

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202407152024101993

文章编号: 1674-599X(2024)05-0087-12

引用格式: 陈杰, 吴剑, 伍志元, 等. 高桩码头群桩绕流水动力特性数值分析[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(5): 87-98.

Citation: CHEN Jie, WU Jian, WU Zhiyuan, et al. Numerical simulation study on hydrodynamic characteristics of flow around pile groups in high-pile wharfs[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(5): 87-98.

高桩码头群桩绕流水动力特性数值分析

陈杰^{1,2,3}, 吴剑^{1,2,3}, 伍志元^{1,2,3}, 邓斌^{1,2,3}, 蒋昌波^{1,2,3}

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 长沙理工大学 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为探究高桩码头桩基础形式下的群桩水动力特征, 基于Flow-3D软件对来流速度为0.25~1.50 m/s的3×3群桩阵列绕流的湍流流场进行三维数值模拟。研究表明: 桩柱的两侧均形成高速区, 随着来流速度的增加, 高速区范围显示出逐渐扩大的趋势。上游桩后方的回流区范围较大, 而中游桩和下游桩的回流区大小基本相同, 均小于上游桩的回流区。随着来流速度的增加, 剪切力和流体力逐渐增大, 并随来流速度呈非线性增长趋势, 且上游桩受力最大, 下游桩次之, 中游桩受力最小。随着来流速度的增加, 群桩尾涡核心区的涡量随之增大, 中游桩和下游桩后方的尾涡强度明显比上游桩的弱, 中游桩和下游桩的尾迹涡长度保持稳定。随着来流速度的增加, 漩涡强度显著提高, 前桩与后桩之间的漩涡相互纠缠。研究成果对于理解群桩绕流的水动力特性具有重要意义, 可为工程设计和实际应用提供参考。

关键词: 港工建筑物水力学; 群桩绕流; 水动力特性; 漩涡结构; Flow-3D软件

中图分类号: TV135.6

文献标志码: A

Numerical simulation study on hydrodynamic characteristics of flow around pile groups in high-pile wharfs

CHEN Jie^{1,2,3}, WU Jian^{1,2,3}, WU Zhiyuan^{1,2,3}, DENG Bin^{1,2,3}, JIANG Changbo^{1,2,3}

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To investigate the hydrodynamic characteristics of pile groups in high-pile wharf foundations, this study conducted three-dimensional numerical simulation of the turbulent flow field around a 3×3 pile group array with incoming flow velocities ranging from 0.25 m/s to 1.50 m/s by using Flow-3D software. The results indicate that high-velocity zones form on both sides of the piles, and the extent of these zones tends to expand as the incoming flow velocity increases. The recirculation zone behind the upstream pile is larger, while the recirculation zones behind the midstream and downstream piles are similar in size and smaller than that of the upstream pile. As the incoming flow

收稿日期: 2024-07-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2601100); 湖南省自然科学基金项目(2022JJ10047、2022JJ20041); 国家自然科学基金项目(52271257)

通信作者: 吴剑(1993—), 男, 讲师, 主要从事工程水力学方面的研究工作。E-mail: wujian@csust.edu.cn

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

velocity increases, the shear force and fluid force increase non-linearly. The upstream pile experiences the greatest force, followed by the downstream pile, with the midstream pile experiencing the least force. Additionally, the vorticity in the core region of the wake vortex increases with higher incoming flow velocity. The wake vortex intensity behind the midstream and downstream piles is significantly weaker than that behind the upstream pile, with the wake vortex length remaining stable for the midstream and downstream piles. As the incoming flow velocity increases, the vortex intensity significantly increases, and the vortex structures between the upstream and downstream piles become entangled. These findings are significant for understanding the hydrodynamic characteristics of flow around pile groups and provide valuable reference for engineering design and practical applications.

Key words: hydraulics of port and harbor structures; flow around pile group; hydrodynamic characteristic; vortex structure; Flow-3D software

宁波舟山港大榭招商国际码头是典型的高桩码头。水流在通过群桩时受到阻碍,流速和流向均发生变化,导致周围海床发生了不同程度的冲刷和淤积,从而影响码头工程建筑的稳定性。因此,研究和分析沿海港口桩基码头群桩的水动力场特性,推论群桩所在区域的沉积侵蚀机制,对于高桩码头的安全、稳定具有重要的工程实践意义。

目前,关于单柱体、双柱体、三柱体和多柱体的流场特征已有较为丰富的研究成果。在单柱体研究方面,已有研究探讨了其形状^[1]、雷诺数^[2]和来流攻角^[3]等因素对柱体周围流场特征的影响。康友良等^[4]对单圆柱在不同风向角下的涡激振动响应进行了双向流固耦合数值模拟,捕捉到了圆柱从“拍”到“锁定”再回到“拍”现象的全过程。在锁定区域附近,圆柱的涡激共振位移幅值远比非锁定区域的大。单柱体的研究结果虽能提供一定的参考,但无法全面反映群桩内部复杂的流动特性。

在双柱体研究方面,QIN等^[5]研究了不同频率比下串列双圆柱的振动机制,包括锁定、涡激振动和驰振。涂佳黄等^[6]发现固有频率比和剪切率显著影响下游圆柱体的振幅,但对上游圆柱体振幅的影响较小,上游圆柱体的共振区域比下游圆柱体的宽。胡彬等^[7]的数值模拟结果表明,当两柱间距小于临界间距($L_c/D=2.25 \sim 2.50$,其中 L_c 为临界间距, D 为圆柱直径)时,上游柱体后方没有出现明显的涡脱落现象;当两柱间距超过临界间距时,涡脱落现象才出现。杜晓庆等^[8]发现随着间距的增加,流场中出现了单一钝体、偏转流和平行涡流等多种流动模式。

在三柱体研究方面,CHEN等^[9]通过数值模拟分析了间距比 $L/D=1.2 \sim 5.0$ (L 为柱间距)的三柱体

绕流流场,探讨了平衡位置偏移、低频振动和涡脱落对流场的影响。杨泉泉等^[10]对等边三角形排列的三圆柱进行了数值模拟,发现尾流模式可分为6种类型。谭志荣等^[11]使用Fluent软件对雷诺数 $Re=2.25 \times 10^6$ 的串列三圆柱湍流模型进行了大涡模拟,结果显示表层涡量变化显著,回流区域与间距比之间存在较强的相关性。目前,对双柱体和三柱体的研究主要关注柱体间距和排列方式对涡脱落及振动特性的影响。这些研究在较小的柱体数量和简单的排列方式下,揭示了一些重要的流动模式,但对于更复杂的群桩排列(如本研究中的 3×3 矩形排列)的研究相对较少。

而在四柱体及多柱体研究方面,HAN等^[12]通过有限元算法对雷诺数 $Re=80$ 和 160 的方形排列四圆柱进行了数值模拟,观察到了“ $2P+2S$ ”(P代表一对漩涡,S代表单个漩涡)涡脱落模式。姚文娟等^[13]研究了雷诺数 $Re=40 \sim 300$ 的方形排列四圆柱($L/D=5$)的涡激振动特性,发现随着雷诺数的增加,涡脱落周期显著减小。赵红晓^[14]对不同雷诺数($Re=200, 5000, 10000$)下多圆柱绕流进行仿真研究,发现尾涡区的长度和紊动强度随着来流雷诺数的增大而增加,圆柱的阻力系数随着雷诺数的增加而降低。GAO等^[15]研究发现入流攻角对下游柱体的涡激振动有显著影响,且随着入流攻角的增加,下游柱体的振动锁定区间始终比上游柱体的宽。干桂轩等^[16]利用DIFFRACT软件计算了规则波作用下4~6根梅花群桩结构的波浪力,发现群桩内部的水动力相互作用显著,每根柱体的波浪力最大值可达单个柱体的2.3倍。任理娇^[17]探讨了振荡流作用下呈菱形分布的四圆柱系统的流动干涉及水动力荷载,通过对不同 Kc 数、雷诺数 Re 和间距比 L/D 下尾流特性

