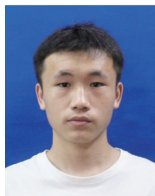


· 地基与基础 ·



## 群桩布置与桩间距对桩基局部冲刷影响的数值模拟\*

李欣宇<sup>1</sup>, 刘肖廷<sup>2</sup>, 李志鹏<sup>1</sup>, 孙洪广<sup>1</sup>

(1. 河海大学力学与工程科学学院, 江苏南京 211100; 2. 中国三峡集团公司科学技术研究院, 北京 101199)

**摘要:** 针对群桩基础因桩间流场复杂干涉导致的局部冲刷机理不明、设计依据不足等问题, 通过建立三维流体-桩基-可冲刷海床耦合数值模型, 模拟了恒流作用下砂质海床上单桩及4种典型群桩布置在不同桩间距下的冲刷过程, 讨论了桩间流场干涉效应及床面剪切应力对冲刷过程的影响。研究表明: 双桩串联布置中, 后桩因前桩遮蔽效应, 冲刷深度较单桩降低34%~53%; 双桩并排布置在 $G/D=2$ 时( $G$ 为桩距,  $D$ 为桩径), 因桩间间隙流导致最大冲刷深度较单桩增加33%; 三桩正三角与倒三角布置的最大冲刷深度较单桩分别增加20%~30%和30%以上。因此, 在工程中建议双桩串联采用 $G/D=3\sim4$ 的桩距以平衡遮蔽效应与冲刷风险, 双桩并排桩距需远超过 $G/D=4$ 才能显著减弱互扰效应, 三桩布置中应尽量避免采用倒三角形式。

**关键词:** 群桩布置; 局部冲刷; 桩间距; 数值模拟; 群桩基础

中图分类号: U656.1; P751; TV148

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0192-13

### Numerical simulation of effects of pile arrangement and spacing on local scour around pile groups

LI Xinyu<sup>1</sup>, LIU Xiaoting<sup>2</sup>, LI Zhipeng<sup>1</sup>, SUN Hongguang<sup>1</sup>

(1. College of Mechanics and Engineering Science, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Institute of Science and Technology Research, China Three Gorges Corporation, Beijing 101199, China)

**Abstract:** To address the issues of unclear local scour mechanisms and insufficient design basis for pile group foundations caused by complex flow field interference between piles, a three-dimensional coupled numerical model of fluid-pile-erodible seabed is established. This model simulates the scour process around a monopile and four typical pile group arrangements under steady current conditions on a sandy seabed with different pile spacings, and discusses the effects of flow field interference between piles and bed shear stress on the scour process. The study shows that in a twin-pile tandem configuration, the scour depth at the rear pile is reduced by 34%–53% compared with a monopile pile, owing to the shielding effect of the front pile. For side-by-side twin piles with  $G/D=2$  (where  $G$  is the pile spacing and  $D$  is the pile diameter), the maximum scour depth increases by 33% due to the gap flow between the piles. Compared with the monopile, the maximum scour depths for the regular-triangle and inverted-triangle arrangements increase by 20%–30% and over 30%, respectively. Therefore, it is recommended in engineering practice to adopt a pile spacing of  $G/D=3\sim4$  for tandem piles to balance the shielding effect and scour risk, to employ a spacing significantly exceeding  $G/D=4$  for side-by-side piles to markedly mitigate mutual interference, and to avoid using the inverted-triangle configuration as much as possible in three-pile arrangements.

**Keywords:** pile group arrangement; local scour; pile spacing; numerical simulation; pile group foundation

收稿日期: 2025-09-17 录用日期: 2025-11-10

\*基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52309087); 江苏省水利科学研究院自主科研经费专项(2024z006)

作者简介: 李欣宇(2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为海上风电场桩基冲刷数值模拟。

通信作者: 孙洪广(1982—), 男, 博士, 教授, 研究方向为泥沙动力学等。E-mail: shg@hhu.edu.cn

近年来,随着全球能源转型加速和“双碳”目标驱动,海上风电凭借其资源丰富、发电效率高、不占用土地资源等优势,逐渐成为风电行业的重要增长极<sup>[1]</sup>。当前全球海上风电产业快速发展,规模化、深远海化成为主要趋势。作为支撑海上风电机组的基础结构,桩基的稳定性直接决定整体系统的服役安全<sup>[2]</sup>。然而,复杂海洋水动力环境引起的桩周局部冲刷问题是威胁桩基结构完整性的主要风险之一<sup>[3]</sup>。作为海上风电工程中应用最为广泛的基础形式,单桩结构的局部冲刷机理已形成较为系统的理论体系,并建立了相对完善的冲刷深度预测模型<sup>[4-8]</sup>。目前,群桩基础在海上风电平台工程中的应用日益增多。与单桩基础相比,群桩系统的冲刷机理及影响因素更为复杂,桩体间的流场干涉效应会显著改变局部冲刷模式,从而影响到群桩基础的稳定性。

目前,针对群桩基础局部冲刷问题已开展了多角度研究,也产生了一系列研究成果。邓绍云<sup>[9]</sup>通过宽长水槽试验系统研究了不同圆柱桩群排列形式下的局部冲刷特性,指出桩群排列方式是影响冲刷形态与程度的最主要因素,流速与水深的影响通过改变桩周流场特性间接体现。代浩等<sup>[10]</sup>针对波浪作用下局部冲刷群桩的动力响应开展模型试验,发现冲刷深度增加会导致桩基自振频率降低、桩顶位移与加速度响应增大,强调了冲刷对桩基动力稳定性的影响。刘斌<sup>[11]</sup>基于高桩码头工程实例,对比分析了多种局部冲刷经验公式的适用性,提出将波浪与潮流叠加为波流共同作用流速后,采用韩海骞和J&S公式可较准确预测桩基冲刷深度。王多银等<sup>[12]</sup>通过非恒定流下桩群绕流局部冲刷试验与数值模拟,揭示了上下游桩冲刷范围的差异及冲刷深度随时间呈对数增长的规律,指出冲刷主要发生于水流上涨阶段。群桩布置会引发多尺度涡系耦合,前排桩产生的马蹄涡与后排桩的绕流场形成干涉。Yang等<sup>[13]</sup>通过试验研究了恒定流条件下不同布置群桩的局部冲刷,结果表明桩间距对群桩局部冲刷的影响随着来流弗劳德数的增大而更加显著。伍志元等<sup>[14]</sup>以近岸风电高桩承台桩基为研究对象,通过数值模

拟发现当流速较大时,前桩对后桩的遮蔽作用明显,后桩周围流速降低,泥沙冲刷坑彼此相连,形成群桩整体冲刷坑。刘钦等<sup>[15]</sup>对恒流条件下砂质海床上等边三角布置的三桩基础进行了局部冲刷数值模拟,研究不同水流攻角和桩间距对冲刷的影响,并提出最优桩间距和最不利桩间距。值得注意的是,上述研究大多致力于揭示最终平衡冲刷状态的特征和规律,聚焦于群桩整体最大冲刷深度或前、后排桩的代表性数值,而对群桩内各单体桩周床面高程的独立性与同步性时空演变规律缺乏系统性解析。同时,桩间距与布置形式是决定群桩平衡冲刷深度及形态的关键因素,如何进行量化分析是关键科学问题。除此之外,由于床面剪切应力在桩基局部冲刷过程中占据主导作用,因此桩基不同排布方式与桩间距下超额剪切应力(海床表面实际受到的流体剪切应力与泥沙临界起动剪切应力的差值)对群桩冲刷的影响机制也有待进一步研究。

基于上述研究背景与不足,本文采用有限体积-有限差分混合算法,求解三维不可压缩黏性流体N-S方程,并结合泥沙输运模型,系统模拟单桩及4种典型群桩布置(双桩串联、双桩并排、三桩正三角形、三桩倒三角形)在多桩距工况下的冲刷过程,通过对比不同群桩布置形式及桩距变化下的流场特征和剪切应力分布规律,结合冲刷深度演化过程,揭示群桩基础因布置形式与桩距差异引发的动态冲刷干涉机制。

