

DOI:10.3969/j.issn.2096-8248.2024.01.013

螺旋桩芯劲性复合桩水平承载特性数值模拟分析*

高霖宇,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:螺旋桩芯劲性复合桩(HSCMP)是一种将刚性螺旋桩与柔性水泥土桩进行复合,形成互补增强的劲性复合桩型。针对 HSCMP 水平承载性能,建立数值分析模型,进行参数化分析,研究水泥土无侧限抗压强度与桩周土不排水抗剪强度比(q_u/S_u)、叶片直径与螺旋桩桩径比(D/d)对 HSCMP 的水平荷载—位移曲线、桩身位移、桩身弯矩的影响。结果表明:HSCMP 的桩身位移及弯矩随着 q_u/S_u 和 D/d 的增加逐渐减小;HSCMP 的水平极限承载力随着 q_u/S_u 的增大先线性增长后趋于稳定,随着 D/d 的增大近似线性提高。最后提出了 HSCMP 归一化水平极限承载力修正计算公式。

关键词:螺旋桩;劲性复合桩;水平承载力;数值模拟

中图分类号:TU476

文献标志码:A

文章编号:2096-8248(2024)01-0099-08

引用格式:高霖宇,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.

Numerical Simulation Analysis of Horizontal Bearing Behavior of Helix Stiffened Cement Mixing Pile

GAO Jiyu, ZONG Zhongling, HUANG Yunhan, ZHUANG Xiaoxuan, FAN Yimin

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

Abstract: Helix stiffened cement mixing pile (HSCMP) is a rigid composite pile type that combines rigid screw piles and flexible cement-soil piles to form complementary reinforcements. Aiming at the horizontal bearing performance of HSCMP, a numerical analysis model was established, and parametric analysis was carried out to study the ratio of cement-soil unconfined compressive strength to the undrained shear strength of soil around the pile (q_u/S_u), the blade diameter to the pile diameter ratio of the screw pile (D/d) effects on the horizontal load—displacement curve, pile displacement, and pile bending moment of HSCMP. The results show that the pile displacement and bending moment of HSCMP gradually decrease with the increase of q_u/S_u and D/d ; the horizontal ultimate bearing capacity of HSCMP increases linearly and then tends to be stable with the increase of q_u/S_u . It increases approximately linearly with the increase of D/d , the HSCMP normalized horizontal ultimate bearing capacity correction calculation formula is proposed.

Key words: helix pile; stiffened mixing pile; horizontal bearing capacity; numerical simulation

* 收稿日期:2023-07-06;修订日期:2023-10-10

基金项目:江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2021681)

作者简介:高霖宇(1999—),男,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为桩基设计理论,(E-mail)2569937300@qq.com。

通信作者:宗钟凌(1979—),男,山东菏泽人,教授,博士,硕士生导师,研究方向为桩基工程与地基处理,(E-mail)jouzhl@jou.edu.cn。

0 引言

螺旋桩芯劲性复合桩(helix stiffened cement mixing pile, HSCMP)又称压力注浆螺旋桩,是一种新型劲性复合桩^[1]。螺旋叶片的存在提升了桩芯与水泥土的相互作用,形成一个互补增强的劲性复合桩型,解决了螺旋桩承载性能不足与桩身易屈曲的问题^[2-3]。

针对 HSCMP 的工作特性,国内外学者开展了荷载传递机制、承载特性以及破坏模式等方面的研究^[3-8]。既有研究表明:① HSCMP 桩身成完整的圆柱体,轴向承载力主要来自桩侧摩擦阻力以及底部端承力,端承力占总承载力的 20%^[3-4]。② 抗压承载力与叶片数量和叶片直径成正比,随钻速的增加而降低。抗拔承载力与水泥土强度成正比,在到达特定值后保持不变^[3,5-6]。③ 受水泥土与土体强度比(C_{ref}/S_u)影响,HSCMP 在竖向荷载作用下具有不同的破坏模式,当 $C_{ref}/S_u \in [40, 80]$ 时,桩土界面处发生破坏,当 $C_{ref}/S_u \in [5, 20]$ 时,水泥土强度不足,破坏面向钢管与水泥土界面处转移^[7]。

