

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.006

黏性沙床面桩柱间距对局部冲刷特性的影响

巩明^{1,2}, 杜升涛^{3,4}, 王超琳³, 武国相^{1,4}, 梁丙臣^{1,4}

(1. 中国海洋大学工程学院; 2. 自然资源部第二海洋研究所; 3. 宁波大学土木工程与地理环境学院;
4. 中国海洋大学山东省海洋工程重点实验室)

摘要: 针对黏性沙床面群桩局部冲刷问题,通过室内水槽试验,采用 0.038 mm 石英粉模拟淤泥质黏性沙,结合土力学参数测定与三维地形扫描技术,研究了单桩及 5×5 群桩在多种桩间距条件下的局部冲刷特性,分析了冲刷深度随时间的变化规律、群桩冲刷的整体性特征以及桩间距对冲刷效率的影响,讨论了黏性沙与非黏性沙冲刷机制的差异及其物理驱动因素。结果表明:黏性沙局部冲刷深度随时间变化可分为初始冲刷阶段、冲刷发展阶段和冲刷平衡阶段,桩后冲刷深度一般大于或等于桩前冲刷深度,与非黏性沙桩柱局部冲刷特征显著不同;群桩局部冲刷效率随桩间距增大而降低,3 倍桩间距时最大冲刷深度接近 6 倍桩径,为单桩局部冲刷深度的 2.4 倍;前 3 行桩柱局部冲刷深度普遍小于下游桩,且第 3 行后冲刷深度趋于稳定。

关键词: 群桩;黏性沙;桩间距;局部冲刷;冲刷深度;水槽试验

Influence of pile spacing on local scour characteristics in cohesive sediment beds

Gong Ming^{1,2}, Du Shengtao^{3,4}, Wang Chaolin³, Wu Guoxiang^{1,4}, Liang Bingchen^{1,4}
(1. College of Engineering, Ocean University of China; 2. Second Institute of Oceanography, MNR;
3. School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University;
4. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, Ocean University of China)

Abstract: In view of the local scour problem around pile groups in cohesive sediment beds, the local scour characteristics of a single pile and 5×5 pile groups under various pile spacing conditions were investigated through laboratory flume experiments. In the experiments, 0.038 mm quartz powder was used to simulate silty cohesive sediment. Combined with geotechnical parameter measurements and three-dimensional topographic scanning technology, the variation law of scour depth over time, the integral characteristics of pile group scour, and the influence of pile spacing on scour efficiency were analyzed. Moreover, the differences in scour mechanisms between cohesive and non-cohesive sediments and their physical driving factors were discussed. The results show that the temporal variation of local scour depth in cohesive sediment can be divided into an initial scour stage, a scour development stage, and a scour equilibrium stage. The scour depth behind the pile is generally greater than or equal to that in front of the pile, which is significantly different from the local scour characteristics around piles in non-cohesive sediment. Furthermore, the local scour efficiency of pile groups decreases with the increase in pile spacing; the maximum scour depth reaches nearly six times the pile diameter at three times the pile spacing, which is 2.4 times the local scour depth of a single pile. The local scour depth of the piles in the first three rows is generally smaller than that of the downstream piles, and the scour depth tends to be stable after the third row.

Key words: pile group; cohesive sediment; pile spacing; local scour; scour depth; flume experiment

随着我国“海洋强国”战略的深入推进,跨海桥梁、海上风电、近海光伏、高桩码头等重大工程在沿海地区密集建设。此类工程下部结构多采用大直径单桩或小直径群桩作为基础,长期受潮流、波浪等动力作用,在沙质或淤泥质海床中易引发桩柱周围的局部冲刷,导致泥沙掏蚀、桩基暴露长度增加,弱化结构的安全性^[1-4]。例如,杭州湾跨海大桥桥墩在强潮流作用下局部冲刷深度超过 10 m^[5],桩基稳定性面临严峻考验。尽管国内外学者对桩基局部冲刷机理开展了大量研究,但由于海洋水动力环境复杂多变,加之床面泥沙特性(如粒径、黏性)差异显著,冲刷机制与深度预测仍存在较大不确定性^[6-8]。因此,亟须针对黏性沙床面群桩局部冲刷机理开展系统性研究,为近海工程安全设计与灾害防控提供理论支撑。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52301324);山东省海洋工程重点实验室开放基金项目(kloe202011)

作者简介: 巩明(1984—),男,高级工程师,博士研究生,主要从事港口与海岸工程研究。E-mail:gm-321@163.com

通信作者: 杜升涛(1988—),男,讲师,博士,主要从事海岸工程研究。E-mail:dushengtao303@163.com

非黏性沙条件下,桩前马蹄涡、桩侧流线集中效应及桩后尾流涡旋是冲刷的主控流体机制^[9]。针对无黏性沙,一些学者通过试验与数值模拟揭示了冲刷深度与波浪 KC 数、涨落潮流参数、冲刷时间(t)、水流强度(u/u_c , u 为水流平均流速, u_c 为泥沙临界起动流速)、桩径(D)、桩间距(S)及泥沙粒径(d_{50})等参数的定量关系^[2-15]。目前针对单桩冲刷平衡深度预测模型(如 Melville 冲刷公式^[11]、HEC-18 式^[13])已有较多研究,但群桩冲刷因桩与桩之间流场相互作用呈现非线性特征^[16-18],因此桩间距及桩柱数量对冲刷深度影响显著^[19-21],导致冲刷平衡深度预测更为复杂。Liang 等^[14]针对双柱串列、并列及三行三列矩形布置群桩开展局部冲刷试验,结果表明串列布置时上游桩对下游桩屏蔽效应显著,上游桩冲刷深度与范围更大;桩间距增大后,上下游桩冲刷深度逐步接近;并列双柱冲刷规律一致,冲刷深度随桩间距增加而减小;Hamidi 等^[18]通过数值模拟对串列双桩柱流场及局部冲刷进行研究,发现随着冲刷坑的发展,两桩之间的冲刷坑逐渐由相互独立合并为一个较大的冲刷坑;Solaimani 等^[20]针对多种排列方式的桩群进行局部冲刷研究,发现冲刷特征与桩间距和群桩的布置形式相关性强,当桩间距 $S>3D$ 时冲刷坑的尺度随着 S/D 增大而显著增大;Zhou 等^[21]认为并列双桩因间隙流挤压形成不对称冲刷坑,Ataie-Ashtiani 等^[22]指出错列布置则因入射角差异导致涡旋脱落频率变化。

