

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.087



开放科学(资源服务)标识码OSID:



冲刷成坑条件下砂土中单桩和群桩竖向受荷模型试验研究

奚望¹, 周航¹, 王增亮², 高磊³, 朱道付⁴, 汪磊⁵, 王峙⁶

(1. 重庆大学土木工程学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南湘潭 411201; 3. 河海大学土木工程学院, 南京 210024; 4. 中国十七冶集团有限公司, 安徽马鞍山 243000; 5. 上海工程技术大学城市轨道交通学院, 上海 201620; 6. 重庆高速公路集团有限公司, 重庆 401121)

摘要: 桩基础因其承载能力强、制造与施工方便等特性, 被广泛应用于海工、水工建设, 而这些基础的安全性和稳定性极易受到水流冲刷等自然灾害的威胁。现有桩基规范多关注冲刷对桩基水平承载力的影响, 忽视了冲刷坑的形成对桩周土体应力状态的改变, 无法有效应对桩基在冲刷环境中的设计需求。基于相似理论与量纲分析设计室内模型试验, 采用铝合金管桩与福建标准砂, 结合定制模具制备稳定冲刷坑体, 运用分级加载方法, 探究不同密实度砂土中单桩及群桩在冲刷条件下的竖向承载特性, 并分析桩间距、土体密实度等主要因素的影响。结果表明, 单桩长径比与桩基承载力呈正相关关系; 冲刷作用会削弱桩基竖向承载能力, 归一化 $t-s$ 曲线刚度减小, $P-s$ 曲线屈服点前移; 相对于无冲刷情况, 冲刷成坑条件下单桩和群桩的极限荷载分别可下降约26%和24%。

关键词: 桩基础; 竖向受荷桩; 受荷模型; 冲刷作用; 模型试验

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Experimental study on vertical loading model of single pile and group pile in sandy soil under scouring conditions

XI Wang¹, ZHOU Hang¹, WANG Zengliang², GAO Lei³, ZHU Daofu⁴,
WANG Lei⁵, WANG Zhi⁶

(1. School of Civil Engineering; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, P. R. China; 4. China MCC17 Group Co., Ltd., Ma'anshan 243000, Anhui, P. R. China; 5. School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, P. R. China; 6. Chongqing Expressway Group Co. Ltd., Chongqing 401120, P. R. China)

Abstract: Pile foundations are widely used in marine and hydraulic engineering due to their strong bearing

收稿日期: 2025-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(52278330, 52027812)

作者简介: 奚望(1997-), 男, 主要从事桩基冲刷研究, E-mail: xiw516@qq.com。

周航(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zh4412517@163.com。

Received: 2025-06-01

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52278330, 52027812)

Author brief: XI Wang(1997-), master student, main research interest: scour of pile foundations, E-mail: xiw516@qq.com.

ZHOU Hang(corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zh4412517@163.com.

capacity, ease of manufacturing, and construction. However, the safety and stability of these foundations are vulnerable to natural disasters such as scour. Statistics show that more than half of the bridge water damage accidents in the past were caused by scour. Current pile foundation standards mainly focus on the impact of scour on horizontal bearing capacity, neglecting the change in the stress state of surrounding soil due to the formation of scour holes. Based on similarity theory and dimensional analysis, laboratory model tests were conducted using aluminum alloy pipe piles and Fujian standard sand, with stable scour pits formed by custom-designed molds. The vertical bearing behavior of single piles and pile groups under scour conditions in sands of varying densities was investigated through a step-loading method, analyzing the influence of key factors including pile spacing and soil density. The results show that the pile length-to-diameter ratio is positively correlated with the bearing capacity. Scour weakens the vertical bearing capacity of the pile foundation, with a decrease in the stiffness of the normalized t-z curve and a shift of the yield point on the P-s curve. Compared to the undisturbed condition, the ultimate load of the single pile and pile group under the scoured pit condition can decrease by approximately 26% and 24%, respectively.

Keywords: pile foundation; vertically loaded pile; loading model; scour effect; model test

桩基础因其承载力强、施工便捷且适应性强,在水工和海工建筑中被广泛应用。然而,水下桩基的安全稳定性常受冲刷威胁^[1-2]。冲刷是水流侵蚀导致桩周土体流失的自然过程,会改变桩基受力状态并显著削弱其承载力,成为桥梁破坏的主要诱因之一。冲刷程度受水流泥沙特性,如流速、水深、粒径等,以及结构特征如墩台形状、尺寸、迎水面宽度和水流夹角共同影响。在桥梁水文冲刷分析中,冲刷主要分为3类:一般冲刷,由自然水流侵蚀引起,与桥梁无关;收缩冲刷,因桥梁压缩过水断面导致水流加速、挟沙能力增强而引起;局部冲刷,是结构物直接干扰水流在桩周造成的强烈局部侵蚀^[3-5]。

由于冲刷行为受水流泥沙特性与结构特征等多种因素共同作用,其精确预测存在较大难度^[6-7]。为简化工程分析,实践中通常将总冲刷深度分解为河道收缩冲刷深度与局部冲刷深度两部分进行估算。值得注意的是,桥梁等过水建筑物桩基周围的冲刷坑形态通常呈现非对称性:桥墩上游往往形成深度较大而范围较窄的冲刷坑,下游则形成深度较浅但范围较宽的冲刷坑,整体形态类似马蹄形。针对这一现象,王增亮等^[8]提出了三维非对称局部冲刷坑的简化模型,基于 Boussinesq 点荷载方程推导了土体应力计算方法,并通过有限元模拟验证了其合理性;周航等^[9]则建立了非对称冲刷坑的平面应变简化模型,基于半无限空间中的弗拉曼解,给出了冲刷坑下土体应力分布的解析解。鉴于冲刷对桩基安全构成显著威胁,其导致的竖向承载力衰减已成为近海及河流工程的关键研究课题。早期研究主要聚焦于揭示冲刷影响机制:王成华等^[10]首创三维有限元开挖法模拟桩周土体流失,高效揭示了冲刷前后承载力退化规律,该方法因高效可靠被广

泛沿用;梁锴等^[11]通过改变桥墩支承条件模拟冲空效应,首次建立了基底应力与位移的量化关系。随后,陈鹏等^[12]采用有限差分法分析了边界条件变化对承载力的影响;Liang 等^[13]基于 Abaqus 证实整体冲刷较局部冲刷危害更甚;Yu 等^[14]的群桩试验表明冲刷后荷载重分配遵循“角桩>边桩>中桩”序列;梁发云等^[15-16]通过循环荷载试验揭示了冲刷深度与累积沉降的正相关性。

近年来,冲刷作用对桩基承载性能影响的研究已逐步突破传统单一场分析框架,向多物理场高精度耦合仿真与智能预测模型两大前沿方向深度拓展。多物理场耦合仿真技术通过建立流体-结构-土体跨尺度耦合模型(如非稳态 CFD-DEM 耦合算法、孔隙-管道流固耦合系统),精准刻画了复杂水动力条件下冲刷坑演化与桩-土界面力学响应的动态交互机制^[17-22]。基于深度神经网络(DNN)、长短期记忆网络(LSTM)及物理信息神经网络(PINN)架构,融合现场监测数据、物理模型试验与高维数值模拟结果,构建了冲刷深度-桩基承载力衰减的时变预测模型^[23-27]。

