

DOI: 10.3969/j.issn.2096-8248.2024.02.011

H-V 组合荷载作用下 HSCM 桩承载性能*

郑家昌, 宗钟凌, 黄蕴晗, 金 伟, 范毅敏, 高霖宇, 郭承宇, 丁文龙, 王卓群

(江苏海洋大学 土木与港海工程学院, 江苏 连云港 222005)

摘要:螺旋桩芯劲性复合桩(helix stiffened cement mixing pile, HSCM 桩)是由螺旋桩芯与水泥土桩劲性复合而成的新型桩基。为研究水平-竖向(H-V)组合荷载作用下 HSCM 桩的承载性能, 基于自制土工箱, 开展 HSCM 桩室内模型试验研究, 设计并制作 3 组共 12 根 HSCM 模型桩进行 H-V 组合荷载试验, 分析加载角度与螺旋叶片数量对桩基承载性能的影响。试验结果表明: 上拔荷载分量对桩基水平极限承载性能有不利影响; 叶片数量越多, HSCM 桩成桩质量越好, H-V 组合荷载作用下承载力越大。

关键词:螺旋桩; 劲性复合桩; 组合加载; 模型试验

中图分类号: TU476 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-8248(2024)02-0081-08

引用格式: 郑家昌, 宗钟凌, 黄蕴晗, 等. H-V 组合荷载作用下 HSCM 桩承载性能[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2024, 33(2): 81-88.

Bearing Performance of HSCM Piles under Combined H-V Loading

ZHENG Jiachang, ZONG Zhongling, HUANG Yunhan, JIN Wei, FAN Yimin,
GAO Jiyu, GUO Chengyu, DING Wenlong, WANG Zhuoqun

(School of Civil and Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

Abstract: Helix stiffened cement mixing pile (HSCM pile) is a new type of pile foundation composed of a spiral pile core and a cement soil pile. In order to study the bearing performance of helix stiffened cement mixing piles (HSCM piles) under combined horizontal-vertical (H-V) load, three groups of 12 HSCM model piles were designed and fabricated for conducting H-V combined load tests, aiming to analyze the effects of the loading angle and the number of helical blades on the bearing performance of the pile foundation. The test results show that appropriately increasing the number of blades in HSCM pile core can improve the integrity of the pile body and improve the load-bearing performance of the pile foundation under the H-V combined load. The uplift load component has a negative impact on the horizontal ultimate bearing capacity of the pile foundation, while the shape of the pile body has a small impact on the horizontal bearing capacity.

Key words: helical pile; rigid composite pile; combined loading; model test

近年来国内外学者对组合荷载作用下桩的承载性能进行了试验与理论研究。胡伟等^[1]研究了螺旋

桩斜向抗拔承载特性, 结果表明上拔荷载可以提高螺旋桩的水平方向承载力。饶文昌等^[2]通过案例分

* 收稿日期: 2023-11-14; 修订日期: 2024-04-07

基金项目: 江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2021681)

作者简介: 郑家昌(1996—), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为桩基础工程, (E-mail) 2021220737@jou.edu.cn。

通信作者: 宗钟凌(1979—), 男, 山东菏泽人, 教授, 博士, 研究方向为复合桩基设计与软土地基处理、复合材料及组合结构设计理论等, (E-mail) jousongzhl@jou.edu.cn。

析与理论论证相结合的方式发现,桩身轴力会影响水平承载力,地基土中桩身长度与桩长比值在 0.9 以下时需要考虑竖向荷载对桩身产生的附加弯矩影响。李龙起等^[3]进行了室内缩尺试验与数值模拟,发现竖向荷载存在且横向荷载相对较大时 $p-\Delta$ 效应起主导作用。Meyerhof 等^[4-6]提出了破坏包络曲线的半经验公式,桩基的极限承载力破坏包络曲线可近似视为椭圆形。Iovino 等^[7]研究证明轴向压荷载可以提高群桩的侧向承载力,并推导出广义力空间中的破坏包络曲线。文松霖等^[8]通过数值模拟研究桩的破坏机理,结果表明不同荷载之间会相互影响,进而导致破坏包络线椭圆中心不在坐标原点上,并基于 Meyerhof 的包络曲线提出了变式。邹新军等^[9]进行了 V-H 组合荷载的试验研究,结果表明预先施加 0.5~0.6 的极限竖向荷载时可以达到最大水平承载力。黄挺等^[10]进行了刚性桩的斜向抗拔试验研究,提出关于桩土界面摩擦系数的破坏包络曲线模型。

