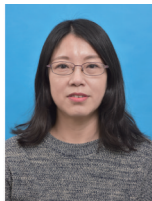


· 地基与基础 ·



不同间距比对桩基结构流场特性 影响的试验研究*

潘新颖^{1,2}, 戴雪冰¹, 王鼎诚¹, 宁 萌^{1,2}

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266000; 2. 山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266000)

摘要: 针对桩基结构中不同串列与并排间距比对流场特性的影响尚不明晰的问题, 采用粒子图像测速(PIV)技术, 在亚临界雷诺数条件下, 开展矩形布置九桩群结构流场的物理模型试验, 系统研究串列间距比(X^*)与并排间距比(Y^*)在 1.5、2.5、4.0 布置下的桩群流场特性变化规律。结果表明, 随着串列间距比的增加, 桩后附着涡逐渐展开并趋向卷起脱离; 而并排间距比的增加则显著降低桩群内部漩涡数量, 逐渐减弱排与排之间剪切层的相互作用。流动形态随串列间距比增大呈现由(R,R)型向(R,J)型再至(J,J)型的演化趋势, 且较小的并排间距延缓了剪切层卷起。近桩区均存在明显回流现象, 小间距比条件能有效抑制回流长度。此外, 小间距比能降低群桩结构内流场紊动强度, 抑制流体动量交换。

关键词: 群桩流场; PIV 试验; 间距比; 亚临界雷诺数

中图分类号: U656.113

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0202-10

Experiment on influence of different spacing ratios on flow field characteristics of pile foundation structures

PAN Xinying^{1,2}, DAI Xuebing¹, WANG Dingcheng¹, NING Meng^{1,2}

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266000, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, Qingdao 266000, China)

Abstract: Regarding the problem of the unclear influence of different tandem and side-by-side spacing ratios on the flow field characteristics in pile foundation structures, we use particle image velocimetry (PIV) technology to carry out a physical model test of the flow field of a nine-pile group structure arranged in a rectangle under subcritical Reynolds number conditions, and systematically study the variation laws of the flow field characteristics of the pile group under the arrangements of tandem spacing ratios (X^*) and side-by-side spacing ratios (Y^*) at 1.5, 2.5, and 4.0. The results show that with the increase of the tandem spacing ratio, the attached vortices behind the piles gradually expand and tend to roll up and detach; while the increase of the side-by-side spacing ratio significantly reduces the number of vortices inside the pile group, and gradually weakens the interaction of the shear layers between rows. The flow pattern shows an evolution trend from the (R, R) type to the (R, J) type and then to the (J, J) type with the increase of the tandem spacing ratio, and the smaller side-by-side spacing delays the roll-up of the shear layer. There is an obvious backflow phenomenon in the near-pile area, and the small spacing ratio condition can effectively suppress the backflow length. In addition, the small spacing ratio can reduce the turbulence intensity of the flow field in the pile group structure and inhibit the momentum exchange of the fluid.

Keywords: flow field around pile group; PIV experiment; spacing ratio; subcritical Reynolds number

收稿日期: 2025-03-03

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2602301)

作者简介: 潘新颖(1976—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事近海工程的教学与科研工作。

随着水运行业的发展和造船技术的提高, 船舶大型化是发展的必然趋势^[1], 这对港口的结构设计优化提出更高的需求。许多港口的构筑物是以单柱或柱群形式存在, 流体在绕桩柱流动时, 会改变原有的流场特性, 形成圆柱绕流。在圆柱绕流问题中, 流体绕流边界层的分离与脱落现象、剪切层的变动、尾迹区域内漩涡的形状和变化, 以及这三者之间的相互作用等因素, 使得对圆柱绕流机理的研究变得尤为复杂^[2]。Wang 等^[3]指出桩柱数量作为一个关键性参数可以决定柱群流态的复杂性, 与单柱相比, 群桩这种多柱结构由于柱与柱之间的相互干扰和耦合, 其流态特征要复杂得多, 并非单桩流场的简单叠加^[4]。

目前关于多柱体流场的研究多集中在双柱、三柱及四柱为主的柱群。Sumner^[5]对两圆柱绕流问题进行综述, 得出: 对于无限长圆柱, 影响参数包括两圆柱间的距离、圆柱方向与来流方向的相对位置、雷诺数等。Zdravkovich^[6]通过试验研究发现, 对于不同的 L/D (L 为柱体中心距, D 为柱体直径), 两柱间隙区和下游柱尾流区的速度分布变化明显, 即当 L/D 小于 3.5 时, 两柱间隙区流体的流速很小, 而下游柱尾流区的流速比上游柱大; 当 L/D 大于 3.5 时, 这两个区域的流速都比 L/D 小于 3.5 时大, 且上游柱后尾流区的流速分布在 L/D 为 3.5 的附近出现突变。关于三柱绕流的研究多针对于等间距串列、并排及三角形的布置形式。Hamed 等^[7]通过粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 试验对比不同桩间距比下的双柱流场, 其结果显示前桩的遮蔽效应使后桩回流区的尺寸减小; 前桩的存在改变了尾涡结构, 且对后桩周围的雷诺应力和紊动强度有影响, 且这种影响效果与桩间距有关。Harichandan 等^[8]研究低雷诺数下串、并排布置三圆柱的绕流, 分析得出: 当 L/D 为 2 时尾流很稳定, 且 3 个圆柱均没有漩涡脱落, 当 L/D 增大至 5 时, 则发现了明显的漩涡脱落。涂佳黄等^[9]对串列 3 个圆柱体的绕流进行数值模拟, 结果表明: 随着间距比的增大, 剪切层会出现再附着、卷起再附着和无再附