相较于非黏性沙,黏性沙因颗粒间黏聚力、高含水率及固结特性,其泥水起动流速计算及冲刷机制呈现显著差异^[23-36]。单桩冲刷特性方面,Hosny^[23]根据试验结果,得出了最大冲刷深度与桩柱直径、黏性沙含量、黏性沙压缩系数、初始含水量、弗劳德数的关系;Debnath 等^[24-25]指出黏性沙临界起动流速受塑性指数、初始含水率及固结度共同控制,且冲刷过程中泥沙以聚集块形式剥离床面,导致冲刷坑坡度陡峭。预测模型方面,Briaud 等^[28]采用 SRICOS-EFA 方法,通过现场取样与室内冲刷率测试,建立了冲刷深度与剪应力的经验关系,但其未考虑群桩相互作用。另外,其他学者^[5,13,26,29,31]利用实验室测试或 Dou^[32]的黏性沙起动流速计算公式,在多种水动力条件下提出或讨论了一些经验公式,但大部分在较小桩间距条件下以等效桩径概念计算群桩整体冲刷深度,对群桩单个桩柱局部冲刷分析不够深入。

现有桩柱局部冲刷的研究多集中于非黏性沙床面单桩或小规模群桩(如双桩、三桩)^[37-40],针对大规模群桩(如 5×5 桩阵),尤其黏性沙床面条件下的局部冲刷规律仍不清晰。鉴于此,本文以淤泥质黏性沙为研究对象,通过室内水槽试验揭示恒定流作用下群桩局部冲刷时空演变规律。

1 试验方法

我国淤泥质海岸线总长约 4 000 km,占大陆海岸线总长度的 25%^[36],广泛分布于长江、黄河等河口三角洲及浙江、广东沿海海域。杭州湾跨海大桥桥墩桩基布置形式多样,多处布设桩径 2.5~2.8 m 的直立群桩,桩间距为 2~3 倍桩径^[5];浙江省宁波港大树高桩码头桩基桩径 2.3 m,桩间距为 4~5 倍桩径^[40-41];墨西哥西海岸的曼萨尼约港高桩码头直立桩桩径 1.2 m,桩间距为 5 倍桩径^[42];深圳某高桩码头的直立桩桩径 0.8 m、桩间距为 6~7 倍桩径^[43]。由于淤泥质滩涂具有重要的生态功能,是众多底栖生物和候鸟的栖息地,近年我国自然资源部规定近海光伏桩基工程须布设于 6 m 等深线以深海域。因此,本文综合借鉴前述跨海桥梁、高桩码头工程实例中的桩基直径与桩距参数,以宁波象山海域底质粒径 0.006~0.016 mm 的海床环境为工程背景开展模型试验设计,探究黏性沙海床中群桩基础的局部冲刷演化规律。试验原型设定水深 8 m,海床为中值粒径 0.1 mm 的淤泥质黏性沙;结合现场实测数据与 Dou^[32]泥沙起动理论公式计算,该底质泥沙临界起动流速为 1.4 m/s。针对近海光伏工程群桩基础,原型桩径取 0.5 m、桩间距 1.5~3.5 m,采用 1:25 几何比尺缩制模型,对应模型桩径 2 cm、模型桩间距 6~14 cm;对于跨海大桥桥墩、高桩码头等大尺度桩基结构,原型桩径 1 m、桩间距 3~7 m,若保持模型桩径统一为 2 cm,则几何比尺取 1:50。Sarmiento 等^[44]通过理论分析与物理模型试验证实,桩柱局部冲刷试验可采用泥沙起动相似准则,控制无量纲水流强度 u/u_c 实现相似设计。基于试验水槽工况条件与模型沙材料特性综合比选,本文选用粒径 0.038 mm 石英粉模拟黏性沙,试验水深控制为 0.4 m 开展系列冲刷试验。

通过水槽试验验证,0.038 mm 石英粉模拟的黏性沙 u_c 为 32.7 cm/s(与式(1)计算的理论值 31.3 cm/s 偏差仅 4.5%)。本文共设置 4 组试验 A、B1、B2、B3,其中试验 A 为单桩局部冲刷;试验 B1、B2、B3 为顺流向、横向桩间距相同,但横向桩间距分别为 $3D$ 、 $5D$ 、 $7D$ 的 5 行 5 列桩柱(即 5×5)。所有试验均在流量(Q)为 $0.068\text{ m}^3/\text{s}$ 、水深 $h=0.4\text{ m}$ 、石英粉粒径 0.038 mm、单桩直径为 2 cm、水流强度 $u/u_c=0.65$ 、冲刷持续时间为

10 h 条件下进行。

$$u_c = 0.32 \ln \left(11 \frac{h}{\Delta} \right) \left(\frac{\Delta}{\Delta_*} \right)^{1/6} \sqrt{3.6 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_{50} + \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_{0*}} \right)^{2.5} \frac{\varepsilon_0 + gh\delta(\delta/d_{50})^{0.5}}{d_{50}}}$$

(1)

式中: Δ 为床面粗糙度; Δ_* 为参考粒径; ε_0 为内聚力综合系数, 取为 $1.75 \text{ cm}^3/\text{s}^2$; ρ_s 、 ρ 分别为泥沙和水的密度, 取 $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$; g 为重力加速度; δ 为水膜厚度, 取 $2.31 \times 10^{-5} \text{ cm}$; γ_0 、 γ_{0*} 分别为黏性沙干重度与平均干容重度, 取 $\gamma_0 = 1150 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_{0*} = 1200 \text{ kN/m}^3$ 。中值粒径 $d_{50} < 0.5 \text{ mm}$ 时, $\Delta = 1 \text{ mm}$ 、 $\Delta_* = 10 \text{ mm}$ 。

开展局部冲刷试验前, 于土力学实验室内系统测定了石英粉床面的土力学参数。将石英粉搅拌并重新整平床面后, 分别在静置 24、48、72 h 后测量其含水率、液限、塑限、湿密度及孔隙比, 每次试验均取 3 组平行试样, 并以 3 次试验平均值作为最终试验结果(表 1)。静置 24 h 与 48 h 的土力学参数变化幅度较小, 而 72 h 后孔隙比从初始的 0.466 显著降至 0.152, 床面呈现高度密实状态。石英粉与水混合后呈现淤泥质特性, 初始 24 h 内具有显著流塑性, 其塑限随静置时间逐步增大。经过对比分析发现, 静置 36 h 后床面状态(塑限 29.4%、液性指数 1.12)可有效模拟实际海岸淤泥质的流变特性。基于实际淤泥质海岸高含水量(62.3%~58.1%)、强流塑性的典型特征, 所有局部冲刷试验均采用静置 36 h 后的黏性沙进行, 以确保床面材料与天然沉积物力学行为的相似性。

