文章编号:1005-0523(2017)06-0045-08

桥闸间耦合水流分析与桥位选择

吴 中,李 婧,李垣君

(河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要:桥梁建设涉及到选址问题,有墩桥梁因桥梁墩柱矗立水中干扰影响原有水流流态,可能会带来河道冲刷、淤积、减小行洪排涝能力等问题。如果建设桥梁临近重要的涉水临河设施,水流流态变化对设施的影响就需要详细评估。以某城市水道节制闸上游桥梁选址规划研究为背景,建立了包括河道、水闸、桥墩相关设施的二维水流数值模型。通过工程前后典型工况下水流的模拟,得到桥墩附近、节制闸前的水位和流速流向的变化,结合节制闸安全运行因素,给出桥梁选址的建议。

关键词:桥梁;选址;水流;水闸

中图分类号:U442.4 文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.06.005

桥梁选址大多要受空间与周边环境限制。桥位选址除受道路选线、地质条件、工程难易与投资总额影响外,桥梁建设对水流的影响也不可忽视。一般情况下,只要考虑水流的通过量、桥梁桥墩挡水对行洪安全的影响。当桥梁建在河道节制闸附近上游区域,以往采用等效桥墩挡水面积的简单计算分析桥墩对水流影响的方法已经难以满足工程设计的要求。尤其在河道水文变化幅度较大情况下,需要细致全面地考虑对水环境、跨河建筑物以及水位、流速和流向的影响。桥梁选址也要以确保其它水工建筑物安全运行为前提。某规划建设桥梁位于运河河口,上游连通京杭大运河与长江,下游为九孔跨河节制水闸A。因引水灌溉的需求,水闸要在多种水位与流量工况下运行。有关部门担心桥墩对水的作用会影响到水闸A的正常工作与安全,需要预测不同桥址对水流影响的量值,为桥位选址决策提供依据。

1 工程背景

如图1所示,节制闸A位于图中右侧中部(地理位置居东),上游约300 m为多条水道汇流处,向南通向长江,向西通向京杭大运河(通过节制闸B)。规划桥位只能位于节制闸A上游100 m有限范围内选择。从交通角度看,桥梁紧靠节制闸A线路布局最优;从水闸运行角度出发,希望桥梁选址远离跨河节制闸。桥梁选位的关键集中于桥墩作用水流对水闸安全运行影响的可接收程度上。对此,方案一为紧靠节制闸方案,桥梁中轴线距A闸闸门59 m;方案二为远离节制闸方案,桥梁中轴线距A闸闸门99 m。桥梁采用七跨方案,每跨桥墩由4个直径1.5 m圆柱并列构成。为减少桥墩对水流干扰,每跨四个桥墩中轴连线与对应闸墩中线对齐。

1.1 水闸典型工况

节制闸A开闸放水主要有4种典型的工况,具体工况参数见表1,水道中泓P点为距A闸闸墩59 m河中位置(图1),计算中需要依据P点水位推算水文要素。

收稿日期:2017-06-15

作者简介:吴中(1964—),男,教授,博士,硕士研究生导师,研究方向为交通运输规划与管理、交通运输信息与控制、交通安全等。

中国知网 https://www.cnki.net

图 1 水道、节制闸与桥梁工程选址示意图

Fig.1 Diagram of waterway, check gate and bridge construction

表 1 节制闸 A 运行典型工况(废黄河高程)

Tab.1 Typical working condition of Check Gate A (the Yellow River elevation)

工况	P 点水位/m	流量/(m^3/s)	说明
1	5.00	950	
2	2.02	950	A 闸开闸运行时，B、C 闸均关闭，水流由长江流入 A 闸。
3	0.83	400	
4	−0.10	400	

