

注浆液水灰比对螺旋桩芯劲性复合桩抗压承载性能的影响研究

丁文龙, 宗钟凌*, 黄蕴晗, 庄潇轩, 范毅敏
(江苏海洋大学 土木与港海工程学院, 江苏 连云港 222005)

摘要: 作为一种新型复合桩, 螺旋桩芯劲性复合桩 (Helix Stiffened Cement Mixing Pile, 简称 HSCMP) 将刚性螺旋桩与柔性水泥土桩进行复合, 两种桩体同步施工一次成桩。为探究注浆水灰比 (w/c) 对 HSCMP 抗压承载性能及成桩效果的影响, 对不同注浆水灰比的 HSCMP 进行了模型桩加载试验及桩周水泥土射钉试验。结果表明: HSCMP 抗压极限承载力及成桩直径随着 w/c 降低呈增大趋势, 当 w/c 小于 0.7 时增长趋势变缓; HSCMP 桩身各处的水泥土强度波动幅度随着 w/c 的降低而减小, 桩身水泥土强度均匀性提高; w/c 降低可显著提升桩身水泥土强度, w/c 由 0.9 降低至 0.6 时, 水泥土强度增幅为 98.9%。

关键词: 螺旋桩芯劲性复合桩; 水灰比; 承载性能; 成桩直径; 射钉试验; 桩身水泥土强度

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2025)01-0018-07

Influence of water cement ratio on the compressive bearing capacity of helix stiffened cement mixing pile

DING Wenlong, ZONG Zhongling*, HUANG Yunhan, ZHUANG Xiaoxuan, FAN Yimin
(School of Civil and Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, Jiangsu, China)

Abstract: As a new type of composite pile, helix stiffened cement mixing pile (HSCMP) is a combination of rigid spiral pile and flexible cement-soil pile, with both types of piles constructed simultaneously in a one-step process. In order to explore the influence of grouting water cement ratio (w/c) on the compressive bearing capacity and pile-forming effect, pile loading test and pin penetration test were carried out on HSCMP with different grouting water cement ratios. The results show that the ultimate bearing capacity and pile diameter of HSCMP increase with the decrease of w/c, and the growth trend slows down when w/c is less than 0.7. The fluctuation range of cement soil strength in HSCMP pile decreases with the decrease of w/c, and the uniformity of cement soil strength in pile body increases. The decrease of w/c can significantly improve the cement soil strength of the pile body. When w/c decreases from 0.9 to 0.6, the strength of cement soil increases by 98.9%.

Key words: HSCMP; water cement ratio; bearing capacity; pile diameter; pin penetration test; cement soil strength of the pile body

0 引言

螺旋桩芯劲性复合桩 (Helix Stiffened Cement Mixing Pile, 简称 HSCMP) 是一种将刚性螺旋桩与柔性水泥土桩进行复合, 两种桩体同步施工一次成桩, 形成的互补增强的劲性复合桩型^[1-2]。HSCMP 不仅安装便捷且桩身整体性好, 一次成桩工艺是在螺旋桩下钻的同时进行压力注浆, 形成复合桩体,

该工艺提高了桩基的成桩效率与承载性能^[3]。

成桩工艺是影响桩基成桩质量与承载性能的主要因素。后注浆工艺是在芯桩安装完成后进行注浆工序, 通过对土体挤压、劈裂等作用, 加强桩基与桩周土的相互作用^[4]。万志辉等^[5]通过试验分析不同成桩工艺对桩基的承载性能及侧摩阻力的影响; XU 等^[6]提出了一种安装带喷嘴隔膜的新型工艺, 通过喷嘴进行喷射灌浆使隔膜膨胀, 与桩周土形成

收稿日期: 2023-07-03; 修回日期: 2024-01-18; 录用日期: 2024-02-22

基金项目: 江苏省重点研发计划 (社会发展) 项目 (BE2021681)。

作者简介: 丁文龙 (1997—), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 研究方向为桩基工程与地基处理。E-mail: 1429380044@qq.com。

