

杨焱铭, 王志国, 张才杰, 等. 弯道水流对桥墩下游水流流态的影响与改进[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(6): 1205-1213. YANG D M, WANG Z G, ZHANG C J, et al. The influence and improvement of curved water flow on the flow pattern downstream of bridge piers[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1205-1213. (in Chinese)

## 弯道水流对桥墩下游水流流态的影响与改进

杨焱铭<sup>1,2</sup>, 王志国<sup>1,2</sup>, 张才杰<sup>3</sup>, 李鑫垚<sup>1,2</sup>, 郑东<sup>1,2</sup>, 刘立龙<sup>1,2</sup>

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038; 3. 南水北调中线公司河北分公司邯郸管理处, 河北 邯郸 056006)

**摘要:** 在实际工程中, 经常将桥墩设置于弯道水流影响范围之内。当桥墩上游存在偏流现象时, 桥墩下游漩涡脱落产生的低流速区与偏流相互影响, 导致下游流速分布呈现极不均匀状态, 从而对下游边坡与相关建筑物构成危害。为改善弯道水流引起的桥墩下游水流流态紊乱, 基于 ANSYS Fluent 建立  $k-\omega$  SST 三维数值模拟与物理模型试验相结合的方法, 研究不同桥墩尾部形态对下游流速分布的影响, 并对下游偏流加剧的原因进行分析。结果表明: 当上游来流发生偏移, 偏流与桥墩尾部的低流速区之间相对流速差增大时, 将导致下游水流紊乱增强; 改进桥墩尾端形态可以改善下游流速分布状况, 桥墩尾端长度与稳流效果在本研究范围内呈正相关关系, 桥墩前端圆弧半径与稳流效果呈负相关关系。本研究成果可为弯道水流中桥墩修建等提供参考。

**关键词:** 桥墩; 弯道水流; 流速分布; 尾部流态; 分布影响; 数学模型

**中图分类号:** TV131 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0120

受地形、地质等各种边界条件限制, 桥墩可能会被设置于弯道水流影响范围内。此时, 当桥墩上游存在弯道水流时, 主流线与桥墩斜交会增加阻水影响且流线在桥墩间收缩、在桥墩下游扩散, 从而形成尾流漩涡区, 造成桥墩下游水流结构紊乱<sup>[1]</sup>。桥墩下游漩涡脱落产生的低流速区与偏流将会相互影响, 可能导致下游流速分布呈现极度不均匀状态, 进而引起水面波动与异常壅水等现象, 对涉河桥梁与下游边坡构成危害。

近年来在桥墩形式和流态方面的数值模拟应用愈加广泛。秦杭晓等<sup>[2]</sup>基于 MIKE 仿真软件建立南水北调中线某渡槽模型, 发现在上游弯道影响下渡槽两侧流量差较大, 且随转弯圆心角增大不断增大。高学平等<sup>[3]</sup>通过 RSM 湍流模型, 针对输水隧洞弯道下游出口偏流现象, 研究了弯道转弯半径对弯道水流的影响范围并提出了建筑物距弯道适宜距离。曹玉芬等<sup>[4]</sup>利用多普勒流速仪对弯道水流进行研究, 发现了弯道水流中横纵向流速变化的趋势。邱翔等<sup>[5]</sup>对近壁面圆柱绕流和壁湍流相互作用进行了研

究, 分析了不同雷诺数下的流态, 漩涡等因素的变化。张新娇<sup>[6]</sup>借助 ANSYS Fluent 软件对弯道河段中排水泵站进口流态进行仿真模拟, 发现通过延长分流墩可有效改善进口流态。刘二朋等<sup>[7]</sup>利用二维椭圆柱绕流模型, 发现当轴长比减小, 桥墩尾部绕流尾涡强度随之减小。ZHANG 等<sup>[8]</sup>利用三维直接数值模型, 研究了当桥墩间距与墩宽之比为 0.4 时, 桥墩尾流以及涡脱落行为在时间和空间上的变化。蹇宏<sup>[9]</sup>利用 ANSYS Fluent 软件进行数值模拟分析了圆形、圆端型、矩形以及尖端形状的桥墩周围流场, 探讨桥墩形状如何影响流场特性。杨小帆等<sup>[10]</sup>基于  $k-\omega(k-\omega)$  SST (shear stress transport) 方程对泵站侧向进水前池进行研究, 发现针对旋涡产生的位置布置导流墩可有效消除旋涡, 改善下游流态。魏松等<sup>[11]</sup>通过物理模型研究, 发现了对比方形墩, 圆端形与三角端形桥墩均有效减小了下游冲刷深度。马剑波等<sup>[12]</sup>借助 MIKE 21 构建圆形、方形、圆端形桥墩分析其对流态影响, 发现圆端形桥墩对墩后流速紊乱影响最小。刘明潇等<sup>[13]</sup>通过物理模型

收稿日期: 2024-04-16 修回日期: 2024-08-08 网络出版时间: 2024-08-19

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240819.0858.002>

基金项目: 水利部泥沙科学与北方河流治理重点实验室开放研究基金项目(IWHR-SEDI-202102)

作者简介: 杨焱铭(1994—), 男, 山东临沂人, 主要从事水力学及流体力学研究。E-mail: [yy\\_dd2008@163.com](mailto:yy_dd2008@163.com)

通信作者: 王志国(1977—), 男, 河北邢台人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事河道治理及生态河道、水工及河工模拟研究。E-mail: [wz1978wc@163.com](mailto:wz1978wc@163.com)