和动力响应的分析,着重探讨了各同步模态及拟周期模态下流动现象及水动力荷载间的关系。多尺度漩涡间的相互作用引起的远场剪切层间的不稳定性使系统产生了除振荡频率外的低频分量。YANG 等^[18]利用粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术研究了 2×2 和 2×3 群桩前马蹄涡的时间平均流拓扑和瞬时演化特征,结果显示随着 L/D 的增加,桩间的逆流和上游流变得明显。齐洪亮等^[19]通过模型试验发现,当透水群桩与保护桥墩的距离约为桥墩直径的 4 倍时,减冲效果最为显著,最大减冲率可达 65%。刘小兵等^[20]通过风洞试验在均匀流场中对比研究了不同间距串列多圆柱气动力的干扰效应,结果表明,串列多圆柱发生流态切换的临界间距比 (L/D) 为 3.5 ~ 4.0,在临界间距附近,所有圆柱的斯特劳哈尔数 St 均突升,气动干扰对串列多圆柱时均阻力系数和 St 的影响主要表现为效应减小。刘闯等^[21]基于 LBM-LES 方法模拟了串列多圆柱的尾涡结构,结果表明,串列多圆柱绕流存在临界间距比 $L/D=4$,当圆柱间距比大于临界间距比时才会出现明显的涡脱落现象,且前方圆柱脱落的涡对方圆柱有冲击作用,会显著影响后方圆柱的气动力。吴苏莉^[22]采用大涡模拟方法,对 $Re=3\ 900$ 工况下的倾斜多柱体结构绕流场控制进行数值研究,阐述了四圆柱体结构群的互扰效应和力学机制。与小倾斜角工况相比,在大倾斜角工况下产生的涡结构不再呈现明显的三维效应。以上多柱体的研究大多针对方形排列的小规模群桩 (如 4 柱体),研究其漩涡脱落模式和流场特征。然而,这些研究基本上未充分考虑高雷诺数条件下的非线性流动特性,同时,对于群桩内部的局部流动特性及相互干扰效应关注较少。

目前,群桩流场的研究主要集中在群桩间流场的流动特性和流体动力特性方面,如群桩间的绕流、压力分布以及速度场特征等,而对群桩内部的局部流动特性、群桩的相互干扰效应以及非稳态流动特性的关注不足。基于上述研究的局限性,本文以大榭码头桩基的群桩为原型,基于 Flow-3D 软件对 3×3 矩形排列的群桩进行数值模拟研究,探讨群桩相互干扰效应及其对群桩流场和漩涡结构的影响,分析群桩的受力差异及剪切力和流体力的非线性增长规律,这对群桩结构的设计和优化具有重要参考价值。

1 模拟方法

本研究基于 Flow-3D 软件进行数值模拟研究,该软件采用有限差分法和卷积嵌套网格法,允许存在不规则网格,可对局部网格进行细化,能够有效处理自由表面流动、湍流和复杂的几何形状,可以在关键区域 (如群桩周围) 提供更高的分辨率,从而提高模拟精度。这些特点使其在模拟涡流和非线性流动方面具有一定的优势。

1.1 控制方程

大涡模拟的基本原理是利用滤波技术将湍流中的瞬时脉动运动分解为大尺度和小尺度两种,通过求解动量方程模拟湍流的大尺度漩涡,而小尺度漩涡的影响则通过亚网格模型来表示。对不可压缩流体的 Navier-Stokes 方程进行滤波处理后,大涡模拟的控制方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial (\bar{u}_i)}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \rho \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

其中,亚格子应力 τ_{ij} 表示为:

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度; u_i, u_j 为流场的速度分量; p 为流场的压强; μ 为流体黏性系数。本文采用 Smagorinsky-Lilly 亚格子模型。亚格子应力定义为:

$$\tau_{ij} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} + \frac{\tau_{kk} \delta_{ij}}{3} \quad (4)$$

式中: τ_{kk} 为亚格子湍动能; δ_{ij} 为克罗内克函数; ν_t 为亚格子涡黏系数,定义为:

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (5)$$

式中: Δ 为局部网格尺度; C_s 为 Smagorinsky 常数,取为 0.16; \bar{S}_{ij} 为经过滤波后的速度变形张量,定义为:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

1.2 计算域

为了进行对比验证,本文选用 ANDREAS 等^[23]的经典粗糙床面单桩模型试验数据,并使用 Flow-3D 软件进行模拟。桩的直径为 0.536 m,桩中心距离入口边界 $8D$,距离出口边界 $12D$,距离两侧边界各 $5D$ 。水深为 0.54 m,流速为 0.326 m/s,床面粗糙度为 7 mm。计算域网格采用三层嵌套网格 (图 1),

最小网格尺寸为3 cm,总网格数为132万。

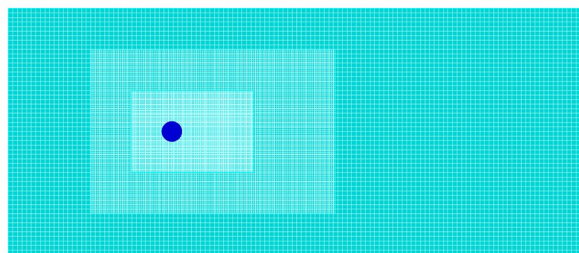
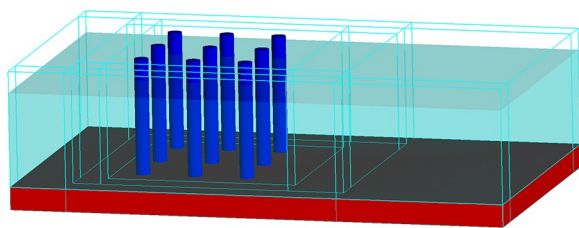
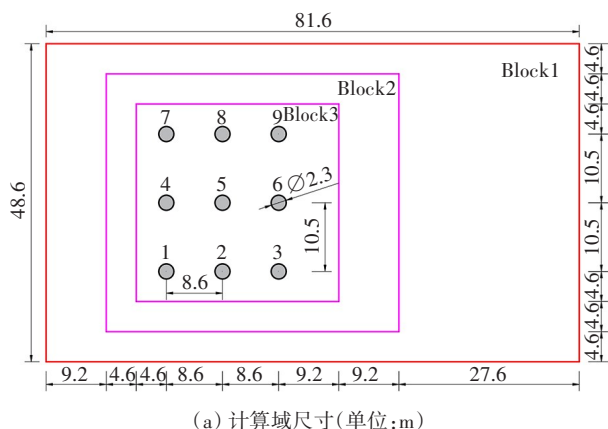


图1 计算域三层嵌套网格

Fig. 1 Three-layer nested grid of the computing domain

根据大榭桩基码头实际工程进行建模,在桩基所处区域附近设置长81.6 m、宽48.6 m、高22.55 m的计算域(图2)。大榭码头桩基承台基础结构布置区域的海底为滩涂,表层主要由粉土和粉沙组成,将沙床表面的粗糙度设定为泥沙中值粒径的2.5倍,床面粗糙度设为0.65 mm,泥沙厚度设为3.7 m,水深15.35 m,上层空气高度3.5 m。采用三层嵌套网格对床沙区域及桩基模型区域进行加密,模型网格的最小尺寸为15 cm,总网格数为557万。



(b) 三维模型图

图2 群桩模型示意图

Fig. 2 Diagram of pile group model

根据大榭码头桩基承台基础结构的布置,在同一水深($h=15.35$ m)、不同流速条件下对桩基周围的水力特性进行模拟。通过查阅相关资料,设置了0.25、0.50、0.75、1.00、1.25和1.50 m/s 6组工况,以模拟不同来流速度下桩周流场的变化。模拟工况