*通信作者: 宗钟凌 (1979—), 男, 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。

良好的相互作用。

同步注浆是在安装螺旋桩的同时进行压力注浆, LAEFER 等^[7]通过室内试验研究了在砂土地基中 HSCMP 一次成桩工艺与水泥浆用量间的关系; MANSOUR 和 EL NAGGAR^[8]通过室内试验研究注浆喷嘴位置对 HSCMP 水泥土柱成型的影响, 并分析了 HSCMP 的荷载传递机理; 赵宇^[9]采用后压力注浆以提高螺旋钢管桩的抗压承载性能, 通过室内试验验证了后注浆工艺的可行性, 通过试验结果分析了叶片间距对后压力注浆螺旋桩极限承载能力的影响规律; 宗钟凌等^[10]与赵成昆等^[11]通过现场试验研究了 HSCMP 的分段式同步旋进压力成桩工艺与轴向承载性能, 优化了 HSCMP 现场成桩的施工工艺, 探究了桩身加设套管对其竖向承载性能的影响。

目前国内外学者已经对 HSCMP 黏结直径的影响因素、桩身参数、荷载传递机理及破坏模式等做了一系列的试验分析。但对于 HSCMP 成桩工艺的工艺参数研究较少, 国内学者 ZHUANG 等^[12]通过室内模型试验探究了旋桩速度、钻进速度等工艺参数对于 HSCMP 承载性能的影响, 对于 HSCMP 的注浆工艺参数未做研究, 而水灰比作为注浆工艺参数对成桩质量及成桩直径有较大影响。为此, 本文开展 HSCMP 在黏土中的室内试验, 研究注浆水灰比对 HSCMP 竖向抗压承载性能、成桩直径及桩周

水泥土强度的影响, 并选取取出成桩效果、承载性能及性价比最好的成桩水灰比。本次的模型试验也可为 HSCMP 的工程应用提供工艺参数选取依据。

1 试验概况

1.1 土体准备

为模仿滨海地区的海相软土, 试验用土选用高岭土, 高岭土干粉如图 1 所示, 高岭土的化学成分如表 1 所示。依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[13]中液限和塑限联合测定法, 测得高岭土的 76 g 圆锥锥入深度与含水率关系曲线如图 2 所示, 高岭土的物理性能指标如表 2 所示。高岭土的集配曲线见图 3, 集配曲线较为平缓, 颗粒均匀, 级配良好。

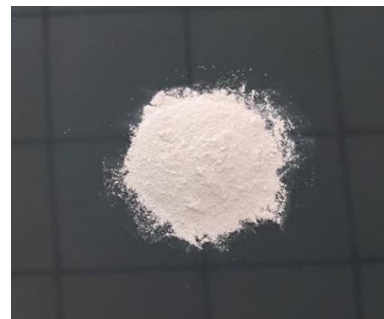


图 1 高岭土干粉

Fig. 1 Dry kaolin powder

表 1 化学成分表

Table 1 Chemical composition

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	灼烧减量
70.16	18.99	0.38	0.2	0.24	0.9	2.4	0.04	0.04	0.04	0.07	6.52

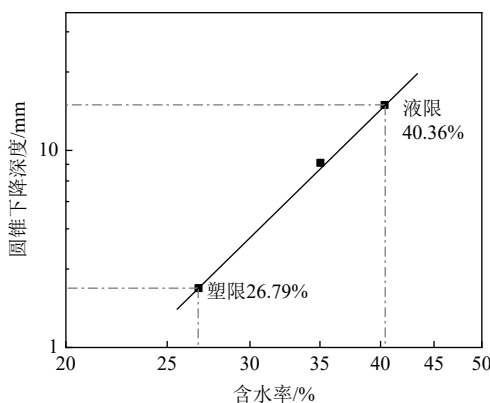


图 2 锥入深度与含水率关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between cone penetration depth and water content

