



码头桩柱群局部冲刷特征三维数值模拟研究*

耿川¹, 李有为², 黄秀乾³, 黄卫³, 杨青远³

(1. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430060;

2. 长江航道勘察设计院(武汉)有限公司, 湖北 武汉 430040; 3. 长江水利委员会长江科学院水力学所, 湖北 武汉 430010)

摘要: 针对实际码头工程中桩柱数量多、建模难度大及计算时间长的问题, 采用不同布置形式下典型桩柱群单元局部冲刷特性的三维水沙模型揭示桩柱群冲刷深度、范围及局部流速变化。以单柱局部冲刷结果进行验证, 不同桩柱布置形式局部冲刷模拟结果表明: 单柱、双柱和桩柱群的冲刷深度和形态有明显差异, 随着桩柱数量增加, 局部冲刷深度逐渐减小, 冲刷形态趋于均匀。大洪水条件下, 码头引桥桩柱(顺水流双柱)局部冲刷明显(3.30~4.31 m), 柱间区域尤为突出。码头平台桩柱(典型桩柱群)冲刷相对均匀(2.5~4.0 m), 高流速区域可能加剧冲刷; 典型三柱群冲刷较浅, 有效降低主桩柱的冲刷深度, 合理布置防撞墩可显著降低冲刷范围和深度。提出的高洪条件下桩柱局部流速大小、冲刷深度和范围, 可为长江中下游桩柱防护中的抛石粒径、防护范围等设计参数提供依据。

关键词: 桩柱群; 局部冲刷; 水沙数学模型; 桩柱防护

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0047-09

Three-dimensional numerical simulation on local scour characteristics of pile-column groups for wharf

GENG Chuan¹, LI Youwei², HUANG Xiuqian³, HUANG Wei³, YANG Qingyuan³

(1. CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430060, China;

2. Changjiang Waterway Survey Design and Research Institute (Wuhan) Co., Ltd., Wuhan 430040, China;

3. Water Conservancy Research Institute, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: To address the challenges of numerous piles and columns, complex modeling, and lengthy computation times in actual wharf engineering projects, we innovatively employ three-dimensional sediment transport model to investigate the local scour characteristics of typical pile-column groups under different arrangements, reveal the scour depth, extent, and local velocity changes within pile-column clusters, and verify by single-column local scour results. The simulations of different pile-column configurations demonstrate distinct differences in scour depth and morphology among single column, double columns, and pile-column groups. As the number of pile-columns increases, local scour depth gradually decreases while scour patterns become more uniform. Under high flood conditions, significant local scouring (3.30–4.31 m) occurs at the pier columns of the wharf approach bridge (twin columns aligned with the flow), particularly pronounced in the inter-column zones. The scour around the wharf platform piles (a typical pile cluster) is relatively uniform (2.5–4.0 m), though high-velocity zones may intensify scouring. The typical three-pile cluster exhibited shallower scour, effectively reducing the scour depth of the main piles. Rational placement of fender piles can significantly reduce both the scour extent and depth. The findings on local flow velocities, scour depth, and extent under high flood conditions provide a basis for determining design parameters such as rock size and protection range for pile column protection in the middle and lower reaches of the Yangtze River.

Keywords: pile-column group; local scour; water and sediment numerical model; pile-column protection

收稿日期: 2025-09-15 录用日期: 2025-11-28

*基金项目: 国家自然科学基金铁路创新发展联合基金项目(U2469205); 中央级科研院所基本科研业务费项目(CKSF2019175/SL)

作者简介: 耿川(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口航道工程和水务环保工程设计工作。

桩柱局部冲刷是一个复杂的三维水沙动力过程,流经桩柱周围的水流将形成复杂的三维流态,是涉水构筑物水毁的主要诱因,因此准确预测冲刷特征对保障工程安全至关重要。目前单桩冲刷机理研究已较为成熟,国内外学者提出了大量的经验公式^[1-4]。虽然不同公式的适用条件有所差异,但选择合适的公式和参数仍能获得比较合理的冲刷预测值。

为解析桩群冲刷的机制与特征,数值模拟因其可复现复杂流场与动态冲刷过程的优势,成为重要研究手段。吴承伟等^[5]采用 ANSYS Fluent 对交错布置双柱桥墩在不同桩间距下的三维绕流流场特性以及水动力产生机理进行研究; Wang 等^[6]使用三维有限元分析,表明冲刷对群桩的横向响应有显著的不利影响;伍志元等^[7]通过嵌套网格技术,阐明冲刷时间、流速、水位、水流攻角等来流条件及桩间距对桩柱冲刷的影响;张曙光等^[8]基于 FLOW-3D 大涡模拟成功复现了圆柱桥墩的冲刷形态;李安斌等^[9]利用 FLOW-3D 大涡模拟,指出 Meyer-Peter 公式较 van Rijn 公式在桥墩绕流局部冲刷模拟中的适用性更好;刘钦等^[10]模拟恒流条件下砂质海床上等边三角布置的三桩基础局部冲刷,发现其存在着最优桩间距、最不利桩间距和最不利水流攻角;王多银等^[11]结合水槽试验与 FLOW-3D 数值模拟,研究非恒定流下方形布置四圆柱桩群冲刷,明确上下游桩冲刷范围差异及最大冲刷深度与体积随时间呈对数增长至平衡的规律;苏洋等^[12]对不同流速和桩径条件下的群桩基础局部冲刷开展数值模拟计算,揭示了冲刷深度的时程变化机理;邓绍云^[13]通过恒定流宽长水槽试验,发现圆柱桩群排列方式是影响床面冲淤的核心因素,水深、流速则通过改变流场间接影响冲淤特性;骆光杰等^[14]针对海上风电单桩基础的研究表明,在桩周设置圆形防护板可有效扰乱桩前水流结构,使最大冲刷深度降低约 88%,为贴近泥面的刚性防护措施提供了设计参考;张以升等^[15]提出一种置于桥墩上游的拟树桩群防护结构,该结构能有效促进悬移质泥沙落淤,并将河床泥沙冲刷量降至无防护时的 22%,展示了一种通过改