应用于高层建筑、输电塔架、海上工程结构等复杂建筑物的桩基,除了承受上部结构所带来的竖向荷载外,还会遭受各种水平荷载作用^[9],然而针对 HSCMP 的水平承载性能的理论研究与工程实践较少。为此,本文基于 ABAQUS 有限元软件,采用 Mohr-Coulomb 塑性模型,考虑桩-土间非线性行为,建立 HSCMP 三维数值分析模型,对 HSCMP 水平承载性能进行参数化分析与研究。

1 数值模型建立与验证

1.1 模型建立

基于非线性有限元软件 ABAQUS 并参照室内试验桩芯材料参数(见表 1)以及土体物理力学参数(见表 2)建立三维数值模型,对 HSCMP 水平承载特性进行数值分析。假定土体和水泥土为均质、连续、各向同性的弹塑性材料,服从 Mohr-Coulomb 屈服准则。由于土体属于半无限空间体,为了消除边界影响,在数值模拟中对土体进行了大尺寸建模。选取 2.5 倍桩身长度方向的基础埋深作为土体计算深度(1.5 m),土体宽度取 10 倍以上桩径(1.5 m),水泥土桩径取开挖所得桩径平均值 90 mm,以确保模拟结果的准确性。为简化模型,将螺旋叶片简化

为圆盘^[10]。当 HSCMP 达到水平极限荷载时,桩芯不会发生破坏,因此螺旋桩采用线弹性本构模型。在建模过程中,将桩芯与水泥土桩、水泥土桩与桩周土体之间的接触均设为摩擦接触,主动面为桩芯一侧与水泥土桩接触面、水泥土桩一侧与桩周土体接触面,从动面为水泥土桩一侧与桩芯接触面、桩周土体一侧与水泥土桩接触面。两对接触面的切向接触均采用“罚函数”法,假设摩擦系数保持不变,即 $\mu = \tan \Psi$,其中 Ψ 为内摩擦角;将两对接触面之间的法向接触均设置为硬接触,允许接触面之间有限滑移。土体侧表面分别设置为 $U_1=0, U_2=0$,即沿坐标轴 x, y 方向不产生平行移动,土体底面约束条件设置为完全铰接,即 $U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$ 。最后将土体上表面设为自由面,不受任何约束。

荷载的施加过程如下:首先,在锚杆顶部设置参考点,然后将其与桩芯上表面进行耦合,最后将位移荷载施加在该参考点上。划分网格时,网格类型均采用 C3D8 单元,并对桩身和桩周土体加密处理,螺旋桩芯、水泥土桩身以及土体网格划分见图 1、图 2。

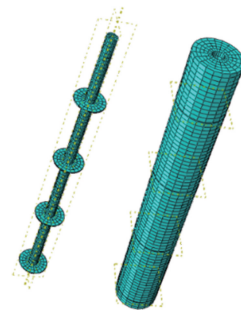


图 1 螺旋桩芯及水泥土桩网格划分

Fig. 1 Mesh division of spiral pile core and cement-soil pile

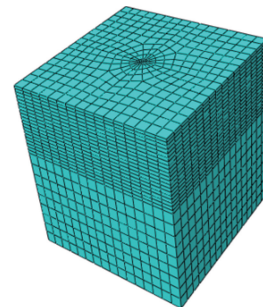


图 2 土体网格划分

Fig. 2 Soil mesh division

1.2 模型验证

1.2.1 试验概况 HSCMP 桩芯采用缩尺的多叶片螺旋桩,桩芯材料参数如表 1 所示。叶片随桩身

排布实物图及其具体尺寸如图 3 所示。

表 1 室内试验桩芯材料参数

Table 1 Parameters of pile core material in indoor test

名称	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/Pa	μ	d/m	L/m	D/m
螺旋桩	7 800	2×10^{11}	0.33	0.022	0.65	0.066

