

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.09.017

基于雷诺平均法的四圆柱桩绕流数值模拟研究

殷新锋¹, 杨鑫¹, 何博文², 黄胄¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要:为研究河海深水中水流对桥梁桩基础的动力学作用。文章基于 ANSYS/FLUENT 数值仿真软件, 采用雷诺平均法研究四圆柱桩的绕流特征, 分析 7 种不同迎流角及 3 种典型间距比下的四圆柱桩绕流场特征、各桩阻力系数及桩周床面所受切应力的分布。结果表明:迎流角与间距比均对四圆柱桩绕流特性有较强的影响;随迎流角从 0°增大到 45°, 下游桩周床面切应力分布模式由屏蔽状态逐渐转变为分离流冲击状态;当间距比为 1.0 时, 临界屏蔽角为 5°;当间距比为 1.5 或 2.0 时, 迎流角处在 20°~30°之间, 各桩阻力系数值均处于 1.0±0.2 范围, 此时屏蔽效应最小。

关键词:雷诺平均法;迎流角;间距比;四圆柱桩;数值模拟

中图分类号:TV135.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)09-1268-07

Numerical simulation of flow around four cylinder pile based on Reynolds averaging method

YIN Xinfeng¹, YANG Xin¹, HE Bowen², HUANG Zhou¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: In order to study the dynamic effects of water flow on bridge pile foundation in deep water, this paper analyzed the flow characteristics of four cylinder pile by using the Reynolds averaging method based on the ANSYS/FLUENT numerical simulation software, and studied the flow field characteristics of four cylinder pile under seven different angles of incoming flow and three typical spacing ratios, the drag coefficient of each pile and the distribution of shear stress on the bed surface around the pile. The results show that both the angle of incoming flow and the spacing ratio have a strong influence on the flow characteristics of the four cylinder pile. With the angle of incoming flow increasing from 0° to 45°, the shear stress distribution mode of the downstream pile bed surface gradually changes from the shielded state to the separated flow impact state. When the spacing ratio is 1.0, the critical shielding angle is 5°. When the spacing ratio is 1.5 or 2.0, and the angle of incoming flow is between 20° and 30°, the drag coefficient of each pile is in the range of 1.0±0.2, and the shielding effect is minimal.

Key words: Reynolds averaging method; angle of incoming flow; spacing ratio; four cylinder pile; numerical simulation

桥梁工程技术的迅速发展,解决了很多施工困难,如今修建跨越海峡、深山峡谷的大型桥梁已成常态。越来越多的跨河、跨海工程的崛起为经济的快速发展提供了条件,同时一些更深入的学术问题仍需要攻克。桥梁桩基础以及桩周河床长

期受水流的动力学作用,导致桥梁产生病害,威胁桥梁的使用寿命。桥梁基础结构多为群桩形式,相比于单墩形式,群桩结构之间的互扰效应,使得其周围的流场结构、床面冲刷机理更为复杂。方型布置四圆柱系统作为多柱结构布置的基本单

收稿日期:2023-01-13;修回日期:2023-04-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078057)

作者简介:殷新锋(1980—),男,安徽安庆人,博士,长沙理工大学教授,博士生导师。

元,广泛的应用于跨河、跨海桥梁等工程领域^[1]。因此,为保障桥梁的正常使用,本文对四圆柱桩基础的绕流问题进行研究,通过了解其流动机理和水动力学规律,保证桥梁结构安全。

水流作用下,圆柱形桩的几何特征会影响水流的流场,而且群桩排列下的水流作用更为复杂。文献[1]采用数值模拟与试验研究相结合的方法,对正列四圆柱在不同间距比、迎流角、雷诺数工况下的流场特性进行深入研究,并总结“偏斜尾流”模态发生的区间范围;文献[2]采用大涡模拟技术分析四圆柱体绕流特性,得出间距比的变化下下游圆柱表面压力系数变化规律;文献[3]采用改进的延迟分离涡方法数值模拟高雷诺数下的方柱、圆柱体绕流,发现圆柱形结构的绕流分离点会因雷诺数的改变而变化;文献[4]基于阻力叠加原理提出桩单元水流阻力计算公式,并且针对群桩中各桩之间的屏蔽效应,提出一种计算概化模式;文献[5]通过试验研究不同水流条件、间距比下群桩的冲刷效应;文献[6]基于改进数值模型的方法,研究单、双圆柱桥墩及群桩基础的局部冲刷影响;文献[7]采用物理试验研究单圆柱情况下的冲刷形态,并通过数值模拟分析了冲刷的发展机理。从上述研究可知,间距比、迎流角、雷诺数等参数对于四圆柱结构柱体之间流场的影响很大。