变桩前水流泥沙运动来实现“以淤代冲”的主动防护新思路;于松宁等^[16]针对不同倾斜方向圆桩开展恒定清水冲淤试验,揭示向下游倾斜减冲、向上游倾斜加冲及侧向倾斜冲淤偏态分布的特征;Nazariha^[17]开展清水冲刷试验,对双柱布置形式和间距较为系统的研究,但未考虑来流含沙量的影响;Du 等^[18]对单个桩柱不同倾斜角条件下的冲刷特征开展试验研究,发现倾斜桩柱对冲刷有抑制作用,抑制效果受水流-波浪条件影响;Gupta 等^[19]通过数值模拟研究防护翼对桥墩局部冲刷的防护效果,表明其可显著减小冲刷深度,为桩柱防护提供了新思路。

综上所述,目前对于桩柱群局部冲刷的研究成果仍显不足。由于不同的桩群布置形式对冲刷深度和范围有较为明显的影响,现有研究的水沙条件也以多年平均情况为主,现有成果难以直接应用到长江中下游大洪水条件下的桩群局部冲刷预测上。同时,现有研究主要关注冲刷坑的特征,未考虑冲刷坑形成后的水动力特征,不能直接为防护材料选择提供依据。实际码头工程包括了引桥和码头平台,桩柱数量众多。若对所有的桩柱进行建模,网格尺寸需要达到 0.1 m 及以下才能较为精确地刻画桩柱,计算网格单元高达数十亿个,难以有效开展三维水沙计算,即使部分高性能平台能够计算,其计算时间也特别长,计算成本巨大。但该方法对设计的指导作用极其有限。本文运用 FLOW-3D 的三维水沙数学模型,针对码头工程典型的桩柱群单元开展模拟研究,通过模拟不同布置形式下的局部流速变化、冲刷深度及其范围,揭示倾斜桩体与垂直桩体局部冲刷差异,为工程防护设计提供理论支撑。

1 模型率定与验证

本文采用 FLOW-3D 水沙模型进行研究,水流模型采用大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 湍流封闭模式,模型基本介绍可参考文献[9]。由于局部冲刷主要是推移质起动输移的结果,泥沙输移采用 Meyer-Peter 公式^[20]:

$$q_b = 8(\Theta - \Theta_c)^{1.5} \left[\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) g d^3 \right]^{0.5} \quad (1)$$

式中: q_b 为单宽推移质输沙率; Θ 为希尔兹参数 (Shields number), 表征水流强度; Θ_c 为临界希尔兹数; d 为泥沙粒径; ρ_s 为泥沙干密度; ρ 为水密度; g 为重力加速度。

1.1 经典水槽试验验证

Melville 冲刷试验是经典的单个圆柱冲刷试验, 其试验条件和布置图可参考文献[9]。本文将计算域高度设置为 25 cm (其中床沙厚度为 5 cm), 宽度为 45.60 cm, 为使上游来流和下游尾流充分发展, 进口和出口距桥墩中心均为 100.0 cm。进口为流速边界条件, 设置为 0.25 m/s, 出口边界条件为压力, 底面采用无滑移边界条件, 粗糙高度为 2.5 倍粒径, 左右边界条件为无滑移边界条件, 水面为压力边界条件。冲刷坑深度随时间发展过程见图 1。可以看出, 模型能够较好地模拟冲刷坑先快速增加后逐渐趋于稳定的发展规律, 定量上模拟值为 3.8 cm, 与试验值 4 cm 误差为 5%。为了探讨网格对计算结果的影响, 设置从 0.3 ~ 3.0 cm 的多种均匀网格尺寸。从结果来看, 当网格尺寸与柱体直径比在 1/10 ~ 1/5 范围时, 计算结果与试验值非常接近, 在尺寸比达到 1/10 左右能够实现网格独立性见图 2。