冲刷作用通过土体流失、边界条件改变及桩-土相互作用弱化等复杂机制显著削弱桩基竖向承载力。尽管在揭示冲刷-承载力时变规律上数值模拟与智能预测模型取得进展,在精准捕捉真实冲刷坑形态下的桩-土界面非线性响应、验证数值模型边界条件、为智能算法提供高质量训练/验证数据方面,高精度实体模型试验仍具有不可替代性。因此,开展系统的冲刷成坑条件下桩基竖向承载特性室内模型试验至关重要。基于此,笔者针对冲刷成坑条件,开展单桩与群桩的竖向承载力特性模型试验,重点分析冲刷参数对荷载-沉降曲线及荷载传递机

制(t - z 曲线)的影响。

1 试验设计

1.1 量纲分析与相似判据的确定

为确保试验模型与原型之间具有相同的力学表现,还需根据相似理论的三大定理(正定理、 π 定理、逆定理)来对模型试验的几何条件、力学条件、运动条件等进行约束,并通过量纲分析确定合理的相似比及无量纲参数^[28-29]。

图1和图2为单桩和群桩的冲刷坑示意图及相关尺寸,冲刷坑体的几何参数的设计参考单、群桩冲刷试验^[30]。由桩土相互作用原理可知,桩体的竖向应力 σ 、位移 s 、桩侧剪应力 τ 主要与桩顶荷载 P 、桩的直径 d 、桩体的入土深度 L_e 、桩的弹性模量 E_p 、桩周土体的弹性模量 E_s 、桩周土体的有效重度 γ' 及有效内摩擦角 φ' 等因素有关。对于冲刷条件下的竖向受荷单桩需考虑冲刷坑体的冲刷坡脚 β 、冲刷深度 S_d 、冲刷底宽 S_{wb} 、冲刷顶宽 S_{wt} 等几何参数。基于 π 定理,表1为实际工程与模型试验比例换算。

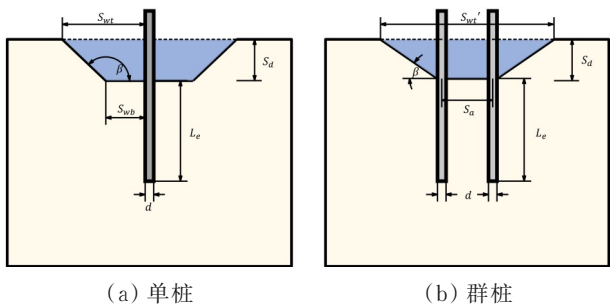


图1 冲刷模型剖面图
Fig. 1 Scour model cross-section

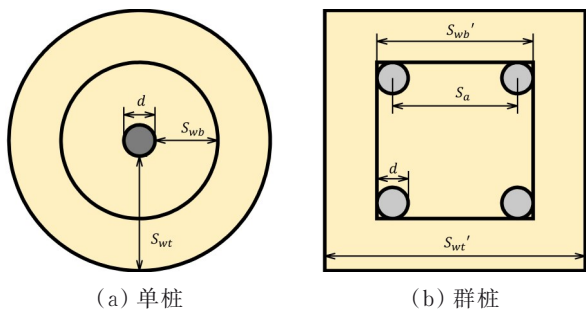


图2 冲刷模型截面图
Fig. 2 Scour model section view

1.2 试验材料参数

试验模型桩采用型号6061铝合金管进行模拟,其基本的物理参数如表2所示。试验采用的桩为刚性桩,在试验进行之前,通过对桩的表面进行打磨处理,增加桩的表面粗糙度,符合模型试验要求的界面相似性处理。

表1 实际工程与模型试验比例换算
Table 1 Conversion of actual engineering to model test scale

量纲类型	物理量	量纲	原型与模型比
几何条件	长度	L	30:1
	面积	L^2	30 ² :1
	孔隙比	-	1:1
	含水量	-	1:1
力学条件	质量	M	30 ³ :1
	密度	ML^{-3}	1:1
	重度	$ML^{-2}T^{-2}$	30:1
	内摩擦角	-	1:1
	荷载	MLT^{-2}	30 ² :1
	轴力	MLT^{-2}	30 ² :1
运动条件	应力	MLT^{-2}	1:1
	时间	T	-
	应变	-	1:1

表2 模型桩材基本物理参数
Table 2 Basic physical parameters of model pile material

泊松比 ν	弹性模量 E_p	极限抗拉强度 σ_{ut}/MPa	拉伸屈服强度 σ_{ys}/MPa	疲劳强度 σ_f/MPa	延伸率 ϵ_f
0.33	68.9	124	55.2	62.1	25.0%

对于砂土地基,其渗透系数比较大,在外部荷载作用下,单桩及群桩基础桩周土体处于完全排水状态,因此试验均在干砂地基中开展。试验所采用的砂土为福建标准砂,在正式试验之前还应对标准砂取样进行土的物理参数进行测定,具体的试验方法参考土工试验规范,结果如表3所示。根据颗粒筛分试验测得本试验用土的主要粒径范围大概在0.8~2 mm之间,平均粒径 $d_{50}=0.75$,绘制颗粒级配曲线如图3所示。利用比重瓶法测得试验用土的比重为 $G_s=2.72$ 。采用手动式相对密度仪测得试验用砂最大干密度 $\rho_{d_{max}}=1.87\text{g}/\text{cm}^3$,最小干密度 $\rho_{d_{min}}=1.58\text{g}/\text{cm}^3$ 。根据直接剪切试验测得标准干砂状态下的内摩擦角为 32° ,通过休止角测试仪测得砂的休止角为 36° 。

表3 福建标准砂基本物理指标
Table 3 Basic physical properties of Fujian standard sand

平均粒径 d_{50}/mm	不均匀系数 C_u	最大干密度 $\rho_{d_{max}}/(\text{g}/\text{cm}^3)$	最大干密度 $\rho_{d_{min}}/(\text{g}/\text{cm}^3)$	比重 G_s
0.75	1.29	1.87	1.58	2.72

1.3 模型箱布置

考虑到试验用砂成本较高且工况数量较多,采用一个高800 mm、内径800 mm的不锈钢圆筒作为模型箱进行试验。在节省成本的同时,为了避免模型箱壁面对试验模型桩产生“边界效应”以影响试验结果的准确性和有效性,综合考虑以往桩基模型

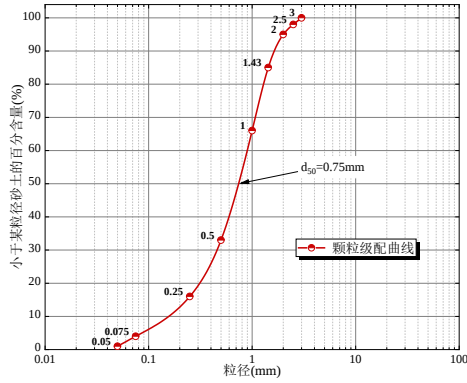


图3 颗粒级配曲线

Fig. 3 Grain size distribution curve of standard sand

试验的研究^[28]及 API 规范所提及的边界效应范围, 竖向荷载作用下的桩对桩周 8 倍桩径范围内的土体产生边界效应影响, 因此模型桩与模型箱侧壁、底面之间的距离设置应超过这个范围。模型箱平面布置图如图 4 所示, 图 5 为模型箱正面示意图。

