



# 大型钢围堰设置对航道水流条件影响

黄鑫伟<sup>1</sup>, 程志友<sup>1</sup>, 黄荣超<sup>2</sup>, 周昔东<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 航运与船舶工程学院, 重庆 400074; 2. 长江海事局后勤管理中心, 湖北 武汉 430324)

**摘要:** 为确保桥梁施工期间桥区通航安全, 分析大型钢围堰设置对航道水流条件带来的影响。以重庆某大桥钢围堰设置为例, 以流体质量守恒方程和雷诺时均方程为理论基础, 基于 Fluent 有限元软件采用二阶迎风算法和格林梯度法, 数值模拟钢围堰设置河段桥梁轴线方向和垂直桥梁轴线方向的断面流速。通过钢围堰设置前后各断面流速变化的比较与分析, 得出钢围堰设置对航道水流条件产生的影响。研究结论表明: 1) 在垂直桥梁轴线方向上, 从钢围堰前端起沿水流方向  $0.4B_s \sim 3.3B_s$  ( $B_s$  为钢围堰的宽度) 处流速增量最为明显。2) 在桥梁轴线方向上 A 区域断面水流流速剧增且钢围堰设置造成的紊流对水流影响的宽度约为  $3.7B_s$ 。3) 钢围堰尾部形成了约 1.3 倍钢围堰长、1.5 倍钢围堰宽的涡街。4) 分析得出的钢围堰设置期间航道水流条件变化特征对维护航道通航安全有重要意义。

**关键词:** 航道; 通航条件; 钢围堰; 流速

中图分类号: U 661.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)08-0122-07

## Influence of large steel cofferdam setting on flow condition of waterway

HUANG Xin-wei<sup>1</sup>, CHENG Zhi-you<sup>1</sup>, HUANG Rong-chao<sup>2</sup>, ZHOU Xi-dong<sup>1</sup>

(1.School of Shipping and Marine Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2.Logistics Management Center of Yangtze River Maritime Administration, Wuhan 430324, China)

**Abstract:** In order to ensure the navigation safety of bridge areas during bridge construction, this paper analyzes the influence of large steel cofferdam setting on waterway flow conditions. Taking the steel cofferdam setting of a bridge in Chongqing as an example, based on the fluid mass conservation equation and Reynolds time-mean equation, and the Fluent finite element software, the second-order upwind algorithm and Green gradient method are used to numerically simulate the bridge axis direction and cross-sectional velocity perpendicular to bridge axis in the steel cofferdam setting river section. Through the comparison and analysis of the change of flow velocity of each section before and after steel cofferdam setting, we obtain the influence of steel cofferdam setting on the flow condition of the channel. The research results indicate that: 1) In the direction perpendicular to the bridge axis, the steel cofferdam front-end along the flow direction is about  $0.4 B_s \sim 3.3 B_s$  ( $B_s$  for the width of the steel cofferdam) velocity increment is most obvious. 2) In the direction of the bridge axis, the flow velocity in section A of the bridge increases sharply, and the turbulence caused by the setting of the steel cofferdam has an impact width of about  $3.7 B_s$ . 3) A vortex street is formed at the tail of the steel cofferdam, which is about 1.3 times the length of the steel cofferdam and 1.5 times the width of the steel cofferdam. 4) The variation characteristics of waterway flow conditions during the steel cofferdam setting are of great significance for the maintenance of waterway navigation safety.

**Keywords:** waterway; navigation conditions; steel cofferdam; velocity

收稿日期: 2020-11-23

作者简介: 黄鑫伟 (1996—), 男, 硕士研究生, 从事船舶流体力学研究。

通讯作者: 程志友 (1979—), 男, 博士, 副教授, 从事船舶原理与海事安全研究。E-mail: czy790705@163.com。

跨江桥梁建设期间,通常会设置大型钢围堰进行施工,随着桥梁深水基础设计和施工技术的进步,大型钢围堰的设置形式增多。在国内外的研究中,已有学者对大体积矩形钢围堰、小型单圆柱桥墩和小型串列复式圆柱桥墩对航道通航水流条件产生的影响进行了探讨,而对于大型钢围堰(哑铃型)的探讨还有待进行。因此,研究大型钢围堰设置对航道通航水流条件的影响,具有重要的工程应用意义。

