

· 航道及通航建筑物 ·



# 基于二维数学模型的串列圆柱桥墩 对通航水流的影响\*

魏祥龙<sup>1</sup>, 杨胜发<sup>1</sup>, 胡鹏飞<sup>2</sup>, 马宪浩<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 2. 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

**摘要:** 规划中的四川江安长江第二过江公路桥采用钻石形串排圆柱型主塔, 为了研究其主塔桥墩对该桥区河段各通航水力要素的影响程度, 通过建立平面二维水流数学模型, 模拟该河段方案实施前后的水流流场, 从工程应用的角度分析串列圆柱桥墩对河段水流条件的影响。分析数模仿真结果得知: 在各级流量下桥区河段水位、流速在工程实施前后变化较小, 桥轴线横向流速较小, 桥梁的建设对通航水流条件影响较小, 不会对船舶安全通过桥区产生影响。

**关键词:** 圆柱绕流; 通航; 数值模拟; 水流条件

中图分类号: TV 147; U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)08-0075-07

## Influence of tandem-ranged cylindrical piers on the navigation flow condition based on 2D numerical model

WEI Xiang-long<sup>1</sup>, YANG Sheng-fa<sup>1</sup>, HU Peng-fei<sup>2</sup>, MA Xian-hao<sup>2</sup>

(1. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Changjiang Chongqing Harbor and Waterway Engineering Investigation and Design Institute, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** The Jiang'an second Yangtze River highway bridge under planning in Sichuan is adopted the diamond-shaped tandem-ranged cylindrical piers as its main towers. In order to study the influence on the navigable waterpower of the river reach under this bridge by the main tower piers, we built a 2D mathematical model for the flow to simulate the flow field before and after the scheme is implemented, and analyze the influence on the flow condition of this river reach by the tandem-ranged cylindrical piers from the view of engineering application. By analyzing the results of the mathematic model, we find that under different levels of flow, the changes of the water level and velocity in the river reach under the bridge are small, and the transverse flow velocity on the axis of the bridge is very slow, and the influence on the navigation flow condition by the construction of bridge is also small and will not affect the ship safely passing through the bridge area.

**Keywords:** flow around cylinder; navigation; numerical simulation; flow condition

随着国民经济的发展, 长江上游越来越多的大型桥梁建成并投入使用, 桥梁的建设会改变原有航道水流条件, 对船舶安全通过桥区产生一定

的影响, 因而有必要研究桥墩绕流对通航水流条件的影响。何国建等<sup>[1]</sup>利用三维数学模型研究桥墩群对河道水流与水位的影响, 为该河段航道整

收稿日期: 2016-03-10

\*基金项目: “十二五” 国家科技支撑计划(2012BAB05B03); 重庆市自然科学基金(cstc2011JJA30002); 重庆市教委基金(KJ1400319); 重庆交通大学研究生教育创新基金(2014110)

作者简介: 魏祥龙(1990—), 男, 硕士研究生, 从事水力学与河流动力学研究。

治及规划提供依据；罗伟林等<sup>[2]</sup>利用 CFD 技术对桥墩周围三维流场进行数值模拟，根据计算成果，提出了影响桥区河段船舶安全航行的流速大小的范围以及通航宽度值；薛小华等<sup>[3]</sup>利用水槽、数模试验，分析得到了桥墩绕流影响宽度的计算公式；杨忠超等<sup>[4]</sup>利用桥墩概化模型试验与三维数值模拟计算论证鱼洞长江大桥对通航的影响；严建科等<sup>[5]</sup>利用水槽试验验证单圆柱绕流水流结构；李彬等<sup>[6]</sup>则应用 MIKE21 软件模拟分析了不同桥墩布置形式斜交桥对河道局部流场的影响；鲁婧等<sup>[7]</sup>利用二维数学模型分析了单、双排桥墩群的流速分布。本文旨在通过建立平面二维数学模型，仿真模拟串列圆柱桥墩桥周围在方案实施前后的水流运动情况，从工程应用角度分析该桥墩方案下通航水流条件的变化及该桥梁建设方案对通航水流的影响，为科学建设该项目以及保障长江干线通航安全提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 拟建桥梁