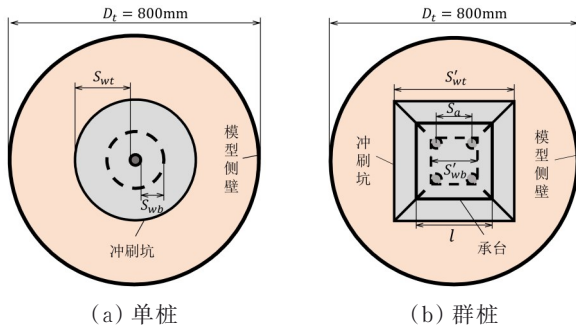


图4 模型箱平面布置图

Fig. 4 Schematic layout of the model box

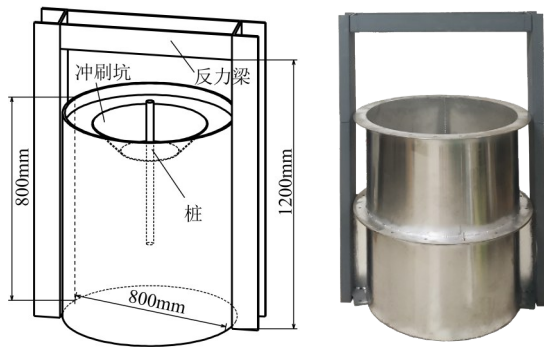


图5 模型箱正面示意图

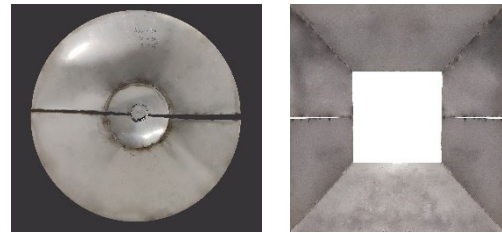
Fig. 5 Front schematic of the model box

1.4 冲刷坑体制备方案及群桩承台设计

在填土达到目标入土深度之前, 应预留一定的空间安装冲刷坑体制模工具, 制模工具如图 6 所示。坑体制模工具安装完成后, 仔细对坑体边缘进行灌砂, 以保证拆模后坑体的完整性, 然后继续填筑砂土直至试验所要求的入土深度。最后刮平地基土表面, 地基土静置 24 h 稳定以后再挖去坑体土。由

于试验冲刷坑体的最大坡角小于砂土的天然休止角, 因此, 坑体在拆模以后, 土体依然也能保留原形状。

与单桩基础不同的是, 群桩基础周围的冲刷坑形态不仅与水流条件、河床泥沙、桩截面等因素有关, 还与群桩的排布方式有关。Amini 等^[31]通过模型槽试验研究了不同的排布方式对群桩冲刷坑体参数的影响, 指出群桩桩周冲刷坑体可简化为倒置的四棱台体, 如图 6(b) 所示。群桩冲刷坑体的主要几何参数可由冲刷坡角 β 、冲刷深度 S_d 、冲刷坑底部宽度即桩间距 S_d 以及顶部宽度 S_{wt}' 等指标来表征。



(a) 单桩

(b) 群桩

图6 坑体模具示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the pit mold

为保证承台的强度, 承台以实心亚克力为原材料, 利用 3D 打印技术在待拼接表面桩槽进行开孔处理, 使承台桩孔内径与桩外径完全贴合以及各孔深相一致, 以避免桩与承台拼接时, 出现过松过紧或长短不一的情况, 如图 7 所示。经过实际检查, 亚克力承台与四根铝管桩拼和效果较为紧实, 且在竖向静压的过程中未发生变形、错动等, 为了便于桩体拆卸重复试验, 无需再对拼接好的群桩进行额外的处理, 即可满足试验加载要求。群桩承台设计参数如表 4 所示, 试验设计中, 按照设计的桩埋深承台在加载全程始终保持悬空, 与地表无物理接触, 从而消除了承台-地基相互作用对群桩承载性能评估的影响, 使试验更侧重于分析桩-土相互作用的本质规律, 故本试验不考虑承台效应。

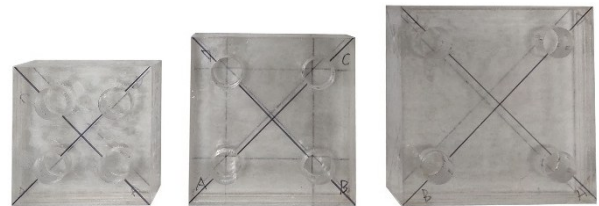


图7 模型群桩承台实物图

Fig. 7 Photograph of pile group cap slab

1.5 加载装置及数据采集

作动器调节至力控模式采取分级加载的方式对桩施加载荷, 即慢速维持载荷法, 力控原理见图

表 4 承台参数表

Table 4 Pile group cap slab parameter

序号	桩间距/ mm	承台尺寸/mm			质量/g	桩槽内 径/mm	桩槽孔 深/mm
		长	宽	高			
1	60 (2d)	130	130	60	1 073	30	30
2	60 (2d)	160	160	60	1 616	30	30
3	120 (4d)	190	190	60	2 427	30	30

8. 根据桩基的极限承载力来划分分级荷载的大小,试验地基土主要涉及3种密实度,还需要分别对这3种密实度状态下的砂土进行桩基加载的预实验。通过预试验确定:相对密实度为30%的砂土每一级荷载施加50N,相对密实度60%及90%的砂土每一级施加荷载100N。经实际观测:在承载极限状态范围内,对于密实度为30%的砂土,每级荷载加载5 min后,沉降变化基本趋于稳定,可记录该点数据;对于相对密实度为60%的砂土,每级荷载加载3 min后,沉降保持稳定,可记录该点数据;对于相对密实度为90%的砂土,每级荷载加载2 min后,沉降基本保持不变,可记录该点数据。

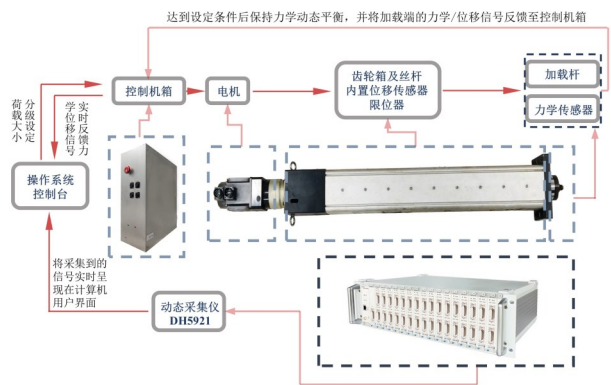


图 8 动力加载设备简图

Fig. 8 Schematic diagram of dynamic loading equipment

加载过程的终止加载条件:1)当施加至某一级荷载时,其沉降始终无法保持稳定且一直处于增长态势,或者位移能保持稳定,但是连续3次超过正常承载状态下位移稳定所需时间2倍以上;2)当施加至某一荷载时,其荷载始终无法达到预期加载的数值,但达到预期荷载的时间连续3次超过正常加载时间的2倍。整个试验的流程如图9所示。

2 试验结果分析

2.1 单桩荷载-沉降曲线分析

试验过程中,考虑无冲刷的1组工况以及冲刷条件下不同密实度、长径比、冲刷坡角、冲刷底宽、冲刷深度的各3组冲刷工况,当分析某一参数的影响时,将其余参数值固定。取砂土相对密实度为30%、60%的荷载-沉降曲线中拐点所对应的极限