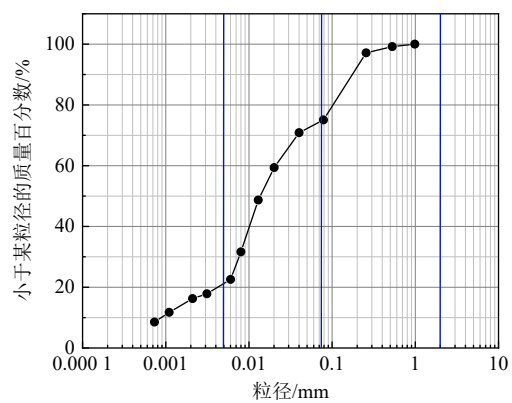


图 3 高岭土集配曲线

Fig. 3 Aggregate distribution curve of kaolin

表 2 物理性能指标表

Table 2 Physical performance index table

相对密度	液限/%	塑限/%	塑性指标
2.536	40.36	26.79	13.57

试验用土使用混凝土单卧轴搅拌机进行制备, 试验土制备时每 20 kg 土加 10 L 水进行搅拌, 试验土搅拌完毕后测得土体含水率为 60%。土体制备时机械搅拌时长应不小于 40 min, 以此保证试验土的均匀性。搅拌至设计时长后将试验土取出,

并使用 3 mm 的不锈钢过滤网过滤掉土杂质，至此试验用土制备完成。

试验用土在制备完成后需排水固结 28 d，待试验用土含水率降至 45%~50%、不排水抗剪强度达到 1.0~2.0 kPa，土体性能与海相软土相近时进行成桩试验。由于黏性土排水固结后土体抗剪强度不均匀，成桩与静载试验时需检测不同深度土体的不排水抗剪强度，为此，本次试验使用 t-bar 法^[14]测量土体不排水抗剪强度，其结果如图 4 所示。

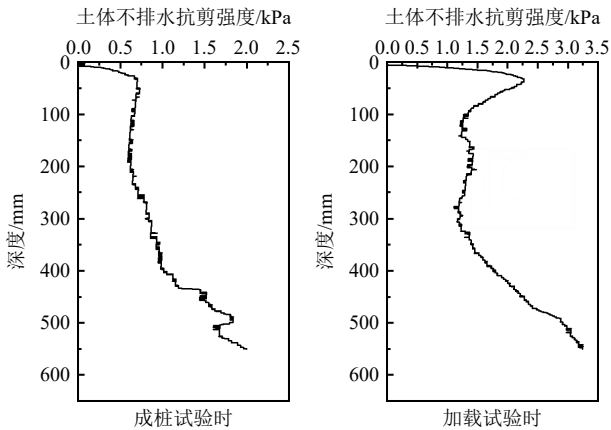


图 4 土体不排水抗剪强度

Fig. 4 Undrained shear strength of the soil

1.2 试验设备与模型桩

试验所用土工箱的尺寸为 2 100 mm×800 mm×1 100 mm。在土工箱底部覆盖一层粗砂，并在粗砂顶部铺设一层土工布，建立排水系统。室内试验的 HSCMP 成桩设备如图 5 所示，设备由旋桩钻机、控制台及注浆设备组成。注浆设备通过输浆管将水泥浆液压送到中心轴，并通过控制台调节注浆压力。旋桩钻机由铰链、旋转接头和电机组成，通过控制台调节旋转速度及下钻速度。

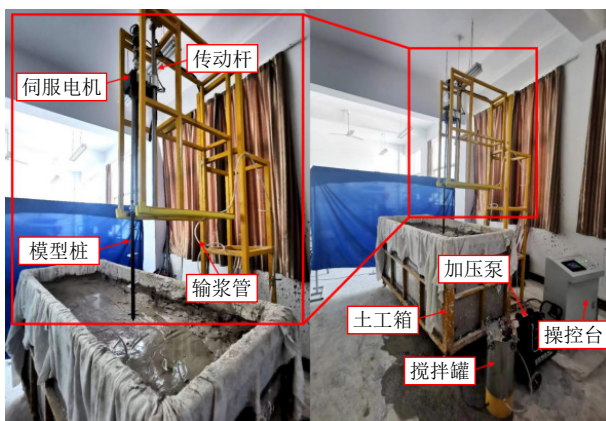


图 5 HSCMP 成桩设备

Fig. 5 Piling equipment of HSCMP

HSCMP 的芯桩为钢管螺旋桩，钢管螺旋桩由钢材加工而成。螺旋叶片直径 $D_H=66$ mm，轴心钢管直径 $D_S=22$ mm，桩长 $L_S=600$ mm，螺旋叶片间