池丽敏等<sup>[1]</sup>采用平面二维水流数学模型,模拟钢围堰施工前后的桥区河段流场,分析了串列矩形柱桥墩对水流条件的影响,得到模拟计算桥区的流速变化和紊流宽度;叶玉康等<sup>[2]</sup>运用 Fluent 软件并基于 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型对单圆柱及串列双圆柱桥墩绕流非稳态瞬时流场进行了数值模拟,探讨串列双圆柱桥墩周围流场与两桥墩间距之间的定量关系;武玉涛<sup>[3]</sup>列举了圆柱绕流问题的研究进展,提供了研究类似问题的方案。亦有学者对桥区航道水流条件的变化给船舶通航带来的具

体影响进行了详细的探讨,胡旭跃等<sup>[4]</sup>通过物理模型试验研究复式圆端型桥墩附近船舶受力特性,得到船舶在桥墩侧向的通航安全距离;范平易<sup>[5]</sup>使用软件 TELEMAC-2D 建立二维有限元水动力数学模型,并用实测的潮位和流速资料对模型进行验证,总结出桥梁工程水动力条件变化的一般规律,从流速和流向两方面分析了建桥对通航的影响。

本文以重庆某大桥钢围堰设置为例,以流体质量守恒方程和雷诺时均方程为理论基础,基于 Fluent 有限元软件研究大型钢围堰设置对航道水流条件的影响。

1 工程概况

重庆某大桥为 ( 34.5 + 180.5 + 480 + 215.5 + 94.5 ) m 的高低塔双索面斜拉桥,半漂浮体系。桥塔采用门形混凝土结构,北塔总高 158 m、南塔总高 227 m,基础为哑铃型承台接群桩基础<sup>[6]</sup>,见图 1。

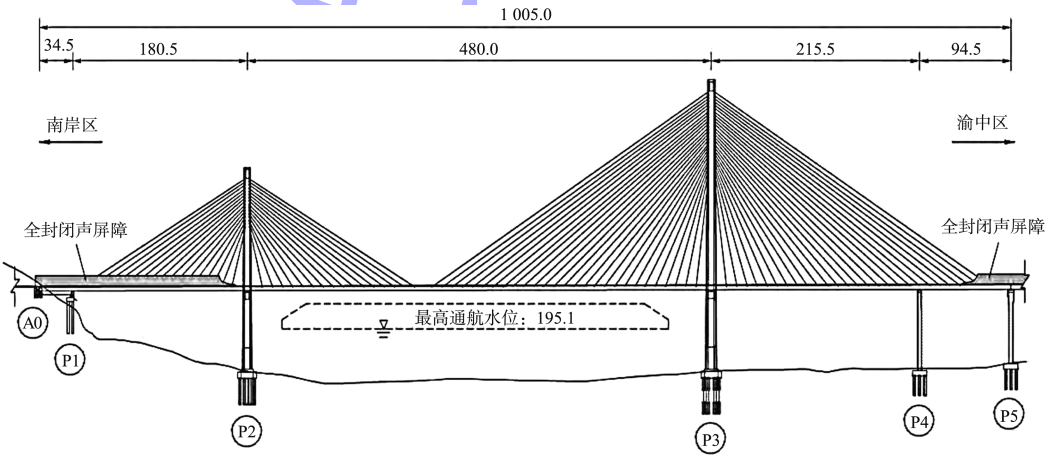


图 1 重庆某大桥总体设计剖面 (单位: m)