注: ρ 为密度; E 为弹性模量; μ 为泊松比; d 为桩径; L 为桩长; D 为叶片直径。

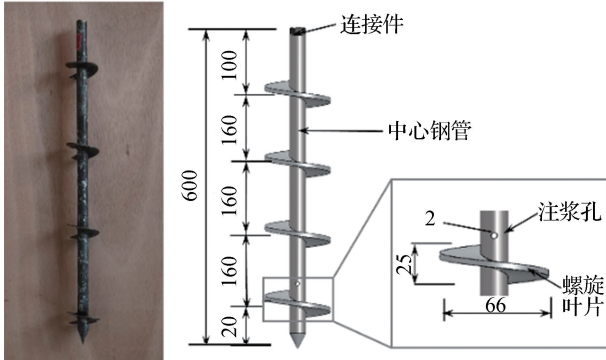


图 3 桩芯实物图及具体尺寸(单位: mm)

Fig. 3 Physical drawing and specific size of pile core (unit: mm)

试验土体由高岭土制备而成。养护过程中土体强度随深度分布不均,经 T-bar 法^[11]测得土体抗剪强度随深度变化曲线如图 4 所示。土体表面形成约 5 cm 厚硬壳层,下部为软土层。土体物理力学参数^[10,12]如表 2 所示。

表 2 室内试验土体物理力学参数

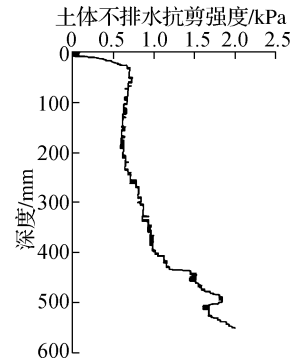
Table 2 Physical mechanical parameters of indoor test soil

名称	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	H/m	S_u/Pa	E_s/Pa	μ	$\Psi/(\text{°})$
硬壳层	1 800	0.05	4.0×10^3	3.00×10^6	0.40	5
软土层	1 700	1.45	2.5×10^3	1.11×10^6	0.40	0
水泥土	1 890	0.60	2.0×10^5	1.50×10^8	0.35	30

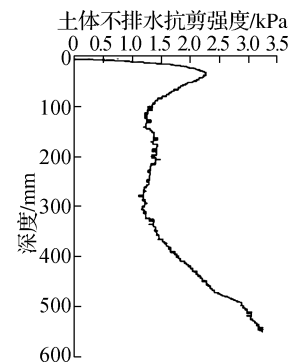
注: H 为土层厚度; S_u 为土体不排水抗剪强度; E_s 为压缩模量; Ψ 为内摩擦角。

1.2.2 结果验证 将数值模拟结果与试验结果进行对比,结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,HSCMP 水平荷载—位移数值模拟结果曲线与试验结果曲线趋势基本一致。当水平位移为 10 mm 时^[13],对应的水平极限承载力模拟结果为 401.1 N,与试验结果(421.3 N)相比,两者相差约 4.8%,数值模拟结果与试验结果较为吻合,验证了数值模型的准确性和结果的可靠性。



a 成桩试验前



b 加载试验时

图 4 土体不排水抗剪强度随深度变化曲线

Fig. 4 Variation curve of undrained shear strength of soil with depth

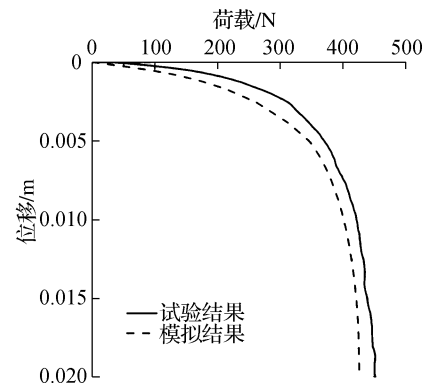


图 5 数值模拟与试验结果对比

Fig. 5 Comparison of numerical simulation and test results

2 HSCMP 水平承载特性分析

引入水泥土无侧限抗压强度与桩周土不排水抗剪强度比(q_u/S_u)及叶片直径与螺旋桩桩径比(D/d)

两种变量,探究不同 q_u/S_u (2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60) 和 D/d (1.5, 2, 2.5, 3, 3.5) 条件下的 HSCMP 水平承载特性。土体参数见表 3, 叶片厚度为 8 mm, 桩芯参数见表 4, 叶片排布见图 6。水泥土直径取叶片直径的 1.2 倍, 各水泥土参数见表 5 和表 6。