距 $S=160$ mm，首层叶片上部桩身长度 $h_1=100$ mm，底层螺旋叶片下部桩身长度 $h_2=20$ mm，叶片螺距为 22.5 mm。由于现场试验时钢管螺旋桩常用的尺寸为：轴心钢管直径 89 mm，螺旋叶片直径 260 mm^[8]，故本文按照相似比 4 进行缩尺试验。为了减少成桩时叶片对桩周土体的扰动，焊接时将螺旋叶片开口置于同一条线。钢管螺旋桩的结构如图 6 所示。

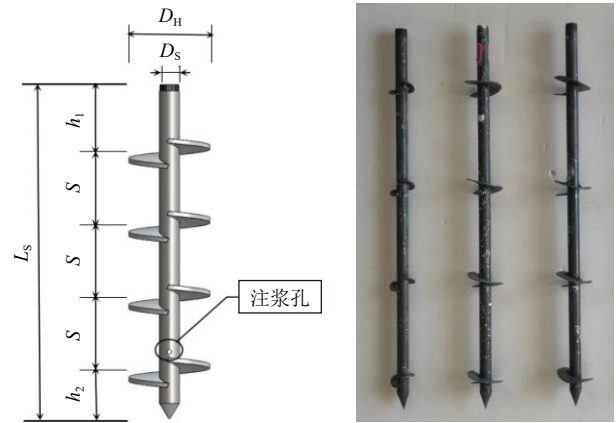


图 6 钢管螺旋桩结构图

Fig. 6 Structural diagram of steel pipe spiral pile

1.3 试验设备与模型桩

(1) 试验方案

为探究水灰比对 HSCMP 的成桩直径、桩身水泥土柱强度及竖向抗压承载性能的影响，本文设计了一组不同水灰比的模型桩试验，共 4 根模型桩，具体试验方案如表 3 所示。4 根模型桩等间距地垂直布置于土工箱内，模型桩距土工箱两侧 350 mm，桩体在土层横向的影响范围满足 3 倍桩径，可忽略边界效应^[15-16]。成桩时采用的是同步旋进注浆工艺，注浆与桩身旋进同步进行。

表 3 试验方案

Table 3 Experimental scheme

桩号	注浆水灰比	旋转速度/ (cm/min)	下转速度/ (cm/min)	注浆压力/ MPa
HSCMP-WC-0.6	0.6			
HSCMP-WC-0.7	0.7	20	25	0.3
HSCMP-WC-0.8	0.8			
HSCMP-WC-0.9	0.9			

(2) 加载方案

加载试验在水泥土强度达到设计强度的 70% 后开始。试验采用位移控制法，下压速度为 2 mm/min。

模型桩的加载设备如图 7 所示。通过 TOPCNC-TC55H 加载设备吊起 100 kg 砝码, 将荷载连续施加到桩头上, 当砝码接触到荷载板时, 试验开始。砝码对桩身产生下压力并引起桩身沉降, 直到桩顶位移急剧增长且承载力不再增大, 即达到破坏荷载时停止加载试验^[17]。4 根桩单独加载, 共进行 4 次加载试验。

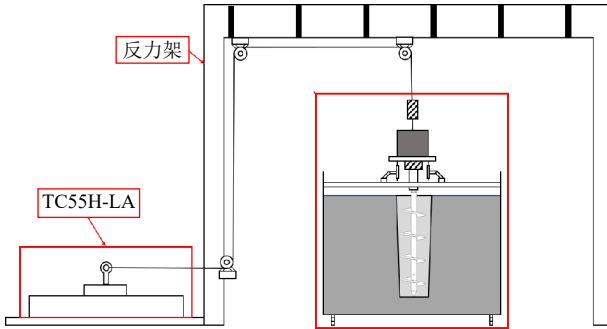


图 7 加载设备

Fig. 7 Loading equipment

(3) 桩身水泥土强度检测方案

桩身水泥土强度检测试验在加载试验后进行, 为降低桩身损伤选用射钉法^[18-19]检测桩周水泥土强度。本次试验选用的射钉设备为瓦斯射钉枪 (45S 型), 用瓦斯射钉枪将标准射钉射入桩周水泥土, 射钉长度为 30 mm, 射钉的贯入长度与桩身水泥土强度存在一定的相关性, 通过试验建立两者关系曲线 (关系式见式 (1)), 推算桩周水泥土强度, 桩身水泥土强度检测设备如图 8 所示。为提高检测结果的准确度, 每根 HSCMP 打入 5 根射钉, 5 根射钉均布于桩身, 并布置于一条线上, 射钉点编号依次为 A、B、C、D、E, 射钉点位置布置图见图 9。

