DOI:10.11918/202504022

考虑桩群布置形式影响的圆形桥墩局部冲刷特征分析

肖莉丽,马志宁,王佳佳,薛殿盛,李亚震,付 极,刘柯辰

(长安大学 公路学院,西安 710064)

摘 要:桥梁结构的倾斜甚至坍塌很大程度上与局部冲刷相关,应提出考虑桩群布置影响的局部冲刷防控设计方法。为此,基于考虑了多种桩心距的双桩串联、双桩并联、四桩井字及多角度双桩斜置共12种不同布置形式下的水槽物理模型试验分析,评价了不同桩群布置对局部冲刷特征的影响;结合双目视觉三维重构技术及Flow-3D数值模拟,分析了不同影响因素及桩群布置形式下的冲刷地形演变及流场变化。结果表明,串联桩群受"增强效应"和"遮蔽效应"影响,上下游桩冲刷深度均浅于单桩,有利于桥梁稳定;并联桩群因"挤压马蹄涡效应",冲刷坑呈"8"字型分布且桩间有明显冲刷痕,会加剧冲刷效果;井字型桩群受多种效应共同作用,冲刷坑呈现串并联组合特征,且桩心距越小,冲刷坑范围越小但深度越大;水流斜向冲击时,偏上游桩冲刷更显著,冲刷坑呈斜"8"字型,且随入射角度从25°增至75°,最大冲刷深度逐渐增大,冲刷坑形态从串联向并联转换。建议桥梁桩群设计采用能有效削弱"挤压马蹄涡效应"、合理利用"遮蔽效应"、有利于减少最大冲刷深度的优化布置形式。

关键词:圆形桥墩;桩群布置;局部冲刷;冲刷坑特征;干扰效应;模型试验

中图分类号:U443.2+2 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)07-0150-16

Analysis of local scour characteristics of circular bridge piers based on pile group arrangement effects

Xiao Lili, Ma Zhining, Wang Jiajia, Xue Diansheng, Li Yazhen, Fu Ji, Liu Kechen

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Local scour is a major factor affecting the inclination and even the collapse of bridge structures. A design method for local scour prevention and control that considered the influence of pile group arrangements should be proposed. Therefore, this paper conducted flume physical model tests, featuring a total of 12 arrangements, including double piles in series, double piles in parallel, a square pattern of four piles, and multi-angle inclined double piles with varied center distances, so as to evaluate the impact of different pile group arrangements on local scour characteristics. Binocular vision 3D reconstruction technology and Flow-3D numerical simulation were employed to analyze the evolution of scour terrain and changes in flow fields under diverse influencing factors and pile group arrangements. Results show that pile groups in series, affected by the "enhancement effect" and "shielding effect", have both upstream and downstream piles with scour depths shallower than that of a single pile, which is beneficial to bridge stability; pile groups in parallel, due to the "confined horseshoe vortex effect", form "8"-shaped scour pits with distinct traces between piles, worsening the scour effect; pile groups featuring a square pattern of four piles, under the combined action of multiple effects, develop scour pits with mixed series-parallel features, and a smaller pile center distance indciates a narrower scour pit range but a greater depth; when water flows strike obliquely, upstream piles suffer more severe scour, creating oblique "8"-shaped scour pits. Moreover, as the incident angle increases from 25° to 75°, the maximum scour depth gradually increases while the pit shape transitions from series-like to parallel-like. It is suggested that bridge pile groups should adopt optimized arrangements that can effectively weaken the "confined horseshoe vortex effect", rationally leverage the "shielding effect", and help reduce the maximum scour depth.

Keywords: circular bridge pier; pile group arrangement; local scour; scour pit characteristic; interference effect; model experiment

局部冲刷现象是指在桥梁墩台周围的河床因水流动力作用而发生剧烈侵蚀,进而形成冲刷坑的物理力学过程。当桥墩周围的局部冲刷深度超过基础的埋置深度时,可能会引发桥梁结构倾斜甚至坍塌

收稿日期:2025-04-08;**录用日期**:2025-06-04;**网络首发日期**:2025-08-06
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250806.1553.002
基金项目:陕西省自然科学基础研究计划(2024JCYBMS391)
作者简介:肖莉丽(1985—),女,博士,副教授
通信作者:王佳佳,jwang@chd.edu.cn

的严重后果。熊文等[1]汇总 1807 ~ 2021 年国内外发生的 1716 起桥梁倒塌案例，发现其中因水毁导致桥梁倒塌的案例占比高达 46.69%，在所有桥梁灾害事故中位列第一。中国山区面积占比超过 65%，由于地形限制，跨沟谷桥梁的桥墩往往需要采取斜交布置、偏心布置或多墩不对称布置等方式以适应现场地形与结构布置需求。然而，斜交与偏置形式的布设在改变局部水流结构的同时，也显著影响了桥墩周围流场的稳定性，导致局部冲刷作用增强，进而诱发冲刷坑的非对称发展、结构失稳甚至桥梁倒塌等严重后果。门昭宇[2]通过物理模型试验和数值模拟发现斜交桥墩的冲刷坑形态与正交桥墩存在较大区别，斜交角度和单宽流量的增加会显著加剧桥墩的局部冲刷深度和范围。特别是在斜交角度大于 15°时，桥墩背水侧会出现顺时针漩涡水流下降区，迎水侧墩尾处受水流顶冲形成局部冲刷坑。但目前国内外对不同布置形式下桥墩冲刷机理的研究仍缺少系统性研究成果。多数研究集中于正交单墩条件下的冲刷规律，忽视了山区桥梁实际斜交、多墩或错位布置的复杂性。因此，研究不同布置形式的桥墩周围水沙运动规律和冲刷效应，对桥梁设计和防护工程具有重要的理论与现实意义。

目前，针对桥梁基础局部冲刷领域的研究方法主要包括原位观测、物理试验和数值模拟。原位观测法可直接获取现场数据以监测冲刷坑变化，对建立经验公式意义重大，然而其成本高昂，需耗费大量人力物力，还易受极端天气影响，存在技术与成本难题[3]。

随着计算流体力学的快速发展，数值模拟技术已逐渐成为分析桥桩局部冲刷的重要手段。Abed 等[4]利用计算流体力学软件 Fluent 研究了在流速、水流深度和泥沙有效直径等特定水力条件下桥墩桩心距对冲刷规律的影响，通过与实验结果进行对比验证了数值模型的准确性。Ahmad 等[5]利用 REEF3D 开源软件模拟了夹克结构周围的局部冲刷。模型基于雷诺平均 Navier-Stokes 方程和 k-ω 湍流模型，采用水平集方法捕捉自由表面，耦合了泥沙输移算法，在不同 KC 数下分析了桩周围局部冲刷坑的形态，结果与实验数据吻合。Jia 等[6]提出了一种使用三维自由表面 RANS 湍流模型模拟桥桩周围局部冲刷的新型数值方法。该方法考虑了强烈的湍流波动和桥桩周围的下潜流对床层冲刷的影响。张曙光等[7]基于 Flow-3D 软件以床面瞬时切应力作为泥沙起动和输移的条件，并使用 Van 输沙率公式计算床面冲淤，模拟了圆柱形桥墩附近的局部冲刷，结果与实测数据相符。苏洋等[8]利用 Flow-3D 软件模拟发现群桩基础最大冲刷深度随时间变化呈现先快速增大、后缓速增长、最终趋于平缓的趋势。迎水侧桩基冲刷坑发展剧烈，冲刷深度和范围远大于后方桩基。桥墩最大冲刷深度随流速增大而显著增加，与桥墩直径近似呈线性关系增长。

物理模型试验能够提供直观的物理过程监控，有助于理解复杂系统，成为研究桥桩冲刷的重要手段。Melville 等和 Shamseldin 等[9-10]研究了桥桩周围的相干结构和马蹄涡系统对冲刷的影响，总结了冲刷坑内水流特征、湍流强度和边界剪切力分布。陶钢等[11]通过模型试验研究了不同波陡对单桩基础局部冲刷的影响，发现波陡增加会导致冲刷加剧，大波陡条件下沙床变形显著，形成沙坝-滩槽结构，而小波陡条件下冲淤不明显。赵西增等[12]研究发现破碎波翻卷产生的湍流及其纵向发展是冲刷的关键因素，桩基与破碎点间距与波长之比 α 和最大冲刷深度密切相关。沙床在破碎波作用下形成沙坝和滩槽结构，显著影响单桩冲刷演变。当 α 在 0.35 ~ 0.55 之间时，桩基引起的净冲刷最为显著，最大局部冲刷深度可达桩径的 0.5 倍。魏松等[13]发现圆端形和三角尖形端部桥墩墩前下降水流和墩周马蹄形涡流强度较矩形端部小。同时，在相同条件下圆端形和三角尖形端部桥墩最大冲刷坑深度相对于矩形端部桥墩也不同程度减小。与单桩冲刷相比，双桩周围可能会发生马蹄涡压缩与上游尾涡再附着现象[14-15]。Wang 等[16]研究了不同桩心距下串列双桩的局部冲刷深度，发现上游桩基冲刷产生的沉积泥沙会为下游冲刷坑提供补充，使得下游桩基表现出动床冲刷的特征。Hannah[17]通过物理模型试验研究了串列、并列和错列双桩的局部冲刷机理，发现双桩冲刷过程中存在多种相互作用效应，包括桩间的增强效应、屏蔽效应、漩涡脱落和被压缩的马蹄形漩涡。Beheshti 等[18]通过三维点式多普勒流速仪(ADV)研究了串列双桩冲刷过程中流场变化，发现上游桩对下游桩存在“遮蔽效应”，导致下游桩区域的近床面流速下降至断面平均流速的 20% ~30%。Hamed 等[19]通过 PIV 技术研究了不同桩间距和双桩高度比对双桩冲刷的影响，发现上游桩的“遮蔽效应”减少了下游桩附近的下降水流和回流区范围，且这种效应与桩间距密切相关。Bozkus 等[20]研究了向下游倾斜的单圆桩、双圆桩以及圆桩在不同方向不同倾斜角度下的局部冲刷，建立了倾斜桥墩的局部冲刷公式。该研究表明桥墩的倾斜角度越大，局部冲刷深度越小。Memar 等[21]分析了水流入射角度为 0° ~90°时双桩的局部冲刷深度，发现上游桩基的局部冲刷深度在 45°时最大，而下游桩基

