

倾斜桩在软土地区变形控制效果分析

吕 凯

(上海市地矿建设有限责任公司, 上海 200040)

摘 要: 为验证高强度预制倾斜桩支护体系在上海软土地区浅基坑工程中的应用效果, 基于上海某开挖深度 5.8 m 基坑为背景, 通过系统监测围护顶竖向位移、水平位移、深层水平位移、支撑轴力、立柱竖向位移及周边地表沉降等多维监测数据, 对比分析验证其变形控制效果。结果显示: 角部混凝土+倾斜桩复合区围护顶竖向位移在最大值显著低于单一倾斜桩区; 围护顶水平位移终值介于 3.4~8.7 mm 之间远低于设计报警值; 深层水平位移呈“弓形”分布, 南侧施工重载通道区值最大值, 达 39.6 mm; 倾斜桩支撑轴力与抗压承载力比值均符合设计要求; 重型车辆通道侧地表沉降最大, 达 29.79 mm。结论表明, 倾斜桩支护可有效控制变形, 结合角部混凝土支撑形成三角受力体系可进一步提升整体支撑刚度; 同时, 动荷载加剧局部变形, 但体系整体安全可靠。研究成果可为相关工程提供参考。

关键词: 倾斜桩; 软土地区; 变形控制

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2026) 03-0121-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.020

Analysis of the Deformation Control Effect of Inclined Piles in Soft Soil Areas

LV Kai

(Shanghai Geological and Mineral Construction Co., Ltd., Shanghai 200040, China)

Abstract: To evaluate the application effectiveness of high-strength prefabricated inclined piles support systems in shallow foundation pit engineering within Shanghai's soft soil regions, a case study was conducted using a 5.8 m excavation depth foundation pit in Shanghai. Through systematic monitoring of multidimensional parameters including vertical displacement of retaining walls, horizontal displacement, deep horizontal displacement, support axial forces, column vertical displacement, and surrounding ground settlement, the deformation control performance was analyzed. Results demonstrated: Vertical displacement at the corner concrete-inclined pile composite zone was significantly lower than that in single inclined pile zones; Final horizontal displacement values of retaining walls ranged between 3.4–8.7 mm, substantially below design alarm thresholds; Deep horizontal displacement exhibited a "bow-shaped" distribution with maximum values recorded in the heavy-load construction passage area on the southern side (39.6 mm); Both support axial force ratios and compressive bearing capacity ratios of inclined piles met design specifications; Maximum surface settlement occurred along heavy vehicle access routes (29.79 mm). The study concludes that inclined pile support systems effectively control deformation, while integrating corner concrete supports to form triangular stress systems enhances overall structural stiffness. Although dynamic loads exacerbate localized deformation, the entire system remains structurally safe and reliable. The outcomes of this study may serve as a reference for relevant engineering application.

Key words: inclined piles; soft soil areas; deformation control

作者简介: 吕 凯 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 岩土工程。

收稿日期: 2025-12-16

岩土力学

0 引言

软土地区基坑常用悬臂直桩、内支撑排桩、锚杆、地下连续墙等支护形式,但悬臂桩仅适用于浅基坑,内支撑建筑垃圾多,锚杆影响周边开发,地下连续墙造价高^[1-2]。因此,反压土、双排桩及倾斜桩等无支护体系愈受关注。倾斜桩支护体系因其在控制基坑变形与优化结构受力方面的显著潜力,同时,凭借可省去水平支撑、施工高效、经济效益显著、侧向刚度优异等优势,能有效减少土体位移,已成为岩土工程领域的研究热点^[3]。