$$Q_u = \left(\frac{T}{17.711} \right)^{\frac{1}{0.3037}} \quad (1)$$

式中: Q_u 为水泥土强度; T 为射钉试验后留在桩体外的射钉强度。



(a) 瓦斯射钉枪 (45S 型) (b) 射钉

图 8 桩身水泥土强度检测设备

Fig. 8 Testing equipment of pile body cement soil strength

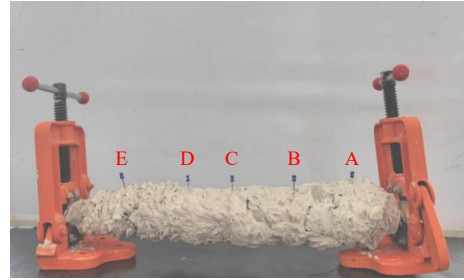


图 9 射钉点位置布置图

Fig. 9 Layout of pin penetration

2 试验结果与分析

2.1 荷载-位移曲线分析

图 10 为模型桩加载试验得到的荷载-位移图, 由曲线可知, 4 根桩的荷载-位移曲线规律大致相同, 4 条曲线均在 1~2 mm 位移值处斜率发生陡变, 故而判定 HSCMP 受压时属于陡变型破坏^[20]。从曲线的整体趋势来看, 荷载-位移曲线可分为以下 3 个阶段: (1) 初始弹性阶段, 此阶段的荷载-位移曲线是线性的, 初始弹性阶段的曲线斜率与桩身刚度成反比, 此阶段斜率越小桩身刚度越大, 由荷载-位移曲线可看出, 注浆水灰比越小, HSCMP 的桩身刚度越大; (2) 非线性陡变阶段, 此阶段的荷载-位移曲线为非线性, 曲线的斜率也在这个阶段迅速增大, HSCMP 的抗压极限承载力也在此阶段内取值; (3) 失效阶段, 此阶段的荷载并没有随着位移的增加而增加, 线段斜率也趋近一固定值。

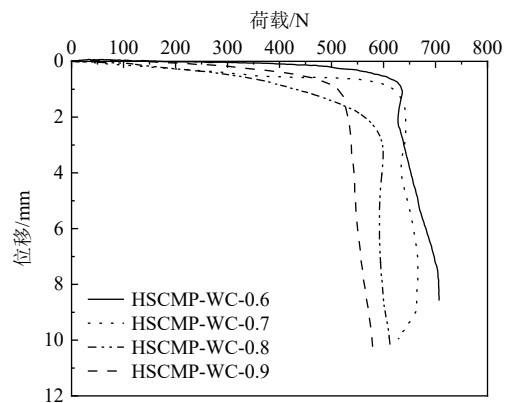


图 10 荷载-位移图

Fig. 10 Load-displacement curves

2.2 极限承载力分析

鉴于本次 HSCMP 的荷载-位移曲线呈陡降型, 曲线中有明显的拐点, 发生陡降起始点对应的荷载值作为 HSCMP 的抗压极限承载力, 由此确定的抗压极限承载力见表 4。由表 4 可知, w/c 由 0.9 降至 0.8 与 w/c 由 0.8 降至 0.7 时所对应的抗压极限承载力增幅分别为 13% 和 7%; 但 w/c 进一步降

低至 0.6 时, 抗压极限承载力不再发生改变。分析原因是在 w/c 未降至 0.7 时, 水泥土黏结直径受 w/c 影响显著, 但当 w/c 达到 0.6 时, 水泥土黏结直径不再受 w/c 影响。

表 4 HSCMP 抗压极限承载力

Table 4 HSCMP ultimate compressive bearing capacity

桩号	注浆水灰比	抗压极限承载力/N	抗压极限承载力对 应位移值/mm
HSCMP-WC-0.6	0.6	640	1.50
HSCMP-WC-0.7	0.7	642	1.75
HSCMP-WC-0.8	0.8	599	3.20
HSCMP-WC-0.9	0.9	530	1.86