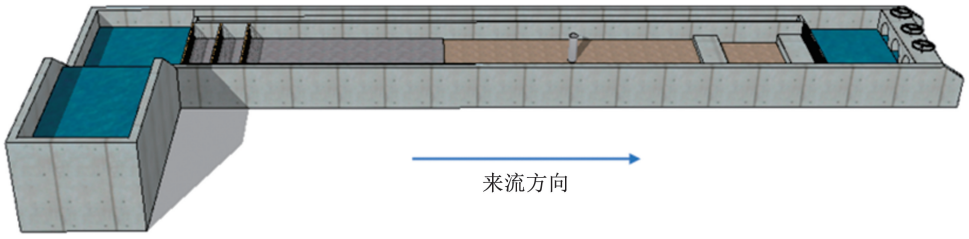
的局部冲刷深度随着水流入射角度的增大逐渐增大。群桩因具有多样的桩基布置形式,其局部冲刷演变更为复杂。Ataie-Ashtiani 等[22]通过试验得出,对于 2 × 2 群桩的最大冲刷深度,在桩心距 L/D = 1.25时比单桩高 63% 左右,桩心距 L/D < 5 时比并列双桩增大约 10% ~ 13%。此外,最大冲刷深度的位置随桩排布形式和桩心距而变化。Lu 等[23]与 Liu 等[24]研究了不同水流流速下与水流入射角下 2 × 2群桩的最大冲刷深度、冲刷坑形态以及每个桩基的最大冲刷深。Ni 等[25]通过试验分析了 5 种群桩布置形式下局部冲刷坑演变过程。以上试验研究成果为理解桥桩冲刷提供了理论基础和经验数据,但是针对多桩柱在不同布置形式下产生的冲刷特征和效应的成果还较为少见,有待进一步深入研究。

综上所述,本文围绕不同桩群布置形式对圆形桥墩局部冲刷特征的影响,以直径 4 cm 的圆柱桩为研究对象,通过设计不同布置形式、不同桩心距的桩群开展桥桩局部冲刷特征的物理模型试验研究,采用 Flow-3D 模拟分析试验环境中的流场分布特征,基于此系统地探究桥桩局部冲刷特征以及影响因素,研究成果旨在为桥桩局部冲刷设计提供参考。

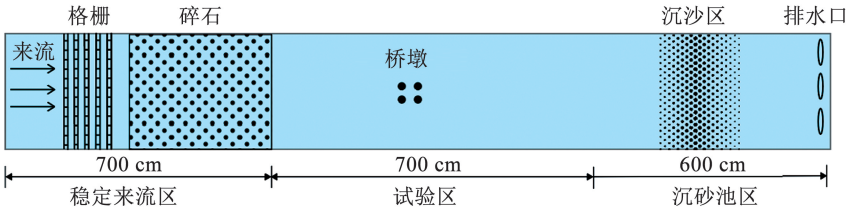
1 模型试验设计

1.1 试验装置

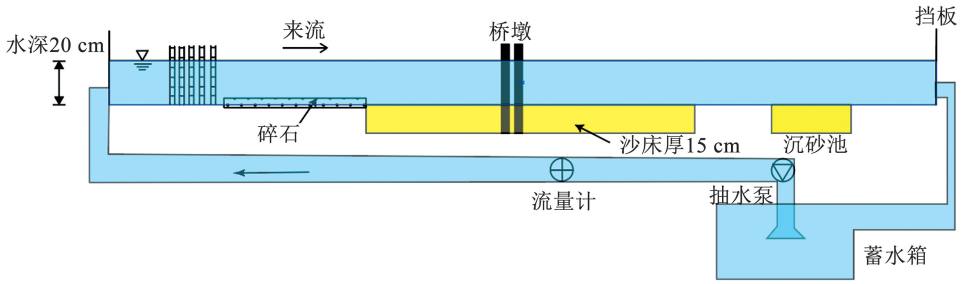
本试验采用的试验水槽全长 L = 20.0 m,宽 B = 1.6 m,高度 H = 0.7 m,来流速度 v = 0.3 m/s,槽底与侧墙均为混凝土修砌而成。试验水槽被划分为稳定来流区、试验区以及沉沙池区三部分(图 1)。其中,稳定来流区全长 7 m,均匀布置 5 道稳流格栅,并在底部铺设大小均匀的碎石以使水流平稳通过试验区;试验区全长 7 m,试验水深 20 cm,铺设 15 cm 厚沙砾,中心位置处为桩柱布置区;沉沙池区位于水槽尾端,长 2 m,宽 1.6 m,深 0.15 m,用于收集被水流冲刷带走的沙砾,防止污染整套水流循环系统。



(a) 水槽全景图



(b) 平面图

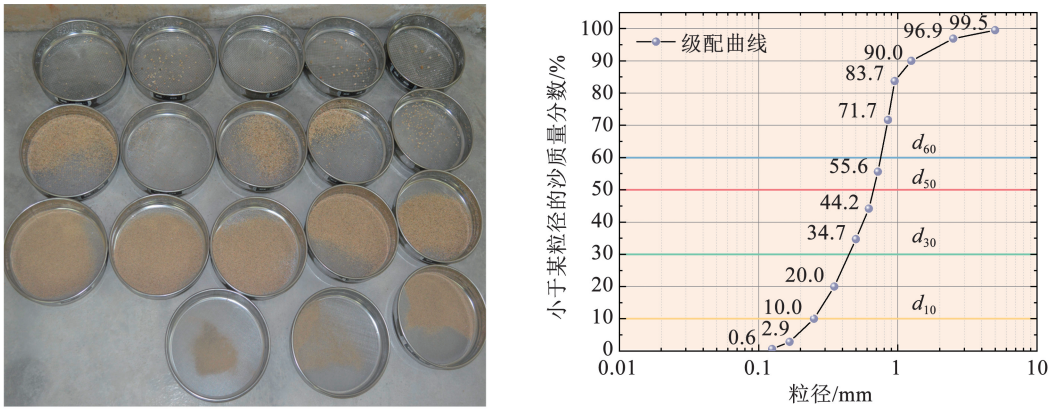


(c) 纵断面图

图 1 试验系统布置

Fig. 1 Experimental system setup

本试验所用桩柱模型采用亚克力材料制作,桩径 D = 4 cm;所用沙砾为均匀沙,沙样密度 2.65 g/cm^3,中值粒径 d_{50} = 0.67 mm,不均匀系数为 3.1,曲率系数为 1.03。该沙样级配曲线特征如图 2 所示,沙样级配良好,满足试验要求。本试验设计 B/D = 40,根据 Istiarto 试验结果[26],当试验条件满足 B/D > 8,可减小水槽侧壁反射波浪对冲刷区的影响。本试验设计 D/d_{50} = 59.7,根据 Ettema 试验结果[27],当试验条件满足 D/d_{50} > 50,可避免泥沙大小对冲刷深度的影响。



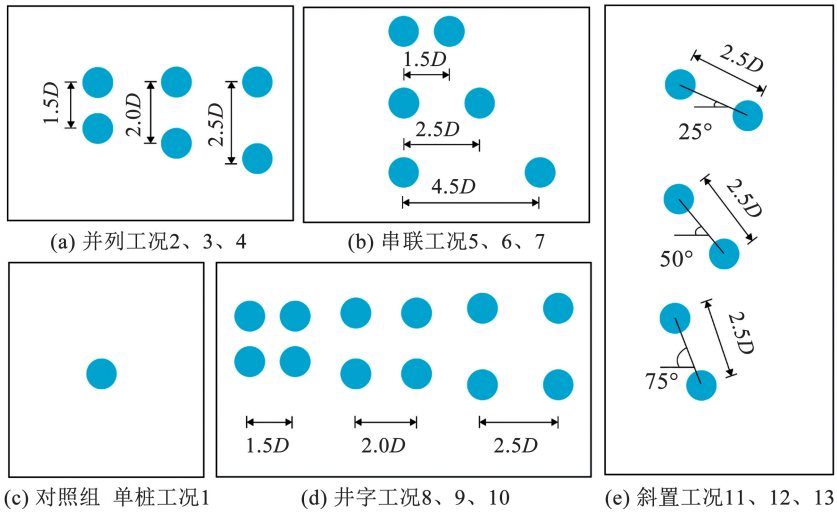
(a) 筛析图　　(b) 颗粒级配图

图 2　沙样颗粒级配

Fig. 2　Grain size distribution of sand samples

1.2　试验方案

为研究桥桩局部冲刷受桩群布置形式与桩心距的影响，本试验选取了工程实践中普遍采用的桥桩布置方式作为工况设计的依据，综合考虑桩群布置形式、入流角度和桩心距等主要控制参数，形成了双桩并列型、双桩串联型、四桩井字型、双桩斜置型(不同入流角度)等 4 种典型桩型分布，并设置了单桩对照组(图 3)。其中，桩群的桩心距 G(桩柱中心与桩柱中心的距离)设置为 1.5D 至 4.5D 不等，D 为桩柱直径。入流角度分别考虑 25°、50°和 75°三种情况；入流角度定义为圆桩中心连线与来流方向的夹角，本文通过双桩斜置角度的变化来模拟入流角度的变化。将以上影响因素进行组合，共形成 13 组试验工况，如表 1 所示。



(a) 并列工况2、3、4　(b) 串联工况5、6、7　(c) 对照组 单桩工况1　(d) 井字工况8、9、10　(e) 斜置工况11、12、13

图 3　桩群俯视布置

Fig. 3　Overhead arrangement of pile groups

表 1　试验工况设计

Tab. 1　Experimental scenario design

组别	桥桩类型	布设间距/入流角度
A(工况 1)	单桩	
B(工况 2、3、4)	并列	1.5D、2.0D、2.5D
C(工况 5、6、7)	串联	1.5D、2.5D、4.5D
D(工况 8、9、10)	井字	1.5D、2.0D、2.5D
E(工况 11、12、13)	斜置	25°、50°、75°

1.3　数据采集

本试验采用三维地形扫描仪采集冲刷地形变化数据。该扫描仪采用的是高精度双目工业级抄数机，扫描方式为非接触式面扫描，测量精度为 0.001 ~ 0.050 mm，单幅扫描点数为 1.0 × 10^6 ~ 2.6 × 10^6(图 4)。双目抄数机原理是利用视觉差获取物体的三维几何信息，具体通过双摄像机在同一时刻不同位置拍摄同一物体，通过计算待测物体的匹配点在左右成像上的位置偏差，进而获得待测点的三维位置。