表 1 黏性沙土力学参数

Table 1 Geotechnical parameters of cohesive sediment

时间/h	含水率/%	液限/%	塑限/%	湿密度/(kg/m ³)	孔隙比
24	23.43	31.27	13.87	2290	0.466
48	26.12	27.30	18.47	2150	0.600
72	14.38	28.22	17.15	2700	0.152

桩柱局部冲刷试验在宁波大学多功能变坡水槽开展, 水槽主体尺寸为 18 m(长)×0.8 m(宽)×0.7 m(高), 最大设计流量 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。如图 1 所示, 试验采用闭式循环水力系统, 水流经离心泵加压输送至进水箱, 通过蜂窝式整流器消除湍流后形成均匀稳定流。试验段下游水位通过电动尾门开度(分辨率 0.1°)精确调控, 流量由电磁流量计实时监测(分辨率 0.1 L/s , 系统误差小于或等于 0.15%)。水泵变频器(频率分辨率 1 Hz)与尾门构成全闭环自动控制系统, 可实现流量动态平衡(波动率小于 0.5%)。流速测量采用声学多普勒流速仪(ADV, Nortek Vectrino+), 精度为 $\pm 0.1 \text{ mm/s}$, 探头搭载于三维高精度位移平台(定位精度 $\pm 0.5 \text{ mm}$)导轨纵向移动, 实现测点毫米级定位。试验段位于水槽中轴区, 铺设长 2 m、厚 15 cm 的 0.038 mm 石英粉模拟黏性沙床面, 床面两侧设置 1:1.5 边坡以固定沙体, 与试验区平顺衔接。

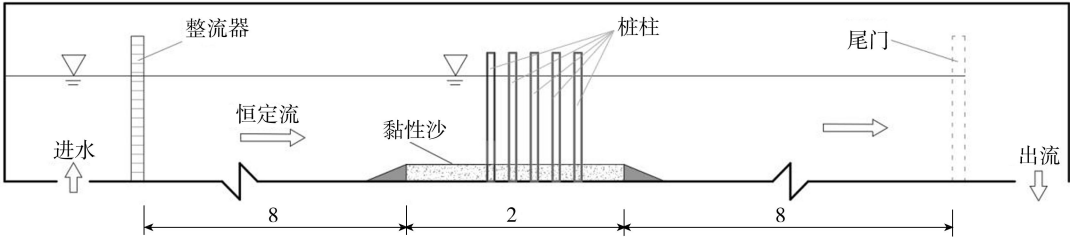


图 1 黏性沙试验水槽布置示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of experimental flume layout for cohesive sediment (unit: m)

在流量 $Q = 0.068 \text{ m}^3/\text{s}$ 、水深 $h = 0.4 \text{ m}$ 的工况下, 采用 16 MHz 声学多普勒流速仪(ADV, Nortek Vectrino+)对桩位预设区域沿水深开展顺流向流速场精细测量。根据 ADV 近场干扰特性(盲区 4~5 cm), 测量范围限定为床面以上 0.3 m 水层, 垂向按 0.3~1.3 cm 梯度布设测点(近床面加密), 单点采样频率 50 Hz、采样时长 200 s(有效数据量 ≥ 10000 组)。实测床面流速随水深的分布曲线如图 2 所示, 符合经典指数模型, 验证了水流边界层发育的充分性。

试验 A 的单桩垂直安装于床面中心位置, 用于获取基础冲刷特性参数。试验 B1、B2、B3 为群桩工况, 采用 5×5 正方形布置(图 3), 顺流向与横向桩间距等值设定。桩柱按从上游看向

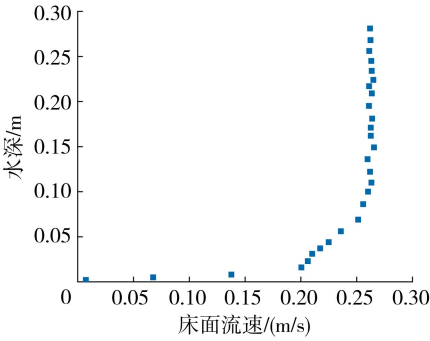


图 2 黏性沙床面流速沿水深分布曲线

Fig. 2 Distribution curve of flow velocity along water depth on cohesive sediment bed

下游视角编号,行号自上游至下游递增(第 1~5 行),列号自上至下递增(第 1~5 列),如第 2 行第 5 列桩记为 P25。坐标系原点设于中心桩 P33 轴线处(第 3 行第 3 列), x 轴顺水流方向, y 轴垂直水流方向, z 轴垂直于 xy 平面且向上为正。水流自第 1 行桩(P11~P15)均匀入流,经桩群作用后由第 5 行桩(P51~P55)下游流出。试验每冲刷 1 h 后停止造流,水槽缓慢放水,待泥沙床面无水后在桩群周围粘贴标记点(图 4),然后用水平向和垂向精度分别为 ± 0.3 、 ± 0.1 mm 的手持式激光地形扫描仪(EinScan Pro 2X)对群桩周围进行地形扫描并生成点云数据,借助 EXScan 后处理软件完成点云数据解算与转换,再导入 Tecplot 软件绘制地形等值云图。

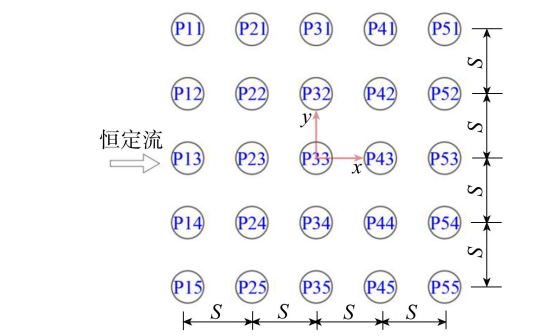


图 3 群桩局部冲刷试验平面布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of plan layout for local scour experiment of pile groups