试验发现改变导流墩体型填补尾涡区可有效改善下游流态。胡靖宇等<sup>[14]</sup>选取南水北调中线 5 座典型桥梁作为试验对象,发现对桥墩加装鱼尾形导流罩可有效降低水面波动,改善流态。Aufar 等<sup>[15]</sup>借助 FLOW-3D 对圆端形矩形桥墩进行数值模拟,分析了该类型桥墩附近河道中轴线沿程流速变化。王才欢等<sup>[16]</sup>通过水力学物理模型试验,探究输水渠道在大流量下,钝体上下游出现超常波动的成因,在重现原型渡槽超常大波动现象后,分析了卡门涡街对渡槽复杂流态的影响。刘洋等<sup>[17]</sup>采用粒子图像测速技术(PIV)对方形桥墩的紊流特性和尾涡区域的尺度进行了研究,通过分析得到了方形桥墩紊流宽度、墩后尾涡区的时均体积,以及墩后尾涡区的时均面积与相对水深和弗劳德数之间的函数关系式。黄靖轩等<sup>[18]</sup>使用声学多普勒流速仪(acoustic doppler velocimeter, ADV)采集弯道试验段内的纵向和横向流速并进行分析,得到了桥墩流速分布均匀程度与弗劳德数之间的关系。

综合上述众多学者开展的墩体绕流与体型优化研究进展情况,可见前人虽然对不同形态的墩体对流态的影响进行了研究,但对圆端型矩形桥墩尾部形态优化对弯道水流墩后流态改善情况的研究尚不多见。本文以某人工渠道中涉河桥梁上下游为研究对象,采用 ANSYS Fluent 软件作为数值模拟工具<sup>[19]</sup>,通过三维数值模拟与物理模型相结合的方法,研究偏流条件下桥墩尾端流线和尾部圆弧半径对下游轴向流速分布均匀度的影响规律,对提高下游流速分布均匀化程度提出优化方案并进行探讨。

## 1 研究区域概况

研究区域位于邯郸市某渠道内一穿渠铁路桥上下游一定范围内,该铁路桥上游 348 m 处有一弯道转弯半径 500 m,桥梁中心线与弯道上游渠道中心线夹角为 66.7°。桥墩布设为双桥墩布设型式,桥梁上下游均为渐变段与梯形干渠连接。如图 1 所示,当该渠段通过流量达到 260 m<sup>3</sup>/s 时,现场观测渠道两岸流速出现分布不均匀继而引起水面异常波动的现象,其最大波动可达 0.6 m,占总水深的 10%,下游流速的不均匀分布对渠道边坡稳定产生了不利影响。

## 2 数值仿真模型

### 2.1 数学模型建立

$k-\omega$  SST 计算方法是计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)领域中一种混合型的湍流模型,

它结合了标准的  $k-\varepsilon$  模型和  $k-\omega$  模型的特点,主要目的是改善标准  $k-\omega$  模型在自由流体流动中的表现,同时保持其在近壁区的优势,对于桥墩绕流模拟有较高的精准度。



图 1 铁路桥水面波动

Fig. 1 The water surface of the railway bridge fluctuates

本次数值仿真采用  $k-\omega$  SST 湍流模型,该模型考虑了湍流切应力的运输,既可以应用在低雷诺系数的湍流模型,没有额外复杂的黏性衰减函数,又可应用在边界层以外的区域,使得 SST  $k-\omega$  模型在本次模拟中有更高的可信度和精度<sup>[20]</sup>。渠道自由液面模拟采用多相流模型(volume of fluid, VOF),VOF 的基本原理是由定义的一个  $f$  值来表示自由面上流体的体积变化, $f$  的值为网格单元上流体体积通量的变化、网格本身体积二者之比。其方程表达式为

$$f(x, y, t) = \begin{cases} 1 & (x, y) \in \Omega^1 \\ 2 & (x, y) \in \Omega^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f$  的值是随流场变化的,在有流体域的网格内取值为 1,在无流体点上取值为 0。在不考虑剧烈相间的前提下对于不可压缩流体,结合连续性介质的特点, $f$  的值是不随质点的运动而改变的,因此其倒数满足:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mu \frac{\partial f}{\partial x} + \nu \frac{\partial f}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

对  $f$  进行积分可得

$$F(i, j) = \frac{1}{\Delta s_{i,j}} \iint_{\Delta s_{i,j}} f(x, y, t) dx dy \quad (3)$$

则 VOF 模型的方程表达式如式(4)所示,它主要表征了在计算流体网格中流体所占网格单元的体积比例。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mu \frac{\partial F}{\partial x} + \nu \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

式中: $x$ 、 $y$  为坐标分量; $\mu$ 、 $\nu$  为速度分量; $t$  为时间; $F$  为体积分数。

模型计算范围为弯道上游 250 m 到铁路桥出口渐变段下游 650 m 之间,模型进口流量为 260 m<sup>3</sup>/s,计算水深 6.35 m,采用 Space Claim 建立该渠段与桥墩部分的几何模型,模型严格按照原型比降分段建立,进出口渐变段比降分别为 1/698、1/833.3,铁路