见表1。

表1 模拟工况

Table 1 Simulation condition

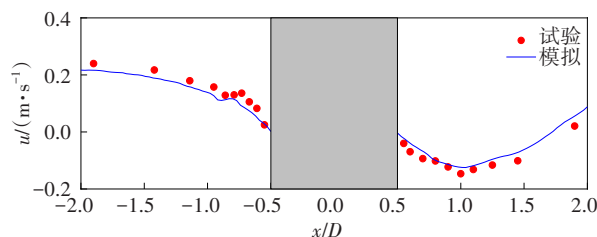
| 工况 | 水深 h/m | 来流速度 $U_a/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 桩径雷诺数 $Re/10^6$ |
|----|-----------------|--|--------------------|
| 1 | 15.35 | 0.25 | 0.575 |
| 2 | 15.35 | 0.50 | 1.150 |
| 3 | 15.35 | 0.75 | 1.725 |
| 4 | 15.35 | 1.00 | 2.300 |
| 5 | 15.35 | 1.25 | 2.875 |
| 6 | 15.35 | 1.50 | 3.450 |

1.3 边界条件

数值模拟的边界条件设置如下:在入口处设置速度边界条件(Specified velocity),直接指定入口的流速大小。在出口处设置压力边界条件(Specified pressure),指定出口的水深来控制流体的出流情况。底部采用无滑移壁面边界条件(Wall),即底部流体与壁面之间不存在相对滑动,从而真实模拟床面的物理特性。在模型顶部,使用压力边界条件(Specified pressure),顶部与外部大气环境相连,将压力设定为标准大气压。在模型的侧面,采用对称边界条件(Symmetry),流体在边界处的法向速度为零,从而有效模拟侧边界的对称性。

1.4 算例验证

图3为不同水深 h 下的流速变化曲线。从图3可以看到,在桩周区域流速发生明显变化。在桩前,流向速度明显减小,表明桩体对水流产生了显著的阻碍作用。在桩后,模拟结果显示流速先为负值然后为正值,说明桩后下游区域出现漩涡。在展向方向上,桩基阻碍水流前进,形成了壅水,导致水位升高,流速减小。在桩后,流速波动比桩前的大,说明绕流后的漩涡不稳定性导致展向速度的波动更大。流向和展向速度在桩周区域的变化与物理模型试验结果一致,两者在桩周附近整体拟合良好。



(a) 流向速度($h=4.3$ cm)

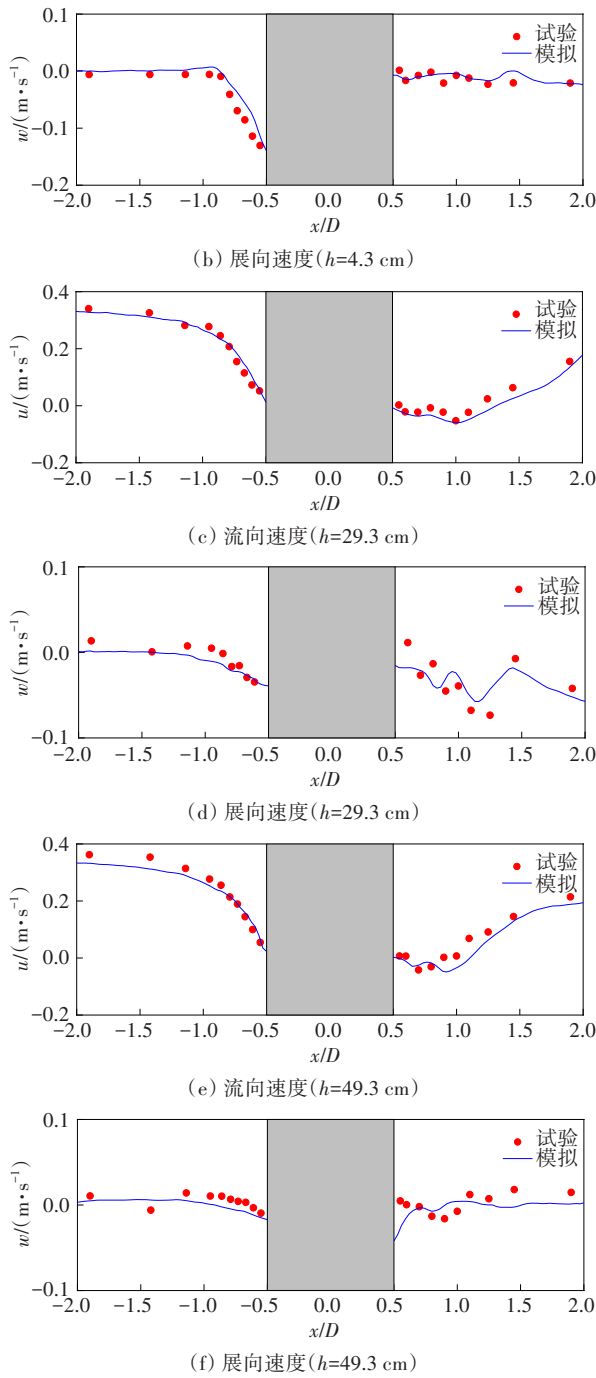


图3 粗糙床面速度验证结果

Fig. 3 Results of velocity validation for rough bed surface

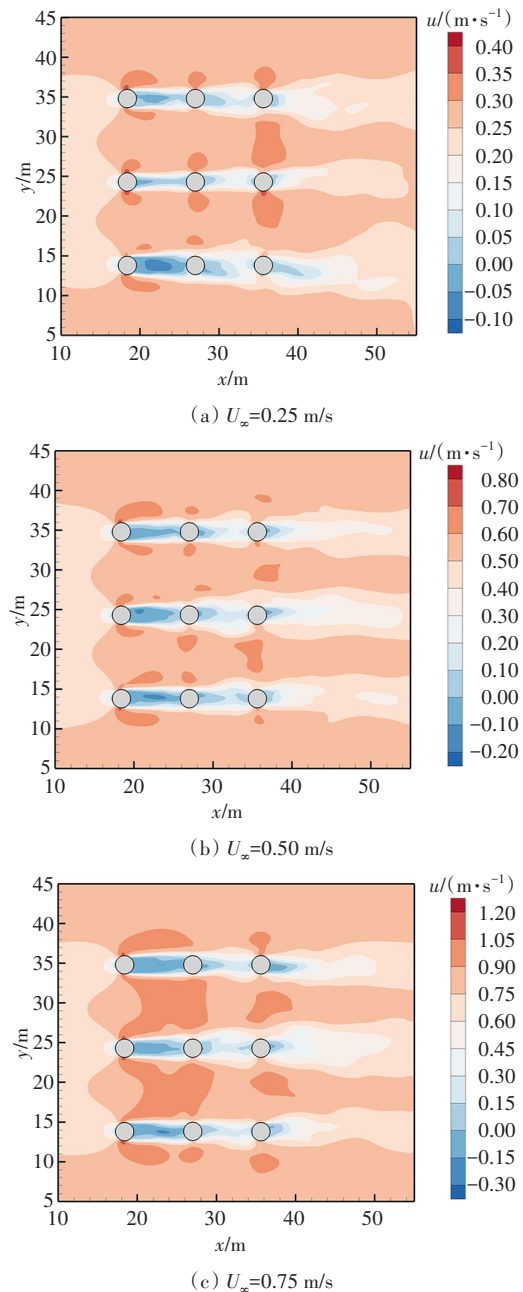
2 结果与讨论

2.1 桩基周围流场特征

2.1.1 平面流场

图4为6种不同来流速度下的时均流向速度分布云图,反映了不同流速下流场的整体变化。从图4可以看出,在群桩中,不同桩的流场之间存在复杂的相互作用,形成了复杂的流动模式。上游桩的尾