川江安长江第二过江公路桥工程位于宜宾市江安县长江流域怡乐镇和阳春镇之间，作为四川长江干线主航道规划的 17 座过江通道之一<sup>[8]</sup>，是四川省沿江综合交通运输体系中的重要组成部分。该拟建大桥起自长江北岸阳春镇阳春村青杠山，跨越长江后，止于怡乐镇柏杨湾，根据方案比选，最终确定的推荐桥型为三塔叠合梁斜拉桥(图 1)，主塔(图 2)采用钻石型并排圆柱，桥梁孔跨布置为  $2 \times 50 \text{ m} + 65 \text{ m} + 2 \times 400 \text{ m} + 65 \text{ m} + 2 \times 50 \text{ m}$ ，主跨跨径为 400 m，边跨跨径为 165 m，斜拉桥边跨布置了 2 个辅助墩，边主跨比为 0.412 5，全长 1 130 m；边塔、中塔柱在纵向轮廓尺寸分别为 8.0~9.0 m、8.0~12.0 m，塔座厚 2.5 m，塔柱、横梁均采用单箱单室断面。4<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>墩位于河道两岸，5<sup>#</sup>墩位于河道中间。

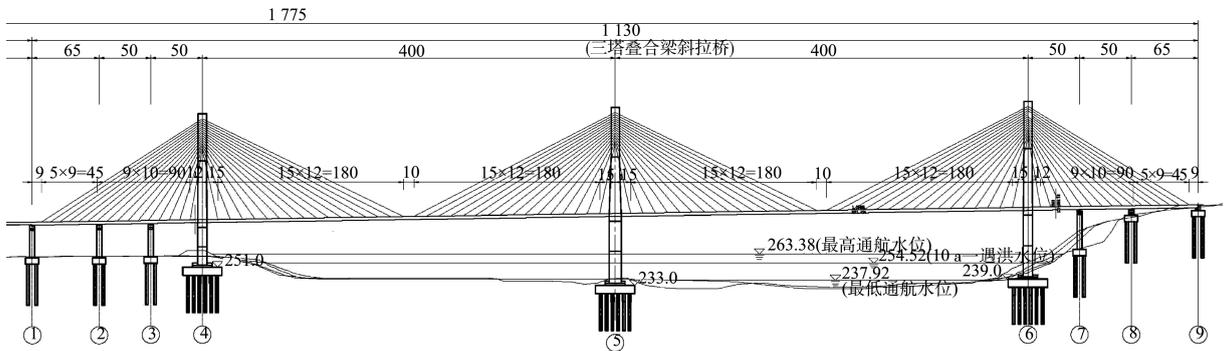


图 1 斜拉桥桥式布置 (单位: m)

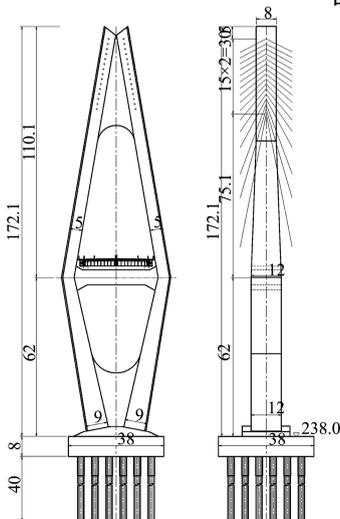


图 2 主塔构造 (单位: m)

### 1.2 河势

工程河段处于长江二龙口水道，航道里程为 966.3 km，河段内有弯道、碛坝、礁石等，航道条件复杂(图 3)。该河段航道微弯，下段左岸黄桷碛伸出江中较开；右岸三滩子一带乱石分布，岸线较不规则，枯水期航道较窄。上段右岸金鱼碛伸出江中较开，碛尾暗碛与左岸黄桷碛碛脑暗碛斜对，形成对口浅滩，枯水期槽窄水浅；经 2007—2008 年对该滩进行工程整治后航道条件改善，但枯、中水期航槽内水流较急。