着 3 种形式, 尾涡第 1 次卷起位置也会逐渐向上游移动。此外, 柱体尾流区顺流向的时均速度分布由“U”形变为“V”形。

矩形布置的九桩模型可看作 3 组并排的串联三桩模型, 其平面流动形态受串列和并排间距的共同影响。马丽丽^[10]采用 PIV 技术对不同间距下九柱桩群的流态进行研究, 试验发现模型的流场特征受间距的影响比受雷诺数的影响更大, 小间距比 $L/D = 1.5$ 和 2.0 时流场呈现明显的屏蔽流态, 间距比 $L/D = 2.5$ 和 3.0 ($Re = 1500$) 时呈现较为复杂的过渡流态; 间距比 $L/D = 3.0$ ($Re = 2\,500 \sim 5\,000$) 时呈现较明显的漩涡脱落的流态。

总体来看, 桩群在较大间距比下, 尾流间的相互作用较小, 圆柱的绕流流场与单柱较为类似; 当间距较小时, 尾流存在明显的相互作用, 不同圆柱的尾流存在显著差异^[11]。目前针对实际工程中常见的群桩的研究较少。因此, 本文基于 PIV 技术对群桩的流场进行测量, 进一步分析不同间距比下群桩的流场特性。试验结果对码头结构的安全性具有重要意义。

1 试验布置

试验水槽长 45 m、宽 1 m、高 1.2 m、试验水深为 0.5 m。试验布置及仪器布设见图 1, 试验段设置长 2 m、宽 1 m 的三面特殊加工的钢化玻璃, 可三面安装激光发射装置, 并配有幕帘, 可形成区域暗室。

PIV 设备包括最大功率为 10 W 的连续激光器 (实际使用功率为 8.5 W 以保证光源均匀)、FASTCAM Mini WX50 CMOS 相机 (分辨率 2 048 px × 2 048 px) 以及 Photron FASTCAM Viewer 软件用于控制相机并采集粒子图像, 试验过程中选取的拍摄速度为 250 帧/s, 此数据的选择综合考虑经典的 1/4 定律 (相邻两帧图像中示踪粒子的位移需小于查询窗口边长的 1/4) 与流体的最大速度, 每个工况拍摄 10 s。示踪粒子为直径 50 μm 的聚苯乙烯粒子, 密度接近于水。

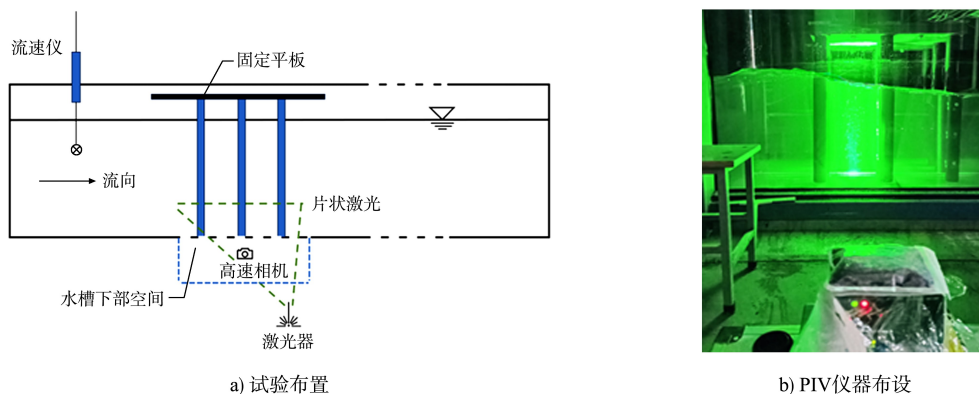


图1 试验布置及PIV仪器布设

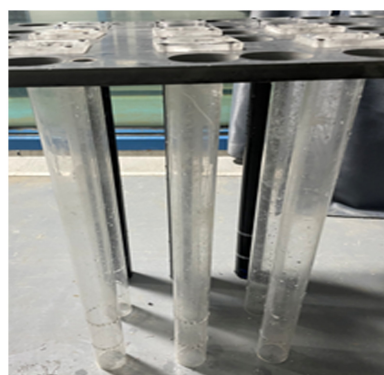
Fig. 1 Experiment layout and PIV equipment arrangement

2 工况设置

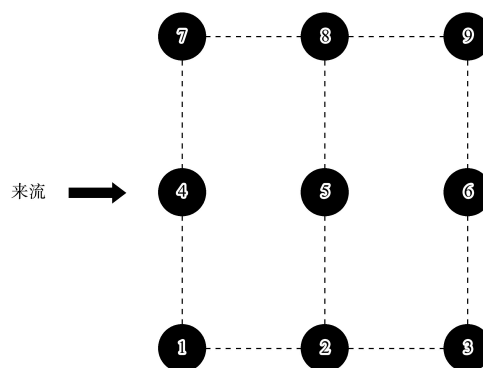
本文以宁波某码头群桩基础为原型建立模型, 见图2。试验模型比尺为1:36, 桩直径 $D=0.06$ m、高度 $H=0.8$ m。为有效观察桩群内部流体的流动特性, 所有桩均使用透明亚克力材料制成。试验桩模型与编号的设置如下: x 轴正向与水流流向一致, y 轴正方向沿水槽宽度方向由1号指向7号桩, z 轴正方向垂直于水槽底面向上; 其中1~3号及7~9号桩为边排桩, 4~6号桩为中排桩, 试验模型中轴线与水槽的中轴线重合。 X^* 和 Y^* 分别为 x 方向(串联)和 y 方向(并排)的无量纲间距比,