1.2 闸前水下地形

水闸 A 上下游都建有双侧弧形直立翼墙，水闸下部结构包括闸墩、闸墩两侧混凝土立柱、闸下门坎。闸 A 前水底有并排的 3 个下凹消力池和消力池上游浆砌块石底面、干砌条石底面。闸 A 前其它部位水下地形有实测资料。根据实测地形数据绘制的闸前 3D 地形如图 2 所示。

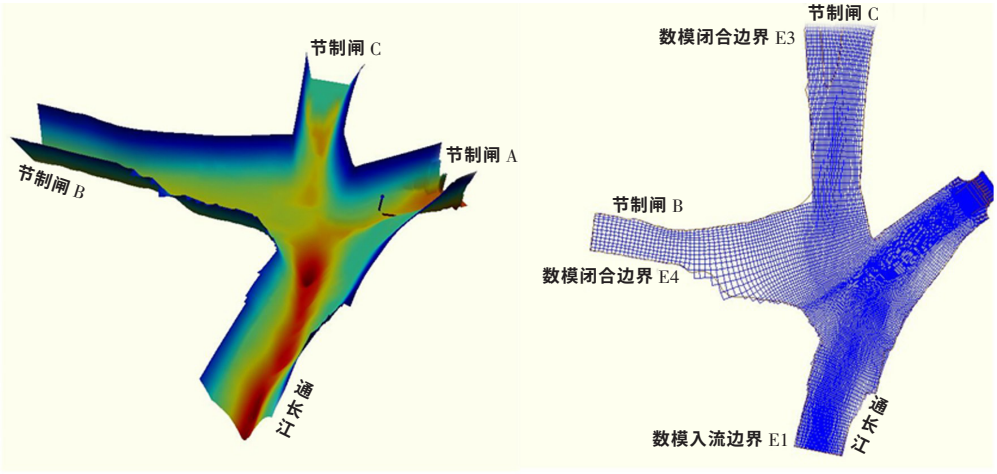

图 2 水下地形和数值模型正交曲线网格

Fig.2 Underwater topography and numerical model orthogonal curvilinear grid

2 桥闸水流模型

桥闸水流数学模型参照真实河道地形、桥墩形式、闸墩等水闸下部结构构建，计算结果具有较高的精度和稳定性，可以模拟出桥梁建设前后水流的改变。

2.1 控制方程

模型控制方程由水平动量方程、连续方程组成。根据不可压缩流体 N–S 方程和 Boussinesq 假定、考虑地球自转影响，可以得到如下平面二维计算形式。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial[(d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \zeta}+\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial[(d+\zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta}=Q \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial u}{\partial \zeta}+\frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial u}{\partial \eta}+\frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta}-\frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \zeta}-fv=-\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}}P_\zeta+F_\zeta+M_\zeta \tag{2}$$

中国知网 https://www.cnki.net

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial v}{\partial \zeta}+\frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial v}{\partial \eta}+\frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \eta}-\frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta}-fu=-\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}}P_\eta+F_\eta+M_\eta \quad (3)$$

式中:ζ 为根据基面确定的水位;ζ,η 为水平正交曲线坐标;d 为参考基面水深;$\sqrt{G_{\xi\xi}}$,$\sqrt{G_{\eta\eta}}$ 为坐标转换系数,在球坐标下 $\zeta=\lambda,\eta=\phi,\sqrt{G_{\xi\xi}}=R\cos\cos\phi,\sqrt{G_{\eta\chi}}=R,\lambda$ 为经度坐标;ϕ 为维度坐标;R 为地球半径;U,V 分别为 ζ 方向和 η 方向按水深积分的平均流速;Q 为全局源汇项;u,v 分别为 ζ 方向和 η 方向的流速;f 为科氏力参数;ρ_0 为水的密度;P_ζ,P_η 为由密度变化产生的压力梯度;F_ζ,F_η 为水平雷诺应力;M_ζ,M_η 为动量方程的源汇项。