2.3 注浆水灰比对成桩效果影响分析

HSCMP 成桩效果如图 11 所示, 4 根模型桩

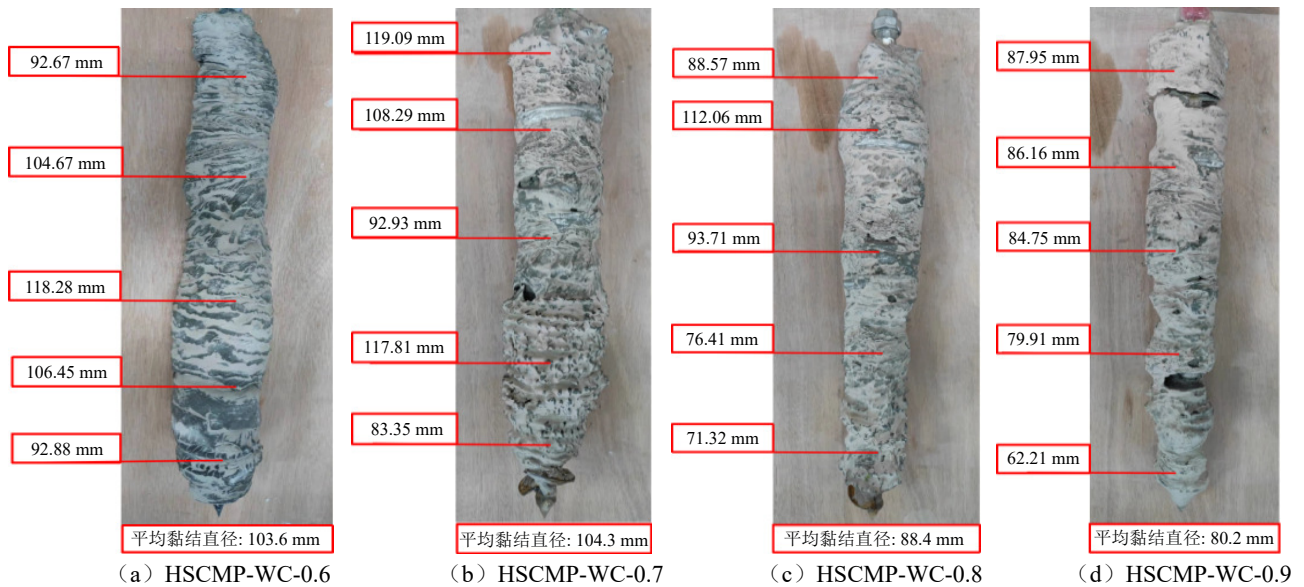


图 11 成桩效果图

Fig. 11 Pile forming effect

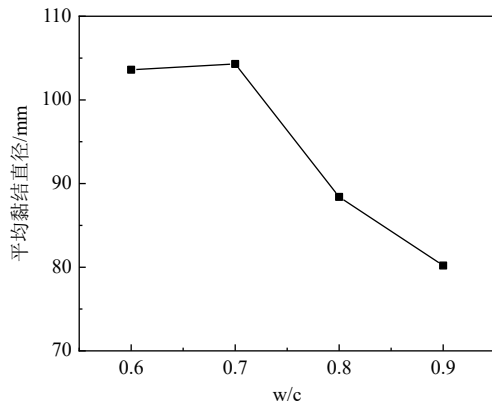


图 12 w/c 与成桩直径关系图

Fig. 12 Relationship between w/c and pile diameter

2.4 注浆水灰比对桩身水泥土强度影响分析

加载试验结束后, 通过瓦斯钢钉枪检测 HSCMP

均为倒圆台状。HSCMP-WC-0.9 桩平均黏结直径为 80.2 mm, HSCMP-WC-0.8 桩平均黏结直径为 88.4 mm, 桩身水泥土质量差, 但桩身表面较为规整; HSCMP-WC-0.6、HSCMP-WC-0.7 两根桩的平均黏结直径分别为 103.6 mm、104.3 mm, 桩身均形成螺旋状水泥土, 且成桩时螺旋桩的旋进速度为下钻速度的两倍, 导致螺纹的间距约为 1/2 的螺距。