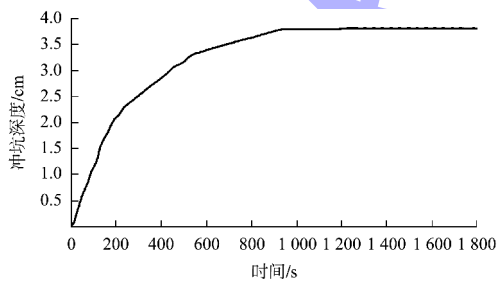


图 1 冲刷坑深度随时间发展过程

Fig. 1 Development of scour pits depth over time

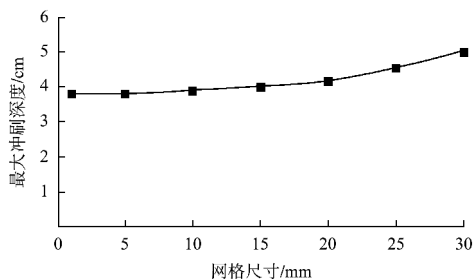


图 2 不同网格尺寸对冲刷深度影响

Fig. 2 Effect of different grid size on scour depth

1.2 单个圆柱冲刷模拟与验证

单个圆柱冲刷方案主要目的是为了率定三维水沙模拟相关参数。其中, 最重要的参数为泥沙上扬系数, 是最终冲刷深度和冲刷历时的关键影响参数。根据已有模拟和相关文献的经验, 在进行具体工程计算前需要对该参数进行率定。

1.2.1 经验公式

现有的桥墩局部冲刷经验(半经验)公式较多, 桥墩等涉河建筑物局部冲刷设计中, 采用最为广泛的是 JTG C30—2015《公路工程水文勘测设计规范》^[21](简称“规范”)。

此外, 文献[2]从能量平衡理论出发, 用量纲平衡法推导得到桥墩局部冲刷公式, 并根据天然实测资料引入泥沙不均匀系数, 并用大量室内试验和天然实测资料进行系数的率定。

$$h_b = 4.37K_1K_2d \left[\frac{(v - v'_0)}{\sqrt{sgd}} \left(\frac{B}{d} \right)^{0.45} \left(\frac{h_p}{d} \right)^{0.1} \right]^{1.08} \quad (2)$$

式中: h_b 为桥墩局部冲刷深度; K_1 为墩型系数; K_2 为河床颗粒影响系数; v 为一般冲刷后墩前进行流速; v'_0 为始冲流速, 近似取 $v'_0 = 0.5v_0$, v_0 为泥沙起动流速, 当 $v/v_0 > 5.0$ 时, 式(2)中指数由 1.08 改为 1.04; s 为泥沙相对密度, 一般取 1.65; B 为墩宽; h_p 为行近水深; d 为泥沙粒径。

文献[3]从桥墩局部冲刷机理出发, 利用不同国家的实测资料, 用量纲分析和回归分析建立桥墩局部冲刷经验公式, 即:

$$h_b = 0.304K_1h_p^{0.29}B^{0.53}d^{-0.13}v^{0.61} \quad (3)$$

式(3)率定选用资料范围较广, 结构比较简单, 所以在初步估算时适用。

1.2.2 冲刷深度验证

本文模拟桩柱直径有 1.0 和 1.2 m, 因为 1.2 m 直径冲刷较 1.0 m 稍大, 所以选用 1.2 m 直径桩柱开展模拟, 以此计算结果为依据设计能够保证所有桩柱的安全。为了能够较为准确地反映桩柱,

桩柱局部网格尺寸为 0.1 m，其余范围为 1 m 网格。

采用经验公式估计的冲刷深度见表 1。根据经验公式来看，该水流条件和床沙粒径条件下冲刷深度为 5 m 以上，为了保证安全选择较大值 5.58 m。通过调整泥沙上扬系数为 0.04，计算最大冲刷深度为 5.61 m，与规范公式极为接近。并且，冲刷形态与文献成果相似。因此可认为本文模型能够较好地模拟桩柱冲刷，率定后的模型可用于后续方案研究的计算。

表 1 不同经验公式冲刷深度计算结果

Tab. 1 Results of scour depth calculations with different empirical formulas

d/mm	$v_0/(m \cdot s^{-1})$	$v'_0/(m \cdot s^{-1})$	h_b/m	经验公式
0.15	0.258	0.095	5.58	规范公式
0.15	0.230	0.216	5.16	文献[2]公式
0.15	-	-	2.15	文献[3]公式

1.2.3 冲刷特征

单柱作用下冲刷深度平面分布和冲刷后三维地形高程分布分别见图 3 和 4。可以看出，冲刷坑呈现马蹄形状，局部主要冲刷深度在 4.5~6.0 m，4.5 m 及以上冲刷深度的范围顺水流方向为-4~16 m，垂直水流方向为-4~4 m，面积约为 144 m²，局部冲刷 4.5 m 深及以上的区域体积为 768 m³。

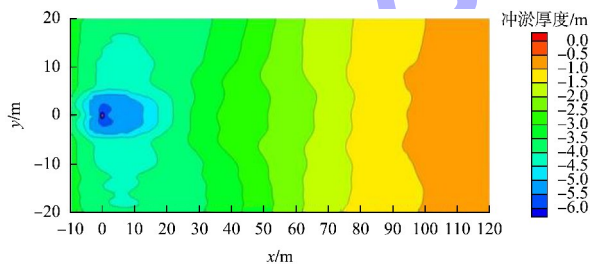
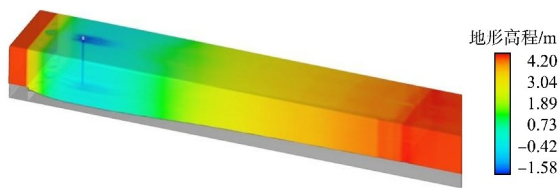


