

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2023.01.001

单向流作用下多桩承台式基础局部 冲刷数值模拟研究

宋木清, 及春宁*, 许栋

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350, E-mail: cnji@tju.edu.cn)

摘要: 该文在清水条件下, 对海上风电多桩承台式基础的局部冲刷进行了数值研究。结果表明, 冲刷过程、深度和流场特征受到桩间距比($G/D=2.0\sim 5.0$, G 为桩柱中心距, D 为桩柱直径)的影响显著。不同 G/D 下, 冲刷坑形态产生较大差异: 当 $G/D=2$ 时, 冲刷特性与单桩局部冲刷特性较为相似; 当 $G/D=3$ 时, 上游桩后尾涡脱落相互作用, 产生顺流向涡结构, 显著削弱了下游桩前马蹄涡强度, 降低了冲刷速度; 当 $G/D=4$ 和 5 时, 上游桩后尾涡脱落作用于下游桩, 加速下游桩周泥沙起动, 在下游产生了更大的冲刷深度。此外, 还讨论了不同 G/D 情况下的尾涡脱落模式及其与泥沙运输的相互作用。

关键词: 海上风电; 群桩基础; REEF3D; 局部冲刷

中图分类号: TU476

文献标志码: A

Numerical Investigation on Local Scour of Offshore Multi-pile Foundation under Unidirectional Flow

SONG Muqing, JI Chunning*, XU Dong

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University,
Tianjin 300350, China)

Abstract: Local scour around offshore wind turbine multi-piles foundation is numerically investigated under clear-water conditions. The characteristics of the scour process, depth, and flow fields are shown to be significantly influenced by the pile gap ratio ($G/D=2.0\sim 5.0$, G and D are the gap distance between centers of the piles and diameter of the piles, respectively). Under different G/D , the scour hole morphology is quite different. When $G/D=2$, the characteristic of multi-piles local scour is similar to the single pile. When $G/D=3$ the front piles vortex shed and interact with each other, creating a streamwise vortex structure that significantly weakens the horseshoe vortex in front of the rear piles and reduces the scouring rate. When $G/D=4$ and 5 , the vortex shedding from the front pile impinges on the upstream face of the rear pile, which significantly mobilizes the sand around the rear pile, and thus leads to a deeper scour hole. In present paper, the vortex shedding patterns and their interaction with the sediment transport in different G/D cases are also discussed.

Key words: Offshore wind power; Multi-piles foundation; REEF3D; Local scour

0 引言

风力发电是新能源发电中技术最成熟及最具规模开发条件的发电方式之一。由于海上风电具备风能资源稳定和距离负荷中心较近等优势, 近年来成为世界各国风电发展的重要方向^[1]。多桩承台基础施工工艺技术成熟, 被广泛应用于海上风电领域中。海上风机基础作为海洋孤立式结构物的一种, 运行

环境恶劣, 长期遭受潮流和波浪的作用, 基础结构周围的土体会不断地遭受侵蚀^[2], 风机基础周围的冲刷现象显著, 大尺度冲刷坑的形成使海上风机基础面临失稳破坏的威胁。因此准确预测海上风机基础周围的局部冲刷特性, 对于海上风电的发展具有重要的经济价值和工程意义。

目前, 已对单桩局部流场结构有基本认知: 桩柱改变了原有流场, 来流在桩前分为三部分, 向上流动形成桩前雍水; 向下部分形成下降水流, 并在床底向上游卷起, 形成马蹄涡; 绕过桩柱两侧的流

收稿日期: 2022-05-25 **修改稿收到日期:** 2022-06-29

作者简介: 宋木清(1997—), 男, 硕士。

动在桩后形成卡门涡街。但目前对恒定流作用下,群桩冲刷研究相对较少。很多学者对不同群桩布置形式和桩间距对冲刷的影响进行了研究。Hannah^[3]进行了1(垂直于水流方向)×2(顺水流方向)、1×3、2×2和2×3群桩布置形式的冲刷试验,发现:随着垂直于水流方向的桩数增加,冲刷深度明显增大,随着桩间距的增大,这种影响机制减弱,顺水流方向的桩数对冲刷的影响较小。Amini等^[4]研究了群桩纵横排桩数、桩间距均匀与否和淹没率等因素的影响,提出当给定群桩桩间距时,冲刷的主要控制因素为垂直于水流方向的桩数,并根据试验数据对群桩桩间距的影响系数进行了修正,建立了一个计算群桩桩周局部冲刷深度的计算公式。Amini等^[5]通过试验发现:在均匀桩间距条件下,随着垂直于水流方向桩间距的增大,最大冲刷深度减小,顺水流方向的桩间距则对冲刷有较小的影响;在非均匀桩间距条件下,垂直于水流方向的桩间距对冲刷深度的影响最显著。Ataie-Ashtiani等^[6]主要考虑了群桩排列形式、桩个数和桩间距的影响,提出了新的群桩修正系数用于预测群桩的冲刷深度。卢中一等^[7-8]试验研究了来流夹角对梅花形排列群桩冲刷的影响,进而提出了群桩夹角系数来修正冲刷深度预测公式。Liang等^[9]针对单桩、双桩以及3×3桩进行冲刷试验,根据试验结果对现有的不同群桩冲刷预测公式进行了对比评价。王鑫^[10]进行了2×2、2×3及梅花四桩布置形式的群桩冲刷试验,研究了水流条件、桩间距、桩数及排列形式对群桩冲刷的影响,并拟合出了群桩冲刷深度与弗劳德数 Fr 之间的函数关系。Lançã等^[11]研究了桩间距、来流夹角、桩的个数及布置形式对冲刷模式以及平衡冲深的影响。

