

文章编号: 1007-2993(2024)06-0745-05

双向搅螺旋桩芯劲性复合桩 抗压承载性能试验研究

郭承宇 宗钟凌 黄蕴晗 庄潇轩
(江苏海洋大学土木与港海工程学院, 江苏连云港 222002)

【摘要】 为进一步提升螺旋桩芯劲性复合桩(HSCMP)的抗压承载力, 提出一种新型劲性复合桩——双向搅螺旋桩芯劲性复合桩(BHCMP)。为研究 BHCMP 的施工工艺可行性和抗压承载性能, 对比其与传统螺旋桩(HP)、螺旋桩芯劲性复合桩(HSCMP)承载特性, 进行现场试桩和抗压承载性能试验。试验结果表明: HSCMP 通过同步旋进注浆在螺旋桩周围形成水泥土柱提高了竖向承载力, 约为 HP 的 1.85 倍, BHCMP 在复搅段通过二次搅拌下钻使复搅段的淤泥土与水泥搅拌更充分, 形成强度更高的水泥土柱, 使 BHCMP 的极限抗压承载力相较于螺旋桩芯劲性复合桩(HSCMP)有 49% 的提升。

【关键词】 螺旋桩; 劲性复合桩; 极限承载力; 现场试验

【中图分类号】 TU473.1

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.06.016

Experimental Study on Compressive Bearing Performance of Bilateral Helix-Stiffened Cement Mixing Piles

Guo Chengyu Zong Zhongling Huang Yunhan Zhuang Xiaoxuan

(College of Civil and Harbor Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222002, Jiangsu, China)

【Abstract】 Bilateral Helix-Stiffened Cement Mixing Piles (BHCMP) is a new type of stiff composite pile. To study the feasibility of the construction process and the compressive bearing performance of BHCMP, three test piles were designed, and the on-site pile formation test and the compressive bearing performance test of the pile foundation were conducted. Comparative analysis of the pile forming process and bearing properties of helical piles, helical stiffened cement mixing piles, and BHCMP was carried out. The test results show that: the vertical bearing capacity of the helical pile is improved by synchronized rotary grouting around the helical pile to form a hydraulic soil column, which is about 1.85 times that of the helical pile, while the BHCMP has a 49% increase in ultimate compressive bearing capacity compared with the helical stiffened cement mixing piles through the secondary mixing and downward drilling, which makes the mixing of silt soil and cement in the re-drilled section more adequate and forms a hydraulic soil column with higher strength.

【Key words】 helical piles; rigid composite pile; ultimate bearing capacity; field test

0 引言

我国沿海地区广泛分布海相软土, 其具有强度低、可压缩性高和渗透性差的特征, 工程上为满足沉降和承载力要求, 基础通常采用桩基础形式。螺旋桩芯劲性复合桩(简称 HSCMP)是一种以螺旋桩(简称 HP)为桩芯, 利用下钻同步注浆技术改善桩周土体, 弥补螺旋叶片对土体的扰动影响的劲性复合桩。HSCMP 不仅施工速度快, 而且施工过程中的土体扰

动小, 同时还解决了螺旋桩承载力不足的问题^[1-2]。

近年来, 国内外学者对 HSCMP 的成桩工艺和承载特性进行了研究。Srijaroen 等^[3]、Nabizadeh 等^[4]和 Mansour^[5] 分别对预注浆、后注浆和同步注浆三种施工工艺形成的 HSCMP 与 HP 进行了比较, 发现前者的承载性能提高了 1.5 ~ 2.5 倍, 其中, 同步注浆形成的螺旋桩芯劲性复合桩效果最为显著。Nasr^[6] 提出了一种同步注浆的螺旋桩的设想, Mansour 等^[2,5]

基金项目: 江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2021681)

作者简介: 郭承宇, 男, 1998 年生, 汉族, 江苏南京人, 硕士研究生, 研究方向为桩基设计理论。E-mail: gcy19981111@gmail.com

通讯作者: 宗钟凌, 男, 1979 年生, 汉族, 山东菏泽人, 教授, 硕士生导师, 研究方向为桩基工程与地基处理。E-mail: Jouzzhl@jou.edu.cn