## 1 理论模型

本文基于计算流体动力学平台,建立了流体-桩基-可冲刷海床系统的三维耦合数值模型,采用有限体积-有限差分混合算法求解控制方程。模型利用流体体积法(volume of fluid, VOF)精确追踪自由液面,并采用分数面积-体积障碍物表征(fractional area and volume obstacle representation, FAVOR)方法<sup>[16]</sup>处理复杂边界与海床形态变化,在结构化正交网格中通过几何分数表征障碍物,兼顾计算效率与精度。数值计算采用自适应时间步长以确保稳定性,动量方程与压力方程分别以

一阶迎风格式离散和广义最小残差法 (generalized minimal residual method, GMRES) 迭代算法求解, 各求解器均采用默认收敛准则。

### 1.1 数学模型

#### 1.1.1 水动力模型

流体运动控制方程基于 N-S 方程组, 包含描述流体运动的连续性方程和动量方程, 采用 FAVOR 方法, 在方程中加入面积分数和体积分数修正 N-S 方程来反映海床形态的影响。控制方程如下:

$$\frac{\partial(uA_x)}{\partial x} + \frac{\partial(vA_y)}{\partial y} + \frac{\partial(wA_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x & \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y & \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z & \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中:  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的速度;  $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向可流动流体的面积分数;  $t$  为时间;  $V_F$  为可流动流体体积分数;  $\rho$  为流体密度;  $p$  为时均压力;  $G_i$  为体积力分量;  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上流体的黏滞力加速度。

#### 1.1.2 湍流模型

已有湍流模型中, RNG  $k-\varepsilon$  模型对强剪切流、旋转流和分离流动的模拟具有优势, 同时兼顾精度和计算效率, 故选用该模型, 其表达式如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) &= \\ P_T + G_T + D_{kT} - \varepsilon_T & \\ \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) &= \\ \frac{C_1 \varepsilon_T}{k_T} (P_T + C_3 G_T) + D_\varepsilon - C_2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} & \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中:  $k_T$  为湍流动能;  $P_T$  为湍流动能的剪切产生项;  $G_T$  为湍流动能的浮力产生项;  $D_{kT}$  为湍流动能的扩散项;  $\varepsilon_T$  为湍流动能的耗散率;  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  为用于调节耗散率方程生成与耗散项的经验常数,  $C_1$ 、 $C_3$  的默认值分别为 1.42 和 0.2;  $D_\varepsilon$  为耗散率的扩散项。

#### 1.1.3 泥沙输运模型

当水流作用下产生的床面剪切应力超过泥沙颗粒的临界剪切应力时, 泥沙开始被水流带走。泥沙颗粒起动速度由 Mastbergen 等<sup>[17]</sup>的研究计算得到:

$$u_{\text{lift}} = \alpha_i n_s d_*^{0.3} (\theta_i - \theta_{\text{cr}})^{1.5} \sqrt{\frac{gd_i(\rho_i - \rho)}{\rho}} \quad (4)$$

式中:  $u_{\text{lift}}$  为泥沙颗粒起动速度;  $\alpha_i$  为与泥沙起动相关的起动系数, 其推荐值为 0.018;  $n_s$  为床面法向单位矢量;  $d_i$  为泥沙颗粒的直径;  $\rho_i$  为泥沙颗粒的密度;  $g$  为重力加速度;  $d_*$  为无量纲泥沙粒径;  $\theta_i$  和  $\theta_{\text{cr}}$  分别为希尔兹参数和临界希尔兹参数, 其计算公式如下:

$$d_* = d_i \left[ \frac{\rho(\rho_i - \rho) \|g\|}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (5)$$

$$\theta_i = \frac{\tau}{gd_i(\rho_i - \rho)} \quad (6)$$

$$\theta_{\text{cr}} = \frac{0.3}{1 + 1.2d_*} + 0.055 [1 - \exp(-0.02d_*)] \quad (7)$$

式中:  $\mu$  为流体动力黏滞系数;  $\tau$  为床面切应力。

泥沙沉降速度由 Soulsby<sup>[18]</sup>公式计算:

$$u_{\text{setling}} = \frac{V_f}{d_i} [(10.36^2 + 1.049d_*^3)^{0.5} - 10.36] \quad (8)$$

式中:  $u_{\text{setling}}$  为泥沙颗粒沉降速度;  $V_f$  为流体的运动黏度。

针对推移质输运, 当前采用的模型由 Meyer-Peter 等<sup>[19]</sup>提出。该模型可预测压实床面上单位宽度内沉积物的体积流量。其控制方程如下:

$$u_{\text{bedload},i} = \frac{q_{b,i}}{\delta_i c_{b,i} f_b} \quad (9)$$

式中:  $u_{\text{bedload},i}$  为第  $i$  种沉积物的推移质输运速度;  $c_{b,i}$  为该类沉积物在床层中的体积分数,  $f_b$  为沉积物的临界堆积分数;  $q_{b,i}$  为单位体积推移质输运

率;  $\delta_i$  为推移质层厚度,  $q_{b,i}$  和  $\delta_i$  的计算公式如下:

$$q_{b,i} = 8 \left[ g \left( \frac{\rho_i - \rho}{\rho} \right) d_i^3 \right]^{0.5} \quad (10)$$

$$\delta_i = 0.3 d_*^{0.7} \left( \frac{\theta_i}{\theta_{cr}} - 1 \right)^{0.5} d_i \quad (11)$$

针对悬移质运输, 采用独立控制方程:

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}_s C_s) = \nabla \cdot \nabla (D_f C_s) \quad (12)$$

式中:  $C_s$  为悬浮泥沙质量浓度, 其定义为每单位体积流体-泥沙混合物中的泥沙质量;  $\mathbf{u}_s$  为悬移质运动速度;  $D_f$  为扩散率。

### 1.2 计算域及网格划分

数值模型计算域尺寸为长 72 m, 宽 42 m, 高 16 m, 中心布置直径 6 m 的单桩, 水深设定为 6.5 m。上、下游出口处分别设置一道稳水挡板, 其尺寸均为厚 1 m、宽 42 m、高 8 m。底部铺设厚度为 8 m 的床沙层。冲刷模拟参数见表 1。为评估

边壁效应的影响, Sarker<sup>[20]</sup> 研究表明, 仅水流作用下, 垂向流影响范围为 5.5 倍桩径, 本文单桩工况下模型宽度与桩径之比为 7:1, 可认为边壁对桩周关键流场的影响在可接受范围内; 对于各群桩排布, 模型最外侧桩与边界的距离均超过 2 倍桩径, 因此边壁效应对桩周流场的影响较小, 可忽略。

为精确捕捉桩周复杂流场, 同时平衡计算精度与效率, 本文采用嵌套网格对计算域进行分区处理, 在桩周关键区域进行局部网格加密, 网格分区见图 1。全局网格在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向尺寸分别为 0.72、0.72 和 0.34 m; 桩周 15 m×15 m 加密区内, 网格尺寸加密至 0.36 m ( $x$ 、 $y$  向) 和 0.17 m ( $z$  向)。网格无关性分析表明, 当网格总数增至 935 864 个时, 桩前 1 m 处冲刷深度与最大冲刷深度的变化率均低于 5%, 继续加密无显著影响, 因此采用此配置进行后续计算。值得注意的是, 其他流体动力学相关变量同样具有网格无关性。

表 1 数值模拟相关参数

Tab. 1 Relevant parameters for numerical simulation

桩径/m	水深/m	水流速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	海床(长×宽×高)/ ( $\text{m} \times \text{m} \times \text{m}$ )	中值粒径/ mm	泥沙密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	临界 希尔兹数	卷吸 系数	推移质 运输系数	休止角/ ( $^\circ$ )
6	6.5	2.08	72×42×8	0.26	2 650	0.040 5	0.018	8	32