桥段比降为 0,其余部分均为 1/25 000。通过网格划分软件 ICEM 对整体计算区域进行结构网格划分,桥墩边界层处进行网格加密处理,网格总数量为

270 万左右,数值模拟后处理采用 CFD post 软件读取计算结果中的流速、水深、过流面积等参数。模型计算区域及局部网格剖分见图 2。

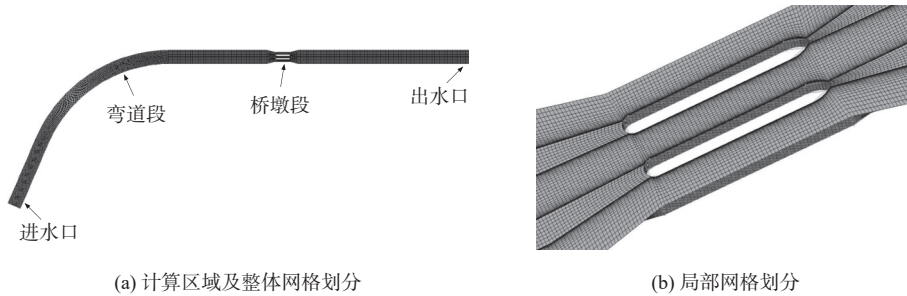


图 2 计算区域及网格

Fig. 2 Calculation area and grid

### 2.2 数值方法和边界条件

对控制方程求解采用有限体积法对计算区域进行离散化处理,采用 SIMPLE 算法进行求解计算<sup>[21]</sup>。进口分别为水进口与空气进口,均为速度进口;出口分别为水出口与空气出口,均为压力出口;采用 VOF 法对自由液面进行捕捉;边壁采用壁面函数法进行处理。

### 2.3 数值模拟结果验证

对原型桥墩采用物理模型试验成果对数值模拟结果进行验证。根据试验段范围和实验室内场地的情况,物理模型的几何比尺选择 1 : 50。模型设计按重力相似进行设计。

如图 3 所示,在桥墩进口渐变段上游 5 m 处断

面中心点与左右坡脚布置  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  共 3 个监测点,在桥墩出口渐变段下游 5 m 中心点布置  $C_4$  监测点,使用旋浆测速仪测量轴向流速。图 4 分别为  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  各点流速  $v$  随水深  $h$  分布模型试验和数值模拟对比结果,表 1 为各测点模型试验与数值模拟平均流速对比与误差,各点平均流速差值均不到 1%。

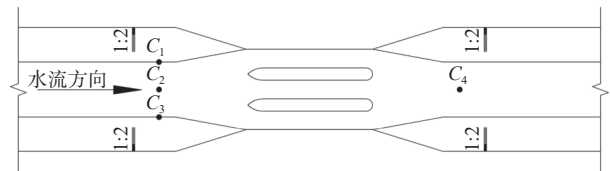


图 3 流速监测点示意

Fig. 3 Schematic of flow monitoring points

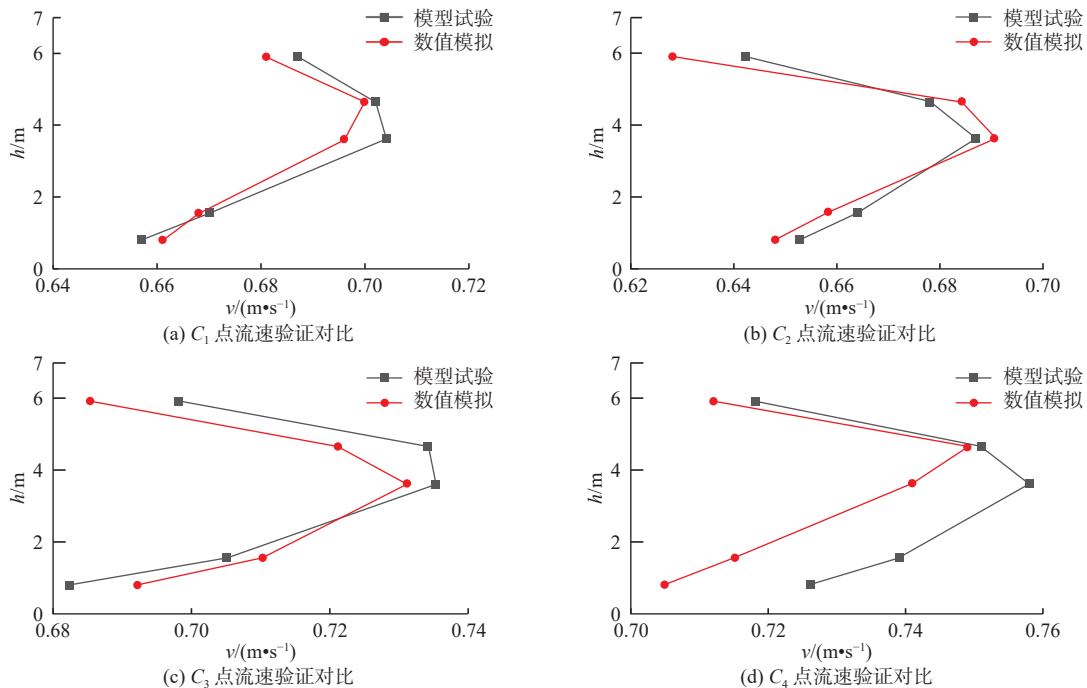


图 4 垂线流速分布

Fig. 4 Vertical flow velocity distribution



表 1 各测点平均流速对比

Tab. 1 Comparison of the average flow velocity of each measurement point 单位: m/s

测点	试验值	计算值	差值
C <sub>1</sub>	0.684	0.681	0.003
C <sub>2</sub>	0.665	0.662	0.003
C <sub>3</sub>	0.711	0.708	0.003
C <sub>4</sub>	0.738	0.724	0.014