在此基础上研究了注浆方法的优化以及注浆压力对螺旋桩轴向性能的影响,结果表明,提高注浆压力能够改善 HSCMP 的轴向承载性能,这在海相软土地基和高密度土层中更为明显。Huang 等^[7]和 Zhuang 等^[8]先后进行了 HSCMP 全尺寸现场试验和小尺寸模型试验,分析验证了 HSCMP 在软黏土地基中的轴向力学性能,并揭示了不同因素对 HSCMP 竖向承载性能的影响,为优化设计和安装提供了建议。由于 HSCMP 在成桩工艺上可能导致桩身水泥土搅拌填充不均匀,桩身抗剪强度较弱,因此工艺上还需改进。

为进一步增大 HSCMP 单桩竖向承载力,对其施工工艺进行了改进,参考刘松玉等^[9]关于双向水泥土搅拌桩的研究,提出了新型双向搅螺旋桩芯劲性复合桩(简称 BHCMP)。通过现场足尺桩基试验验证了 BHCMP 成桩工艺的可行性,研究了不同桩芯对 BHCMP 的抗压承载性能的影响,研究成果可为 BHCMP 的设计与施工提供参考。

1 试验方案设计

1.1 工程地质条件

试验场地位于连云港沿海地区,场地地势平坦,表层黏土厚度较小,下部逐渐过渡到软土,均匀性一般,工程性质较差。淤泥层普遍分布于高速互通区,厚度较大,工程性质极差。根据地质勘察结果,埋深 16 m 范围的地基土可划分为 4 个工程地质层:①层为素填土,土质主要为黏性土,软塑—可塑,较为松散,均匀性差;②层为黏土,软塑—可塑,属于高压缩性地

基土;③层为淤泥,具有高干强度和韧性,属于高度可压缩的地基土层;④层为粉质黏土夹粉土,属于中度可压缩的地基土层,具有较差的均匀性。典型地质剖面见图 1,各土层的物理力学指标见表 1。

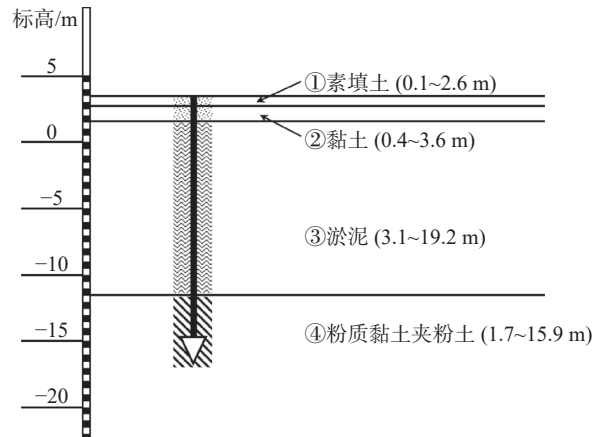


图 1 地质剖面图

1.2 试验桩设计

现场设计了 3 根试验桩,螺旋桩(HP)、螺旋桩芯劲性复合桩(HSCMP)、新型双向搅螺旋桩芯劲性复合桩(BHCMP)各 1 根,3 根桩的螺旋桩芯参数相同,螺旋主轴外径 89 mm,每节长为 3 m,共 4 节,总长为 12 m。每节通过精加工的高强螺栓连接,以保证连接处的气密性,确保注浆压力稳定。注浆孔位于最下部螺旋叶片上方,采用对称式开孔,孔径为 4 mm。螺旋叶片直径 D 设计为钢管直径 d 的 3 倍。试验桩参数见表 2, BHCMP 构造图见图 2。

表 1 土层物理力学指标

土层名称	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	含水率 $w/\%$	底层深度 H/m	平均层厚 $/\text{m}$	压缩模量 E_s/MPa	极限侧阻力 q_{si}/kPa	极限端阻力 q_{pk}/MPa	S_u $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$
①素填土			0.30	0.30		65.00	2.99	
②黏土	18.10	37.50	1.30	1.00	5.08	51.00	1.86	24
③淤泥	15.80	65.20	12.00	10.00	1.93	10.00	0.44	14
④粉质黏土夹粉土	19.30	26.90	16.00		5.93	60.00	3.18	32