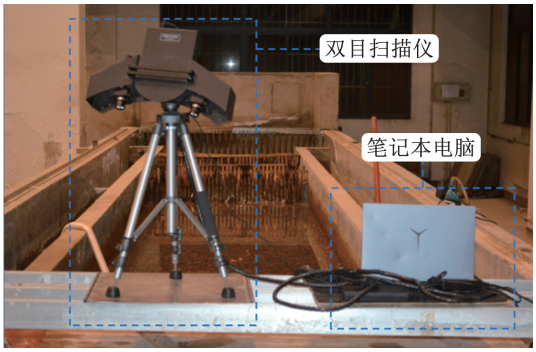
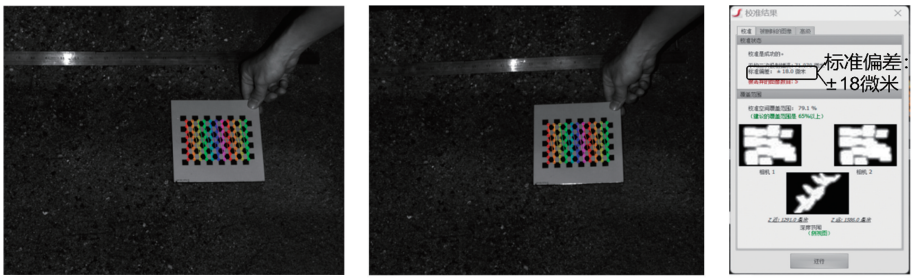


图 4 高精度双目工业抄数机

Fig. 4 High-precision binocular industrial 3D scanner

在三维建模过程中,不同的标定方法会对建模的精度产生显著影响。本试验选择张正友标定法,标定板采用了边长为 10 mm 的 9 × 16 黑白正方形组合棋盘形式,以提高标定的准确性和可靠性。该方法基本流程包括采集 20 余张不同位置和倾斜角度的标定图片来覆盖 65% 以上的扫描区域,以确保标定的全面性和准确性(图 5)。同时,标准偏差需控制在 20 μm 内,以便获得较高精度的扫描结果。张正友标定法不仅制作简便、成本低廉,而且标定精度也完全满足试验需求。



(a) 左视图 (b) 右视图 (c) 标定偏差图

图 5 张正友标定法

Fig. 5 Calibration method by Zhang Zhengyou

完成标定后,对冲刷坑及四周喷洒显像剂,旨在解决坑底水光带来的折射偏差以及透明亚克力模型难以扫描的问题。地形三维建模主要步骤包括:1)采用 Wrap 软件对三维扫描仪获取的冲刷坑特征及周围河床变化的三维点云数据进行整体对齐,同时把获取的三维点云模型封装成 STL 面片数据;2)再将扫描后的 STL 面片数据导入 Geomagic-Qualify 确立三维坐标,并根据河床建立沙平面;3)通过沙平面与 STL 模型进行偏差比较,获取桥桩局部冲刷相关高程数据。具体工况扫描流程如图 6 所示。将采用此方法获取的某工况冲刷坑三维地形重构模型与该工况下实际观测的冲刷坑形态进行对比,结果表明重构模型整体与实际观测结果高度吻合,且多处微地形特征匹配精准(图 7)。

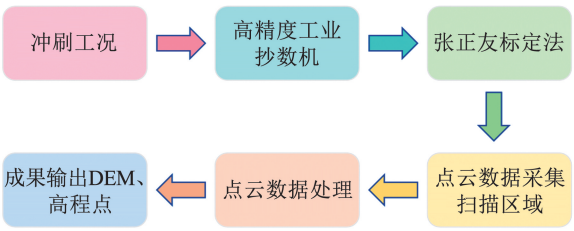
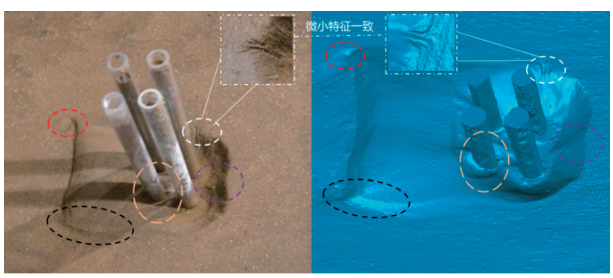


图 6 工况扫描流程

Fig. 6 Flowchart of scenario scanning



(a) 试验结果 (b) 扫描结果

图 7 试验结果与扫描结果对比

Fig. 7 Comparison between experimental and scanning results

2 流场分析

2.1 Flow-3D 数值模拟验证

为分析桩群布置形式对桩周流场的影响,采用 Flow-3D 软件对试验工况进行流场模拟分析,并与试验结果进行对比验证。在 Flow-3D 软件构建了与物理模型试验对应的数值水槽模型,以工况 1 为例,圆桩直径 4 cm,水槽尺寸为长 20D、宽 10D,头部和尾部各设置 1D 挡板以稳定水流、防止泥沙流失。沙床厚度为 0.15 m,水深 0.2 m,来流速度为 0.3 m/s。计算域整体采用 0.15D 网格划分,桩周网格加密至 0.08D,根据不同的工况网格总数在 $4 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5$ 之间。本文模拟试验中上游进水口边界设定为 specified velocity;下游出水口边界设置成 out flow;水槽两侧边界设置成 symmetry;水槽底部边

界设定为 wall；水槽顶部边界条件设置为 specified pressure。模型具体布置情况见图 8。

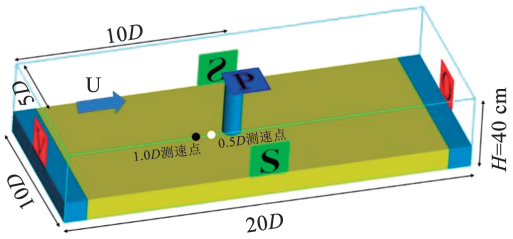


图 8　Flow-3D 建模

Fig. 8　Flow-3D modeling

图 9 为柱体正前方 0.5D 和 1.0D 位置处的纵向测点流速与 Flow-3D 数值模拟得到的流速剖面对比图。其中，测点角度为 0°，D 为圆桩直径。由图 9 可知，Flow-3D 数值模拟的流速剖面与试验数据吻合良好，流速的变化趋势与实测结果一致。将 Flow-3D 模拟数据进行可视化处理，生成圆形桩周局部流场示意图和桩周流线三维及平面图，如图 10 所示。数值模拟结果可以反演出物理试验中的桩前雍水现象、桩底的下降水流、桩侧流线收缩以及尾涡脱落等现象，经对比，数值模拟呈现的桩周流场分布及宏观特征与物理试验结果高度相似。此外，现有文献[28-29]也验证过 Flow-3D 软件能够准确模拟出圆柱绕流运动，表明该软件在模拟桩周流场方面具有较高的准确性和可靠性，可以为后续深入研究桩群布置形式对桩周流场的影响提供有效的研究手段。

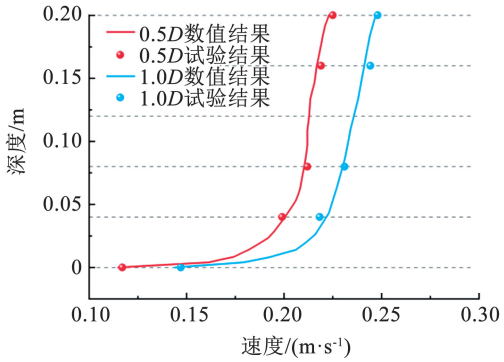
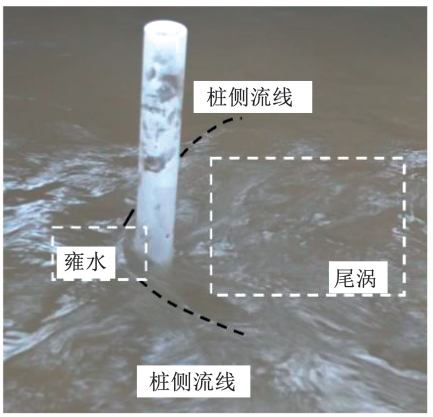
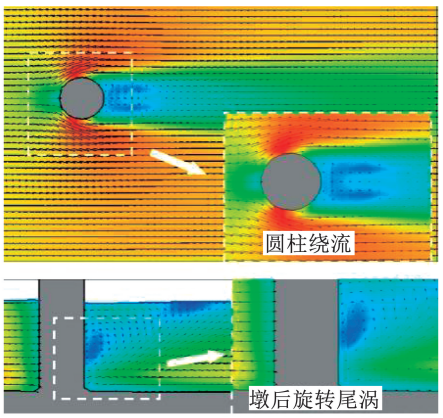


图 9　流速对比

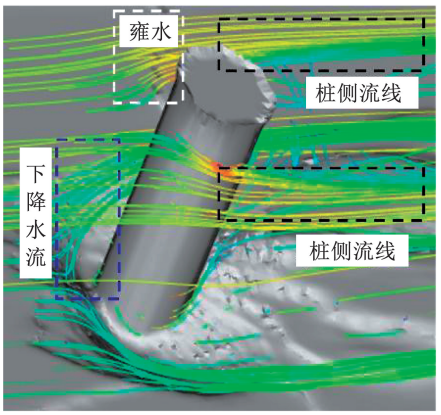
Fig. 9　Comparisons of flow velocities



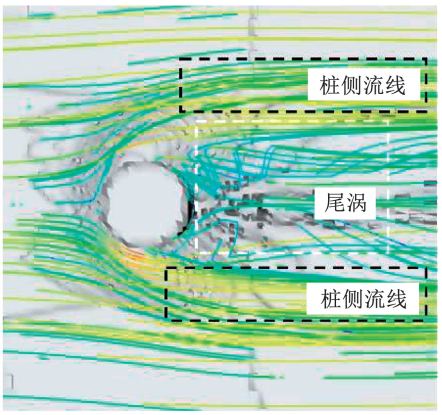
(a) 试验现场实拍图



(b) Flow-3D局部流场示意图



(c) Flow-3D桩周流线三维视图



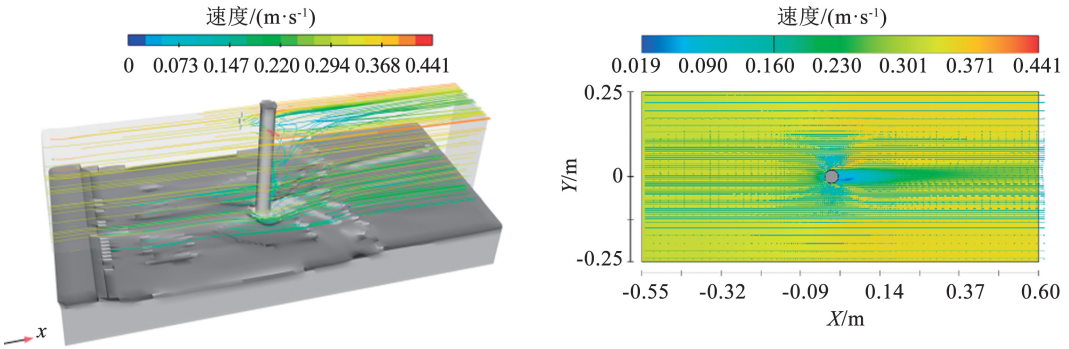
(d) Flow-3D桩周流线平面视图

图 10　流场对比

Fig. 10　Comparison of flow fields

2.2 单桩流场分析

桥墩的存在引起桩周三维流场发生复杂变化是导致局部冲刷产生的主要原因。通过 Flow-3D 可建模分析单桩冲刷时桩周流场的三维流线图(x 方向为水流方向)和平面流速(图 11)。由图 11(a)可知,由于桥墩曲面阻挡,墩前水流出现下降,下降水流在墩前产生逆压力梯度,导致底床边界层在桩侧发生分离旋转,形成马蹄形漩涡,漩涡产生的旋转带动泥沙产生悬浮搬运。同时流线在桩侧处收缩,流速变大,在桩尾处扩散,在扩散区与桥桩之间不断产生尾流漩涡。由图 11(b)可知,墩前水流因分离作用产生驻点,驻点处流速趋于零,墩侧水流因流线收缩,流速增加,由 0.3 m/s 的来流速度最高增至 0.395 m/s;墩后水流因桥墩遮蔽作用而导致流速大幅减小,发生回流,致使边界层脱落,在柱后形成的交替脱落的尾涡,尾涡末端处流速恢复至来流速度。