其中, P2 墩施工钢围堰尺寸为 54.6 m(横桥向)×24.6 m(顺桥向)×33.75 m(高),壁厚 2 m。围堰采用双壁钢套箱形式,整体自浮,用拖轮和

锚碇控制。平面布置形状为哑铃型,见图 2。落地处河底高程约为 162 m、宽约 600 m,桥区水深约 33 m,钢围堰设置区域河段平面见图 3。

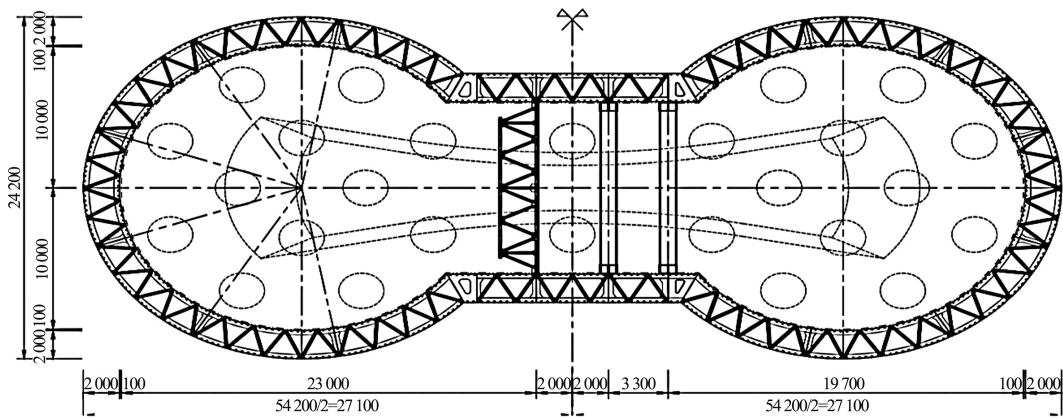
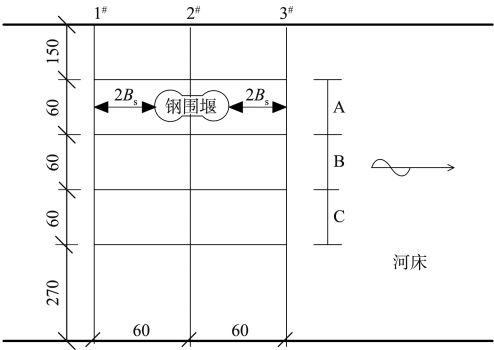


图 2 P2 墩钢围堰平面布置俯视图 (单位: mm)



注:  $B_s$  为钢围堰的宽度。

图 3 钢围堰设置区域河段平面 (单位: m)

将钢围堰布置区域进行沿桥梁轴向方向和垂直桥梁轴向方向划分。断面及计算区域编排见图 3。桥梁轴线方向上, 选取断面 2<sup>#</sup> 为特征截面, 考虑到该钢围堰设置在距左岸约 180 m 处, 故从左岸 150 m 处起, 一直到距右岸 270 m 处, 按照沿河宽每 10 m, 水深每 5 m 设置水流观测点。每 60 m 分为 1 个大区域, 编号分别为 A、B、C, 共计 3 个区域, 84 个测点。断面 2<sup>#</sup> 测点布置见图 4。

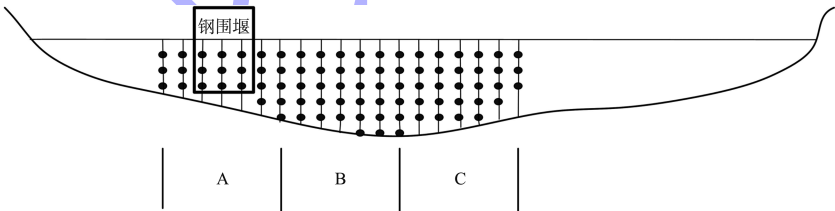
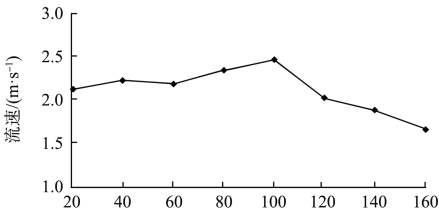


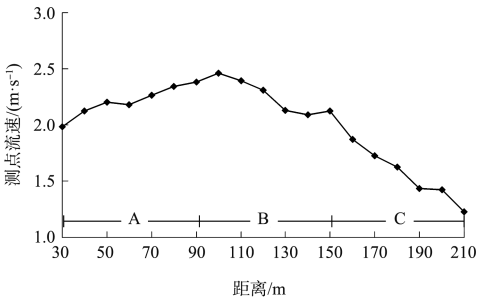
图 4 断面 2<sup>#</sup> 测点布置

设置大型钢围堰前, 河段垂直桥梁轴线方向上, 最高平均表面流速为 2.46 m/s, 最低平均表面流速为 1.66 m/s; 河段桥梁轴线方向表面最高流速为 2.51 m/s。流速分布见图 5。



垂直桥梁轴线方向上距断面 1<sup>#</sup> 距离/m

a) 垂直桥梁轴线方向断面



b) 桥梁轴线断面处沿河宽方向(水深 5 m)