表 2 试验桩设计参数

桩型及代号	桩总长/m	叶片直径/m	外钻杆长度/m	反向钻杆叶片直径/m
螺旋桩 HP	12	0.26		
螺旋桩芯劲性复合桩 HSCMP	12	0.26		
螺旋桩芯劲性复合桩 BHCMP	12	0.26	3	0.26

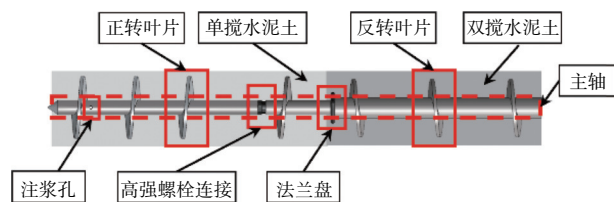


图 2 BHCMP 构造图

现场设计的试验桩正反叶片对比图和首节反钻套管段的试验桩如图 3 所示。

1.3 成桩工艺

通过钻机对 HP 施加垂直应力和旋转力,使得螺旋叶片对土体产生的剪切和推挤,实现逐层深入地下,最终钻至设计深度完成成桩,整个施工过程始终保持

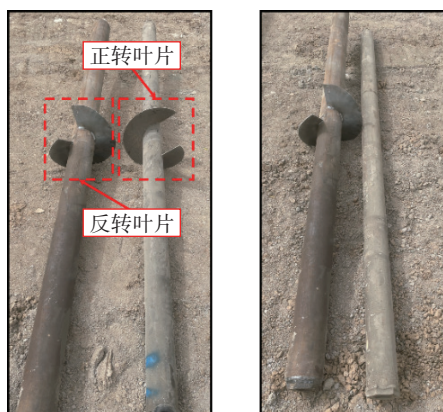


图3 试验桩正反转叶片

桩身垂直。

在 HP 的成桩步骤基础上, HSCMP 在成桩过程引入了注浆技术, 在 HP 的成桩过程中同步进行压力注浆, 通过将水泥浆液注入螺旋桩腔体内, 从下端的注浆口喷出, 螺旋叶片对水泥和土体的初步搅拌实现了桩体与周围土层之间的紧密结合, 从而优化了桩基力学性能。在注浆过程中的压力作用不仅有助于提高土体对桩体的侧摩阻力和端阻力, 同时还填充了因螺旋桩在旋进过程中对土体的扰动而产生的空隙, 进一步加强了桩体的强度。

螺旋桩芯安装过程保持匀速, 每节钢管通过高强螺栓连接。旋进速度应控制在 $1.0 \sim 1.5 \text{ m/min}$ 。注浆时应采用压力注浆, 水灰质量比为 0.6 。注浆压力应控制在 0.6 MPa 。完成安装后, 整个螺旋钢管被水泥土柱完全包裹。成桩设备如图 4 所示。

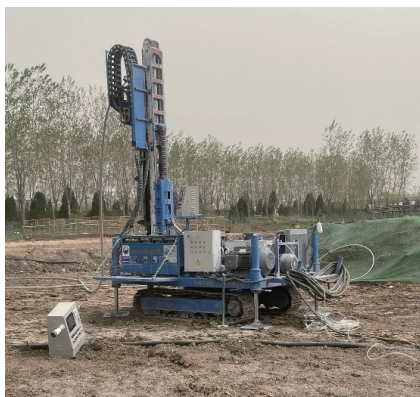


图4 成桩设备

BHCMP 的成桩工艺是在 HSCMP 的基础上进行加强。更换了反向旋转接头, 添加了反向叶片钻杆段(反钻套管的深度可依据设计深度进行改变, 反向外钻杆速度应与内钻杆同步), 通过逆时针下压螺旋套管, 使得水泥与周围土体进一步得到搅拌, 水泥土搅拌得更加充分, 形成强度更高性质更均匀的水泥土柱, 从而达到提高桩体的极限抗压承载力的目的。

