

文章编号: 1007-2993(2024)05-0548-06

螺旋桩芯劲性复合桩群桩效应数值模拟分析

范毅敏 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】 螺旋桩芯劲性复合桩(Helix Stiffened Cement Mixing Pile, 简称 HSCMP)是一种新型复合桩, 其群桩效应及承载力变化规律尚不明确。基于有限元数值模拟方法, 对 HSCMP 桩间距与叶片直径比(S_g/D_H)和水泥土强度与桩周土强度比(C_{ref}/S_u)进行参数化分析, 并将分析结果与群桩效应系数理论计算结果对比。结果表明: 保持叶片直径和土的基本性能不变的情况下, 群桩承载力与水泥土强度及桩间距正相关; $S_g/D_H \leq 2$ 时, 理论计算结果与数值模拟结果相似, 随着 S_g/D_H 增加, 数值模拟结果与应力叠加法结果较为吻合; $S_g/D_H \leq 2$ 时, 桩间土应力叠加效应显著, 易导致螺旋桩芯-水泥土柱的界面破坏, 但 $C_{ref}/S_u \geq 40$ 时, 破坏模式不再发生改变, 表现为水泥土柱-土的界面破坏。

【关键词】 HSCMP 群桩; 群桩效应; 破坏模式; 数值模拟

【中图分类号】 TU473

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.05.007

Numerical Analysis on Group Pile Effect of Pressure Grouted Helical Pile Group

Fan Yimin Zong Zhongling Huang Yunhan Zhuang Xiaoxuan

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

【Abstract】 Helix Stiffened Cement Mixing Pile (HSCMP) is a new type of composite pile, and its group pile effect and bearing capacity variation law is still unclear. Based on the finite element numerical simulation method, the ratio of HSCMP pile spacing to helix diameter (S_g/D_H) and the ratio of cement soil strength to soil strength around the pile (C_{ref}/S_u) were parametrically analyzed and the results were compared with the theoretical calculation of the group pile effect coefficient. The results show that the group pile bearing capacity is positively correlated with soil strength and pile spacing when the helix diameter and soil properties are kept constant; when $S_g/D_H \leq 2$, the existing theoretical calculation results are similar to the numerical simulation results, and the numerical simulation results are more consistent with the stress superposition method as S_g/D_H increases; when $S_g/D_H \leq 2$, the stress superposition effect of soil between piles is significant, which is easy to lead to the damage of the interface of helical pile core-cement soil column, but when $C_{ref}/S_u \geq 40$, the damage mode will not be changed again, and it is shown as the damage of the interface of cement soil column-soil.

【Key words】 HSCMP group pile; group pile effect; failure mode; numerical simulation

0 引言

劲性复合桩是散体桩、柔性桩、刚性桩经复合施工形成的具有互补增强作用的桩^[1]。针对其单桩承载力机理及破坏模式等问题, 鲍鹏等^[2]通过数值模拟分析了劲性复合桩静力和动力特性; 郑刚等^[3]通过室内试验探究了劲性复合桩的破坏机理和抗弯组合强度; 顾士坦等^[4]基于明德林位移法和复合材料力学的基本原理, 推导了一种用于劲性复合桩芯桩轴向应力和水泥土桩-芯桩接触面剪切应力的计算方法; 李丹等^[5]通过室内模型试验研究了劲性复合群

桩基础在软土中的受力特征和褥垫层的移动趋势。

螺旋桩芯劲性复合桩(HSCMP)研究初期也称注浆螺旋钢管桩, 是采用螺旋桩下钻与注浆同步施工技术形成的劲性复合桩, 同步注浆形成的水泥土柱直径约为螺旋叶片直径的 1.26 ~ 1.35 倍, 可以显著增大桩身刚度, 提高桩基承载力, 且水泥土柱与周围土的黏结系数在 0.8 ~ 1.2 范围内^[6-7]。

目前, 国内外学者已经开展了 HSCMP 单桩承载性能的研究^[8-10], 但针对其群桩效应研究成果较少。群桩基础中承台-基桩-桩间土体相互作用导致桩基

基金项目: 江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2021681)