(a) 三维流线图 (b) 平面流速图

图 11 单桩三维流线与平面流速

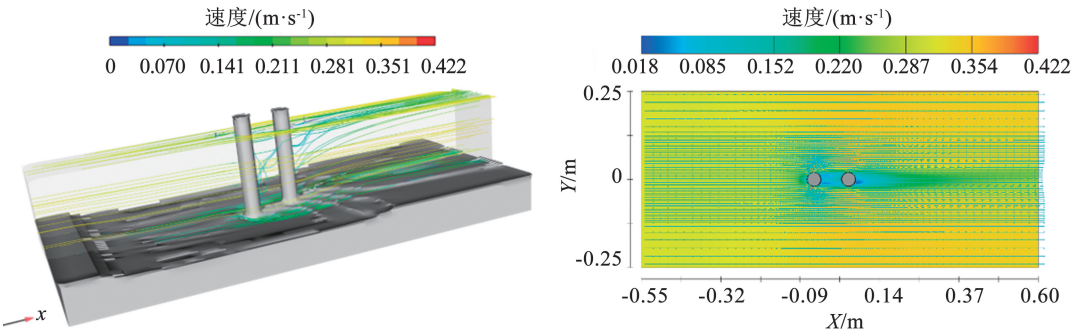
Fig. 11 3D streamline plots and planar velocity contour maps of a single pile

2.3 桩群布置形式对流场的影响

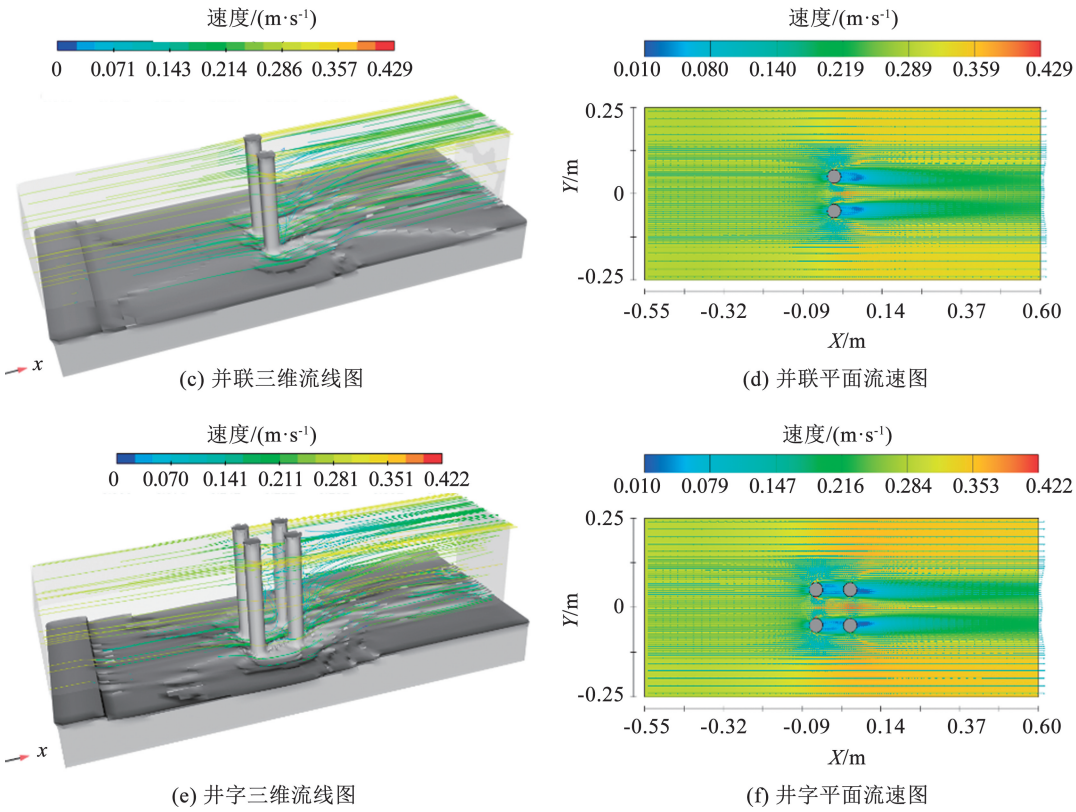
桩群呈现不同布置形式时,桩周的流场会发生复杂的变化。图 12 显示桩心距为 2.5D 工况下串联、并联与井字布置的桩周流场三维流线图与平面流速图。由三维流线图可知单桩的流线特征在多桩布置中均有体现,并且由于多桩的存在,桩与桩之间存在着干扰效应。

通过分析图 12(b)与图 12(f)可知,上游桩后复杂的三维尾流会对下游桩产生干扰,扰乱下游桩前水流原本的层流模式,导致下游桩前的水流状态、流速和方向均发生改变。上述由于上游桩部分阻挡原本直接作用于下游桩的水流冲击力而产生的流场效应称为“屏蔽效应”。与之对应,下游桩前缘的流动分离会增强上游桩尾涡中的垂向速度分量,形成向下旋转的分离模式,从而加快尾涡中的悬移质沉积,使得上游桩后的河床位置高于单桩工况。上述由于下游桩分流作用导致上游桩流场和河床位置变化的效应称为“增强效应”。

通过分析图 12(d)和图 12(f)可知,当上游双桩呈并排状迎接来流时,被桩分离开的流线会在桩间发生碰撞与挤压。而且桩间距越小,过水断面越小,导致流速增大以及桩间流线挤压,而流速进一步加快将使得内侧流速大于外侧,剪应力增加,泥沙进一步掏蚀以及冲刷深度加深。上述由于桩间距减小产生的流场差异变化现象称为“被挤压的马蹄涡流效应”。



(a) 串联三维流线图 (b) 串联平面流速图



(c) 并联三维流线图　(d) 并联平面流速图

(e) 井字三维流线图　(f) 井字平面流速图

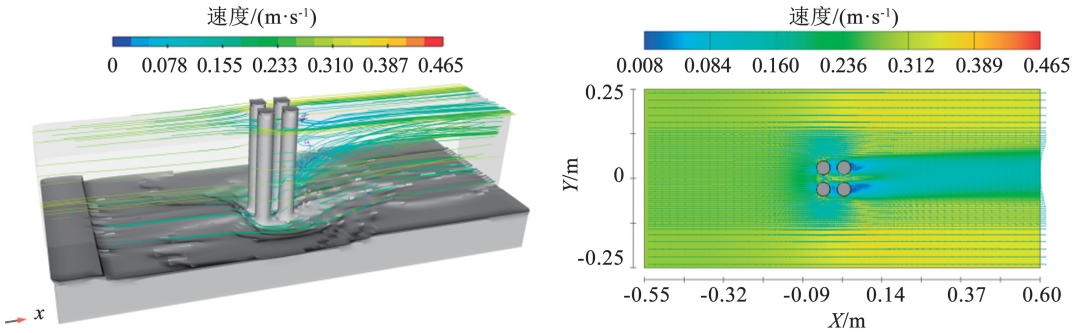
图 12　不同布置形式下的桩周三维流线与平面流速

Fig. 12　3D streamline plots and planar velocity contour maps around piles with different arrangements