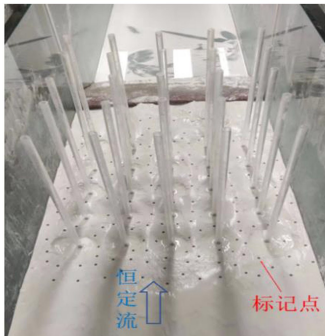


图 4 试验 B3 冲刷 1 h 后地形照片

Fig. 4 Topographic photo after scouring for 1 h in test B3

2 试验结果与分析

2.1 群桩局部冲刷特性

单桩条件下,局部冲刷坑围绕桩柱呈现不规则形状,与非黏性沙床面的局部冲刷形态显著不同。非黏性沙床面的局部冲刷坑坡度较为平缓,通常接近泥沙的水下休止角。而黏性沙在局部冲刷过程中,泥沙以单颗粒、小碎块和大碎块 3 种形式运动^[24-25,30],冲刷坑形成后,边坡常以塌落的方式进入坑内,导致冲刷坑的坡度较为陡峭。由图 5(a)可知,冲刷坑在顺流向和横向的最大尺寸分别为 $15D$ 和 $13D$,最大冲刷深度约为 $2.5D$,且桩前和桩后的冲刷深度相近。由于激光地形扫描仪水平向和垂向扫描精度分别为 ± 0.3 、 ± 0.1 mm,因此平面和垂向最大相对测量误差分别为 0.1%、0.6%,具有较高精度。尽管试验 A 的水流强度为 0.65,其冲刷深度却比 Gong 等^[45]非黏性沙局部冲刷试验在更高水流强度下的冲刷深度($2.0D$)更大,这一现象与 Ansari 等^[46]的试验结论一致,即黏性沙的局部冲刷深度可能小于或大于非黏性沙的冲刷深度,主要取决于黏性沙的含水量和流塑性等特性。当塑性指数大于 4、黏土含量超过 30%时,黏性沙床面局部冲刷深度可远小于非黏性沙,二者比值范围为 0.1~1^[46]。当黏性沙处于低含水率和密实状态时,泥沙颗粒间的电学吸引力形成较强的胶结力^[35],泥沙主要以聚集体的形式运动^[35-36],导致其临界起动剪应力显著增大,从而使黏性沙的局部冲刷深度小于非黏性沙^[27];反之,则冲刷深度更大。因此,与非黏性沙相比,黏性沙条件下桩柱局部冲刷的影响因素更为复杂,冲刷特性也更为多样化。此外,桩后尾涡引起的冲刷现象也表现出与非黏性沙不同的特点,黏性沙颗粒较细,冲刷坑泥沙易被水流携带至下游,沉积较少。

由图 5 可知,当桩柱为 5×5 群桩时,试验 B1 在桩侧后方水槽壁面附近因预先埋设的抽水泵导致形成了较大的冲刷坑,但未观测到对群桩周围局部冲刷地形的影响。整体来看,当桩间距为 $3D$ 时,试验 B1 中桩柱之间的冲刷坑在冲刷后已连成一个整体。随着桩间距增大至 $5D$ 和 $7D$,尽管桩柱之间的床面均位于冲刷坑以下,但从形态上仍表现出一定的独立性。此外,试验 B1~B3 的最大冲刷深度变化较小,范围为 $5D\sim 6D$ 。上游桩柱的局部冲刷深度小于下游桩柱,且当桩柱位于第 3 行及以后时,局部冲刷深度的变化趋于稳定。

2.2 局部冲刷深度随时间变化

为分析局部冲刷深度随时间的变化规律,每隔 1 h 对桩柱周围地形进行扫描,每组试验共获得 10 组冲刷地形数据。基于这些数据,沿顺流向截取每列桩柱的中轴线断面,分别得到单桩局部冲刷的 $y/D=0$ 剖面,以及桩间距为 $3D$ 、 $5D$ 、 $7D$ 的群桩局部冲刷二维断面($y/D=-10$ 、 $y/D=-5$ 、 $y/D=5$ 、 $y/D=10$ 、 $y/D=0$ 剖面)。由