螺旋桩芯劲性复合桩(HSCM 桩)又称压力注浆螺旋桩,是一种新型复合桩。该桩型将刚性螺旋桩与柔性复合桩进行组合,解决了螺旋桩承载性能不足与桩身屈曲的问题。HSCM 桩采用同步施工一次成桩技术,提高材料的利用率,减少水泥用量,缩短施工工期。目前有关 HSCM 桩的组合承载性能研究较少,影响了其进一步发展应用。本文通过科学地分析与试验,对 HSCM 桩的适用范围与前景进行深入研究。

HSCM 桩作为一种新型复合桩基,在沿海软土地区得到了推广应用。目前,针对 HSCM 桩承载性

能的研究主要集中在单一竖向荷载作用方面。高霁宇等^[11]对 HSCM 桩水平承载性能进行了研究,提出了 HSCM 桩的归一化水平承载力修正计算公式。Zhuang 等^[12]验证了 HSCM 桩相比螺旋桩成桩直径会扩大 20% 以上,且增加螺旋叶片数量可以提高桩身完整度。Mansour 等^[13]对螺旋桩芯劲性复合桩在砂土地基中的注浆方式进行了研究,发现 HSCM 桩的侧摩阻力高于螺旋桩,且注浆口构造及位置对桩径也有影响。宗钟凌等^[14]为验证 HSCM 桩的成桩效果进行了现场足尺试验,并研究了桩基的极限抗拔承载性能,提出了抗拔极限承载力实用计算方法。

HSCM 桩不仅承受竖向荷载,还有可能受到较大的水平荷载作用。例如作为输电杆塔、风机等高耸结构的基础时,水平和竖向荷载会同时作用于桩基。但国内外针对组合荷载作用下 HSCM 桩承载性能的研究相对较少。为此,本文基于自制成桩设备,开展室内模型试验,研究 HSCM 桩在 H-V 组合荷载作用下的承载性能。本次试验设计并制作 3 组共 12 根 HSCM 模型桩进行 H-V 组合荷载试验,分析加载角度与螺旋叶片数量对桩承载性能的影响。试验采用位移控制器匀速加载,相比分级加载更符合实际工程荷载变化情况。

1 试验概况

1.1 模型桩设计参数与试验方案

HSCM 桩身是以螺旋桩为桩芯,外层包裹水泥土层而形成的一种组合桩基结构,如图 1 所示。

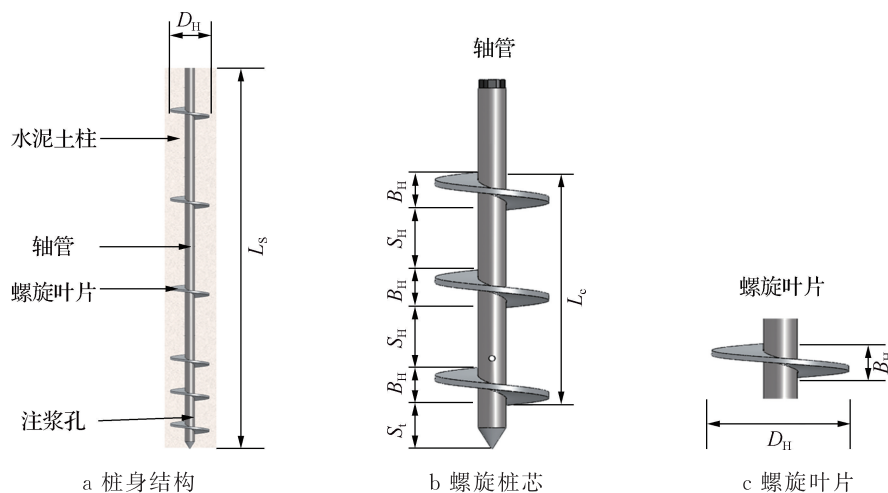
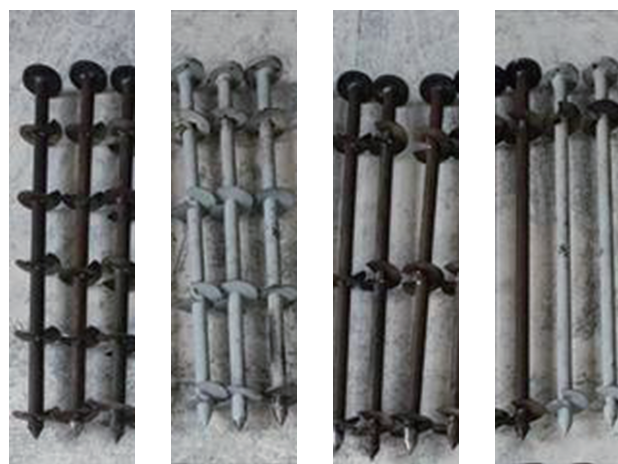


