

DOI: 10.11779/CJGE20240568

软土地区预制桩搅拌植桩承载变形特性现场试验研究

王卫东^{1,2}, 杨昱¹, 吴江斌^{1,2}, 王萌^{1,2}, 钱建固¹, 林城³

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 华东建筑设计研究院有限公司上海地下空间与工程设计研究院, 上海 200011; 3. 维多利亚大学工学院, 维多利亚 V8P 5C2)

摘要: 搅拌植桩能有效发挥预制桩桩身强度, 为明晰不同工艺对复合桩荷载传递机制的影响, 本研究分别开展了辅助沉桩和自重沉桩的现场静载试验, 并利用光纤监测技术分析了复合桩的荷载传递特性, 揭示了两种工艺的承载力发挥机制。试验结果表明: 两种施工工艺都能有效发挥预制桩桩身强度, 其中自重沉桩表现出纯摩擦桩特性, 侧摩阻力约为勘察报告建议的灌注桩侧摩阻力极限值 (1.68~3.61) 倍, 发挥极限侧阻所需的桩土相对位移约为 10~20 mm, 辅助沉桩表现出端承摩擦桩特性, 桩端阻力约为勘察报告建议的灌注桩端阻力极限值 1.5 倍, 大部分土层侧摩阻力约为勘察报告建议的灌注桩侧摩阻力极限值 (1.16~2.5) 倍, 发挥极限侧阻所需的桩土相对位移约为 6.5~10 mm。同时分析了两种工艺的加固机理, 自重沉桩通过渗透加固桩周土体, 侧摩阻力提升较高, 辅助沉桩通过桩端的挤扩效应, 有效提升复合桩侧摩阻力和桩端阻力, 在试验范围内, 通过适当降低水灰比, 辅助沉桩承载力可以进一步提升。

关键词: 搅拌植桩; 辅助沉桩; 自重沉桩; 侧摩阻力; 桩端阻力

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)10-2136-09

作者简介: 王卫东(1969—), 男, 博士, 全国工程勘察设计大师, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事地下工程、深基坑工程、高层建筑地基基础的设计与理论研究工作。E-mail: weidong_wang@arcplus.com.cn。

Full-scale experimental study on load-deformation characteristics of prebored grouted planted piles in soft ground

WANG Weidong^{1,2}, YANG Yu¹, WU Jiangbin^{1,2}, MENG Wang^{1,2}, QIAN Jiangu¹, LIN Cheng³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Underground Space & Engineering Design & Research Institute, East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200011, China; 3. School of Engineering, University of Victoria, Victoria BC V8P 5C2, Canada)

Abstract: Prebored grouted planted piles can effectively utilize strengths of precast pile shafts. To clarify the influence of different construction techniques on the load transfer mechanism of composite piles, this study conducted full-scale static load tests on auxiliary-driven and gravity-driven piles. Using fiber optic monitoring technology, the study analyzes load transfer characteristics of composite piles and revealed the bearing capacity development mechanisms associated with each construction technique. The test results indicate that both construction techniques can effectively utilize strength of precast pile shafts. Among them, gravity-driven piles exhibit pure friction pile characteristics, with the side friction resistance being 1.68~3.61 times the recommended ultimate value from the cast-in-place pile geotechnical investigation, and the relative pile-soil displacement required to develop the ultimate side friction is about 10~20mm. Auxiliary-driven piles exhibit end-bearing friction pile characteristics, with the pile end resistance approximately 1.5 times the recommended ultimate value from the cast-in-place pile geotechnical investigation, and the side friction resistance of most soil layers ranging from about 1.16 to 2.5 times the recommended ultimate value. The relative pile-soil displacement required to develop the ultimate side friction is about 6.5~10mm. Simultaneously, the reinforcement mechanisms of the two construction techniques are analyzed. Gravity-driven piles reinforce the soil around the pile through penetration by significantly improving the side friction resistance. Auxiliary-driven piles, due to the squeezing and expanding effect at the pile end, effectively increase the side friction resistance

基金项目: 上海市科技创新行动计划项目 (21DZ2207500, 22DZ1202900); 上海市青年科技启明星计划 (22QB1400500) This work was supported by the Shanghai Science and Technology Development Funds (Grant Nos.21DZ2207500, 22DZ1202900), and Shanghai Rising-Star Program (Grant No.22QB1400500).

收稿日期(Received): 2024-06-11 **修回日期(Revised):** 2024-09-11 **接受日期(Accepted):** 2024-10-23 **网络出版日期(Online):** 2024-10-24

*通信作者 (E-mail: wjb@ecadi.com)

and pile end resistance of the composite piles. Within the test range, reducing the water-cement ratio properly can further enhance the bearing capacity of auxiliary pile-driven piles.

Key words: prebored grouted planted pile; auxiliary-driven pile; gravity-driven pile; side friction resistance; pile end resistance

0 引言

预制桩由于工业化生产, 桩身强度高, 且施工过程中泥浆排放量低, 被广泛应用于基础工程中^[1]。当前国内预制桩主要采用锤击或静压方法沉桩, 无法穿越密实砂层等硬土层, 在深厚软土地区, 管桩竖向抗压承载力难以发挥, 导致大直径、混凝土等级高的预制桩桩身强度难以发挥, 限制了预制桩在软土地区的推广和应用。

近年来, 越来越多的工程通过预先在桩位加入水泥浆与原位土搅拌成孔, 再将预制桩植入, 能显著减小硬土层的沉桩阻力, 有效减少预制桩的挤土效应, 更好发挥预制桩的桩身强度, 并有效解决混凝土因强度低而导致荷载传递深度有限的问题^[2], 在软土地区逐渐应用, 目前应用较多的搅拌植桩分别是劲性复合桩和静钻根植桩两种施工工艺^[3]。静钻根植桩更强调无沉桩阻力, 桩孔内形成的浆液含水率高, 预制桩可通过自重沉入, 在桩端使用大量的低水灰比水泥浆和设置扩大头以获得足够的竖向承载力; 劲性复合桩桩孔内形成的浆液含水率低, 需桩机辅助沉桩, 保留部分挤土效应, 以获得足够的抗压承载力。