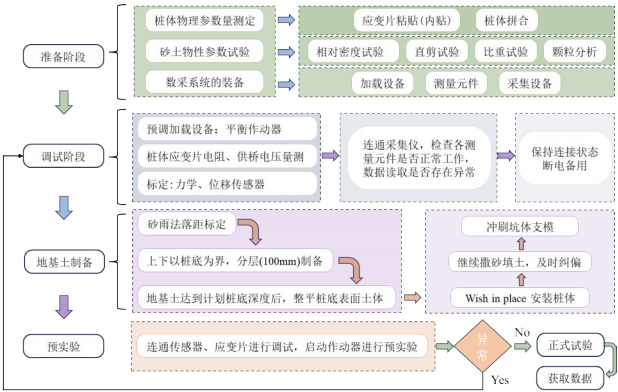


图 9 试验实施流程图

Fig. 9 Experimental implementation flowchart

荷载对陡降型荷载-沉降曲线进行分析,取砂土相对密实度为90%的荷载-沉降曲线中沉降达0.1d时所对应的荷载对缓降型荷载-沉降曲线进行分析。

图10(a)为冲刷前、后荷载-沉降曲线的对比,可以看出,冲刷坑显著削弱了桩基承载力。在冲刷底宽、深度均为2d且坡角23°的工况下(其他参数不变),极限荷载较无冲刷工况降低了约33%,曲线拐点对应的荷载值从398N下降至306N。承载力显著下降主要源于冲刷坑的双重削弱效应:一方面,冲刷移除了桩周土体,导致桩-土有效接触面积减少,直接削弱了桩侧摩阻力;另一方面,冲刷移除上覆土体,导致坑底附近土体的竖向有效应力降低,进而削弱了桩端土体的承载能力,降低了桩端阻力。因此,冲刷后桩基承载力的下降是桩侧摩阻力与桩端阻力共同衰减的结果。

图10(b)反映了在冲刷条件下桩基荷载-沉降曲线随密实度的变化。冲刷条件下,砂土密实度对荷载-沉降特性影响显著。在相对密实度30%(松散)和60%(中密)砂土中,荷载-沉降曲线均呈现明显拐点,对应的临界荷载分别为306N和400N,表明临界荷载随密实度增加而提高。当密实度增至90%(密实)时,曲线拐点消失,呈现应变硬化特征,桩基极限承载力随沉降持续增长。相较于松散砂土,中密与密实砂土中的桩基极限荷载分别提升了80%和260%。

图10(c)反映了冲刷条件下不同长径比对桩基荷载-沉降规律的影响。由图10(c)可见,长径比越大,桩基所能承受的极限荷载也越大,荷载-沉降曲线随沉降增大其曲线刚度的变化减缓。当沉降达0.1d时,与 $L_e/d=12$ 相比, $L_e/d=14$ 、 $L_e/d=16$ 的桩基所能承受的荷载分别增加了13%和22%。造成这一现象的原因也主要有两个方面,一方面是桩基入土深度的增加会加大桩身与桩周土体的接触面积,使得侧阻力发挥更加充分;另一方面,较长

的桩长因其所能达到的土体深度也越深,从而改变了土体有效重度的计算深度,在一定程度上也增加了桩端对荷载承担的贡献。

冲刷底宽、坡角及深度的改变对桩基荷载-沉降的影响如图 10(d)~图 10(f)所示。结果表明:三者

均削弱桩基竖向承载性能,但程度各异。冲刷深度增加影响最为显著,导致承载力明显衰减、沉降曲线整体下移。相较而言,冲刷底宽与坡角的变化影响相对缓和,主要表现为初始刚度及沉降增长速率的局部调整。

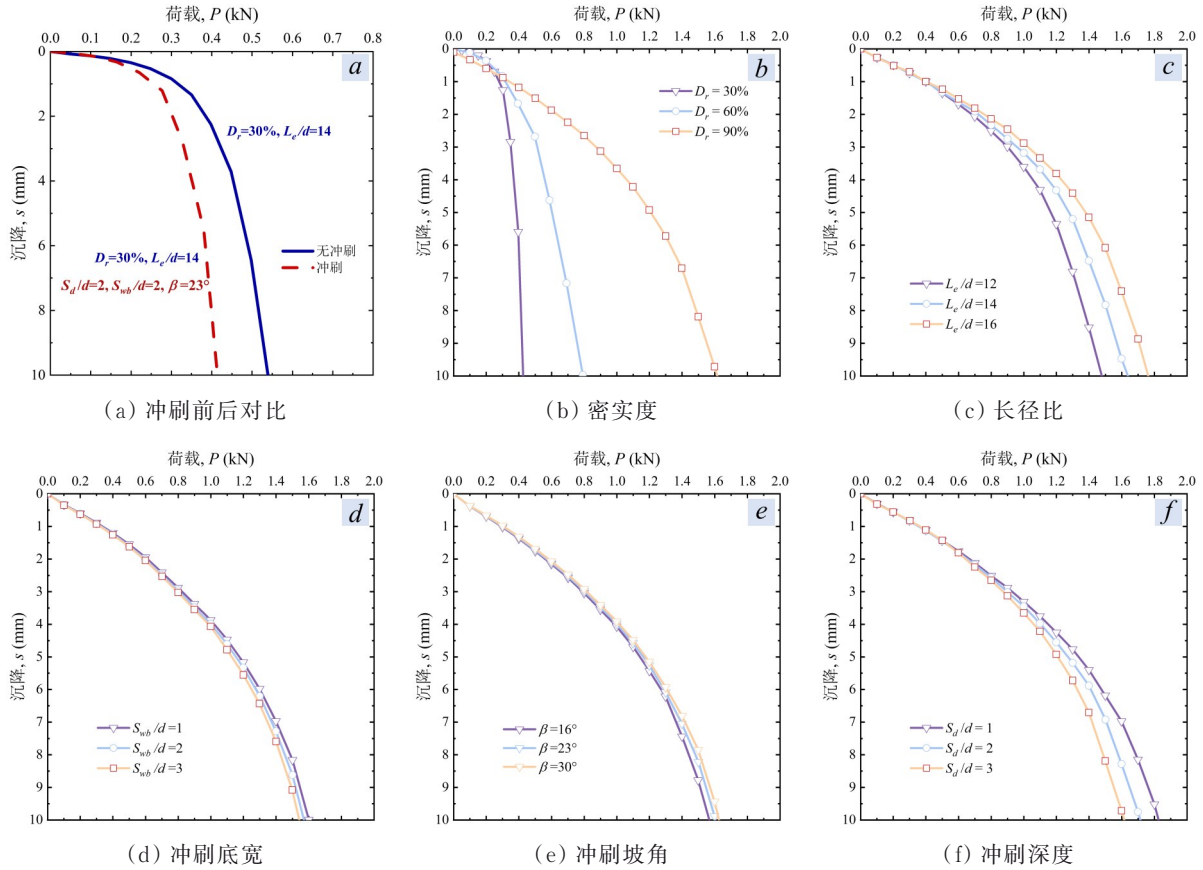


图 10 单桩桩顶荷载-沉降曲线

Fig. 10 Load-settlement curves at single pile head

为定量表征其影响规律,在沉降达到 $0.1d$ 时,分析各组冲刷参数下的荷载变化可得:冲刷底宽由 $S_{wb}/d=1$ 增加至 $S_{wb}/d=2$ 和 $S_{wb}/d=3$ 时,荷载分别降低了4%和6%;当冲刷坡角由 $\beta=16^\circ$ 增加至 $\beta=23^\circ$ 、 $\beta=30^\circ$ 时,荷载分别下降了3%和5%;当冲刷深度由 $S_d/d=1$ 增加至 $S_d/d=2$ 和 $S_d/d=3$ 时,所对应的荷载分别降低了13%和26%。