本文采用 ANSYS/FLUENT 数值模拟软件,基于雷诺平均法对水流作用下四圆柱桩基础的流场特性进行计算,得到水流作用下四圆柱桩的三维流场特征,并建立合理底面粗糙壁面边界条件模拟河床。开展不同迎流角、间距比条件下四圆柱桩绕流特性的数值模拟研究,得出正方形排列四圆柱桩的流态特征随迎流角、间距比变化的规律及桩周床面切应力的分布特征。

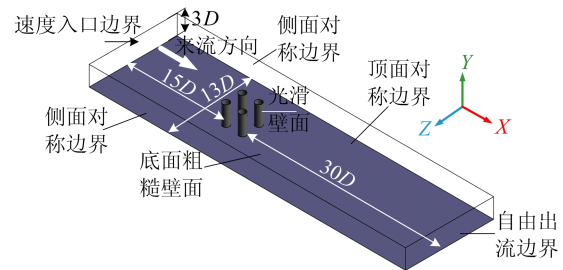
1 计算方法

1.1 计算域及边界条件

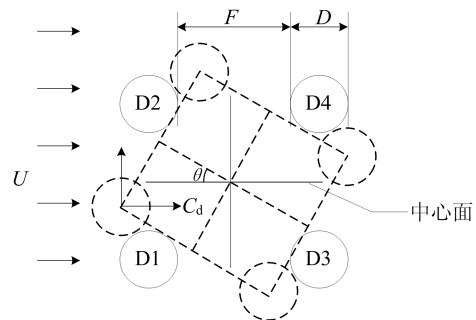
四圆柱桩计算模型如图1所示。计算域入口到上游桩前端距离设置为 $15D$,下游桩后端到出口的距离取 $30D$,计算域的宽度则为 $13D$,高度为 $3D$ 。计算域的水深取 $h=0.06$ m,设置入口来流速度 $U=0.246$ m/s,来流方向与 X 轴正向一致,流体动力黏度系数 $\mu=0.001\ 003$ Pa·s,流体密度 $\rho=998.2$ kg/m³,圆柱直径 $D=0.02$ m,雷诺数 $Re=\rho UD/\mu\approx 4\ 900$ 。

迎流角与间距比的定义如图1b所示,其中均匀来流方向与四圆柱水平中心面的夹角,称为迎流

角 θ ; $n=F/D$ 为间距比(相邻两桩之间的净间距即 F),圆柱编号分别为 $D1$ 、 $D2$ 、 $D3$ 、 $D4$ 。



(a) 三维计算模型



(b) 迎流角和间距比

图1 四圆柱桩计算模型

在群桩基础结构中,方形布置的四圆柱结构是最常见的结构形式,因此本文采用正方形布置 2×2 的四圆柱桩结构为研究对象,计算参数设置3种典型间距比 n 分别为 1.0 、 1.5 、 2.0 ;迎流角 θ 分别为 0° 、 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 30° 、 45° 。

入口条件:入口采用速度入口边界条件,切向速度为0,只有法向速度;出口条件:出口采用自由出流边界条件;侧面与顶面采用对称边界条件;底面粗糙壁面采用无滑移的壁面边界条件;重力加速度为 -9.81 m/s²,设置非定常流动为流体流动方式。

1.2 控制方程

雷诺平均法的控制方程是将非稳态的 Navier-Stokes(N-S)方程进行时间平均化,也就是将流体流动按照时间平均流动与脉动流动进行叠加。即将瞬时 N-S 方程中的解变量分解为平均分量和脉动分量^[7]。得到:

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i' u_j'}) + f_i \end{aligned} \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \quad (3)$$