对于劲性复合桩, Jamsawang 等^[4]和钱于军等^[5]通过现场试验证明了劲性复合桩的承载能力要明显高于传统管桩和混凝土搅拌桩; 岳建伟等^[6]分析了复合桩的承载特性, 认为复合桩侧摩阻力提高依赖预制桩插入过程的挤土效应和混凝土的固化效应。Wonglert 等^[7]和 Zhou 等^[8]分别通过室内模型试验和数值模拟, 分析了劲性复合桩的破坏机制。Zhang 等^[9]和 Zhu 等^[10]基于劲性复合桩受力机制, 开发了复合桩受荷变形计算和设计方法。

对于静钻根植桩, 王卫东等^[11-12]通过静载和自平衡试验, 分别分析了软土地区静钻根植桩的承载特性和静载根植桩桩端扩底段强度。凌造等^[13]通过室内单元试验, 研究了静钻根植桩不同水泥掺量下桩周和桩端混凝土强度变化规律。徐礼阁等^[14]基于静钻根植桩桩端和桩周混凝土分布形式, 推导了静钻根植桩沉降计算方法。吴江斌等^[15]基于单桥静力触探贯入阻力参数, 加入侧阻和端阻系数, 提出了静钻根植桩承载力设计计算方法。

对于两种施工工艺形成的搅拌植桩形成的复合桩, 主要的区别是混凝土桩的成桩方法不同。复合桩

承载变形机制较为复杂, 包含预制桩-混凝土和混凝土-土两个界面的强度发挥, 及不同工艺对桩周和桩端土体的扰动机制, 而不同施工工艺的工作机制也包含置换、水泥浆液渗透加固、沉桩挤扩加密等因素影响。目前对于深厚软土地层搅拌植桩的足尺试验研究尚不丰富, 缺乏同一场地中, 对不同施工工艺形成的复合桩其承载特性的对比研究。

鉴于此, 本文将针对两种工法中混凝土桩不同施工工艺, 分析其对预制桩搅拌植桩承载特性的影响, 明晰不同工艺复合桩受荷承载工作机理, 分析搅拌植桩对软土地层的适用性, 研究成果可以为软土地层搅拌植桩的理论研究和工程应用提供参考。

1 试验场地土基本物理性质

试验场地位于上海市松江区泗泾镇沪松公路, 勘察报告显示, 试验场地土层属于第四纪全新世 Q4—晚更新世 Q3 沉积层, 主要由填土、黏性土、淤泥质土、粉性土、粉砂组成, 属于典型软土地层, 试验场地的土层分布其主要参数见表 1。

2 现场试桩方案

2.1 施工方法

目前在深厚软土地层中常用的植桩工法为劲性复合桩和静钻根植桩, 本试验为分析大直径管桩在软土地层的承载特性, 根据以上两种工法设置两种预制桩植桩方案:

(1) 搅拌植桩(自重): 如图 1(a) 所示, 参照静钻根植桩工法, 使用搅拌桩机下沉时注水搅拌, 将桩孔内土体搅拌成相对质量密度为 1.4~1.5 的泥浆, 再自下而上注入水泥浆进行注浆搅拌, 其中桩端 6 倍桩孔直径范围内注入水泥浆水灰比为 0.6, 桩周其它范围内注入水灰比为 1.0 的水泥浆, 最后再植入预制管桩。由于桩孔内置换了一部分土体, 混凝土浆液流动性较好, 因此可以通过自重将管桩植入。

(2) 搅拌植桩(辅助): 如图 1(b) 所示, 参照劲性复合桩工法, 采用搅拌桩机对原位土进行注浆搅拌, 使用两搅两喷工艺, 桩周和桩端水灰比一致, 再植入预制管桩, 由于最终形成的混凝土浆液含水率不高, 桩孔内混凝土浆液流动性偏低, 因此需要通过锤击或静压将管桩辅助植入。

表 1 试验场地土层及参数
Table 1 Soil layers and parameters of test site

土层名称	w/%	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	E_s/MPa	f_{sb}/kPa	q_{pb}/kPa	f_{sd}/kPa	q_{pd}/kPa
②粉质黏土	30	18.7	20	17	5.0	15		15	
③淤泥质粉质黏土	38	17.9	12	18	3.2	15		15	
⑤ ₁₁ 黏土	41	17.6	17	12	3.0	25		30	
⑤ ₁₂ 粉质黏土	33	18.3	18	18	4.4	35		40	
⑥ ₁ 粉质黏土	22	19.9	41	17	7.1	55		65	
⑥ ₂ 黏质粉土夹粉质黏土	25	19.1	7	28	8.5	35		45	
⑦ ₁ 砂质粉土	25	19.1	5	31	10.7	60	1400	85	4500
⑦ ₂₁ 粉砂	23	19.4	2	35	13.7	65	2000	110	6600
⑧ ₁ 粉质黏土	35	18.2	18	18	15.0				

注： f_{sb} 为灌注桩侧摩阻力（kPa）； q_{pb} 为灌注桩桩端阻力（kPa）； f_{sd} 为预制桩侧摩阻力（kPa）； q_{pd} 为预制桩桩端阻力（kPa）。