上述变化规律反映了不同冲刷坑几何特征对桩基荷载传递路径的调节作用。冲刷底宽与冲刷坡角主要通过控制冲刷体积影响坑体边界的应力释放区域,从而对桩周浅层土体有效应力产生一定改变,但由于桩体依然与原状土保持大部分接触,其承载力的主要贡献源并未发生根本改变。相比之下,冲刷深度的增加直接削弱了桩-土接触长度,降低了侧摩阻贡献,且下部坑底有效应力的下降也抑制了桩端阻力的发展,从而造成承载能力明显下降。

2.2 群桩荷载-沉降曲线及群桩效应

图 11 系统展示了冲刷前后及不同参数条件下 2×2 群桩体系在竖向荷载作用下的荷载-沉降($P-s$)响应特征。总体来看,群桩体系的 $P-s$ 曲线主要表现为无明显峰值的渐进式缓降型,但在部分松散或中密条件下亦存在拐点,曲线形态呈现“陡降-平缓”的过渡特征。随着荷载增加,体系刚度逐步退化,尤其在临近极限荷载阶段,沉降增速加快、刚度急剧降低,表现出明显的非线性软化特征;而在相对密实度较高的砂土中,曲线表现为持续缓降型,沉降发展更加稳定。为合理评估不同条件下 2×2 群桩承载力的规律,综合考虑曲线形态差异性:对于存在拐点的破坏模式,选取拐点对应荷载作为承载力判据;对于缓变型曲线,则采用沉降达 $0.1d$ 所对应的荷载作为参考承载力指标。

图 11(a)为冲刷对裙装竖向承载性能的影响。图 11(a)表明,冲刷显著削弱了 2×2 群桩基础的竖

向承载性能。冲刷后,相同沉降(如 3 mm)对应的荷载值下降(从约 1.7 kN 降至 1.3 kN,降幅约 23%),且体系表现出更快的刚度衰减,中高荷载阶段沉降增长更快(例如,某荷载下冲刷后沉降 9.82 mm 远高于冲刷前的 4.92 mm)。

图 11(b)表明砂土相对密实度对 2×2 群桩基础竖向承载性能有显著影响。密实度从 30% 增至 90%,极限荷载大幅提升(1.1、2.7、6.8 kN)。密实度越低, P - s 曲线越陡峭,呈“拐点型”破坏;密实度越高,曲线越平缓,刚度更高,沉降发展更稳定(例如 1 kN 荷载作用下,密实度 30% 沉降近 9.5 mm,而 90% 不足 1 mm)。这归因于高密实度下砂土颗粒排列致密、骨架稳定,增大了摩阻力与接触面积,提升了桩侧阻与端阻效率及整体抗沉降性能。

图 11(c)表明砂土相对密实度对 2×2 群桩基础竖向承载性能有显著影响。密实度从 30% 增至 90%,极限荷载大幅提升(1.1、2.7、6.8 kN)。密实

度越低, P - s 曲线越陡峭,呈“拐点型”破坏;密实度越高,曲线越平缓,刚度更高,沉降发展更稳定。这归因于高密实度下砂土颗粒排列致密、骨架稳定,增大了摩阻力与接触面积,提升了桩侧阻与端阻效率及整体抗沉降性能。

图 11(d)展示了不同桩间距条件下 2×2 群桩荷载-沉降(P - s)曲线的演化特征。结果表明,随着桩间距 S_d/d 的增大, 2×2 群桩基础的竖向承载能力持续增强,曲线在相同沉降下整体向荷载较大值方向偏移,曲线刚度表现出逐渐增强的趋势。

图 11(e)与图 11(f)分别展示了冲刷坡角和冲刷深度对 2×2 群桩基础荷载-沉降响应规律的影响。总体而言,冲刷坑几何参数变化对群桩基础承载力的影响存在显著差异,其中冲刷坡角对曲线影响较小,而冲刷深度的增加则引起了较为明显的性能退化。

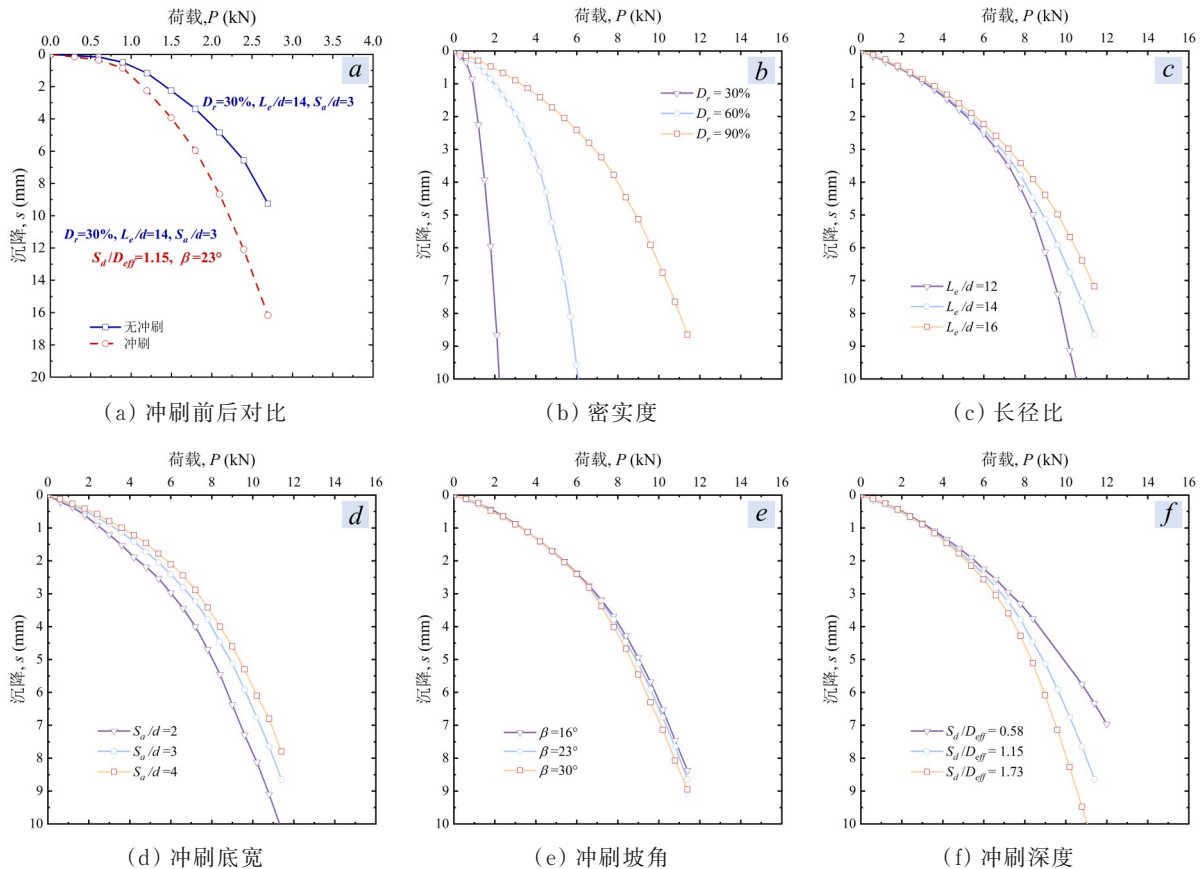


图 11 群桩桩顶荷载-沉降曲线

Fig. 11 Load-settlement curve at the pile top of pile groups

2.3 单桩荷载传递 t - z 曲线分析

图 12 为各试验工况得到的归一化 t - z 曲线,桩侧剪应力通过 τ_{max} 进行归一化,桩侧剪切位移通过桩径 d 进行归一化。

图 12(a)为冲刷前后归一化 t - z 曲线的对比,由

于冲刷坑的存在, t - z 曲线的削弱较为明显,曲线刚度随着剪切位移的增加差异逐渐扩大。冲刷坑对 t - z 曲线的影响主要是因为冲刷后桩身所能提供的剪应力减少,且由于承载能力降低,同等大小的载荷却造成了更大剪切位移。