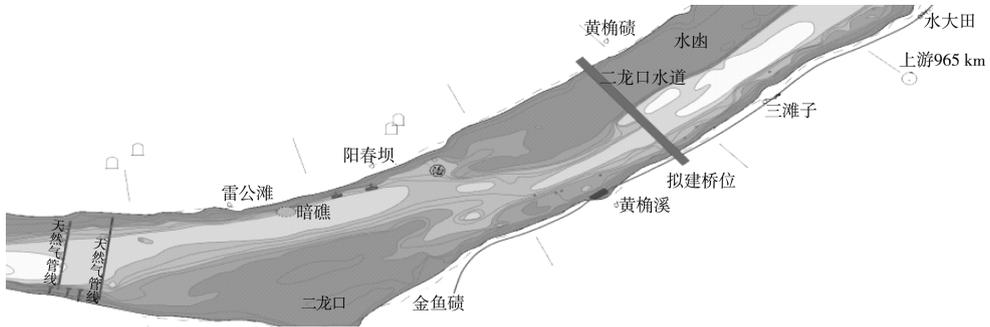


图 3 拟建桥位及河势

1.3 航道规划

工程所在水道属长江叙泸段航道, 该段航道 2008 年 9 月已实行一类维护。经叙泸段航道建设工程整治后, 于 2015 年 3 月 26 日起, 长江上游四川省宜宾合江门至重庆市羊角滩段航道维护尺度将由 2.7 m 提升至 2.9 m。根据相关规划, 该河段将通过航道整治等相关工程举措提升至 II 级航道, 并长期规划达到 I 级航道通航标准<sup>[9]</sup>。

1.4 水位流量

拟建大桥上游约 57.8 km 处有长江李庄水位站, 该水位站为长江干流上段的国家基本水位站, 根据李庄至泸州河段历史调查及实测的水面线, 建立李庄站与拟建大桥的水位关系, 然后将李庄站水位流量关系转换至拟建大桥, 拟选桥位水位流量关系见图 4<sup>[10]</sup>。

2 水流数学模型的建立及验证

为了复演方案前后桥区流场情况, 需要通过二维数学模型进行模拟, 本文采用沿平均水深的有限元法二维水流数学模型进行计算, 该模型具有计算精度高、模拟复杂边界条件较好等特点。

2.1 控制方程<sup>[11]</sup>

水流连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \quad (1)$$

X 方向动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a}{\partial x} \right) - fv - \frac{\epsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\epsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{u \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{\frac{4}{3}}} = 0 \quad (2)$$

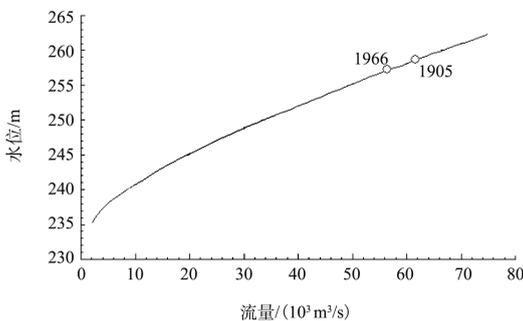
Y 方向动量方程:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left( \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a}{\partial y} \right) - \frac{\epsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\epsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{v \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{\frac{4}{3}}} = 0 \quad (3)$$

式中:  $t$  为时间;  $u$ 、 $v$  分别为沿 X、Y 方向的流速;  $h$  为水深;  $\eta$  为床面高程;  $g$  是重力加速度;  $\epsilon_{xx}$ 、 $\epsilon_{yy}$ 、 $\epsilon_{xy}$  是紊动黏性系数, 取为  $\alpha u_* h$ ,  $\alpha = 3 \sim 5$ ,  $n$  为糙率系数,  $u_*$  为摩阻流速。

2.2 计算条件

本次数值模拟是对于定场流的计算, 只需在上游设置来水流量, 在下游设置尾水位。为了使数模结果更好地反映桥区河段在不同流量下的通航水流条件, 需要选取有代表性的流量工况作为计算输入条件, 见表 1。