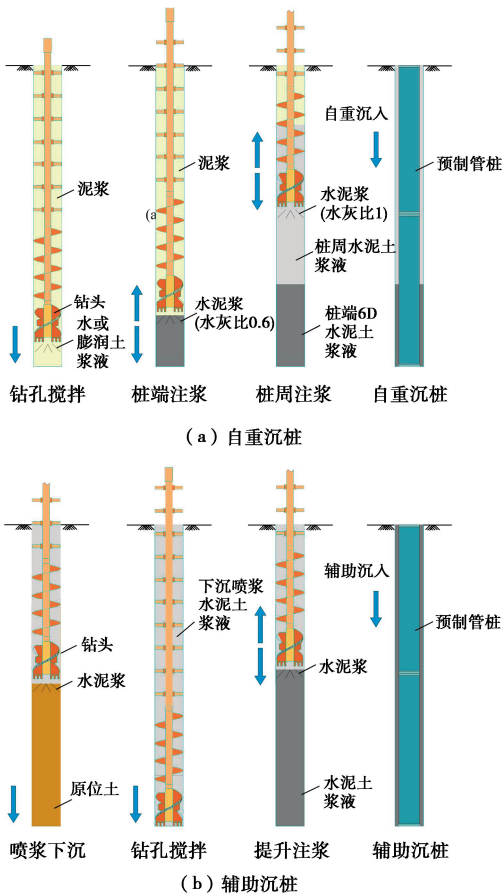


图 1 搅拌桩桩不同施工工艺流程

Fig. 1 Different construction processes for prebored grouted planted piles

2.2 试桩布置

现场试验主要研究目的是搅拌桩桩不同施工工艺在典型软土地层应用的适用性，为充分发挥复合桩承载力，试验选用超高强混凝土管桩（UHC），混凝土强度等级为 C105。试验共设置了 3 个试验组共 5 根试桩（见表 2），其中 S1 组设置 2 根试桩，桩桩方法为搅拌桩桩（自重），其桩型均为钻孔直径 1000 mm 植入 UHC-800AB130 型管桩；S2 组设置 2 根试桩，植

桩方法为搅拌桩桩（辅助），其桩型均为钻孔直径 1000 mm 植入 UHC-800AB130 型管桩；S3 组设置 1 根试桩，桩桩方法为搅拌桩桩（辅助），桩型为钻孔 900 mm 植入 UHC-700AB110 型管桩。为方便对比，3 组试桩桩长均为 40 m，持力层为⑦₂₁粉砂层。试桩平面布置如图 2 所示。

表 2 试桩方案布置
Table 2 Scheme of test piles

组号	桩桩方法	钻孔直径/mm	植入管桩	Q_u	水灰比	a_w
S1	自重	1000	UHC 800AB130	7047 kN	桩周 1.0 桩端 0.6	15
S2	辅助	1000	UHC 800AB130		1.0	15
S3	辅助	900	UHC 700AB130	5912 kN	0.8	15

注： Q_u 为传统工法施工的管桩极限承载力计算值（kN）； a_w 为水泥掺量（%）。

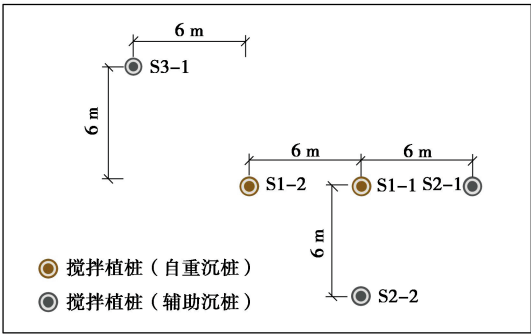


图 2 试验场地桩位平面布置

Fig. 2 Pile location layout of test site

2.3 监测方案

为研究搅拌桩桩不同工艺对复合桩承载特性的影响，本试验对 S1-1 和 S2-1 两根试桩采用定点密集分布式光纤对桩身轴力进行监测，如图 3 所示，沿管桩桩身每米对称布置一对光纤光栅测点，为使光纤与管桩协同变形，采用内埋式布设方案，在管桩离心前提

前将感测光缆与钢筋笼用扎带绑扎固定。每节管桩光缆在桩底箍筋处设置 U 字回路, 并在桩头从管桩内部将光缆引出, 为保护每节管桩的桩头和桩底处光缆, 均外套 PU 管进行保护, 试桩施工完成后, 感测光缆从管桩内部引出。

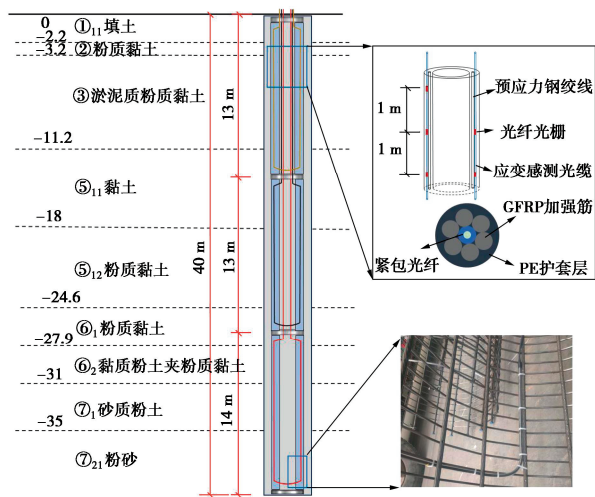


图 3 光纤监测剖面

Fig. 3 Monitoring profile using optical fiber

2.4 静载试验

在试桩施工完成 28 d 后, 对现场 5 根试桩进行静载试验检测, 为防止桩身混凝土发生破坏, 在桩顶位置处使用 C60 细石混凝土填芯加固, 并在外侧设置钢护筒, 桩帽直径为 1000 mm。

试验依据行业标准《建筑基桩检测技术规范: JGJ106—2014》^[16]开展, 如图 4 所示, 采用堆载法提供反力, 加载方式为慢速维持荷载法, 为了方便对比不同植桩工法的承载特性, 5 根试桩第一级荷载均为 2000 kN, 每级荷载增量均为 1000 kN, 直至满足规范中要求的终止加载条件时, 开始逐级卸载, 卸载时每级卸载量为 2000 kN。



图 4 静载试验加载方法

Fig. 4 Loading method of static load test

3 试验结果与分析

3.1 搅拌植桩(辅助)施工记录

本次植桩试验辅助沉桩使用锤击法沉桩, 液压锤锤重为 16 t, 在管桩依靠自重沉入至一定深度时, 通过打桩机进行辅助沉桩, 液压锤初始跳高为 15 cm, 在贯入度偏低时, 提高锤高, 每级为 15 cm。图 5 记录了采用搅拌植桩(辅助)工法 3 根试桩的每延米锤击数及锤跳高。结果表明砂土和粉土与水泥形成的浆液黏稠度较高, 辅助植桩基本在桩沉入⑦层后需要使用打桩机进行辅助沉桩, 另外水灰比对锤击贯入度有明显影响, 水灰比为 1.0 时, S2-1 总锤击数为 102 击, S2-2 总锤击数为 162 击; 水灰比为 0.8 时, S3-1 总锤击数为 420 击。相似工况使用传统锤击工法锤击数基本在 1000 击以上, 表明搅拌后再将管桩植入可以明显减小沉桩阻力, 有效减弱对桩身强度和周围环境的影响^[17-18]。