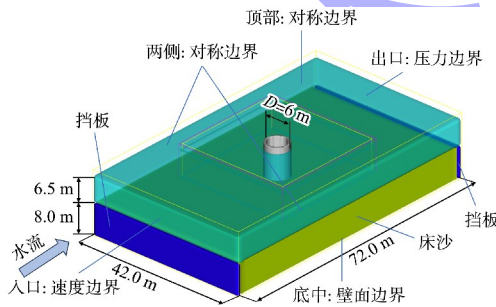


图 1 边界条件与网格划分

Fig. 1 Boundary conditions and mesh generation

### 1.3 边界条件

数值模型的边界条件设置见图 1。入流边界采用速度入口, 设定为均匀来流, 流速为 2.08 m/s, 模拟清水冲刷条件, 上游无泥沙补给, 入口处总水深为 14.5 m (水深 6.5 m + 沙床厚度 8 m); 流出边界采用静水压力出口, 控制出口水位高度为 14.5 m; 计算域两侧设置为对称边界, 对称边界

并非传统闭边界, 它通过设定法向速度为 0、法向梯度为 0 实现流场的镜像对称, 在物理上模拟了一个无限延伸的流场; 顶部边界应用刚盖假定, 同样设置为对称边界; 底部边界设为无滑移壁面。

## 2 桩基础局部冲刷数值分析

### 2.1 数值模型验证

开展群桩周围泥沙冲刷数值研究之前, 首先需要验证数值模型的可靠性。本文将通过单桩冲刷验证模型与 Khosronejad 等<sup>[21]</sup> 的试验结果进行对比, 试验使用的水槽为 10 m×1.21 m×0.45 m, 泥沙厚度为 0.2 m, 泥沙中值粒径为 0.85 mm, 临界希尔兹数为 0.03, 桩径为 0.165 m, 水流速度为 0.25 m/s, 水深为 0.186 m。经历 700 s 冲刷模拟后, 本模型预测最大冲刷深度发展曲线与 Khosronejad 等人试验数据对比情况见图 2。可以看出, 尽管当前模型模拟得到的最大冲刷深度略

小于实测值，但冲刷深度随时间的变化趋势与试验数据基本一致，因此该数值模型可用于研究桩基周围的局部冲刷规律。

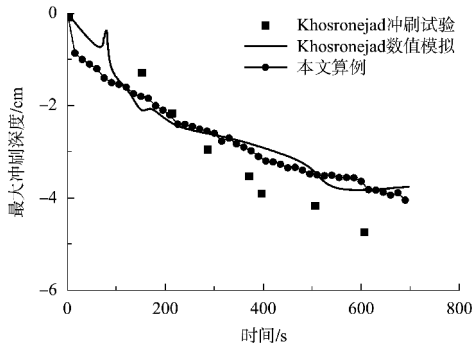


图2 单桩最大冲刷深度时间演变：本文模型与Khosronejad等试验数据对比

Fig. 2 Time evolution of maximum scour depth of a monopile: comparison between the present model and experimental data by Khosronejad et al.

### 2.2 单桩冲刷数值分析

以单桩基础冲刷作为基准，单桩桩周流场与冲刷特性呈现典型特征，模拟结果见图3。 $t=600\text{ s}$ 时距离床面1 m处单桩周围流速在 $x-y$ 平面上的分布见图3a)，在海床面上方1 m处，由于桩体扰流导致局部加速效应，桩周流速最大值达到2.96 m/s，发生在桩体两侧。 $t=600\text{ s}$ 时海床面超额剪切应力分布见图3b)，此时桩周最大超额剪切应力为13.37 Pa。 $t=600\text{ s}$ 时海床冲刷云图见图3c)，最大冲刷深度为2.06 m，位于桩侧约55°位置。桩前、侧、后0.8 m处的床面无量纲高程变化见图4，床面无量纲高程用 $z/D$ 表示。桩前和桩侧均呈现典型冲刷特性，桩侧冲刷深度大于桩前，桩后表现为动态淤积过程。

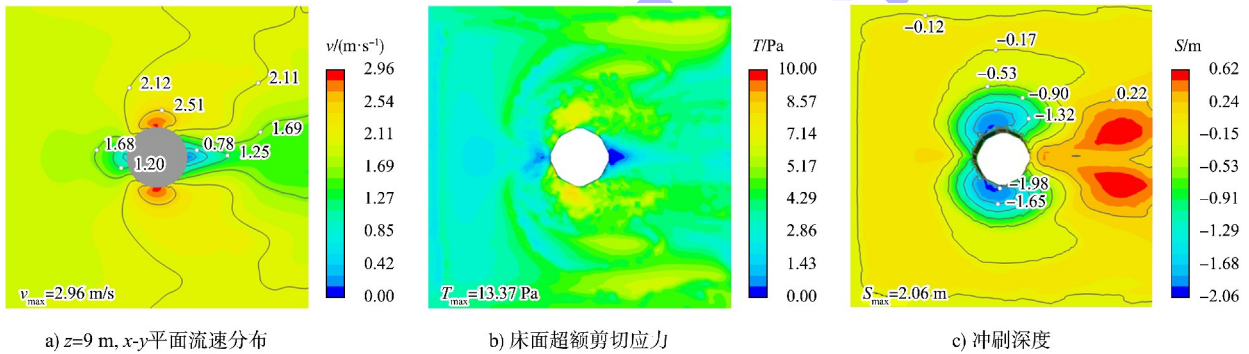


图3  $t=600\text{ s}$ 时单桩周围流场及冲刷特性分布

Fig. 3 Flow field and scour characteristics around monopile at  $t=600\text{ s}$

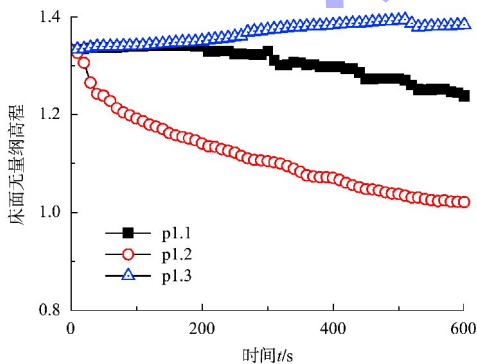


图4  $t=600\text{ s}$ 内单桩周围不同位置床面无量纲高程变化  
Fig. 4 Temporal variation of normalized bed elevation at different locations around a monopile within  $t=600\text{ s}$

### 2.3 群桩基础局部冲刷数值分析

采用与单桩工况相同的水动力边界条件开展

群桩冲刷数值模拟。为确保计算精度，对桩周关键流动区域采用与单桩模拟一致的局部网格加密策略。双桩作为最简单的群桩系统，其研究有利于揭示群桩效应与冲刷机理；而三桩布置是当前海上风电导管架基础的主流形式<sup>[22]</sup>，具有重要的工程实际意义。本文所研究的群桩布置形式及其对应的桩距参数见表2，群桩布置中各桩与单桩冲刷的桩径一致，其中三桩排布为等边三角形，相邻桩之间桩距相等。为定量分析冲刷发展过程，在各桩周关键位置布置了床面高程监测点，各测点与桩表面垂直距离为0.8 m，具体布置方案见图5。监测数据采用床面无量纲高程 $z/D$ 表示。