作者简介: 范毅敏, 男, 1998 年生, 汉族, 江苏镇江人, 硕士研究生, 研究方向为桩基工程与地基处理。E-mail: fanyimin1212@163.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: Jouzhl@jou.edu.cn

应力扩散与叠加,使得群桩基础的荷载传递及变形特性较单桩基础更为复杂,这一现象称为群桩效应。群桩效应系数是依单桩承载力推求群桩承载力的重要参数指标^[11-12],通常与桩长、桩径、桩数、桩间距及桩间土性质等因素密切相关。

本文基于有限元数值模拟方法,对 HSCMP 群桩桩间距与叶片直径比(S_g/D_H)和水泥土强度与桩周土强度比(C_{ref}/S_u)进行参数化分析。

1 数值模型建立

地质勘察揭露试验场地埋深 15 m 范围内的地基层层自上而下可以划分为 6 层,分别为素填土、黏土、淤泥、含砂姜黏土、黏土、黏土夹砂,土层物理力学性能指标见表 1。

表 1 土层物理力学性质指标

土层名称	厚度/m	压缩模量 E_s /MPa	不排水抗剪强度 S_u /kPa
素填土	1.20	3.45	26.17
黏土	1.30	5.32	27.16
淤泥	8.00	1.79	5.68
含砂姜黏土	1.20	9.86	102
黏土	2.20	10.00	114.36
黏土夹砂	6.10	9.36	227.70

试验所使用的 HSCMP 的示意图及相关参数如图 1 和表 2 所示。

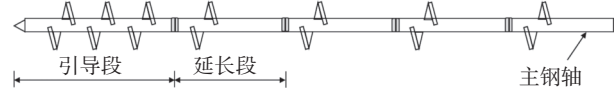


图 1 试桩示意图^[11]

表 2 试桩参数

桩长/m	引导段叶片直径/m	延长段叶片直径/m	主钢轴直径/mm	壁厚/mm
14	0.26	0.20	89	6

1.1 单桩数值模型建立

数值模拟采用 PLAXIS 3D 软件。为消除边界效应,水平方向影响范围应大于 8 倍桩径,故模型 X 轴和 Y 轴的范围取 $-3 \sim 3$ m,桩端下部土层另取 20 倍桩径,即模型 Z 轴方向深 20 m^[13]。限制模型 X 和 Y 平面的水平位移,同时限制模型底部水平和竖直方向位移,顶面自由。土层依现场实测划分为 6 层,本构模型采用莫尔-库仑准则,土体排水类型为不排水(B)。主钢轴与螺旋叶片均用板单元建模,螺旋叶片可简化为平板^[14]。弹性模量为 206 GPa,重度为 78.5 kN/m³,泊松比为 0.3。

为模拟桩土相互作用,用弹塑性模型来描述接

触面界面行为,界面强度和土体强度相关,每个土层材料参数对应强度折减因子 R_{inter} 。基于预制桩和水泥土的抗剪试验,当水泥土强度为 65 ~ 1500 kPa 时,界面摩擦系数为 0.116 ~ 0.141^[15]。本文钢管、桩周土和水泥土界面的强度折减因子 R_{inter} 取 0.13,桩周土强度折减因子 R_{inter} 取 0.4。

1.2 模型验证

试桩和数值模拟的荷载-位移结果对比情况如图 2 所示。通过拐点法判断其极限承载力分别为 525 kN 和 550 kN,试验结果与数值模拟结果吻合较好,验证了该模型的准确性。

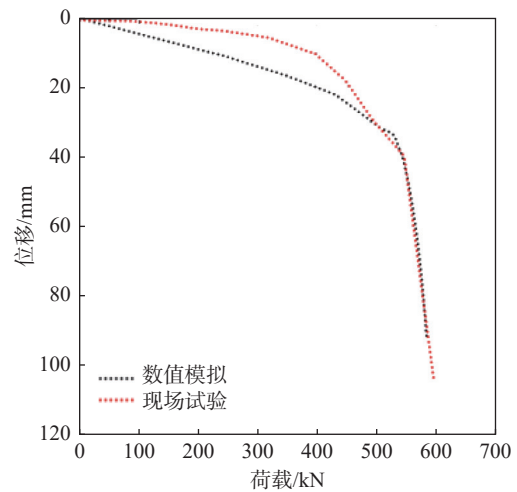


图 2 数值模拟与试验结果对比

1.3 群桩模型的建立

群桩模型建立过程中,桩体与土体的建模思路与单桩相同。桩芯嵌入承台,桩芯与承台的接触关系设为绑定。为总结规律且便于计算,对现场土体各强度指标按厚度进行加权平均得均质土体。群桩模型选取 4 根桩呈正方形排布的形式(见图 3)。