即桩心距离与桩柱直径之比, 试验取值分别为1.5、2.5和4.0, 共形成9种布置方案。

从时均流速图(未列出)发现底面对高于0.2 m水深平面的流场影响较小, 且考虑高速相机拍摄流场画面的清晰度, 故选择0.2 m水深平面的流场作为研究对象。根据原型水文数据, 实际流速为0.62 m/s, 根据Froude相似准则计算得到模型流速为0.103 m/s, 试验流速设定为0.1 m/s。水的动力黏度为 1.002×10^{-3} Pa·s, 密度为998.23 kg/m³, 计算相应的圆柱雷诺数为5 977.42, 属于亚临界雷诺数区间。



a) 桩模型



b) 桩模型编号

图2 桩模型及编号

Fig. 2 Pile model and number setting

3 流场特性分析

3.1 瞬时流速

$z=0.2$ m的 x - y 平面, 间距比组合(X^* , Y^*)分别为(1.5, 1.5)、(2.5, 1.5)、(4.0, 1.5)、(1.5, 4.0)、(2.5, 4.0)和(4.0, 2.5)时的瞬时流速云图

和流线叠加图见图3。由于激光照射区域有限且呈矩形布置的桩群沿横向对称, 为保证串联间距比较大时试验结果的精确性, 对串联间距比为4时的布置选择一半流场作为研究区域。

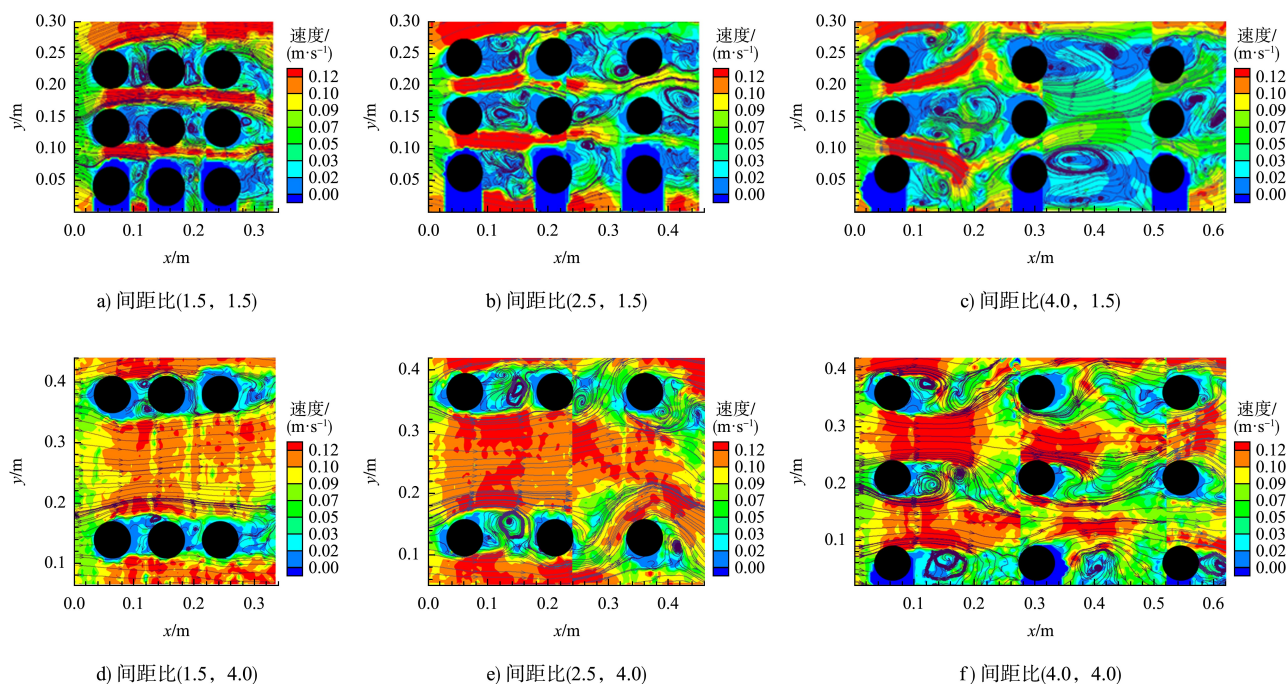


图 3 不同间距比下的瞬时流速云图及流线叠加

Fig. 3 Instantaneous flow velocity contour and streamline superposition under different spacing ratios

由图 3a)、b) 可知, 并排间距比为 1.5 的条件下, 串联间距比从 1.5 增至 2.5 时, 边排和中排桩后始终存在两个稳定的附着涡, 且随着串联间距比的增大, 这些桩后附着涡逐渐展开。当串联间距比进一步增加, 中游桩的剪切层开始在其下游桩前卷起。由图 3c) 可知, 当串联间距比增至 4.0 时, 中排的上游桩后形成两个较大的漩涡, 剪切层发生膨胀, 挤压了边排上游桩的剪切层, 使其向外偏斜, 进而阻止其在中游桩上的附着, 使中排与边排桩流场形态不同。

由图 3a)、d) 可知, 串联和并排的间距比都较小, 为 1.5 时, 桩群的桩间流速增大, 相邻两排柱体剪切层间的相互作用显著。随着并排间距比的增加, 这种剪切层间的相互作用逐渐减弱, 当并排间距比达到 4 时, 排与排之间的相互作用几乎消失, 流场形态趋于单排串联布置三桩模型的状态。

对比图 3b) 与 e) 可知, 在串联间距比为 2.5 时, 随着并排间距比的增大, 桩群内部的漩涡数量显

著降低, 且桩柱剪切层间的相互影响逐渐减少, 中游桩的剪切层也倾向于其下游桩前卷起。此外, 由图 3f) 可知, 当串联间距比为 4 且并排间距比增至 2.5 时, 桩群中各桩的剪切层均不再附着于其下游的柱体上。