注: 水位为1965年黄海高程。

图 4 拟选桥位处水位流量关系

根据拟建大桥水位流量关系和设计流量, 即可得到设计水位; 同时利用桥位的流量水位, 根据实测资料计算得出的河道比降即可推求河段的计算尾水位。

表1 计算边界条件

工况	洪水频率	流量/(10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /s)	桥位处水位/m
1	20 a 一遇流量	51.0	256.38
2	汛期常遇流量	35.0	250.42
3	中水流量	15.0	245.77
4	枯水流量	5.8	239.73

2.3 基本方程的数值离散与求解

对浅水方程的时间采用差分法进行离散, 采用有限单元法对空间进行离散, 单元插值采用混合插值方法。根据数模验证阶段对糙率的率定, 不同计算流量下糙率不同,  $n$  的取值范围在 0.019 ~

0.022, 干湿临界水深为 0.15 m。对于非线性方程组, 采用 Newton-Raphson 方法进行求解。

2.4 计算域的选取及网格的生成

本文综合考虑拟建大桥所在河段的河势及水文资料因素, 针对推荐桥位建立模型, 推荐桥位计算河段总长约 7 900 m, 计算进口距推荐桥位约 4 476 m。计算河段采用三角形网格进行离散, 对桥墩附近网格进行加密, 在计算时桥墩做不过水处理。网格尺度纵向约 35 m、横向约 30 m, 桥位模型计算网格见图 5。

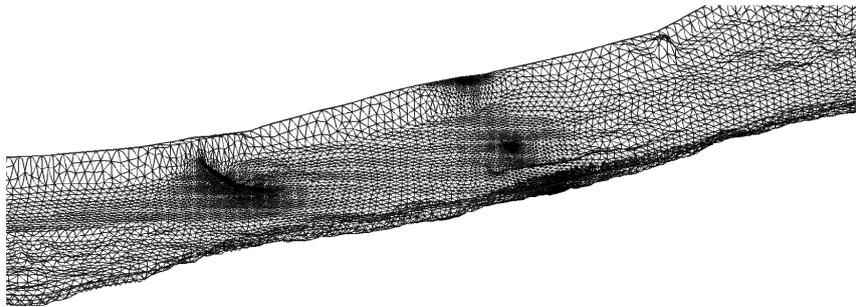


图5 推荐桥位计算区域网格划分

2.5 数学模型的验证

本次计算采用 2015 年 9 月实测工程河段地形图进行建模, 为了验证模型的可靠性, 并对相关模型参数进行率定, 本研究分别采用 2013 年 3 月、6 月、7 月的水文观测资料及流速流向实测图对计算的水位、流速进行验证。

1) 水位验证。

通过将计算结果与枯水期、中水期与洪水期实测结果进行对比, 并反复调试计算参数, 根据 2013 年 6 月、7 月两次实测水位资料, 对该河段内的水位进行验证。从数模计算结果与实测资料的对比可以发现, 二者偏差不大; 大多数水位测点的实测值与计算值差值在 ±0.1 m 以内, 同时由于测量精度原因, 实测局部地形与实际地形未能完全相同, 计算后造成个别水尺水位偏差稍大, 但误差均保持在 ±0.299 m 之内, 不影响数模整体的准确性, 该数学模型可用于方案前后流场的模拟计算 (表 2)。