表 3 水平承载试验土体参数

Table 3 Parameters of horizontal bearing test soil

名称	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	H/m	D_t/m	S_u/Pa	E_s/Pa	μ	$\Psi/(\text{°})$
软土	1 800	20	4	2.6×10^4	1.3×10^7	0.3	0

注: D_t 为土体直径; S_u 为土体不排水抗剪强度。

表 4 水平承载试验螺旋桩芯参数

Table 4 Parameters of spiral pile core in horizontal bearing test

名称	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/Pa	μ	d/m	L/m	D/m
HP	7 800	2×10^{11}	0.33	0.089	14	0.26

注: E 为弹性模量; d 为桩径; L 为桩长; D 为叶片直径; HP 为螺旋钢管。

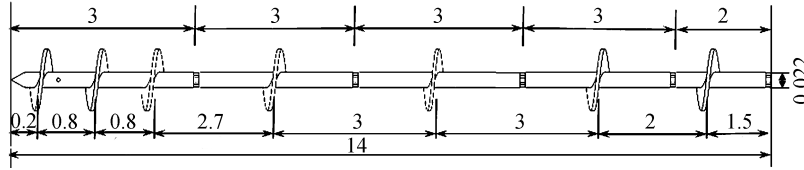


图 6 叶片排布示意图(单位:m)

Fig. 6 Schematic diagram of blade arrangement (unit: m)

表 5 不同 q_u/S_u 条件下水泥土桩参数

Table 5 Parameters of cement-soil piles under different q_u/S_u conditions

编号	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E_s/Pa	μ	D_s/m	D/m	$\Psi/(\text{°})$	S_u/Pa	q_u/Pa	q_u/S_u
CS-Q2		7.28×10^6					2.60×10^4	5.20×10^4	2
CS-Q4		1.46×10^7					5.20×10^4	1.04×10^5	4
CS-Q6		2.18×10^7					7.80×10^4	1.56×10^5	6
CS-Q8	2 000	2.91×10^7	0.3	0.312	0.26	30	1.04×10^5	2.08×10^5	8
CS-Q10		3.64×10^7					1.30×10^5	2.60×10^5	10
CS-Q20		7.28×10^7					2.60×10^5	5.20×10^5	20
CS-Q40		1.46×10^8					5.20×10^5	1.04×10^6	40
CS-Q60		2.18×10^8					7.80×10^5	1.56×10^6	60

注: D_s 为水泥土直径; D 为叶片直径; S_u 为水泥土不排水抗剪强度; q_u 为水泥土无侧限抗压强度; q_u/S_u 为强度比。

表 6 不同 D/d 条件下水泥土桩参数

Table 6 Parameters of cement-soil piles under different D/d conditions

编号	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E_s/Pa	μ	D_s/m	D/m	$\Psi/(\text{°})$	S_u/Pa	q_u/Pa	D/d
CS-D1.5				0.160 2	0.133 5				1.5
CS-D2				0.213 6	0.178 0				2.0
CS-D2.5	2 000	2.18×10^8	0.3	0.267 0	0.222 5	30	7.8×10^5	1.56×10^6	2.5
CS-D3				0.320 4	0.267 0				3.0
CS-D3.5				0.373 8	0.311 5				3.5

注: D/d 为叶片直径与螺旋桩桩径比。

2.1 水平极限承载力

2.1.1 q_u/S_u 影响 对上述不同 q_u/S_u 条件下的 HSCMP 工况进行数值模拟,水平荷载以位移方式施加, q_u/S_u 对 HSCMP 水平极限承载力影响如图 7 所示。其中 HSCMP 的水平极限承载力以桩顶水平位移 10 mm^[12]对应的承载力来确定。由图 7a 可知,随着 q_u/S_u 的逐渐增大,HSCMP 水平极限承载力逐渐增大,各 q_u/S_u 条件下水平极限承载力如表 7 所示。水平荷载一位移曲线从“陡变”型向“缓变”型发展。由图 7b 可知, q_u/S_u 为 4 时,桩身水平极限承载力比 q_u/S_u 为 2 时提高 42.5%; q_u/S_u 增至 10 时,水平极限承载力提高 117%;当 $q_u/S_u > 10$ 后,水平极限承载力增长率显著降低。因此,适当增大 q_u/S_u 可提高桩身水平承载力,若持续增大 q_u/S_u 则对桩身水平极限承载力影响较小。