图 5 设置大型钢围堰前流速分布

## 2 理论基础

钢围堰上下游断面遵循流体运动的质量守恒

方程<sup>[7]</sup>:

$$\int_{A_1} u_1 dA_1 = \int_{A_2} u_2 dA_2 \tag{1}$$

式中:  $u_1$ 、 $u_2$  分别为钢围堰不同瞬态断面的水流速度;  $A_1$ 、 $A_2$  分别为不同瞬态断面面积。

水流模型采用不可压缩流体运动的 Navier-Stokes 方程和连续方程, 两式联立为雷诺时均方程<sup>[8]</sup>, 其表达式为:

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{u_j} \overline{u_i})}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) + \overline{F_i} \tag{2}$$

式中:  $t$  为时间;  $\overline{p}$  为时均压强;  $\mu$  为动力黏性系数;  $\overline{F_i}$  为时均体积力;  $\rho \overline{u_i' u_j'}$  为雷诺应力, 代表紊动对时均流动产生的影响;  $\rho$  为水流密度;  $x_i$ 、 $x_j$  分别表示水流在  $x$ 、 $y$  方向上的位移分量;  $\overline{u_i}$ 、 $\overline{u_j}$  分别表示雷诺平均速度在  $x$ 、 $y$  方向上的分量。

水流经钢围堰时, 在平面上首先触碰钢围堰前端圆弧曲面, 可近似为绕曲面流动的水流运动状态。根据普朗特边界层方程<sup>[9]</sup>, 在物体表面纵深上水流流速为:

$$\left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)_{y=0} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \tag{3}$$

速度梯度  $\frac{\partial u}{\partial y}$  的变化率由  $\frac{dp}{dx}$  决定。

### 3 Fluent 模拟分析

#### 3.1 网格划分

对钢围堰计算区域水流划分网格并建立模型, 断面 2<sup>#</sup> 附近区域采用自适应密集正交, 断面 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 周围手动划分 5 层最小单元尺寸设为 1 m, 其余区域用智能划分, 见图 6。

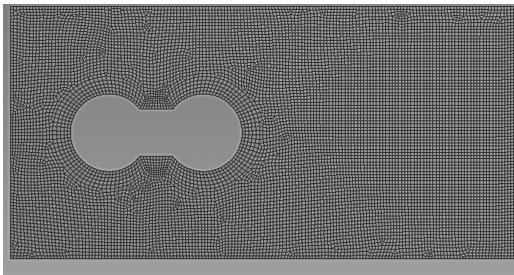


图 6 钢围堰计算区域网格划分

该区域总长 300 m、宽 260 m, 总共生成 11 677 个节点、11 377 个单元, 通过 Ansys workbench 中的 mesh metric 进行网格质量检测, 网格划分度 (Element Metric) 最小的为 0.369 48, 最高的为 0.999 47, 平均为 0.942 22, 该网格划分符合模拟要求, 精度良好。

#### 3.2 计算参数设定

##### 3.2.1 初始条件和边界条件

选取 195 m 水位作为计算工况, P2 墩过水断面面积为 24.6 m×10.0 m, 桥位处过水总面积为 7 875 m<sup>2</sup>, 流量为 16 700 m<sup>3</sup>/s, 布置钢围堰前的进口界面初始水流速度为 2.12 m/s。

##### 3.2.2 雷诺数

相关研究表明<sup>[10-11]</sup>, 圆柱间距和圆柱直径对旋涡的始点、脱落以及绕流升阻力系数具有较大影响。借鉴樊娟娟等<sup>[12]</sup>、滕丽娟等<sup>[13]</sup> 在相关研究上对于雷诺数的设置方法, 在初始流速 2.12 m/s、圆柱直径 24.6 m 时将代表惯性力与黏滞力之比的雷诺系数设定为  $Re = \rho v d / \mu = 5.16 \times 10^4$ 。

#### 3.3 算法

相关研究表明<sup>[14-15]</sup>, 多圆柱绕流等类似问题在进行数值分析时, 需要使用多维线性重建方法来计算单元表面处的值, 将单元中心解在单元中心处进行泰勒展开。因此, 本算例采用 Fluent 中的 second order upwind 二阶迎风算法对模型进行计算求解。借鉴赵辉<sup>[16]</sup> 关于梯度差值的确定方案, 选取 Green-Gause cell Based 作为本算例的梯度差值方案。