迹漩涡与中下游桩的前缘流场相互干扰,这种干扰效应导致中下游桩迎流面的流动特性发生变化。由于上游桩在来流方向上的遮挡作用,中下游桩所处位置的流场更为复杂,包含了来自上游桩的尾流和周围流场的耦合作用。上游桩产生的漩涡在下游的传播过程中,与中下游桩的流场发生相互作用。特别是在高来流速度下,上游桩后方的漩涡明显影响了中下游桩前方的流场分布,并导致流速重新分布。这种相互作用导致了中下游桩周围流场的不均匀性,进一步加剧了桩间流体动力的相互干扰。此外,上游桩的漩涡与中下游桩的漩涡产生了强烈的相互作用,进一步复杂化了群桩的整体流场。



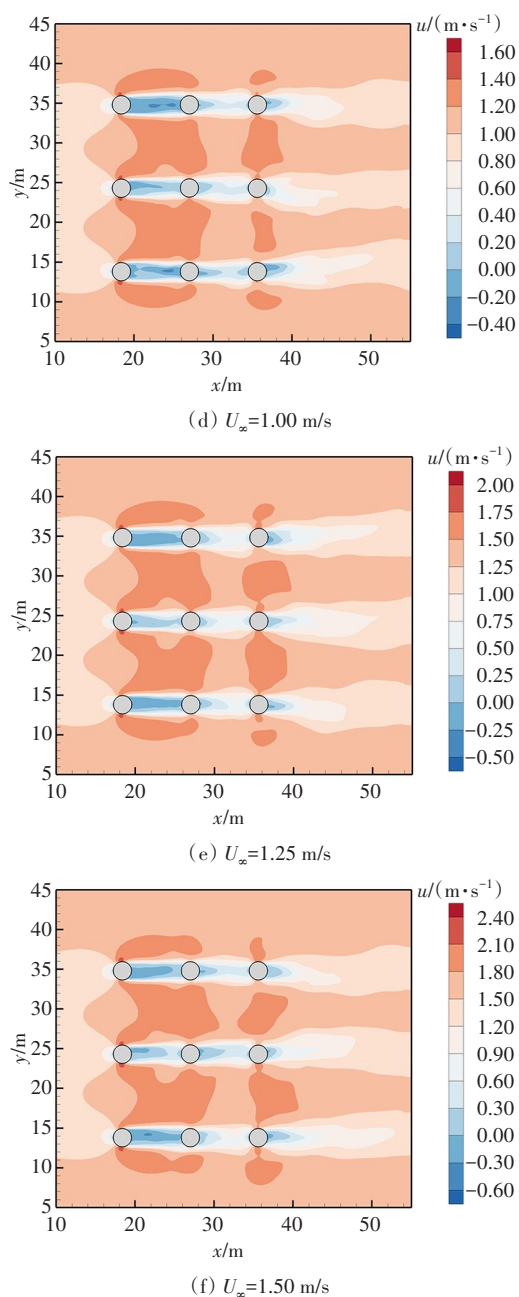


图4 不同来流速度下桩周平面时均流向速度

Fig. 4 Time-averaged planar streamwise velocity around the pile under different inflow velocities

通过图4还可以看到,过流断面的收缩导致群桩之间的流速增加,进而增强了对尾流的拉伸作用。由于上游桩的遮蔽效应,中游桩和下游桩的桩后回流区的长度分布规律不明显,但其尺度均比上游桩的小。中游桩之间流向速度的最大值区域比上游桩之间流向速度的最大值区域小,即中游桩之间流向速度的加速效果比上游桩的差。

当流速较小时,并列桩桩间流速大于自由来流速度的区域较小,群桩之间的相互影响较弱,整体流动形态类似于单桩流动,每个桩两侧均存在一个

高速区。在桩前区域,流速分布受来流速度的直接影响。当流体绕过桩体时,在桩前形成高压区,流速降低。上游桩前的高压区和后方的回流区共同作用,促进了漩涡的生成和脱落。随着流速的增加,上游桩和下游桩两侧流速大于自由来流速度的区域逐渐扩大并融合为一个更大的区域,但其整体范围保持相对稳定。下游桩之间的高速区尽管未与上游桩的高速区融合,但其范围也呈逐渐扩大趋势。

对于群桩之后的尾流区,上游桩后方的回流区是最大的,几乎从上游桩一直延伸到了中游桩;而中游桩和下游桩回流区的大小基本相同,均小于上游桩的回流区,这是上游桩与中下游桩桩前的来流速度不同导致的。上游桩前方的来流速度均匀,此时两侧高速水流对其尾流的拉伸作用最强,故形成了最大的回流区。在上游桩桩后区域,流体经过桩体后形成尾流区,流速显著降低,形成了低速区和回流区。漩涡在桩后生成并脱落,这些漩涡在向下游传播的过程中对流场产生扰动,显著影响了中下游桩的流场结构。

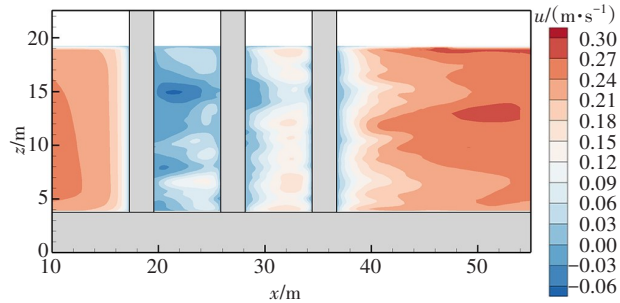
对于中游桩和下游桩,它们均位于上游桩的尾流区内,来流条件较为相似。由于前桩的阻碍作用,前桩尾流发生偏转,并具有一定的横向速度,对后桩尾流区的拉伸作用较弱,因此其回流区范围比上游桩的小。在桩间区域,受上游桩尾流区和下游桩遮挡效应的共同影响,流速分布的变化较复杂。上游桩尾流区形成的低速区对下游桩的迎流侧产生了显著影响,导致桩间区域的流速降低,桩间流速分布不均匀,特别是在上游桩和下游桩之间,这是由于流体在上游桩后形成的回流区与中游桩前的高压区相互作用,核心区域的流速和压力随时间变化显著,致使桩间流场特征复杂化。由于流速梯度的存在,流体在绕过桩体后,在桩后形成了剪切层,剪切层的不稳定性导致了漩涡的生成。

2.1.2 立面流场

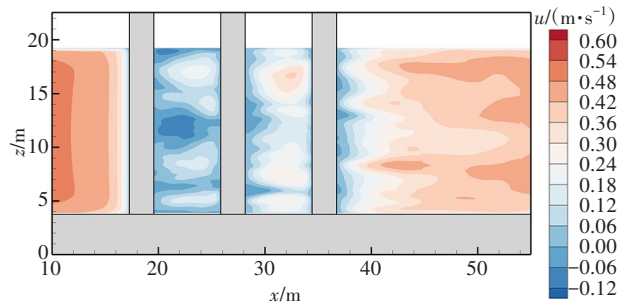
图5为顺水流方向中轴线纵剖面的时均流向速度分布云图。从图5可以看出,由于桩间过流断面的减小,中轴线纵断面流向速度增大。受上游桩的遮蔽作用,背流侧的流速加速区域面积比迎流侧的明显要小,且流速低于来流流速的区域呈增大趋势。

因受前桩的阻碍作用,上游桩桩前纵断面的流速逐渐减小,直至为零。靠近床面和水面的流速小于中间主流区域的流速。从图5可以简单推断出,上游桩桩前的流速矢量几乎平行于床面(这与

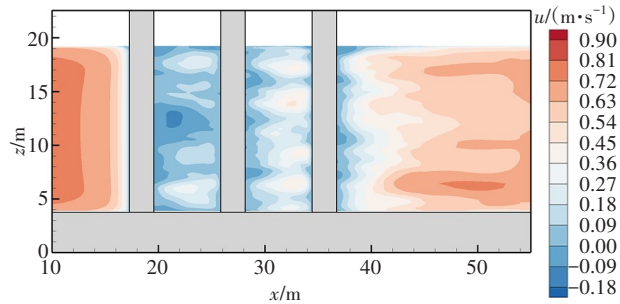
YANG等^[18]的研究结果一致),桩后上升流和下降流随来流速度的变化规律不明显。该断面近床面的水流由迎流侧的下降流转变为背流侧的上升流。