其中: t 为时间;对于三维流动, x_i 为笛卡尔坐标

下 3 个方向的坐标; u_i 为此坐标系下时均流速分量; u_i' 为此坐标系下的脉动速度分量; ρ 为流体密度; μ 为流体的动力黏度系数; p 为作用在流体表面的平均压力; δ_{ij} 为克罗内克符号, 当 $i=j$ 时 $\delta_{ij}=1$, 当 $i \neq j$ 时 $\delta_{ij}=0$; f_i 为作用在流体上的体积力(在本文中仅考虑重力)。式(2)中包含了脉动量乘积的时均值 $\overline{\rho u_i' u_j'}$ 未知量称为雷诺应力, 因此要使方程闭合需要将雷诺应力补偿模型模拟出来。

1.3 湍流模型及网格划分

本文采用的湍流模型是由文献[8]提出的考虑湍流剪切应力输运的 $k-\omega$ 模型, 称为剪切应力传输 (shear stress transport, SST) 模型, 其中 k 是湍流动能, ω 是湍流动能的特定耗散率, 该模型混合了 $k-\omega$ 模型重现近壁流动行为的能力和 $k-\epsilon$

模型在自由流区域的能力。该模型引入的混合函数在近壁区域被设计成为 1, 此时激活标准 $k-\omega$ 模型, 远离表面时为 0, 此时激活转换后的 $k-\epsilon$ 模型, 同时利用 2 种模型各自的优势, 提高了 SST 模型在近壁区绕流和旋流方面的可信度。

计算域内横向、垂向平面网格划分示意图如图 2 所示, 本文采用 Workbench Mesh 程序进行网格划分, 计算域内所有网格均为六面体网格, 对四圆柱桩群的正方形局部区域内整体加密; 同时, 考虑到要获取准确的桩周床面切应力分布, 底面河床壁面附近网格的划分十分重要, 因此, 本文垂向网格划分自上至下以适当比例不断加密, 到底面河床壁面的第 1 层网格高度为 0.000 5 m。

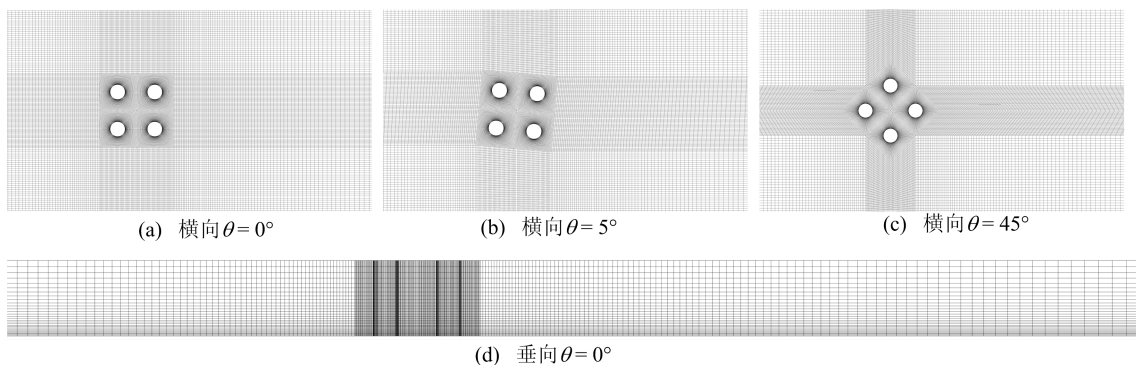


图 2 横向平面、垂向平面网格划分

1.4 求解流程

本文基于 ANSYS/FLUENT 商用软件, 采用有限体积法进行空间离散, 求解器为压力基求解器, 压力与速度的解法采用 SIMPLE 算法^[9]。计算流程如图 3 所示。