表 2 不同群桩排布形式及桩距  
Tab. 2 Different pile group layouts and spacings

布置形式	相对桩距 ( $G/D$ )
双桩串联	2, 3, 4
双桩并排	2, 3, 4
三桩正三角形	1, 3, 5
三桩倒三角形	1, 3, 5

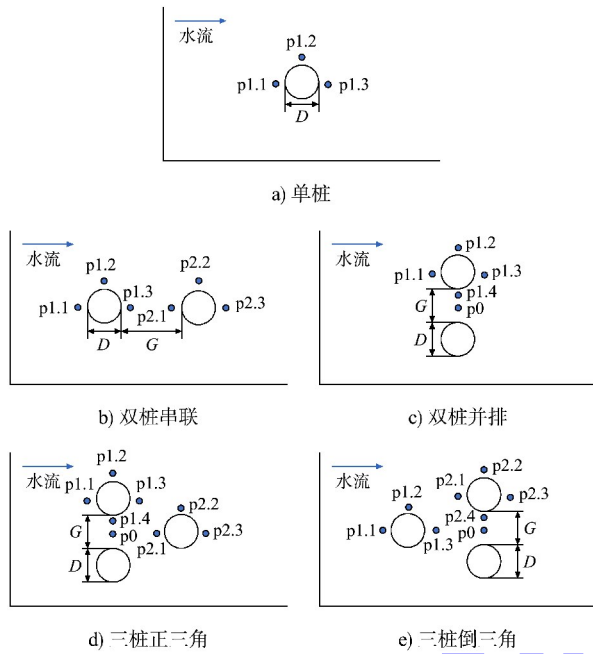
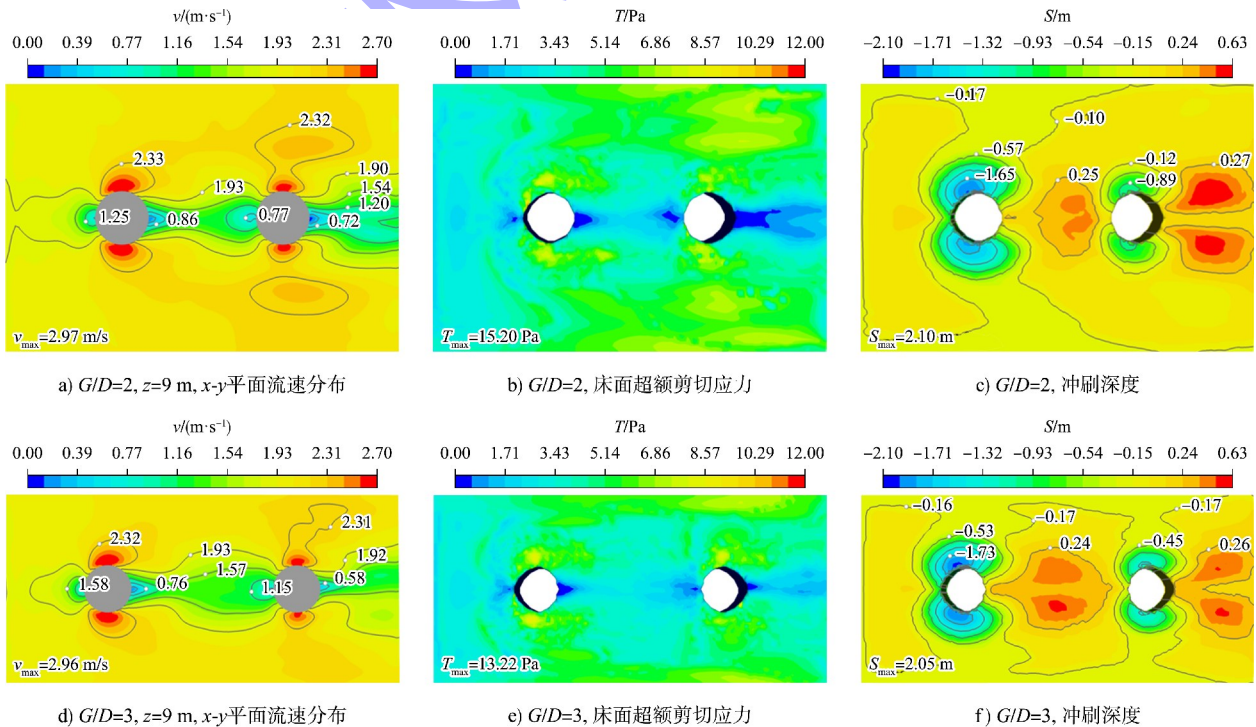


图 5 单桩与群桩布置形式及各测点分布  
Fig. 5 Layout of monopile and pile group and distribution of measurement points

### 2.3.1 双桩串联

在双桩串联布置的情况下, 模拟结果见图 6,  $t=600$  s 时流场最大流速、最大床面超额剪切应力和最大冲刷深度均随着桩距增大而呈现递减趋势。当桩间距  $G/D=2$  时, 由于下游桩的存在, 会引起略大的“堵塞”效应, 由此产生一个相对较大的逆压梯度, 从而形成相对较大的马蹄涡, 前桩冲刷深度较单桩略微升高; 随着桩距的增大, 当  $G/D$  达到 3 时, 冲刷作用明显减弱, 此时最大冲刷深度已和单桩接近; 当  $G/D>3$  时, 下游桩后开始形成“二元涡街”<sup>[23]</sup>, 因此后桩桩侧冲刷深度增加; 不同桩距下各桩桩前、侧、后 0.8 m 处的床面无量纲高程随时间的变化见图 7, 可知在相同的水动力条件下, 双桩串联布置时, 前桩的桩周冲刷情况与单桩比较接近, 由于前桩的“遮蔽作用”, 后桩马蹄涡小于单桩工况下的马蹄涡强度, 后桩桩侧冲刷深度较单桩降低 34%~53%。在  $G/D=2\sim4$  范围内的模拟结果表明, 桩距为  $G/D=3\sim4$  时, 既可充分利用前桩的遮蔽效应以降低后桩冲刷, 又可有效避免桩距较小时因“堵塞”效应导致的前桩冲刷加剧。



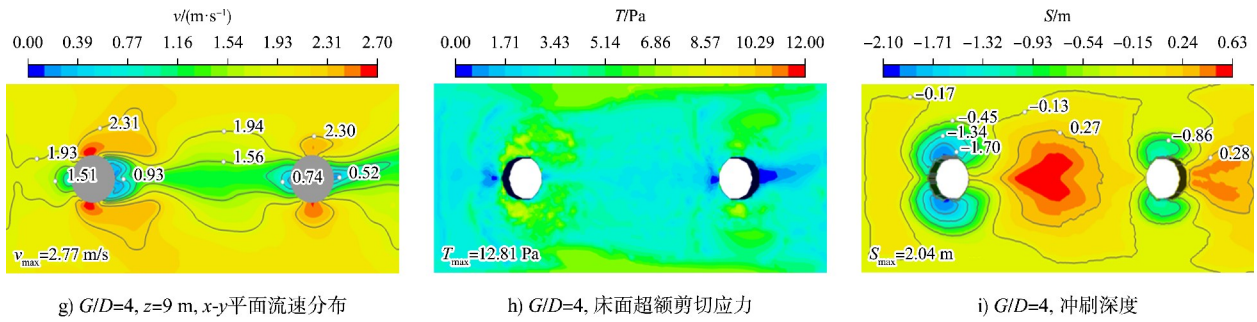


图 6  $t=600$  s 时不同桩距下串联布置双桩周围流场及冲刷特性分布

Fig. 6 Flow field and scour characteristics around tandem twin-piles with various spacing ratios at  $t=600$  s