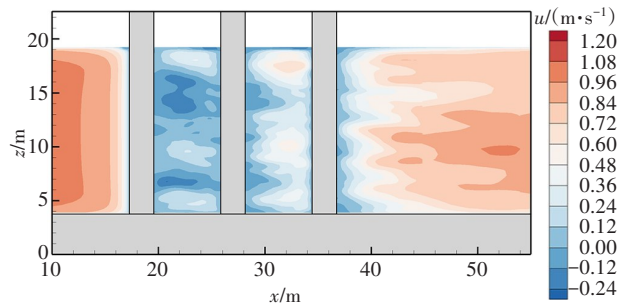
(a) $U_{\infty}=0.25$ m/s



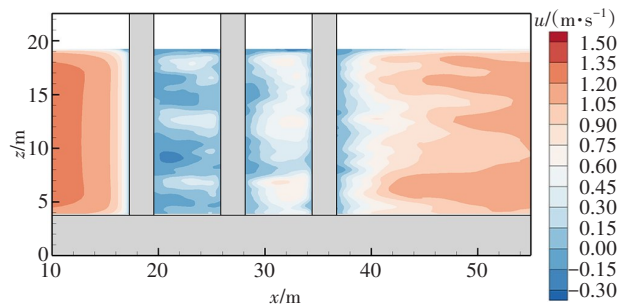
(b) $U_{\infty}=0.50$ m/s



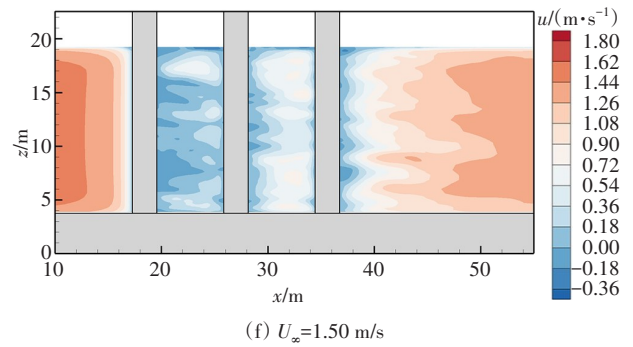
(c) $U_{\infty}=0.75$ m/s



(d) $U_{\infty}=1.00$ m/s



(e) $U_{\infty}=1.25$ m/s



(f) $U_{\infty}=1.50$ m/s

图5 不同来流速度下桩周立面时均流向速度

Fig. 5 Time-averaged vertical streamwise velocity around the pile under different inflow velocities

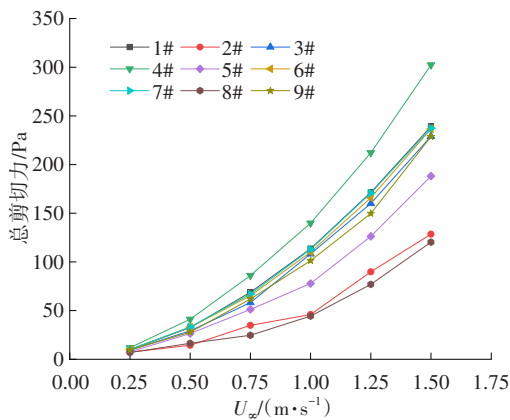
桩周5 m范围内的流向速度基本小于来流速度。在桩后形成回流区,且背流侧的回流区面积比迎流侧的小。当来流速度从0.25 m/s增至1.50 m/s时,回流区的尺寸变化规律与图4的变化规律基本一致。在中轴线纵剖面上,桩后形成漩涡,流速矢量与床面不平行。

在上游桩、中游桩、下游桩之间的区域,由于桩的阻碍和遮蔽作用,流速较低,并且存在回流区。上游桩后方的回流区明显大于中游桩和下游桩的回流区。流体在绕过上游桩后形成低压区,该低压区导致流体回流和漩涡的形成。对于尾流区,上游桩后方的回流区范围最大,并延伸至中游桩,而中游桩和下游桩回流区的大小基本相同,均小于上游桩的回流区。原因在于上游桩首先接触来流,上游桩两侧高速水流对其尾流的拉伸作用最强,形成了较大的分离区和回流区;而中游桩和下游桩位于前桩的尾流区内,来流条件相似,尾流发生偏转,横向速度减弱,回流区范围比上游桩的小。由此可以推断,来流速度对尾流区的回流具有显著影响。

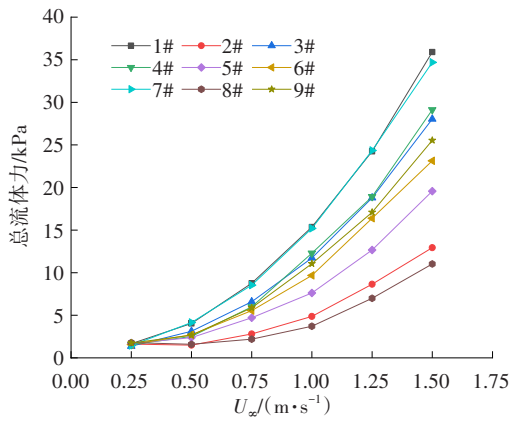
2.2 桩基受力特征

在不同来流速度下,桩基承受的力也有所不同。在来流速度较大的情况下,升力可能导致桩基不稳定。为了定量分析桩间的干扰效应,本文计算了不同桩受力的变化情况。图6主要展示了在不同来流速度下,群桩所受的剪切力和流体力的变化情况。从图6总体来看,随着来流速度的增加,剪切力和流体力逐渐增加,并且阻力随着来流速度的增加呈非线性增长趋势。当来流速度较小时,阻力较小;而当来流速度较大时,阻力急剧增大。由于对称性,上游两侧的1#和7#桩受力情况基本相同;中游的2#和8#桩、下游的3#和9#桩之间受力差别不大,这是由于它们均处于前桩的尾流中。在不同的

来流速度下,群桩的总剪切力和总流体力的变化规律相同,上游桩受力最大,下游桩次之,中游桩受力最小。上游桩由于直接暴露在来流中,阻挡了大部分流体,形成了强烈的回流区和高剪切力区域。中游桩处于前桩的尾流中,受到前桩和下游桩的双重影响,所受剪切力和流体力最小。而下游桩由于后方没有桩基的影响,其尾流被拉伸,下游桩所受力介于上游桩和中游桩之间。这一非线性增长规律可归因于流体流动中的湍流特性和桩间的相互干扰效应。特别是在来流速度较大的情况下,湍流强度增加导致剪切力和流体力显著增大。