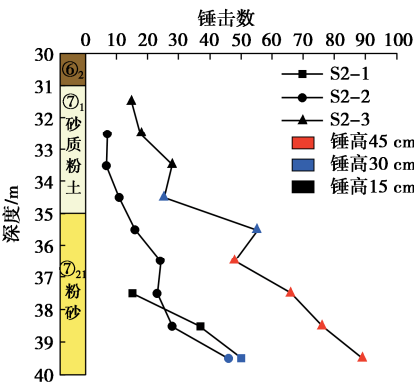


图 5 辅助沉桩锤击数记录

Fig. 5 Blow count record of auxiliary pile driving

3.2 静载试验结果

图 6 和表 3 分别展示了静载试验中 5 根试桩的 $Q-s$ 曲线和试验结果, 其中 S1 组 M1000-C800 自重沉桩工法极限承载力均值为 9000 kN, 相较于传统锤击、静压预制桩的极限承载力计算值提升 27.7%, S2 组 M1000-C800 辅助沉桩工法极限承载力均值为 9500 kN, 相较于传统预制桩的极限承载力计算值提升 34.8%, 可以看出搅拌植桩能显著提高预制管桩承载力, 更好地发挥桩身强度, 另外辅助沉桩相较于自重沉桩平均承载力提升 5%。同时 S3 组 M900-C700 辅助沉桩工法极限承载力为 10000 kN, 相较于传统预制桩的极限承载力计算值提升 69.1%, 结果表明, 通过适当降低水灰比, 提高贯入阻力, 能进一步提高搅拌植桩工法的承载力。试验中 3 种搅拌植桩工况的极限承载力皆明显大于传统锤击、静压预制桩的极限承载力计算值, 表明搅拌植桩虽然削弱了挤土效应对侧阻与端阻的有利作用, 但通过搅拌桩扩大了桩身的直径和侧摩阻力, 在保证承载力发挥的同时, 减小沉桩阻力及沉桩对桩身和周边环境的影响。

表 3 试桩静载结果

Table 3 Results of static load test on test piles

桩号	试桩工艺	最大加载/ kN	累计沉降/ mm	极限值		特征值		卸载回弹量/ mm
				承载力/kN	沉降/mm	承载力/kN	沉降/mm	
S1-1	自重沉桩	11000	91.47	10000	34.87	5000	9.60	12.4
S1-2	M1000-C800	9000	100.70	8000	21.00	4000	7.29	16.3
S2-1	辅助沉桩	10000	63.11	9000	28.28	4500	8.75	23.1
S2-2	M1000-C800	11000	100.95	10000	25.94	5000	8.72	25.1
S3-1	辅助沉桩 M900-C700	11000	100.70	10000	20.30	5500	7.29	21.7

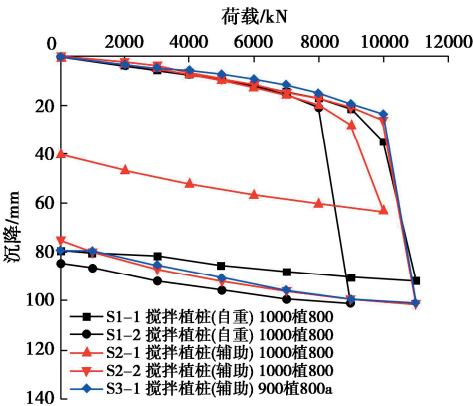


图 6 试桩 Q - s 曲线

Fig. 6 Q - s curve of test piles

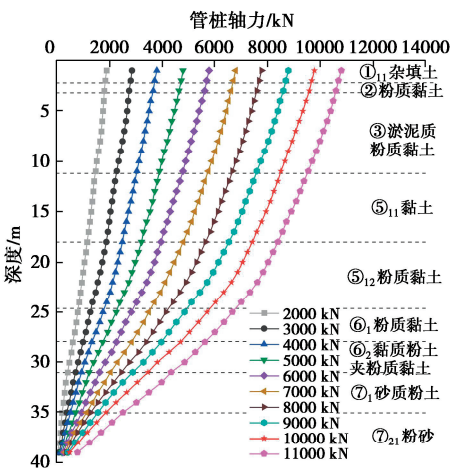
4 承载特性分析

4.1 桩身轴力分析

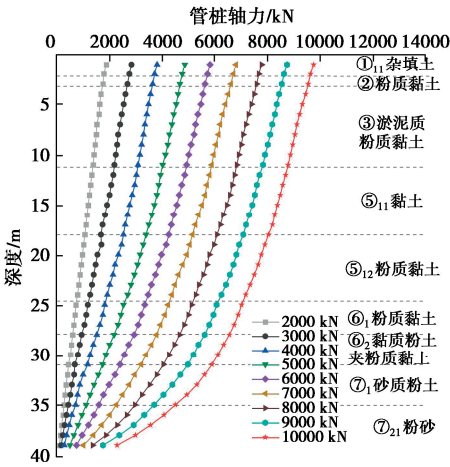
基于光纤测试得到的桩身应变，通过换算得到桩身轴力，图 7 为 S1-1 和 S2-1 管桩轴力沿深度的分布图，结果表明轴力沿深度逐渐减小，证明桩-水泥土-土界面接触良好，水泥土能将荷载扩散传递到周围土体，同时两根试桩都随着土层深度增加，轴力减小幅度逐渐增加，表明桩土界面强度与土体围压成正比。通过对比两根试桩轴力曲线可以看出，S2-1 在桩端处荷载要明显大于 S1-1，考虑桩端 5 m 处均为⑦₂₁ 粉砂层，且相邻深度处土体提供的侧摩阻力接近，以深度为 38~39 m 范围内轴力减小斜率估算桩端阻力，可以得到达到极限承载力时，自重沉桩 S1-1 桩端阻力为 203 kN，端阻比为 2%，表现出纯摩擦桩特性；辅助沉桩 S2-1 桩端阻力为 1135 kN，端阻发挥比为 12.6%，表现为端承摩擦桩特性。