图 5 为中轴线沿程水面线物理模型试验结果与数值计算结果对比,可以看出数值模拟结果与物理模型试验水面线趋势基本一致,且水深差值最大不超过 2%,表明本文采用的数值模拟方法是可行的。

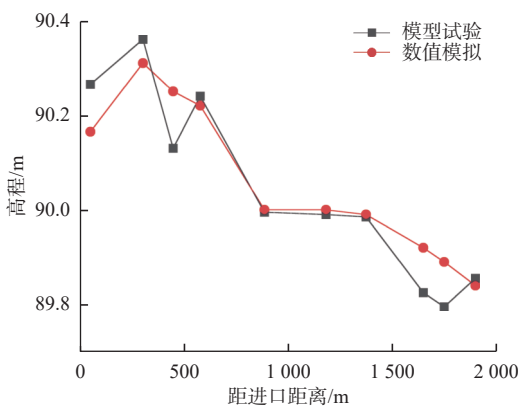


图 5 模型试验与数值模拟水面线对比

Fig. 5 Comparison of model test and numerical simulation of water surface line

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 评价指标

为了评价各断面流速分布均匀化程度,采用轴速度均匀度表示出口断面的轴向速度分布的均匀化程度。前人提出的流速分布均匀度公式多用于矩形断面且水面波动较小,断面可均匀切分;对于非矩形断面或水面波动较大的水面,仅对断面均匀切分会导致切分后各单元断面过流面积有一定误差,为增加计算结果准确性,在前人流速分布均匀度公式基础上,加入各单元断面面积加权,该公式可适用于非规则断面或水面波动较大情况下的流速分布均匀度。设均匀度参数为  $C_{au}$ ,  $C_{au}$  越接近 100%,表明过水断面水流轴向流速分布越均匀,  $C_{au}$  计算公式为

$$C_{au} = \left[ 1 - \frac{1}{\bar{v}_a} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_{ai} - \bar{v}_a)^2 A_i}{A}} \right] \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $\bar{v}_a$  为各断面平均轴向速度, m/s;  $v_{ai}$  为第  $i$  个单元断面的轴向速度, m/s;  $A$  为断面总面积;  $A_i$  为第  $i$  个单元断面面积;  $C_{au}$  为轴向速度分布均匀度。

#### 3.2 计算工况

因现场流量达到 260 m<sup>3</sup>/s 时桥墩附近出现流态紊乱现象,为了改善该流量条件下弯道水流桥墩下游流态,采用单因素变量法对桥墩尾部体型和尾部反弧半径进行优化,仿真试验进口流量 260 m<sup>3</sup>/s,共设计 13 种计算工况,优化方案对比见图 6。保持桥墩尾部末端圆弧半径  $r=0.04B$  不变,改变桥墩尾部长度  $L=1.7B \sim 2.9B$ ,变化间隔  $0.2B$ ,共 7 个工况,用于研究  $L$  的变化对桥墩流态的影响;保持  $L=2.3B$  不变,改变桥墩尾部末端圆弧半径  $r=0 \sim 0.1B$ ,变化间隔  $0.02B$ ,共 6 组工况,用于研究  $r$  的变化对桥墩流态的影响<sup>[22]</sup>。详细计算工况见表 2。

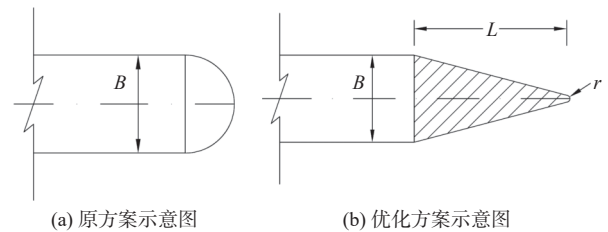


图 6 优化方案与原方案对比

Fig. 6 Comparison between the optimized solution and the original solution

表 2 试验方案汇总

Tab. 2 Summary of the pilot programme

方案	$L$	$r$
1	1.7B	0.04B
2	1.9B	0.04B
3	2.1B	0.04B
4	2.3B	0.04B
5	2.5B	0.04B
6	2.7B	0.04B
7	2.9B	0.04B
8	2.3B	0.10B
9	2.3B	0.08B
10	2.3B	0.06B
11	2.3B	0.04B
12	2.3B	0.02B
13	2.3B	0

#### 3.3 桥墩上游来流分析

图 7 为原方案桥墩上游沿程截面流速云图,可以看出:受上游弯道影响,上游来流已存在一定偏

流现象;随着水流接近桥墩,在流水与桥墩阻水互相影响下,桥墩进口处流量分布不均,流速分布均匀度仅为 73%。

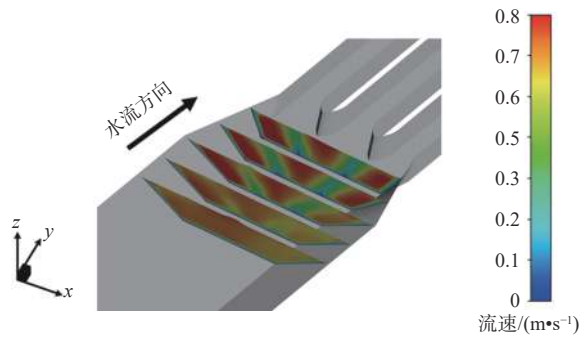


图 7 上游流速沿程分布云图  
Fig. 7 Upstream velocity distribution along the way

### 3.4 桥墩尾部长度的下游流速分布影响

设渐变段与下游直线段交界断面为原点,顺水流方向为正方向,设测量断面距原点距离为  $l_i$ , 设  $l_i$  与桥墩宽度  $B$  的比值为  $S_i=l_i/B$ 。式中:  $i$  为断面编号, 选取  $S_1=-2$ 、 $S_2=0$ 、 $S_3=4$ 、 $S_4=8$ 、 $S_5=12$  断面作为特征断面见图 8。