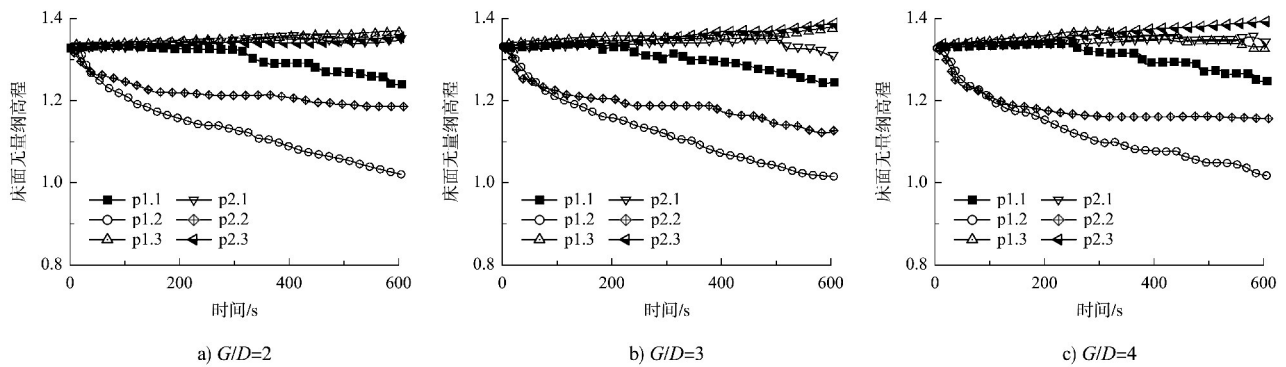


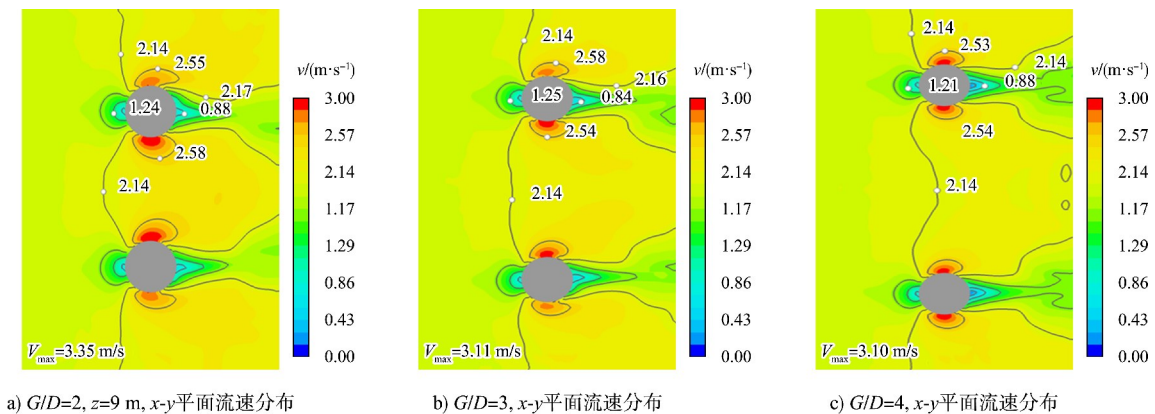
图 7  $t=600$  s 内双桩串联布置桩周不同位置床面无量纲高程变化

Fig. 7 Temporal variation of normalized bed elevation at different circumferential positions around tandem twin-piles within  $t=600$  s

### 2.3.2 双桩并排

在双桩并排布置的情况下，在不同桩距条件下， $t=600$  s 时刻流场速度、床面超额剪切应力以及冲刷深度的对比见图 8。在  $G/D=2$  时，相邻桩之间存在较强的间隙流，桩间流速较大，同时，马蹄涡尺寸较大，床面剪切应力也较大，所以在桩间距较小时，冲刷深度较单桩大大增加，当  $G/D=2$  时，最大冲刷深度为 2.75 m，较相同水动力条件下单桩最大冲刷深度增加了 33%。随着桩间距的增大，桩间流场的互扰效应减小，床面超额剪切应力减小，

桩周冲刷深度也减小。不同桩距下并排双桩桩周以及两桩中间处冲刷深度随时间的变化见图 9。当  $G/D=2$  时，两桩内侧冲刷深度较外侧高 7%，且两桩中间处也有明显的冲刷；当  $G/D \geq 3$  时，两桩内外两侧冲刷深度已基本相同，且两桩中间处冲刷程度随桩距增大而减小。值得注意的是，在  $G/D=4$  时，双桩并排布置时桩周冲刷深度仍然大于单桩工况，且由  $G/D=3$  到  $G/D=4$ ，冲刷深度减小程度并不明显，这表明，双桩并排情况下，当桩距增大到一个较大数值时，桩间互扰效应才可能消失。



a)  $G/D=2$ ,  $z=9$  m,  $x$ - $y$  平面流速分布

b)  $G/D=3$ ,  $x$ - $y$  平面流速分布

c)  $G/D=4$ ,  $x$ - $y$  平面流速分布

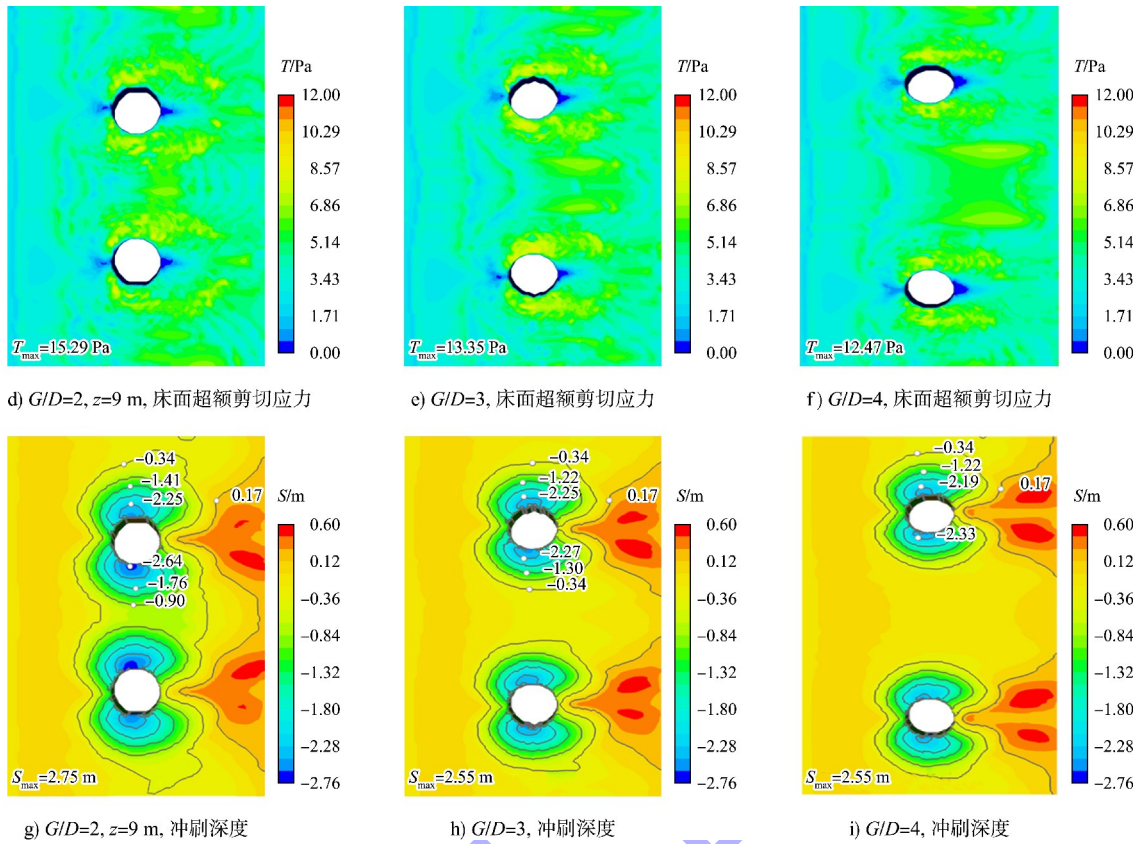


图 8  $t=600\text{ s}$  时不同桩距下并排布置双桩周围流场及冲刷特性分布

Fig. 8 Flow field and scour characteristics around side-by-side twin-piles with various spacing ratios at  $t=600\text{ s}$

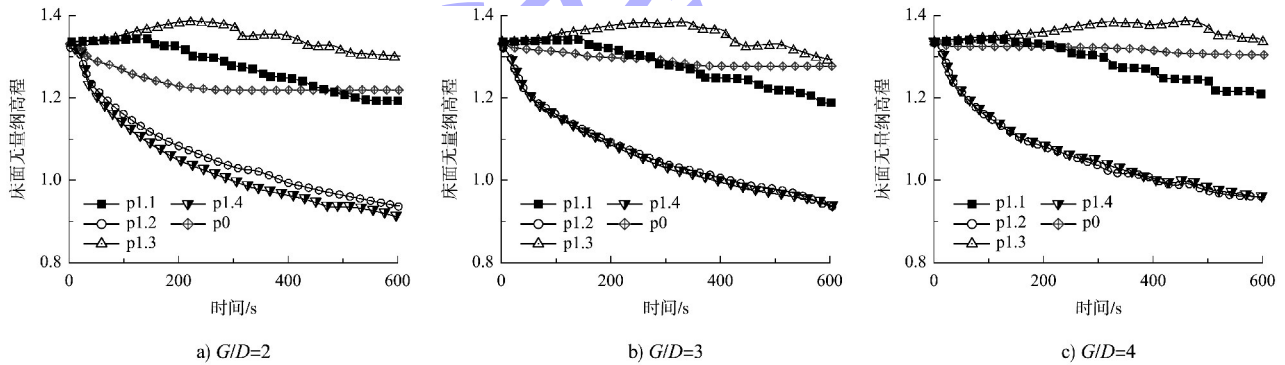


图 9  $t=600\text{ s}$  内双桩并排布置桩周不同位置床面无量纲高程变化

Fig. 9 Temporal variation of normalized bed elevation at different circumferential positions around side-by-side twin-piles within  $t=600\text{ s}$