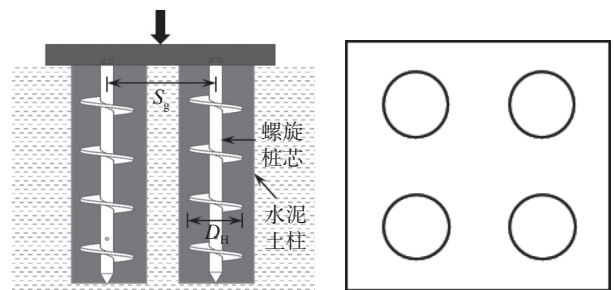


图 3 群桩布置示意图

为了分析不同水泥土强度和不同桩间距条件下,群桩承载力的变化规律,依次建立 $C_{ref}/S_u=5, 10, 20, 40, 60, 80$ 时, $S_g/D_H=1.5, 2, 3, 4, 5$ 的模型。有限元模型见图 4。

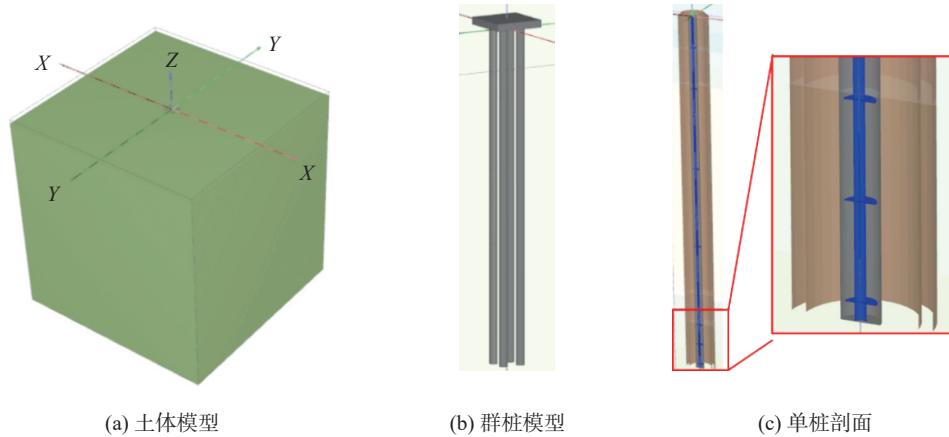


图4 有限元分析模型

2 结果分析

2.1 混凝土强度对HSCMP群桩承载力的影响

为研究混凝土强度对HSCMP群桩抗压承载能力的影响,保持 S_g/D_H 为4,将 C_{ref}/S_u 依次设置为5, 10, 20, 40, 60, 80,其荷载-位移曲线见图5。

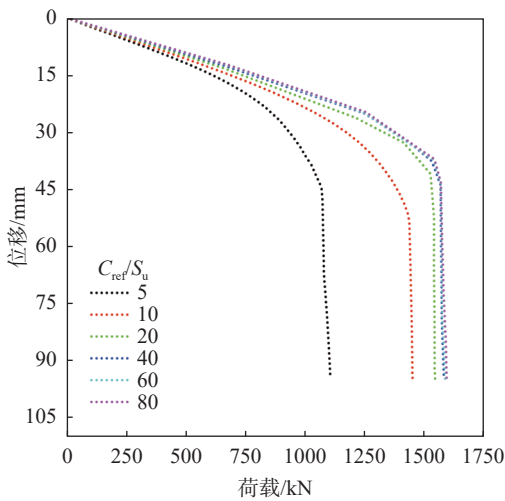


图5 不同混凝土强度下荷载-位移曲线

在确定极限承载力方面,可利用拐点法判别,结果见表3。当 C_{ref}/S_u 由5增加到10时,群桩极限承载力增加了32%;当 C_{ref}/S_u 由10增加到80时,群桩极限承载力增速变缓,尤其当 C_{ref}/S_u 由20逐步增加到80时,群桩极限承载力仅增加了1%。结果表明, C_{ref}/S_u 在未达到40时,受荷过程中混凝土柱剥落,未能充分发挥混凝土柱承载力;当 C_{ref}/S_u 大于40时,混凝土柱与螺旋桩芯黏结较好,最后随着桩土界面的破坏达到极限承载力。