目前针对群桩冲刷的研究成果相对较少,且在以往研究中,主要以河流中的桥墩布置形式为主,而对海上风电的基础形式(如多桩承台式基础)则研究较少。多桩承台式基础局部冲刷不是多个单桩局部冲刷的简单叠加,相邻桩柱的水流结构和局部冲刷过程存在复杂的相互作用,其冲刷深度和范围远大于单桩基础局部冲刷,导致多桩承台式基础更容易发生失稳破坏。

因此,本文针对多桩承台式基础,研究单向流作用下间距比对于流动特性和局部冲刷特征的影响。

1 数值方法与模型设置

1.1 控制方程

本文使用开源计算流体力学代码REEF3D(www.reef3d.com)。REEF3D是挪威科技大学Bihs博士及其团队开发的海岸工程和海洋工程三维水动力学程序,可以模拟水流、波浪作用下结构物受力、运动以及结构物周围局部冲刷问题^[12]。本节将对REEF3D三维水沙模型的原理做简要介绍。

流动控制方程包括连续性方程和雷诺平均Navier-Stokes(RANS)方程。

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + g_i \quad (2)$$

式中, ρ 为流体的密度, t 为时间, u_i 为时均速度, p 为时均压强, v 为流体分子运动黏滞系数, v_t 为湍流引起的涡黏系数, g_i 为加速度。采用5阶加权本质无震荡格式(WENO)对控制方程进行离散,时间使用三阶Runge-Kutta显式格式,同时使用自适应步长。湍流模型使用 $k-\omega$ 模型^[13]。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta_k k \omega \quad (3)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\omega}{k} \alpha P_k - \beta \omega^2 \quad (4)$$

$$P_k = v_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

$$v_t = \frac{k}{\omega} \quad (6)$$

式中: k 为湍流动能, ω 为湍流动能耗散率, P_k 为湍流动能生成项, α 、 β_k 、 β 、 σ_k 和 σ_ω 为经验系数,分别取值为5/9、0.09、3/40、2和2。

REEF3D采用水平集法对自由表面进行模拟。通过定义有符号距离函数的零水平集 $\phi(\mathbf{x}, t)$ 来表示空气-水和水-泥沙之间界面的位置。对于空气-水界面, 通过求解以下方程求出水平集函数 $\phi(\mathbf{x}, t)$ 。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_j \frac{\partial \phi}{\partial x_j} = 0 \quad (7)$$

对于水-泥沙界面, 方程如下

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + F \left| \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right| = 0 \quad (8)$$

式中: F 为床面沿其法线方向的变化速度, 计算如下

$$F = \frac{\partial z_b}{\partial t} \quad (9)$$

式中: z_b 为局部床面高程。床面变化速度 F 由推移质、悬移质冲刷和沉降决定, 并依赖于局部床面切应力, 即采用Exner方程求解

$$(1 - p')F = -\frac{\partial q_{B,x}}{\partial x} - \frac{\partial q_{B,y}}{\partial y} - E + S \quad (10)$$

式中: p' 为床床的孔隙率, $q_{B,x}$ 和 $q_{B,y}$ 分别为推移质在 x 和 y 方向的输沙率, E 为悬移质冲刷率, S 为悬移质沉降率。

推移质计算使用van Rijn推移质输沙率公式^[14]

$$\frac{q_{b,i}}{d_i^{1.5} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho)g}{\rho_s}}} = 0.053 \cdot \frac{\left(\frac{\tau - \tau_{c,i}}{\tau_{c,i}} \right)^{2.1}}{\left\{ d_i \left(\frac{\rho_s / (\rho - 1)g}{v^2} \right)^{1/3} \right\}^{0.3}} \quad (11)$$

式中: ρ_s 为泥沙密度, d_i 为泥沙颗粒直径, $\tau_{c,j}$ 为通过希尔兹曲线图得到的临界起动切应力, τ 为切应力, 计算如下

$$\tau = -\rho(v_i + v) \frac{\partial u}{\partial z} \quad (12)$$

悬移质沉降率 S 的计算公式^[15]为

$$S = w_s c_b \quad (13)$$

式中: w_s 为泥沙沉速, c_b 为床面处含沙量, 计算公式如下

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + w_s \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) \quad (14)$$

式中: Γ 为泥沙扩散系数, 等于涡黏系数。

悬移质冲刷率 E 的计算公式为

$$E = w_s c_{bed,susp,load,i} \quad (15)$$

式中: $c_{bed,susp,load,i}$ 为距床面 $0.05h$ 处含沙量, h 为水深。

$$c_{bed,susp,load,i} = 0.015 \frac{d_i}{a} \cdot \frac{\left(\frac{\tau - \tau_{c,i}}{\tau_{c,i}} \right)^{1.5}}{\left\{ d_i \left(\frac{\rho_s / (\rho_w - 1)g}{v^2} \right)^{1/3} \right\}^{0.3}} \quad (16)$$