(a) 总剪切力



(b) 总流体力

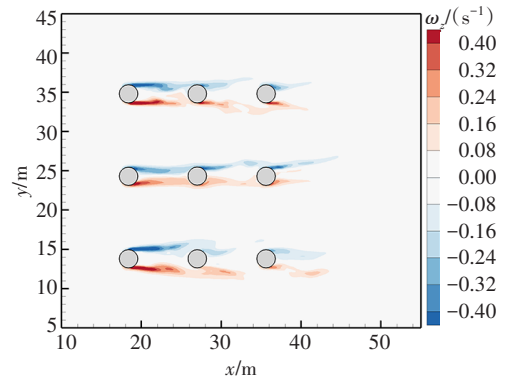
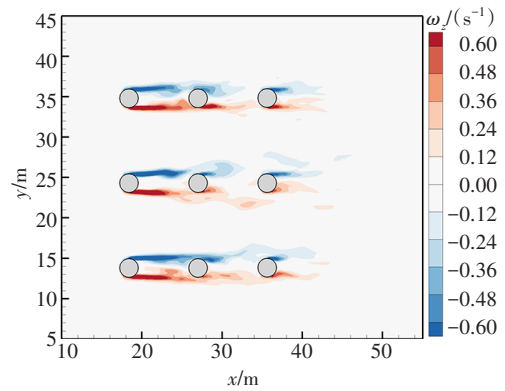
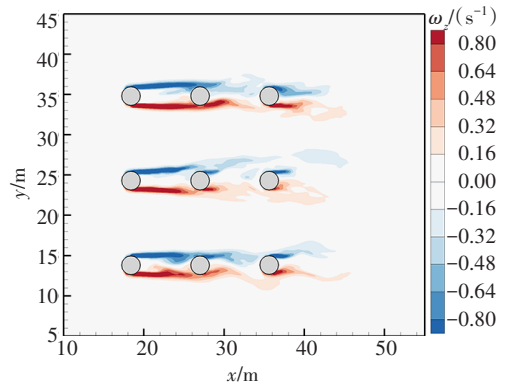
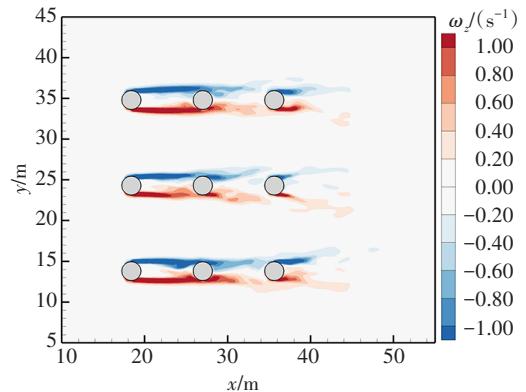
图6 不同来流速度下群桩的受力

Fig. 6 Forces on pile group under different inflow velocities

2.3 桩基周围漩涡特征

2.3.1 涡量特征

水流经过桩体后会形成一左一右两个反向旋转的对称漩涡。图7所示为不同来流速度下的涡量 ω_z 云图。从图7可以看出,群桩内每个桩体后方都有尾涡脱落。然而,由于桩与桩之间的相互作用,群桩内各桩体后方的尾涡生长长度及强度与单独桩体的有所不同。

(a) $U_{\infty}=0.25$ m/s(b) $U_{\infty}=0.50$ m/s(c) $U_{\infty}=0.75$ m/s(d) $U_{\infty}=1.00$ m/s

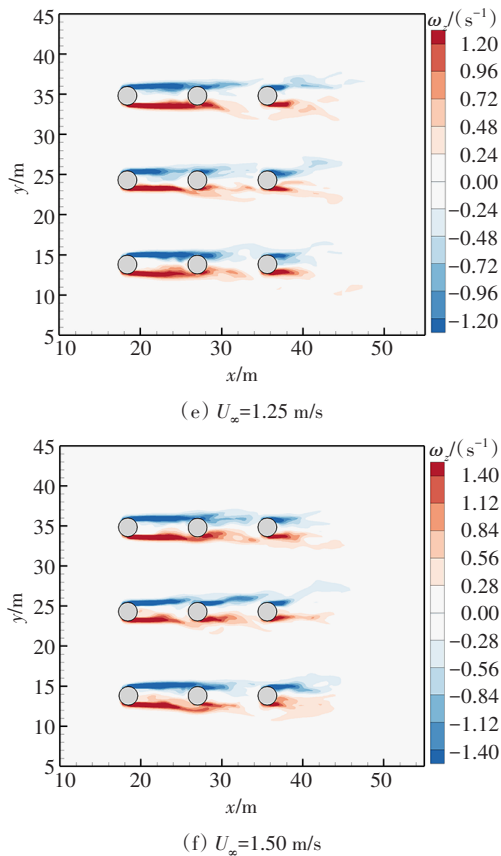


图7 不同来流速度下的涡量云图

Fig. 7 Vorticity contour plots under different inflow velocities

从图7还可以看出,顺水流方向左中右三列桩之间的相互影响较小,每列桩体的涡流主要影响约 $2D$ 宽度的范围,且桩体两侧正方向和反方向的尾涡基本呈对称分布。每列的上中下游桩体由于阻挡和遮蔽效应,对尾涡的影响显著。

涡流脱落是一个动态的非线性过程,在桩后形成剪切层,剪切层的不稳定性导致了涡流的生成。在不同来流速度下,上游桩尾迹剪切层长度存在显著差异。当来流速度较小时,流体黏性力占主导地位,剪切层长度较短,涡流的相互作用较弱,尾迹涡结构相对稳定,涡量分布均匀,呈现出典型的Kármán涡街特征。随着来流速度的增加,上游桩尾迹涡量显著增加,惯性力逐渐占据主导地位,上游桩尾迹剪切层长度显著增加,这主要是因为较大的来流速度促进了桩后涡流的形成和发展,进而使剪切层得以延展。剪切层内的涡流结构变得更加复杂,涡流的相互作用增强,尾迹中涡流的排列变得更加不规则。在较大的来流速度下,上游桩尾迹的剪切层长度增长趋缓,逐步达到最大值,上游桩尾迹剪切层长度趋于稳定,剪切层内的涡流结构呈现出明显的非线性特征。此时,尾迹涡流结构高度

紊乱,涡流的相互作用剧烈,涡量分布出现明显的非对称性。剪切层长度的增加对下游桩间的水流干扰也变得更加显著,导致下游桩体受力特性复杂化。

通过以上分析可以看出,来流速度越大,上游桩尾迹剪切层的长度越长。这一现象说明来流速度不仅影响了桩后涡流的形成和发展,也对剪切层的延展和稳定产生了重要影响。

2.3.2 涡流特征

图8展示了在不同来流速度下桩周围的涡流等值面三维图。由图8可知,涡流的生成和脱落在群桩流场中是一个动态的过程,受到相邻桩的显著影响。上游桩后方形成的涡流,在向下游传播时,与下游桩的流场发生相互作用,诱导下游桩形成新的涡流,这种涡流诱导效应使得桩间的相互作用更加复杂。当来流速度较小时,桩基周围形成的涡流数量较少且强度较低,显示出较为平稳的流动特征。随着流速的增加($U_{\infty} > 0.5 \text{ m/s}$),桩体周围的涡流增多,强度也有所增加。此时,桩基周围形成了大量涡流,涡流强度显著提高,涡流结构变得复杂,前桩与后桩间的涡流相互纠缠,显示出明显的复杂流动特征。此外,中下游桩的存在干扰了上游桩涡流的传播路径,导致涡流结构的改变和能量的重新分配。这种机制可以通过湍流涡流理论解释,即上游桩产生的涡流在传播过程中受到中游桩的阻碍,部分能量被耗散,剩余的涡流能量则在中游桩和下游桩之间重新分配。

从图8(c)~8(f)可以看出,在中低速及高速情况下($U_{\infty} = 0.75 \sim 1.50 \text{ m/s}$),尽管流速有所增加,但涡流区并未发生显著变化,这表明随着来流速度的增大,虽然涡流的强度和数量有所增加,但其空间分布和区域范围保持相对稳定。这一现象与前文提到的涡量变化规律一致,即流速增大时涡量增加,但涡流区的范围并未显著扩展。这也与YANG等^[18]关于群桩前马蹄涡特性的研究结果一致,表明群桩之间复杂流动的相互作用是涡量和涡流结构发生变化的重要原因。在来流速度较大的情况下,上游桩后方的尾涡明显影响中游桩和下游桩前方的流场分布,导致流速重新分布。这种相互作用导致了下游桩周围流场的不均匀性,进一步加剧了桩间流体动力的相互干扰。此外,上游桩的尾涡与中下游桩的尾涡发生了强烈的相互作用,进一步复杂化了群桩的整体流场。