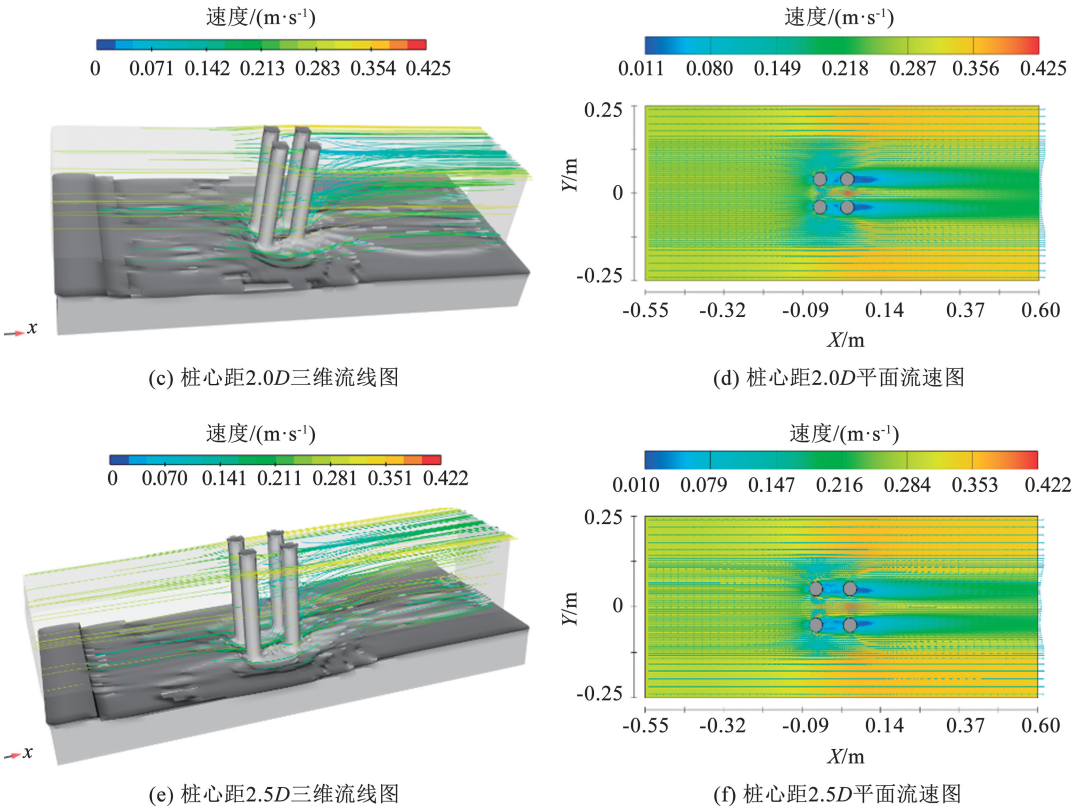
2.4　桩心距对流场的影响

选取桩心距分别为 1.5*D*、2.0*D* 和 2.5*D* 的井字型桩群布置作为研究对象，分析其流场三维流线和平面流速如图 13 所示。由图 13(a)、13(c)、13(e)可知，桩心距对流线的影响随着桩心距的增大而逐渐减弱。当桩心距较小时，串联双桩的边界层从上游桩的两侧分离后，尚未完成旋转便沿着下游桩的侧面滑落，并在下游桩后完成旋转剥离。相比之下，并联双桩的桩内侧流线受到显著挤压，过水断面的狭窄导致内侧流速显著高于外侧流速。当桩心距较大时，桩群之间的相互干扰效应逐渐减弱，桩与桩之间的流线不再受到显著挤压，群桩中的各桩逐渐呈现出独立的流场特征。

由图 13(b)、13(d)、13(f)可知，模型桩心距越小，上游桩内侧的流线受到的挤压越强烈，从而导致流速显著增加。当桩心距为 1.5*D* 时，在来流速度为 0.3 m/s 的条件下，内侧流速增加至 0.417 m/s，增速比为 1.39 倍。此外，平面流速图也清晰表明内侧流速显著高于外侧流速。随着桩心距的增大，桩内侧的流线挤压效应逐渐减弱，桩两侧的流速分布逐渐趋于对称。



(a) 桩心距1.5*D*三维流线图　(b) 桩心距1.5*D*平面流速图



(c) 桩心距2.0D三维流线图　(d) 桩心距2.0D平面流速图

(e) 桩心距2.5D三维流线图　(f) 桩心距2.5D平面流速图

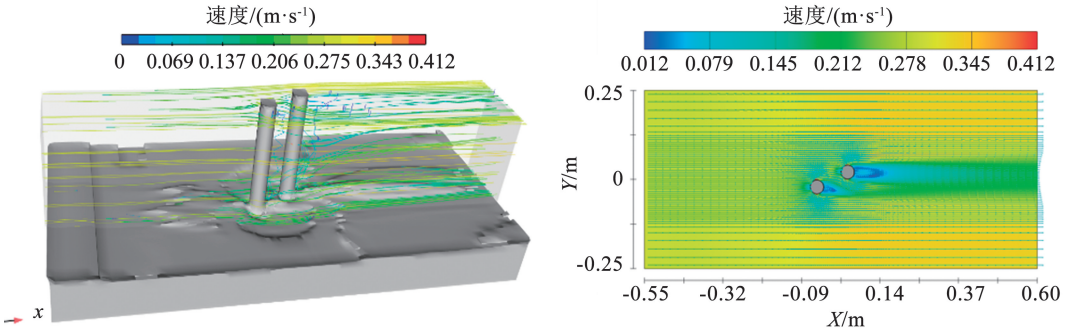
图 13　不同桩心距下的桩周三维流线图与平面流速图

Fig. 13　3D streamline plots and planar velocity contour maps around piles with different center distances

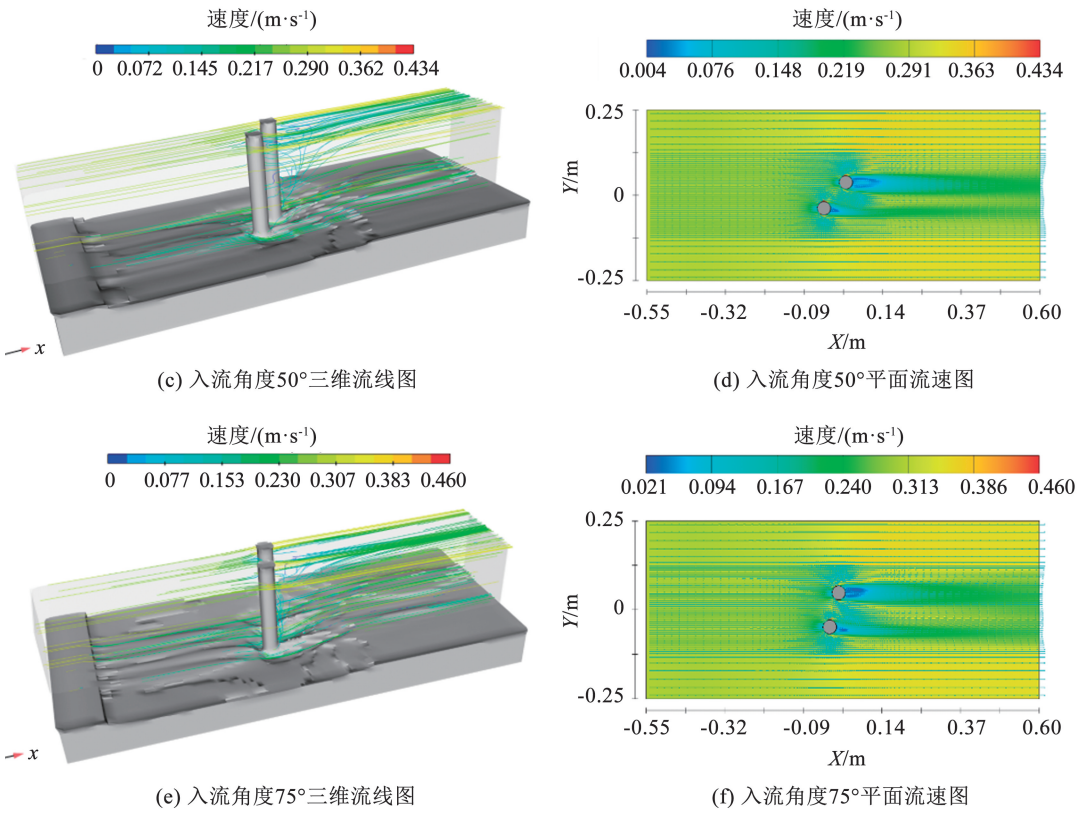
2.5　入流角度对流场的影响

为了分析入流角度对桩周流场的影响，选取入流角度为 25°、50°和 75°的双桩工况作为研究对象，通过 Flow-3D 模拟 3 种入流角度下的桩周三维流线和平面流速，如图 14 所示。由三维流线图 14(a)、14(c)和 14(e)可知，当入流角度为 25°时，上下游桩之间主要受到“遮蔽效应”和“增强效应”的干扰。双桩内侧的流线受到的挤压效应较弱，而上游桩的低速尾涡因下游桩的流线收缩而流速略有提升。随着入流角度从 25°增加到 75°，上下游桩之间的“遮蔽效应”和“增强效应”逐渐减弱，但此时“挤压马蹄涡效应”逐渐增强。该现象在流线上表现为上下桩的流线交织缠绕逐渐转变为左右桩的流线缠绕。

由平面流速图 14(b)、14(d)和 14(f)可知，斜向入流会打破正向入流时桩周流场的对称性，复杂的流场特征会导致局部流速发生显著变化，例如内侧流速显著增加，而外侧流速相对较小。当入流角度为 25°时，桩侧最大流速为 0.388 m/s，为来流速度的 1.293 倍；当入流角度增加至 75°时，桩侧最大流速为 0.420 m/s，为来流速度的 1.4 倍。由此可见，入流角度与桩侧流速之间呈正相关关系。



(a) 入流角度25°三维流线图　(b) 入流角度25°平面流速图



(c) 入流角度50°三维流线图　(d) 入流角度50°平面流速图

(e) 入流角度75°三维流线图　(f) 入流角度75°平面流速图

图 14　不同入流角度下的桩周三维流线与平面流速

Fig. 14　3D streamline plots and planar velocity contour maps around piles under varying inflow angles

3　冲刷坑形态分析

3.1　单桩冲刷坑形态特征

河床面形态特征是桥桩绕流冲刷研究的关键内容。本试验中单桩工况下河床冲刷坑形态的扫描结果如图 15 所示。

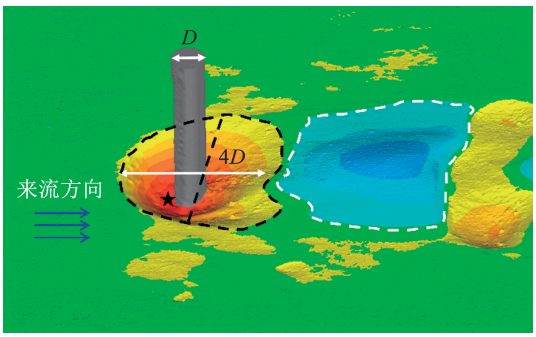


图 15　单桩冲刷坑特征

Fig. 15　Scour pit characteristics of a single pile

由图 15 可知，冲刷坑的影响范围约为 4D，冲刷坑的形状由迎水面圆滑的半圆形和背水面鱼尾状组成(黑色虚线范围，下文图同)。桥桩前方受到水流冲刷最为严重，因此冲刷坑也最深，最大坑深点位于桥桩迎水的桩脚处(五角星标识，下文图同)。在桥桩后方，冲刷坑的坑底缓慢抬升至河床高度，并在桥桩后一定距离处形成了鼓起的沙堆(白色虚线范围，下文图同)。这些沙堆是由于桥桩前方被掏蚀的泥沙在桥桩后方尾涡剥离后堆积形成的。因此，冲刷坑内被掏蚀的沙砾体积与后方形成的沙堆体积大致相等。此外，冲刷坑外围的河床几乎保持平整状态，这表明局部冲刷仅发生在桥桩周围一定范围内。