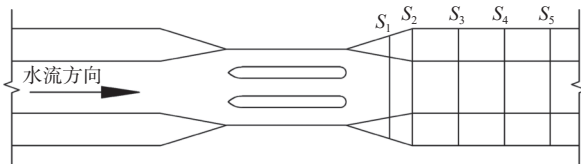


图 8 特征断面示意图  
Fig. 8 Schematic diagram of the feature section

图 9 为桥墩尾端圆弧半径  $r=0.04B$  时桥墩尾部不同长度对下游流速分布的影响,优化后的各方案

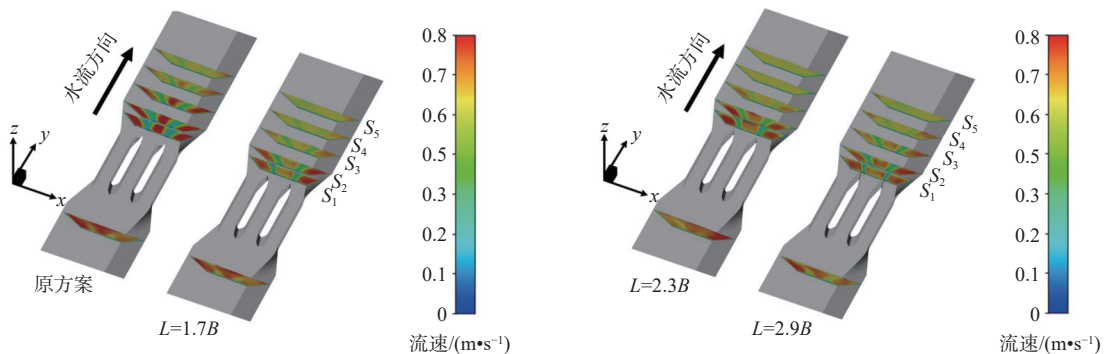


图 10 下游轴向流速分布云图  
Fig. 10 Downstream axial flow velocity distribution cloud

### 3.5 桥墩尾端圆弧半径对下游流速分布影响

图 11 为桥墩尾部长  $L=2.3B$  时桥墩尾端不同圆弧半径对下游轴向流速分布均匀度的影响。随着墩尾段圆弧半径的减小,下游各断面轴向流速分布均匀度呈上升趋势,流速分布逐渐均匀。当  $0.1B \geq$

案流速分布均有一定程度改善:当  $L$  增至  $2.1B \sim 2.5B$  时,轴向流速分布均匀度改善效果最好;当  $L$  大于  $2.5B$  时,轴向流速分布均匀度略微有下降趋势。

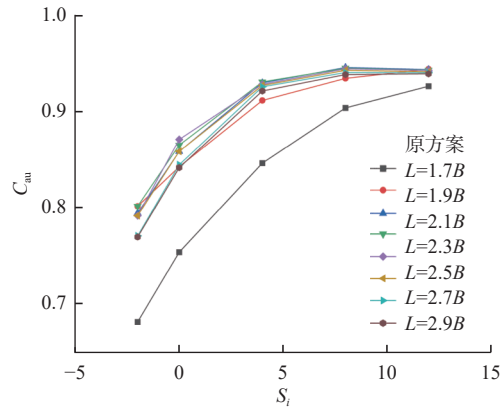


图 9 各断面轴向流速分布均匀度与桥墩尾部长度的关系  
Fig. 9 Relationship between the uniformity of axial velocity uniformity at each section and the length of the backflow surface

为更直观观测不同方案下游流速分布,绘制不同尾部长度各特征断面轴向流速云图,见图 10。对各方案模拟数据进行处理,根据本文提出的流速均匀化评价指标计算方法,计算得到各方案流速分布均匀化系数(表 3)。原方案下游  $S_1$  断面轴向流速分布均匀度仅为 68%,直至  $S_5$  断面轴向流速分布均匀度提升至 93%;而优化后的方案均较原方案有不同程度的流态改善效果,其中  $L=1.7B$  和  $L=2.3B$  时改善效果最佳,在  $S_1$  断面的轴向流速分布均匀度分别提升至 80% 和 81%,至  $S_5$  断面提升至 91% 和 93%,较原方案有明显改善。

表 3 各断面轴向流速分布均匀度

方案	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$
原型	68	75	84	90	92
$L=1.7B$	80	84	91	93	94
$L=1.9B$	79	85	92	94	94
$L=2.1B$	80	86	93	94	94
$L=2.3B$	79	87	92	94	94
$L=2.5B$	79	85	92	94	94
$L=2.7B$	77	84	92	94	94
$L=2.9B$	76	84	92	93	93

图 12 给出了方案 8 至方案 13 各特征断面轴向流速云图。由图 12 可以看出,由于受上游弯道影响,水流在行至桥墩前均已有偏流现象,断面流速分布不均匀;当  $r=0.1B$  时,至第 4 断面仍存在较为明显的流速分布不均匀现象;当  $r=0.08B\sim 0.04B$  时,流速分布均匀度逐步改善,直至  $r=0.04B$  时第 4 断面流速分布已明显均匀化;当  $r=0.02B\sim 0$  时,改善效果较  $r=0.04B$  时无明显变化,均为第 4 断面流速分布开始明显均匀化。对各方案模拟数据进行处理,根据本文提出的流速均匀化评价指标计算方法,计算得到各方案流速分布均匀化系数(表 4),可见:  $r=0.1B$  时下游  $S_1$  断面轴向流速分布均匀度仅为 72.51%,直