图 1 HSCM 桩示意图

Fig. 1 Schematic of HSCM pile

模型桩的桩芯钢管(轴管)壁厚为 1 mm,直径为 22 mm。螺距 B_H 为 20 mm,叶片直径 D_H 为 66 mm,总桩长 L_S 为 600 mm,有效桩长 L_e 为 500 mm,最底层叶片与桩底距 S_1 为 20 mm,注浆孔直径为 3 mm,叶片间距 S_H 随叶片数量发生变化。

为研究不同叶片数量 n 与加载角度对 HSCM 桩斜向承载性能的影响,设计 3 组模型试验,以加载角度编号。根据倾斜加载的荷载包络曲线特征,30°~60°角度间极限承载力相差较大。因此本文一组到三组加载角度分别为 45°,60°,30°,每组 4 根桩,模型桩芯实物如图 2 所示,叶片排布如图 3 所示。试验取叶片数量 $n=4$ 模型桩作为对照组,钻进速度 $v=250$ mm/min。模型桩以 HSCM-加载角度-叶片数量(n)命名,如 HSCM-30-2 代表加载角度为 30°、叶片数量 $n=2$ 的模型桩。



a 5 叶片桩芯 b 4 叶片桩芯 c 3 叶片桩芯 d 2 叶片桩芯

图 2 模型桩芯

Fig. 2 Model pile core

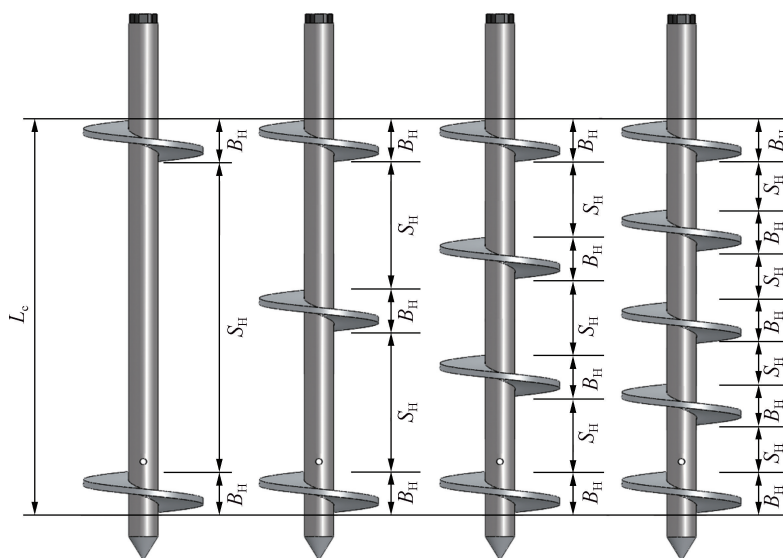


图 3 模型桩芯叶片排布

Fig. 3 Arrangement of blades of model pile core

1.2 土层填筑与模型安装

试验在长×宽×高=2.1 m×0.8 m×1.0 m 尺寸的模型箱中进行。模型箱设有排水系统,底部铺设粗砂并埋置排水板,后铺设土工布,用于隔离土样与粗砂。本次试验采用高岭土模拟土基,高岭土物理性质相对稳定,试验过程中不会因为压缩产生过大沉降。将制备完成的土样加入模型箱中,土层上方铺设土工布,并使用粗砂堆载预压。预压 14 d,测得土体参数如表 1 所示。