3.2　不同桩群布置形式的冲刷坑形态特征

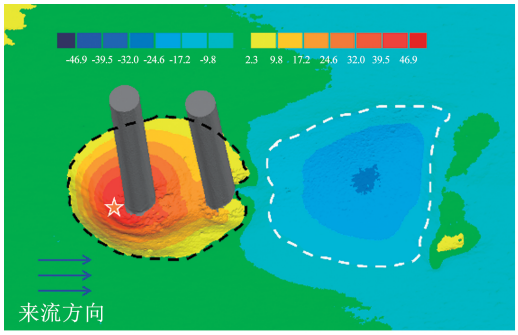
为探究不同桩群布置形式下冲刷坑形态特征，在相同水流速度(v = 0.3 m/s)下取桩心距 2.5D 条件下的并联工况 4、串联工况 6、井字工况 10 冲刷产生的冲刷坑形态进行分析，如图 16 所示。由图可知，桩群的布置方式不同，其冲刷坑的形态特征也会表现出显著差异。

针对图 16(a)中的串联型桥桩。过小的桩心距导致了下游桩在上游桩的尾涡剥离范围之内，从而上下游桩的冲刷坑连接成一整体，下游桩的冲刷坑在上游桩的冲刷坑尾端内，最大冲刷深度点发生在上游桥桩的前侧。

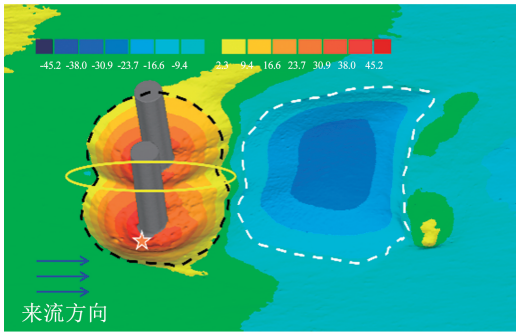
针对图 16(b)中的并联型桥桩。冲刷坑呈现“8”字型左右对称分布，左桩的冲刷坑与右桩的冲刷坑相交形成“8”字形状，桩之间有明显的凸起冲刷痕(黄色圆圈范围，下文图同)，冲刷痕的两头端点为双桩冲刷坑交汇处。冲刷痕的形成主要是由于来流在遇到桥墩阻碍后向两侧分流，进而在两桥墩之间的区域引发马蹄形涡流的相互挤压与碰撞

所致。

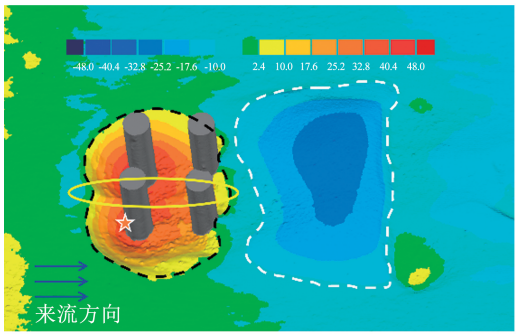
针对图 16(c)中的井字型桥桩。其冲刷坑呈现左右对称,形态表现为串联型与并联型布置的结合体,表现出“遮蔽效应”、“增强效应”和“压缩马蹄涡效应”的组合效应。此外,左右侧的桥桩之间存在着由挤压马蹄型涡流冲刷而形成的凸起痕,形态呈现上与并列桥桩一致;前后排的桥桩由于桩心距较小而同时受到“增强效应”与“遮蔽效应”影响,导致井字布置的左右侧桥桩与前后排桥桩的冲刷坑衔接形成一个近似大直径圆桩冲刷坑的整体形态。



(a) 串联工况4,2.5D



(b) 并联工况6,2.5D



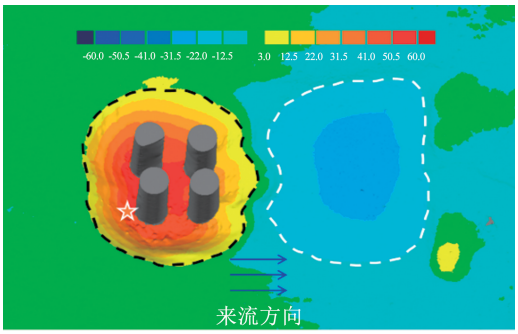
(c) 井字工况10,2.5D

图 16 不同布置形式冲刷形态

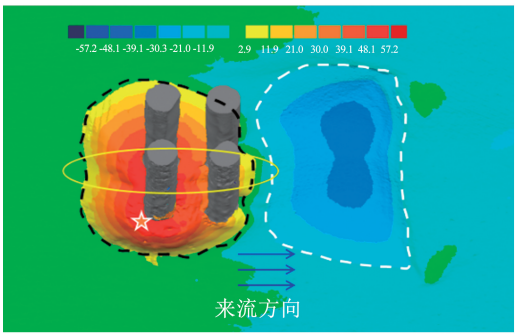
Fig. 16 Scour morphology under different arrangements

3.3 不同桩心距的冲刷坑形态特征

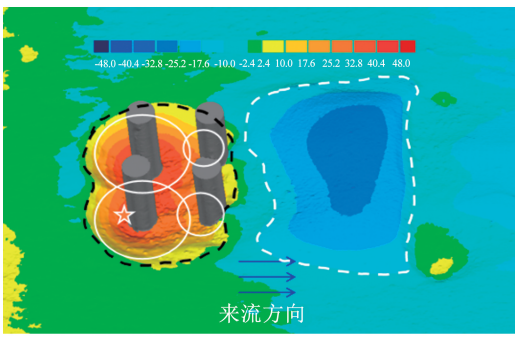
桩心距是影响冲刷坑特征的关键参数,不同桩心距条件下的桩群分布会导致冲刷坑形态产生显著差异。以工程实践中常见的井字型桩群布置为例(图 17),由图 17 可知,桩心距的逐步增加会导致冲刷范围逐渐扩展,冲刷坑形态也由趋于整体性向独立分散性转变。桩心距为 1.5D 时桩壁之间的间距仅为 0.5D,4 个独立的圆桩在冲刷过程中的表现更像是一个较大的整体圆桩,各桩冲刷坑相互衔接导致其整体形态接近圆形,与单桩冲刷坑形态相似,如图 17(a)所示。随着桩心距的增加,各个桩体逐渐转变为独立的单桩,相应的冲刷坑也开始相互分离。当桩心距增加至 2.0D 时,冲刷坑呈现出明显的左右分割特征,中间存在冲刷痕迹,表现出冲刷坑有分割成 4 个独立圆形冲刷坑的趋势,如图 17(b)所示。当桩心距进一步增加至 2.5D 时,冲刷坑进一步分割,独立圆坑的形状更加显现,如图 17(c)。



(a) 井字工况8,1.5D



(b) 井字工况9,2.0D



(c) 井字工况10,2.5D

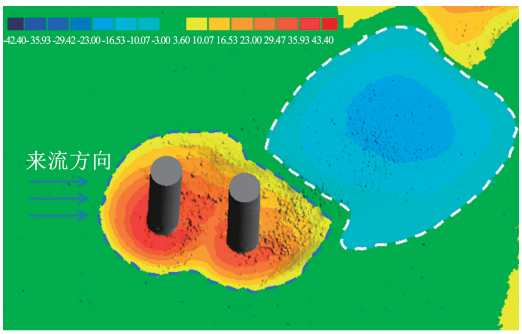
图 17 井字布置冲刷形态

Fig. 17 Scour morphology with a square pattern of four piles

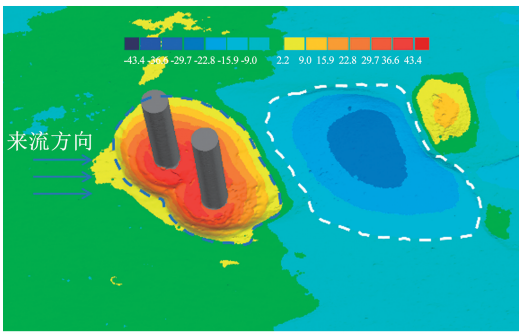
3.4 不同入流角度的冲刷坑形态特征

入流角度是影响桥桩冲刷坑形态的关键因素之一。不同入流角度下的桩群分布会导致冲刷坑形态

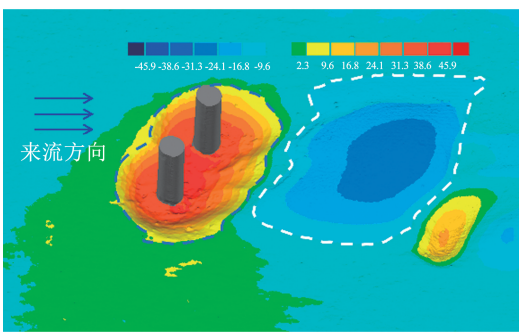
的显著差异。本研究通过设定双桩配置在 2.5D 桩心距条件下，采用斜置角度(25°、50°、75°)来模拟入流角度的变化，进而分析入流角度对冲刷效应的影响。如图 18(a)～18(c)所示，斜置双桩配置下的冲刷坑呈现出斜“8”字型的分布特征。与并列双桩配置的对称分布特性不同，斜置双桩中的上游桩冲刷坑范围要大于下游桩，较大的冲刷坑与较小的冲刷坑共同构成“8”字型的两个圆环，尤其在 25°斜置角度时这一现象更为显著。此外，由于下游桩位于上游桩的“遮挡效应”影响范围内，下游桩的外侧冲刷范围略大于内侧。串联型布置可以看成是入射角度为 0°，并联型布置则为 90°，因此，当入流角度趋于 0°和 90°时，冲刷坑形态分别类似于串联型和并联型布置。随着入流角度从 0°增加至 90°，冲刷坑的形态也由串联型配置的冲刷坑形态逐渐转变为并联型配置的冲刷坑形态。



(a) 斜置工况11,25 °



(b) 斜置工况12,50 °



(c) 斜置工况13,75 °

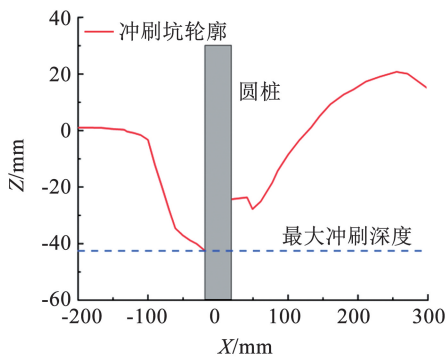
图 18　斜置布置冲刷形态

Fig. 18　Scour morphology with inclined arrangement

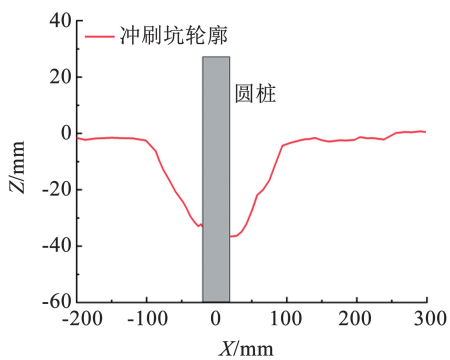
4　冲刷坑深度分析

4.1　单桩冲刷坑深度特征

图 19 展示了在特定水力条件下(水深 20 cm，流速 v = 0.3 m/s)，单桩工况形成冲刷坑的纵向与横向剖面图。由图可见，桩前冲刷坑呈现出具有快速下切特点的侵蚀坡形态特征，这是由于水流的直接冲击和动力作用导致泥沙颗粒被分离和搬运。桩后形成了一个缓慢向上隆起的鼓包状结构，该现象源于水流分离，泥沙在分离区域沉积。桩左右两侧冲刷坑近似对称分布，表明在单向水流作用下，桥桩两侧的冲刷效应相对均衡。冲刷坑的最大冲刷点发生在桩前，最大冲刷深度达到 4.25 cm，约为桩径 D 的 1 倍。