图 12 为 w/c 与成桩直径的关系曲线, 当 $w/c \geq 0.7$ 时, 降低 w/c 可以适当增大成桩直径, 但当 w/c 降低至 0.6 后, 成桩直径增幅减小。这是由于 w/c 较小的水泥浆重度大, 对土体的劈裂效果好, 桩身成型后桩周水泥土直径大, 当 w/c 低至 0.7 后水泥浆的劈裂效果达到上限, HSCMP 成桩直径不再随着 w/c 降低而增加, HSCMP 抗压极限承载力也不再有所提升。

的桩身水泥土强度。桩身射钉点位水泥土强度分布如图 13 所示。从图 13 中可以看出, w/c 越低, 桩身水泥土强度越高; $w/c=0.9$ 时, 射钉点位的水泥土强度波动幅度大, 当 w/c 降低至 0.6 时, 5 个射钉点位的水泥土强度偏差较小。在相同注浆量的前提下, w/c 较低时桩身水泥含量较大, 桩身水泥浆分布均匀, 因此桩身各处的水泥土强度偏差不大; 随着 w/c 的增大, 桩身水泥含量降低, 水泥浆未能满布于桩身, 桩身各处水泥土强度波动幅度较大。

为确保桩身水泥土强度取值的准确度, 选取 5 个射钉点位的水泥土强度平均值作为桩身水泥土强度。图 14 为 w/c 与桩身水泥土强度的关系曲线。由图 14 可知, w/c 由 0.9 降低至 0.6 时, 曲线整体的变化趋势呈线性, 水泥土强度随 w/c 的降低而增

大, 其增幅为 98.9%。

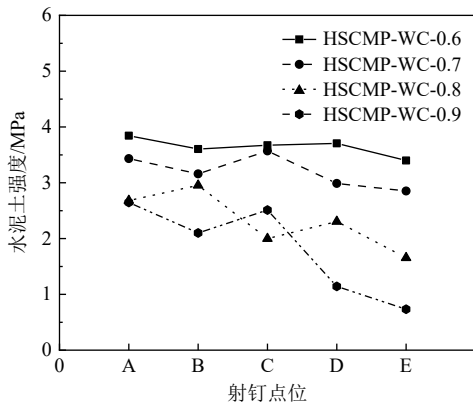


图 13 桩身射钉点位水泥土强度分布图

Fig. 13 Strength distribution of cement soil at the point of nail shooting of pile body

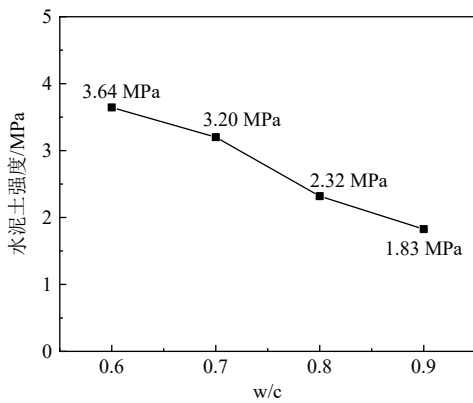


图 14 w/c 与桩身水泥土强度关系图

Fig. 14 Relationship between w/c and cement soil strength of pile body

3 结 论

为探究 w/c 对 HSCMP 竖向抗压承载性能、成桩效果及桩身水泥土强度的影响, 本文通过模型试验及射钉试验得到如下结论:

(1) HSCMP 抗压极限承载力及成桩直径随着 w/c 降低呈增大趋势, 当 w/c 小于 0.7 时趋势变缓。

(2) w/c 由 0.9 降低至 0.6 时, 桩身各处的水泥土强度波动幅度减小, 当 w/c=0.6 时, 桩身各处水泥土强度趋于一致。

(3) w/c 的降低可显著提升桩身水泥土强度, w/c 由 0.9 降低至 0.6 时, 水泥土强度增幅为 98.9%。

由于模型试验规模和尺寸相对较小, 试验用土也与工程存在一定差距, 本文只是基于试验结果总结出了注浆水灰比对承载性能及桩身水泥土强度的影响, 这还有待实际工程的进一步检验。