表 1 高岭土物理特性

Table 1 Physical properties of kaolin

相对密度	含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数	重度/(kN·m ⁻³)
2.8	55~60	78	33	45	0.49~0.60	17.2

土体强度采用 T-bar 法进行测量,通过式(1)得出土体强度,试验测得土体强度曲线如图 4 所示。

$$C_u = \frac{(F_{total} - F_{rod})}{N_T A_T} \quad (1)$$

式中: C_u 为土体不排水抗剪强度; F_{total} 为 T-bar 插入土体期间的总阻力; F_{rod} 为光杆插入土体期间的总阻力; N_T 为 T-bar 承载能力因子, 本文中取为 $10.5^{[15]}$; A_T 为丙烯酸棒水平投影面积, 本文中取为 $2\,320\text{ mm}^2$ 。

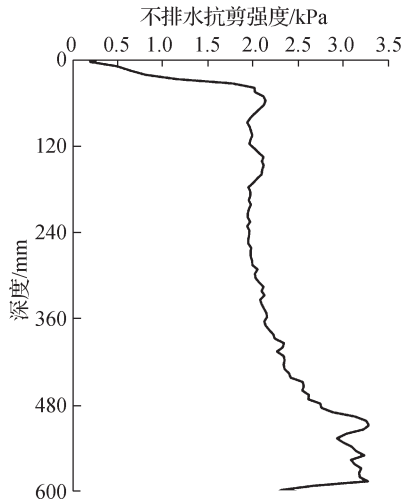


图4 T-bar 不排水抗剪强度随深度变化曲线

Fig. 4 T-bar test undrained shear strength variation curve with depth

HSCM 桩成桩需要预先设定点位。为减少边界效应的影响, 本次试验模型桩与每根桩的位置沿长边均匀分布, 每个桩与土工箱侧壁距离为桩径的 $4\sim 7$ 倍^[16], 成桩过程如图 5 所示。

成桩设备包括压力注浆系统、旋桩系统与控制系统, 能够在模型桩旋进的同时进行压力注浆。水泥浆的水灰比为 0.6 , 注浆压力 0.2 MPa , 加入 0.2% (质量分数) 减水剂保证水泥浆和易性, 注浆压

力由压力注浆系统控制。



图5 成桩过程

Fig. 5 Rotary pile process

1.3 加载试验

加载试验采用位移法控制, 加载速率为 1 mm/min , 加载装置示意图如图 6 所示。本次试验通过调节土工箱位置调整加载角度, 试验前使用量角器对桩轴与加载钢丝绳之间夹角进行测量, 确保加载角度一定。通过位移控制器施加荷载, 并由反力架调整荷载施加方向, 桩顶水平或竖向位移达到 10 mm 时停止试验。在桩顶加载处安装加载板并设置位移传感器测量位移。荷载传感器设于钢丝绳上, 保证钢丝绳加载角度与传感器加载角度一致。为减少误差, 加载板上设置 3 个 LVDT 位移传感器, 实际加载设备如图 7 所示。