基于笛卡尔网格进行网格划分, 使用虚拟单元(Ghost Cell)浸入边界法模拟水-泥沙边界。同时添加沙滑算法, 并考虑床面切应力折减。

1.2 数值模型验证

根据Roulund等^[16]的直立桩柱绕流实验进行水流模型验证。计算域长度为20 m, 宽度为10 m, 高度0.6 m, 网格大小为0.025 m。计算域左侧设为入流边界条件, 使用对数流速分布, 右侧为出流边界条件, 两侧及底部为壁面边界条件, 顶部为对称边界条件。水深为0.54 m, 平均流速为0.326 m/s, 床面粗糙高度为1.0 cm, 摩阻流速为0.023 m/s, 雷诺数为 1.75×10^5 。模拟时长为100 s。提取 $x=15.0$ m处的流速垂向分布与物理实验数据对比, 结果如图1所示。由图中可知, 数值吻合良好, 水流模型满足精度要求。

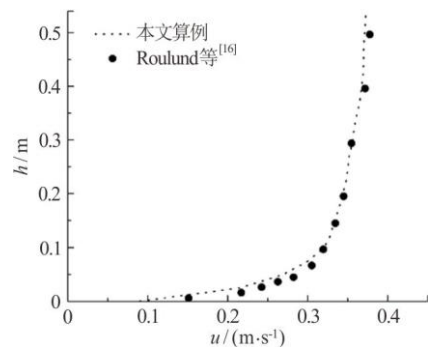


图1 流速验证

Fig.1 Verification of flow velocity

根据Melville等^[17]的圆柱形桥墩的清水局部冲刷实验进行冲刷模型验证。圆柱直径为 $D=0.07\text{ m}$ 。Shen等^[18]的研究表明,计算域宽度超过 $8D$ 后,边壁影响可忽略不计。计算域尺寸为 $1.4\text{ m}\times 0.56\text{ m}\times 0.6\text{ m}$,圆柱置于距离速度入口 $10D$ 处,计算域示意图如图2所示。网格尺寸为 $1/8D$,即 0.00875 m 。水深为 0.2 m ,泥沙中值粒径为 0.96 mm ,平均流速为 0.231 m/s ,平均流速与泥沙起动临界速度的比值为 0.688 ,临界起动希尔兹数为 0.03 。左侧设为入流边界条件,使用对数流速分布;右侧为出流边界条件;两侧及底部为壁面边界条件;顶部为对称边界条件。

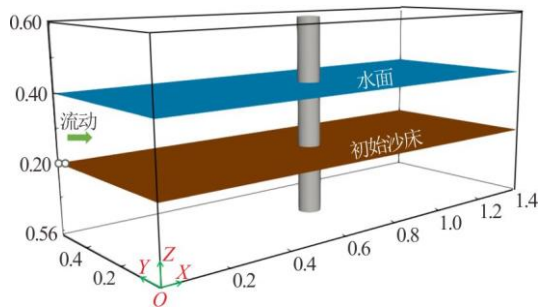


图2(网上彩图) 验证模型示意图

Fig.2 (Color online) Computational domain and setup for the validation case

该算例为清水冲刷,最大冲刷深度曲线如图3所示,模拟计算63 h时达到平衡冲刷深度,平衡冲刷深度与物理实验结果基本吻合。

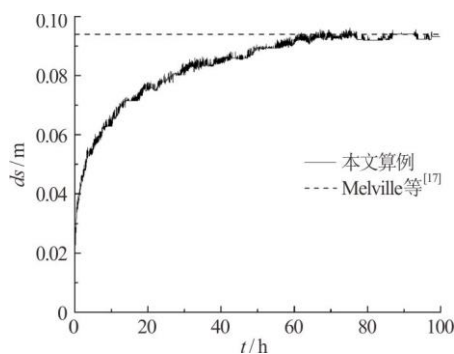


图3 最大冲刷深度随时间变化

Fig.3 Temporal evolution of the maximum scour depth at a cylindrical pile

1.3 模型设置

根据现有工程资料,海上风机多桩承台式基础间距比为 $G/D=2, 3, 4$ 和 5 (G 为桩柱中心距)。同时为简便计算,将海上风电多桩承台式基础简化为8根直桩环形布置,桩柱直径 $D=2\text{ m}$ 。计算域左侧设为

入流边界条件,采用对数流速分布;右侧为出流边界条件;两侧及底部为壁面边界条件;顶部为对称边界条件。计算域大小设置为 $72\text{ m}\times 72\text{ m}\times 39\text{ m}$ 。计算域示意图如图4所示,群桩中心距离入口 36 m 处,网格尺寸为 0.25 m ,即 $1/8D$ 。初始沙床厚度为 15 m (其中 $G/D=2$ 时由于冲刷深度较大,沙床厚度取 20 m),水深为 20 m ,泥沙中值粒径为 0.96 mm ,摩阻流速为 0.0217 m/s ,平均流速与泥沙起动临界速度的比值为 0.9 ,临界起动希尔兹数为 0.03 。模型结构对称,因此只对上半部分四根桩桩周点位进行测量,如图5所示。