2.2　数值模型

考虑较远处河道地形对闸前流态的影响,模型东起 A 闸下游、西至 B 闸下游,北起 C 闸南至通往长江河道,东西南北大约 1 500 m×1 500 m 范围,建立计算水域的 3D 地形模型见图 2。

由于 A 闸开启工作时 B、C 闸关闭,因此模型边界主要包括有:入流边界和 A 闸出流无反射边界;河道侧向、B 闸下游截断面、C 闸为全反射闭合边界(图 1);桥墩、闸墩按其大小形状设置为干点,在水中为固定形状固体,桥墩闸墩外表面成为实质上的闭合边界。河床底部摩阻系数设为 0.022 5。边界标识号见图 1。

模型采用变距曲线正交网格,考虑到闸前流态的重要性,网格在 A 闸河道中泓上加密并延伸。考虑到 A 闸上游汇流区流态复杂,可能会出现跌水现象,计算边界采用上游流量控制,下游 A 闸出流口水位控制的差分解法。数值计算不仅可以得到桥闸周边二维平均流速分布,同时也可以得到桥墩引起的河面水位增高分布。

3　典型工况计算

3.1　闸 A 出流边界 E2 水位

各典型工况皆为恒定流状态,由于推算的水位点 P 处于方案一桥位处(图 1),属计算区域内点,无法作为边界条件的控制水位。模型给定边界条件还需要知道 A 闸下游边界处水位。因此只能反复设定出流断面水位初值反向迭代逼近桥位 P 处水位,寻找并标定桥梁未建情况下诸工况的开边界出流水位(表 2)。

表 2　无桥状态 4 种工况出流断面 E2 水位标定结果(废黄河高程)

Tab.2　E2 water level calibration results of four kinds discharge section in non bridge state (the Yellow River elevation)

工况	流量/(m^3/s)	入流断面	P 点水位/m	标定水位处	出流水位标定结果 E2/m
1	950	入流边界 E1	5.00	A 闸出流口	4.913
2	950		2.02		1.901
3	400		0.83		0.786
4	400		–0.10		–0.123

A 闸后水流为人工控制的恒定流,正常工况下水位保持不变,标定 E2 水位可以作为各种工况的出流边界条件。从表 2 中可以看出水闸 A 下游 E2 出流边界处水位明显低于闸 A 上游 P 点水位。

3.2　各工况水流计算

根据各工况上游流量和下流水位的边界控制条件,结合地形与桥闸布设,分别计算出无桥与两种不同桥位方案四种工况下的水流流速与水表水位分布。4 种工况桥闸附近水流流速分布见图 3~图 6。最高水位工况的水表水位分布见图 7。在图 3~图 6 各子图的右上端明显看到 A 闸深色的 9 个泄流闸孔和相应的闸墩,在相应的有桥方案子图中可以看到深色或浅色的水中桥墩。

从 4 种工况计算结果看,桥梁对闸 A 上游的水流流态有明显的干扰。较高水位工况 1、2,4 组河道桥墩阻水作用明显;较低水位工况 3、4,中泓两组桥墩影对水流响较大。各工况下,桥墩的阻水作用将 A 闸前无桥水流流速中泓“舌状”分布改变为中泓“张开的手指状”分布。其中,950 m^3/s 大流量、低水位工况 2 和 400 m^3/s 小流量低水位工况 4 还会引起闸前中泓流速较大的增大(见表 3)。由于 4 种工况入流源于长江,水流入 A 闸前在汇流区附近有转弯,A 闸前流态表现出中泓的非对称。从流速矢量图中看出,工况 4 甚至建桥后