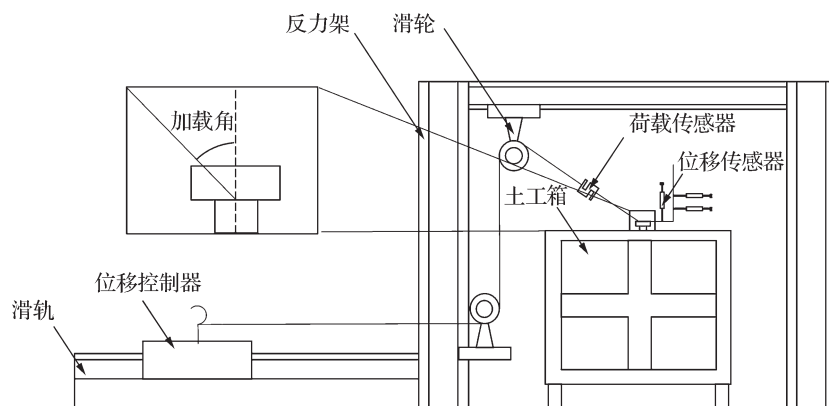


图6 加载装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the loading device

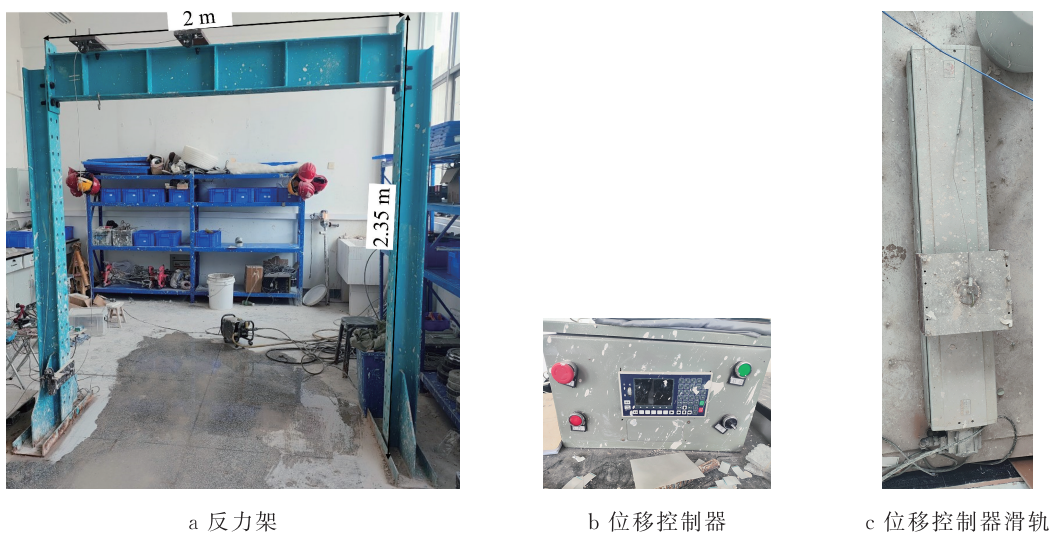


图 7 实际加载设置
Fig. 7 Actual loading device

2 结果与分析

2.1 成桩效果分析

加载试验完成后,将所有试验桩拔出可以直观观测成桩的效果,如图 8 所示。HSCM 桩成桩直径

在桩身上、中、下 3 个部位变化最大,因此取埋置深度 100,300,500 mm 处桩径进行测量,得到上部桩径 D_T 、中部桩径 D_M 、下部桩径 D_B ,计算平均桩径 $D_{Av} = (D_T + D_M + D_B) / 3$,并对每根桩称质量,得到桩重 ω ,结果如表 2 所示。



图 8 HSCM 桩实际成桩效果
Fig. 8 Actual pile forming effect of HSCM pile

由图 8 可以直观看出,2 叶片桩桩径较小,且部分桩分布不均匀,一组桩 3 和 4 叶片与三组桩 3 叶片桩径自上而下递减,桩身形状为倒圆台型。二组 4 叶片桩成桩直径中间大两端小,桩身形状接近梭形。而 5 叶片桩上、中、下 3 部分桩径变化不大,具有较高的完整性与连续性。上述结果表明,水泥土桩身完整性与螺旋叶片数量有关,增加叶片数量可以提高搅拌效率,使土体与水泥浆充分混合,成桩桩

身形状接近于圆柱体。二组与三组 2 叶片桩在无叶片区域,土体与水泥浆混合效果较差,难以形成空腔,导致水泥土无规则分布。

图 9 为 3 组模型桩身平均直径对比结果。可以看出, D_{Av} 在 3 叶片到 4 叶片时桩径变化在 20% 以下,而 2 叶片桩与其他桩 D_{Av} 相差 13%~56%,变化较大。叶片数量在 3 叶片以上时,增加叶片数量只能提高对周边土体的搅拌效率,对成桩直径影响

较小;而低于3叶片时,减少叶片数量会降低桩身完整性。

表2 桩身参数
Table 2 Pile parameters

编组	叶片数量 n	D_T/mm	D_M/mm	D_B/mm	D_{Av}/mm	w/N
一组	2	73	76	73	74.0	46.76
	3	118	103	80	100.3	51.35
	4	119	108	97	108.0	53.15
	5	97	100	95	97.3	50.04
二组	2	73	79	86	79.3	42.56
	3	86	95	88	89.6	55.82
	4	90	114	73	92.3	51.54
	5	86	106	88	93.3	48.64
三组	2	75	73	60	69.3	41.00
	3	110	100	85	98.3	45.69
	4	90	95	97	94.0	54.58
	5	88	100	98	95.3	47.75