4.2 桩侧摩阻力分析

对于搅拌植桩工法，预制桩所受到的荷载能否通过水泥土传递到桩周土层，是其能否充分发挥桩身强度的关键，考虑到本次试验水泥土层厚度较薄，外界面强度不会超过内界面强度，基于轴力监测结果，以钻孔直径为侧摩阻力换算尺寸，图 8 分别为自重沉桩 S1-1 和辅助沉桩 S2-1 的桩侧单位摩阻力分布图，可以看出，两根试桩都随着深度增加，土层提供的侧摩阻力逐渐增加，当桩顶荷载在达到极限承载力时 S1-1



(a) 自重沉桩 S1-1



(b) 辅助沉桩 S2-1

图 7 试桩桩身轴力曲线

Fig. 7 Axial forces of test piles under different loads

在桩端附近土层摩阻力要低于 S2-1，而在其它土层摩阻力都要高于 S2-1。表 4 列出了两根试桩在桩顶荷载达到极限承载力时，不同土层提供的单位侧摩阻力，结果表明，在桩身范围内，除⑥₁ 粉质黏土层外，皆大于勘察报告建议的灌注桩侧摩阻力极限值，搅拌植桩（自重）黏性土增强系数为 2.02~2.63，粉土增强系数为 2.11~3.61，其中③层淤泥质粉质黏土层增强系数为 2.53、⑤₁₁ 层黏土层增强系数为 2.20、桩端⑦₂₁ 粉砂层增强系数为 1.68；搅拌植桩（辅助）黏性土增强系数为 1.16~2.2，粉土增强系数为 1.75~1.90，其中③层淤泥质粉质黏土层增强系数为 1.64、⑤₁₁ 层黏

土层增强系数为 1.40、桩端⑦₂₁粉砂层为 2.5; 两根试桩均在⑥₁粉质黏土层侧阻提高系数相比于偏低, 这是由于⑥₁粉质黏土层为硬塑状态, 搅拌破坏了土体的结构性且水泥浆液与土体混合效果不佳, 其中辅助沉桩因为直接用水泥浆与土体搅拌, 搅拌效果偏差, 因此小于灌注桩侧阻极限值。

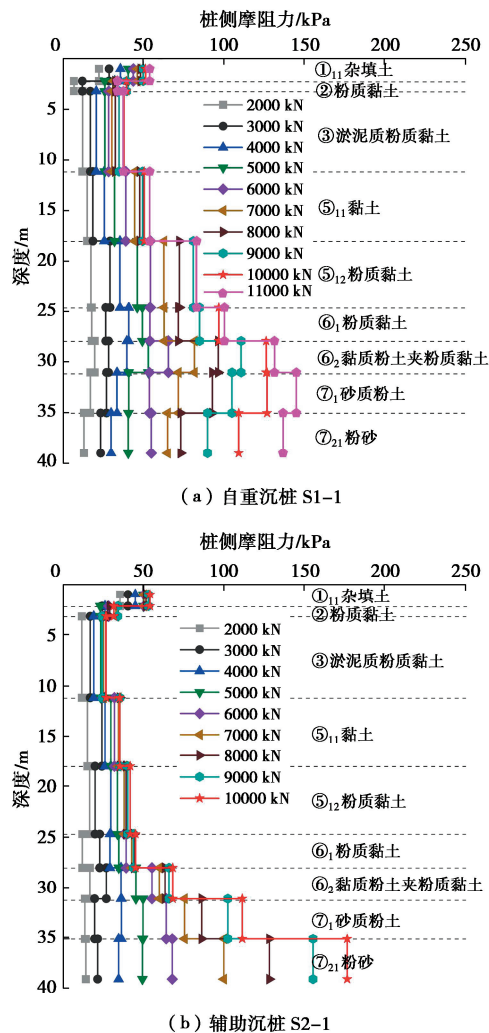


图 8 试桩侧摩阻力分布

Fig. 8 Distribution of side frictional resistance of test piles

表 4 试桩不同土层极限侧摩阻力

Table 4 Ultimate side friction of test piles in different soil layers					
土层	f_{sb}	搅拌植桩 (自重) S1-1		搅拌植桩 (辅助) S2-1	
		f_{su}	f_{su}/f_{sb}	f_{su}	f_{su}/f_{sb}
②粉质黏土	15	39.5	2.63	33.0	2.20
③淤泥质粉质黏土	15	37.9	2.53	25.1	1.67
⑤ ₁₁ 黏土	25	50.5	2.02	35.1	1.40
⑤ ₁₂ 粉质黏土	35	83.0	2.37	40.5	1.16
⑥ ₁ 粉质黏土	55	96.9	1.97	44.1	0.80
⑥ ₂ 黏质粉土夹粉质黏土	35	126.4	3.61	66.4	1.90
⑦ ₁ 砂质粉土	60	127.0	2.11	105.2	1.75
⑦ ₂₁ 粉砂	65	109.3	1.68	162.2	2.50

注: f_{su} 为实测侧摩阻力极限值 (kPa)。

通过假定桩周土不随桩体移动, 忽略桩周土剪切变形, 可以通过桩顶沉降和光纤测得的微应变计算出不同深度 z 处的桩土相对位移, 即

$$s(z) = s_0 - \sum_{i=0}^z \varepsilon(i) \Delta i \quad (1)$$

式中: $s(z)$ 为深度 z 处的桩土相对位移; s_0 为静载试验测得的桩顶沉降; $\varepsilon(i)$ 为深度 i 处的光纤实测桩身应变值; Δi 为测点间距 (本试验为 1 m)。

桩侧不同土层提供的侧摩阻力和桩土相对位移的关系如图 9 所示, 总体上看, 桩侧摩阻力与桩土相对位移的关系曲线呈线双曲线形态, 其中对于浅层土 (0~11.2 m), 两种工法侧阻发挥性状接近, 中部土层 (11.2~31 m), 自重沉桩工法侧阻发挥更好, 极限侧阻相对于辅助沉桩提高约 1 倍。而在桩端持力土层 (⑦₂₁粉砂), 辅助沉桩相对于自重沉桩提高 48.6%, 这是由于辅助沉桩对桩端砂土层有一定的挤密作用, 桩端土层刚度提高, 使在桩端附近的桩侧土侧摩阻力也明显提升^[19]。两根试桩各土层发挥极限侧阻所需的桩土相对位移约为 6.5~10 mm, 自重沉桩 S2-1 土层发挥极限侧阻所需的桩土相对位移约为 10~20 mm。