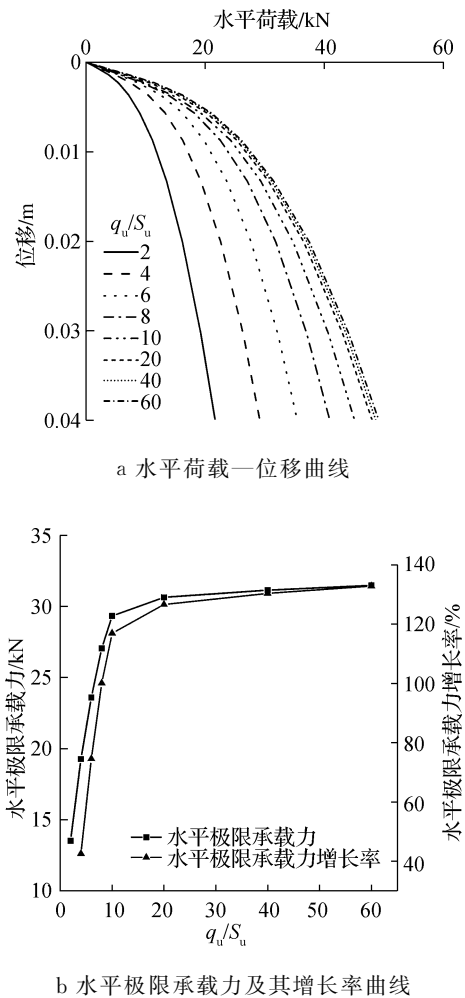


图 7 q_u/S_u 对 HSCMP 水平极限承载力影响
Fig. 7 Effect of q_u/S_u on HSCMP horizontal ultimate bearing capacity

表 7 各 q_u/S_u 条件下水平极限承载力

Table 7 Horizontal ultimate bearing capacity at each q_u/S_u condition

q_u/S_u	2	4	6	8	10	20	40	60
极限承载力/kN	13.5	19.3	23.6	27.1	29.3	30.6	31.1	31.4

为量化分析 q_u/S_u 对 HSCMP 水平极限承载力的影响,对 HSCMP 水平极限承载力进行归一化处理。水平极限承载力 P_{ult} 经 Q_{max} 归一化,即 P_{ult}/Q_{max} 。 Q_{max} 为最大水平极限承载力,其混凝土强度与普通混凝土强度相同,归一化结果为纵坐标, q_u/S_u 为横坐标。图 8 为归一化后水平极限承载力与 q_u/S_u 关系。由图 8 可知, q_u/S_u 与水平极限承载力呈明显非线性递增关系。经非线性拟合,归一化水平极限承载力 P_{ult}/Q_{max} 与 q_u/S_u 关系如式(1)所示。 q_u/S_u 大于 10 后,归一化水平极限承载力 P_{ult}/Q_{max} 增长缓慢。

$$P_{ult}/Q_{max} = 0.65 - 0.4 / (1 + ((q_u/S_u)/4.97)^{2.67}) \quad (1)$$

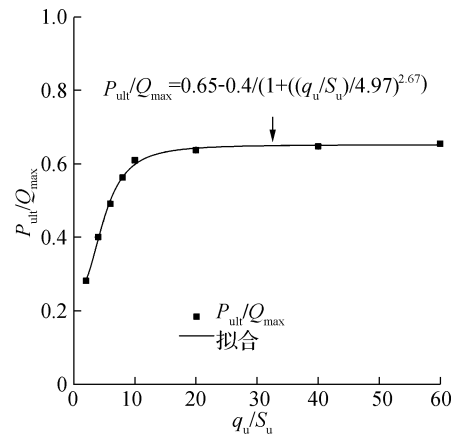
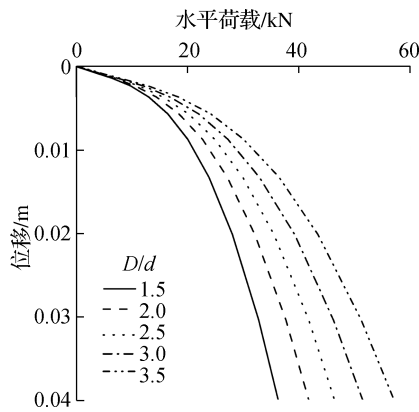
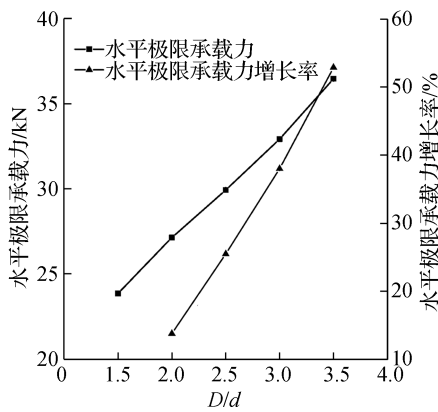