图 12(b)为砂土密实度对归一化 $t-z$ 曲线的影响。图 12(b)表明,随砂土密实度增加,归一化 $t-z$ 曲线呈现规律变化:松散砂土初始刚度(曲线起始斜率)更高,剪应力增长更快,但更早达到极限状态(约 0.65)并趋于平缓;高密实度砂土初始刚度较低,但剪应力持续上升,极限值显著提高(可达 0.98),刚度退化延迟。这源于松散砂土颗粒易重排导致快速软化,而密实砂土骨架稳固、抗剪性能持续增强。

图 12(c)为长径比对归一化 $t-z$ 曲线的影响。图 12(c)表明,增大桩长径比显著提升冲刷后归一化 $t-z$ 曲线的初始刚度,长径比越大,剪应力达到极限值所需位移越小。这表明更大的埋深增强了桩-土界面剪切面积和约束力,提高了荷载传递效率与剪应力发挥速率。冲刷导致入土深度减少将显著削弱此能力。

图 12(d)和(e)分别展示了冲刷底宽、冲刷坡角对归一化 $t-z$ 曲线的影响,两者对 $t-z$ 曲线影响都不显著,尤其是冲刷底宽,在不同冲刷底宽的坑体作用下,基本没有改变 $t-z$ 曲线的线形,且曲线大体重合。而冲刷坡角的改变对归一化 $t-z$ 曲线的影响要明显一些,表现为随冲刷坡角的增大,其曲线初始刚度削减。这也表明冲刷底宽和冲刷坡角的改变对桩侧剪应力的影响不大。

图 12(f)为冲刷深度对单桩荷载传递 $t-z$ 曲线的影响。图 12(f)表明,冲刷深度增加显著削弱归一化 $t-z$ 曲线:初始刚度降低,且刚度削减趋势贯穿加载全程。这直接源于桩土接触面积减少,导致桩侧可提供的剪应力整体下降。不同的冲刷条件,桩基试验 $t-z$ 曲线有着不同程度的变化,其中影响较大的是土体的密实程度、桩的长径比、冲刷坑的冲刷深度,然而冲刷底宽和冲刷坡角对 $t-z$ 曲线影响较小。

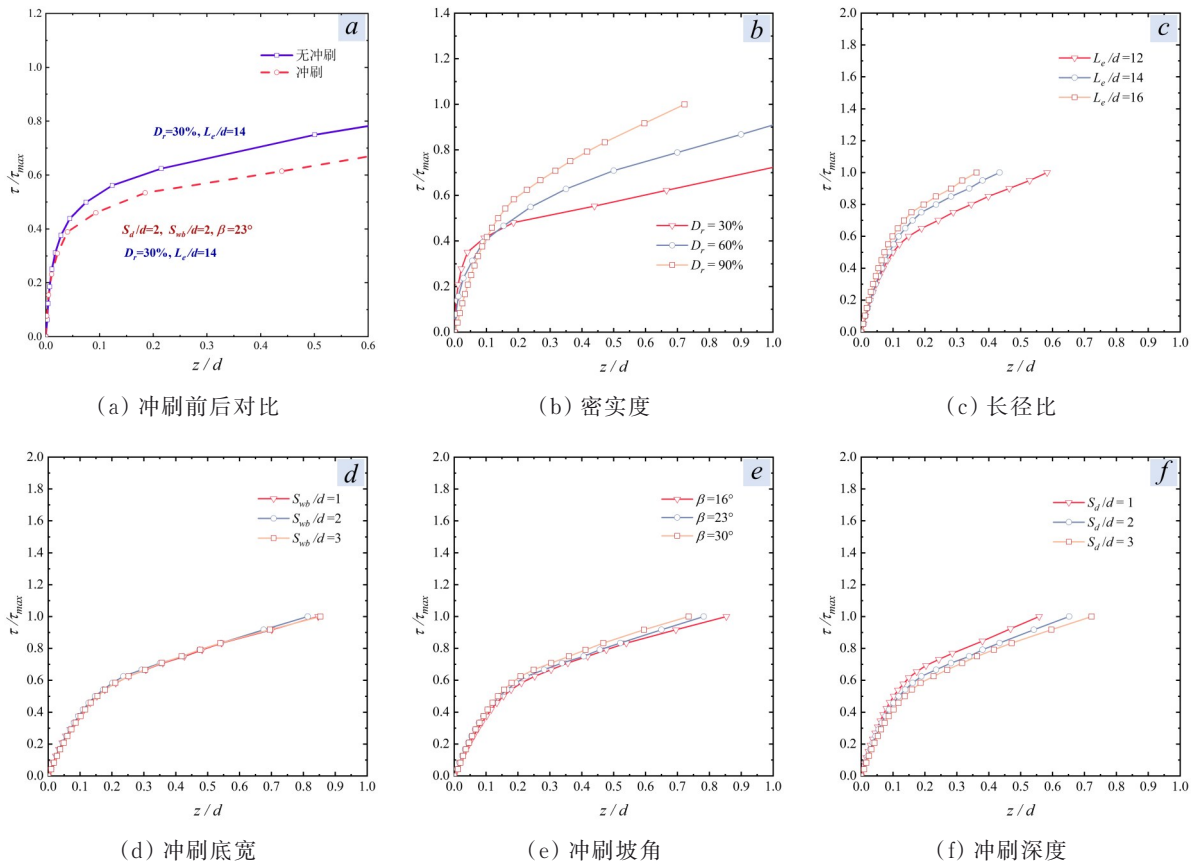


图 12 单桩荷载传递 $t-z$ 曲线分析

Fig. 12 $t-z$ curves for single pile load transfer

2.4 群桩荷载传递 $t-z$ 曲线分析

图 13 为不同冲刷条件下群桩荷载传递 $t-z$ 曲线。不同的冲刷条件, 2×2 群桩的试验 $t-z$ 曲线有着不同程度的变化,其中影响较大的参数是土体的相对密实程度、桩的长径比、桩间距、冲刷坑的冲刷深度,然而冲刷坡角对 $t-z$ 曲线影响较小,这一规律

与总荷载-沉降曲线类似,也进一步说明 $t-z$ 曲线能较好表达桩顶荷载由桩侧剪应力向桩周土体传递的规律,以此预测桩基的非线性沉降。

图 13(a)为冲刷对群桩单桩影响 $t-z$ 曲线。冲刷显著削弱群桩内单桩的桩-土界面剪应力传递。冲刷前后曲线在初始位移阶段($z/d < 0.01$)刚度相

近,但位移增大后冲刷曲线明显下移且发展滞缓,表明荷载传递效率降低,在 $z/d=0.05$ 处,冲刷前剪应力达0.8,冲刷后仅约0.6(降幅 $>25\%$)。主因是冲刷导致桩周有效嵌固深度减小、土体结构性劣化,叠加松砂($Dr=30\%$)易软化特性,共同引发界面剪切强度衰减与提前屈服。

图13(b)为砂土密实度对群桩中单桩 $t-z$ 曲线的影响。砂土密实度显著调控桩-土界面性能:密实度增加提升曲线整体刚度与极限剪应力。松砂($Dr=30\%$)剪应力增长快但软化早,密实砂($Dr=90\%$)因颗粒咬合紧密而侧阻发挥充分。群桩中单桩剪应力始终高于同条件独立单桩,揭示密实砂中群桩效应呈侧阻增强特征。