表2 水位验证

$Q/(10^3 \text{ m}^3/\text{s})$	水尺编号	水位/m		
		实测值	计算值	计算误差
5.8	1 <sup>#</sup>	239.759	239.490	-0.269
	2 <sup>#</sup>	239.526	239.481	-0.045
	3 <sup>#</sup>	239.789	239.546	-0.243
	4 <sup>#</sup>	239.553	239.657	0.104
	5 <sup>#</sup>	239.855	239.771	-0.084
	6 <sup>#</sup>	239.784	239.793	0.009
	7 <sup>#</sup>	239.986	239.687	-0.299
	8 <sup>#</sup>	239.771	239.849	0.078
	9 <sup>#</sup>	241.002	241.142	0.140
	10 <sup>#</sup>	240.881	241.048	0.167
	11 <sup>#</sup>	241.524	241.662	0.138
	12 <sup>#</sup>	241.367	241.659	0.292
15.0	1 <sup>#</sup>	245.411	245.239	-0.172
	2 <sup>#</sup>	245.262	245.265	0.003
	3 <sup>#</sup>	245.431	245.590	0.159
	4 <sup>#</sup>	245.483	245.655	0.172
	5 <sup>#</sup>	245.441	245.635	0.194
	6 <sup>#</sup>	245.492	245.677	0.185
	7 <sup>#</sup>	245.933	245.900	-0.033
	8 <sup>#</sup>	245.982	245.931	-0.051
	9 <sup>#</sup>	246.281	246.383	0.102
	10 <sup>#</sup>	246.662	246.569	-0.093
	11 <sup>#</sup>	246.963	246.871	-0.092
	12 <sup>#</sup>	247.196	246.899	-0.297

2) 流速验证。

应用建立的水流数学模型, 对工程河段验证流量进行流速验证。这里以中水流量为例进行说明, 从流速验证(图 6)可见, 数模计算流速的大小及分布的位置均与实测资料符合度较高, 实测点位的计算值与实测值之间的差值均在±0.15 m/s 的范围内, 个别差值较大, 但也在±0.3 m/s 的范围内, 计算与实测偏差值控制在±10%范围内, 符合相关规范的要求<sup>[12]</sup>。

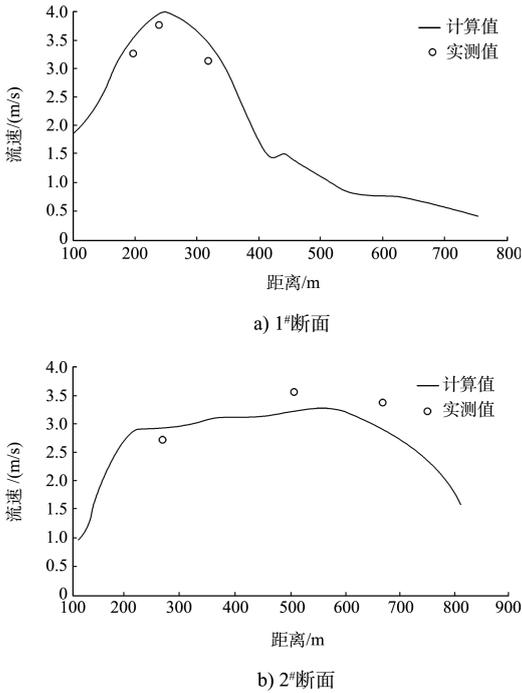


图 6 断面流速验证 ( $Q=31\times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ )

3 数模计算结果

3.1 工程对河段流场的影响

拟建大桥建成后, 串联圆柱桥墩会占据过水面

积, 改变河道原有流场, 为了探究桥墩对流场的影响, 这里选取了最大一级流量下( $Q=51\times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ )中墩附近的流场等值线(图 7)进行分析。从图 7 可以看出, 串联圆柱桥墩绕流会在桥墩下游产生尾涡湍流区, 同时由于两圆柱距离较近, 整体表现出单物体绕流特性<sup>[13]</sup>, 数模结果显示圆柱间流速保持在 0.015 m/s 以内。同时由于绕流现象的存在, 桥梁建成后会在桥墩周围形成紊流区, 对桥区水域的河床演变和航道安全产生影响<sup>[14]</sup>, 由其计算公式<sup>[15]</sup>可知, 流量越大、流速越大则紊流宽度越大, 从通航安全角度取最高通航流量并根据数模成果计算得出 5#墩紊流宽度为 43 m, 考虑到跨径以及洪中枯航道边界的布置, 桥墩紊流区对于船舶通过桥区影响较小(表 3)。

$$E = 0.88K_1v^{0.75}b^{0.56}h^{0.44} \quad (4)$$

式中:  $E$  为桥墩紊流总宽度(m);  $K_1$  为与桥墩形状相关的系数;  $v$  为墩前水流流速(m/s);  $b$  为墩形计算宽度(m);  $h$  为桥墩附近水深(m)。