在支护结构优化方面,研究表明倾斜桩可有效改善传统支护形式的局限性。郑刚等^[4-5]采用有限元方法对比发现,相较于悬臂排桩,倾斜桩能有效降低结构位移;王恩钰等^[6]也进一步验证了斜直交替、“人”字形等多种组合形式对减小桩身位移与坑外沉降的适用性;刘畅等^[7]从受力机理指出倾斜桩对直桩的斜撑效应是控制变形效果的关键;在稳定性与参数选择方面,周海祚等^[8]揭示了倾斜角、插入比及土体强度对稳定性的正向作用;马雪兵等^[9]通过参数分析表明,增加桩长、缩小桩间距或缩短连梁都可提升支护效果,但张福海等^[10]也提出,斜桩布置过密可能会引发框架桩的侧向变形甚至沉降的风险。在设计理论创新方面,王艳华等^[11]提出将倾斜桩简化为直-斜交替模式的简化算法,其计算结果与监测值高度吻合;郭景琢等^[12]发展的桩土相互作用设计方法,亦经实测验证具备工程适用性;杨坡等^[13]发现其桩顶水平位移分布规律与内支撑相反;周红卫等^[14]指出其可规避传统拆撑对地下结构的干扰;而张瑞程^[14]、张松波等^[16]的案例研究分别证实了其在软土地区的适用性,同时提示前排斜桩位移大于后排直桩的现象需引起重视。

综上所述,现有研究已为倾斜桩支护奠定了坚实的理论基础,部分研究论文基于少量实测数据也验证了其支护效果,但普遍缺乏在工程实例中对各监测数据进行相互验证。以上海某项目基坑为背景,深入探讨倾斜桩在浅基坑中的应用,通过对比围护顶竖向位移、围护顶水平位移、深层水平位移、第一道支撑轴力、立柱竖向位移及地表沉降等多维关键监测数据相互验证,揭示其在浅基坑工程中的实际应用效果。

1 工程案例

1.1 工程概况

上海市某工程基坑面积 6 454 m²,开挖深度 5.8 m (贴边深坑区域挖深 0.8~1.5 m),基坑安全等级、基坑环境保护等级均为三级。

基坑采用灌注桩排桩结合外侧 $\phi 850@600$ mm 三轴水泥土搅拌桩作为围护结构。坑内土体采用 $\phi 7000@500$ mm 双轴搅拌桩进行墩式加固,加固体与围护桩之间采用压密注浆填充加固。基坑整体采用一道注浆矩形预制倾斜桩撑(规格 350 mm × 450 mm,长 30、32 m,平均间距 4.5 m,插入角度 38°),局部转角采用一道混凝土支撑。倾斜桩与排桩之间采用围檩+牛腿连接保证整体稳定性。典型支护结构如图 1 所示。