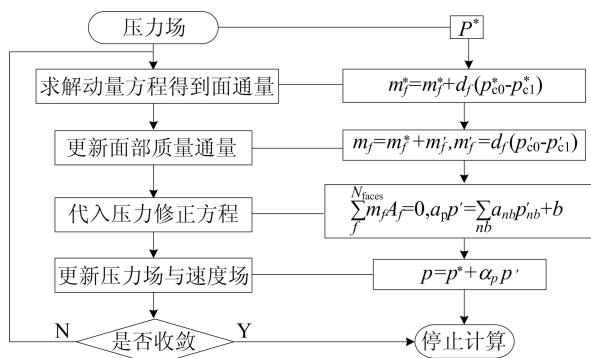


图 3 计算流程图

1.5 算例验证

1.5.1 单圆柱模型验证

本文所采用的雷诺应力模拟模型是 $k-\omega$ 模型中的 SST 模型, 为验证湍流模型、网格划分及各

项参数设置的正确性, 首先进行单圆柱模型数值模拟验证, 模型如图 4 所示。

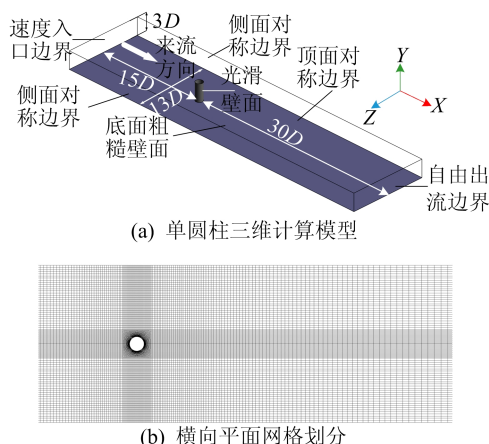


图 4 本文单圆柱验证模型

圆柱桩的阻力系数定义为:

$$C_d = \frac{2f_{\text{Drag}}}{\rho U^2 A_{\text{ref}}} \quad (4)$$

其中: ρ 为流体密度; U 为流体流动速度; f_{Drag} 为圆柱桩受到流体沿水流方向的分力; A_{ref} 为圆柱桩在

迎水面(垂直于水流方向)上的投影面积。

采用本文方法计算了 $Re=3\ 900$ 工况下的单圆柱绕流的数值模拟结果,并将平均阻力系数值与已有的文献结果进行对比分析,结果见表 1 所列。由表 1 可知,本文方法计算的平均阻力系数与文献[2]、文献[10]、文献[12]的结果吻合较好,体现了本文方法进行单圆柱模拟的准确性。

表 1 单圆柱计算结果与文献结果对比

数据来源	平均阻力系数
文献[2]	1.033
文献[10]	0.990
文献[11]	1.040
文献[12]	1.130
本文	1.026

1.5.2 四圆柱模型验证

本文四圆柱模型的计算模型及网格划分如图 1、图 2 所示。雷诺数在 $10^3 \sim 10^5$ 内均属亚临界区,圆柱绕流计算模型雷诺数处于亚临界区时,流态特征相接近,文献[13-14]的试验模型雷诺数分别为 2 100 和 8 000,因此将本文雷诺数为 4 900 的模拟结果与亚临界区内文献[13-14]的物理试验结果对比,由验证结果可知,本文上游桩平均阻力系数值与文献结果相比偏小,下游桩平均阻力系数值与文献结果吻合较好。

对单圆柱与四圆柱情况进行对比验证,结果如图 5 所示,结果证明了本文模型的适用性,因此可以采用本文方法对四圆柱桩的绕流过程进行数值模拟分析。

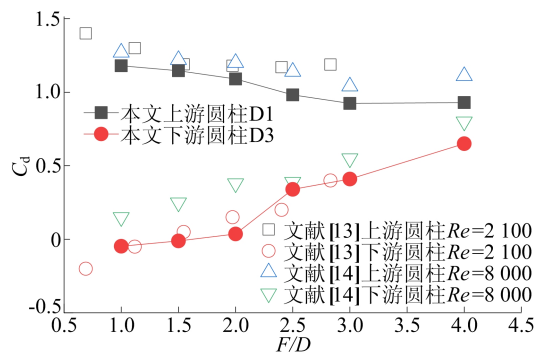


图 5 四圆柱计算结果与文献结果对比

2 计算结果与讨论

2.1 桩周床面切应力分析

桩基础周围河床受到水流脉动作用,会造成桩周附近河床的局部冲刷,影响桩基础的稳定性。

考虑到这种冲刷效应与床面所受切应力有直接联系,本节研究了床面切应力随迎流角及间距比变化的特性。床面切应力可通过作用在河床壁面边界上的水流强度来体现,其表达式^[15]为:

$$\tau_w = \rho u_*^2 \quad (5)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{\mu U}{y} + \rho k C_\mu \right)} \quad (6)$$