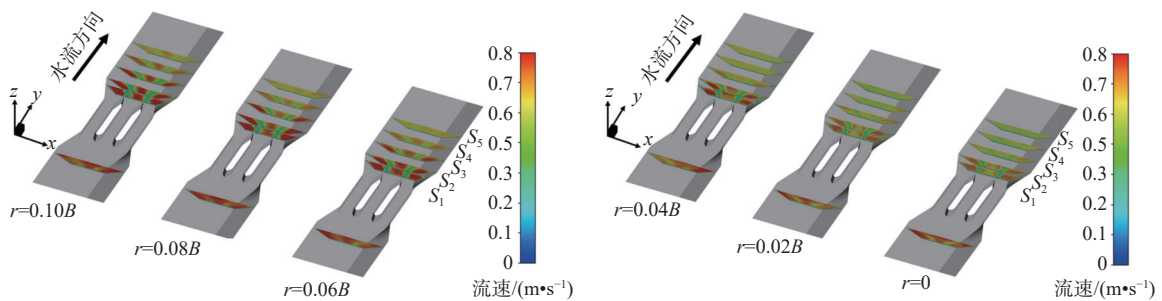


图 12 下游轴向流速分布云图  
Fig. 12 Downstream axial velocity uniformity cloud

表 4 各断面轴向流速分布均匀度

半径	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$
$r=0.10B$	72.51	78.59	86.88	90.48	92.92
$r=0.08B$	74.50	80.71	88.65	92.22	93.95
$r=0.06B$	78.65	85.73	92.65	93.74	94.04
$r=0.04B$	80.57	87.72	93.28	94.24	94.05
$r=0.02B$	80.83	87.93	93.55	94.36	94.10
$r=0$	80.95	87.81	93.33	94.28	94.16

由上述分析,原方案下游主流线产生较大偏移,受桥墩影响产生的墩尾低流速区与偏流产生的高流速区之间流速差进一步增大,由水流能量方程可知,当同一断面内同水深条件下流速差距较大时,

至  $S_5$  断面轴向流速分布均匀度提升至 92.92%;随着  $r$  减小,各断面流速分布均匀度均有所上升,  $r$  减小至  $0.04B$  时  $S_1$  断面的轴向流速分布均匀度提升至 80.57%,至  $S_3$  断面提升至 93.28%,较  $r=0.1B$  时有较为明显的改善;进一步减小至  $r=0$  时,  $S_1$  断面的轴向流速分布均匀度为 80.95%,至  $S_3$  断面提升至 93.33%,较  $r=0.04B$  时无明显变化。这说明在合理范围内桥墩尾部圆弧半径对下游流速分布影响较小,具体实施时应以结构需求作为优先考虑因素。

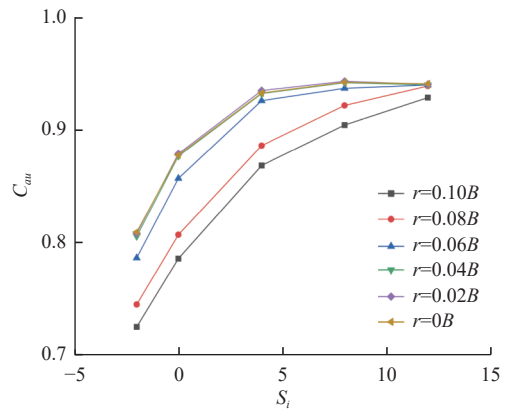


图 11 各断面轴向流速分布均匀度与桥墩尾部顶端半径的关系

Fig. 11 Relationship between the uniformity of axial velocity uniformity and the diameter of the top of the backflow surface for each cross-section

两处会产生一定的压强差,进而产生横向流,导致偏流现象加剧。能量方程如下:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (6)$$

式中:  $z$  为水头,  $m$ ;  $P$  为压强,  $kg/(m \cdot s^2)$ ;  $v$  为流速,  $m/s$ ;  $\rho$  为流体密度,  $kg/m^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ 。

桥墩尾部长度增加在一定范围内会改善下游流速分布情况,但超出范围轴向流速分布均匀度反而呈负相关;尾部顶端半径减小会持续改善下游流速分布情况,但  $r < 0.04B$  时改善效果提升很小,实际工程中尾部顶端过小会导致顶端抗扰动能力差,影响工程使用寿命。综合考虑工程桥墩布设实际情况,



桥墩尾部长度不大于  $2.3B$ , 尾端圆弧半径以结构需要设计为宜。

### 3.6 桥墩尾部对尾流漩涡脱落的影响

桥墩布设后尾流流态复杂, 水流出现与边界层分离与“卡门涡街”现象, 尾流区回流紊乱。水流在桥墩周围产生的边界层在桥墩墩头开始变厚, 并随着流动性继续沿着桥墩表面移动, 从而造成回流区流态紊乱。流体在桥墩表面流过时, 某些黏滞性流体层会因摩擦而减慢速度并形成边界层; 在墩尾某一点, 当流速足够缓慢时, 流体不能继续贴合表面, 这个点就被称为分离点。强烈回流区主要集中在下游 2~3 倍桥墩宽度范围内, 回流区内存在反向流速<sup>[24]</sup>。当桥墩尾部变长时, 流体在分离前会使桥墩表面的附着距离增加, 意味着流体有更长的路径和更多时间减速和转向。因为流体有更多空间逐渐减少速度, 所产生的漩涡会更加分散和扩散, 这使得从桥墩尾部脱落的漩涡不会像原方案情况下那么强烈和集中, 从而使桥墩下游因漩涡引起的回流区问题得到了较好的解决。