2.2 桩间距对HSCMP群桩承载力的影响

为研究HSCMP群桩的桩间距对其抗压承载能力的影响,保持 C_{ref}/S_u 为40,将 S_g/D_H 依次设置为1.5, 2, 3, 4, 5,其荷载-位移曲线如图6所示。

表3 群桩抗压极限承载力

S_g/D_H	C_{ref}/S_u	极限承载力 Q_u/kN	位移/mm
4	1	473	39
	5	1100	42
	10	1455	52
	20	1570	43
	40	1580	43
	60	1584	39
	80	1587	38

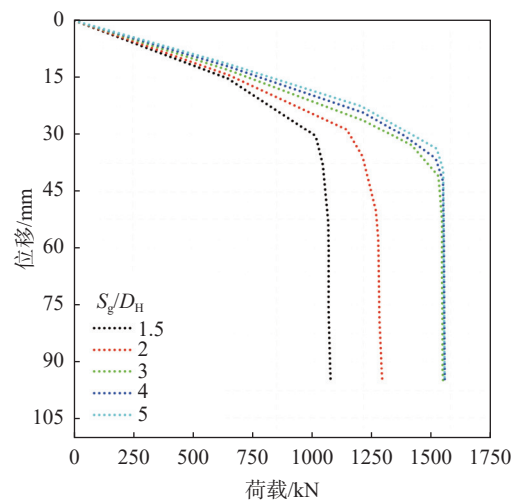


图6 不同桩间距下荷载-位移曲线

由图6可知,随着桩间距的增大,HSCMP群桩的承载力逐渐增大,当桩间距为 $1.5D_H$ 时,承载力最小,仅达到1050 kN;当桩间距为 $5D_H$ 时,HSCMP群桩的承载能力最大,是桩间距为 $1.5D_H$ 时的1.51倍;当 S_g/D_H 从1.5增大到2时,承载力提高了19%;当 S_g/D_H 从2增大到3时,承载力增幅为31%;而 S_g/D_H 从3增大到5时,承载力增幅仅为2%。由此表明, S_g/D_H 较小时群桩效应更显著,较强的群桩效应影响

了桩侧摩阻力的发挥,导致群桩基础的竖向承载力较低。

在加载初期,同一荷载作用下,不同桩间距的HSCMP群桩的沉降差异并不显著,但随着荷载的增加,差异会愈发显著。其原因在于,随着竖向荷载的增加,受荷的桩侧土阻力作用区域逐渐变大,导致应力叠加作用越来越明显,从而产生了显著的群桩效应。

3 群桩效应

3.1 破坏模式分析

为研究水泥土强度对HSCMP群桩破坏模式的影响,分别提取 $S_g/D_H=4$ 时不同水泥土强度下的位移云图和 $C_{ref}/S_u=40$ 时不同桩间距下的位移云图,结果见图7和图8。由图7可知,当 $C_{ref}/S_u=5$ 时,仅有桩端螺旋叶片较密部分存有完整的圆柱形水泥土,此处破坏模式表现为桩-土界面破坏,但其他部分水泥土已经剥落,表现为螺旋桩芯-水泥土破坏;随着水泥土强度进一步提高,螺旋桩芯与水泥土粘结的更加紧密;当 $C_{ref}/S_u \geq 40$ 时,桩顶部分水泥土也不会剥落,表现为完整的桩-土界面破坏。由图8可知,当 $S_g/D_H=1.5$ 时,桩间土位移远大于周围土体,这也就导致群桩承载力大幅下降,随着桩间距的逐渐增加,桩间土位移明显降低,这也是群桩效应逐步衰退的体现。综合来看,群桩效应产生的应力叠加也会使较弱的水泥土柱更早剥落。