### 4 计算结果分析

#### 4.1 Fluent 模拟结果的可靠性分析

通过 Fluent 试验, 计算出了特征断面 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 的流速模拟值。

表 1 断面流速对比

水流初速/(m·s <sup>-1</sup> )	水流断面	断面平均流速/(m·s <sup>-1</sup> )		
		模拟值	实测值	残差
2.12	1 <sup>#</sup>	2.25	2.24	0.01
	2 <sup>#</sup>	3.17	3.01	0.16
	3 <sup>#</sup>	3.08	2.88	0.20
平均值		2.83	2.71	0.12



将模拟值与各个断面实际水流速度进行对比，实测数据采用该工程在 2018 年 3 月的水文观测资料。通过表 1 可以看出，每个断面的模拟流速与实际流速的残差都不超过 0.3，残差最大断面 3# 的相对误差也仅  $0.20/2.88=6.94\%$ ，属于正常范围。计算结果与实测数据的对比可证明本算例模拟的可靠性。

4.2 钢围堰设置对航道通航水流条件的影响

4.2.1 垂直桥梁轴线方向断面流速的变化

从 Fluent 中导出计算结果数据，钢围堰设置前后垂直桥梁轴线方向断面平均流速见图 7。从图 7 分析，钢围堰设置后，该区域的水流状态发生了较大变化。钢围堰上游圆柱两侧附近区域流速剧增，因为钢围堰本身占据了一部分断面面积，通过流体质量守恒公式可知，断面面积减小，流速增大。流速变化较大的区域集中在垂直桥梁轴线方向距断面 1# 40~100 m 处，即距钢围堰前端约  $0.4B_s \sim 3.3B_s$  处。其中，距围堰前端  $0.4B_s$  断面处的流速变化最大。又因为尾部紊流的影响，距断面 3# 约  $0.3B_s \sim 0.7B_s$  处的流速增量在同一垂直桥梁轴线断面上呈现正负交替现象。

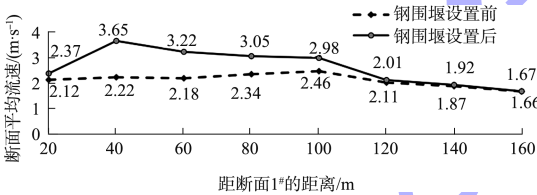


图 7 钢围堰设置前后垂直桥梁轴线方向断面平均流速

4.2.2 桥梁轴线方向截面流速变化

水流速度计算云图见图 8。在桥梁轴线方向上，钢围堰设置后，A 区域的断面水流流速激增，该区域钢围堰两侧的水流状态关于钢围堰中心线

近似对称，大体积载重船舶如果在进入此区域前没有提前降速，容易发生碰撞。B 区域位置上的水流相对于钢围堰修建前普遍增大，但局部受紊流的影响，摩擦阻力增大，水头损失造成局部流速变小。另外，水流冲击钢围堰时，在水流横向上的升阻力系数变大，动水压强的变化频率增快导致钢围堰两侧流速激增，水流流向发生较大改变，纵向流速增大，船舶航行时就有可能受到钢围堰上游圆柱两侧附近区域水流所施加的向外的推力。根据图 9 不同水深所有测点的钢围堰设置前后流速对比可以发现，C 区域流速变化较小，再依据沈小雄等<sup>[17]</sup>对航道边线与桥墩之间安全距离的研究，此钢围堰设置可进一步确定钢围堰设置后水流影响较大的宽度约为 90 m，即距钢围堰轴线约  $3.7B_s$ ，该范围以外区域的水流变化对船舶通航条件影响较小。从河流纵深的角度来看，水深 15 m 内水流流态变化明显，水流流速沿纵深减小，尤其是在 B 区域，水流呈紊流状态，流速沿纵深减小的幅度明显。考虑到大型船舶吃水一般在 5~10 m，因水流沿纵深速度变化较大，船舶底部易受到紊流切应力的影响。