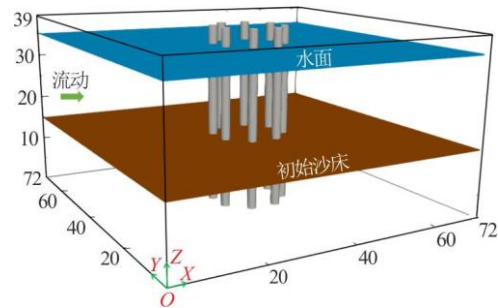


图4(网上彩图) 多桩承台式基础示意图

Fig.4 (Color online) Computational domain for the local scour around multi-piles

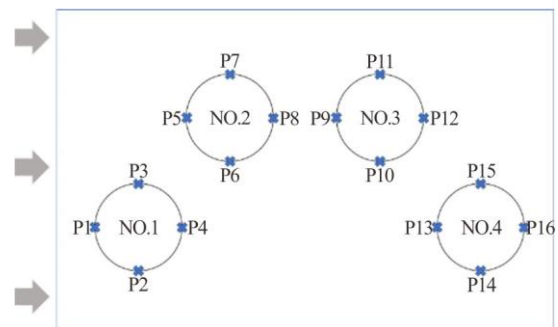


图5(网上彩图) 测量点位平面图

Fig.5 (Color online) Plan view of the measurement locations

2 结果与讨论

图6至图9分别给出前150 h不同间距比下,各测量位置的冲刷深度随时间变化。表1和表2给出了不同 G/D 下, $t=150\text{ h}$ 时的桩周冲刷深度。可见 $G/D=2$ 时,上游桩(1号桩和2号桩)桩周冲刷速率与冲刷深度均大于下游桩(3号桩和4号桩)。并且,各桩桩后的冲刷速率均小于桩前与桩侧,这与单桩情况相同。但由于流场关于桩柱不对称,桩两侧的冲刷速率存在较大差异。在1号桩冲刷的初始阶段, $t=10\text{ h}$ 前,桩

表 1 $t=150$ h 时, 不同间距比下 P1-P8 的冲刷深度Table 1 The final scour depth at points P1 to P8 of the multi-piles for all cases at $t=150$ h

工况	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
$G/D=2.0$	13.38	13.60	12.89	13.61	13.24	14.09	11.85	12.31
$G/D=3.0$	4.14	4.51	4.36	4.25	4.23	4.20	3.95	3.18
$G/D=4.0$	9.69	10.26	9.79	9.13	10.23	11.62	9.86	11.04
$G/D=5.0$	7.58	7.14	6.41	5.97	9.06	9.06	8.00	7.72

表 2 $t=150$ h 时, 不同间距比下 P9-P16 的冲刷深度Table 2 The final scour depth at points P9 to P16 of the multi-piles for all cases at $t=150$ h

工况	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
$G/D=2.0$	12.04	11.54	11.31	11.91	11.77	10.89	10.89	9.74
$G/D=3.0$	2.73	3.18	3.09	2.64	3.72	4.31	3.42	3.11
$G/D=4.0$	11.41	12.09	10.33	10.87	10.34	11.49	11.03	10.90
$G/D=5.0$	7.73	9.11	8.11	9.19	7.20	8.38	7.73	8.82

前(P1)冲刷速率最大, 略大于两侧(P2和P3)冲刷速率, 这与单桩桩周冲刷速率稍有不同, 如图6(a)所示。随着冲刷的发展, 桩前冲刷速率逐渐降低, 桩下侧(P2)冲刷速率最大, 上侧(P3)冲刷速率最小。这是因为1号桩与下方桩的收缩流动叠加, 造成桩间流速增大, 使得此处冲刷速率显著增加, 这与Ataie-Ashtiani等^[19]的物理模型实验结果相同。2号桩下侧点(P6)由于受到1号桩尾涡的影响, 导致此处紊动增强, 床面切应力增大, 冲刷速率增大。3号桩由于受到上游桩的遮蔽作用, 桩周冲刷速率均小于2号桩, 桩下侧点(P10)冲刷速率略大于桩上侧点(P11)。对于4号桩, 其与1号桩的桩间距 $G/D \approx 5$, 根据Zhao等^[20]的串列双桩的研究结论, 4号桩冲刷深度应大于1号桩; 然而, 由于受到其他桩的影响, 4号桩冲刷深度小于1号桩。这说明, 群桩之间流场复杂, 串列双桩的研究结论不能简单应用于群桩局部冲刷。

$G/D=3$ 时, 各桩的冲刷速率和冲刷深度远小于 $G/D=2$ 时, 这是因为 $G/D=3$ 时的流场结构与 $G/D=2$ 时的流场结构发生了显著改变有关, 将在后文详细分析。在冲刷初期, 1号桩、2号桩和4号桩的两侧由于收缩流产生冲刷, 桩后产生淤积。2号桩桩周的泥沙起动, 被输送至下游, 由于3号桩的阻挡, 其在桩周形成淤积, 如图7(c)所示。淤积在前15 h主要发生在桩柱前侧(P9)和下侧(P10), 上侧(P11)由于上游来沙, 冲刷速率变小, 但并未产生淤积, 随着冲刷的继续发展, 后侧(P12)在15 h后产生淤积。此外, 1号桩上下侧(P2和P3)冲刷速率与冲刷深度较 $G/D=2$ 时差值