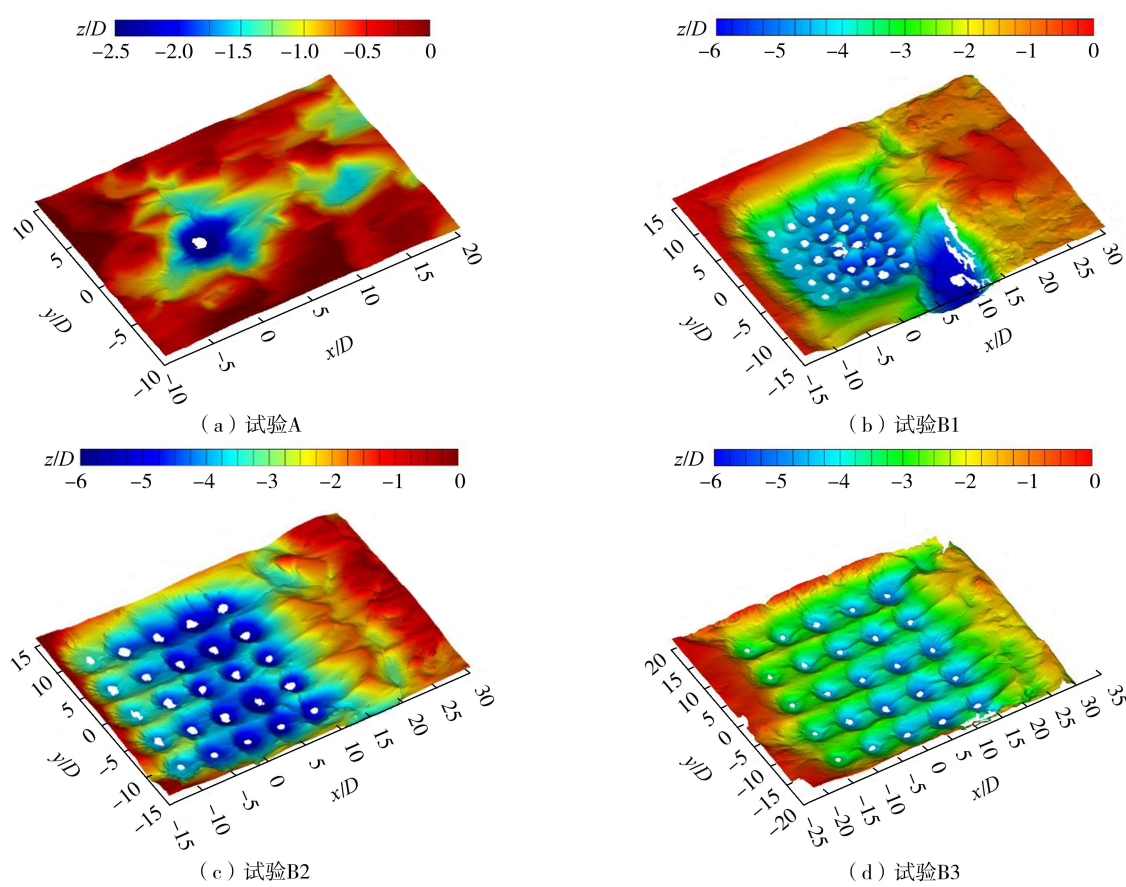


图 5 单桩与群桩局部冲刷试验三维地形云图

Fig. 5 Three-dimensional topographic cloud maps of local scour experiments for single pile and pile groups

于同一试验中每列桩柱的二维断面形态较为相似,以下选取桩柱 P13、P23、P33、P43、P53 所在断面的 $y/D=0$ 剖面进行讨论,其地形变化见图 6。

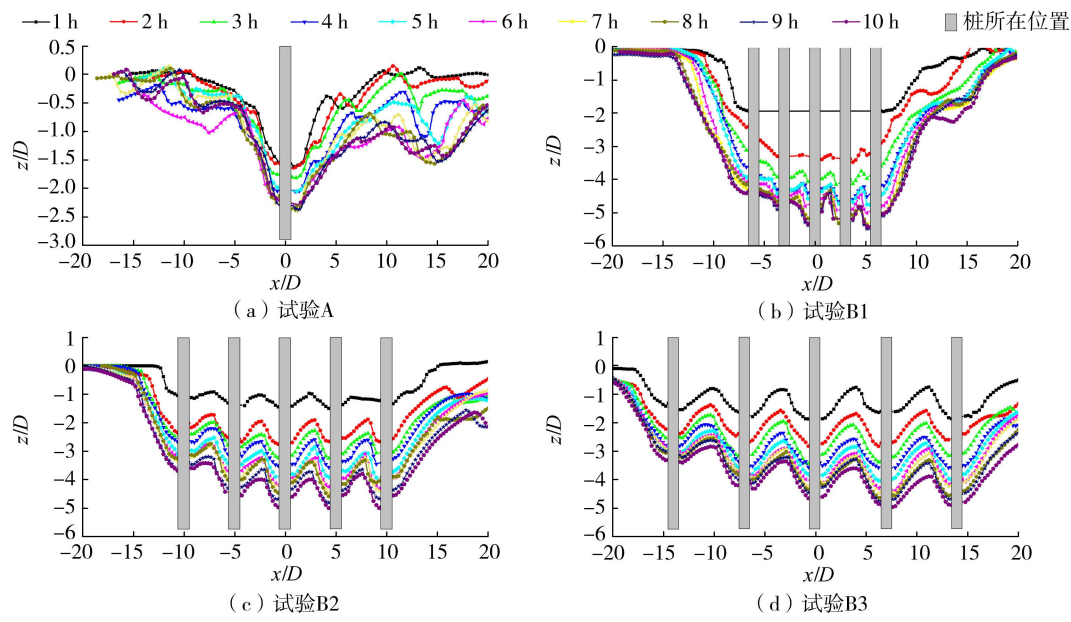


图 6 单桩与群桩中轴线断面 $y/D=0$ 地形变化

Fig. 6 Topographic changes at central axis section ($y/D=0$) for single pile and pile groups

由图 6(a)可知,单桩条件下,顺流向 $y/D=0$ 剖面的床面冲刷深度随冲刷时间逐渐增大至一定值后趋于稳定。冲刷初始阶段(例如冲刷 1h),桩前和桩后的局部冲刷深度分别为 $1.55D$ 和 $1.61D$,两者基本一致,分

别占冲刷 10 h 后冲刷深度的 68.0%和 68.2%。随着冲刷的持续进行,冲刷深度增长逐渐放缓,至冲刷 7 h 时,床面地形趋于稳定,剖面线与 8、9、10 h 的冲刷剖面线基本重合,表明局部冲刷已达到平衡状态。与非黏性沙试验中桩前冲刷深度通常大于桩后冲刷深度的特性不同,试验 A 中桩后冲刷深度为 2.36*D*,略大于桩前冲刷深度 2.28*D*。Ting 等^[27]在非黏性沙局部冲刷试验中也观察到了类似现象,并通过研究 2.5、7.5、15 cm 3 种桩径在流速 0.21 m/s 条件下的冲刷规律,发现高雷诺数时桩后冲刷深度可能大于桩前冲刷深度。然而,Ettema 等^[37]认为圆柱局部冲刷与桩柱雷诺数(Re_D)无关,与 Re_D 相关的斯特劳哈尔数(Sr)可通过改变桩柱后方旋涡脱落频率影响尾流结构,是决定局部冲刷发展的关键因子。Debnath 等^[25]根据试验得出桩后冲刷深度明显大于桩前冲刷深度的结果,并指出床面剪切力和水流强度是导致桩前、桩后冲刷深度与非黏性局部冲刷试验现象相反的原因。Ting 等^[27]采用最大剪应力(τ_{max})公式^[28]计算了非黏性沙床面的 τ_{max} ,通过分析可知, $\tau_{max}=2.26\sim4.83$ Pa 时桩前冲刷深度大于桩后冲刷深度, $\tau_{max}=0.54\sim2.59$ Pa 时桩前冲刷深度小于桩后冲刷深度。但 Debnath 等^[25]在试验中发现 $\tau_{max}=2.54\sim6.44$ Pa 时仍有一些局部冲刷深度桩前小于桩后现象,因此未明确给出 τ_{max} 的范围与桩前、桩后冲刷深度的具体关系。试验 A 中 $Re_D=4\,250$,计算得到 $\tau_{max}=0.746$ Pa,与 Ting 等^[27]在桩径 2.5 cm 低雷诺数条件下试验结果及 Debnath 等^[25]指出的较小 τ_{max} 结果一致。