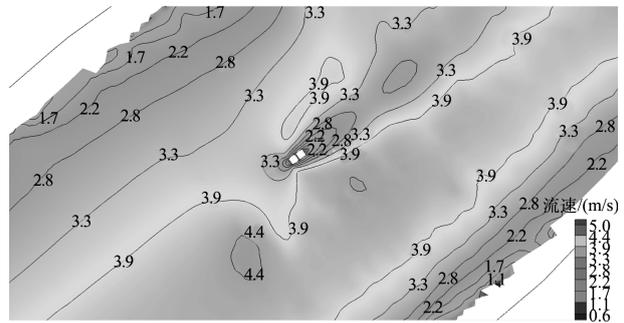


图 7 建桥后桥区流速等值线( $Q=51\times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ )

表 3 桥墩紊流总宽度计算及取值

桥墩编号	墩柱轴线与水流夹角/(°)	墩形计算宽度/m	墩前流速/(m/s)	墩前水深/m	紊流宽度标准值/m	紊流宽度设计值/m	紊流宽度取值/m
5#	2.58	12.99	3.84	17.2	28.38	42.58	43
6#	1.26	10.53	1.55	11.7	10.79	16.18	17

通过各级流量下工程前后流速差值的等值线(图 8)可以看到, 大桥修建后, 增加了河道的阻水面积并使桥墩上游流速降低, 尤其墩前的局部流减小幅度较大; 同时河道受到桥墩的挤压, 河

道束窄, 壅高了上游水位, 致使河道比降增加; 由于桥墩阻水与束窄河道, 通航孔内流速比其他水域流速变化较为明显; 而在墩后形成的掩护区内, 流速大大减小, 并形成一定范围的回流区,

桥墩周围由于桥墩的阻水作用流速改变值较大，通航孔流速差值与影响范围最大情况均发生在最大一级流量下。主通航孔内流速差值均在 0.1 m/s 以内，比对图 8 差值等值线，各级流速差值与与墩后绕流范围均较小，总体双圆柱桥墩对通航孔流速的影响较小。

### 3.2 工程对桥区水位的影响

建桥后，桥墩挤占了部分河道过水面积，故桥位上游一定范围内因桥墩阻水产生壅水；而桥位处水流受平面上的束窄产生侧向收缩，引起桥位及下游一定范围内水面跌落。图 9 表示经数学模型计算后方案前后的水位变化，其中桥位布置在观测起点距 1 035 m 处。