中国知网　https://www.cnki.net

桥上游临近南岸的局部区域出现顺时针的环流。

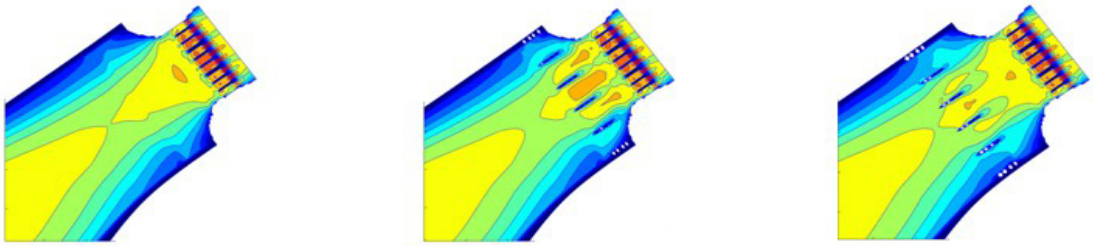

图3 工况1无桥、桥位一、桥位二方案桥闸间流速等值线图

Fig.3 Working condition 1, non bridge, bridge site scheme one, two of flow velocity contour map between bridge and gate

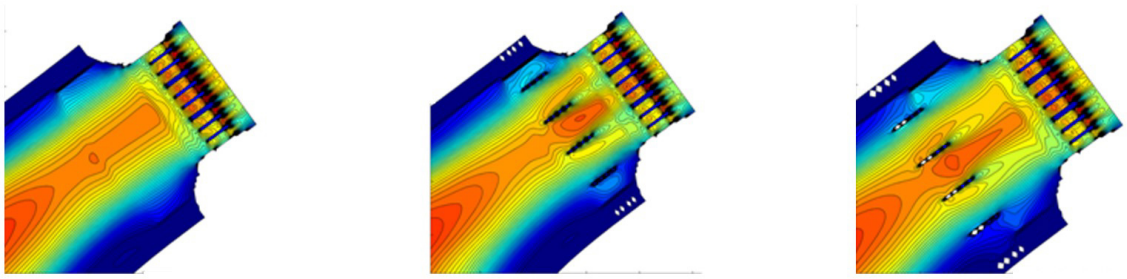

图4 工况2无桥、桥位一、桥位二方案桥闸间流速等值线图

Fig.4 Working condition 2, non bridge, bridge site scheme one, two of flow velocity contour map between bridge and gate

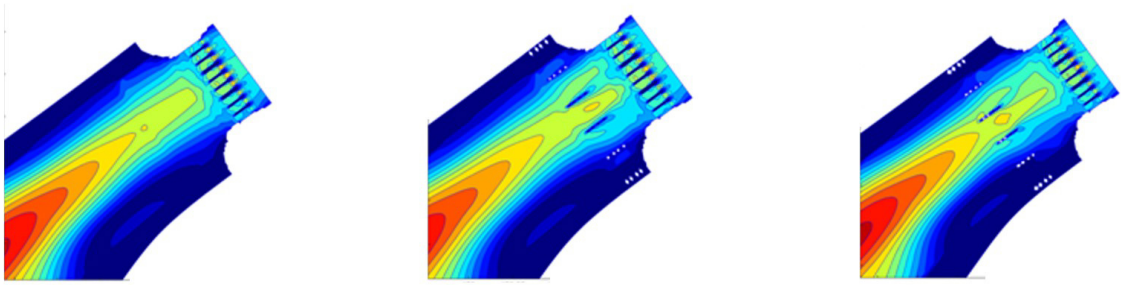

图5 工况3无桥、桥位一、桥位二方案桥闸间流速等值线图

Fig.5 Working condition 3, non bridge, bridge site scheme one, two of flow velocity contour map between bridge and gate