由图 6(b)可知,当桩柱为 5×5 阵列且桩间距为 3*D* 时(试验 B1),冲刷速率显著加快,冲刷至 7 h 基本达到平衡状态,冲刷 10 h 后的冲刷深度约为单桩条件下的 2 倍。根据第 3 列桩柱可知,当桩柱行数 $R<3$ 时,上游桩柱的冲刷深度小于下游桩柱;当 $R\geq 3$ 时,桩柱的冲刷深度在任意行或列中的变化较小,基本稳定在 5.5*D* 左右。群桩局部冲刷表现出整体冲刷特性,整体冲刷坑的顺流向长度约为 34*D*。然而,Gong 等^[45]在非黏性沙床面中开展了水流强度为 0.6、0.8、1.0 的群桩 5×5 阵列局部冲刷试验,发现桩柱局部冲刷深度随着群桩行数的递增而呈线性减小。

由图 6(b)~(d)可知,随着桩间距增大,桩柱周围局部冲刷效率逐渐降低,以冲刷时间 2 h 为例, $S=3D$ 时,最大冲刷深度约为 3.5*D*; $S=5D,7D$ 时,逐渐减小为 2.5*D* 左右。然而,冲刷 10 h 后,群桩局部冲刷深度的差异较小,例如第 1 行桩柱的冲刷深度仍为最小,而第 3~5 行桩柱的冲刷深度基本保持不变。尽管群桩绕流过程中桩柱之间存在复杂的湍流相互作用,但同一行中 5 列桩柱的局部冲刷深度非常接近,且上游桩柱的冲刷深度通常小于下游桩柱。此外,在较大桩间距条件下,中间位置桩柱(如桩柱 P33、P23、P43)的桩前、桩后冲刷深度及冲刷坑坡度表现出较好的前后对称性。单桩试验表明,冲刷 1 h 后的冲刷坑顺流向长度为 18*D*,因此在试验 B1~B3 中,桩间距为 3*D*、5*D*、7*D* 的情况下,群桩桩柱之间床面的一般冲刷可以忽略不计。

选取试验 B1~B3 群桩冲刷深度最大的桩柱,分析其桩前相对冲刷深度(d_s/D , d_s 为冲刷深度)随时间($t^*=gt^2/D$)的变化关系,并与试验 A 进行对比,结果如图 7 所示。利用 Du 等^[38]提出的双指数型公式对数据点进行拟合,拟合效果较好,其中试验 B1 的决定系数最小($R^2=0.96$),其他试验 R^2 均为 0.99。由图 7 中拟合曲线可知,黏性沙床面群桩局部冲刷深度可类似于非黏性沙局部冲刷,分为 3 个冲刷阶段,即冲刷初始阶段、冲刷发展阶段、冲刷平衡阶段。图 7 冲刷深度变化趋势与无黏性沙冲刷演化过程基本一致,结合 Ettema^[39]的无黏性沙冲刷机理展开分析:冲刷初始阶段,桩体扰流产生下潜水流,桩前马蹄涡未充分发育,桩侧流线汇聚效应主导冲刷,桩身两侧率先形成冲蚀;待桩前马蹄涡生成后,桩前床面同步发生淘刷,冲刷坑在涡旋作用下持续拓宽加深;当冲刷坑规模达到马蹄涡作用极限,坑内泥沙无法向外输运,冲刷坑形态不再明显变化,冲刷进入平衡阶段。试验 A、B1、B2、B3 的冲刷初始时刻均在极短时间内完成, $t^*<6.5\times10^{10}$,即 $t<1$ h;试验 A、B1、B2、B3 冲刷发展阶段分别为 $t^*=10^{11}\sim2.2\times10^{11}$ (即 $t=1\sim6$ h)、 $t^*=10^{11}\sim5\times10^{11}$ (即 $t=1\sim9$ h)、 $t^*=10^{11}\sim4\times10^{11}$ (即 $t=1\sim8$ h)。由于 $t^*=4\times10^{11}$ (即 $t\approx8$ h)时,4 条曲线中的 d_s/D 基本保持为恒定值,因此可认为试验结束时($t^*=6.4\times10^{11}$ 或 $t=10$ h)均已达到冲刷平衡状态。取冲刷 10 h 后最大冲刷深度为平衡深度,则试验 A、B1、B2、B3 分别为 2.43*D*、5.85*D*、5.59*D*、5.06*D*。群桩局部冲刷约为单桩冲刷深度的 2 倍以上,群桩最大冲刷深度随着桩间距增大而减小,且 3*D*、5*D* 桩间距时群

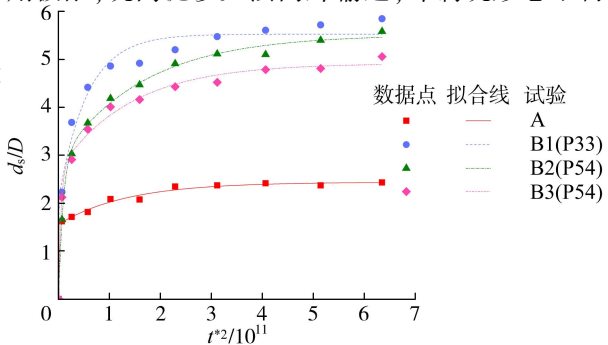


图 7 冲刷深度随时间变化关系
Fig. 7 Relationship between scour depth and time

桩最大冲刷平衡深度较为近似。

2.3 冲刷平衡深度规律

利用桩柱顺流向断面,获得 5×5 群桩、桩间距 3*D*、5*D*、7*D* 条件下每个桩柱相对冲刷平衡深度 d_{se}/D (d_{se} 为桩柱冲刷平衡深度),结果如图 8 所示。当 $S=3D$ 时,第 1~5 行桩柱的 d_{se}/D 平均值分别为 4.15、4.60、5.10、5.15、5.10;同一行桩柱冲刷深度变化相对较大,最大变化出现在第 3 行桩柱,最大、最小 d_{se}/D 分别位于桩柱 P32、P35,其值分别为 5.65、4.70。当 $S=5D$ 时,同一行桩柱局部冲刷平衡深度变化幅度小;第 1~5 行桩柱的 d_{se}/D 平均值分别为 3.75、4.50、5.00、5.20、5.10。当 $S=7D$ 时,第 1~5 行桩柱的 d_{se}/D 平均值分别为 3.40、4.20、4.70、4.90、4.80;总体上,上游桩柱局部冲刷深度小于下游冲刷深度,第 3~5 行桩柱局部冲刷深度在各组试验中分别趋于各自稳定值。随着桩间距的增加,第 1 行桩柱冲刷平衡深度逐渐减小,桩间距 3*D*、5*D*、7*D* 条件下分别为 4.15*D*、3.75*D*、3.40*D*。但桩间距 3*D*、5*D* 时,第 2~5 行桩柱冲刷平衡深度值基本相等;桩间距达到 7*D* 时,第 1~5 行桩柱冲刷平衡深度均小于桩间距 3*D*、5*D* 的桩柱冲刷平衡深度。由此可见,黏性沙床面群桩局部冲刷的临界桩间距为 5*D*。