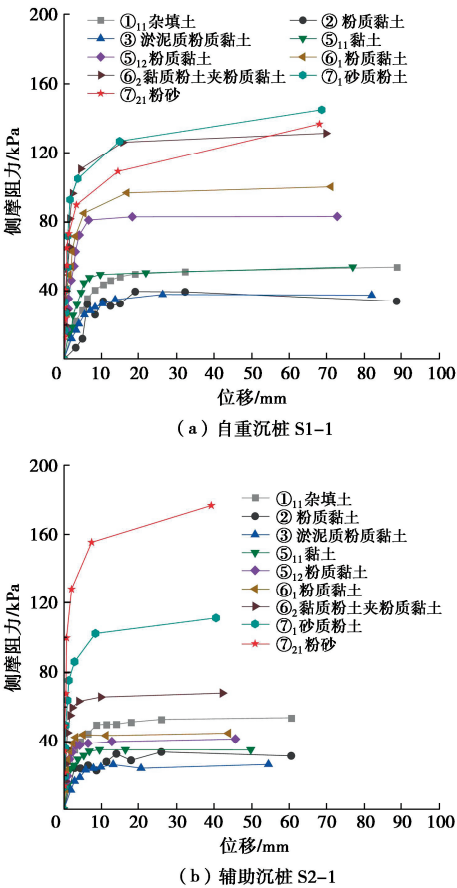


图 9 试桩不同土层侧摩阻力与桩土相对位移曲线

Fig. 9 Curves of pile side friction versus pile-soil relative movement at different soil layers

4.3 桩端阻力分析

搅拌植桩不同施工方法对桩端阻力的发挥有明显影响,考虑 UHC 管桩和水泥土的刚度差距,单位端阻计算时,以管桩外径为计算截面^[20],图 10 展示了两种搅拌植桩工法单位桩端阻力随桩端位移的变化规律。结果表明,自重沉桩桩端位移达到 3.5 mm 时,单位桩端阻力基本达到极限值,而辅助沉桩在桩顶极限荷载时,单位桩端阻力仍在增长。

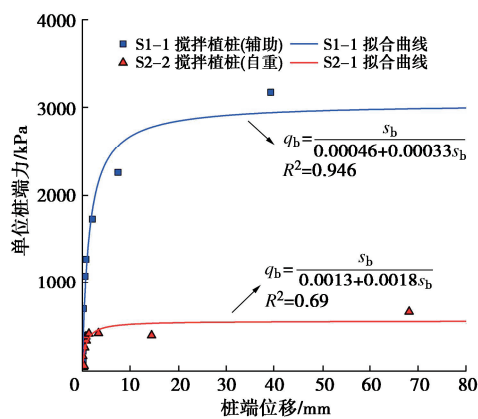


图 10 试桩桩端阻力与桩端位移曲线

Fig. 10 Curves of pile end resistance versus end displacement

可以看出两种工法都随桩端位移的增加呈现双曲线形态,为更好评估桩端阻力的变化规律,可通过双曲线模型进行拟合:

$$q_b = \frac{s_b}{a + bs_b} \quad (2)$$

式中: q_b 为单位桩端阻力; s_b 为桩端位移; a 和 b 为两个常数。根据 Hirayama^[21], a , b 可根据下式计算:

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{S_{\text{ref},e}}{q_u} \\ b &= \frac{1}{q_u} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: q_u 为极限桩端阻力, $S_{\text{ref},e}$ 为发挥一半 q_u 所需的桩端位移。基于两根试桩的实测数据进行拟合,拟合曲线如图 10 所示,基于拟合结果,两根试桩端阻比如表 5 所示,可以看出辅助沉桩工法相比于灌注桩桩端阻力有约 1.5 倍的增强系数,而自重沉桩工法只能发挥 0.25 倍灌注桩桩端阻力,结合 Q - s 曲线回弹量分析,自重沉桩工法在沉桩时仅靠自重沉入,预制桩未与土体接触压实,桩端与原状土之间可能存在一定厚度的水泥土,但其承载力低于原状土,同时相对质量密度较低的水泥土浆液会使桩端土体应力释放,土体有效应力减小,导致桩端阻力进一步降低。

5 搅拌植桩受荷机理分析

搅拌植桩是通过将刚性预制桩植入柔性水泥土桩的工法,其目的是通过水泥土作为过渡层,有效将预

制桩桩身荷载传递到桩周土体。试验表明,不同搅拌工艺形成的水泥土桩对复合桩承载特性有明显区别。

表 5 试桩极限桩端阻力

土层名称	地勘建议值(灌注桩)/kPa	Table 5 Ultimate pile end resistance of test pile			
		搅拌植桩(自重)		搅拌植桩(辅助)	
		S1-1 q_u /kPa	$s_{\text{ref},e}$ /mm	S2-1 q_u /kPa	$s_{\text{ref},e}$ /mm
⑦ ₂₁ 粉砂	2000	555.6	0.72	3030.3	1.4

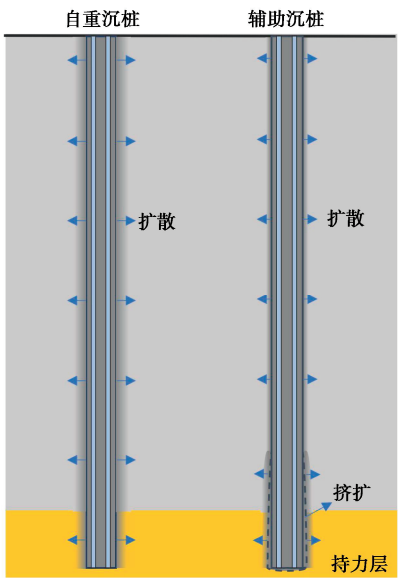


图 11 搅拌植桩不同施工工艺成桩机制

Fig. 11 Pile formation mechanism of prebored grouted planted piles under different construction techniques