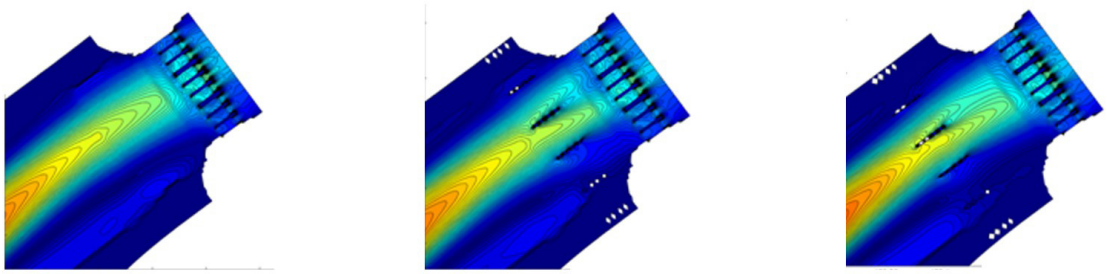

图6 工况4无桥、桥位一、桥位二方案桥闸间流速等值线图

Fig.6 Working condition 4, non bridge, bridge site scheme one, two of flow velocity contour map between bridge and gate

中国知网 https://www.cnki.net

由于桥梁桥墩的阻水作用,桥位处水位会有所抬高。桥位一、二方案桥墩处至上游全计算域水位被抬高 1.4 cm,由于 P 点和桥位一桥墩位置重合,桥位一方案 P点水位抬高 1.4 cm;桥位二 P 点处于桥位二桥墩下游,P点水位没有变化。水位的抬高主要涉及到水道的防洪,大流量低水位工况 2 桥位桥墩前(桥墩上游)抬高水位值最大达到 2.6 cm,工况 3、工况 4 桥位桥墩前水位分别抬高 1.5 cm,1.0 cm。图 7 表达了无桥、方案一、方案二计算域水位高程的分布,可以发现汇流处至 A 闸河道交接段有明显的水位跌落,其它工况也有类似的情况。这是水位从缓流向急流转变的跌水现象,这也是入流断面 E1 处无法由 P点水位标定水位高程的原因。

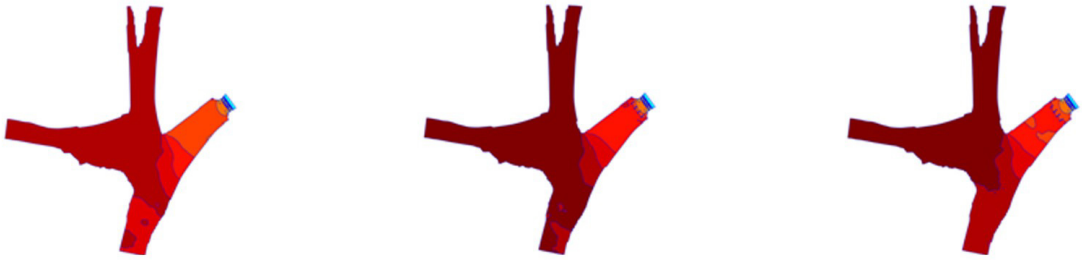

图 7　工况 1 (最高水位)无桥、桥位一、桥位二方案计算全域水位等值线图

Fig.7　Working condition 1 (highest water level), no bridge, bridge site one, two calculate the whole water level contour map

3 种方案 4 种工况计算结果部分涉及闸孔的水流水位值列于表 3 中。由于 3 种方案不同工况的流量都恒定,建桥后中闸前水位和中闸后水位于建桥前几乎没有变化,表达了恒定水流在闸前闸后的特性,计算结果合理。

表 3　无桥、桥位一、二方案四种工况闸孔周边水位水流计算值

Tab.3　Four working conditions, no bridge, bridge site one and two of calculation value of water level flow around gate hole

工况	无桥				桥位方案一				桥位方案二			
	P 点水位/m	中闸前水位/m	中闸后水位/m	闸孔最大流速/(m/s)	P 点水位/m	中闸前水位/m	中闸后水位/m	闸孔最大流速/(m/s)	P 点水位/m	中闸前水位/m	中闸后水位/m	闸孔最大流速/(m/s)
1	5.00	4.98	4.91	0.88	5.014	4.98	4.91	1.00	5.00	4.98	4.91	0.91
2	2.02	2.02	1.88	1.55	2.046	2.02	1.88	1.65	2.02	2.015	1.88	1.57
3	0.83	0.84	0.79	0.87	0.845	0.83	0.79	0.92	0.83	0.83	0.79	0.93
4	–0.1	–0.05	–0.12	1.63	–0.09	–0.06	–0.12	1.65	–0.08	–0.06	–0.12	1.59