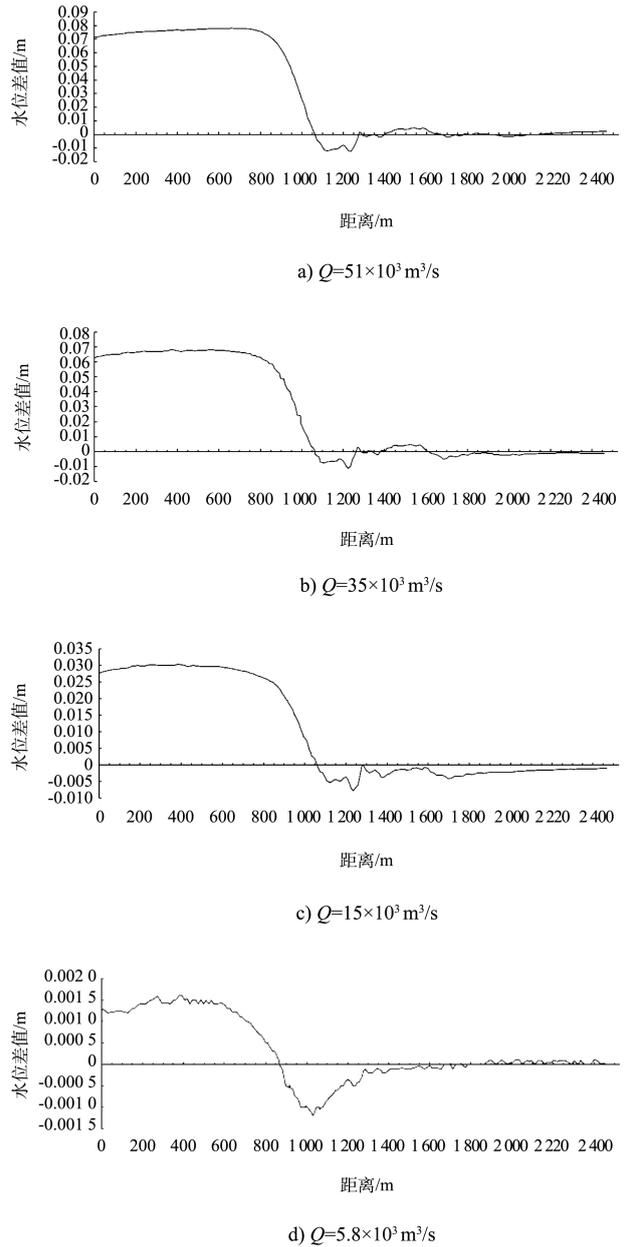
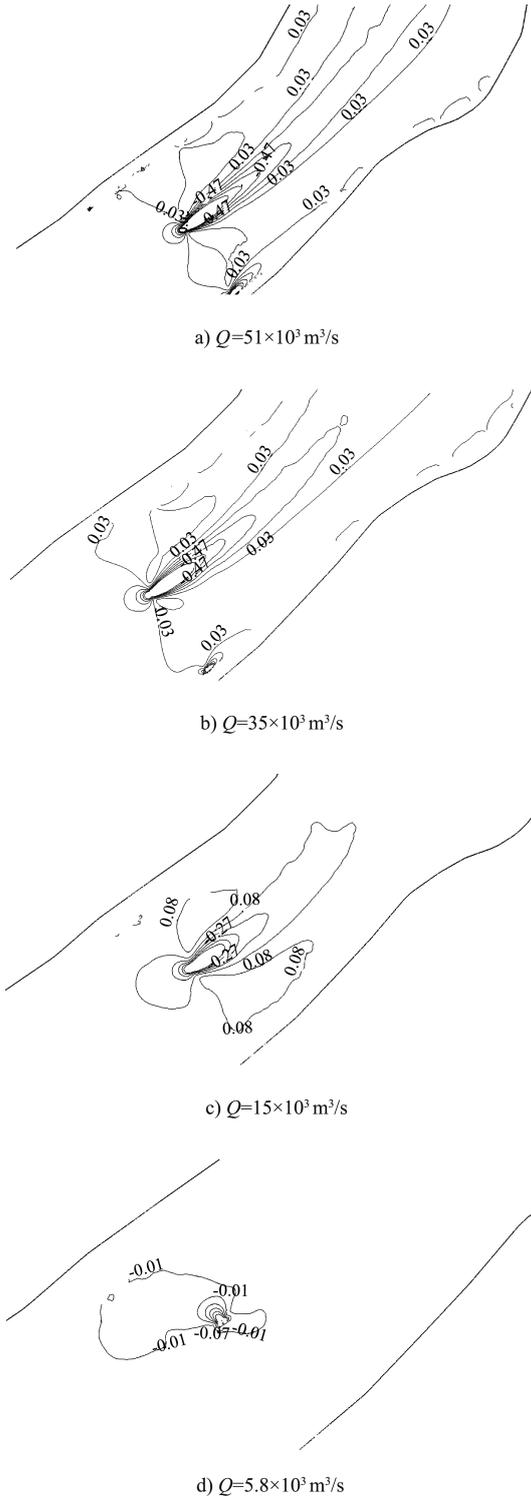