图 3 单个桩柱作用下冲淤厚度平面分布

Fig. 3 Plane distribution of scour thickness under action of single pile-column



a) 局部流场结构



b) 河床冲淤地形

图 4 单个桩柱作用下冲刷后三维地形高程分布

Fig. 4 Elevation distribution of three-dimensional topography after scouring by single pile-column

单柱作用下冲刷前后垂向平均流速分布见图 5。可以看出，桩柱的存在显著改变了局部流速分布，冲刷前，局部流速存在大于来流平均流速的区域，且成对称分布，桩柱附近最大流速为 4.73 m/s；冲刷后由于该河段发生了较大的冲刷，流速较进口平均流速小，但是圆柱局部垂向平均流速仍可达 3.2 m/s。

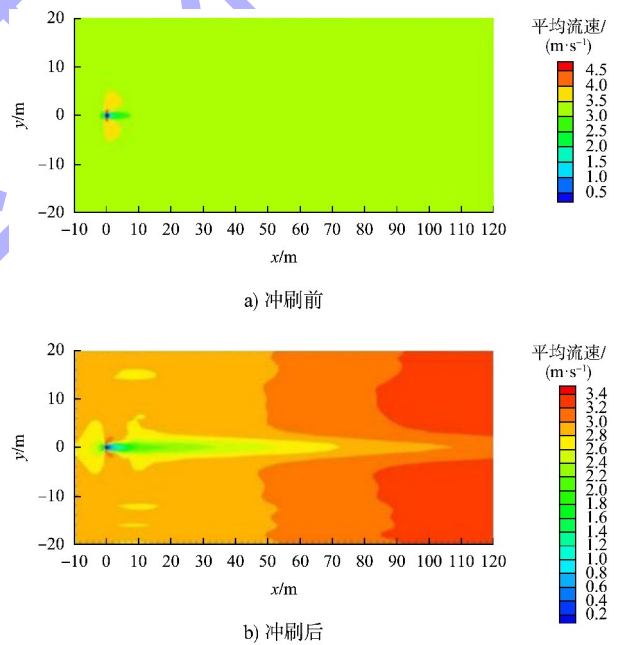


图 5 冲刷前后垂向平均流速分布

Fig. 5 Distribution of vertical mean flow velocity before and after scouring

2 计算工况与模型构建

2.1 计算工况

经过初步建模尝试和分析发现，若要开展工程中引桥和码头平台的所有桩柱群局部冲刷特性模拟研究，需要对所有的桩柱进行建模，网格尺寸需要达到 0.1 m 及以下才能较为精确地刻画桩柱，这导致建模工作量特别巨大，总的计算网格

单元高达数十亿个,一般工作站没有足够的储存空间和计算内存,无法开展计算。即使部分高性能工作站能够计算,其计算时间也特别长。更为重要的是,将每个桩柱精细建模计算对设计的指导作用极其有限。因此,这种方案不可行也无必要。从目标可达性、方案可行性和工作量等多方面综合考虑,拟定研究工况如下。

工况1:单桩局部冲刷特征研究。给定设计流量条件下的流速、水深条件,模拟单桩局部冲刷特征,并采用规范公式和文献公式进行验证,实现模型参数率定,得到单桩局部冲刷深度和范围。

工况2:引桥顺水流方向双柱冲刷特性研究。由于垂直水流方向桩距/桩柱为15,桩柱间水流相互作用对局部冲刷影响已经不明显,而顺水流方向桩距/桩柱为4,还处在对局部冲刷影响较为明显变化的范围内,因此需要开展引桥顺水流方向双柱冲刷特性研究,具体为双柱顺水流排列下,采用单柱率定后的模型参数进行数值模拟,得到局部冲刷特征(范围、深度)和局部流速大小。

工况3:码头平台桩柱群冲刷特性研究。由于顺水流方向和垂直水流方向间距都在冲刷明显变化的范围内,因此需要开展桩群作用下局部冲刷模拟研究。现有成果表明^[22],经过数排桩柱后,局部冲刷特性不再发生明显变化,因此本研究选取上游与引桥相连接的3排(顺水流)×8列(垂直水流)桩柱群单元进行模拟,得到冲刷特征。

工况4:防撞三柱单元群冲刷特性研究。由于顺水流方向和垂直水流方向的柱间距都在冲刷明显变化的范围内,并且防撞墩三柱的布置形式与引桥双柱和码头平台桩群都不同,具有独特的冲刷特征,因此需要开展桩群作用下局部冲刷模拟研究。此外,每个桩群间的距离较大,相互之间影响可以忽略,因此选择典型防撞三柱单元群开展模拟研究。

2.2 模型构建

本文模拟不以实际河道地形为对象,忽略河势引起的环流,采用典型单元为模拟对象,研究桩柱群作用下冲淤模型特征。模型计算范围:模型分为进口不可冲刷段、铺沙段和出口不可冲刷