BHCMP 的成桩过程如图 5 所示。

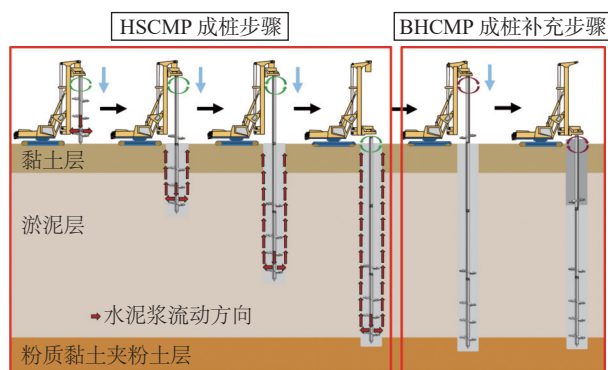


图5 BHCMP 成桩过程示意图

1.4 加载方案

试验桩现场布置见图 6, 各桩相距 5 m , 确保不产生群桩效应。成桩 28 d 后进行加载。依据《建筑桩基检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[10], 单桩竖向抗压静载试验采用慢速维持荷载法, 试验应符合下列规定:

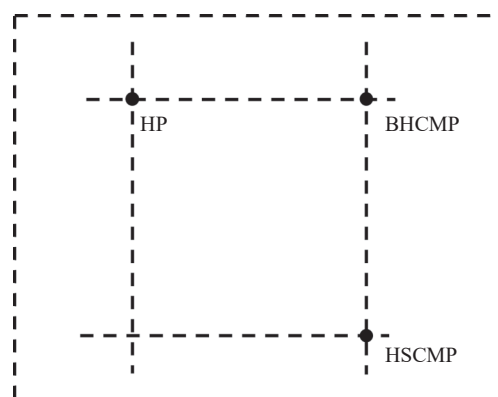


图6 试验桩位布置图

(1) 当施加某一级别荷载时, 如果桩顶的沉降量超过前一级荷载作用下沉降量的 5 倍, 并且桩顶沉降相对稳定, 总沉降量保持在 40 mm 以下时, 可以继续施加荷载直至桩顶的总沉降量超过 40 mm 。

(2) 在施加某一级别荷载后的 24 h 内, 如果桩顶的沉降量超过前一级荷载作用下沉降量的 2 倍, 且在这段时间内尚未达到相对稳定的标准, 需要持续观察沉降情况。加载装置示意图如图 7 所示。

2 试验结果及分析

2.1 桩基荷载-位移曲线

桩基抗压荷载-位移曲线如图 8 所示, 在相同荷载作用下 BHCMP 的位移量小于 HSCMP 与 HP 的位移量。在加载初期, 3 根桩的桩顶位移相对较小, 且各个桩关系曲线差异较小, 其荷载-位移曲线近似呈线性变化; 随着桩顶竖向荷载得增加, 桩顶位移增量逐渐变大。