图 8 q_u/S_u 与归一化水平极限承载力关系
Fig. 8 Relationship between q_u/S_u and normalized horizontal ultimate bearing capacity

2.1.2 D/d 影响 不同 D/d 对应的水平荷载一位移和水平极限承载力增长率曲线如图 9 所示。由图 9a 可知,由于 D/d 增大,混凝土桩径也随之增大,相同荷载条件下桩头位移逐渐减小,即桩身抵抗侧向变形的能力增加。各 D/d 条件下水平极限承载力值如表 8 所示,水平极限承载力随 D/d 的增大近似线性增加,增长率如图 9b 所示。因此 D/d 大小可直接影响桩身抵抗侧向变形的能力。



a 水平荷载—位移曲线



b 水平极限承载力及其增长率曲线

图9 D/d 对 HSCMP 水平极限承载力影响

Fig. 9 Effect of D/d on HSCMP horizontal ultimate bearing capacity

表8 各 D/d 条件下水平极限承载力

Table 8 Horizontal ultimate bearing capacity at each D/d condition

D/d	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
极限承载力/kN	23.9	27.1	29.9	32.9	36.5

为量化分析 D/d 对 HSCMP 水平极限承载力的影响,对 HSCMP 水平极限承载力进行归一化处理。水平承载力 P_{ult} 经 Q_{min} 归一化,即 P_{ult}/Q_{min} 。 Q_{min} 为 D/d 为 1 时对应的水平极限承载力,归一化结果为纵坐标, D/d 为横坐标。图 10 为归一化后水平极限承载力与 D/d 关系。由图 10 可知, D/d 与水平极限承载力呈明显线性递增关系。经线性拟合,归一化水平极限承载力 P_{ult}/Q_{min} 与 D/d 函数关系如式(2)所示。

$$P_{ult}/Q_{min} = 0.3D/d + 0.71. \quad (2)$$

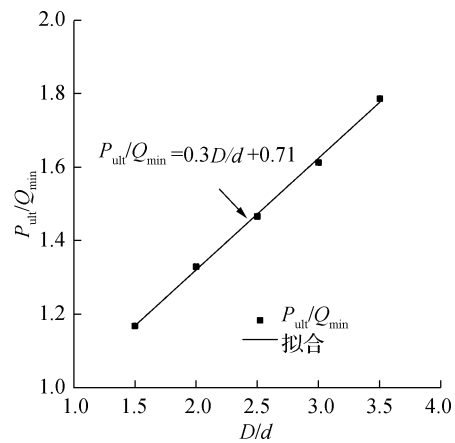


图10 D/d 与归一化水平极限承载力关系

Fig. 10 Relationship between D/d and normalized horizontal ultimate bearing capacity