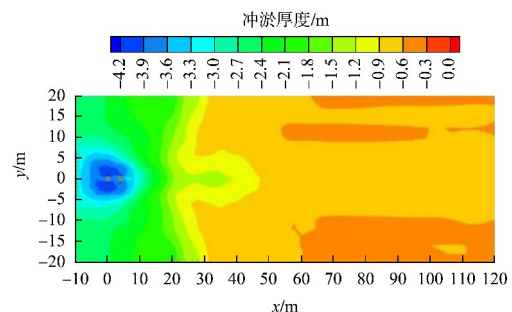
段。 x 方向长为350 m,范围为 $-50 \sim 300$ m,其中 $-50 \sim -20$ m和 $280 \sim 300$ m为河床不可冲刷段,其余段为可冲刷段。 y 方向宽40 m,范围为 $-20 \sim 20$ m, z 方向高30 m,范围为 $-4 \sim 26$ m,其中河床可冲刷深度范围为 $-4 \sim 4$ m,即泥沙厚度为8 m。

计算水沙条件:由于不同的流量与含沙量并没有良好的对应关系,从安全角度出发,选取大流量低含沙量作为计算条件。本文模拟提取不利洪水峰值流量 $Q=85\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 条件下本文模型计算范围内的定床二维水深、流速和含沙量计算结果作为计算条件^[23],对应的初始和下游边界水深为20 m,流速为3.4 m/s,含沙量为 $0.3\text{ kg}/\text{m}^3$ 。根据实测资料,给定河床中值粒径为0.15 mm。

3 结果与分析

3.1 顺水流双柱冲刷特征(引桥桩柱模拟)

双柱作用下冲刷深度平面分布和冲刷后三维地形高程分布分别见图6和7。由图6可以看出,冲刷稳定后,双柱冲刷与单柱冲刷坑形态有较大差别,其中最为显著的是两柱间和柱连线所在区域冲刷较附近冲刷深度小,从而将冲刷深度较大的区域分为了两个部分。由图7可以看出,双柱附近冲刷深度在4 m左右,最大冲刷深度为4.31 m,比单柱局部最大冲刷深度小。双柱局部发生明显冲刷深度在3.30~4.31 m。3.3 m及以上冲刷深度的范围顺水流方向为 $-9 \sim 9$ m,垂直水流方向为 $-5 \sim 6$ m,面积约为 198 m^2 ,局部冲刷3.3 m深以下区域体积为 645 m^3 。



注:冲刷为负,淤积为正。

图6 双柱作用下冲淤厚度平面分布

Fig. 6 Plane distribution of flushed silt thickness under double-column action



图 7 双柱冲刷后三维地形高程分布

Fig. 7 Elevation distribution of three-dimensional topography after double-column scouring

双柱作用下冲刷前后垂向平均流速分布见图 8。可以看出，在桩柱局部出现较大流速区域，并且呈现出基本对称的分布。由图 8a)可知，冲刷前最大流速为 4.43 m/s；由图 8b)可知，冲刷后最大流速为 3.8 m/s。因此，防护材料起动流速不能小于 4.43 m/s。

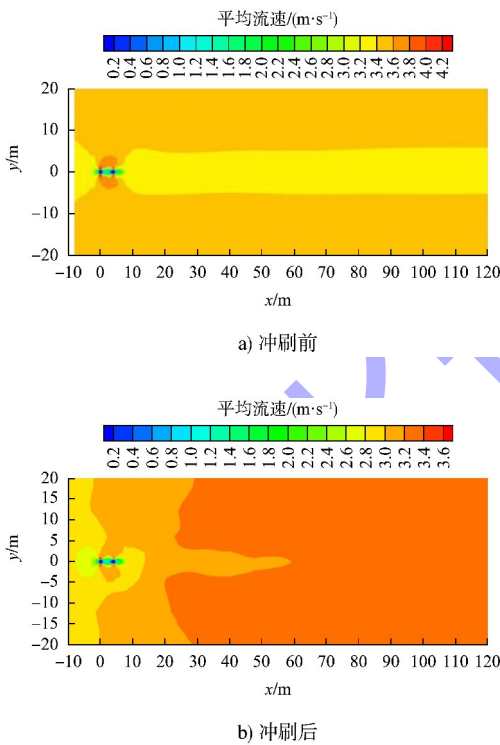


图 8 冲刷前后垂向平均流速分布

Fig. 8 Mean vertical flow velocity distribution before and after scouring

3.2 典型桩柱群冲刷特征(码头平台桩柱模拟)

本文工况计算桩柱直径存在 1.2 和 1.0 m 两种规格，且存在直桩和斜桩两种布置形式，见图 9。选取上游与引桥相连接的 3 排(顺水流)×8 列(垂直水流)桩柱群，8 列桩分别为两边各两排直桩和中间两对斜柱，模型局部网格加密见图 10。