3 结 论

- a. 在黏性沙条件下,即使水流强度较低(本文为 0.65),桩前与桩后的局部冲刷深度基本相等,这与非黏性沙条件下桩前冲刷深度明显大于桩后冲刷深度的特性显著不同。黏性沙群桩局部冲刷中,上游桩柱的冲刷深度通常小于下游桩柱,与非黏性沙群桩的冲刷特性相反,表明黏性沙床面中,尾流涡旋对桩柱局部冲刷深度的贡献不小于桩前马蹄涡的作用。
- b. 无论是单桩还是 5×5 群桩(桩间距为 3*D*、5*D*、7*D*),桩柱冲刷深度随时间的变化均可划分为冲刷初始阶段、冲刷发展阶段和冲刷平衡阶段,在 10 h 内,冲刷均可达到平衡状态。群桩在桩间距为 3*D* 和 5*D* 时,实时冲刷深度的变化历程基本相同。
- c. 当桩间距为 3*D*、5*D*、7*D* 时,群桩中每个桩柱的局部冲刷深度均为单桩条件下的 2 倍以上,第 1~3 行桩柱冲刷深度逐渐增大,第 3~5 行桩柱冲刷深度基本保持为同一水平。随着桩间距的增大,第 2~5 行桩柱的冲刷深度在桩间距为 3*D* 和 5*D* 时较为接近;当桩间距达到 7*D* 时,群桩局部冲刷深度变化不再受桩间距影响。

参考文献:

[1] 李永乐,房忱,裴放,等. 海洋桥梁波流力作用与基础冲刷问题及对策研究[J]. 中国工程科学,2019,21(3):18-24. (Li Yongle,Fang Chen,Qiu Fang,et al. Wave current force action and foundation scour of marine bridges[J]. Strategic Study of CAE,2019,21(3):18-24. (in Chinese))

[2] Zhang Fengpeng, Chen Xuguang, Yan Jiahao, et al. Countermeasures for local scour around offshore wind turbine monopile foundations:a review[J]. Applied Ocean Research,2023,141:103764.

[3] 贾家喻,张金凤,郑斌,等. 潮流作用下海上风电群桩基础局部冲刷与防护试验研究[J]. 海洋工程,2023,41(1):159-168. (Jia Jiayu,Zhang Jinfeng,Zheng Bin,et al. Experimental study on local scouring and protection of offshore wind power pile groups foundation under tidal current[J]. The Ocean Engineering,2023,41(1):159-168. (in Chinese))

[4] Sui Titi,Yang Yunhan,Yang Zhendi,et al. Experimental study on the irregular wave-induced pore pressure of a sloping beach with cross-shore profile evolution[J]. Ocean Engineering,2025,324:120680.

[5] Zhang Zhiyong,Du Shengtao,Guo Yakun,et al. Field study of local scour around bridge foundations on silty seabed under irregular tidal flow[J]. Coastal Engineering,2023,185:104382.

[6] Liang Bingchen,Du Shengtao,Pan Xinying,et al. Local scour for vertical piles in steady currents: review of mechanisms, influencing factors and empirical equations[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2020,8(1):4.

[7] Guan Dawei,Xie Yuxuan,Yao Zishun,et al. Local scour at offshore windfarm monopile foundations:a review[J]. Water Science

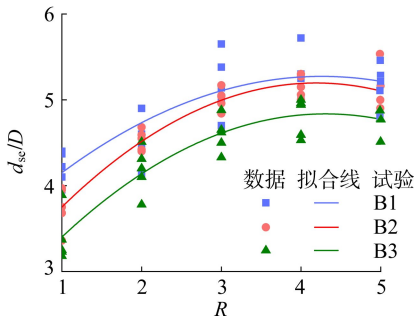


图 8 试验 B1~B3 单个桩柱冲刷平衡深度
Fig. 8 Equilibrium scour depths of individual piles in tests B1-B3