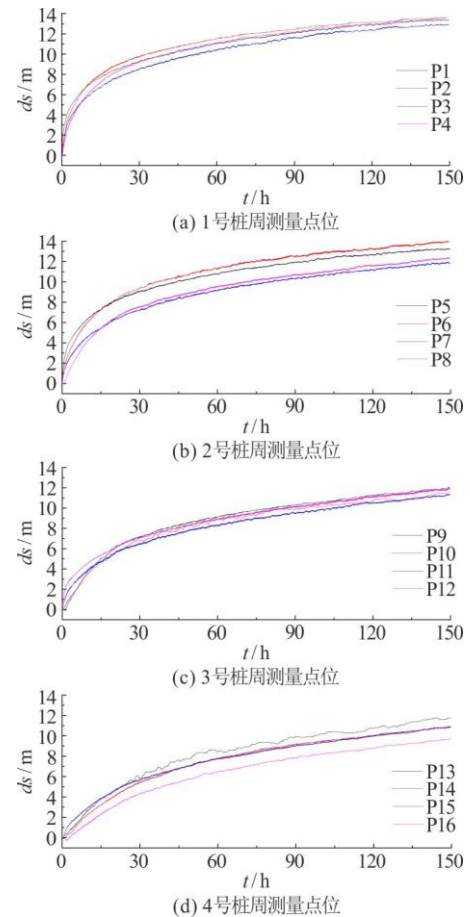


图 6 (网上彩图) $G/D=2$ 时, 冲刷深度随时间变化
Fig.6 (Color online) Temporal variations of scour depth around multi-piles at $G/D=2$

变小, 说明随着 G/D 的增加, 两桩间的加速作用被削弱。3号桩仍受到2号桩的遮蔽作用, 导致冲刷速率与冲刷深度均小于2号桩。

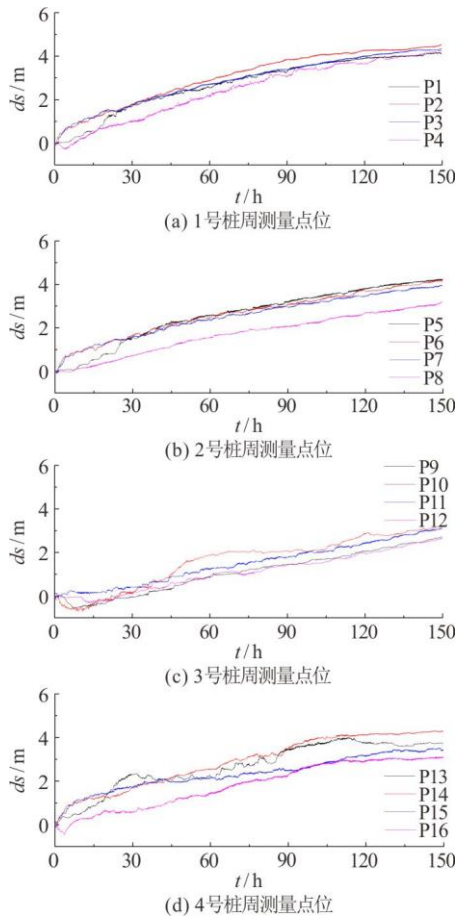


图7(网上彩图) $G/D=3$ 时, 冲刷深度随时间的变化
Fig.7 (Color online) Temporal variations of scour depth around multi-piles at $G/D=3$

$G/D=4$ 时, 1号桩由于受到其他桩柱影响较小, 冲刷速率较低, 桩后点(P4)在 $t=2$ h 时产生淤积, 且冲刷速率最慢, 如图 8(a)所示。同样基于此原因, 2号桩桩周 P5、P7 和 P8 的冲刷速度与 1号桩基本相同, 桩柱下侧点(P6)冲刷速率仍然最大, 说明在 $G/D=4$ 时, 2号桩下侧仍受到 1号桩后方尾涡影响, 流速增大, 进而此处床面切应力增加, 产生更大的冲刷。2号桩与 3号桩桩周冲刷速度基本相同, 如图 8(b)和图 8(c)所示。即随着间距比的增加, 2号桩对下游桩的遮蔽作用逐渐减弱; 而 $G/D=4$ 为该作用的临界间距, 超过该间距后, 上游桩后尾涡脱落交替撞击下游桩, 桩间湍流动能增强, 在下游桩产生更大的冲刷深度。对于 1号桩和 4号桩, 4号桩桩周冲刷速率与冲刷深度均大于 1号桩, 进一步证实了上述结论。

$G/D=5$ 时, 1号桩由于受其他桩柱影响较小, 桩周冲刷速率与冲刷深度最小, 下游桩桩周冲刷深度均大于上游桩, 如图 9 所示。此外, 3号桩桩周冲刷速率与冲刷深度大于 4号桩柱, 说明上游桩对下

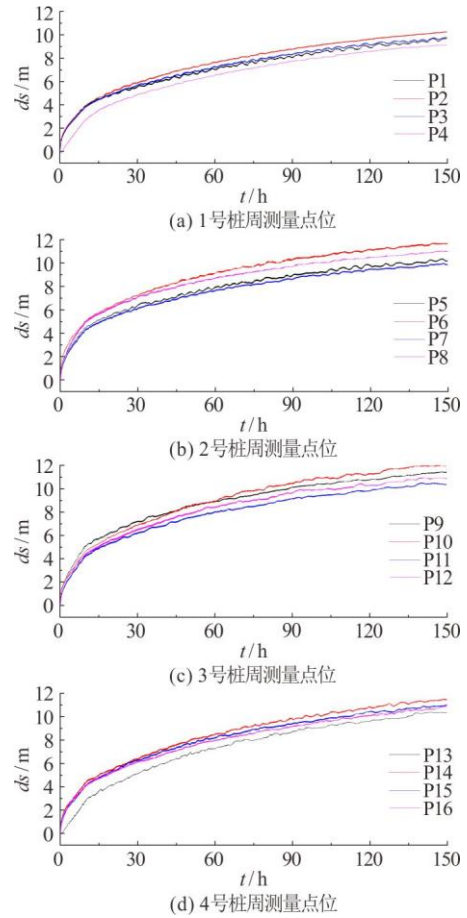


图8(网上彩图) $G/D=4$ 时, 冲刷深度随时间的变化
Fig.8 (Color online) Temporal variations of scour depth around multi-piles at $G/D=4$