### 2.3.3 三桩正三角形

三桩正三角排布下桩间距  $G/D=1、3、5$  的情况下  $t=600\text{ s}$  时流场速度、超额剪切应力冲刷深度云图以及各桩桩周床面无量纲高程随时间变化曲线分别见图 10、11。三桩正三角布置下, 随着桩距的增大, 流场最大流速、最大冲刷深度、床面最大超额剪切应力均表现出先增大后减小的趋势; 当  $G/D=1$  时, 前排两桩间的加速流导致桩内侧冲刷深度显著大于外侧, 同时两桩中心区域产生明

显冲刷; 当  $G/D=3$  时, 流场干涉减弱, 后排桩侧冲刷深度与前排趋于一致, 且前排两桩中心位置冲刷程度显著减小, 后桩桩后位置由  $G/D=1$  时持续淤积过程转变为“先淤后冲”的过程; 当  $G/D=5$  时, 各桩绕流趋于独立, 整体冲刷强度降低, 且后桩桩后位置转变为持续冲刷的过程。值得注意的是, 所有工况下最大冲刷深度较单桩增加了 20%~30%, 表明三桩正三角布置始终存在显著的群桩效应。

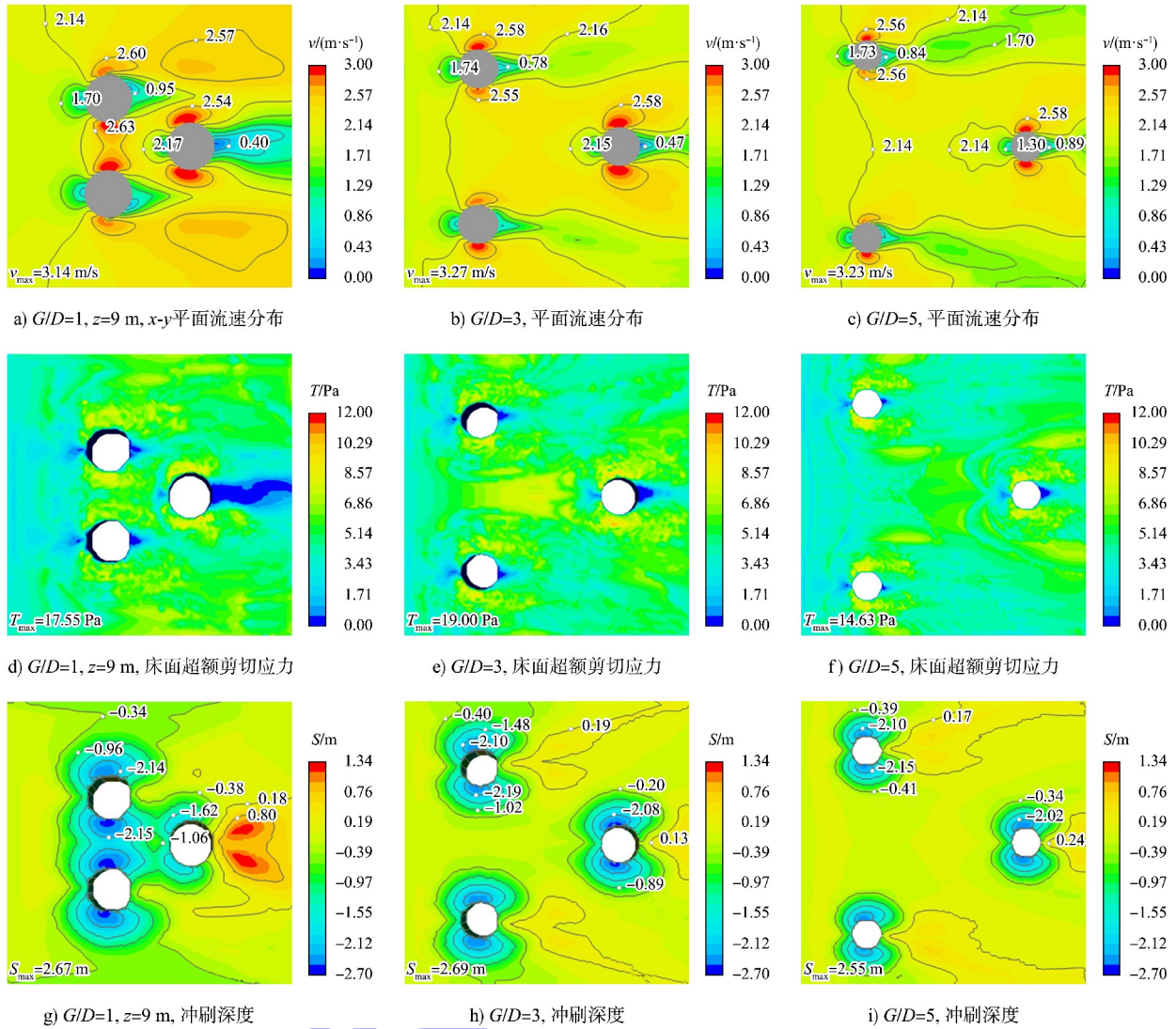


图 10  $t=600\text{ s}$  时不同桩距下三桩正三角形布置周围流场及冲刷特性分布

Fig. 10 Flow field and scour characteristics around equilateral triangular pile clusters with various spacing ratios at  $t=600\text{ s}$

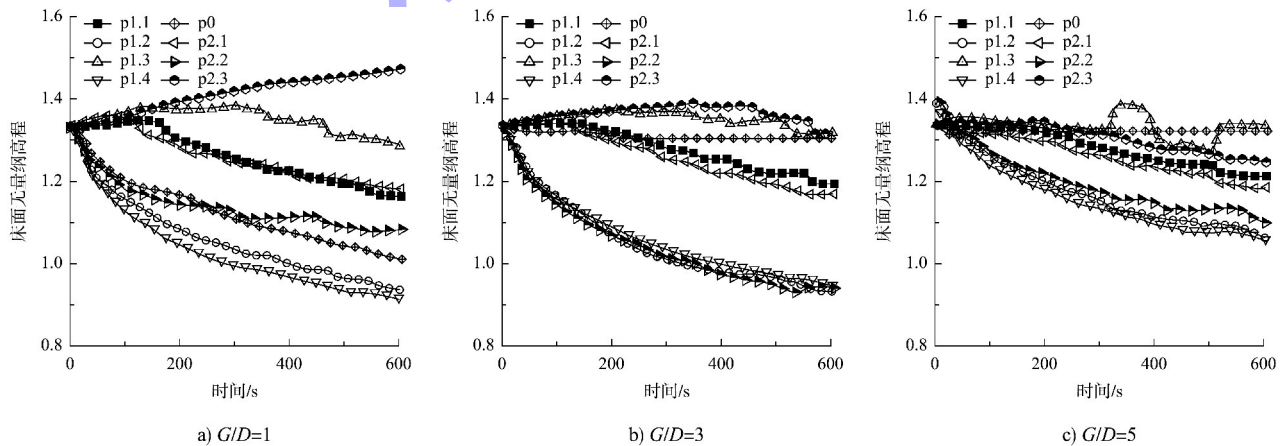


图 11  $t=600\text{ s}$  内三桩正三角形布置桩周不同位置床面无量纲高程变化

Fig. 11 Temporal evolution of normalized bed elevation at circumferential positions around an equilateral triangular pile cluster within  $t=600\text{ s}$