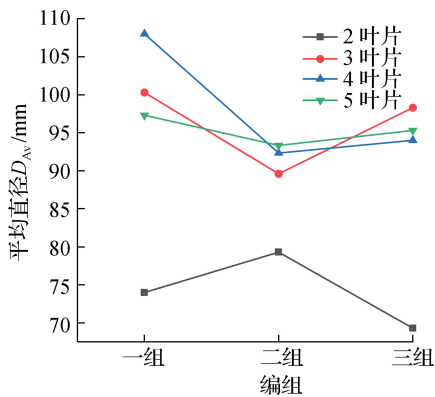


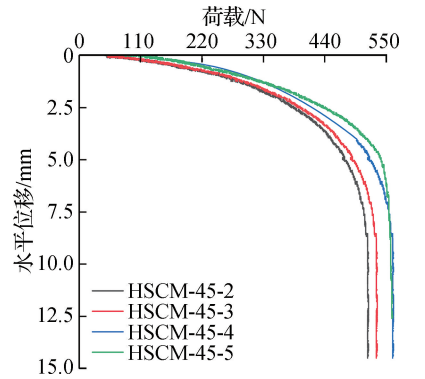
图9 模型桩身平均直径对比

Fig. 9 Comparison of average diameters of model pile

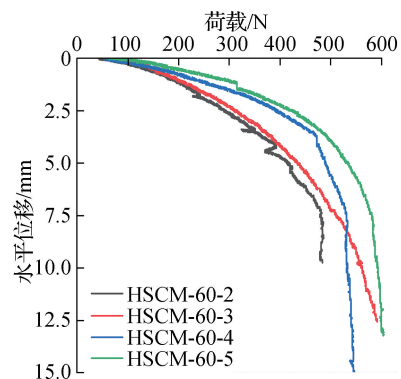
2.2 荷载位移曲线

根据试验结果分析,最大竖向位移不超过3 mm,桩体最大旋转角度小于 1° ,因此本文试验以水平位移作为桩基破坏判断标准。

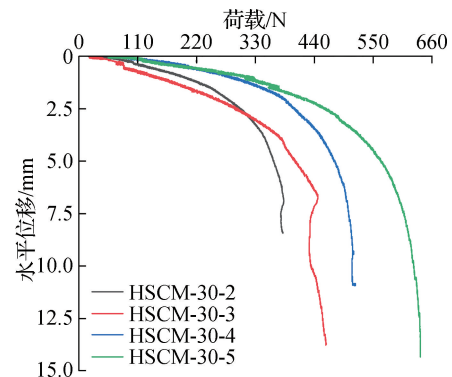
不同加载角度试验桩的荷载—水平位移曲线如图10所示。曲线可以分为线性、非线性、破坏3个阶段。可以看出,在荷载—水平位移曲线的线性部分,HSCM-30-3刚度低于HSCM-30-2,其余桩初始刚度随叶片数量增加而提高。从桩身形状分析,HSCM-30-2的桩身不完整,桩下部分无叶片处水泥土层少,桩径接近螺旋桩直径;加载中主要由螺旋桩芯受力,导致HSCM-30-2前期刚度较高但实际承载力较低。



a 一组加载曲线



b 二组加载曲线



c 三组加载曲线

图10 H-V组合加载荷载—水平位移曲线

Fig. 10 Load-horizontal displacement curve of H-V combined loading

2.3 极限承载力分析

斜向荷载作用下极限承载力取值方法主要有桩顶沉降曲线法与桩顶合成位移曲线法。本文通过桩顶沉降曲线法进行取值。桩顶沉降曲线法以水平与竖向分位移为取值标准,本文取最大水平位移达到10%叶片直径时对应荷载为桩基极限荷载^[16]。通过极限荷载计算每组水平承载力与竖向承载力,结