其中: y 为到壁面的距离; k 为湍动能; C_μ 为经验常数,值为 0.09。

平床条件下迎流角 0° 、 5° 、 45° 时不同间距比下桩周附近床面的切应力分布如图 6~图 8 所示。

由图 6 可知, $\theta=0^\circ$ 时上游桩的床面最大切应力发生在桩侧,值为 1.4 Pa 左右,其发生方向的切线与水流方向夹角在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间,其原因是水流在经过圆形桩时的绕流导致桩两侧剪切速度增大,因此圆形桩在两侧位置床面切应力最大;下游桩外侧由于受到上游桩外侧剪切层的覆盖,产生了屏蔽效应,而下游桩内侧因受桩间的间隙流冲击影响,因此导致下游桩的床面最大切应力发生在桩身内侧,值为 1.1 Pa 左右,其切线与水流方向夹角在 $0^\circ \sim 10^\circ$ 之间,随着间距比增大间隙流冲击影响越小,下游桩内侧的床面最大切应力值及切线与水流方向夹角也相应变小。说明下游桩受上游桩的屏蔽效应影响,床面所受切应力也随之变小,桩身外侧切应力减少约 0.7 Pa,内侧切应力减少约 0.3 Pa。

由图 7 可知,在 $\theta=5^\circ$ 、间距比为 1.0 的情况下,上游桩剪切层对下游桩的屏蔽效应还是较大,此时 D3 外侧床面切应力相较 $\theta=0^\circ$ 时的情况还没有明显的增大,均在 0.7 Pa 左右;而对比图 7b、图 7c,可知,当 $\theta=5^\circ$ 、间距比为 1.5 或 2.0 时,下游桩 D3 外侧与 D4 内侧的床面最大切应力相较 $\theta=0^\circ$ 时分别增大了 0.4、0.2 Pa。可以得出,间距比为 1.0 时上游桩的剪切层对下游桩的屏蔽角在 5° 左右,而由于间距增大,间距比为 1.5 或 2.0 时上游桩的剪切层对下游桩的屏蔽效应也相应减弱。

由图 8 可知, $\theta=45^\circ$ 时,D2、D3 号桩侧床面最大切应力值已经超过了桩 D1 号桩,最大值达到了 1.7 Pa 左右。其原因是迎流角从 0° 增大至 45° 的过程中,上游桩后的尾流发展方式逐渐从屏蔽下游桩的状态转变成了冲击下游桩,因此当 $\theta=45^\circ$ 时桩 D2、桩 D3 是受到了自身充分迎流和桩 D1 分离流冲击的双重影响。