图13(c)为长径比的影响,长径比增大明显改善荷载传递性能,表现为 $t-z$ 曲线斜率与极限剪应力同步提升(如 $z/d=0.03$ 处 $\tau/\tau_{\max}$ 随长径比增至0.98)。桩长增加扩展了有效嵌固深度与侧阻发挥区。群桩中单桩剪应力全程高于独立单桩,证实群桩体系对剪应力传递具正向增益。

图13(d)为桩间距对群桩中单桩的荷载传递 $t-z$ 曲线影响。桩间距增大持续改善群桩中单桩的桩-

土界面性能, $t-z$ 曲线刚度及对应的极限剪应力随之提升,最大提升幅度达约9.5%。较大的桩间距有效减弱了桩间应力场的重叠程度和土体扰动,从而优化了荷载传递条件;反之,较小桩间距则因形成显著的“剪应力干扰区”,削弱了界面有效剪应力的传递能力,导致性能受限。

图13(e)为冲刷坡角的影响分析,冲刷坡角变化对归一化 $t-z$ 曲线的影响非常有限。不同坡角下的曲线在整体形态与发展趋势上高度相似,近乎重合。这是因为坡角改变主要影响冲刷坑的水平几何轮廓,而对桩身所在关键区域的竖向有效深度及剪应力传递路径影响甚微,特别是在坑深不变的情况下。

图13(f)为冲刷深度的影响分析,冲刷深度增加显著削弱群桩中单桩的桩-土相互作用性能。表现为 $t-z$ 曲线刚度下降、极限剪应力降低。曲线形态趋于“平缓型”,荷载传递范围缩小,剪应力发挥滞后。主因是冲刷导致有效桩-土接触范围缩减、坑底土体结构性削弱及竖向有效应力下降,限制了剪应力发展。

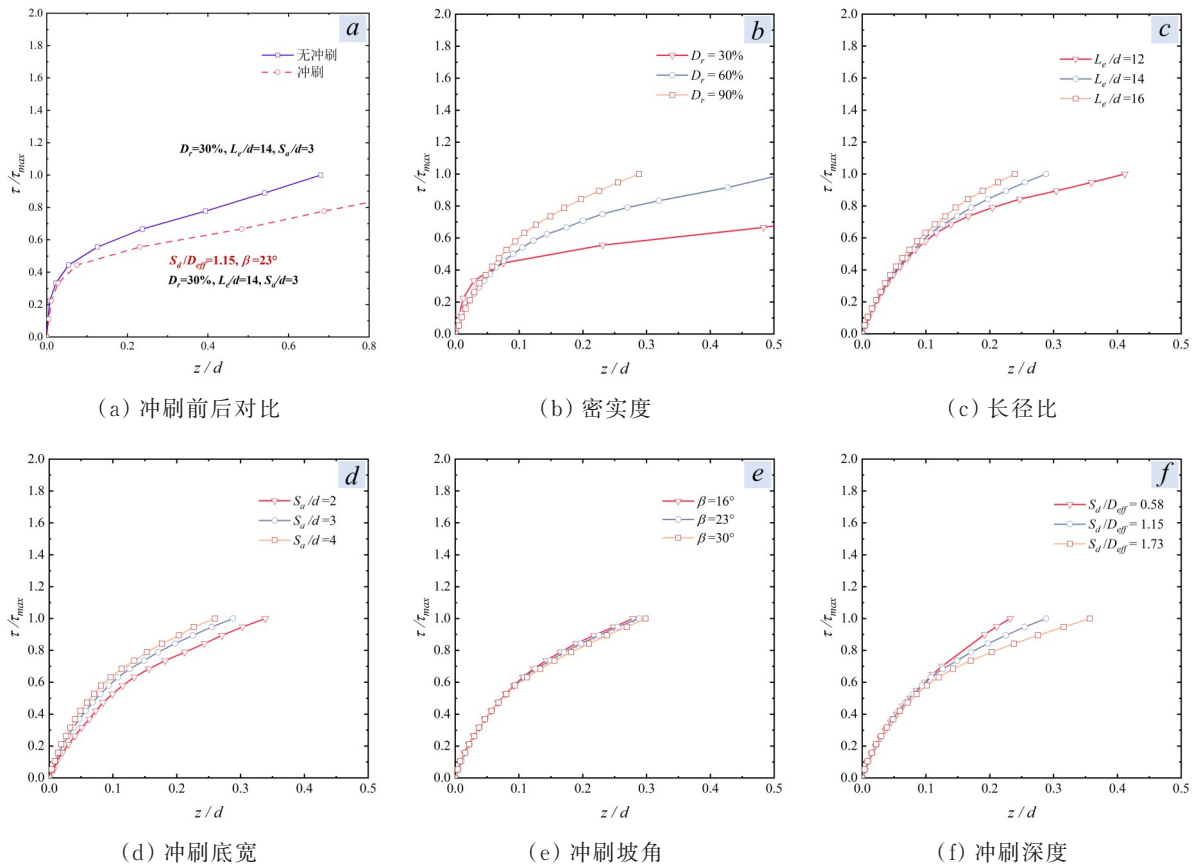


图13 群桩荷载传递 $t-z$ 曲线分析

Fig. 13 $t-z$ curves for group pile load transfer

3 结论

通过室内模型试验系统研究了冲刷成坑条件下砂土中单桩及群桩基础的竖向承载特性。基于相似理论设计试验方案,采用几何相似比 30:1 的铝合金模型桩和福建标准砂地基,严格控制模型箱边界效应与承台悬空条件。通过调控冲刷坑几何形态(底宽、坡角、深度)、砂土密实度、桩基尺寸(长径比)及群桩排布(桩间距)等关键参数,系统分析了荷载-沉降($P-s$)曲线与荷载传递($t-z$)曲线的演化规律。主要结论如下:

1)冲刷作用显著削弱桩基承载性能,冲刷坑形成导致桩-土接触面积减小,破坏桩侧摩阻力与桩端阻力的协同工作机制。单桩与群桩均表现出承载力显著降低、 $P-s$ 曲线屈服点前移、归一化 $t-z$ 曲线刚度退化的特征。试验表明,冲刷引起的桩周土体应力重分布是承载性能劣化的根本原因

2)土体参数与桩体尺寸主导承载力响应,砂土密实度增加可大幅提升桩基极限承载力并改善荷载传递效率,其机制在于密实砂土骨架稳定性增强及桩-土界面摩擦效应优化;增大桩长径比通过增加有效嵌固深度和桩端阻力贡献,显著延缓沉降发展,该效应在高密度土体中尤为突出。

3)冲刷深度为最敏感控制参数,相较于冲刷底宽与坡角,冲刷深度增加对承载力削弱作用最为显著。其通过双重路径影响承载机制:直接减少有效桩长导致侧摩阻力损失,同时降低冲刷坑底部土体竖向有效应力,抑制桩端阻力发挥。试验证实该参数对 $t-z$ 曲线刚度退化的贡献率远高于其他冲刷几何参数。

4)群桩承载特性受桩间距与冲刷深度协同调控,增大桩间距可有效缓解桩-土应力重叠效应,提升群桩整体承载力及单桩荷载传递效率;冲刷深度增加则加剧群桩体系沉降,并导致群桩内荷载重分布特征改变。在低密实度砂土中,冲刷深度增加与桩间距减小的组合效应将引发更为显著的承载力劣化。

参考文献

- [1] DIAZ E E M, MORENO F N, MOHAMMADI J. Investigation of common causes of bridge collapse in Colombia [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2009, 14(4): 194-200.
- [2] 刘碧容. 尼伯特台风引起桥涵水毁调查及计算分析[J]. 福建交通科技, 2017(1): 70-73.
- LIU B R. Investigation and calculation analysis of bridge and culvert water damage caused by typhoon Niebert [J].