(a) 单桩中心纵断面



(b) 单桩中心横断面

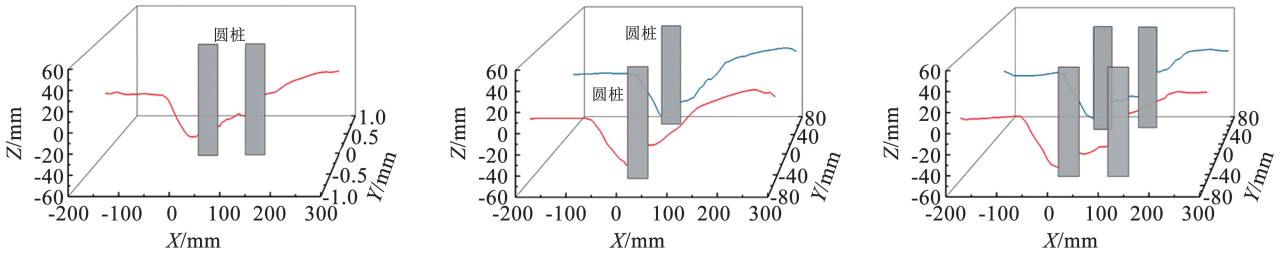
图 19　单桩冲刷坑剖面

Fig. 19　Cross-sectional profiles of scour pit around a single pile

4.2　不同桩群布置形式的冲刷坑深度特征

图 20 展示了桩心距为 2.5D 时，串联、并联以及井字型桥桩配置下纵向冲刷深度的沿程分布情况。由于不同桥桩配置对水流流场的影响各异，冲刷坑的最大深度和坡度也相应改变。在对称流场中，对称布置的桩结构呈现出冲刷坑深度与斜率的对称分布特性。当桩心距为 2.5D 时，并联与多桩布置的桩前冲刷坑深度均大于串联布置。因为并排放置的桩增大了对来流的阻挡面积，相当于增大了整个桩群的等效桩径；阻挡面积增大使得被阻挡的

流体量增多,进而压缩了桩侧流体空间,导致流速增大形成速度更快的马蹄形涡流能够携带更多沙砾,最终加深了冲刷坑深度。相较而言,串联布置的桩前冲刷坑深度与单桩情况相近,上下游桩之间存在不显著的堆积后再侵蚀现象。



(a) 串联 (b) 并联 (c) 井字

图 20 2.5*D* 桩心距下不同布置形式冲刷深度

Fig. 20 Scour depth for different arrangements at a center distance of 2.5*D*

图 21 展示了串联、并联和井字型桥桩工况与单桩工况最大冲刷坑深度。数据显示,所有多桩工况下的最大冲刷坑深度均超过单桩工况。这表明多桩布置中存在的增强效应、屏蔽效应、漩涡脱落,以及受压缩的马蹄涡之间会产生复杂的相互作用,共同促使冲刷坑深度增加。其中井字桩布置形成的冲刷坑深度最大,约为单桩冲刷深度的 1.13 倍;并联布置的冲刷坑深度次之,约为单桩冲刷深度的 1.06 倍;串联布置的冲刷坑深度则与单桩工况较为接近。

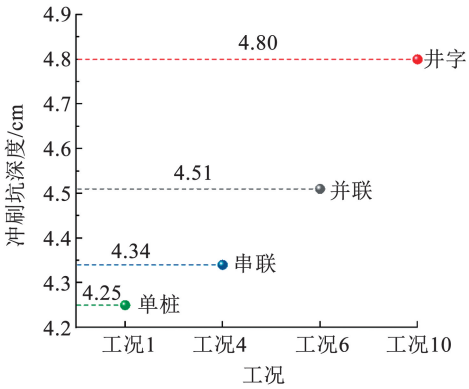
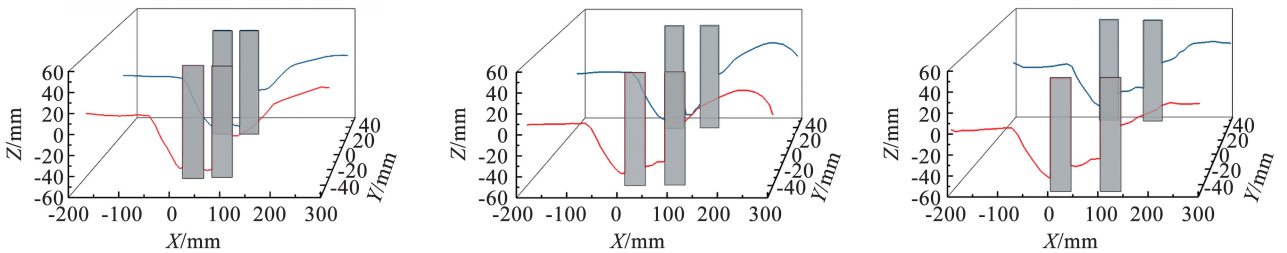


图 21 不同布置形式冲刷深度对比

Fig. 21 Comparison of scour depths for various arrangements

4.3 不同桩心距的冲刷坑深度特征

图 22 展示了井字型布置下不同桩心距桥桩最大冲刷深度所在位置的纵向剖面图。由图 22 可知,随着桩心距的减小,冲刷坑深度逐渐增加,桩前冲刷坑的下切斜率也逐渐增加。此外,上下游桥桩之间的冲刷坑也进一步加深。当桩心距减小至 1.5*D* 时,冲刷坑深度可达单桩工况冲刷坑深度的 1.41 倍,且冲刷坑的深度和范围均显著大于单桩工况。当桩心距增加至 2.5*D* 时,相较于 1.5*D* 工况,冲刷坑范围虽有所扩大,但冲刷深度降低至单桩工况的 1.13 倍。通过分析井字型桥桩布置可知,较小的桩心距会导致多桩呈现出整体效应,使得桩与桩之间的独立性减弱。具体而言,相对桩径的增加导致多桩在流场中的行为类似于一个具有更大桩径的单桩,也意味着冲刷坑深度的增加,导致多桩的埋置深度变浅,稳定性降低,加大桥梁失稳破坏的可能性。随着桩心距的增加,相对桩径效应逐渐减弱。当桩心距增加至一定程度后,桩与桩之间的相互干扰将逐渐减少,冲刷破坏的可能性也随之降低。



(a) 井字1.5*D*桩心距 (b) 井字2.0*D*桩心距 (c) 井字2.5*D*桩心距

图 22 井字布置冲刷坑剖面

Fig. 22 Cross-sectional profiles of scour pit with a square pattern of four piles

表 2 中列出了在不同桩心距、不同桩群布置形式下的冲刷坑最大深度对比数据。由表可知,在较小桩心距条件下,除了串联布置,其他多桩布置均显著增加了冲刷坑的最大深度,且冲刷坑深度的增加与桩心距呈反比关系。在串联布置中,桩心距与冲刷坑深度之间存在正比关系;当桩心距增至4.5*D*

表 2　多桩布置工况同单桩比深表

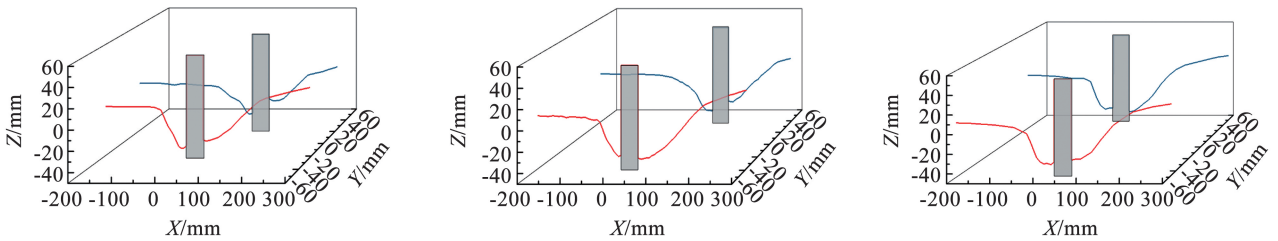
Tab. 2　Comparison of scour depths between multi-pile and single-pile arrangements

工况	最大冲刷深度/cm	同单桩比深
1-单桩	4.25	
2-并联 1.5D	4.95	1.16
3-并联 2.0D	4.63	1.09
4-并联 2.5D	4.5	1.06
5-串联 1.5D	4.19	0.92
6-串联 2.5D	4.34	1.02
7-串联 4.5D	4.82	1.13
8-井字 1.5D	5.99	1.41
9-井字 2.5D	5.3	1.25
10-井字 2.5D	4.8	1.13

时，冲刷坑深度达到单桩布置的 1.13 倍，当桩心距超过 4.5D 后下游桩可能超过上游桩影响范围，下游桩会逐渐转换为单桩冲刷特征。针对双桩的并联与串联布置，在较小的桩心距条件下，并联布置的冲刷深度更大，这一现象表明在桥梁设计中，“挤压马蹄涡效应”相较于“遮蔽效应”对冲刷坑深度的影响更显著，因此在设计时应予以更多的考虑。

4.4　不同入流角度的冲刷坑深度特征

入流角度是影响桥桩冲刷深度的重要因素之一。图 23 展示了不同入流角度(25°、50°、75°)条件下斜置双桩布置的冲刷坑深度变化特征。由图可知，斜置双桩布置中上游桩的冲刷坑深度略大于下游桩，该差异归因于下游桩处于上游桩的“遮挡效应”影响范围内。随着入流角度从 25°增加至 75°，最大冲刷深度逐渐增大，当入流角度为 75°时，最大冲刷深度达到最大值。此外，双桩斜置 75°趋于并联布置，冲刷坑深度相较另外两个工况略大，该结论与并联布置下冲刷坑深度大于串联布置的特征一致。特别地，在斜置 50°布置下，冲刷坑最大深度并非发生在上游桩的桩前或桩侧，而是紧靠在上游桩后的位置，该现象是由于桩后尾涡受到下游桩干扰所致。