同时, 湍动能也是衡量流态紊乱程度的重要参考因素, 因为尾流区湍动能的大小主要与大尺度漩涡脱落有关, 图 13 为原型与  $L=2.3B$ 、 $r=0.04B$  工况尾部湍动能对比, 由图可知湍动能主要集中在桥墩下游一定范围内, 最大值处可以代表平均漩涡脱落的位置<sup>[25]</sup>。涡量随漩涡向下游移动逐渐耗散, 在距桥墩较远处湍动能已接近于 0, 此时漩涡脱落所产生的影响很小。桥墩体型优化后, 最大平均湍动能位置从  $S_f=-4.5$  断面延后到  $S_f=-3.5$  断面, 此时漩涡脱落位置较原方案向下游移动, 最大平均湍动能由  $0.11 \text{ m}^2/\text{s}^2$  降至  $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 尾流区湍动能显著减弱, 回流区回流流速明显减小, 低流速区轴向流速有所增加, 断面轴向流速差减小。

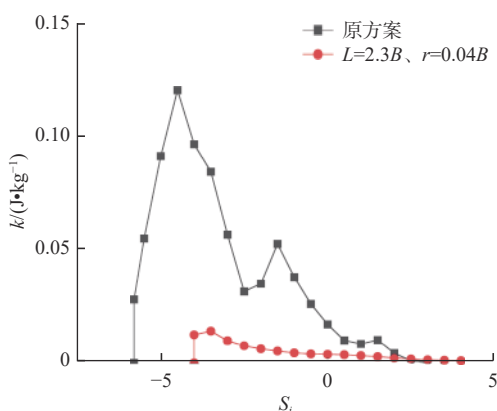


图 13 沿桥墩中心线的平均湍动能分布

Fig. 13 Mean turbulent kinetic energy distribution along the centerline of the bridge abutment

## 4 结论

采用数值模拟方法, 计算分析不同桥墩尾部长度与顶端半径情况下下游渠道流态的变化, 经过对比分析, 得出结论如下。

当上游来流发生偏移, 桥墩下游的偏流与桥墩产生的低流速区会引起更大的相对流速差, 产生横向压强差使桥墩下游流态更加紊乱。

根据数值模拟结果同时分析了桥墩后端动能变化, 结果表明延长桥墩尾部填补尾流区可使漩涡脱落断面延后, 进而降低整体平均最大湍动能降幅可达 80%, 从而对流态优化。

当其他条件不变时, 改进桥墩尾部的长度与稳流效果正相关, 顶端圆弧半径与稳流效果负相关。当长度与顶端半径达到某临界点之后, 稳流效果提升幅度明显减小。这表明, 通过合理布置桥墩尾部长度及顶端形式, 可以达到调整下游水流流态的目的。

### 参考文献:

- [1] 朱殿芳, 唐川, 李果, 等. 沱江花瓶墩跨河桥梁壅水影响一维数学模型计算 [J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(4): 36-39. DOI: 10.3969/j.issn.2096-5419.2023.04.009.
- [2] 秦杭晓, 赵文龙, 贺蔚, 等. 上游弯道圆心角对渡槽流动特性的影响研究 [J]. 水力发电, 2024, 50(7): 54-58. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2024.07.010.
- [3] 高学平, 刘帅, 刘殷竹, 等. 平面转弯有压输水隧洞对进/出水口水力特性影响研究 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2023, 56(5): 524-534.
- [4] 曹玉芬, 白玉川, 高术仙. 连续弯道水槽水流结构与床面形态试验研究 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2020, 53(12): 1226-1235.
- [5] 邱翔, 陈佳岩, 李家骅, 等. 雷诺数对近壁面圆柱绕流和壁湍流相互作用结构特性的影响 [J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2021, 36(1): 67-76. DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2021.01.010.
- [6] 张新娇. 基于数值模拟的某弯道河段泵站进水流态改善措施 [J]. 水利技术监督, 2023(11): 119-123. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1305.2023.11.032.
- [7] 刘二朋, 陈威, 林永水, 等. 不同雷诺数下二维椭圆柱绕流的数值模拟研究 [J]. 应用力学学报, 2021, 38(5): 2025-2031. DOI: 10.11776/cjam.38.05.A072.
- [8] ZHANG Z M, JI C N, XU D. Temporal and spatial