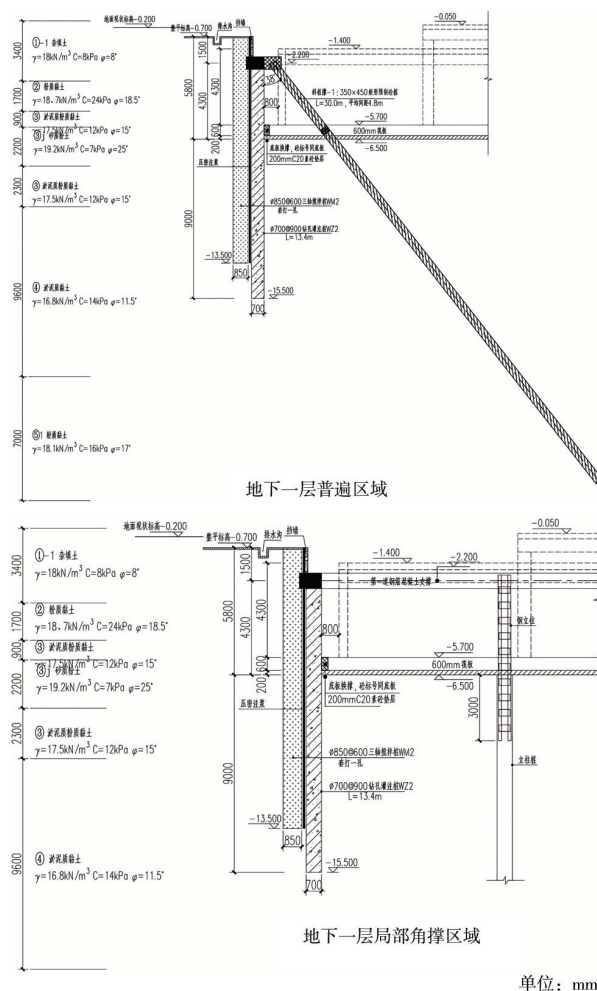


图 1 典型剖面图

Fig. 1 Typical cross-section diagram

工程 100.45 m 深度范围内均为第四纪松散沉积物,属第四系 $Q_{43} \sim Q_{31}$ 河口、滨海、沼泽、溺谷、浅海相沉积层,主要由饱和黏性土、粉性土及砂土组成。场地地下水有浅部土层中的潜水,其稳定水位埋深在地面以下 0.60~1.40 m 之间,其相应标高在 2.72~3.92 m 之间,平均潜水位标高为 3.33 m。承压水则赋存于第⑦层、第⑧₂ 层、第⑨层砂土中,第⑦层水位埋深约为 3.0~7.0 m;第⑧₂ 层与下部第⑨层联通,水位埋深约为 3.0~9.0 m。

1.2 监测点布设

各测点平面布置如图 2 所示。

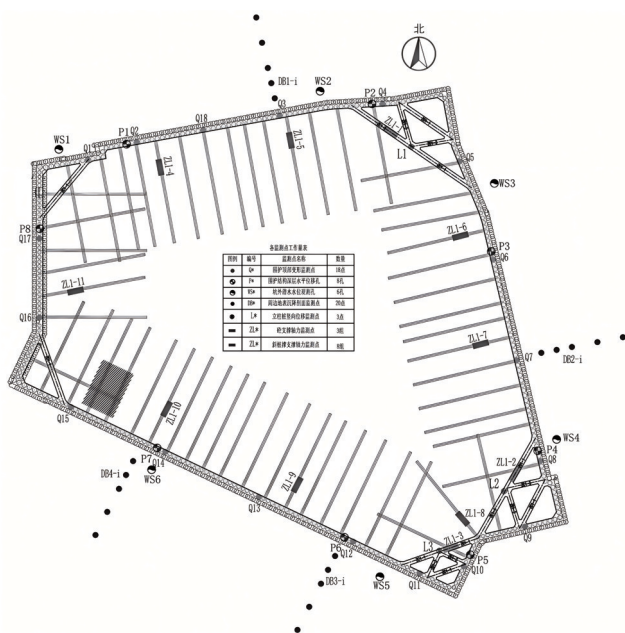


图 2 监测点平面布置图

Fig. 2 Layout plan of monitoring points

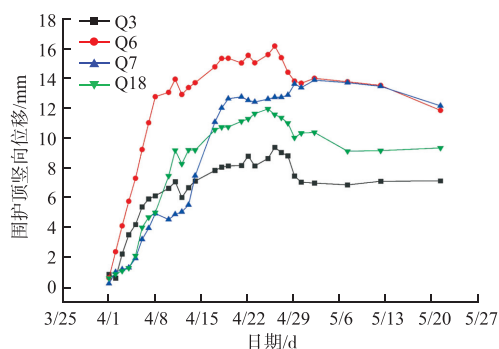
2 结果与分析

2.1 围护顶竖向位移分析

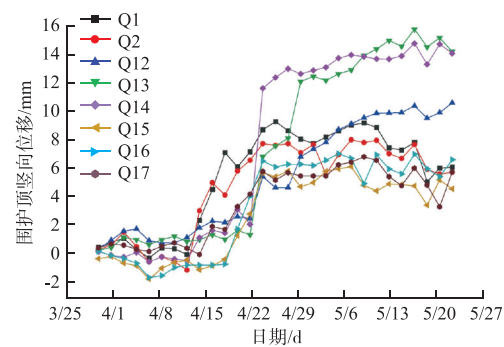
由图 3 可知,根据规律可把各测点分为 a、b、c 三类。第一类为 Q3、Q6、Q7、Q18 (图 3 (a)),受首次第二层土方开挖影响,挖土卸载导致倾斜桩对围护结构产生竖向反作用力,造成前期竖向位移急剧增加,稳定后趋于平缓,最大竖向位移达 16.12 mm;第二类为 Q1、Q2、Q12~Q17 (图 3 (b)),前期无卸土影响竖向位移平缓,待土方开挖至测点附近时位移急剧增加,后续恢复平缓,最大竖向位移为 15.71 mm;第三类为 Q4、Q5、Q8~Q11 (图 3 (c)),在倾斜