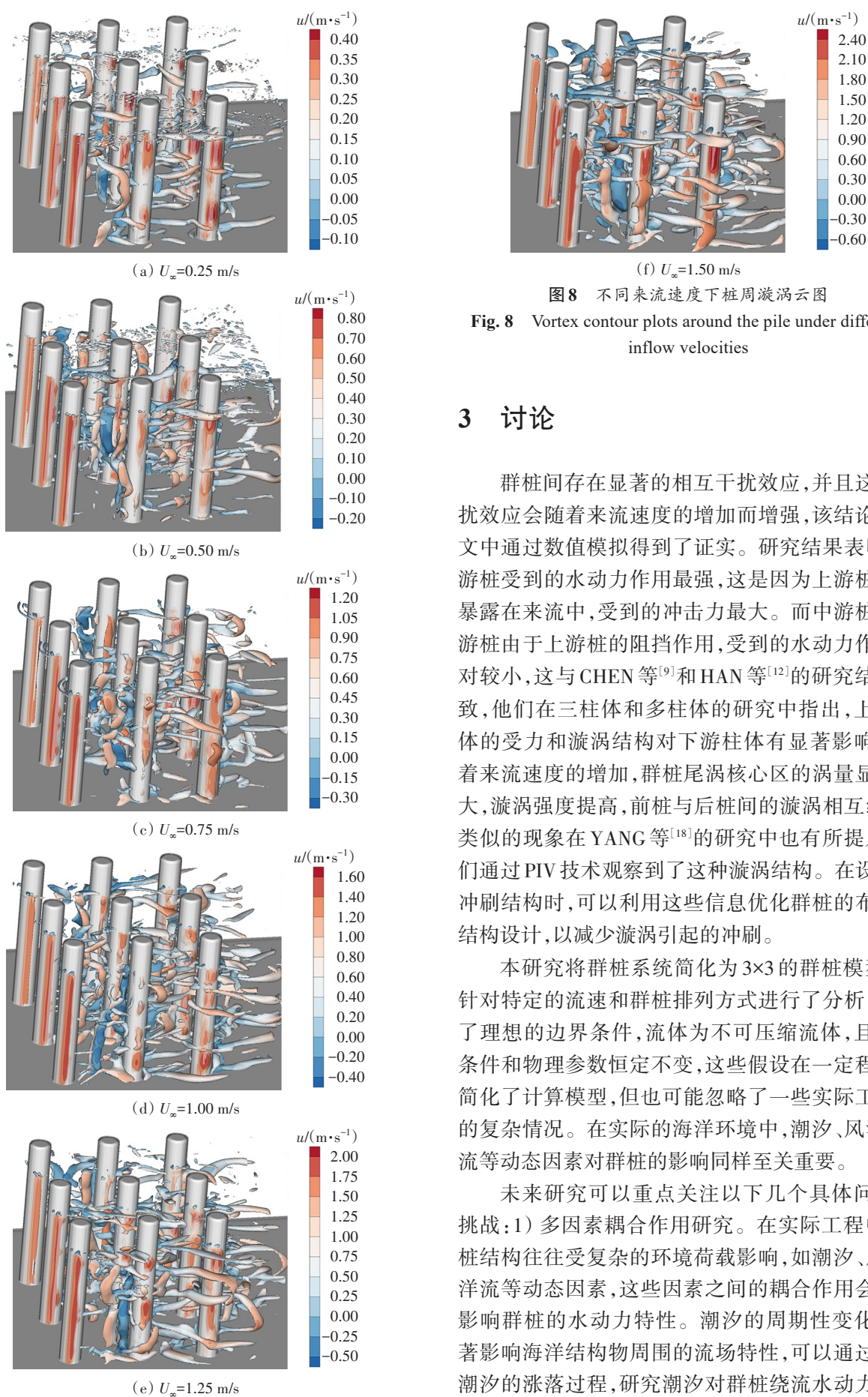


图8 不同来流速度下桩周涡云图

Fig. 8 Vortex contour plots around the pile under different inflow velocities

3 讨论

群桩间存在显著的相互干扰效应,并且这种干扰效应会随着来流速度的增加而增强,该结论在本文中通过数值模拟得到了证实。研究表明,上游桩受到的水动力作用最强,这是因为上游桩直接暴露在来流中,受到的冲击力最大。而中游桩和下游桩由于上游桩的阻挡作用,受到的水动力作用相对较小,这与CHEN等^[9]和HAN等^[12]的研究结果一致,他们在三柱体和多柱体的研究中指出,上游柱体的受力和漩涡结构对下游柱体有显著影响。随着来流速度的增加,群桩尾涡核心区的涡量显著增大,漩涡强度提高,前桩与后桩间的漩涡相互纠缠。类似的现象在YANG等^[18]的研究中也有所提及,他们通过PIV技术观察到了这种漩涡结构。在设计防冲刷结构时,可以利用这些信息优化群桩的布局 and 结构设计,以减少漩涡引起的冲刷。

本研究将群桩系统简化为3×3的群桩模型,仅针对特定的流速和群桩排列方式进行了分析,假设了理想的边界条件,流体为不可压缩流体,且环境条件和物理参数恒定不变,这些假设在一定程度上简化了计算模型,但也可能忽略了一些实际工程中的复杂情况。在实际的海洋环境中,潮汐、风浪、洋流等动态因素对群桩的影响同样至关重要。

未来研究可以重点关注以下几个具体问题和挑战:1) 多因素耦合作用研究。在实际工程中,群桩结构往往受复杂的环境荷载影响,如潮汐、风浪、洋流等动态因素,这些因素之间的耦合作用会显著影响群桩的水动力特性。潮汐的周期性变化会显著影响海洋结构物周围的流场特性,可以通过模拟潮汐的涨落过程,研究潮汐对群桩绕流水动力特性

的影响。风浪在海洋环境中普遍存在,其非线性作用机制复杂,可以结合风浪的频谱特性,采用数值模拟和试验验证的方法,研究风浪作用下群桩的水动力响应。此外,可以研究这些因素的综合耦合作用对群桩水动力特性的影响,开发动态耦合数值模型,以提升对实际工程情况的模拟精度。2) 多尺度分析方法的应用。群桩结构的水动力特性具有显著的尺度效应,微观尺度的流场特性和宏观尺度的整体流动行为之间可能存在复杂的相互作用。多尺度分析方法可以通过同时考虑不同尺度下的流动特性,揭示其内在的规律和机制。例如,可以采用大涡模拟和直接数值模拟方法来捕捉微观尺度下的湍流结构,进一步细化单根桩和相邻桩之间相互作用的研究,揭示局部流场特性及其对结构安全的影响。同时,结合传统的雷诺平均 Navier-Stokes 方法进行宏观尺度的流场分析。在大尺度上,可以考虑整个码头结构和周围环境的相互作用,采用多尺度数值模拟技术,研究整体流场和群桩水动力特性的耦合关系。通过多尺度耦合模拟,可以更准确地描述群桩水动力特性的整体行为,揭示不同尺度下群桩水动力特性的内在联系,构建更加全面的水动力模型。

4 结论

本文基于 Flow-3D 软件数值模拟分析了不同来流速度下 3×3 矩形布置的九圆柱绕流流场特性,重点探究了矩形排列群桩的速度场、压力场和涡量场的湍流特性。结果表明:

1) 当来流速度较小时,每个桩两侧均形成了一个高速区。随着流速的增加,上游桩和中游桩两侧流速大于自由来流速度的区域逐渐扩大并融合为一个更大的区域,而下游桩之间的高速区也呈现出逐渐扩大的趋势。