图 11 展示了自重沉桩和辅助沉桩的成桩机制,对于参考静钻根植桩的自重沉桩方法,由于前期已将原位土体注水搅拌为相对质量密度为 1.5 的泥浆,再加入水泥浆后,孔内流体流动性好,该方法在沉桩过程中挤土效应较小^[22],同时由于水泥土含水率高,其浆液能更好渗透进桩周土^[23],不仅对桩周土有一定的加固作用,同时使水泥土-土界面有一定的黏结效应,使得侧摩阻力显著提升^[24]。但由于其在沉桩过程中,预制桩基本靠自重沉入,预制桩桩底与桩端土体未能压实且浆液流动性好,在水泥土硬化过程中,桩端土体所受围压减小起到卸载效应,土体有效应力减小,因此桩端阻力较小,植桩后形成的复合桩整体呈摩擦桩特性。

如图 11 所示,对于参考劲性复合桩的辅助沉桩方法,由于在注浆搅拌过程中,由于使用水泥浆液和原位土体进行搅拌,孔内流体黏度高,预制桩沉入过程中,无法完全靠自重沉入,在一定深度处需要辅助压桩,在桩端一定范围内,预制桩会使柔性水泥土桩在竖向和径向都发生扩张,使土体有效应力增加,即在挤扩范围内侧摩阻力和桩端阻力都有效增强^[25]。而辅助沉桩工法由于水泥土含水率偏低,其浆液流动性也偏低,在水泥土-土界面处,有一定的黏结效应,但其

对桩周土扩散加固效果要弱于自重沉桩工法, 因此对侧摩阻力的提升效果略低于自重沉桩。

对于辅助沉桩, 水灰比大小对于孔中流体黏稠度影响较大, 因此对预制桩沉桩阻力也有明显影响, 对比 S2 组和 S3 组试桩可以看出, 将水灰比从 1.0 改为 0.8 显著提高了沉桩阻力, 若基于试桩 S2-1 监测得到的端阻和侧阻可计算 S3-1 的承载力约为 7950 kN, 而 S3-1 静载试验结果相对于反算估值提升 25.8%, 说明在试验范围内, 辅助沉桩适当降低水灰比提升沉桩阻力, 能明显提高复合桩承载力, 同时 $Q-s$ 曲线初始段斜率更小, 沉降控制效果更好, 但降低水灰比会导致沉桩阻力显著提升, 需两者综合考虑。

综上所述, 搅拌桩桩自重沉桩和辅助沉桩方法, 都可以有效将预制桩植入砂层, 并有效发挥与预制桩桩身强度相匹配的承载力, 可以在大部分软土地区推广应用。而不同方法承载机理不同, 自重沉桩方法可以明显增强复合桩和土的界面强度, 提高侧摩阻力, 而辅助沉桩对于桩端处的侧阻和端阻有明显增强, 同时可以调整水灰比, 有效提高复合桩承载力。对于在桩端周围需要控制挤土效应的区域, 推荐使用自重沉桩方法, 可以减小对周围环境影响; 而对承载力需求较大或需要以沉降控制的桩基工程, 推荐适当降低水灰比使用辅助沉桩方法。

6 结 论

为研究软土地区不同水泥土性状对搅拌桩桩承载特性的影响, 分别参考劲性复合桩和静钻根植桩两种工法特点, 设置了 5 根试桩进行静载荷试验, 并结合光纤监测结果, 分析了不同施工工艺对搅拌桩桩竖向受荷承载机理的影响, 主要得到以下 5 点结论。

(1) 搅拌桩桩能提高软土地层预制桩承载力, 有效发挥预制桩桩身强度, 相比于传统锤击、静压施工的预制桩极限承载力计算值, S1 组自重沉桩和 S2 组辅助沉桩分别提升了 27.7%, 34.8%, 而对于水灰比为 0.8 的辅助沉桩 S3 组, 承载力提升了 69.1%。

(2) 自重沉桩表现为纯摩擦桩, 端阻比为 2%, 仅为灌注桩地勘建议值 0.25 倍; 辅助沉桩表现为端承摩擦桩, 端阻比为 12.6%, 极限端阻力约为灌注桩地勘建议值的 1.5 倍。

(3) 相比于灌注桩地勘建议极限值, 自重沉桩 S1-1 黏性土增强系数为 2.02~2.63, 粉土增强系数为 2.11~3.61, 桩端砂土增强系数为 1.68, 辅助沉桩 S2-1 黏性土增强系数为 1.16~2.2, 粉土增强系数为 1.75~1.90, 桩端砂土增强系数为 2.5。

(4) 自重沉桩 S1-1 土层发挥极限侧阻所需的桩土相对位移约为 10~20 mm, 辅助沉桩 S2-1 土层发挥

极限侧阻所需的桩土相对位移约为 6.5~10 mm。

(5) 通过对两种施工工艺的承载机理分析, 建议在位移控制敏感区域, 推荐使用自重沉桩方法; 而对承载力需求较大或需要以沉降控制的桩基工程, 可以适当降低水灰比使用辅助沉桩方法。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 王卫东、吴江斌、杨昱和王萌设计研究内容, 王卫东和吴江斌提供研究指导, 王卫东、杨昱和王萌完成数据分析, 吴江斌、杨昱、钱建固和林城参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by WANG Weidong, WU Jiangbin, YANG Yu, and WANG Meng, and supervised by WANG Weidong and WU Jiangbin. The data analyses were conducted by WANG Weidong, YANG Yu, and WANG Meng. The manuscript was drafted and revised by WU Jiangbin, YANG Yu, Qian Jiangu, and LIN Cheng. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

- [1] 陈 刚, 周清晖, 徐铨彪, 等. 预应力钢绞线超高强混凝土管桩受弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(7): 173-182. (CHEN Gang, ZHOU Qinghui, XU Quanbiao, et al. Study on flexural performance of prestressed steel strand reinforced ultra-high strength concrete pipe piles[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(7): 173-182. (in Chinese))
- [2] 吴雄志. 水泥土桩单桩荷载传递及临界桩长研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1491-1494. (WU Xiongzi. Study on load transfer and critical length of single cement-soil pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1491-1494. (in Chinese))
- [3] 王卫东, 徐中华, 吴江斌, 等. 基坑与桩基工程技术新进展[J]. 江苏建筑, 2021(3): 1-10. (WANG Weidong, XU Zhonghua, WU Jiangbin, et al. New technique development in deep excavation engineering and pile engineering[J]. Jiangsu Construction, 2021(3): 1-10. (in Chinese))
- [4] JAMSAWANG P, BERGADO D T, VOOTTIPRUEX P. Field behaviour of stiffened deep cement mixing piles[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2011, 164(1): 33-49.
- [5] 钱于军, 许智伟, 邓亚光, 等. 劲性复合桩的工程应用与试验分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 998-1001. (QIAN Yujun, XU Zhiwei, DENG Yaguang, et al. Engineering application and test analysis of strength composite piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 998-1001. (in Chinese))