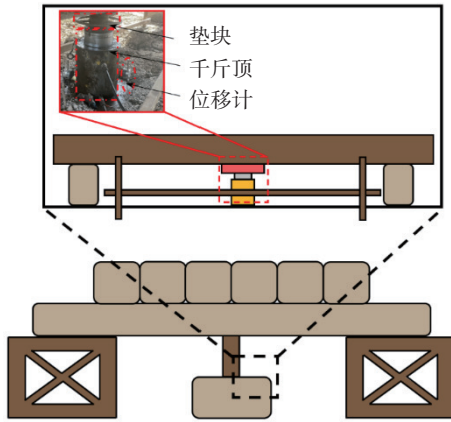


图7 加载装置示意图

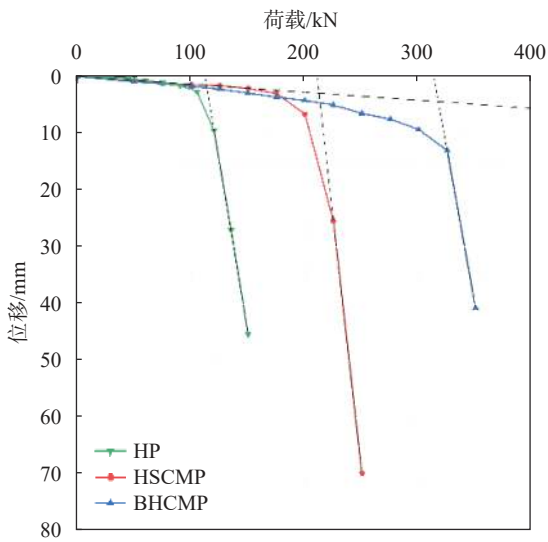


图8 单桩抗压荷载-位移曲线

2.2 极限承载力判定

单桩的极限承载力通常出现在荷载恒定或持续轻微增加过程中桩的沉降速率增加,即表现出的突降破坏阶段^[11]。整个单桩静载试验曲线可分为3个区域:初始线弹性段、非线性过度段和斜率较大段即破坏段。对于小直径单桩因为其轴向刚度的可变性,可根据图形构造相关的图形失效准则进行判定^[12-13],文献[12]定义桩的极限承载力为抗压荷载-位移曲线破坏阶段的切线延伸部分与初始直线部分延伸之间的交点对应的荷载,文献[13]则将桩的极限承载力视为曲线斜率为0.14 mm/kN处切线延伸部分与初始直线部分延伸之间的交点对应的荷载。根据《建筑桩基检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[10],可观察到在曲线上存在陡变型的特征。这种陡变现象表明桩在特定荷载作用下,其下压量随位移的变化呈现急剧增加。在此情况下,为了确定桩的极限荷载,可以采用陡变起始点对应的荷载值作为标志。按照上述判定失效准则和判断依据,试验结果见表3。HSCMP

的极限抗压承载力相较于HP提高了85%。经改进施工工艺的BHCMP极限抗压承载力比HP提高176%,相较于HSCMP极限抗压承载力提高49%。

表3 抗压极限承载力

编号	判定标准			平均值
	文献[12]	文献[13]	文献[10]	
HP	114	90	120	108
HSCMP	212	165	225	200
BHCMP	316	251	325	298

上述试验结果表明,通过压力注浆形成的桩体整体较螺旋桩而言承载力有大幅度提高,同步高压注浆技术与螺旋桩旋进技术相结合的HSCMP能显著提高抗压极限承载力。因在淤泥层增设螺旋叶片可使HSCMP的水泥土成型更加饱满^[14],其极限抗压承载力也会因此大幅提升。相较于HSCMP,BHCMP其最上面一节的叶片换成反向螺旋叶片,并增加一节反向下钻的施工流程。通过表3中的数据可以看出新型双向搅螺旋桩芯劲性复合桩(BHCMP)的极限承载力比HSCMP的极限承载力有所提高。可以看出通过双向搅后的首节钻杆周围的水泥土强度会进一步增强,相较于单搅后的水泥土有较大变化,承载力也因此有大幅度提升。

2.3 极限承载力结果分析

对比本次试验中的HP、HSCMP和BHCMP,在相同地质条件和成桩深度下,HSCMP的极限抗压承载力是螺旋桩的1.85倍,BHCMP的极限抗压承载力是螺旋桩的2.76倍。通过对比成桩工艺发现同步旋进注浆螺旋桩周围形成水泥土柱,增大成桩直径,且通过结合水泥与淤泥质土形成水泥土加固土体并提高土体的强度,提高桩侧摩阻力,从而提高桩体的极限抗压承载力。对比分析BHCMP与HSCMP,发现首节二次搅拌后成桩的BHCMP通过第二轮搅拌提高了水泥土强度,从而达到提高桩体的极限抗压承载能力的目的。

对比国内外学者的试验结果,得出相同试验条件下不同成桩工艺的压浆螺旋桩与普通螺旋桩的极限抗压承载力比例见表4。对比结果表明,施工工艺对于螺旋桩的承载力有不同程度加强。但由于每个试验的设计参数不同和试验的地基土体性质不同,包括注浆压力、旋进速度、叶片尺寸、叶片排布、注浆孔大小和位置设置等都会对桩基的成桩效果造成影响,导致相同成桩工艺下的试验得到结果有所不同。