2) 上游桩后方的回流区范围较大,而中游桩和下游桩回流区的大小基本相同,均小于上游桩的回流区。

3) 随着来流速度的增加,剪切力和流体力逐渐增加,并且阻力随着来流速度的增加呈非线性增长趋势。上游桩受力最大,下游桩次之,中游桩受力最小。

4) 来流流速越大,群桩尾涡核心区的涡量也越大。中游桩和下游桩的桩后尾涡强度明显比上游桩的弱,中游桩和下游桩的尾迹涡长度随来流速度

的变化规律不明显。

5) 随着流速的增加,桩基周围形成了大量漩涡,漩涡强度显著提高,漩涡结构变得复杂,前桩与后桩之间的漩涡相互纠缠。

参考文献(References):

- [1] 庄茜,李绍武,祁泽鹏.基于有限体积法的群桩绕流数值模拟[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2015,48(5):445-454.
ZHUANG Qian, LI Shaowu, QI Zepeng. Numerical simulation for flow around pile group based on FVM[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2015, 48(5): 445-454.
- [2] BAI H L, ALAM M M. Dependence of square cylinder wake on Reynolds number[J]. 2018, 30(1): 015102. DOI: 10.1063/1.4996945.
- [3] WU B, LI S P, LI K, et al. Numerical and experimental studies on the aerodynamics of a 5:1 rectangular cylinder at angles of attack[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 199: 104097. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104097.
- [4] 康友良,董国朝,韩艳,等.基于双向流固耦合的灯柱涡激振动分析[J].交通科学与工程,2019,35(3):43-50. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.03.009.
KANG Youliang, DONG Guochao, HAN Yan, et al. Numerical simulation of the vortex-induced vibration of a lamppost based on the bidirectional fluid-solid interaction [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(3): 43-50. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.03.009.
- [5] QIN B, ALAM M M, JI C N, et al. Flow-induced vibrations of two cylinders of different natural frequencies [J]. Ocean Engineering, 2018, 155: 189-200. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.02.048.
- [6] 涂佳黄,黄林茜,何永康,等.低雷诺数下串列布置双圆柱涡激振动特性研究[J].力学学报,2022,54(1):68-82. DOI: 10.6052/0459-1879-21-381.
TU Jiahuang, HUANG Linxi, HE Yongkang, et al. Study on the vortex-induced vibration characteristics of two tandem cylinders at low Reynolds number [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(1): 68-82. DOI: 10.6052/0459-1879-21-381.
- [7] 胡彬,水庆象,王大国,等.特征线算子分裂有限元的圆柱绕流大涡模拟[J].水利水电科技进展,2017,37(2):27-32. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2017.02.005.
HU Bin, SHUI Qingxiang, WANG Daguo, et al. Large eddy simulation of flow around circular cylinder combined with characteristic-based operator-splitting finite element method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(2): 27-32. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2017.02.005.
- [8] 杜晓庆,林伟群,施春林,等.高雷诺数下并列双圆柱绕流的大涡模拟[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(6):

- 193-200. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201806039.
- DU Xiaoqing, LIN Weiqun, SHI Chunlin, et al. Large eddy simulation of flow around two side-by-side circular cylinders at a high Reynolds number [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(6): 193-200. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201806039.
- [9] CHEN W L, JI C N, WILLIAMS J, et al. Vortex-induced vibrations of three tandem cylinders in laminar cross-flow: vibration response and galloping mechanism [J]. Journal of Fluids and Structures, 2018, 78: 215-238. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2017.12.017.
- [10] 杨泉泉, 及春宁, 陈威霖, 等. 三角形排列圆柱绕流尾流模式及其流体力特性[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2019, 34(1): 69-76. DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2019.01.009.
- YANG Xiaoxiao, JI Chunning, CHEN Weilin, et al. Wake patterns and hydrodynamic forces of flow around circular cylinders in an equilateral triangular arrangement [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2019, 34(1): 69-76. DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2019.01.009.
- [11] 谭志荣, 熊劭, 王洋, 等. 高雷诺数下串列三圆柱绕流的大涡模拟[J]. 水运工程, 2022(12): 25-33. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20221129.016.
- TAN Zhirong, XIONG Mai, WANG Yang, et al. LES on flow past three tandem cylinders at high Reynolds number[J]. Port & Waterway Engineering, 2022(12): 25-33. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20221129.016.
- [12] HAN Z L, ZHOU D, HE T, et al. Flow-induced vibrations of four circular cylinders with square arrangement at low Reynolds numbers [J]. Ocean Engineering, 2015, 96: 21-33. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.12.002.
- [13] 姚文娟, 张旭炎, 何涛. 低雷诺数下四圆柱涡激振动特性研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2023, 38(6): 893-906. DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2023.06.009.
- YAO Wenjuan, ZHANG Xuyan, HE Tao. Numerical investigation on characteristics of vortex-induced vibration of four circular cylinders at low Reynolds numbers[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2023, 38(6): 893-906. DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2023.06.009.
- [14] 赵红晓. 多圆柱绕流的数值模拟及力学分析[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(7): 130-135. DOI: 10.19927/j.cnki.syyt.2023.07.026.
- ZHAO Hongxiao. Numerical simulation and mechanical analysis of flow around multiple cylinders[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2023, 42(7): 130-135. DOI: 10.19927/j.cnki.syyt.2023.07.026.
- [15] GAO Y Y, YANG K, ZHANG B F, et al. Numerical investigation on vortex-induced vibrations of four circular cylinders in a square configuration [J]. Ocean Engineering, 2019, 175: 223-240. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.02.012.
- [16] 干桂轩, 孙亮, 岳磊, 等. 规则波对大直径群桩作用的数值模拟研究[J]. 水利水运工程学报, 2020(6): 121-126. DOI: 10.12170/20191006001.
- GAN Guixuan, SUN Liang, YUE Lei, et al. Numerical simulations of the group effect of large-diameter columns in regular waves [J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(6): 121-126. DOI: 10.12170/20191006001.
- [17] 任理娇. 多圆柱系统在均匀流和振荡流作用下的同步响应研究[D]. 大连理工大学, 2021. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2021.004957.
- REN Chengjiao. Synchronisation behaviours of steady and oscillatory flows past multiple cylinders[D]. Dalian University of Technology, 2021. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2021.004957.
- [18] YANG Y L, QI M L, LI J Z, et al. Experimental study of flow field around pile groups using PIV [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2021, 120: 110223. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110223.
- [19] 齐洪亮, 袁天刚, 陈贵山, 等. 清水条件下淹没式透水桩群减少圆柱桥墩局部冲刷试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(2): 69-79. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.02.007.
- QI Hongliang, YUAN Tiangang, CHEN Guishan, et al. Experimental on local scour around cylindrical pier protected by submerged permeable pile group in clear water [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2023, 43(2): 69-79. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.02.007.
- [20] 刘小兵, 吴倩云, 姜会民, 等. 串列多圆柱气动力干扰效应的试验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(7): 37-44. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.07.005.
- LIU Xiaobing, WU Qianyun, JIANG Huimin, et al. Tests for aerodynamic force interference effect of tandem cylinders [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(7): 37-44. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.07.005.
- [21] 刘闯, 黄剑峰, 邵晨. 基于LBM-LES的三维串列多圆柱绕流尾流结构研究[J]. 应用力学学报, 2022, 39(1): 186-194. DOI: 10.11776/j.issn.1000-4939.2022.01.023.
- LIU Chuang, HUANG Jianfeng, SHAO Chen. Research on wake structure of three-dimensional tandem multi-cylinder flow based on LBM-LES[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(1): 186-194. DOI: 10.11776/j.issn.1000-4939.2022.01.023.
- [22] 吴苏莉. 倾斜旋转多柱体结构群流固耦合特性分析[D]. 湘潭大学, 2021. DOI: 10.27426/d.cnki.gxtd.2021.001479.
- WU Suli. Analysis of fluid-structure coupling characteristics of inclined rotating multi-cylinder structure [D]. Xiangtan University, 2021. DOI: 10.27426/d.cnki.gxtd.2021.001479.
- [23] ANDREAS R, MUTLU S B, JØRGEN F, et al. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 534: 351-401.

(责任编辑:石月珍)