参考文献

- 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.
- 邓亚光, 郑刚, 陈昌富, 等. 劲性复合桩技术综述[J]. 施工技术, 2018, 47(增刊 4): 262-264.
DENG Yaguang, ZHENG Gang, CHEN Changfu, et al. Review of SCM composite column pile[J]. Construction Technology, 2018, 47(S4): 262-264.
- VICKARS R A, CLEMENCE S P. Performance of helical piles with grouted shafts[C]//New Technological and Design Developments in Deep Foundations. Denver, Colorado, USA. 2000: 327-341.
- WANG G S, HONG B N, LIU X, et al. Experimental study on the shear properties of soil around piles with permeation grouting[J]. Applied Sciences, 2023, 13(1): 621.
- 万志辉, 戴国亮, 龚维明, 等. 不同成桩工艺对后压浆灌注桩承载特性影响的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(2): 231-236.
WAN Zhihui, DAI Guoliang, GONG Weiming, et al. Experimental study on influence of different piling techniques on bearing characteristics of post-grouting bored piles[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(2): 231-236.
- XU M J, ZHANG F Y, NI P P, et al. Load-settlement behaviour of membrane-confined grouted pile: experimental and analytical study[J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(5): 2777-2793.
- LAEFER D F, MENNINGER N E, HERNANDEZ W E. Grouting patterns and possibilities with helical piers[C]//Presented at Underground Construction in Urban Environments. New York, USA. 2005.
- MANSOUR M A, EL NAGGAR M H. Optimization of grouting method and axial performance of pressure grouted helical piles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, 59(5): 702-714.
- 赵宇. 注浆式螺旋钢管桩抗压承载力试验研究及设计

- 方法[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- ZHAO Yu. Experimental study and design method of compressive bearing capacity of grouting spiral steel pipe pile[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [10] 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.
- ZONG Zhongling, ZHUANG Xiaoxuan, HUANG Yunhan, et al. Experimental study on uplift capacity of pressure grouted helical piles[J]. The Ocean Engineering, 2022, 40(1): 160–166.
- [11] 赵成昆, 宗钟凌, 张魁, 等. 海相软土区注浆螺旋桩承压性能试验研究[J]. 江苏海洋大学学报 (自然科学版), 2021, 30(2): 66–71.
- ZHAO Chengkun, ZONG Zhongling, ZHANG Kui, et al. Experimental study on bearing capacity of grouting screw pile in marine soft soil area[J]. Journal of Jiangsu Ocean University (Natural Science Edition), 2021, 30(2): 66–71.
- [12] ZHUANG X X, ZONG Z L, HUANG Y H, 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.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test Methods of Soils for Highway Engineering: JTG 3430—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [14] 贾宁, 孟庆辉, 李振华, 等. T型触探测试软黏土不排水抗剪强度工程实践[J]. 工程勘察, 2016, 44(9): 17–21, 35.
- JIA Ning, MENG Qinghui, LI Zhenhua, et al. Engineering practice of undrained shear strength determination of soft soil by T-bar penetration test[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2016, 44(9): 17–21, 35.
- [15] YANG J. Influence zone for end bearing of piles in sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(9): 1229–1237.
- [16] 邵康, 苏谦, 刘凯文, 等. 竖向受压下考虑安装扰动螺旋钢管桩数值模拟分析与现场载荷试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(12): 2570–2581.
- SHAO Kang, SU Qian, LIU Kaiwen, et al. Field test and numerical analysis of a helical steel pile under vertical compression loads considering installation effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(12): 2570–2581.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Testing of Building Foundation Piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [18] 宋人心, 傅翔, 王五平, 等. 混凝土含水率对射钉法影响的试验研究[J]. 施工技术, 2005, 34(4): 44–45.
- SONG Renxin, FU Xiang, WANG Wuping, et al. Study on effect of water-content coefficient of concrete upon pin penetration test[J]. Construction Technology, 2005, 34(4): 44–45.
- [19] 周孝正, 蔡正咏. 射钉法检测硬化混凝土强度的试验研究[J]. 水力发电, 1991(12): 56–57, 50.
- ZHOU Xiaozheng, CAI Zhengyong. Experimental study on the strength of hardened concrete by nail-shooting method[J]. Hydraulic Power, 1991(12): 56–57, 50.
- [20] 刘金砺. 桩基础设计与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- LIU Jinli. Design and Calculation of Pile Foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1990.