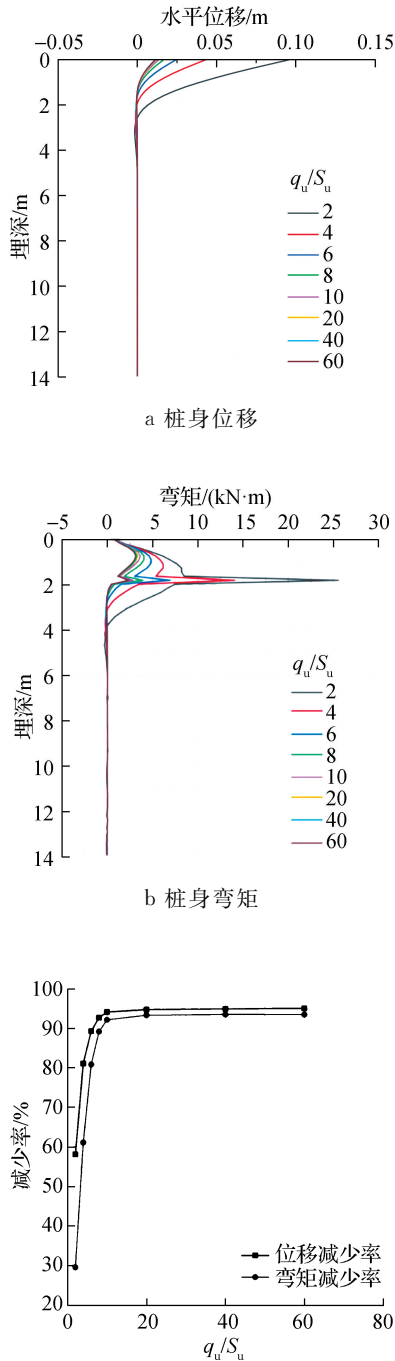
2.2 桩身位移及弯矩

2.2.1 q_u/S_u 影响 为探究水泥土强度对于 HSCMP 水平承载特性的影响,在 30 kN 水平荷载作用下,不同 q_u/S_u 对应的桩身位移和弯矩分布及其变化率如图 11 所示。

随着 q_u/S_u 的增加,相同荷载作用下桩身位移及弯矩呈降低趋势。如图 11b 所示,当 $q_u/S_u < 8$ 时,桩身最大弯矩位于首层叶片处,这是由于水泥土不排水抗剪强度较低,在水平荷载作用下,首层叶片发生较大变形,埋深叶片处弯矩产生突变;当 $q_u/S_u \geq 8$ 时,随着 q_u/S_u 逐渐增大,桩周水泥土强度提高,变形减小,水平荷载逐渐从桩芯传至桩周水泥土,最大弯矩出现在泥面下 1 m 左右(2~3 倍桩径处),且桩身位移零点及最大弯矩逐渐上移。然而桩身位移弯矩并非无限减少,由图 11c 可知, q_u/S_u 从 2 增至 10 时桩顶位移和首层叶片处弯矩减少率分别为 94.1% 和 92.1%;当 $q_u/S_u > 10$ 后,其减小速率随 q_u/S_u 的增加明显降低。因此,可通过适当增大 q_u/S_u 来提高 HSCMP 水平承载性能。

2.2.2 D/d 影响 为探究水泥土桩直径对于 HSCMP 水平承载特性的影响,在 30 kN 水平荷载作用下,不同 D/d 对应的桩身位移和弯矩分布及其变化率如图 12 所示。随着 D/d 的增加,同一荷载作用下,桩身位移及弯矩显著降低。当 D/d 从 1.5 增至 3.5 时,桩头位移从 23.5 mm 减至 8.2 mm,降低 65.1%,首层叶片处弯矩从 5.78 kN·m 降低至 1.88 kN·m,降低 67.5%,桩身位移零点和最大弯矩位置逐渐上移; $D/d \leq 1.5$ 时最大弯矩位于首层叶片位置处,当 $D/d > 1.5$ 后,最大弯矩位于泥面下