桩与混凝土支撑协同作用下虽出现位移增长趋势,但未呈现急剧上升趋势,最大竖向位移为 9.51 mm。

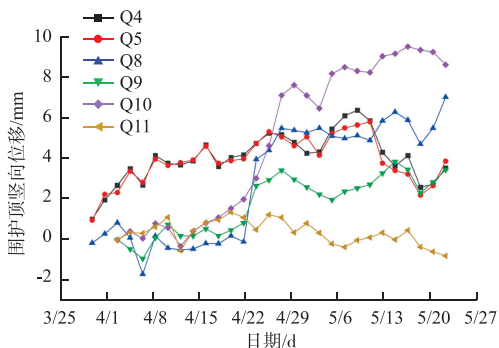
监测数据显示,第三类监测点累计位移值显著低于前两类测点。支撑角部区域凭借倾斜桩与混凝土的双重支撑,构筑起稳固的三角受力体系,有效分散了土体开挖引发的应力重分布,从而显著抑制了围护结构的竖向变形。相较之下,第一、二类测点主要依赖倾斜桩单一支撑,对开挖过程中瞬时卸荷效应更为敏感,致使位移在土方开挖初期迅速增长。



(a) 第一类围护顶竖向位移



(b) 第二类围护顶竖向位移



(c) 第三类围护顶竖向位移

图 3 围护顶竖向位移曲线图

Fig. 3 Vertical displacement curve of the envelope roof

岩土力学

2.2 围护顶水平位移分析

由图4可知,桩顶水平位移整体趋势逐渐向坑内偏移,各监测点桩顶水平位移终值介于3.4~8.7 mm之间。由设计图纸可知,围护顶水平位移报警值为30 mm,其变形值远小于设计报警值。这是由于倾斜桩作为支撑体系,在水平方向上的具有反向支撑垂直桩作用。通过倾斜桩+水平围檩的多重作用,有效分担了土方开挖引起的侧压力,使得桩顶水平位移控制在安全范围。

此外,每层土方开挖完成后,各测点的水平位移增率有效放缓,显示出支护结构能有效的发挥约束作用,遏制了土体侧向变形的效率。尤其随着开挖深度加深,支护结构的支撑作用显著增强,水平位移增速远低于前期土方开挖阶段。

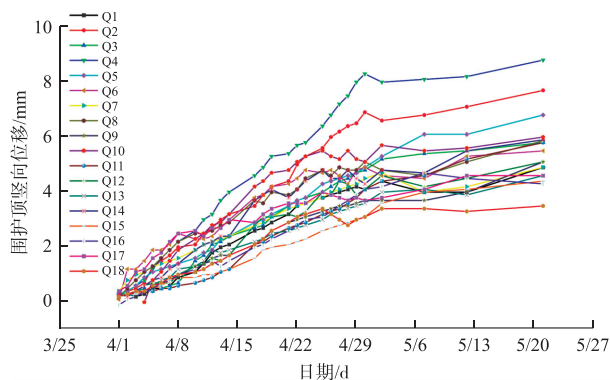


图4 围护顶水平位移曲线图

Fig. 4 Diagram of the horizontal displacement curve of the envelope roof

2.3 深层水平位移分析

由图5可知,各测点深层水平位移均呈现“弓形”分布,最大位移出现在基坑中下部,深度约在5~8 m位置,表明该区域土体受开挖卸荷影响最为显著。

靠近基坑南侧P6、P7监测点深层水平位移最大值位于基坑开挖面附近,分别为34.8、39.6 mm,明显大于其他监测点深层水平位移值,结合现场施工工况及场地布置可知,基坑南侧2 m处作为主要土方运输通道,该区域土体扰动与重型机械频繁作业的附加荷载有关。而P1、P3、P4等远离施工道路监测点,最大位移分别为29.1、24.1、30.0 mm,也进一步验证了外部动荷载会对深层土体水平位移产生影响。