- [6] 岳建伟, 鲍 鹏. 组合桩的竖向承载力特性研究[J]. 土木工程学报, 2008, **41**(5): 59-64. (YUE Jianwei, BAO Peng. Characteristics of the vertical bearing capacity of composite piles[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, **41**(5): 59-64. (in Chinese))
- [7] WONGLERT A, JONGPRADIST P. Impact of reinforced core on performance and failure behavior of stiffened deep cement mixing piles[J]. Computers and Geotechnics, 2015, **69**: 93-104.
- [8] ZHOU M, LI Z T, HAN Y S, et al. Experimental study on the vertical bearing capacity of stiffened deep cement mixing piles[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, **22**(5): 04022043.
- [9] ZHANG Z, RAO F R, YE G B. Design method for calculating settlement of stiffened deep mixed column-supported embankment over soft clay[J]. Acta Geotechnica, 2020, **15**(4): 795-814.
- [10] ZHU S M, CHEN C F, CAI H, et al. Analytical modeling for the load-transfer behavior of stiffened deep cement mixing (SDCM) pile with rigid cap in layer soils[J]. Computers and Geotechnics, 2022, **144**: 104618.
- [11] 王卫东, 凌 造, 吴江斌, 等. 上海地区静钻根植桩承载特性现场试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, **40**(2): 238-245. (WANG Weidong, LING Zao, WU Jiangbin, et al. Field study on bearing characteristics of pre-bored precast pile with enlarged base in Shanghai[J]. Journal of Building Structures, 2019, **40**(2): 238-245. (in Chinese))
- [12] 王卫东, 王 萌, 吴江斌. 静钻根植桩扩底桩端极限承载性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2023, **44**(11): 3091-3098. (WANG Weidong, WANG Meng, WU Jiangbin. Field study on the ultimate bearing capacity of enlarged grout base of pre-bored grouted planted pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, **44**(11): 3091-3098. (in Chinese))
- [13] 凌 造, 王卫东, 吴江斌, 等. 静钻根植桩中水泥土力学性能试验[J]. 地下空间与工程学报, 2022, **18**(增刊 1): 106-113. (LING Zao, WANG Weidong, WU Jiangbin, et al. Laboratory test on mechanical properties of cement soil in pre-bored precast pile with an enlarged base[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, **18**(S1): 106-113. (in Chinese))
- [14] 徐礼阁, 王奎华, 张 鹏, 等. 层状地基中考虑桩侧水泥土与土的静钻根植桩单桩沉降计算[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, **47**(3): 868-874. (XU Lige, WANG Kuihua, ZHANG Peng, et al. Calculation method for settlement of single static drill rooted pile considering cemented soil and soil around pile in layered soil[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, **47**(3): 868-874. (in Chinese))
- [15] 吴江斌, 凌 造, 王卫东, 等. 基于静力触探试验指标的静钻根植桩承载力计算方法[J]. 建筑结构, 2023, **53**(8): 137-142. (WU Jiangbin, LING Zao, WANG Weidong, et al. Calculation method of bearing capacity of pre-bored precast pile with enlarged base by index of CPT[J]. Building Structure, 2023, **53**(8): 137-142. (in Chinese))
- [16] 建筑桩基检测技术规范: JGJ106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Technical Code for Testing of Building Foundation Piles: JGJ106—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))
- [17] 邢皓枫, 赵红威, 徐 超, 等. PHC 管桩锤击施工效应分析[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(8): 1208-1212. (XING Haofeng, ZHAO Hongwei, XU Chao, et al. Driving effect of PHC pipe piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(8): 1208-1212. (in Chinese))
- [18] 张 冰, 马泉源. 上海浦东国际机场二期航站楼桩基施工技术[J]. 施工技术, 2007, **36**(1): 56-58. (ZHANG Bing, MA Quanyuan. Construction technology of pile foundation in the terminal of Shanghai Pudong international airport phase 2[J]. Construction Technology, 2007, **36**(1): 56-58. (in Chinese))
- [19] WU Y, ZHANG X F, ZHAO C, et al. Effects of soil unloading and grouting on the vertical bearing mechanism for compressive piles[J]. Ocean Engineering, 2023, **271**: 113754.
- [20] ZHANG Y, LI Z G, MAO Y T, et al. Studies on applications of precast pile planting method[M]//Smart Geotechnics for Smart Societies. London: CRC Press, 2023: 1528-1537.
- [21] HIRAYAMA H. Load-settlement analysis for bored piles using hyperbolic transfer functions[J]. Soils and Foundations, 1990, **30**(1): 55-64.
- [22] ZHOU J J, YU J L, GONG X N, et al. Field study on installation effects of pre-bored grouted planted pile in deep clayey soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2024, **61**(4): 748-762.
- [23] ZHANG M X, ZHU X W, YU G L, et al. Permeability of muddy clay and settlement simulation[J]. Ocean Engineering, 2015, **104**: 521-529.
- [24] 周佳锦, 马俊杰, 俞建霖, 等. 静钻根植桩竖向承载性能现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(3): 640-647. (ZHOU Jiajin, MA Junjie, YU Jianlin, et al. Field tests on bearing capacity of pre-bored grouted planted piles under compression and tension[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(3): 640-647. (in Chinese))
- [25] 朱 锐, 周 峰, 陈廷柱, 等. 柔性复合桩挤土效应及承载力作用机制研究[J]. 岩土力学, 2023, **44**(12): 3577-3586. (ZHU Rui, ZHOU Feng, CHEN Tingzhu, et al. Soil squeezing effect and bearing mechanism of strength composite pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, **44**(12): 3577-3586. (in Chinese))