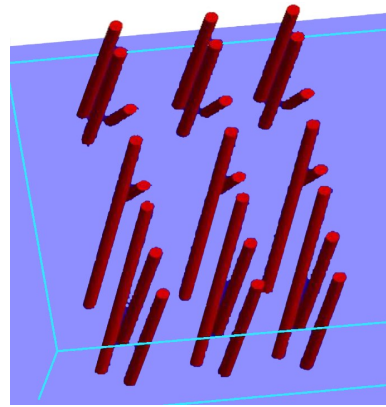


图 9 桩柱群布置

Fig. 9 Layout of pile group

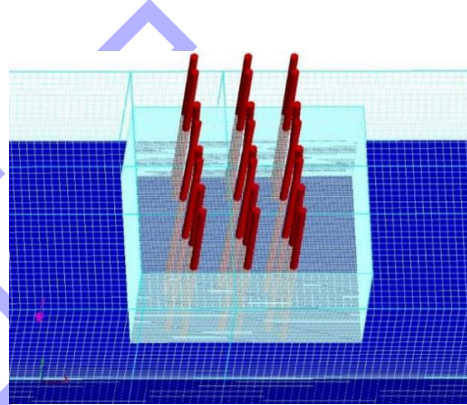


图 10 桩柱群局部网格加密

Fig. 10 Local grid encryption of pile group

桩柱群作用下冲刷深度平面分布和冲刷后三维地形高程分布分别见图 11 和 12。由图 11 可以看出，冲刷稳定后，桩群冲刷与单柱/双柱冲刷坑形态有较大差别。斜柱局部河床冲刷较直柱冲刷深度大，柱连线所在区域冲刷明显比附近冲刷深度小。斜柱靠近直柱一侧冲刷深度较小而另一侧冲刷深度较大，最大冲刷深度超过 6.0 m，比单柱/双柱局部最大冲刷深度还大。但是局部冲刷深度超过 6 m 的范围很小。桩群所在范围内发生明显冲刷深度在 2.5~4.0 m。2.5 m 及以上冲刷深度的范围顺水流方向为 -4~16 m，垂直水流方向为 -14~14 m，面积约为 560 m²，局部冲刷 2.5 m 深及以上区域体积为 1 680 m³。每个斜柱局部冲刷半径约为 2.0 m(即柱周围 1.5 m 范围内冲刷)，平均深度 3.0 m，体积为 2.25 m³，出于安全考虑，局部按冲刷体积 3.375 m³ 计算。直柱平均深度约为 1.5 m，局部冲刷体积按 1.7 m³ 计算。

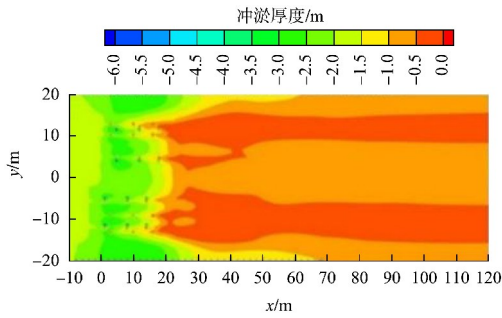


图 11 桩群作用下冲淤厚度平面分布
Fig. 11 Plane distribution of scour thickness under pile group action



图 12 桩群冲刷后三维地形高程分布
Fig. 12 Elevation distribution of three-dimensional topography after pile scouring

桩柱群作用下冲刷前后垂向平均流速分布见图 13。可以看出, 在桩柱局部出现较大流速区域, 在直柱布置之间的区域流速较大。直柱的背流区域有较为明显的流速减缓区, 而斜柱后面没有明显流速减缓区。

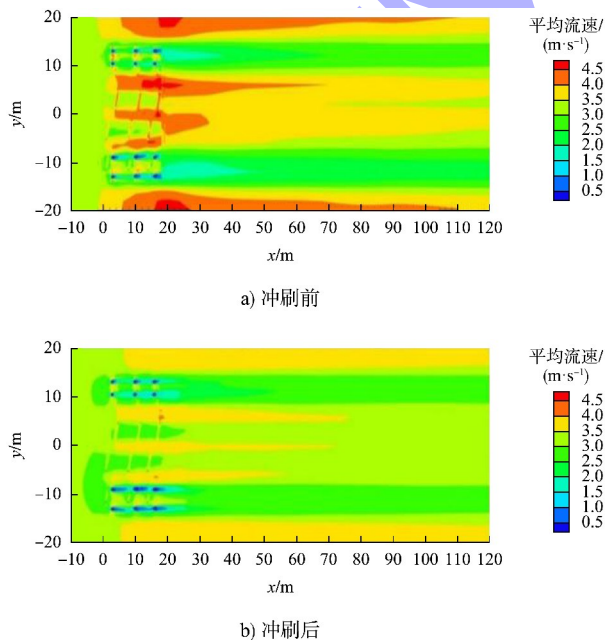


图 13 冲刷前后垂向平均流速分布
Fig. 13 Mean vertical flow velocity distribution before and after scouring

由图 13a) 可知, 冲刷前最大垂向平均流速为 4.76 m/s; 由图 13b) 可知, 冲刷后最大流速为 4.1 m/s。因此, 防护材料起动流速不能小于 4.76 m/s。

3.3 典型三柱群冲刷特征(防撞墩桩柱)