- evolution of vortex shedding for flow around a cylinder close to a wall[J]. *Ocean Engineering* 228 (2021): 108964. DOI:10.1016/J.OCEANENG.2021.108964.
- [9] 蹇宏. 桥墩形状对河道水流绕流特征的影响研究[J]. *公路*, 2022, 67(4): 184-189.
- [10] 杨小帆, 于永海, 刘东, 等. 基于 SST  $k-\omega$  湍流模型的泵站侧向进水流态改善研究[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(3): 1-4.
- [11] 魏松, 苏陈, 方睿智, 等. 考虑端部形状影响的矩形桥墩局部冲刷试验研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2024, 47(1): 69-76.
- [12] 马剑波, 毛思, 赵君, 等. 桥墩型式对河道流态的影响分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(增刊 1): 314-318. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.S1.051.
- [13] 刘明潇, 王泽众, 朱勇杰, 等. 大型输水隧洞出口扩散段非稳流态研究[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(12): 107-116.
- [14] 胡靖宇, 樊梦洒, 冀荣贤, 等. 大型输水渠跨渠桥梁墩柱导流罩及现场试验研究[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(6): 1194-1203. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0118.
- [15] AUFAR C P, OKI S, ISTIARTO, et al. Oblong bridge pier shape influence toward flow velocity characteristic and scour depth[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 794(1). DOI 10.1088/1755-1315/794/1/012058.
- [16] 王才欢, 王伟, 侯冬梅, 等. 大型输水渡槽水流超常波动成因分析与对策[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(2): 46-52. DOI: 10.11988/ckyyb.20200406.
- [17] 刘洋, 徐毅, 王茂枚, 等. 方形桥墩紊动特性及尾涡区尺寸 PIV 试验[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(4): 55-60. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2022.04.010.
- [18] 黄靖轩, 陶涛, 孙小双, 等. 桥墩阻水比对弯道河流流速分布的影响[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(22): 9781-9789. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2022.22.042.
- [19] 翟英剑, 吴文勇, 王振华, 等. 基于 Ansys Fluent 的压力对灌水器流道单元水力特性及抗堵塞性能探究[J]. *节水灌溉*, 2022(5): 47-53. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2022.05.008.
- [20] 冯成栋, 顾明. 基于改进剪切应力输运  $k-\omega$  湍流模型对考虑风向随高度偏转大气边界层的数值模拟[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(6): 821-830. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.21280.
- [21] 张亚英, 吴乘胜, 王建春, 等. 基于神威超算平台的三维方柱绕流大规模并行数值计算与分析[J]. *船舶力学*, 2022, 26(9): 1255-1267. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2022.09.001.
- [22] 牟献友, 王丹, 冀鸿兰, 等. 环翼式防冲板对圆端形桥墩局部冲刷试验及水力特性[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(5): 146-155. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.05.023.
- [23] 武娟娟. 输水渠道桥梁墩柱绕流特性及减阻技术研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023. DOI: 10.27144/d.cnki.ghbsc.2022.000680.
- [24] 赵苗苗, 贾君德, 秦景洪, 等. 闸站结合泵站前池导流墩整流模拟[J]. *中国农村水利水电*, 2018(4): 125-130. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2018.04.027.
- [25] 梁健, 刘成文, 李兆敏. 带整流罩隔水管流场特性的大涡模拟研究[J]. *力学季刊*, 2020, 41(1): 197-205.

## The influence and improvement of curved water flow on the flow pattern downstream of bridge piers

YANG Daoming<sup>1,2</sup>, WANG Zhiguo<sup>1,2</sup>, ZHANG Caijie<sup>3</sup>, LI Xinyao<sup>1,2</sup>, ZHENG Dong<sup>1,2</sup>, LIU Lilong<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Hebei Key Laboratory of Smart Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

3. Handan Management Office of Hebei Branch of South-to-North Water Diversion Company, Handan 056006, China)

**Abstract:** In practical engineering, bridge piers are frequently located within the influence of bending water flow. When there is a deviation in the flow upstream of the bridge pier, the low-velocity area created by the shedding of vortices downstream of the bridge pier interacts with the deviation flow. This leads to a highly uneven distribution of flow velocity downstream, posing a hazard to the downstream slopes and related buildings.

To improve the disturbance of flow pattern downstream of the bridge pier caused by curve flow, a method of  $k-\omega$



SST 3D numerical simulation and physical model test were established based on ANSYS Fluent. The influence of different pier tail shapes on downstream velocity distribution was studied, and the causes of downstream deviation were analyzed. The findings indicated that when the incoming flow upstream shifted and the relative velocity difference between the shifted flow and the low-velocity area behind the pier increased, it led to an increase in turbulence in the downstream flow. Enhancing the design of the downstream end of the pier can improve the distribution of velocity downstream. The length of the tail end of the pier had a positive correlation with the steady flow effect, while the radius of the arc at the front end of the pier had a negative correlation with the steady flow effect in the scope of this study.

The research results can reference related projects such as bridge pier construction in curved water flow.

**Key words:** bridge pier; bend water flow; flow velocity distribution; tail flow state; distribution influence; mathematical model

.....

(上接第 1195 页)

speed of the filling valve is 7 min. When the operating head was greater than 5.99 m, the continuous opening time of the double-sided uniform speed of the filling valve is 9 min. In each operating water level combination, the continuous opening time of the double-sided uniform speed of the discharge valve is 7 min. When the upper lock head valve was continuously opened bilaterally for water filling for 6 to 9 min, the minimum instantaneous pressure at the top of the upper lock head water conveyance corridor was 2.57 mH<sub>2</sub>O. When the lower lock head valve was continuously opened bilaterally for water discharge for 6 to 9 min, the minimum instantaneous pressure at the top of the lower lock head water conveyance corridor was -0.26 mH<sub>2</sub>O. Under different water head conditions, the water level of the lock chamber rose and fell smoothly, the surface was calm, and there was no unfavorable flow pattern such as vortex and bubble vortex in the lock chamber, and as a whole flow pattern of the lock chamber was better. Under the recommended valve operation mode, the hydraulic characteristics of the lock, the pressure characteristics of the water conveyance corridor and bollard force for ships moored in lock chambers meet the specifications and design requirements.

**Key words:** North Ship Lock; water conveyance system; hydraulic characteristics; instantaneous pressure; model test