Fujian Transportation Science & Technology, 2017(1): 70-73. (in Chinese)

- [3] BRIAUD J L, TING F C K, CHEN H C, et al. SRI-COS: Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(4): 237-246.
- [4] LIN C, HAN J, BENNETT C, et al. Analysis of laterally loaded piles in sand considering scour hole dimensions [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(6): 04014024.
- [5] LIN C, HAN J, BENNETT C, et al. Analysis of laterally loaded piles in soft clay considering scour-hole dimensions [J]. Ocean Engineering, 2016, 111: 461-470.
- [6] LAI Y G, LIU X F, BOMBARDELLI F A, et al. Three-dimensional numerical modeling of local scour: A state-of-the-art review and perspective [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 148(11): 03122002.
- [7] NIMBALKAR P, RATHOD P, MANEKAR V, et al. Scour model for circular compound bridge pier [J]. Water Supply, 2022, 22(5): 5111-5125.
- [8] 王增亮, 周航, 丁选明, 等. 桩基三维非对称局部冲刷坑条件下土体应力计算简化模型[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(5): 45-57.
- WANG Z L, ZHOU H, DING X M, et al. Simplified model of soil stress calculation under the condition of three-dimensional asymmetrical local scour hole of pile foundation [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(5): 45-57. (in Chinese)
- [9] 周航, 王增亮, 刘汉龙, 等. 桩基非对称局部冲刷条件下土体应力变化解析解[J]. 中国公路学报, 2021, 34(11): 72-82.
- ZHOU H, WANG Z L, LIU H L, et al. Analytical solution of soil stress variation under condition of asymmetric local scour of pile foundation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(11): 72-82. (in Chinese)
- [10] 王成华, 高江林, 高文梅. 群桩在水流冲刷影响下的承载性状研究[J]. 低温建筑技术, 2006, 28(3): 60-63.
- WANG C H, GAO J L, GAO W M. A study of load-bearing of pile groups due to current scour [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2006, 28(3): 60-63. (in Chinese)
- [11] 梁锴, 方理刚, 段靛靛. 冲刷对桥墩稳定性影响的有限元分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1643-1645.
- LIANG K, FANG L G, DUAN L L. Finite element analysis of influence of scour on stability of piers [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1643-1645. (in Chinese)
- [12] 陈鹏, 李文华, 范涛, 等. 土体冲刷对桥梁桩基影响的三维差分模拟计算分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2007, 26(4): 23-26.

- CHEN P, LI W H, FAN T, et al. Effect of river brush on bridge pile foundation with 3-D difference simulation [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2007, 26(4): 23-26. (in Chinese)
- [13] LIANG F Y, WANG Y Q, HAN J. Numerical analysis of scouring effects on the behavior of pile foundations with the Mohr-Coulomb model [C]// GeoHunan International Conference, 2011: 82-87.
- [14] YU Q Q, GONG W M. Test research on the influence of pile group vertical bearing characteristic due to water scouring [C]// 2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering, 22-24 April, 2011.
- [15] 梁发云, 李彦初, 陈海兵. 冲刷作用下单桩循环加载特性的模型试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(10): 1511-1515, 1522.
- LIANG F Y, LI Y C, CHEN H B. Influence of scour depth on vertically cyclic behaviors of single pile with model tests [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(10): 1511-1515, 1522. (in Chinese)
- [16] 李彦初, 梁发云. 考虑土体冲刷应力历史的单桩承载性状分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(6): 1624-1629.
- LI Y C, LIANG F Y. Numerical simulation of bearing behaviors of single pile under scouring conditions considering soil stress history [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(6): 1624-1629. (in Chinese)
- [17] ALASTA M S, ALI ALI A S, EBRAHIMI S, et al. Modeling of local scour depth around bridge pier using FLOW 3D [J]. Computational Research Progress in Applied Science & Engineering, 2022, 8(2): 1-9.
- [18] WANG C, WU Q Y, ZHANG H, et al. Effect of scour remediation by solidified soil on lateral response of monopile supporting offshore wind turbines using numerical model [J]. Applied Ocean Research, 2024, 150: 104143.
- [19] MA H H, LI B E, ZHANG S Y. Scour mechanism around a pipeline under different current-wave conditions using the CFD-DEM coupling model [J]. Computers and Geotechnics, 2024, 170: 106304.
- [20] LIU M M, WANG H C, TANG G Q, et al. Investigation of local scour around two vertical piles by using numerical method [J]. Ocean Engineering, 2022, 244: 110405.
- [21] ZHENG H B, ZHANG H, LIANG F Y, et al. Numerical investigation on lateral monotonic and cyclic responses of scoured rigid monopile based on an integrated bounding surface model [J]. Computers and Geotechnics, 2024, 166: 105997.
- [22] JIA X J, ZHANG H, WANG C, et al. Influence on the lateral response of offshore pile foundations of an asymmetric heart-shaped scour hole [J]. Applied Ocean Research, 2023, 133: 103485.
- [23] ASIM M, RASHID A, AHMAD T. Scour modeling using deep neural networks based on hyperparameter optimization [J]. ICT Express, 2022, 8(3): 357-362.
- [24] KIM T, SHAHRIAR A R, LEE W D, et al. Interpretable machine learning scheme for predicting bridge pier scour depth [J]. Computers and Geotechnics, 2024, 170: 106302.
- [25] GUGULOTH S, PANDEY M, PAL M. Application of hybrid AI models for accurate prediction of scour depths under submerged circular vertical jet [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2024, 29(3): 04024010.
- [26] TAO H, HABIB M, ALJARAH I, et al. An intelligent evolutionary extreme gradient boosting algorithm development for modeling scour depths under submerged weir [J]. Information Sciences, 2021, 570: 172-184.
- [27] CHOUDHARY A, DAS B S, DEVI K, et al. ANFIS- and GEP-based model for prediction of scour depth around bridge pier in clear-water scouring and live-bed scouring conditions [J]. Journal of Hydroinformatics, 2023, 25(3): 1004-1028.
- [28] 梁发云, 姚国圣, 陈海兵, 等. 土体侧移作用下既有轴向受荷桩性状的室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1603-1609.
- LIANG F Y, YAO G S, CHEN H B, et al. Model tests on behavior of axially loaded piles subjected to lateral soil movement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1603-1609. (in Chinese)
- [29] 梁发云, 华建, 江铸炜, 等. 悬索桥自适应锚碇基础土压力与变位离心模型试验[J]. 中国公路学报, 2024, 37(8): 125-134.
- LIANG F Y, HUA J, JIANG Z W, et al. Centrifugal model tests on earth pressure and displacement of adaptive anchorage for suspension bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(8): 125-134. (in Chinese)
- [30] LIANG F Y, HUA J, JIANG Z W, et al. Centrifugal Model Tests on Earth Pressure and Displacement of Adaptive Anchorage for Suspension Bridges[J]. 2024, 37(8): 125-134.
- [31] AMINI A, MELVILLE B W, ALI T M, et al. Clear-water local scour around pile groups in shallow-water flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138(2): 177-185.