### 2.3.4 三桩倒三角形

三桩倒三角排布下桩间距  $G/D=1、3、5$  的情况下  $t=600\text{ s}$  时流速分布、超额剪切应力冲刷深度云图以及各桩桩周床面无量纲高程随时间变化曲线分别见图 12、13。随着桩距增大, 最大流速和冲刷深度同样呈现先增后降趋势, 而最大超额剪切应力在  $G/D\geq 3$  时维持较高水平。最大冲刷深度变化与床面最大超额剪切应力变化规律表现出一致性。当  $G/D=1$  时, 由于前排桩尾涡与后排双桩

的相互作用, 在后排桩间及外侧形成局部加速区, 后排两桩桩周冲刷程度大于前排桩, 且后排两桩桩外侧大于内侧, 两桩中心也表现出明显的冲刷现象; 当  $G/D=3$  时, 后排两桩桩内外侧趋近于相同, 且两桩中心冲刷明显降低; 当  $G/D=5$  时, 后排两桩桩内外侧冲刷程度基本一致; 总的来讲, 三桩倒三角排布下, 最大冲刷深度较单桩增加了 30% 以上, 高于同桩距下正三角排布, 因此在实际工程中应尽量避免此种排布形式。

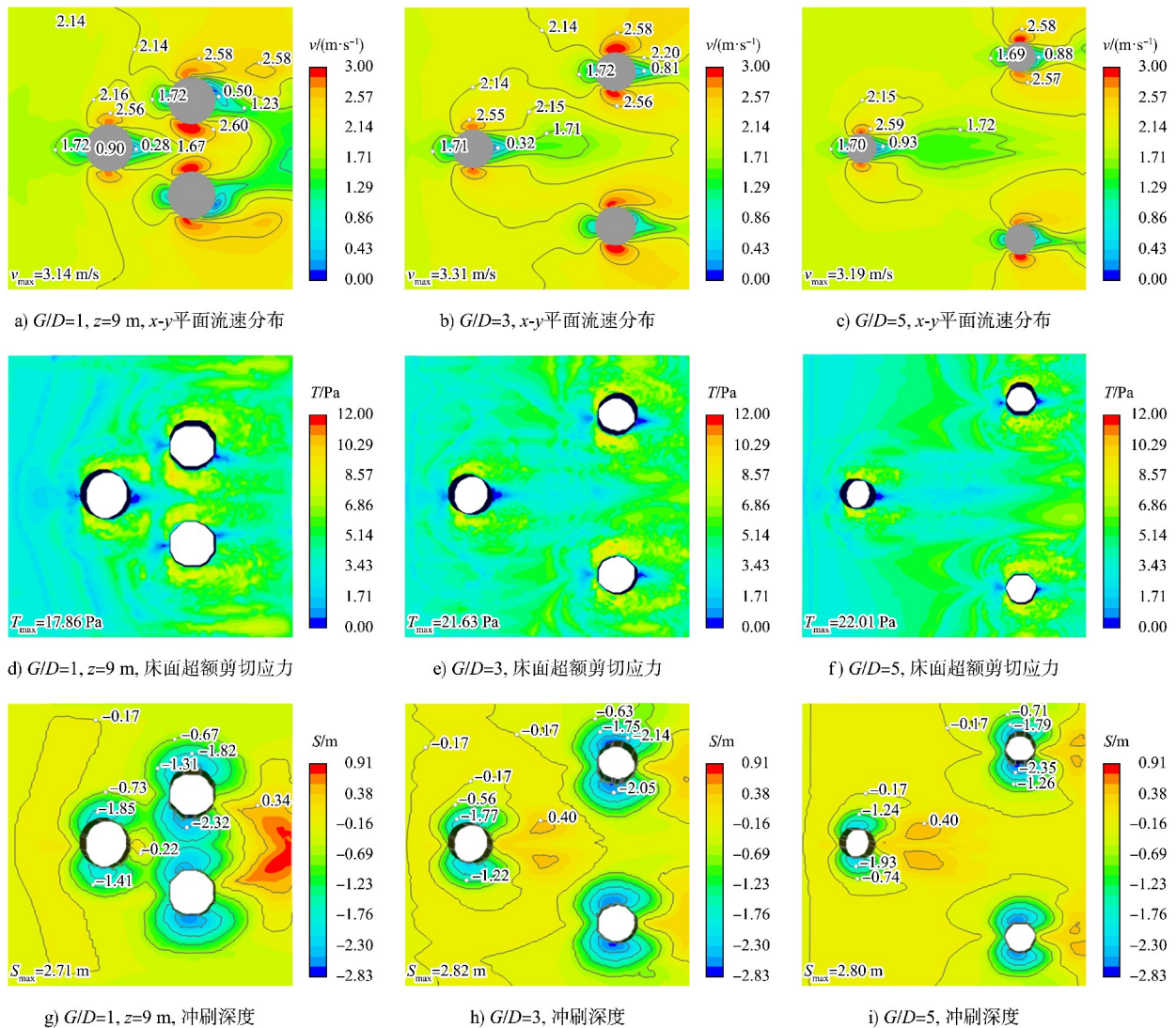


图 12  $t=600\text{ s}$  时不同桩距下三桩倒三角形布置周围流场及冲刷特性分布  
 Fig. 12 Flow field and scour characteristics around inverted triangular pile clusters with various spacing ratios at  $t=600\text{ s}$

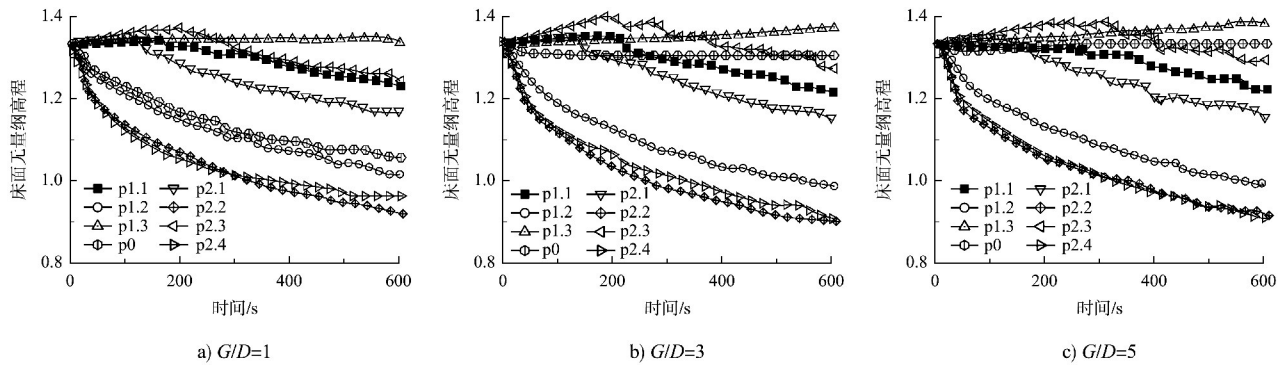


图 13  $t=600$  s 内三桩倒三角形布置桩周不同位置床面无量纲高程变化

Fig. 13 Temporal evolution of normalized bed elevation at circumferential positions around an inverted triangular pile cluster within  $t=600$  s

### 2.4 不同布置形式及桩距下的冲刷特性差异

单桩及 4 种典型群桩布置下，模拟结束时的最大无量纲冲刷深度见图 14。双桩串联布置在  $G/D \geq 3$  时冲刷深度与单桩相当，显示出良好的流场恢复特性；而双桩并排布置即使增大至  $G/D=4$ ，冲刷深度仍较单桩增加 24%，表现出持续的干涉效应。三桩布置中，正三角形形式在  $G/D=5$  时冲刷深度较  $G/D=3$  降低 5.2%，呈现先增后减趋势；相比之下，倒三角形布置在所有桩距下均表现出更强烈的冲刷效应，较单桩增加 30% 以上。综合分析表明，正三角形和双桩串联在适当桩距下能有效控制冲刷发展，而倒三角布置因强烈的尾流干涉效应，冲刷更为显著，工程中应避免应用。