图 9 建桥前后水位差值

对比 4 级流量下工程前后的桥区河段主航槽中心线处沿程水位差值可以发现，桥下游水位最大降低值为 0.013 m，桥上游水位最大壅高值为 0.079 m，

图 8 工程前后桥区流速差等值线 (单位: m/s)

最大壅水、降水的情况发生在桥墩上下游 300 m 的范围内, 且均发生在流量为  $Q = 51 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$  的时候, 对比 4 级流量工程前后的水位差值等值线可以发现, 随着流量的减少, 水位的变化幅度以及影响范围逐渐减少, 直至  $Q = 5.8 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$  时降到最低。

### 3.3 工程对桥位断面流速变化的影响

桥梁对水流的影响主要体现在桥位附近, 分析桥位断面流速变化的影响更可清楚说明建桥后串列圆柱桥墩对通航水流条件的影响, 因而在桥位断面布置 15 个测点, 得到 4 级流量下桥位处断面流速、流向变化, 通过前文的分析可以发现, 在最大级流量下桥墩对通航水流条件影响较大, 在该级流量下, 流速变化值最大为 0.29 m/s, 夹角最大变化值为  $5.09^\circ$ , 最大横向流速为 0.51 m/s。

## 4 结论

1) 结果显示串列圆柱桥墩由于桥墩距离较近桥区流场呈现单物体绕流特性, 最高通航流量下紊流宽度对桥区通航航道宽度影响较小, 工程前后通航孔附近水域流速变化较小, 桥区河段流速分布与建桥前基本一致。

2) 桥区水位呈现墩前雍水、墩后跌水的情况, 最大水位变幅及影响范围发生在最高通航流量下, 且随着流量的减少, 水位的变化幅度以及影响范围逐渐减少, 且均发生在桥墩附近局部范围内。

3) 通过对桥梁轴线布置测点的观测发现, 桥位断面处的最大流速变幅、水流夹角以及横向流速发生在最高流量下, 但该变化对船舶安全通过桥区的影响较小。

## 参考文献:

- [1] 何国建, 方红卫, 府仁寿. 桥墩群对河道水流影响的三维数值分析[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2007(3): 345-351.
- [2] 罗伟林, 甘浪雄, 邹早建. 桥墩附近流场分布及对通航船舶的影响[J]. 中国航海, 2014(1): 66-70.
- [3] 薛小华, 刘怀汉, 茆长胜. 桥墩扰流对通航净宽尺度影响的试验研究[J]. 水运工程, 2008(1): 78-81.
- [4] 杨忠超, 陈明栋, 杨胜发, 等. 鱼洞长江大桥桥墩对水流及通航的影响研究[J]. 人民长江, 2009, 40(22): 63-66.
- [5] 严建科, 焦臣, 龙涛, 等. 单圆柱桥墩绕流流场试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2012(6): 779-785.
- [6] 李彬, 孙东坡, 赖冠文, 等. 桥墩布置形式对桥墩绕流及局部流场的影响[J]. 中国农村水利水电, 2013(7): 129-132.
- [7] 鲁婧, 王向东, 成晨, 等. 相同压缩比条件下单双排桥墩群流场分析[J]. 人民黄河, 2013(1): 115-116.
- [8] 长江经济带综合立体交通走廊规划(2014—2020年)[J]. 综合运输, 2014(11): 14-25.
- [9] 胡小庆, 解中柱, 刘勇, 等. 长江干线宜宾至重庆河段提升河段航道等级可行性研究成果[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2014.
- [10] 陈明栋, 胡江, 喻涛, 等. 四川江安第二过江通道公路桥梁工程水文分析专题研究报告[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [11] 杨胜发, 胡江, 付旭辉, 等. 秤杆碛边滩采砂对嘉陵江河道影响研究[J]. 水运工程, 2008(2): 73-77.
- [12] JTJ 312—1998 航道整治工程技术规范[S].
- [13] 陈波. 基于 PIV 技术的近壁双圆柱绕流尾迹特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [14] 林姗, 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.
- [15] 庄元. 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.

(本文编辑 武亚庆)