3.2 瞬时涡量

在 $z=0.2\text{ m}$ 的 x - y 平面上间距比组合 (X^*, Y^*) 为 $(1.5, 1.5)$ 、 $(4.0, 1.5)$ 、 $(1.5, 4.0)$ 和 $(4.0, 4.0)$ 时的瞬时涡量云图见图 4。可以看出, 在较小的串联间距比下, 同排桩柱周围涡量的连续性较强, 而较小的并排间距使得排与排之间的涡流区域扩大, 群桩结构外侧也产生了许多细碎的小涡。随着串联间距比的增加, 同排桩柱周围涡量的连续性减弱, 各桩柱后形成了许多细碎的小涡, 尤其在中游与下游桩柱周围, 涡量的分布更加细碎。这表明当串联间距比较大时, 上游桩桩后尾流的湍动使得中、下游桩附近涡量的分布变得更为分散。

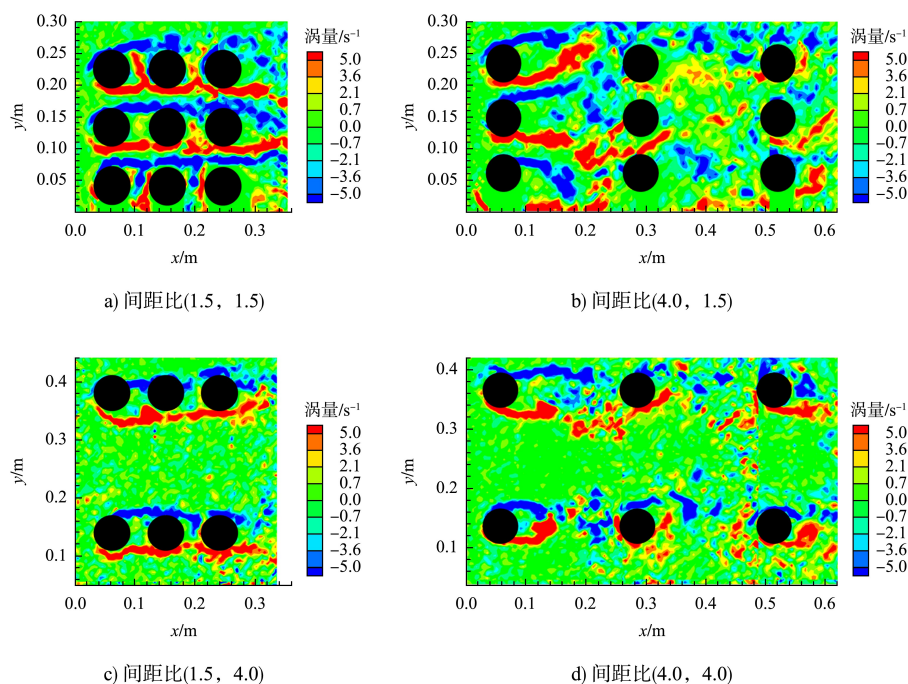


图4 不同间距比下的瞬时涡量云图

Fig. 4 Instantaneous vorticity contour under different spacing ratios

3.3 流动形态分类

Igarash 等^[12]将流态分为 3 种主要类型: W 型(前柱剪切层包裹在后柱上)、R 型(前柱剪切层附着在后柱前方或后方)以及 J 型(前柱剪切层在后柱前卷起并撞击在后柱上)。本文选取 $z=0.2$ m 高度的 x - y 平面,采用文献[12]的流动形态分类方法,结合图 3 对不同间距比下群桩流场的流动形态进行分类,整理的结果见表 1。

表 1 不同间距比下的流动形态分类
Tab. 1 Classification of flow patterns under different spacing ratios

Y^*	$X^*=1.5$	$X^*=2.5$	$X^*=4.0$
1.5(边排)	R,R	R,R	J,J
1.5(中排)	R,R	R,R	R,J
2.5(边排)	R,R	R,J	J,J
2.5(中排)	R,R	R,J	J,J
4.0(边排)	R,R	R,J	J,J
4.0(中排)	R,R	R,J	J,J

根据文献[12]可知,串列布置的三桩模型在雷诺数超过临界值且间距比 $X^* < 2.21$ 时,流动形态表现为(R,R)型;而当 $2.21 \leq X^* < 3.24$ 时,流态转变为(R,J)型; $X^* > 3.24$ 时,流态转变为

(J,J)型。本文试验结果在并排间距比 Y^* 为 4.0 时获得的流动形态结果与文献[12]的研究结果一致。

由图 3a)和 d)可知,当串列间距比为 1.5 时,并排间距比的改变不会影响流动形态,边排和中排桩的流动形态始终为(R,R)型,这与三桩模型保持一致;当串列间距比增至 2.5 时,三桩模型的流动形态转变为(R,J)型,而试验模型在并排间距比为 1.5 的条件下,边排和中排桩的流动形态仍维持(R,R)型,表明较小的并排间距会增加群桩结构内各柱体的剪切层长度;当串列间距比增至 4.0 时,三桩模型的流动形态转变为(J,J)型,而试验模型在并排间距比为 1.5 的条件下,中排桩的流动形态表现为(R,J)型,边排桩的流动形态为(J,J)型,这个结果进一步说明,在较小的并排间距下,中排桩剪切层长度的增加更为显著。但总体来看,随着串列间距比的增大,桩群的流动形态从(R,R)型过渡到(R,J)型,最终变为(J,J)型,显现出与三桩模型相似的变化趋势。

3.4 时均流速分布

为比较不同间距比条件下,各桩桩后尾流区

在不同位置处的流速分布特征, 本文提取各桩桩后距前桩心 $0.58D$ (近桩) 和 $X^*D/2$ (中线) 位置在 $z=0.2\text{ m}$ 的 x - y 平面处的流速数据, 见图 5。