此外,P5监测点深层水平位移最大仅为17.2 mm,明显低于其他测点,其位置位于基坑角部区域,而角部区域采用的是倾斜桩与混凝土双重支撑,空间刚度显著增强,对深层土体侧向位移形成有效约束。

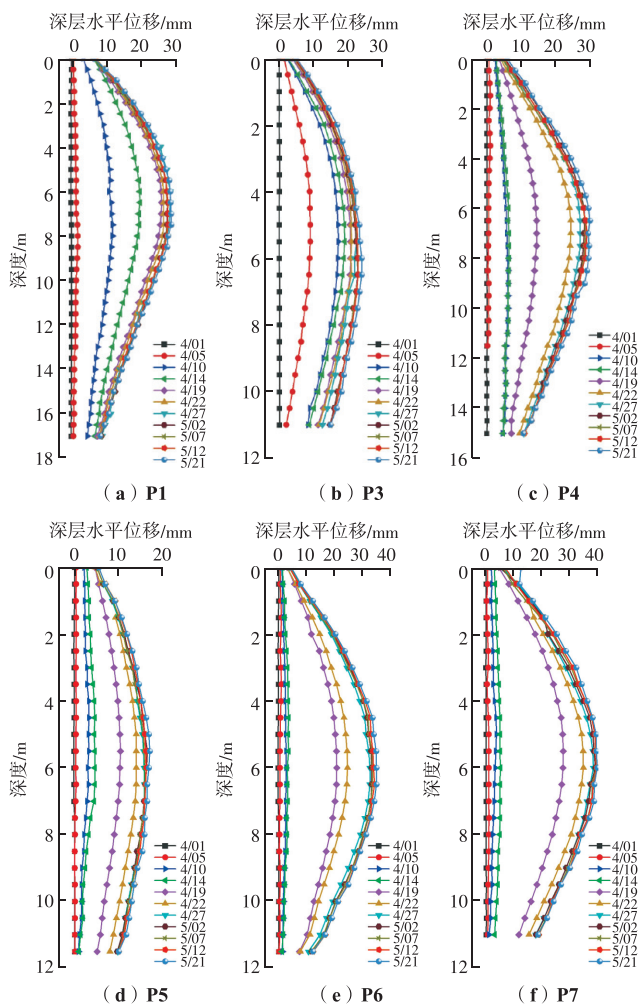


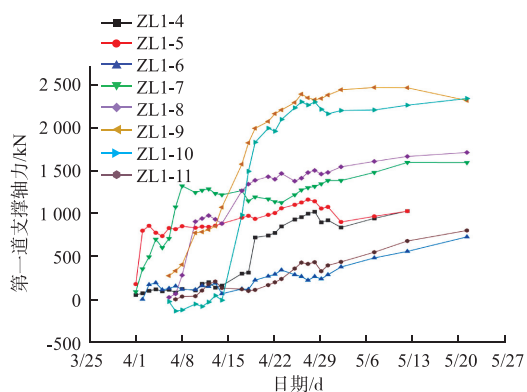
图5 深层水平位移曲线图

Fig. 5 Deep horizontal displacement curve

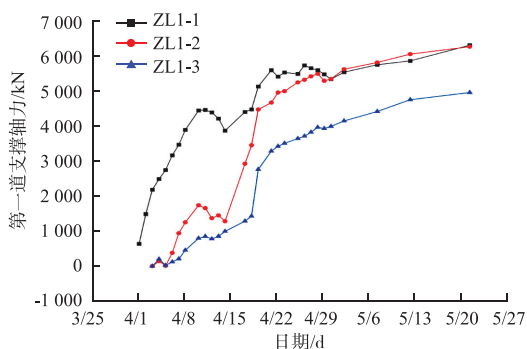
2.4 支撑轴力分析

由图6可知,根据支撑形式不同分为两类,第一类为倾斜桩支撑轴力(图6(a)),第二类为转角混凝土支撑轴力(图6(b))。从图中发现,两类支撑轴力前期变化迅速以抵抗基坑开挖时围护结构体变形。由设计图纸可知,第一道混凝土支撑报警轴力值为8 000 kN,倾斜桩支撑报警轴力值为2 500 kN。混凝土支撑轴力与抗压承载力比值为0.62~0.78,满足正常使用状态;倾斜桩支撑轴力与抗压承载力比值多数维持在0.29~0.68之间,亦满足正常使用状态。

但监测数据显示 ZL-9 和 ZL-10 两处最大轴力值分别达 2 456.5、2 328 kN，其支撑轴力与抗压承载力比值高达 0.93~0.98，显然两处监测点的轴力出现显著的承压特征。根据现场施工工况及场地布置发现，监测点位于主要土方运输通道侧，频繁的重型车辆荷载及震动对其产生影响，导致轴力值偏高。



(a) 倾斜桩支撑轴力



(b) 转角混凝土支撑轴力