(a) 斜置25°　(b) 斜置50°　(c) 斜置75°

图 23　斜置布置冲刷坑剖面

Fig. 23　Cross-sectional profiles of scour pit with inclined arrangement

5　讨　论

本文通过水槽试验对双桩基础在并列与串列布置下的局部冲刷特性进行了研究。试验结果表明，相同桩间距 2.5D 下，并列双桩产生的最大冲刷深度(4.5 cm)大于串列双桩(4.34 cm)。这一发现与 Sumer 等[30]进行双桩并列和串列的局部冲刷试验研究，得出并列双桩的局部冲刷深度比串列双桩大的结论相吻合。两组研究的共同指向表明，桩群布置形式对局部冲刷发展具有重要影响，其中并列布置因流场干扰效应更为剧烈，导致冲刷坑深度增加更为显著。

Ataie-Ashtiani 等[22]通过试验得到串列双桩局部冲刷深度随着桩心距 L/D 的增大先增大后减小，当桩心距 $L/D<1.25$ 双桩可视为单桩冲刷，在桩心距 $L/D=3$ 时冲刷深度取得最大；并列双桩局部冲刷深度随着桩心距的增大逐渐减小。本研究针对并列双桩，通过设置 1.5D、2.0D、2.5D 三组桩心距试验，测得最大冲刷深度随间距增大呈现的递减规律(由 4.95 cm 减小至 4.5 cm)，与 Ataie-Ashtiani 等提出的结论相互印证。这表明桩心距增加会使桩间流场干涉效应逐渐减弱，导致马蹄涡强度和尾流区紊动能量降低，从而削弱了冲刷发展动力。对于串列双桩，本研究在桩心距 1.5D 至 2.5D 范围内观测到冲刷深度随间距增大而递增的趋势，与 $L/D<3$ 时冲刷深度呈正相关的结论形成有效衔接。由于试验参数未涵盖 $L/D=3$ 的临界间距，故未完整呈现“先增后减”的全过程。

本研究在固定桩心距 2.5D(小于尾涡充分发展长度)条件下，揭示了“遮蔽效应”、“增强效应”和“挤压马蹄涡效应”在不同桩群布置中的主导作用机制。双桩串联工况中，“遮蔽效应”主导下游桩冲

刷抑制,“增强效应”引发上游桩局部冲刷强化;双桩并联布置下,“挤压马蹄涡效应”与分流强化效应协同驱动桩间高剪切区形成;井字型桩群体系中,“遮蔽效应”、“侧向增强效应”与“挤压马蹄涡效应”多维度耦合,塑造复合冲刷形态。研究表明,桩群空间约束通过重构流场能量分布路径,形成差异化的冲刷控制机理。

6 结 论

本文在明渠水槽中开展了双桩串联、双桩并联、四桩井字和双桩斜置的桥墩局部冲刷试验,采用 Flow-3D 软件分析了各工况桥墩周围流场特征,基于双目视觉测量方法实现了冲刷区域三维地形的重构。定量分析了不同桩群布置、不同桩心距、不同入流角度对桥墩局部冲刷的影响,以期为桥桩局部冲刷设计提供参考,具体结论如下:

1)群桩布置形式对桩周流场的影响主要体现在并排桩间的“挤压马蹄涡流效应”、上下游桩间的“遮蔽效应”和“增强效应”。这些效应的强弱与桩心距呈反比关系,具体表现为:桩心距越小,流场的复杂性越高,局部流速和冲刷作用越显著。

2)桩群冲刷坑的特征受流场效应差异影响显著。串联桩群中,上游桩因“增强效应”导致桩后冲刷深度较浅,且下游桩受“遮蔽效应”影响,桩前冲刷深度也较浅;并联桩群中,左右桩受“马蹄涡挤压效应”影响,冲刷坑呈“8”字型分布,桩间有明显的冲刷痕迹;井字型布置的桩群同时受“遮蔽效应”、“增强效应”和“挤压马蹄涡效应”的影响,展现出串联和并联布置冲刷坑的组合特征。

3)桩心距对群桩局部冲刷的影响显著。桩心距过小会导致群桩的相对桩径增大,进而增加冲刷深度。此外,在较小的桩心距下,随着桩数的增加,冲刷深度也随之增大。在工程实践中,采用多桩布置时应适当增加桩心距,以降低因冲刷引起的失稳风险。

4)当水流以一定角度冲击桥墩时,偏上游的桩产生的冲刷深度与范围均大于偏下游的桩,冲刷坑的整体形态呈现出斜“8”字型分布。当入流角度从 0°变为 90°时,双桩冲刷坑特征从串联形态转换为并联形态。在 25°、50°、75°三个角度中,75°时的冲刷坑的深度为最大,最大深度处于上游桩后。

参考文献

[1]熊文, 蔡春声, 张嵘钊. 桥梁水毁研究综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(11): 10
Xiong Wen, Cai Chunsheng, Zhang Rongzhao. Review of hydraulic bridge failures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(11): 10. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.11.002

[2]门昭宇. 斜交桥墩的局部冲刷试验及数值模拟研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019
Men Zhaoyu. Partial scouring test and numerical simulation of skew piers[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019

[3]孙建江. 基于 GA-MIV-BP 神经网络的桥墩冲刷深度预测[D]. 南昌: 南昌大学, 2022
Sun Jianjiang. Prediction of pier scour depth based on GA-MIV-BP neural network[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022. DOI: 10.27232/d.cnki.gnchu.2022.001411

[4]Abed B S, Majeed H Q. The behavior of scouring around multiple bridge piers having different shapes[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 745(1): 012158

[5]Pandey M, Sharma P K, Ahmad Z, et al. Maximum scour depth around bridge pier in gravel bed streams[J]. Natural Hazards, 2018, 91(2): 819

[6]Jia Y, Altinakar M, Guney M S. Three-dimensional numerical simulations of local scouring around bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Research, 2018, 56(3): 351

[7]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
Zhang Shuguang, Yin Jinbu, Zhang Genguang. Large-eddy simulation on local scour of cylindrical piers based on Flow-3D[J]. Journal of Sediment Research, 2020, 45(1): 67. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2020.01.010

[8]苏洋, 邬洪卫, 吴泽镕, 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
Su Yang, Wu Hongwei, Wu Zerong, 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

[9]Yang Y, Melville B W, Xiong X, et al. Temporal evolution of scour at bridge abutments in compound channels[J]. International Journal of Sediment Research, 2022, 37(5): 662

[10]Xie Y, Melvilleb W, Shamseldin A Y, et al. Smart sediment particle: a novel approach to investigating fluvial bed entrainment using instrumented sensors[J]. International Journal of Sediment Research, 2023, 38(1): 66

[11]陶钢, 赵西增, 侯亚东, 等. 破碎波波陡对单桩基础局部冲刷特性影响研究[C]// 中国海洋学会海洋工程分会. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2024: 229
Tao Gang, Zhao Xizeng, Hou Yadong, et al. Influence of breaking wave steepness on local scour characteristics around monopile foundations [C]// Chinese Society of Oceanography, Ocean Engineering Branch. Qingdao: Ocean University of China Press, 2024: 229. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.039101

[12]陶钢, 赵西增, 侯亚东, 等. 破碎波作用下单桩基础局部冲刷试验研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2024, 39(1): 81

Tao Gang, Zhao Xizeng, Hou Yadong, et al. Experimental study on local scour around monopile foundation in breaking waves[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics: Ser. A, 2024, 39(1): 81. DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2024.01.013

[13] 魏松, 苏陈, 方睿智, 等. 考虑端部形状影响的矩形桥墩局部冲刷试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2024, 47(1): 69
Wei Song, Su Chen, Fang Ruizhi, et al. Experimental study on local scour of rectangular pier considering the influence of end shape [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2024, 47(1): 69

[14] 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

[15] Ataie-Ashtiani B, Aslani-Kordkandi A. Flow field around single and tandem piers[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2013, 90(3): 471

[16] Wang H, Tang H, Liu Q, et al. Local scouring around twin bridge piers in open-channel flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(9): 06016008

[17] Hannah C R. Scour at pile groups: research report No. 28-3[R]. Christchurch: Civil Engineering Department, University of Canterbury, 1978

[18] Beheshti A A, Ataie-Ashtiani B. Experimental study of three-dimensional flow field around a complex bridge pier[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(2): 143

[19] Hamed A M, Peterlein A M, Randle L V. Turbulent boundary layer perturbation by two wall-mounted cylindrical roughness elements arranged in tandem: effects of spacing and height ratio [J]. Physics of Fluids, 2019, 31(6): 065110

[20] Bozkus Z, Özalp M C, Dincer A E. Effect of pier inclination angle on local scour depth around bridge pier groups[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43(10): 5413

[21] Memar S, Zounemat-Kermani M, Beheshti A A, et al. Investigation of local scour around tandem piers for different skewangles[J]. E3S Web of Conferences, 2018, 40: 03008

[22] 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

[23] Lu Y, Liang B, Yin Z, et al. Experimental study on time factor of scour around pile groups[J]. Ocean Engineering, 2022, 261: 112125

[24] Liu M, Tang G, Jin X, et al. Experimental study of local scour around four piles under different attack angles and gap ratios[J]. China Ocean Engineering, 2024, 38(4): 612

[25] Ni X, Xue L, An C. Experimental investigation of scour around circular arrangement pile groups[J]. Ocean Engineering, 2021, 219: 108096

[26] Istiarto I. Flow around a cylinder in a scoured channel bed[D]. Lausanne, Switzerland: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2001

[27] Ettema R. Scour at bridge piers: a report submitted to the National Roads Board[D]. Auckland: ResearchSpace@Auckland, 1980

[28] Wang P, Ji C, Sun X, et al. Development and test of FDEM-FLOW-3D—A CFD-DEM model for the fluid-structure interaction of AccropodeTM blocks under wave loads[J]. Ocean Engineering, 2024, 303: 117735

[29] 斜锦周, 詹懿德, 骆光杰, 等. 基于 Flow 3D 的海上风电单桩基础局部冲刷数值模拟研究[J]. 科技通报, 2021, 37(8): 108
Dou Jinzhou, Zhan Yide, Luo Guangjie, et al. Local scour of single pile foundation of offshore wind power based on Flow 3D numerical simulation[J]. Bulletin of Science and Technology, 2021, 37(8): 108. DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2021.08.019

[30] Sumer B M, Fredsoe J. Wave scour around group of vertical piles [J]. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, 1998, 124(5): 248