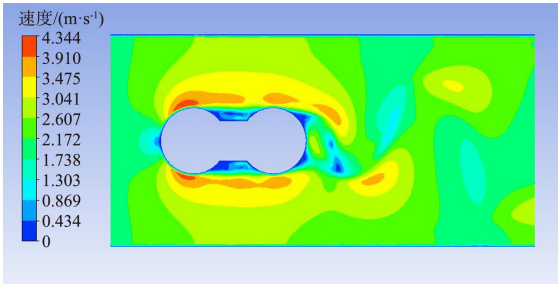
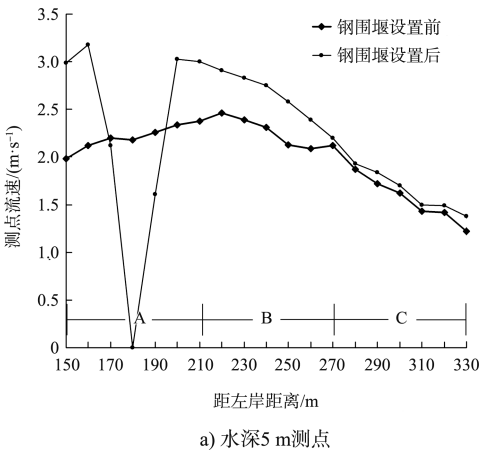
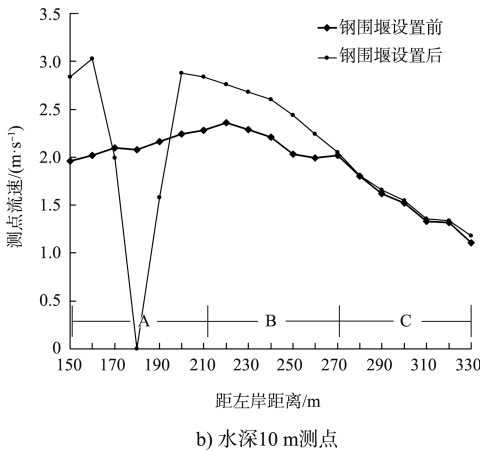