图 6 支撑轴力曲线图

Fig. 6 Supporting axial force curve

2.5 立柱竖向位移分析

由图 7 可知，其整体呈现先上升后趋于稳定的态势。初期主要受土方开挖影响，立柱承担较大荷载，

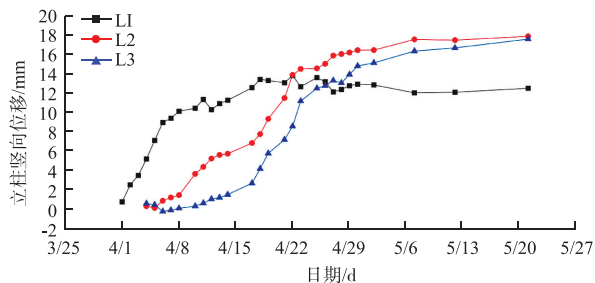


图 7 立柱竖向位移曲线图

Fig. 7 Column vertical displacement curve

位移迅速增加，最大值达 17.88 mm。随着底板浇筑完成，荷载重新分布，位移逐渐稳定。表明立柱及支撑系统整体性能良好，未出现结构性风险。

2.6 周边地表沉降分析

由图 8 可知，整体呈逐步增加的趋势，DB3-2、DB3-3、DB4-2、DB4-3、DB4-4 监测点最大沉降值分别达 29.78、29.55、29.79、29.19、29.68 mm。上述沉降值接近地表沉降报警值 30 mm。经分析发现，监测点侧为土方车辆行车通道，尤其上述点位均处于行车路线上，频繁的重型车辆荷载加剧了地表沉降，但对整个围护体系未产生实质影响。

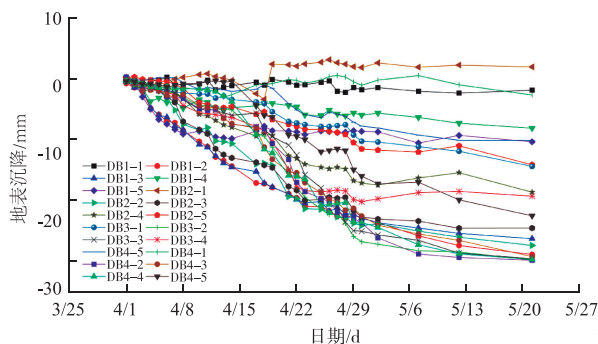


图 8 周边地表沉降曲线图

Fig. 8 Surrounding surface settlement curve

3 结论

基坑支护体系在施工全过程中表现稳定，各项监测指标处于可控范围，支护结构受力形态符合设计预期。结合围护顶竖向位移、围护顶水平位移、深层水平位移、第一道支撑轴力、立柱竖向位移及地表沉降等多维度数据，得出以下主要结论：