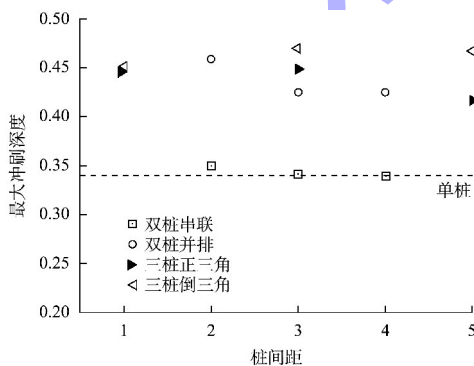


图 14 单桩以及 4 种群桩布置在不同桩间距下最大无量纲冲刷深度

Fig. 14 Maximum normalized scour depth for monopile and four group pile configurations at various spacing ratios

### 3 结论

1) 床面最大超额剪切应力随桩距的变化趋势

与流场最大流速及最大冲刷深度基本一致，其空间分布与持续时间对冲刷发展具有关键控制作用。

2) 双桩串联布置中，前桩冲刷特性与单桩相近，后桩因遮蔽效应冲刷深度降低 34%~53%。建议采用桩距  $G/D=3\sim4$ ，以兼顾遮蔽效应与冲刷风险控制。双桩并排布置在  $G/D=2$  时，最大冲刷深度较单桩增加 33%，内侧冲刷深度高于外侧 7%；桩距增大至  $G/D=4$  时冲刷仍显著大于单桩，表明互扰效应持续存在。

3) 三桩正三角布置在  $G/D=1$  时前排桩冲刷深度大于后排，内侧较外侧高 6.3%；随桩距增大，最大冲刷深度呈先增后减趋势，整体较单桩增加 20%~30%。三桩倒三角布置冲刷更为显著，整体冲刷深度增加 30% 以上，工程中应避免采用。

4) 本研究基于恒定流与均匀砂质海床假设，所得结论在当前模拟的桩距范围内成立。后续研究将进一步扩充桩距参数，并引入波-流耦合及泥沙非均匀性条件。

### 参考文献:

[1] MATHEWS J, THURBON E, KIM S Y, et al. Gone with the wind: how state power and industrial policy in the offshore wind power sector are blowing away the obstacles to East Asia's green energy transition [J]. Review of evolutionary political economy, 2023, 4(1): 27-48.

- [2] 陈建均. 海上风电单桩基础冲刷固化土防护应用研究[J]. 水道港口, 2024, 45(5): 764-771.  
CHEN J J. Research on application of scour prevention technology for single pile foundation of offshore wind power[J]. Journal of waterway and harbor, 2024, 45(5): 764-771.
- [3] QU L L, AN H W, DRAPER S, et al. A review of scour impacting monopiles for offshore wind [J]. Ocean engineering, 2024, 301: 117385.
- [4] WHITEHOUSE R. Scour at marine structures: a manual for practical applications[M]. London: Thomas Telford, 1998.
- [5] SUMER B M, FREDSE J. Scour around pile in combined waves and current [J]. Journal of hydraulic engineering, 2001, 127(5): 403-411.
- [6] SUMER B M, FREDSE J. Wave scour around a large vertical circular cylinder[J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 2001, 127(3): 125-134.
- [7] SUMER B M, FREDSE J. The mechanics of scour in the marine environment[M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2002.
- [8] ROULUND A, SUMER B M, FREDSE J, et al. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile [J]. Journal of fluid mechanics, 2005, 534: 351-401.
- [9] 邓绍云. 圆柱桩群局部冲刷特性试验[J]. 水运工程, 2011(10): 15-19.  
DENG S Y. Experimental characteristics of local scour around cylinder pile clusters [J]. Port & waterway engineering, 2011(10): 15-19.
- [10] 代浩, 戴国亮, 杨炎华. 波浪作用下局部冲刷群桩动力特性试验研究[J]. 水运工程, 2017(1): 147-151, 157.  
DAI H, DAI G L, YANG Y H. Experimental study on dynamic response of local scoured group piles under wave loading [J]. Port & waterway engineering, 2017(1): 147-151, 157.
- [11] 刘嫔. 高桩码头桩基局部冲刷研究[J]. 水运工程, 2020(8): 100-102.  
LIU P. Research on local scour of pile foundation of high-piled wharf [J]. Port & waterway engineering, 2020(8): 100-102.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 伍志元, 李昂, 蒋昌波, 等. 水流作用下桩基局部水沙动力特征数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2024(5): 42-53.  
WU Z Y, LI A, JIANG C B, et al. Numerical simulation of local hydro-sediment dynamics around pile foundations under flow conditions [J]. Hydro-science and engineering, 2024(5): 42-53.
- [15] 刘钦, 赵红宇, 余冰茜, 等. 恒流条件下三桩基础局部冲刷数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(3): 438-449.  
LIU Q, ZHAO H Y, YU B Q, et al. Numerical simulation of local scouring of three piles under steady currents[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(3): 438-449.
- [16] HIRT C W, SICILIAN J M. A porosity technique for the definition of obstacles in rectangular cell meshes [C]// Proceedings of the 4th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics. Washington, D. C. : National Academy of Sciences, 1985: 1-15.
- [17] MASTBERGEN D R, VAN DEN BERG J H. Breaching in fine sands and the generation of sustained turbidity currents in submarine canyons [J]. Sedimentology, 2003, 50(4): 625-637.
- [18] SOULSBY R. Dynamics of marine sands: a manual for practical applications[M]. London: Thomas Telford, 1997.
- [19] MEYER-PETER E, MÜLLER R. Formulas for bed-load transport[C]//Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Research.

Stockholm: IAHR, 1948: 39-64.

[20] SARKER M A. Flow measurement around scoured bridge piers using Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV) [J]. Flow measurement and instrumentation, 1998, 9(4): 217-227.

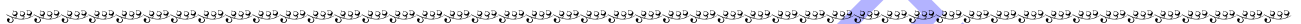
[21] KHOSRONEJAD A, KANG S, SOTIROPOULOS F. Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers [J]. Advances in water resources, 2012, 37: 73-85.

[22] 杨娟, 朱聪, 蔡丽, 等. 海上风电场不同结构形式桩基局部冲刷数值模拟 [J]. 人民长江, 2020, 51 (9): 151-157.

YANG J, ZHU C, CAI L, et al. Numerical simulation of local scouring around different structural forms of pile foundations for offshore wind farm [J]. Yangtze River, 2020, 51(9): 151-157.

[23] ZDRAVKOVICH M M. The effects of interference between circular cylinders in cross flow [J]. Journal of fluids and structures, 1987, 1(2): 239-261.

(本文编辑 王传瑜)



(上接第 71 页)

[13] 王子恒, 余文成, 刘均利, 等. 高强灌浆料加固既有 RC 柱的偏心受压试验分析 [J]. 桂林理工大学学报, 2023, 43(1): 91-95.

WANG Z H, YU W C, LIU J L, et al. Analysis of eccentric compression test for reinforcement of existing RC columns with cement-based grouting material [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2023, 43(1): 91-95.

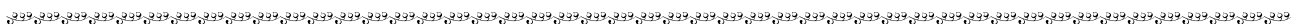
[14] 陈俊岭, 段建平, 冯又全, 等. 环氧树脂灌浆料在风电机组基础环式基础加固中的应用研究 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 259-265.

CHEN J L, DUAN J P, FENG Y Q, et al. Application research of epoxy resin grouts in strengthening of ring foundation for wind turbine tower [J]. Acta energiae solaris sinica, 2022, 43(10): 259-265.

[15] 冷玉坤, 刘均利, 余文成, 等. 高强灌浆料加固既有 RC 梁抗弯性能分析 [J]. 华侨大学学报 (自然科学版), 2022, 43(1): 51-58.

LENG Y K, LIU J L, YU W C, et al. Flexural performance analysis of existing RC beams strengthened using high-strength grouting material [J]. Journal of Huaqiao University (natural science), 2022, 43(1): 51-58.

(本文编辑 王传瑜)



### 著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司等以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部