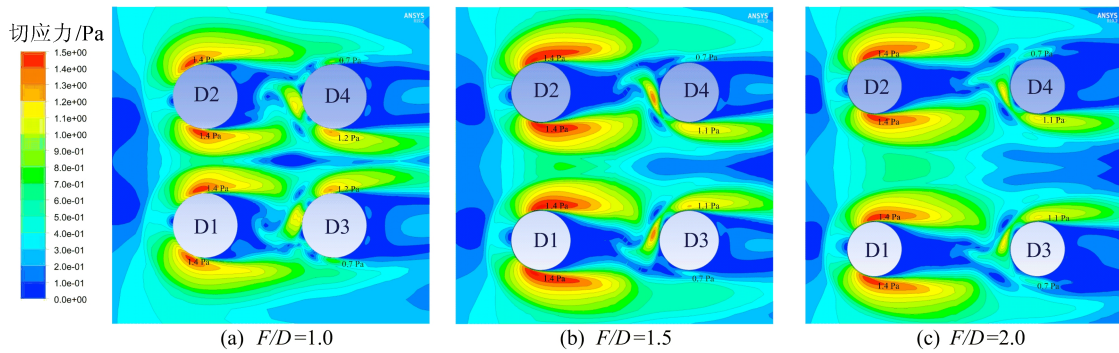


图 6 $\theta=0^\circ$ 时不同间距比下的桩周床面切应力分布云图

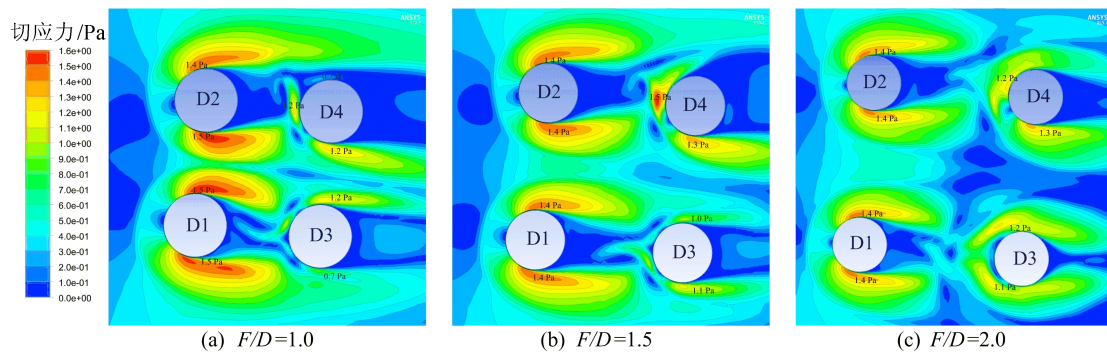


图 7 $\theta=5^\circ$ 时不同间距比下的桩周床面切应力分布云图

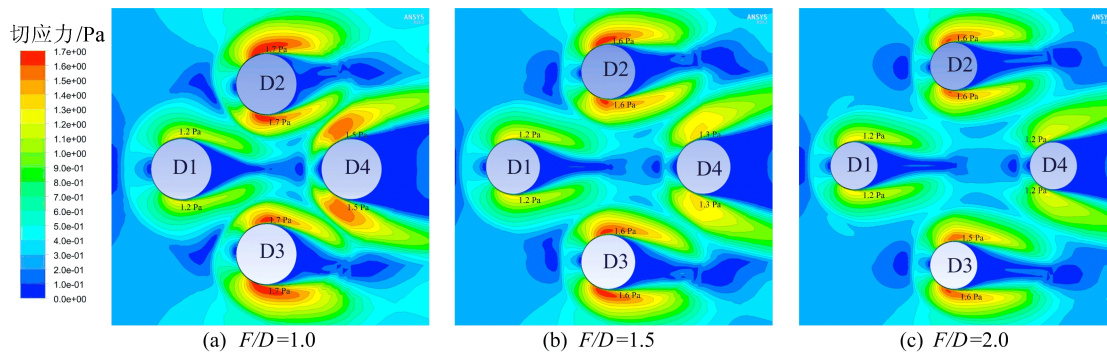


图 8 $\theta=45^\circ$ 时不同间距比下的桩周床面切应力分布云图

2.2 流体阻力参数分析

阻力受力示意图如图 9 所示。

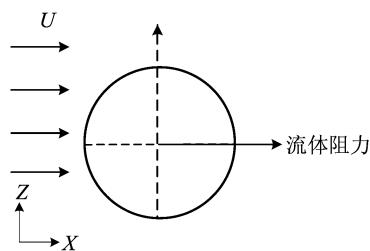
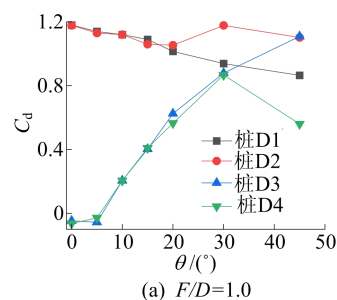


图 9 圆柱桩受到流体阻力的方向

在 3 种典型间距比工况下,各桩平均阻力系数随 θ 变化如图 10 所示。从图 10 可以看出,随着 θ 不断增大,桩 D1、D2 平均阻力系数的波动比桩 D3 和 D4 小得多;随着 θ 从 0° 增大至 45° , D3 的平均阻

力系数值也不断增大直至与桩 D2 平均阻力系数相接近;而下游桩 D4 的平均阻力系数在 θ 为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 时达到峰值,最后再下降至 0.6 左右。其原因是 $\theta=45^\circ$ 时,桩 D4 受到其他圆柱桩共同干扰而被屏蔽。以致 D4 的平均阻力系数明显小于其他 3 个圆柱。