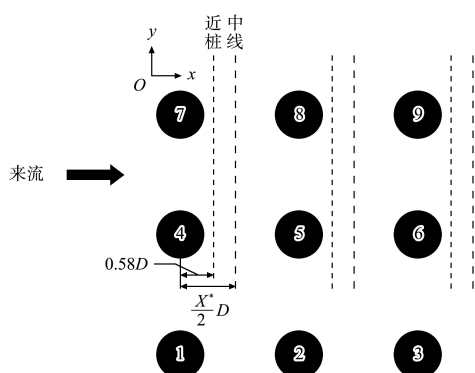


图 5 特征位置选取

Fig. 5 Feature location selection

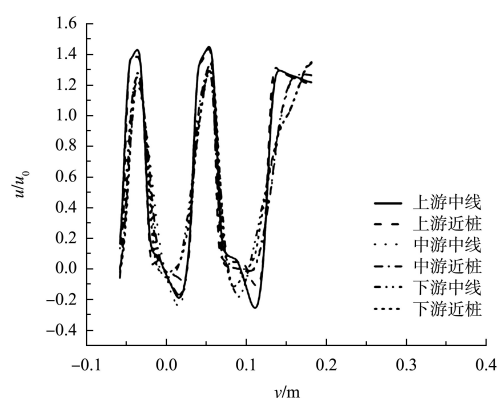
特征位置处沿 x 正方向的无量纲流速 u/u_0 (u_0 为来流速度, u 为沿 x 方向的时均速度) 分布见图 6。可以看出, 受桩后尾涡的影响, 近桩位置处的流速分布不稳定, 呈现出双极值的特点, 且最大值出现在上游中排与边排桩之间的桩间区域。当并排间距比为 1.5 时, 各布置桩间区域的流速最大, 无量纲速度值可达 1.5; 随着并排间距比的增大, 桩间区域的流速逐渐减小, 剪切层的宽度逐渐增加, 而串列间距比的改变对流速最大值的影响相对较小。

当并排间距比为 1.5 时, 近桩与中线位置的流速分布差异不大, 呈“W”形态; 当并排间距比增加至 2.5 时, 桩间区域的流速略有减小, 且上游近桩及中线位置在桩间区域的流速分布形成一个平台区间, 流速分布变为双“U”形态, 此时中游和下游桩的流速分布虽无明显的平台区间, 但峰值区域也变得更为平缓; 当并排间距比增至 4.0 时, 各布置在近桩及中线位置的流速分布皆形成平台区间。

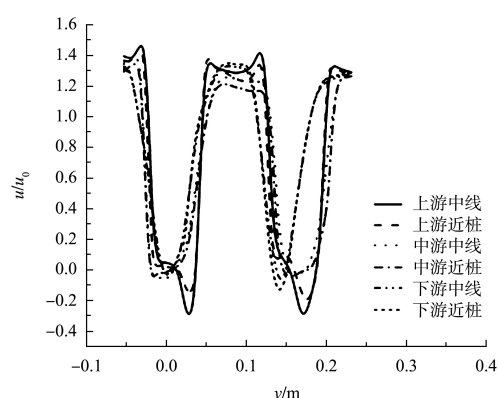
各桩桩后在近桩位置处皆有回流现象出现, 其中上游桩的回流速度略大于中游和下游桩, 且随着串列间距比的增大而增强。这是因为当桩间距较小时, 上游桩桩后区域的流体趋于静止, 随

着间距比的增大, 从上游桩脱落的尾涡得以充分发展, 导致回流增强。在串列间距比为 1.5 的情况下, 各桩后中线位置均存在回流现象, 且上游桩的回流速度比中游和下游桩大。当串列间距比增大至 2.5、并排间距比为 1.5 时, 边排下游桩中线位置的回流现象消失; 当并排间距比增至 2.5 和 4.0 时, 各中游及下游桩中线位置处的回流现象也消失, 这表明较小的并排间距比能有效抑制中游和下游桩回流区域的长度。

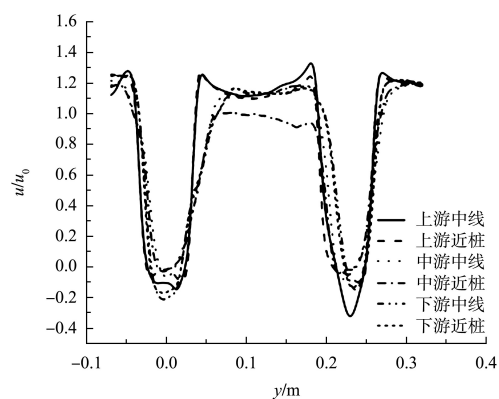
当串列间距比增至 4.0 时, 上游桩受中游及下游桩的影响较小, 绕流形态类似于并排布置三桩模型的状态; 受上游桩尾流的影响, 中游和下游桩的流速分布也呈现出与其他位置不同的特点, 且因较小的并排间距会增大剪切层的长度, 中线位置仅在并排间距比为 1.5 时有回流出现。当并排间距比增至 2.5 和 4.0 时, 各中线位置则不存在回流。



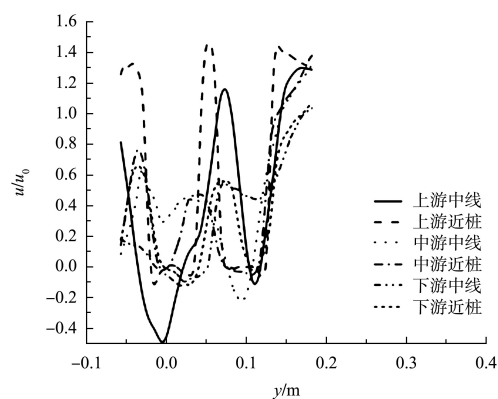
a) 间距比(1.5, 1.5)