果如表 3 所示。可以看出, 每组桩 P_T 随叶片数量的增加而提高, 平均每增加 1 个叶片承载力提高 8.7%。这是因为增加叶片数量可以使土与水泥浆充分搅拌, 提高桩身完整性, 从而增大桩土接触面积, 进而增大承载力。因此, 增加叶片数量可以提高 HSCM 桩在 H-V 组合荷载下的极限承载力。

表 3 极限承载力

Table 3 Ultimate carrying capacity

桩号	HSCM 桩 极限承载力 P_T/N	HSCM 桩 承载力水平 分量 P_{HT}/N	HSCM 桩 承载力垂直 分量 P_{VT}/N
HSCM-30-2	383.20	191.60	331.86
HSCM-30-3	443.40	221.70	384.00
HSCM-30-4	500.10	250.05	433.10
HSCM-30-5	598.10	299.05	517.97
HSCM-45-2	501.60	354.68	354.68
HSCM-45-3	517.16	365.69	365.69
HSCM-45-4	546.83	386.67	386.67
HSCM-45-5	557.21	394.00	394.00
HSCM-60-2	466.46	403.96	233.23
HSCM-60-3	487.49	422.18	243.75
HSCM-60-4	519.76	450.12	259.88
HSCM-60-5	567.66	491.61	283.83

为研究竖向荷载对 HSCM 桩水平承载力的影响, 对比每个加载组水平承载力, 如图 11 所示。30° 加载组的 $P_{HT}/P_{VT}=0.58$, 30° 加载组水平承载力最小。45° 加载组 $P_{HT}/P_{VT}=1$, 水平承载力平均为 30° 加载角的 1.59 倍。60° 加载组 $P_{HT}/P_{VT}=1.73$, 水平承载力平均为 45° 加载组的 1.17 倍。因此, 提高上拔荷载会降低水平荷载, 且影响效果与 P_{HT}/P_{VT} 为非线性变化, 在 $P_{VT}/P_{HT}>1$ 时提升效果较小, 在 $P_{VT}/P_{HT}<1$ 时水平承载力下降较明显。

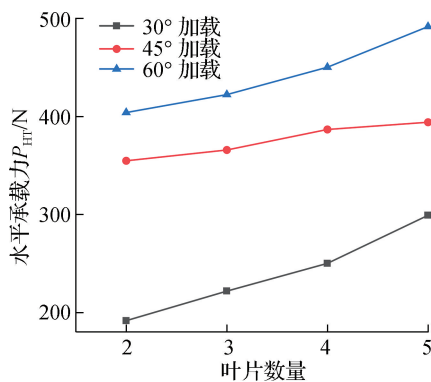


图 11 水平承载力曲线

Fig. 11 Horizontal bearing capacity curve

对比叶片数量相同的 HSCM 桩的水平承载力可以看出, 3 组模型桩 5 叶片桩的桩身形状相近, HSCM-60-5S 桩的 P_{HT} 是 HSCM-45-5 桩的 1.25 倍, HSCM-45-5 桩的 P_{HT} 是 HSCM-30-5 桩的 1.32 倍。HSCM-30-4, HSCM-45-4 和 HSCM-60-4 桩身形状有差异, HSCM-60-4 桩的 P_{HT} 是 HSCM-45-4 桩的 1.16 倍, HSCM-45-4 桩的 P_{HT} 是 HSCM-30-4 桩的 1.55 倍。两组变化规律基本一致, 表明桩身形状对水平承载力影响较小。这是因为水平承载力主要由桩侧的土体提供, 与桩的水平投影面积相关, 桩径相同时, 桩侧土体面积变化较小。

3 结论

通过模型试验, 对 HSCM 桩的斜向加载承载性能进行了研究, 并通过极限承载力与桩身尺寸分析 HSCM 桩身形状对斜向抗拔承载力的影响, 得出以下结论。

(1) 叶片数量在 2 及以下时, HSCM 桩的桩身形状不均匀, 完整性与连续性较差, 叶片数量为 3 和 4 时桩身较为完整但分布不均匀, 5 叶片桩身形状接近圆柱体。

(2) 对 HSCM 桩施加上拔荷载会降低水平承载力, 影响效果呈非线性分布。当 $P_{VT}/P_{HT}>1$ 时变化较小, 当 $P_{VT}/P_{HT}<1$ 时水平承载力下降较为明显。