图 8 水流速度计算云图



a) 水深 5 m 测点



b) 水深 10 m 测点

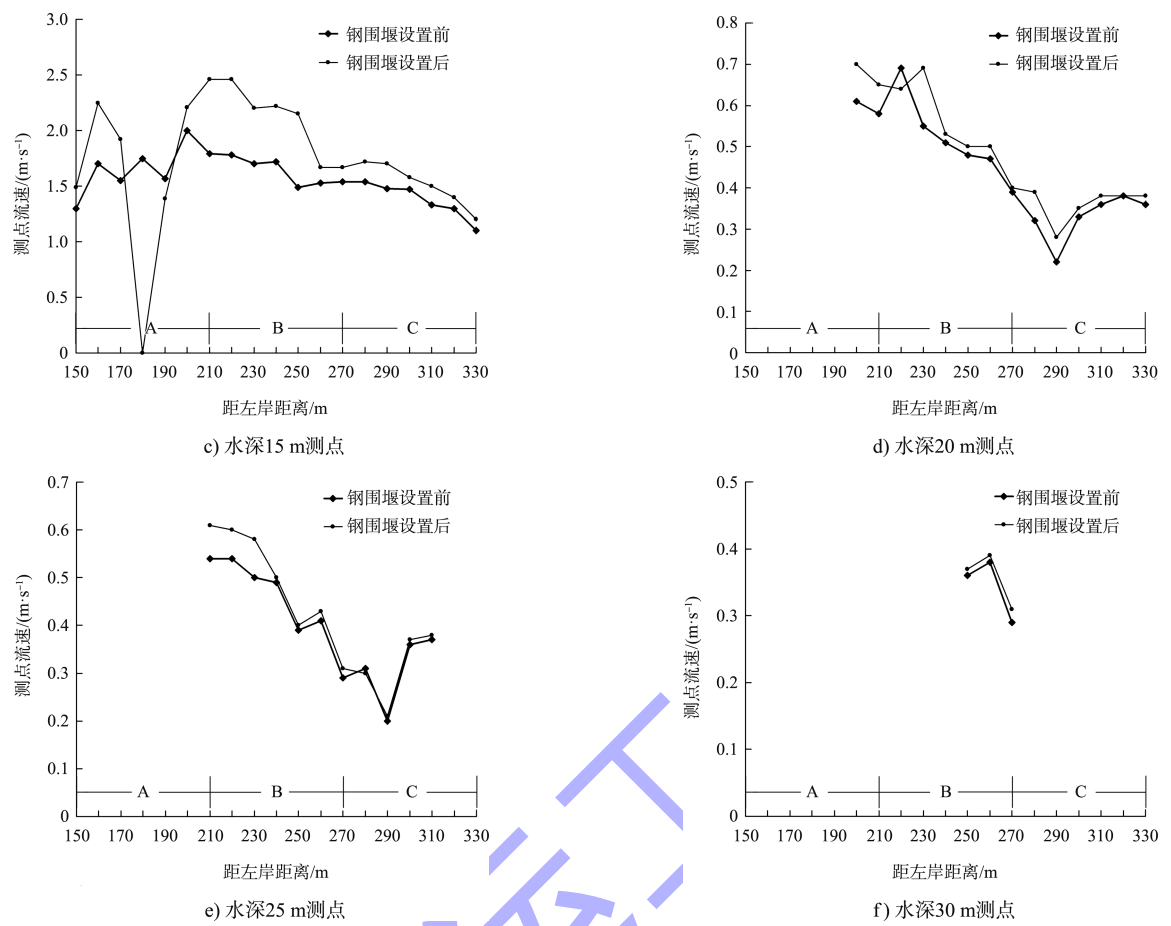


图 9 测点流速对比

4.2.3 尾涡紊流区流场分析

根据流场矢量图(图 10)可以看出, 钢围堰两

翼中轴线区域形成了湍急的旋涡, 钢围堰尾部形成了涡脱现象, 尾部下流水流形成了密集湍流场。

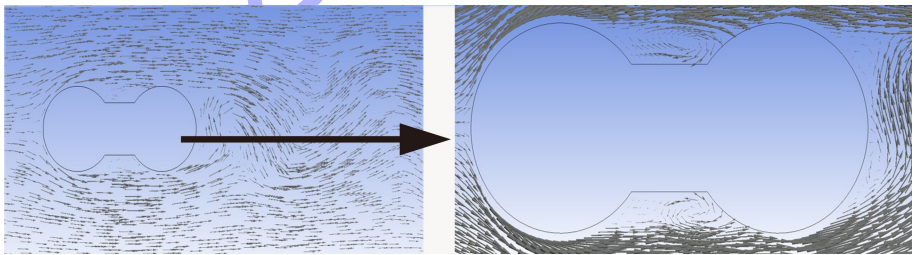


图 10 流场矢量

参考刘晓平等<sup>[18]</sup>对串列双桥墩紊流特性的研究, 考虑产生尾部旋涡这种现象主要是因为距径比  $L/D \leq 2.0$  时, 钢围堰尾部涡脱落频率较小, 且尾涡脱落频率的最小值及涡量最大值均出现钢围堰两翼 3m 内区域, 说明上游尾涡接触到下游圆柱切面后被反射, 与上游尾涡叠加并附着在中轴线区域接触面, 导致剪切层加厚, 紊动强度和尾涡强度增大。又因为水流的黏滞性, 当经过下游圆

弧面时, 动水压强的差值迅速增大, 又形成了快速的分流, 因此在尾部产生了小型涡脱。根据流场矢量图及流速的变化规律, 可以分析出钢围堰设置后, 其尾部形成了长约 75 m、宽约 36 m 的涡街, 与钢围堰的长和宽之比分别为  $\varepsilon_{\text{长}} = L_{\text{涡}}/L_{\text{堰}} = 1.3$ 、 $\varepsilon_{\text{宽}} = B_{\text{涡}}/B_{\text{s}} = 1.5$ 。结合钢围堰下游各断面水流流向与垂直桥梁轴线方向最大倾角折线(图 11)分析, 船舶通过钢

围堰下游区域时,越接近钢围堰尾部,水流流向偏角越大,船体受到旋涡的影响越强。船舶航行时对方向控制的难度增加,给船舶的操纵带来一定的难度。在预设船舶航线和航行工况时,应考虑水流流向变化较大的因素,选择合理的舵角与漂角,以符合该区域的通航条件。