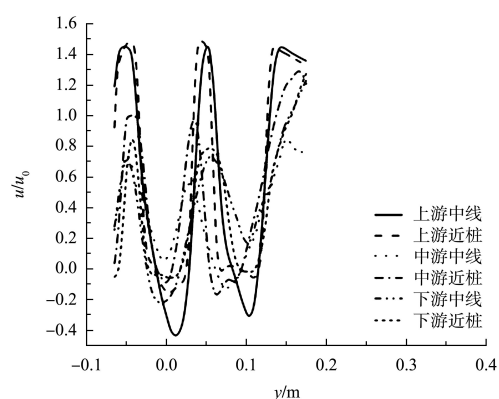
b) 间距比(1.5, 2.5)



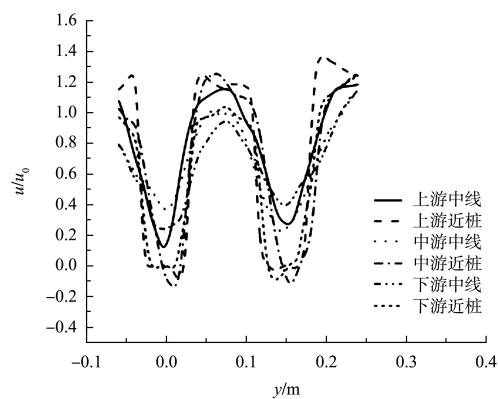
c) 间距比(1.5, 4.0)



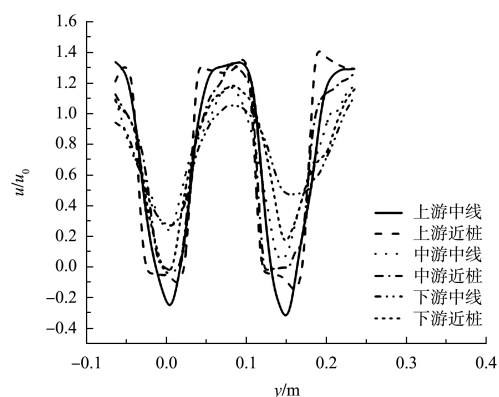
g) 间距比(4.0, 1.5)



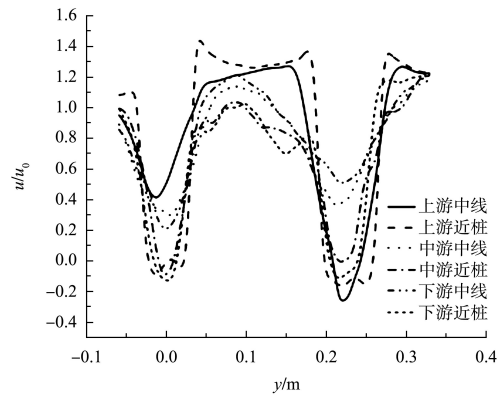
d) 间距比(2.5, 1.5)



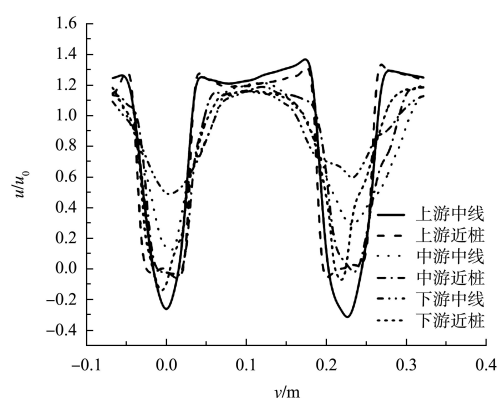
h) 间距比(4.0, 2.5)



e) 间距比(2.5, 2.5)



i) 间距比(4.0, 4.0)



f) 间距比(2.5, 4.0)

图 6 不同间距比下特征位置处的流速分布

Fig. 6 Velocity distribution at feature locations under different spacing ratios

3.5 紊动强度和雷诺应力

紊动强度,也称脉动速度,是瞬时流速与时均流速差的均方根,反映了水流脉动所带的能量,可通过以下公式计算:

$$u_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{(u_t - \bar{u})^2}} \quad (1)$$

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{(v_t - \bar{v})^2}} \quad (2)$$

式中: u_{rms} 、 v_{rms} 分别为 x 、 y 向紊动强度; u_t 、 v_t 分别为 x 、 y 向瞬时流速; $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 分别为 x 、 y 向的时均流速。

在 $z=0.2 \text{ m}$ 的 x - y 平面上间距比组合(X^* , Y^*) 为(1.5, 1.5)、(4.0, 1.5)、(1.5, 4.0)和(4.0, 4.0)时的脉动速云图见图 7。可以看出, x 向紊动强度

(u_{rms})较大的区域基本位于边界层, 而 y 向紊动强度(v_{rms})较大的区域则位于中下游桩的桩前区域。随着间距比的增大, 径向紊动强度和切向紊动强度分布区域和强度都有所增大, 表明较小的串列间距或并排间距都会减小群桩结构内流场的紊动强度。