4　计算结果分析对比

4.1　闸墩前后水域平均流速变化

4 个典型工况中,工况 2、工况 4 是不同流量下的低水位工况,它所对应的闸前、闸后流速比高水位更大。虽然建桥前后 A 闸闸孔前后水位变化不大（水位梯度也没有变化）, 但闸孔前临近矩形水域 118.5 m×7.5 m 和闸孔后临近水域 118.5 m×3.0 m 的流速分布发生了一些变化,将不同工况下两块水域的网格流速统计值列于表 4。

中国知网　https://www.cnki.net

表4 不同工况闸前、闸后水域流速统计值

Tab.4 Statistical values of flow velocity in front and back of sluice gates under different working conditions

工况编号		工况4（无桥）	工况4（方案一）	工况4（方案二）	工况2（无桥）	工况2（方案一）	工况2（方案二）
闸前水域速度	平均值/(m/s)	0.68	0.65	0.66	1.10	1.09	1.10
	最大值/(m/s)	1.08	1.03	1.02	1.43	1.45	1.42
	最小值/(m/s)	0.16	0.22	0.19	0.36	0.33	0.36
	方差	0.033 9	0.029 4	0.032 4	0.027 4	0.028 2	0.026 9
闸后水域速度	平均值/(m/s)	0.64	0.64	0.64	1.13	1.14	1.14
	最大值/(m/s)	1.26	1.23	1.22	1.90	1.92	1.90
	最小值/(m/s)	0.07	0.08	0.07	0.13	0.13	0.13
	方差	0.086 3	0.079 2	0.080 8	0.232 6	0.225 1	0.224 7

表4计算结果表明，不同桥位桥梁建设方案总体上对A闸前7.5 m上游有限水域和闸后3.0 m下游有限水域的平均流速影响不大，但流速方差的不同表明闸前后流速分布受到了桥墩的影响。

4.2 桥墩对水流形态影响分析

虽然表4表明桥墩对闸墩前后的平均流速影响不大，但闸孔周边的流态仍然需要分析。对有桥方案与无桥情况同等工况的流速矢量差进行分析，寻求桥墩建设带来的闸孔前后的流速附加矢量。2种桥位方案针对无桥状态的各工况流速附加矢量放大局部图见图8、图9。

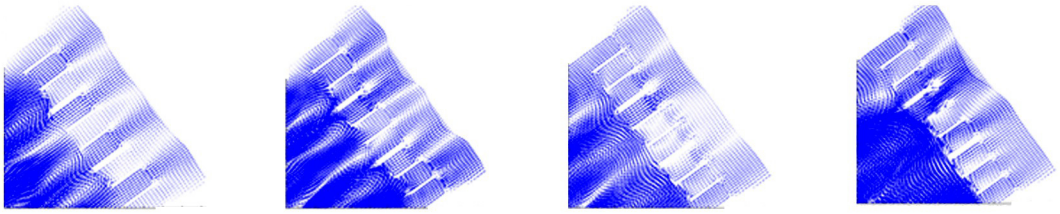

图8 桥位方案一引起的附加流速矢量(左至右：工况1，2，3，4)

Fig.8 Additional flow velocity vectors (left to right: conditions 1, 2, 3, 4) caused by bridge plan 1