(1) 倾斜桩在浅层土体中有效发挥了承载作用，其较传统混凝土支撑体系材料大量减少，降低了施工成本，体现出较高的经济效益。

(2) 通过在应力集中区域采用混凝土支撑+倾斜桩的复合支护形式形成了稳定的三角受力体系，其抗变形能力明显高于单一倾斜桩支撑体系，显著提高了基坑整体结构刚度。

(3) 通过深层水平位移、支撑轴力、周边地表沉降关键点位分析相互验证了频繁的重型车辆动荷载会对行车侧的基坑变形产生一定影响，但对整个围护体系的安全不构成实质威胁。

岩土力学

(4) 本工程支护结构变形规律符合软土力学特性, 应力重分布过程平稳可控, 验证了倾斜桩支护体系在软土地质条件下的适用可靠性。

参 考 文 献

- [1] 郑刚, 王玉萍, 程雪松, 等. 基坑倾斜桩支护性能及机理大型模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43 (9): 1581-1591.
- [2] 吕凯. 软土地区自动伺服系统深基坑变形分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (3): 84-89.
- [3] 赵玉成, 代兆宇, 夏瑞萌, 等. 雄安新区深基坑双排桩支护的实践与探讨 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 79-83, 95.
- [4] 郑刚, 王玉萍, 程雪松, 等. 倾斜桩支护结构的工作性能和基坑稳定性 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2021, 60 (1): 115-124.
- [5] 郑刚, 王玉萍, 程雪松, 等. 软土地区基坑前排倾斜双排桩支护现场试验及工作机理 [J]. 长江科学院院报, 2024, 41 (6): 98-105, 113.
- [6] 王恩钰, 周海祚, 郑刚, 等. 基坑倾斜桩支护的变形数值分析 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41 (增刊1): 73-76.
- [7] 刘畅, 马力遥, 郑刚, 等. 斜直交替基坑支护桩现场实测及机理研究 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44 (5): 827-835.
- [8] 周海祚, 郑刚, 何晓佩, 等. 基坑倾斜桩支护稳定特性及分析方法研究 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44 (2): 271-277.
- [9] 马雪兵, 余地华, 郑刚, 等. 深基坑前排倾斜双排桩设计与施工技术研究 [J]. 施工技术 (中英文), 2021, 50 (7): 6-10.
- [10] 张福海, 周玉石, 刘学港, 等. 基于斜桩支护的框架结构基坑变形分析 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2022, 52 (1): 58-65.
- [11] 王艳华, 黎亦丹, 余雷. 斜-直交替倾斜桩的设计计算方法探讨 [J]. 城市勘测, 2025 (2): 231-235.
- [12] 郭景琢, 李昕昊, 程雪松, 等. 基坑斜直组合倾斜桩支护结构设计计算方法研究 [J]. 土木工程学报, 2023, 56 (8): 153-163.
- [13] 杨坡, 胡磊, 章李坚. 双排桩-超前斜撑-水平内支撑组合支护结构变形分析 [C] //《施工技术》杂志社. 2024 年全国土木工程施工技术交流会论文集 (下册). 中建国际建设有限公司, 2024: 975-980.
- [14] 周红卫, 李明, 莫春, 等. 高强预制倾斜桩对基坑支护施工的作用 [C] //中国土木工程学会总工程师工作委员会. 中国土木工程学会总工程师工作委员会 2021 年度学术年会暨首届总工论坛会议论文集. 中建三局第三建设工程有限责任公司, 2021: 302-304.
- [15] 张瑞程. 新型斜撑-排桩基坑支护体系工程应用分析 [J]. 施工技术 (中英文), 2024, 53 (12): 162-166.
- [16] 张松波, 宋志, 张涛, 等. 无支撑支护前排倾斜双排桩内力变形性状 [J]. 建筑施工, 2021, 43 (4): 696-698, 703.

网址: www.fmhzhly.com