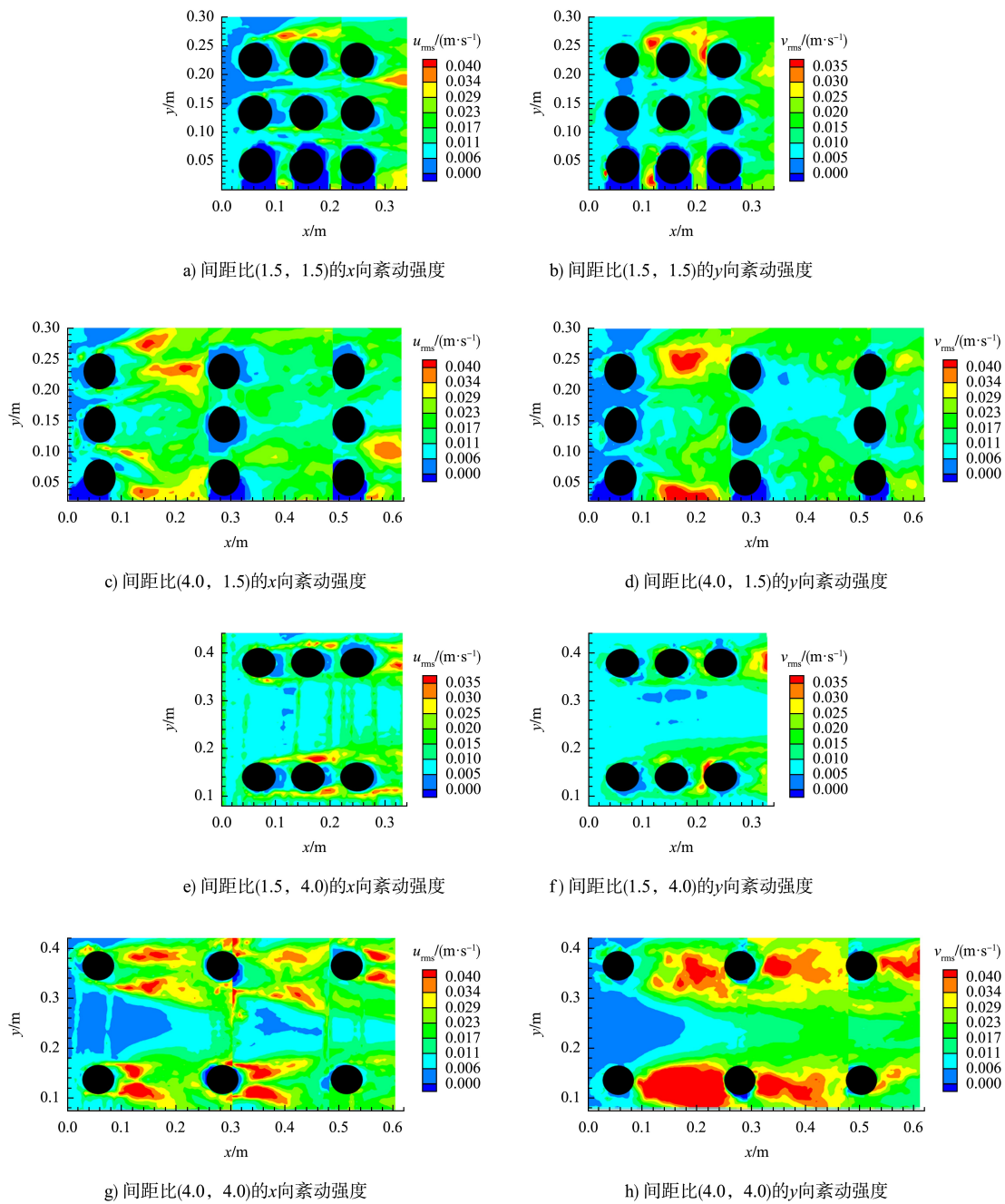


图 7 不同间距比下的紊动强度云图

Fig. 7 Radial turbulence intensity contour under different spacing ratios

雷诺应力是用于描述流体中由紊动引起的层间动量交换的量,定义为任意两个脉动速度分量乘积的时均值,表达式为:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{(i_t - i)} \overline{(j_t - j)} \quad (3)$$

式中: ρ 为流体的密度; i, j 为紊动强度分量 u, v, w ; i_t, j_t 为 u_t, v_t, w_t ; $\bar{i}, \bar{j}$ 为 $\bar{u}_t, \bar{v}_t, \bar{w}_t$ 。

当 $i=j$ 时,表示雷诺法向正应力;当 $i \neq j$ 时,表示雷诺切应力。本文主要分析雷诺切应力 τ_{uv} 在 $z=0.2$ m 的 x - y 平面上的分布特征,这个参数可反映流体中由于紊动引起的剪切力大小。

在 $z=0.2$ m 的 x - y 平面上间距比组合 (X^*, Y^*) 为 $(1.5, 1.5)$ 、 $(4.0, 1.5)$ 、 $(1.5, 4.0)$ 和 $(4.0, 4.0)$

时的雷诺应力云图见图 8。当串列间距比较小时,流体的动量交换主要局限于桩柱周围,此时雷诺切应力的分布范围较窄且数值较小,并排间距比的大小对流体动量交换的影响较为有限。随着串列间距比的增大,流场流态由 (R, R) 型逐步向 (J, J) 型转变,流体动量交换的区域扩大,各桩桩后的剪切层及尾流区域的动量交换明显增强。当流态为 (J, J) 型时,随着并排间距比的增加,上游与下游桩柱之间雷诺应力的分布区域扩大。这个现象表明在较小的并排间距下流体的动量交换受到了明显的抑制。