(3) 叶片数量在 3 及以下时, 增加叶片数量可以提高 HSCM 桩身直径, 叶片数量大于 3 时, 增加叶片数量对桩身直径影响较小。增加叶片数量可有效提高 H-V 组合荷载作用下 HSCM 桩的承载力。

根据以上结论, HSCM 桩设计时需要考虑实际受荷情况, 当 $P_{VT}/P_{HT}<1$ 时需要考虑竖向荷载对水平承载力的影响, 对 HSCM 桩成桩叶片密度进行调整。

参考文献:

- [1] 胡伟, 杨瑶, 刘顺凯, 等. 光伏支架螺旋桩斜向拉拔承载特性试验研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(12): 50-61.
- [2] 饶文昌, 竺明星. 组合荷载作用下基桩水平承载特性的简化半解析解[J]. 中外公路, 2021, 41(6): 6-13.
- [3] 李龙起, 赵皓琛. 组合荷载作用下倾斜桩基横向承载特性[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(6): 124-134.
- [4] MEYERHOF G G, RANJAN G. The bearing capacity of rigid piles under inclined loads in sand. I: vertical piles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1972, 9(4):

- 430-446.
- [5] MEYERHOF G G, RANJAN G. The bearing capacity of rigid piles under inclined loads in sand. III: pile groups[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1973, 10(3): 428-438.
- [6] MEYERHOF G G. The bearing capacity of rigid piles and pile groups under inclined loads in clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1981, 18(2): 297-300.
- [7] IOVINO M, MAIORANO R, DE SANCTIS L, et al. Failure envelopes of pile groups under inclined and eccentric load[J]. Géotechnique Letters, 2021, 11(4): 247-253.
- [8] 文松霖,王孝兵. 桩基承载力包络线基本特性数值模拟研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(12): 42-46.
- [9] 邹新军,王奕康,周密. 上硬下软地层中桩盘复合基础V-H承载特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(2): 145-153.
- [10] 黄挺,罗成未,焦澳,等. 密实砂中刚性锚桩斜向抗拔承载特性[J]. 工业建筑, 2023, 53(3): 180-187.
- [11] 高霁宇,宗钟凌,黄蕴晗,等. 螺旋桩芯劲性复合桩水平承载特性数值模拟分析[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2024, 33(1): 99-106.
- [12] ZHUANG Xiaoxuan, ZONG Zhongling, HUANG Yunhan, 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): 992-1011.
- [13] MANSOUR M, NAGGAR M H E. Optimization of grouting method and axial performance of pressure-grouted helical piles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, 59(5): 702-714.
- [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] GERKUŞ H. Model experiments to measure yield thresholds and trajectories for plate anchors and develop a new anchor concept[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2016.
- [16] NOWKANDEH M J, CHOBBASTI A J. Numerical study of single helical piles and helical pile groups under compressive loading in cohesive and cohesionless soils[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(5): 4001-4023.

(责任编辑:褚金红 实习编辑:易圣杰)

著作权使用声明

为适应我国信息化建设发展的需要,有力地促进科研学术信息的交流和信息资源的开发利用,扩展广大作者的学术交流渠道和促使科研成果的迅速转化,本刊已先后加入了《中国学术期刊(光盘版)》《中国期刊网》、由国家科技部组织实施的原中国科技信息研究所万方数据网络中心具体负责运作的“万方数据网”、由科学技术部西南信息中心所创办的大型综合性《中文科技期刊数据库》,并成为上述《中国学术期刊(光盘版)》《中国期刊网》《中国学术期刊综合评价数据库》《中国核心期刊(遴选)数据库》以及“万方数据——数字化期刊群”《中文科技期刊数据库》全文收录期刊,它们将以网络和光盘等不同的方式向社会提供文献信息服务。凡向本刊所投稿件,稿件发表后,所有署名作者自愿将稿件的出版权(包括但不限于纸版、复制、汇编、发行、信息网络传播等)转让给本刊,同意稿件进入本刊所加入的文献数据库,各数据库的著作权使用费与文章评审费相抵,不再另行支付。如有不同意者,请另投他刊或特别声明需另作处理。

《江苏海洋大学学报(自然科学版)》编辑部