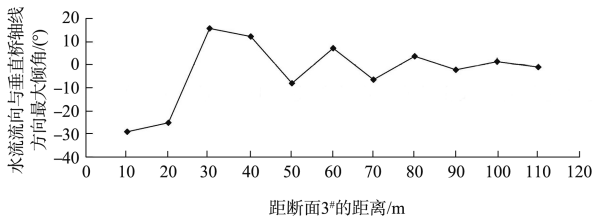


图 11 断面 3# 水流流向与垂直桥梁轴线方向最大倾角折线

## 5 结语

1) 本算例采用 Fluent 有限元软件进行计算,网格划分的精度达到试验要求,使用二阶迎风算法所得到的结果数据较为精确。

2) 在垂直桥梁轴线方向上,钢围堰设置区域流速总体上增幅明显,从钢围堰前端起沿水流方向  $0.4B_s \sim 3.3B_s$  处流速增量最为明显,距断面 3#  $0.3B_s \sim 0.7B_s$  处的流速增量在同一垂直桥梁轴线断面上呈现正负交替现象,船舶在经过该区域时应提前做好控制船速的措施。

3) 在桥梁轴线方向上, A 区域的断面水流流速激增,而且该区域船舶易受到轴向的推力,容易发生碰撞事故。C 区域流速变化较小,此钢围堰设置对桥区水流的影响宽度约为  $3.7B_s$ 。B 区域沿水深流速呈紊流状态,流速沿纵深减小的幅度明显。水流沿纵深速度变化较大,船舶底部易受到紊流切应力的影响,应在船舶底部做好防护。

4) 钢围堰下游形成的密集湍流场,形成了尺寸约为 1.3 倍钢围堰长、1.5 倍钢围堰宽的涡街,造成了下游各个断面流向偏幅较大的现象,船体受到旋涡干扰,给航向操纵造成影响,在设定航线和航行参数时,应提前考虑此因素,保证通航的安全。

5) 通过探讨大型钢围堰设置区域的水流特征,分析大型钢围堰施工时期对通航的影响,为类似工程的研究提供部分参考。

## 参考文献:

- [1] 池丽敏,魏月梅,冯佳佳,等.串联矩形桥墩对通航水流影响的二维数值模拟[J].水利信息化,2017(3):41-45.
- [2] 叶玉康,刘晓平,李安斌.串联双圆柱桥墩周围流场特性研究[J].人民珠江,2019,40(10):73-79,121.
- [3] 武玉涛,任华堂,夏建新.圆柱绕流研究进展及展望[J].水运工程,2017(2):19-26,56.
- [4] 胡旭跃,曹勇,沈小雄,等.复式圆端型桥墩附近船舶受力特性及通航安全区范围[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2016,13(2):70-75,101.
- [5] 范平易.桥区流场数值模拟及建桥对通航的影响研究[D].上海:上海交通大学,2010.
- [6] 王帆,黎小刚,赖亚平,等.重庆南纪门长江大桥主桥总体设计[J].桥梁建设,2019,49(1):89-94.
- [7] 赵振兴.水力学[M].北京:清华大学出版社,2010.
- [8] 高学平.高等流体力学[M].天津:天津大学出版社,2005.
- [9] 董守平.高等流体力学[M].北京:中国石油大学出版社,2006.
- [10] PRASANTH T K, MITTAL S. Flow—induced oscillation of two circular cylinders in tandem arrangement at low Re [J]. Journal of fluids and structures, 2009, 25(6): 1029-1048.
- [11] 刘景伟,郭海燕,赵婧,等.直径串联双圆柱体绕流的数值模拟[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2013,43(12):92-97.
- [12] 樊娟娟,唐友刚,张若瑜,等.高雷诺数下圆柱绕流与大振幅比受迫振动的数值模拟[J].水动力学研究与进展(A辑),2012,27(1):24-32.
- [13] 滕丽娟,张志伟,武燕蕾.湍流模型下双柱绕流升阻力系数数值模拟[J].河北工程大学学报(自然科学版),2009,26(2):51-54.
- [14] 楼小峰,曹丰产,林志兴.串联钝体绕流的数值计算[J].同济大学学报(自然科学版),2002,30(5):604-608.
- [15] 贾晓荷.单圆柱及双圆柱绕流的大涡模拟[D].上海:上海交通大学,2008.
- [16] 赵辉,张耀冰,陈江涛,等.非结构网格体心梯度求解方法的精度分析[J].空气动力学学报,2019,37(5):844-854.
- [17] 沈小雄,程永舟,胡旭跃,等.航道边线与桥墩之间安全距离的研究[J].水运工程,2004(11):85-87,16.
- [18] 刘晓平,苏冠华,黄琼,等.串联双桥墩紊流特性研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2016,13(2):76-80.

(本文编辑 武亚庆)