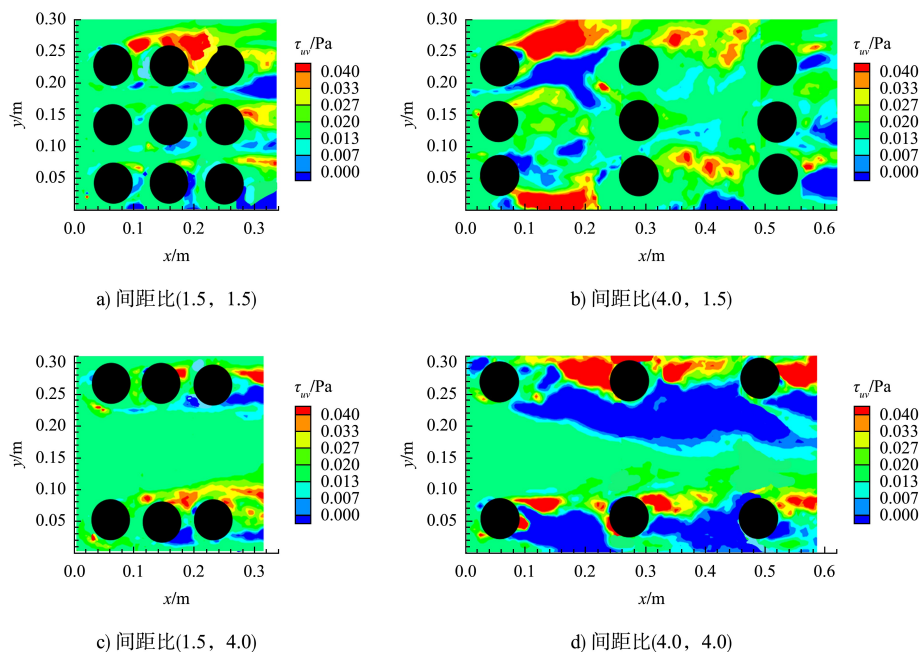


图 8 不同间距比下的雷诺应力云图

Fig. 8 Reynolds stress contour under different spacing ratios

4 结论

1) 随串列间距比从 1.5 增加至 4.0, 桩后附着涡逐渐展开并趋于卷起脱离; 当并排间距比从 1.5 增加至 4.0 时, 桩群内部涡旋数量显著减少, 排与排之间的剪切层相互作用逐步减弱, 在并排间距比达到 4.0 时, 这种作用几乎完全消失, 流场特性趋于单排串列三桩模型的流动特征。

2) 随着串列间距的增加, 同排桩之间的涡量连续性逐渐减弱, 导致各桩尾流区域的涡量分布

趋于破碎化; 并排间距的增加则显著扩展了排与排之间的涡流区域, 同时使群桩外缘区域的涡量分布同样趋于细碎。

3) 群桩流动形态随串列间距比增大呈现由 (R, R) 型向 (R, J) 型再至 (J, J) 型的演化趋势, 显现出与等间距串列三桩布置相似的变化趋势; 并排间距比虽不改变演化方向, 但可调节剪切层干扰强度, 较小的并排间距延缓剪切层卷起。两类间距比协同作用, 决定了群桩流场结构的演变过

程与稳定性特征。

4) 各桩的近桩区均存在明显的回流现象, 上游桩附近的回流速度略大于中游和下游桩; 较小的并排间距比能够有效抑制回流区域的长度, 随着串列和并排间距比的增加, 桩群中轴线位置的回流现象逐渐消失。

5) 较小的串列与并排间距比均可降低群桩结构内流场的紊动强度, 并有效抑制桩群内部流体的动量交换。

参考文献:

- [1] 吴亮, 陈先威. 既有海港高桩码头升级改造方案[J]. 水运工程, 2025(4): 88-93.
WU L, CHEN X W. Upgrading and reconstruction schemes of existing seaport high-pile wharves[J]. Port & waterway engineering, 2025(4): 88-93.
- [2] 唐一夫. 圆柱绕流底部流场及紊动特性试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
TANG Y F. Experimental measurements and numerical study on flow field and turbulence characteristics around a circular pile[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [3] WANG X K, GONG K, LIU H, et al. Flow around four cylinders arranged in a square configuration[J]. Journal of fluids and structures, 2013, 43: 179-199.
- [4] 王多银, 唐选海, 穆军帅, 等. 非恒定流下桩群绕流局部冲刷试验[J]. 水运工程, 2024(7): 75-83.
WANG D Y, TANG X H, MU J S, et al. Local scour experiment of flow around pile group under unsteady flow[J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 75-83.
- [5] SUMNER D. Two circular cylinders in cross-flow: a review[J]. Journal of fluids & structures, 2010, 26(6): 849-899.
- [6] ZDRAVKOVICH M M. Flow induced oscillations of two interfering circular cylinder [J]. Journal of sound and vibration, 1985, 101(4): 511-521.
- [7] HAMED A M, PETERLEIN A M, RANDLE L V. Turbulent boundary layer perturbation by two wall-mounted cylindrical roughness elements arranged in tandem: effects of spacing and height ratio [J]. Physics of fluids, 2019, 31(6): 065110.
- [8] HARICHANDAN A B, ROY A. Numerical investigation of low Reynolds number flow past two and three circular cylinders using unstructured grid CFR scheme [J]. International journal of heat and fluid flow, 2010, 31(2): 154-171.
- [9] 涂佳黄, 王程, 梁经群, 等. 亚临界雷诺数下串列三圆柱体绕流特性研究 [J]. 船舶力学, 2021, 25(9): 1159-1171.
TU J H, WANG C, LIANG J Q, et al. Study on flow characteristics of three tandem circular cylinders at a subcritical Reynolds number [J]. Journal of ship mechanics, 2021, 25(9): 1159-1171.
- [10] 马丽丽. 跨海桥梁桩基础局部冲刷演化特征试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
MA L L. Experimental investigation on scour development around the pile foundation of the sea-crossing bridge[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [11] 陈元瑞, 林子宽, 孟静, 等. 多圆柱绕水动力特性与流场特征的实验研究[C]//吴有生, 王本龙, 何春荣. 第十六届全国水动力学学术会议暨第三十二届全国水动力学研讨会论文集(上册). 北京: 海洋出版社, 2021: 522-530.
CHEN Y R, LIN Z K, MENG J, et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics and flow pattern of multiple cylinders in a cross-flow[C]//WU Y S, WANG B L, HE C R. Proceedings of the 16th National Congress on Hydrodynamics and the 32nd National Conference on Hydrodynamics (volume I). Beijing: China Ocean Press, 2021: 522-530.
- [12] IGARASHI T, SUZUKI K. Characteristics of the flow around three circular cylinders[J]. Bulletin of the JSME, 1984, 27: 2397-2404.

(本文编辑 王璁)