(a) $F/D=1.0$

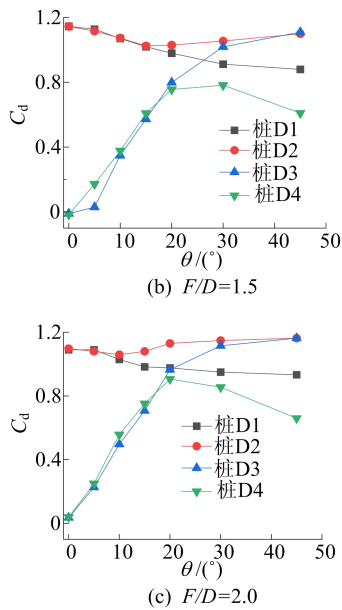


图 10 各桩平均阻力系数随迎流角变化

2.3 桩间间隙流流速分析

中心面处特征纵剖面示意图如图 11 所示。迎流角 0°时,1.0、1.5、2.0 这 3 种间距比下四圆柱桩中心面间隙流的纵向及垂向流速情况分别如

图 12、图 13 所示。

其中,纵向同来流方向一致,垂向与来流方向垂直, X/D 是距离上游圆柱中心点的相对距离。

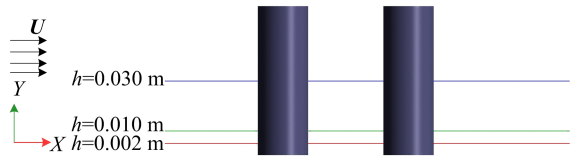


图 11 中心面处不同高度的特征纵剖面示意图

从图 12 可以看出,在群桩的上游区域($X/D < -1$)纵向流速在越来越接近上游桩前时慢慢变小,并且高间距比的纵向流速相对大于小间距比时的纵向流速,这说明四圆柱桩存在一定的整体效应,且间距越小,四桩的整体阻水效应就越明显;同时在群桩下游区域($X/D > 3$),高间距下的纵向流速也相对大于低间距时的流速,这也说明间距越小,阻水能力越强,因而桩后流速也偏小,间距越大时,桩间区域能够通过流量更多,因此高间距比的间隙流流速相比低间距比时增大。

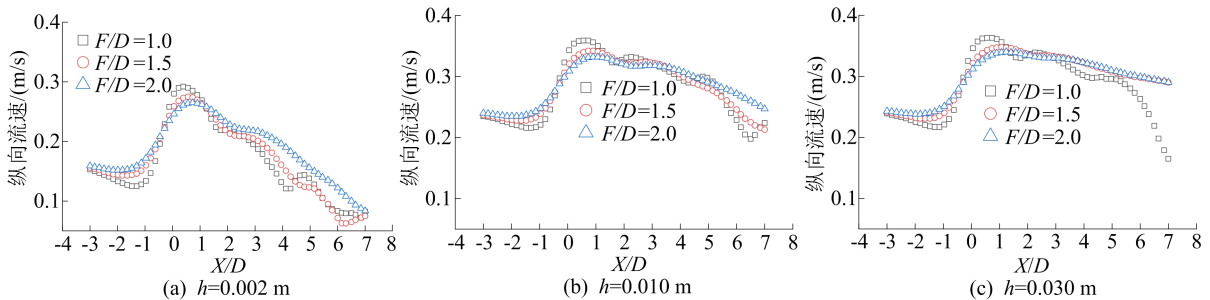


图 12 不同间距比下中心面上各特征纵剖面纵向流速

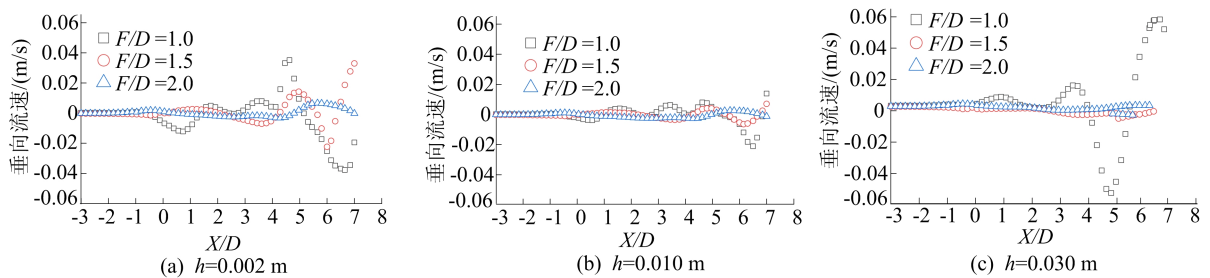


图 13 不同间距比下中心面上各特征纵剖面垂向流速

从图 12c、图 13c 可以看出,1.5、2.0 这 2 种间距比的流速曲线已经接近一致,这说明随着桩间距的增大,桩间区域的间隙流所受圆形桩几何特征的影响越来越小,由以上分析可以得出,间距比大于 1.5 后间隙流的发展会越来越趋于稳定。