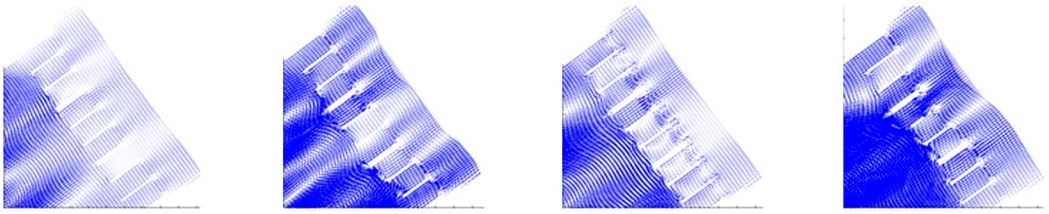

图9 桥位方案二引起的附加流速矢量(左至右：工况1，2，3，4)

Fig.9 Additional flow velocity vectors (left to right: conditions 1, 2, 3, 4) caused by bridge plan 2

由于桥墩将A闸前水道流速的“舌状”分布改变为“指状”分布，桥墩对闸前水流的影响显然不是均衡施加的。如果将闸孔从北至南以1#~9#编号，桥墩对各闸孔流速的增减见表5。向上向下箭头分别表示流速对无桥状态的增加与减少，短横线表达既没有增减。总体而言，水道中高流速的“指状”分布增大了A闸两侧闸孔流速，中泓闸孔流速有增有减。

中国知网 https://www.cnki.net

表 5　受桥墩影响闸孔流速的增减

Tab.5　The increase or decrease of the velocity of the gate hole by the influence of the pier

桥位	闸孔工况	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
方案一	1	↑	↑	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↑
	2	↑	↑	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↑
	3	↑	↑	↓	↓	–	–	↓	↑	↑
	4	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑
方案二	1	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑
	2	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑
	3	↑	↑	↓	↓	↓	–	–	↑	↑
	4	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑

桥墩对 A 闸前水流流态影响更为复杂，方案一 1、2 工况 1#~4# 闸孔前附加了顺时针环流、5#~6# 闸孔前逆时针和 7#~9# 闸孔前逆时针两个环流；方案一 3、4 工况又有所变化，1#~3# 闸孔前附加顺时针环流、4#~6# 闸孔前、7#~9# 闸孔前附加两个逆时针环流。方案二闸前情况与方案一相差不大，但相应环流流速有所减小。闸前存在附加环流对水闸安全不利。

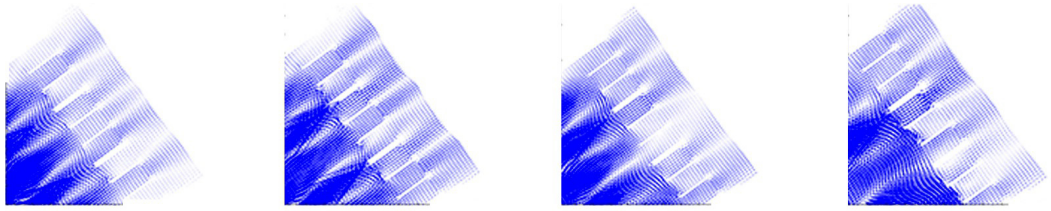

图 10　桥位方案一、二流速矢量差(左至右:工况 1、2、3、4)

Fig.10　Bridge position scheme one and two flow vector difference (left to right: conditions 1, 2, 3, 4)

对桥位方案一与桥位方案二的流速矢量差进行观察(图 10)，比较两桥位方案相应水流对 A 闸的影响程度。方案一矢量减方案二闸孔流速增减见表 6。

从表 6 统计结果中可以看出，方案一和方案二比较，不论什么工况，水道中泓最大流速 5# 闸孔的流速始终最增大的，这对水闸安全不利。

表 6　方案一对方案二闸孔流速的附加增量

Tab.6　Scheme one to two additional increment of flow velocity at gate hole

桥位比较	工况	闸孔								
		1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
方案一	1	↑	↑	–	↓	↑	↓	↓	↑	–
	2	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↑
方程二	3	↑	↑	↓	↓	↑	–	↓	↑	↑
	4	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↓	–	↑