本研究仅初步探讨了 BHCMP 双向搅拌工艺,对于不同搅拌参数下对水泥土桩的影响还有待深入研究。

表 4 承载性能对比

成桩方式	文献	极限抗压 承载力之比	土体	加载
前注浆	Srijaroen等 ^[3]	1.24	海相软土	抗压
后注浆	Khazaei和Eslami ^[15]	2.29	砂土	抗压
	Vickars和Clemence ^[16]	1.51	冲积土	抗压
同步旋进注浆	Mansour和 El Naggar ^[2]	3.00 ~ 3.93	砂土	抗压
	本文	1.85	淤泥质土	抗压
双向搅同步注浆	本文	2.76	淤泥质土	抗压

3 结论

通过现场试验,研究了螺旋桩芯劲性复合桩的复合施工工艺和其自身的抗压承载性能,结论如下:

(1)海相软土地区采用双向搅拌螺旋桩芯劲性复合桩(BHCMP)能显著提升抗压承载能力,其极限抗压承载力为传统螺旋桩的 2.76 倍。螺旋桩芯劲性复合桩(HSCMP)在增加反向搅拌段后,其极限抗压承载力提高了 49%。

(2)通过增加反向螺旋叶片,改进了 HSCMP 的施工工艺和设计参数,双向搅拌的运用使得 BHCMP 的水泥土搅拌更加充分,提升了桩体周围水泥土的强度,从而提高了桩基的抗压极限承载能力。

参 考 文 献

- [1] 宗钟凌,鲁先龙,李青松,等. 静压钢管注浆微型桩承载性能试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(S2): 323-329.
- [2] MANSOUR M A, EL NAGGAR M H. Optimization of grouting method and axial performance of pressure-grouted helical piles[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2022, 59(5): 702-714.
- [3] SRIJAROEN C, HOY M, HORPIBULSUK S, et al. Soil-cement screw pile: Alternative pile for low-and medium-rise buildings in soft Bangkok clay[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2021, 147(2): 04020173.
- [4] NABIZADEH F, CHOBBASTI A J. Field study of capacity helical piles in sand and silty clay[J].

- Transportation Infrastructure Geotechnology*, 2017, 4(1): 3-17.
- [5] MANSOUR M A. Performance of pressure grouted helical piles under monotonic axial and lateral loading[D]. London: The University of Western Ontario (Canada), 2019.
- [6] NASR M A. Method for installing a screw pile: U. S. Patent 7, 338, 232[P]. 2008-03-04.
- [7] HUANG Y, ZHUANG X, WANG P, et al. Axial behavior of pressure grouted helical piles installed in marine soft clay based on full-scale field tests[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2022, 40(12): 5799-5812.
- [8] ZHUANG X, ZONG Z, HUANG Y, et al. Analysis of the installation effect on the axial performance of pressure-grouted helical piles in clay by small-scale model tests[J]. *Buildings*, 2022, 12(7): 992.
- [9] 刘松玉,席培胜,储海岩,等. 双向水泥土搅拌桩加固软土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2007(3): 560-564.
- [10] JGJ 106—2014 建筑基桩检测技术规范[S].
- [11] HIRANY A, KULHAWY F H. On the interpretation of drilled foundation load test results[M]//Deep foundations 2002: An international perspective on theory, design, construction, and performance. 2002: 1018-1028.
- [12] MANSUR C I, KAUFMAN R I. Pile tests, low-sill structure, Old River, Louisiana[J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1958, 123(1): 715-743.
- [13] BUTLER H D, HOY H E. The Texas quick-load method for foundation load testing, user's manual[J]. NASA STI/Recon Technical Report N, 1976, 77: 31346.
- [14] 宗钟凌,庄潇轩,黄蕴晗,等. 压力注浆螺旋钢管桩抗拔承载性能试验研究[J]. 海洋工程, 2022, 40(1): 160-166.
- [15] KHAZAEI J, ESLAMI A. Postgrouted helical piles behavior through physical modeling by FCV[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2017, 35(4): 528-537.
- [16] VICKARS R A, CLEMENCE S P. Performance of helical piles with grouted shafts[M]//New technological and design developments in deep foundations. 2000.

收稿日期: 2023-08-14