3 结 论

本文基于计算流体力学理论,采用 FLUENT 数值模拟软件分析了迎流角、间距比变化下的床面切应力分布,揭示了水流作用下各圆柱桩之间的相互影响规律,对工程实践具有一定意义,可得

出结论如下。

1) 随迎流角从 0° 增大到 45° , 下游桩周围河床的床面切应力分布模式由屏蔽状态向分离流冲击状态转变。

2) 间距比为 1.0 时上游桩的剪切层对下游桩的屏蔽角在 5° 左右; 随间距比的增大, 上游桩的剪切层对下游桩的屏蔽效应减小。

3) 间距比为 1.5 或 2.0 工况下, 迎流角位于 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间时, 各桩阻力系数值均处于 1.0 左右, 屏蔽效应最小。

4) 当迎流角为 0° 时, 对比典型间距下的间隙流流速, 当间距比大于 1.5 后桩间区域的间隙流受圆形桩几何特征的影响越来越小; 实际工程中可通过调整迎流角、间距比的布置, 优化设计方案, 降低水流的动力学作用, 保障工程结构安全。

参 考 文 献

- [1] 殷长山. 方型布置四圆柱绕流的试验及数值研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [2] 涂佳黄, 唐彪, 曹波, 等. 正方形排列四圆柱体绕流特性及互扰效应研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(1): 32-40, 471.
- [3] 李聪洲, 张新曙, 胡晓峰, 等. 高雷诺数下多柱绕流特性研究[J]. 力学学报, 2018, 50(2): 233-243.
- [4] 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.
- [5] 杨熠琳. 桥梁群桩基础局部冲刷机理研究[D]. 北京: 北京

交通大学, 2020.

- [6] 喻鹏. 改进数值模型与群桩基础桥墩局部冲刷的 CFD 模拟[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [7] 金亚昆. 桥墩局部冲刷坑发展中的三维紊流场研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [8] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 269-289.
- [9] PATANKAR S V, SPALDING D B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows [J]. Journal of Heat Mass Transfer, 1972, 15(10): 1787-1806.
- [10] ONG L, WALLACE J. The velocity field of the turbulent very near wake of a circular cylinder [J]. Experiments in Fluids, 1996, 20(6): 441-453.
- [11] KRAVCHENKO A G, MOIN P. Numerical studies of flow over a circular cylinder at $Re=3\ 900$ [J]. Physics of Fluids, 2000, 12(2): 403-417.
- [12] 端木玉, 万德成. 雷诺数为 3 900 时三维圆柱绕流的大涡模拟[J]. 海洋工程, 2016, 34(6): 11-20.
- [13] LAM K, LI J Y, SO R M C. Force coefficients and Strouhal numbers of four cylinders in cross flow [J]. Journal of Fluids and Structures, 2003, 18(3/4): 305-324.
- [14] WANG X K, GONG K, LIU H, et al. Flow around four cylinders arranged in a square configuration [J]. Journal of Fluids & Structures, 2013, 43: 179-199.
- [15] 陈小莉. 局部绕流冲刷机理及数值模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 1254 页)

- [16] ZHU L, YU W, ZHOU K R, et al. Order fulfillment cycle time estimation for on-demand food delivery [C]//The 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining (KDD'20). New York: Association for Computing Machinery, 2020: 2571-2580.
- [17] 王强, 林友芳, 万怀宇. 基于多任务学习的快件送达时间预测方法[J]. 计算机工程, 2022, 48(4): 324-330.
- [18] ADITYA G, JURE L. Node2vec: scalable feature learning for networks [C]//The 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'16). New York: Association for Computing Machinery, 2016: 855-864.
- [19] 陈颖婷, 林耿, 陈梦, 等. 融合多头自注意力的问答社区专家推荐算法[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(5): 1452-1458.

- [20] SONG W P, SHI C C, XIAO Z P, et al. AutoInt: automatic feature interaction learning via self-attentive neural networks [C]//The 28th ACM International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM'19). New York: Association for Computing Machinery, 2019: 1161-1170.
- [21] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning [J]. Nature, 2015, 521(7553): 436-444.
- [22] SUN Y W, WANG Y L, FU K, et al. FMA-ETA: estimating travel time entirely based on FNN with attention [C]//ICASSP 2021-2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Toronto: IEEE, 2021: 3355-3359.

(责任编辑 张 镅)