩的影响, 对河道整治、防洪控导工程适应性较好; 桥墩所在位置处水深较浅、流速低, 避免了大量开挖, 河道冲刷变化较小, 桥墩墩位布置较好, 可以适应航道整

治、防洪控导工程等引起的河床冲淤、水深的变化。

比选桥式方案采用单孔单向通航, 跨度100 m, 中墩位于现有主槽及航线范围内, 水深较深, 影响航槽布置和船舶通航^[6], 同时也会对规划航线布置和船舶通航造成影响。桥墩周围水流流态紊乱^[7], 对桥墩周围河床演变有影响, 桥墩阻水作用也会对桥区主槽河床演变带来不确定性。比选桥式桥墩布置对河床演变引起航道变迁的适应性欠佳。

6.2.2 整治建筑物引起航道变迁的适应性

根据河段现有及规划的防洪控导工程, 目前的河势流路与规划流路基本一致, 主槽沿左岸控导工程, 过桥位后逐渐过渡至右岸, 沿右岸控导工程顺河而下。目前, 桥区河段主槽流路与规划的整治线及控导线基本吻合, 随着河道整治工程的修建和完善, 流路将逐渐向规划流路调整。推荐桥式方案采用180 m跨度, 主通航孔桥墩布置与整治线、规划航线基本吻合, 也兼顾了后期整治建筑物引起的航道变迁, 与规划航道相吻合; 比较桥式方案采用100 m跨度分孔通航, 通航孔桥墩布置于现状主航槽内, 后期整治建筑物引起航道变迁后, 航道范围内仍会存在桥墩影响船舶通航, 桥墩布置与航道变迁的适应性较差。故推荐桥式方案对整治建筑物引起航道变迁的适应性更好。

6.3 对可供通航水域覆盖程度

通航水域即为可供船舶通航的水域范围, 分析了拟建大桥研究河段枯水期(设计最低通航水

位)、洪水期(10 a 一遇水位)两种工况下两种桥式方案的通航水域覆盖情况。桥位河段水深及航道弯曲半径较好,通航水域确定时主要考虑水深条件的影响,根据河段地形图,建桥前后河段通航水域变化见表 6。

表 6 建桥前后通航水域变化

工况	桥型	总通航水域宽度/m	通航水域缩窄率/%
枯水期 设计最低通航水位	建桥前	101.8	-
	推荐桥式	87.9	13.64
	比较桥式	68.6	32.61
洪水期 10 a 一遇水位	建桥前	338.0	-
	推荐桥式	266.0	21.30
	比较桥式	247.0	26.92

根据表 6 可知,枯水期两种桥式方案下的通航水域左边界受控导工程及桥梁主墩控制,通航水域右边界受江心洲及浅滩控制,扣除桥墩引起的紊流宽度后,确定推荐桥式和比较桥式枯水期的通航水域总宽度分别为 87.9、68.6 m,洪水期总通航水域宽度分别为 266.0、247.0 m。两种桥式方案的通航水域宽度均满足其航道最小通航净宽,但推荐桥式方案的桥墩布置通航水域缩窄率更小,故推荐桥式方案的桥墩布置更优。

6.4 航道通过能力的适应性

推荐桥式方案采用单孔双向通航,能适应现状及规划航线布置。桥墩布置及桥梁跨度、通航孔的布置均能满足桥区河段双向通航的要求,不会形成通行控制河段,满足工程河段航道通过能力。

比较桥式方案采用分孔单孔单向通航,其主桥墩位于现有和规划航槽范围内,影响过往船舶正常通航。

6.5 小结

推荐桥式方案桥墩布置于现有及规划主航槽以外,且距离较远,不影响河段的航线布置和航路选择,通航净宽满足要求,与航道变迁适应性较好,不影响河段的航道通过能力,通航条件较为优良;比较桥式方案跨度较小,仅能满足单孔单向通航要求,可采取分孔通航的方式,中间涉水桥墩位于现有及规划航槽范围内,会对河段的航线布置和航路选择、航道通过能力造成影响,

河中主墩位于主航槽内,主墩位置处流态紊乱,在一定程度上为桥区主航槽河床演变带来不确定性,适应性较差。

7 结语

1)桥区河段水沙条件复杂,桥梁桥墩布置和桥梁跨度的选择会对主航槽演变、通航条件以及项目总投资造成一定的影响。

2)通过数值模拟技术深入分析建桥前后桥区河段水流条件,直观明了、依据充分、技术可行。

3)桥梁桥墩布置和桥梁跨度选择是桥梁设计中的重要环节,不仅关系到通航、行洪,也关系到桥梁工程投资。桥墩布置和跨度选择可结合水流条件从净宽满足性、河床及航道变迁适应性、通航水域覆盖程度、对航道通过能力的适应性等方面分析桥墩墩位及跨度的影响。

4)数值模拟技术可应用于桥梁桥墩布置及跨度选择,可为其合理布置、经济性选择等提供一定的技术支撑。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 交通运输部天津工程科学研究所. 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.
- [3] 长江航道局, 中交水运规划设计有限公司.长江干线通航标准: JTS 180-4—2015[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [4] 长江航道规划设计研究院.中交天津港航勘察设计研究院有限公司.航道工程设计规范: JTS 181—2016[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.
- [5] 长江航道局.航道工程手册[M].北京: 人民交通出版社, 2004: 667-689.
- [6] 王建军, 张明进.长南京以下 12.5 m 深水航道二期工程口岸直河段选槽数学模型[J].水运工程, 2013(12): 1-7.
- [7] 李焱, 汤小霞.长洲水利枢纽四线船闸引航道通航水流条件数值模拟[J].水道港口, 2014, 35(1): 66-72.