- and Engineering,2022,15(1):29-39.
- [8] Zhao Peiqing, Qi Wengang, Liu Bo, et al. A physics-based model for clear-water scour development around a pile foundation in clayey soils[J]. Applied Ocean Research, 2025, 155: 104436.
- [9] Reddy S K, Chandra V. Prediction models for scour depth around circular compound bridge piers[J]. Water Science and Engineering, 2025, 18(3): 378-390.
- [10] 陈汨梨, 林祥峰, 张明宗, 等. 往复流作用下潮流能水轮机单桩基础冲刷试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 17-22. (Chen Mili, Lin Xiangfeng, Zhang Mingzong, et al. Experimental study on scour process around mono-pile foundation of a tidal stream turbine under bidirectional flow[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(2): 17-22. (in Chinese))
- [11] Melville B W. Pier and abutment scour: integrated approach[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(2): 125-136.
- [12] Sheppard D M, Melville B, Demir H. Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(1): 14-23.
- [13] Richardson E V, Davis S R. Evaluating scour at bridges[R]. 4th ed. Washington: Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation, 2001.
- [14] Liang Fayun, Wang Chen, Huang Maosong, 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.
- [15] Sui Titi, Liu Chenglin, Zhang Jisheng, et al. 3D numerical modeling of wave-monopile-seabed interaction in the presence of a scour hole[J]. Ocean Engineering, 2024, 298: 117254.
- [16] Kim H S, Nabi M, Kimura I, et al. Computational modeling of flow and morphodynamics through rigid-emergent vegetation[J]. Advances in Water Resources, 2015, 84: 64-86.
- [17] Kim H S, Nabi M, Kimura I, et al. Numerical investigation of local scour at two adjacent cylinders[J]. Advances in Water Resources, 2014, 70: 131-147.
- [18] Hamidi A, Siadatmousavi S M. Numerical simulation of scour and flow field for different arrangements of two piers using SSIIM model[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2018, 9(4): 2415-2426.
- [19] 高鹏程, 牟献友, 赵奕涵, 等. 冰盖下串列桥墩局部冲刷及水流特性研究[J]. 水利水电科技进展, 2026, 46(1): 74-82. (Gao Pengcheng, Mou Xianyou, Zhao Yihan, et al. Study on local scour and flow characteristics around tandem piers under ice cover[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2026, 46(1): 74-82. (in Chinese))
- [20] Solaimani N, Amini A, Banejad H, et al. The effect of pile spacing and arrangement on bed formation and scour hole dimensions in pile groups[J]. International Journal of River Basin Management, 2017, 15(2): 219-225.
- [21] Zhou Y, Yiu M W. Flow structure, momentum and heat transport in a two-tandem-cylinder wake[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 548: 17-48.
- [22] Ataie-Ashtiani B, Aslani-Kordkandi A. Flow field around single and tandem piers[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2013, 90(3): 471-490.
- [23] Hosny M M. Experimental study of local scour around circular bridge piers in cohesive soils[D]. Fort Collins: Colorado State University, 1995.
- [24] Debnath K, Chaudhuri S. Local scour around non-circular piers in clay-sand mixed cohesive sediment beds[J]. Engineering Geology, 2012, 151: 1-14.
- [25] Debnath K, Chaudhuri S. Laboratory experiments on local scour around cylinder for clay and clay-sand mixed beds[J]. Engineering Geology, 2010, 111(1/2/3/4): 51-61.
- [26] 张玮, 濮勋, 廖迎娣. 淤泥质海岸近海风电塔基局部冲刷计算研究[J]. 海洋工程, 2010, 28(2): 105-109. (Zhang Wei, Pu Xun, Liao Yingdi. Calculation of local scour around piles of offshore wind power on muddy coast[J]. The Ocean Engineering, 2010, 28(2): 105-109. (in Chinese))
- [27] Ting F C K, Briaud J L, Chen H C, et al. Flume tests for scour in clay at circular piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(11): 969-978.
- [28] Briaud J L, Ting F C K, Chen H C, et al. SRICOS: prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(4): 237-246.
- [29] 梁发云, 王琛, 王玉, 等. 黏性-砂性土层中群桩基础冲刷特性波流水槽试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(增刊1): 79-83. (Liang Fayun, Wang Chen, Wang Yu, et al. Analysis on flume test of local scour around pile groups embedded in sandy-cohesive soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(S1): 79-83. (in Chinese))

[30] Dey S, Helkjær A, Sumer B M, et al. Scour at vertical piles in sand-clay mixtures under waves[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2011, 137(6): 324-331.

[31] 李嘉隆. 黏性土地基桩基础局部冲刷深度预测方法[J]. 船舶工程, 2023, 45(增刊1): 15-19. (Li Jialong. Prediction method of local scour depth of pile foundations in cohesive soil[J]. Ship Engineering, 2023, 45(S1): 15-19. (in Chinese))

[32] Dou G R. Incipient motion of sediment under currents[J]. China Ocean Engineering, 2000, 14(4): 391-406.

[33] 杜升涛, 王超琳, 杨博, 等. 水流强度对淹没式方桩局部冲刷特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 92-100. (Du Shengtao, Wang Chaolin, Yang Bo, et al. Influence of flow intensity on local scour characteristics of a submerged square pile[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(2): 92-100. (in Chinese))

[34] 陈秉如, 冀鸿兰, 高鹏程, 等. 冰盖下组合桥墩的局部冲刷特性及水力特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 53-60. (Chen Bingru, Ji Honglan, Gao Pengcheng, et al. Local scour and hydraulic characteristics of composite piers under ice sheet[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(2): 53-60. (in Chinese))

[35] 刘洁, 刘洁玉, 白玉川. 黏性泥沙流变特性及其临界起动的研究[J]. 泥沙研究, 2015, 40(6): 59-64. (Liu Jie, Liu Jieyu, Bai Yuchuan. Experimental study on rheological characteristics and incipient motion of the cohesive sediment[J]. Journal of Sediment Research, 2015, 40(6): 59-64. (in Chinese))

[37] 郭超, 何青. 黏性泥沙絮凝研究综述与展望[J]. 泥沙研究, 2021, 46(2): 66-73. (Guo Chao, He Qing. Review of the research on cohesive sediment flocculation[J]. Journal of Sediment Research, 2021, 46(2): 66-73. (in Chinese))

[37] Ettema R, Kirkil G, Muste M. Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(1): 33-40.

[38] Du Shengtao, Wang Zhenlu, Wang Risheng, et al. Effects of flow intensity on local scour around a submerged square pile in a steady current[J]. Physics of Fluids, 2022, 34(8): 085126.

[39] Ettema R. Scour at bridge piers[D]. Auckland: University of Auckland, 1980.

[40] 潘新颖, 郭云辉, 梁丙臣, 等. 水流作用下的群桩流场特性 PIV 试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2024(5): 54-62. (Pan Xinying, Guo Yunhui, Liang Bingchen, et al. PIV experimental study on the flow field characteristics of pile groups under hydraulic action[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(5): 54-62. (in Chinese))

[41] 徐忠琨. 宁波大榭招商国际集装箱码头工程设计[J]. 水运工程, 2008(10): 113-119. (Xu Zhongkun. Design of Ningbo Daxie merchants steam navigation international container terminal[J]. Port & Waterway Engineering, 2008(10): 113-119. (in Chinese))

[42] Wang Jianfeng, Su Lei, Xie Libo, et al. Seismic response analysis of pile-supported wharf under three types of near-fault ground motion[J]. Structures, 2023, 57: 105144.

[43] Li Panpan, Li Jingpei, Li Lin, et al. Overall structural degradation of a high-piled wharf under chloride invasion and the impact force of ship berthing[J]. Ocean Engineering, 2024, 312: 119320.

[44] Sarmiento J, Guanche R, Losada I J, et al. Scour processes around pile clusters of jacket foundations under steady currents[J]. Ocean Engineering, 2024, 313: 119502.

[45] Gong Ming, Pan Xinying, Du Shengtao, et al. Laboratory study of local scour around an array of pile groups in clear-water scour conditions[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2025, 13(1): 137.

[46] Ansari S A, Kothiyari U C, Raju K G R. Influence of cohesion on scour around bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Research, 2002, 40(6): 717-729.

(收稿日期: 2025-03-20 编辑: 刘晓艳)