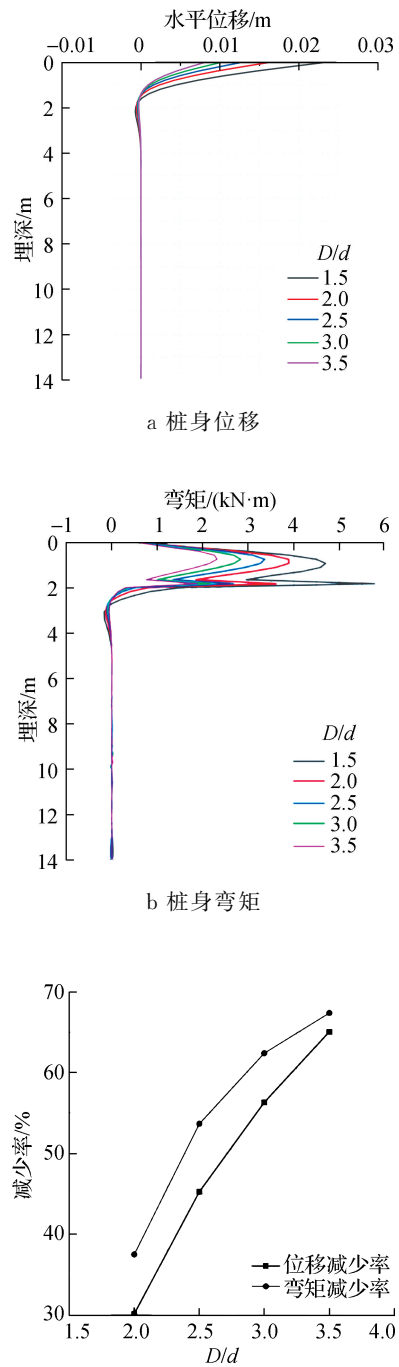
2~3 倍桩径处。这是由于随着 D/d 增大, 水泥土桩桩径也随之增大^[2], 扩大了桩土接触面积, 使得桩侧土抗力增大, 荷载沿桩身传递深度降低, 从而导致桩身变形及桩身最大弯矩减小。因此, 增加 D/d 可显著提高 HSCMP 水平承载性能。



c 桩顶位移和首层叶片处弯矩减少率

图 11 q_u/S_u 对桩身位移及弯矩影响

Fig. 11 Effect of q_u/S_u on pile displacement and bending moment



c 桩顶位移和首层叶片处弯矩减少率

图 12 D/d 对桩身位移及弯矩影响

Fig. 12 Effect of D/d on pile displacement and bending moment

3 结论

本文通过数值模型分析水泥土桩 q_u/S_u 和 D/d 对水平极限承载力、桩身位移及弯矩的影响, 主要结论如下。

(1) 增大 q_u/S_u 和 D/d 可提高 HSCMP 水平

极限承载力,荷载位移曲线从“陡变”型向“缓变”型转变。 D/d 与水平极限承载力近似呈线性递增关系。当 q_u/S_u 较小时,增大 q_u/S_u 可提高HSCMP水平极限承载力,当 q_u/S_u 增大到一定程度后, q_u/S_u 对水平极限承载力影响较小。

(2)为量化 q_u/S_u 和 D/d 对HSCMP水平极限承载力的影响,基于数值模拟,提出 q_u/S_u 和 D/d 与归一化水平极限承载力修正关系曲线,为预测HSCMP水平极限承载力提供方法。

(3)随着 q_u/S_u 和 D/d 的增加,桩身位移及弯矩呈降低趋势,桩身位移零点和最大弯矩逐渐上移。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 宗钟凌,庄潇轩,黄蕴晗,等.软黏土中成桩工艺对HSCM桩抗压承载性能影响的模型试验研究[J].海洋工程,2023,41(3):168-176.
- [3] 宗钟凌,曹博,黄蕴晗,等.注浆螺旋钢管桩抗压承载性能试验研究[J].工业建筑,2022,52(6):127-132.
- [4] MANSOUR M A. Performance of pressure grouted helical piles under monotonic axial and lateral loading [D]. London, Ontario, Canada: The University of Western Ontario, 2019.
- [5] HUANG Yunhan, ZHUANG Xiaoxuan, WANG Peipei, 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.
- [6] 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.
- [7] ZHUANG Xiaoxuan, ZONG Zhongling, HUANG Yunhan, et al. Parametric study on analyzing the effect of soil-cement strength on the uplifting behavior of HSCM piles installed in marine soft clay[J]. Applied Sciences, 2022, 13(1): 330.
- [8] 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.
- [9] 何奔.软粘土地基单桩和复合桩基水平受荷性状[D].杭州:浙江大学,2017.
- [10] 钱锦源.黏土中螺旋锚承载特性数值分析[D].吉林:东北电力大学,2023.
- [11] 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.
- [12] 李子田.水泥土劲性复合桩的竖向承载机理研究[D].太原:中北大学,2021.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑桩基技术规范:JGJ 94—2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [14] 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.

(责任编辑:褚金红 实习编辑:张昌保)