游桩桩周冲刷的增强作用存在临界值, 超过后增强作用减弱。

图10给出了不同间距比下的最大冲刷深度随时间变化曲线。由图中可见, 冲刷速率在 $G/D=2$ 时最大, 在 $G/D=3$ 时最小, $t=150$ h 时, $G/D=2$ 工况的最大冲刷深度最大, $G/D=3$ 工况的最小。这是因为 $G/D=3$ 工况的冲刷机理与其他间距比工况不同所致。其余工况下, 随着间距比的增大, 各桩相互作用减弱, 冲刷深度变小。值得注意的是, 当冲刷时间足够长时, $G/D=3$ 工况的最大冲刷深度与其他工况的相当。

图 11 分别给出了 $G/D=2, 4, 5$ 工况在 $t=150$ h 时的冲刷坑和 $G/D=3$ 工况在 $t=1000$ h 时的冲刷坑。冲刷坑形态可归纳为三种情况:

① $G/D=2$ 时, 群桩冲刷坑为一个整体, 无明显分界, 群桩上游冲刷深度大于下游, 群桩后方泻涡主要集中在两侧并形成两道冲刷沟, 在中部形成沙脊;

② $G/D=3$ 时, 上游桩的冲刷坑逐渐分离, 产生不明显的分界线, 上游桩桩周冲刷深度小于下游

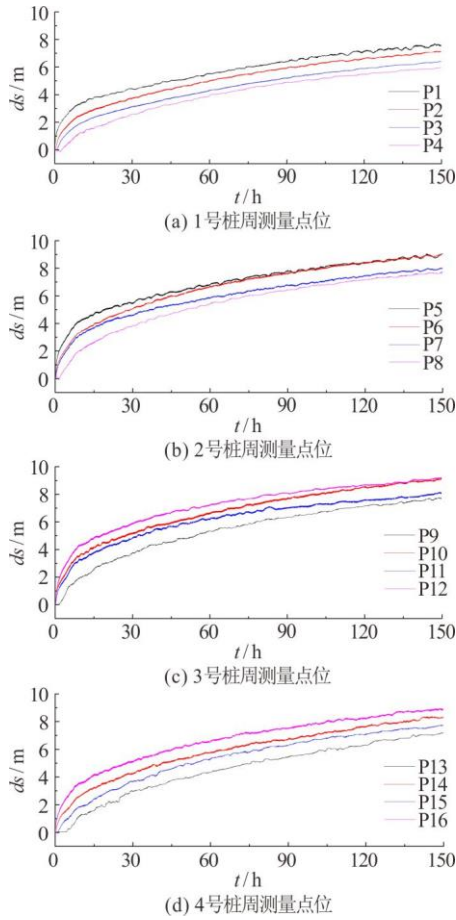


图 9 (网上彩图) $G/D=5$ 时, 冲刷深度随时间的变化

Fig.9 (Color online) Temporal variations of scour depth around multi-piles at $G/D=5$

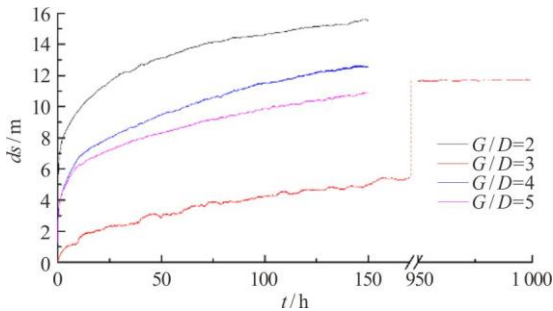


图 10 (网上彩图) 不同 G/D 下, 最大冲刷深度随时间的变化
Fig.10 (Color online) Temporal variations of maximum scour depth around multi-piles for different G/D cases

桩桩周冲刷深度, 群桩后方泻涡主要集中在中部, 在中轴线处产生冲刷沟;

③ $G/D=4$ 和 5 时, 随着间距比的增加, 桩间冲刷坑分界线更加明显。1 号桩冲刷深度略小, 其余桩冲刷深度基本相同。群桩中部冲刷强度减弱, 群桩后方由于两侧和中部桩泻涡产生沿中轴线对称分布的两条沙脊。

为了更好地分析冲刷坑形态与冲刷速度产生较大差距的原因, 图 12 给出了不同间距比下群桩周围

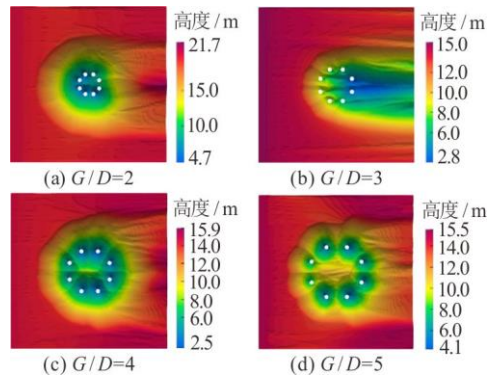


图 11 (网上彩图) 不同 G/D 下的冲刷坑形态

Fig.11 (Color online) Variations of the scour hole morphology with different G/D cases