本文工况计算桩柱直径 1.7 m, 呈正三角分布, 桩间距离为 6 m, 其中迎流两个桩柱连线与水流主流方向垂直, 剩余 1 根桩柱处于下游。三柱群作用下冲刷深度平面分布和冲刷后三维地形高程分布分别见图 14 和 15。由图 14 可以看出, 冲刷稳定后, 三柱群冲刷特征与工况 1~3 条件下的冲刷特征差异明显。迎流两个桩柱局部冲刷形态与单柱冲刷形态类似, 但处于两柱间侧的冲刷深度明显大于另一侧。下游单根桩柱冲刷形态也与单柱类似, 冲刷也呈现明显对称性, 但冲刷深度明显小于迎流双柱。防撞墩所在区域冲刷较上游冲刷小, 对局部地形起到了防护的作用。防撞墩桩柱局部深度在 -0.4~0 m, 顺水流方向冲刷范围 -2~2 m, 垂直水流方向冲刷宽度 2 m。冲刷范围约 32 m², 平均冲刷深度 0.2 m, 冲刷体积 6.4 m³。

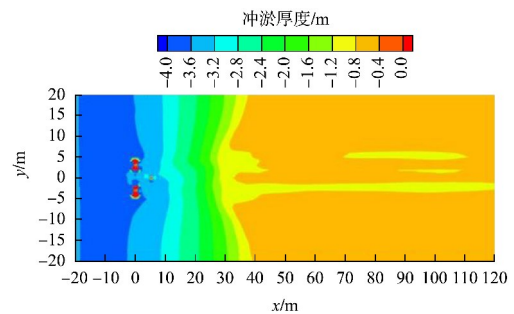


图 14 桩群作用下冲淤厚度平面分布
Fig. 14 Plane distribution of scour thickness under pile group action

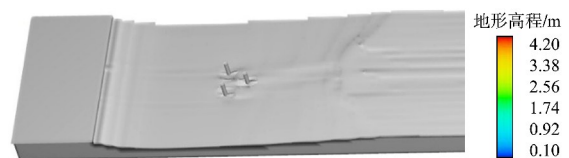


图 15 桩群冲刷后三维地形高程分布
Fig. 15 Elevation distribution of three-dimensional topography after pile scouring

三柱群作用下冲刷前后垂向平均流速分布见图16。可以看出,在桩柱局部出现较大流速区域,主要分布在桩柱两侧。桩柱背流区域有较为明显的流速减缓区。由图16a)可知,冲刷前最大垂向平均流速为4.26 m/s;由图16b)可知,冲刷后最大流速为4.10 m/s。因此,防护材料起动流速不能小于4.26 m/s。

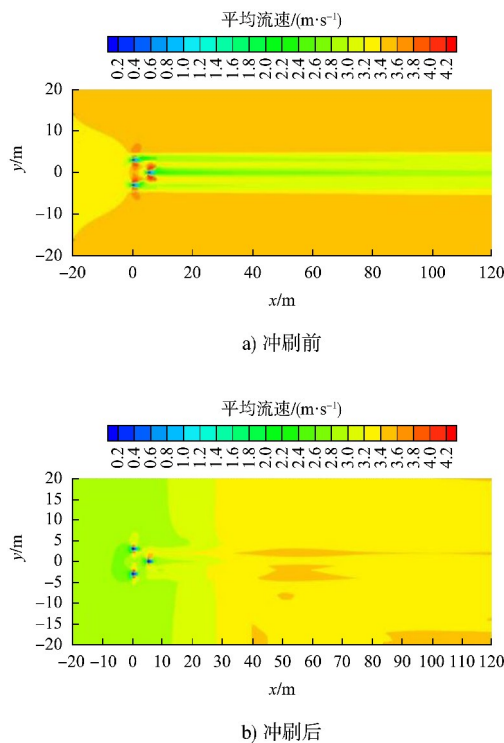


图16 冲刷前后垂向平均流速分布

Fig. 16 Mean vertical flow velocity distribution before and after scouring

4 结论

1) 单柱、双柱及桩柱群的冲刷深度和形态存在明显差异。随着桩柱数量的增加,局部冲刷深度逐渐减小,冲刷形态趋于更均匀。

2) 顺水流双柱的局部冲刷深度较大,尤其在引流方向,两柱连线两侧区域容易形成深冲刷坑。优化桩柱布局可以减缓局部冲刷,减少结构破坏风险。

3) 典型桩柱群周围的冲刷相对均匀,但流速较大区域仍可能加剧冲刷,且斜柱局部冲刷深度大于直柱。设计时应考虑柱间相互作用,采用防护材料和加固措施,以有效防止深冲刷。

4) 典型三柱群周围的冲刷深度较小,起到了

良好的防护作用,尤其在保护主桩柱和减少局部冲刷方面发挥了积极作用。合理布置防撞墩可显著减少冲刷范围和深度。

参考文献:

- [1] DAVIS S R. Evaluating scour at bridges [M]. 4th ed. Washington: Federal Highway Administration, 2001.
- [2] 张佰战,李付军.桥墩局部冲刷计算研究[J].中国铁道科学,2004,25(2):48-51.
ZHANG B Z, LI F J. Bridge pier local scour calculation[J]. China railway science, 2004, 25(2): 48-51.
- [3] 周玉利,王亚玲.桥墩局部冲刷深度的预测[J].西安公路交通大学学报,1999,19(4):48-50.
ZHOU Y L, WANG Y L. Prediction of local scour depth around bridge piers [J]. Journal of Xi'an Highway University, 1999, 19(4): 48-50.
- [4] DONG H Y, SUN Z L, FANG S B, et al. Experimental study on local scour depth around pile groups[J]. Energy reports, 2022, 8: 373-380.
- [5] 吴承伟,杨万理,王广俊.错置双柱式桥墩三维流场及水流力特征研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2020,35(3):328-337.
WU C W, YANG W L, WANG G J. Study on flow field and current force characteristics of bridge pier composed of staggered twin circular columns[J]. Chinese journal of hydrodynamics, 2020, 35(3): 328-337.
- [6] WANG Z, ZHOU H, SHEIL B, et al. Numerical investigation of the lateral response of pile groups in sand under local scour conditions [J]. Computers and geotechnics, 2023, 159: 105435.
- [7] 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.
- [8] 张曙光,尹进步,张根广.基于Flow-3D的圆柱形桥墩局部冲刷大涡模拟[J].泥沙研究,2020,45(1):67-73.
ZHANG S G, YIN J B, ZHANG G G. Large-eddy simulation on local scour of cylindrical piers based on Flow-3D[J]. Journal of sediment research, 2020, 45(1): 67-73.

- [9] 李安斌,张根广,MAN C,等.输沙率公式对桥墩局部冲刷数值模拟影响研究[J].泥沙研究,2022,47(3):15-22.
LI A B, ZHANG G G, MAN C, et al. Influence of sediment transport rate formula on numerical simulation of local scour around a bridge pier [J]. Journal of sediment research, 2022, 47(3): 15-22.
- [10] 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 scour around tripod foundations under steady flow conditions [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(3): 438-449.
- [11] 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.
- [12] 苏洋,鄢洪卫,吴泽镛,等.基于Flow-3D的大临结构群桩基础局部冲刷数值模拟研究[J].公路,2024,69(12):202-207.
SU Y, WU H W, WU Z R, et al. Numerical simulation and study of local scour of pile group foundation for large temporary facility based on Flow-3D [J]. Highway, 2024, 69(12): 202-207.
- [13] 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.
- [14] 骆光杰,詹懿德,葛畅,等.基于Flow 3D的海上风电单桩基础冲刷防护数值模拟研究[J].水力发电,2021,47(8):110-114.
LUO G J, ZHAN Y D, GE C, et al. Numerical simulation of scour protection for offshore wind turbine monopile foundations based on Flow-3D [J]. Water power, 2021, 47(8): 110-114.
- [15] 张以升,唐伟,曹飞,等.拟树桩群防护下并线桥墩的局部冲刷研究[J].水利水运工程学报,2025(1):145-156.
ZHANG Y S, TANG W, CAO F, et al. The investigation of local scouring of bridge group piers protected by quasi-stumps group [J]. Hydro-science and engineering, 2025(1): 145-156.
- [16] 于松宁,潘新颖,鲁友祥,等.圆桩倾斜方向对冲淤演变影响的试验研究[J].水运工程,2022(8):17-23.
YU S N, PAN X Y, LU Y X, et al. Experimental study on influence of inclined direction of circular pile on evolution of scouring and deposition [J]. Port & waterway engineering, 2022(8): 17-23.
- [17] NAZARIHA M. Design relationships for maximum local scour depth for bridge pier groups [D]. Ottawa: University of Ottawa, 1996.
- [18] DU S T, WU G X, ZHU D Z, et al. Experimental study of local scour around inclined piles in combined waves and current [J]. Ocean engineering, 2022, 266: 112511.
- [19] GUPTA L K, PANDEY M, RAJ P A. Numerical simulation of local scour around the pier with and without airfoil collar (AFC) using FLOW-3D [J]. Environmental fluid mechanics, 2023, 24(4): 631-649.
- [20] MEYER-PETER E, MÜLLER R. Formulas for bed-load transport [C]//Proceedings of 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research. Brussels: International Association for Hydraulic Structures Research, 1948: 39-64.
- [21] 公路工程水文勘测设计规范: JTG C30—2015 [S]. 北京:人民交通出版社有限公司,2015.
Hydrological specifications for survey and design of highway engineering: JTG C30-2015 [J]. Beijing: China Communication Press Co., Ltd., 2015.
- [22] 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.
LU Z Y, GAO Z R. Characteristics of local scour about large-scale pile groups in water [J]. The ocean engineering, 2009, 27(1): 70-76.
- [23] 长江航道勘察设计院(武汉)有限公司.安庆港中心港区长风作业区二期工程水沙数学模型研究[R].武汉:长江航道勘察设计院(武汉)有限公司,2022.
Changjiang Waterway Survey Design and Research Institute (Wuhan) Co., Ltd. Study on water-sediment mathematical model for the second phase project of Changfeng operating zone in the central port area of Anqing Port [R]. Wuhan: Changjiang Waterway Survey Design and Research Institute (Wuhan) Co., Ltd., 2022.