5　结论

根据数模计算结果研究分析可得：

1）水闸上游建桥会明显改变闸前流态，河道内高流速中泓“舌状”分布因受桥墩阻挡改变为“指状”分

中国知网　https://www.cnki.net

布。

2）由于桥墩的阻水作用，桥梁桥墩面向上游水位有所抬高，抬高影响范围较大，在计算区域内影响范围为1 000 m，尤其在大流量低水位时期，抬高更明显。

3）建桥后水流形成的“指状”分布使大流速水流有扩散性，明显增加了靠岸两侧闸孔水流，也增加或减小了水闸中央闸孔流速。

4）桥梁桥墩使闸前流态复杂化（理想状态下，闸前水流为平行流最佳），在闸前附加多个顺时针环流与逆时针环流，当附加环流流速较大时，会对建筑结构产生危害。

5）桥位方案一、桥位方案二的比较：P点到出水断面的水位梯度变化是方案一大于方案二；闸前环流流速大小是方案一大于方案二；中间闸孔最大流速是方案一大于方案二，通过以上分析，桥位方案二对水闸影响小于桥位方案一，建议选用桥位方案二。采用桥闸耦合水流数模分析，可以提供桥闸间水流详细流态，为进一步分析水闸安全、底部冲刷、河岸稳定提供了基础数据，具有工程实用性。

研究可继续深入，可在三维模型下分析拟建桥梁对已有建筑的影响，与二维模型计算结果进行比较；可选择多种桥位方案，进行更全面的桥位比选研究和水流分析。

参考文献：

[1] 戴文鸿，张云. 桥墩壅水计算及影响分析. 河海大学学报：自然科学版，2010，38(2)：268-270.
[2] 庄元，刘祖源. 桥墩紊流宽度的试验研究[J]. 武汉理工大学学报：交通科学与工程版，2007，31(5)：846-849.
[3] 高冬光，等. 桥位勘测设计[M]. 北京：人民交通出版社，2001：12-17.
[4] JTG C30-2002. 公路工程水文勘测设计规范 [S]. 2002.
[5] 庞启秀，庄小将，黄哲浩，等. 跨海大桥桥墩对周围海区水动力环境影响数值模拟[J]. 水道港口，2008，29(1)：16-20.
[6] 张磊，黎洪萍. 公路桥梁选址优化综合评价指标体系的探讨[J]. 基建优化，2007，28(3)：94-95.
[7] 谭海玲. 公路桥梁选址分析[J]. 中国水运.2008，6(1)：64-65.
[9] 范平易，邹早建. 基于桥区水流数值模拟的桥墩对通航影响分析[J]. 中国航海，2010，33(1)：37-41.
[10] 卢华喜，周珍伟，王漪璇. 液固耦合作用对不同截面深水桥墩的自振特性影响研究[J]. 华东交通大学学报，2015，32(2)：8.

Analysis of Coupled Flow Between Bridge and Sluice and the Selection of Bridge Site

Wu Zhong，Li Jing，Li Yuanjun

（College of Civil and Transportation Engineering，Hohai University，Nanjing 210098，China）

Abstract：Bridge construction involves the site selection with the pier column tower over water disturbing the original flow pattern，which may cause such problems as river channel erosion，sedimentation and decline in flood drainage. When the construction of the bridge is close to the wading installations，the effect of variations of flow pattern on installations requires thorough assessment. Taking the bridge site planning of the upstream aqueduct gate of a city as the study background，this paper established a two-dimensional flow numerical model of river channel，sluice，pier and other facilities. Through the simulation of water flow under typical conditions before and after the engineering，the changes of water level，velocity and flow direction near the bridge and check gate were obtained. Combining the safe operation factor of the check gate，it provides some suggestions for bridge site selection.

Key words：bridge；site selection；flow；sluice

（责任编辑　王建华）

中国知网 https://www.cnki.net