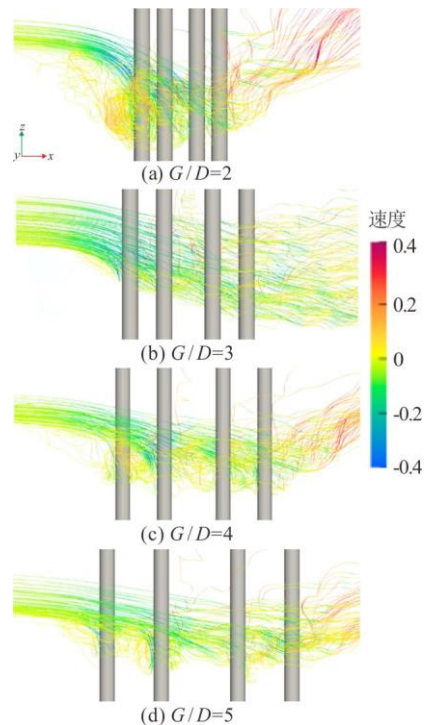


图 12 (网上彩图) 不同 G/D 下的三维流线

Fig.12 (Color online) Three-dimensional streamline for different G/D cases

流线, 可将群桩流场分为三类: $G/D=2$, $G/D=3$, 和 $G/D=4$ 和 5 时。 $G/D=2$ 时, 涡旋主要作用在群桩前侧, 后侧涡旋较小, 在尾部产生上升流。上游四根桩柱前均有涡旋但由于间距比过小, 马蹄涡汇合一起, 这与单桩情况类似, 因此最后的冲刷坑形状也与单桩基本相同。同时更强的涡旋会导致周围的泥沙加速起动, 从而使得冲刷速率与冲刷深度增加, 对应图10中的 $G/D=2$ 冲刷速率与冲刷深度最大。 $G/D=3$ 时, 只在上游桩前存在马蹄涡, 并且强度较弱, 下游桩前基本无涡, 群桩中后部流线顺直, 没有涡旋扰动泥沙, 导致冲刷发展较慢。 $G/D=4$ 和 5 时, 随着间距比的进一步增

加,所有桩柱周围均有马蹄涡生成,并且不再汇为一个整体,这也对应了所有桩周均有冲刷坑产生,整体冲刷坑为多个单个冲刷坑叠加形成,且分界明显。

图 13 分别给出了不同间距比下, z 方向涡流分布。由图中可见,在 $G/D=2$ 时,1 号桩后未发生完全泻涡就作用于 4 号桩,从而抑制了 4 号桩前的马蹄涡,导致冲刷减弱。由于 2 号桩后剪切层包裹着 3 号桩,导致了 3 号桩局部冲刷减小。随着间距的增大,1 号桩后逐渐发生尾涡脱落,在 $G/D=3$ 时,由于 1 号桩与下方桩柱后方泻涡发生相互作用,导致流场和冲刷坑形态与其他三种工况产生较大差异。当间距继续增大,1 号桩与下方桩柱后方泻涡不再相互作用,上游桩后尾涡交替脱落作用于下游桩,桩间湍流强度增强,下游桩产生大于上游桩桩周的冲刷深度,如图 14 所示。为了更好地观察桩周涡旋情况,图 15 给出了不同间距比下的涡旋结构(采用 Q 等值面^[21]进行可视化)。由于观察角度所限,将下方 4 桩与上方 4 桩命名相同。由图中可见, $G/D=2$ 时,1 号桩前存在马蹄涡,3 号桩由于前桩遮蔽作用且间距较小,桩前马蹄涡被明显削弱,未在图中观察到马蹄涡。各桩后方尾涡脱落由于间距较小产生相互影响,整体尾涡脱落集中在两侧,因此在两侧形成冲刷沟在中部形成沙脊。 $G/D=3$ 时,1 号桩后方发生尾涡脱落并与上方桩柱相互作用,在群桩中部形成顺流向的涡旋结构,对 4 号桩影响较大,使得其冲刷坑形态和冲刷速率与其他工况产生较大差异。随着间距比的进一步增大,在 $G/D=4$ 和 5 时,1 号桩与上方桩柱后方尾涡

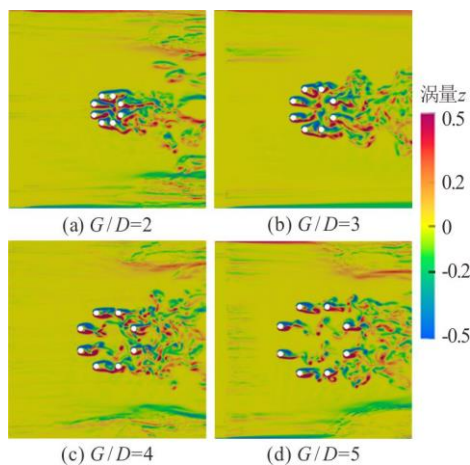


图 13(网上彩图) 不同 G/D 下的 z 方向涡量
Fig.13 (Color online) Contours of spanwise vorticity in z direction for different G/D cases

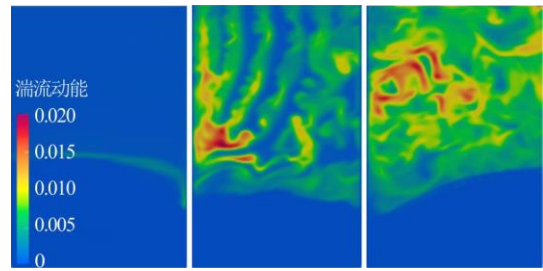


图 14(网上彩图) $G/D=5$ 时, 1-4 号桩截面湍流动能
Fig.14 (Color online) Contours of turbulence kinetic energy at $G/D=5$ of points P1-P4

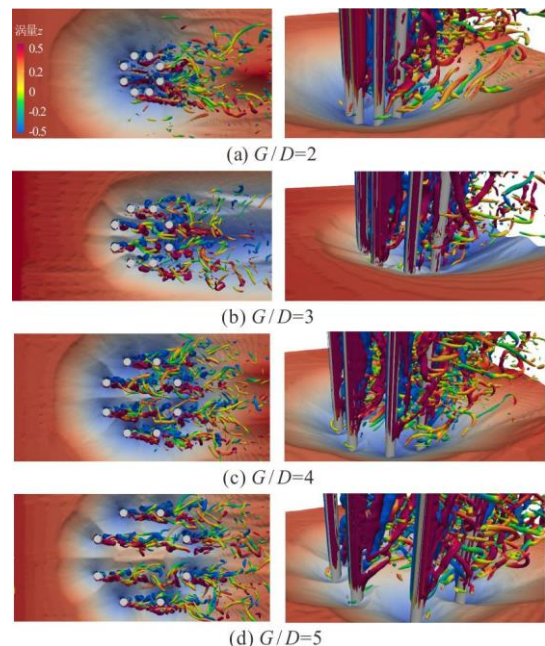


图 15(网上彩图) 不同 G/D 下的桩周涡旋结构
Fig.15 (Color online) Vortex structures for different G/D cases

脱落基本无相互影响,3 号桩随着远离上游桩,桩前马蹄涡不再被抑制,冲刷深度增加,3 号桩前马蹄涡强度高于 2 号桩,如图 15(d)所示。

3 结论

本文对单向流作用下,不同 G/D 的多桩式承台式基础局部冲刷进行了数值模拟,研究了桩间距对于冲刷深度随时间变化、冲刷机制和冲刷坑形态的影响。当 $G/D=2$ 时,桩前马蹄涡汇为一个整体,产生了最大的冲刷速度与冲刷深度,而下游桩受到上游桩遮蔽作用,冲刷深度小于上游桩。各桩间距较小,冲刷坑无明显分界。桩后泻涡集中于两侧,并形成两条冲刷沟。当 $G/D=3$ 时,上游桩前冲刷坑逐渐分离,产生不明显分界线,上游桩后尾涡发生相互作用,形成顺流向涡旋,显著削弱了下游桩前马

蹄涡强度, 使得冲刷速率最小。当 $G/D=4$ 和 5 时, 桩间分界线更加明显, 上游桩后尾涡相互作用减弱, 下游桩前马蹄涡不再受到抑制, 同时由于上游桩后泻涡作用于下游桩, 增强了桩间湍流强度, 在下游桩处产生了更大的冲刷深度。

参 考 文 献:

- [1] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2016(14): 3758-3770.
- [2] 张博杰. 水流作用下海上风机桩式基础局部冲刷三维数值模拟研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [3] Hannah C R. Scour at pile groups [D]. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury, 1978.
- [4] Amini A, Melville B W, Ali T M, et al. Clear-water local scour around pile groups in shallow-water flow [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138(2): 177-185.
- [5] Amini A, Solaimani N. The effects of uniform and nonuniform pile spacing variations on local scour at pile groups [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2018, 36(7): 861-866.
- [6] Ataie-Ashtiani B, Beheshti A A. Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 132(10): 1100-1104.
- [7] 卢中一, 高正荣. 大型涉水群桩桥基局部冲刷特性试验研究 [J]. 海洋工程, 2009, 27(1): 70-76.
- [8] 卢中一, 高正荣. 水流夹角对群桩局部冲刷影响试验研究 [J]. 中国港湾建设, 2011(6): 16-20.
- [9] Liang F, Wang C, Huang M, et al. Experimental observations and evaluations of formulae for local scour at pile groups in steady currents [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2017, 35(2): 245-255.
- [10] 王鑫. 近海岸桥梁桩基础冲刷研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [11] Lan a R, Fael C, Maia R, et al. Clear-water scour at pile groups [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 139(10): 1089-1098.
- [12] Afzal M S, Bihs H, Kumar L. Computational fluid dynamics modeling of abutment scour under steady current using the level set method [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2020, 35(4): 355-364.
- [13] Wilcox D C. Turbulence modeling for CFD [M]. California, United States: DCW Industries, Inc., 1998.
- [14] van Rijn L C. Sediment transport, part I: bed load transport [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1984, 110(10): 1431-1456.
- [15] van Rijn L C. Sediment transport, part II: suspended load transport [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1984, 110(11): 1613-1641.
- [16] Roulund A, Sumer B M, Fredsøe J, et al. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2005, 534: 351-401.
- [17] Melville B W, Chiew Y M. Time scale for local scour at bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(1): 59-65.
- [18] Shen H W, Schneider V R, Karaki S. Local scour around bridge piers [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1969, 95(6): 1919-1940.
- [19] Ataie-Ashtiani B, Aslani-Kordkandi A. Flow field around side-by-side piers with and without a scour hole [J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2012, 36: 152-166.
- [20] Zhao S, Ji C, Sun Z, et al. Effects of the gap on the local scour around two tandem piles in shallow flows [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 246: 110575.
- [21] Dubief Y, Delcayre F. On coherent-vortex identification in turbulence [J]. *Journal of Turbulence*, 2000, 1(1): N11.