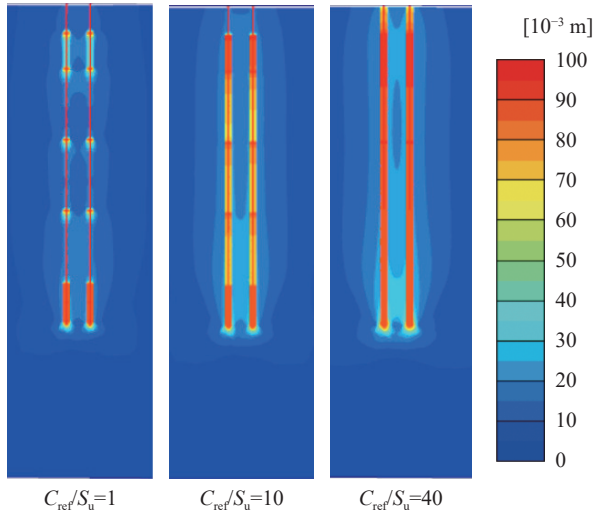


图7 不同 C_{ref}/S_u 下的位移云图

3.2 群桩效应系数计算方法

群桩效应是指群桩竖向受荷时,由于承台-桩-土的相互作用,群桩工作特性(如桩侧阻力、桩端阻力、沉降等)与单桩相比有显著差异,导致其极限承载力不等于各单桩之和,其大小可以用群桩效应系数来衡量^[16],表达式为

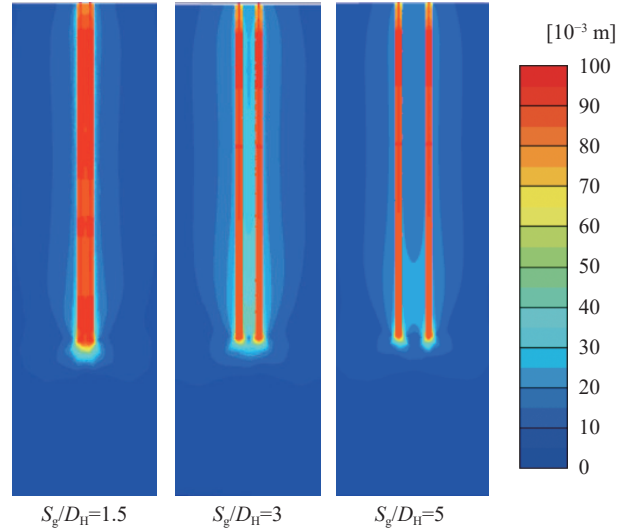


图8 不同 S_g/D_H 下的位移云图

$$\eta = \frac{Q_u}{n \cdot P_u} \quad (1)$$

式中: η 为群桩效应系数; Q_u 、 P_u 分别为群桩极限承载力和单桩极限承载力; n 为基桩数量。

目前群桩效应系数常用的计算方法有实体周长法、Converse-Labrrre法及应力叠加法^[17]。

(1) 实体周长法

桩距为 S_a 、桩径为 d 的 $m \times n$ 群桩基础,群桩效应系数可以表达为

$$\eta = \frac{2(m+n-2)S_a + 4d}{\pi m n d} \quad (2)$$

(2) Converse-Labrrre法

$$\eta = 1 - \tan^{-1} \left(\frac{d}{S_a} \right) \frac{2(n-1)m + (m-1)n}{mn} \quad (3)$$

式中符号意义同式(2)。

(3) 应力叠加法

对于 $m \times n$ 群桩,可以设桩身埋深为 l ,纵向桩间距为 S_1 ,横向桩间距为 S_2 ,并考虑土体内摩擦角 φ ,群桩效应系数可以表达为

$$\eta = \frac{1}{1 + \lambda} \quad (4)$$

$$\lambda = 2A_1 \frac{m-1}{m} + 2A_2 \frac{n-1}{n} + 4A_3 \frac{(m-1)(n-1)}{mn}$$

$$A_1 = \left(\frac{1}{3S_1} - \frac{1}{2l \tan \varphi} \right) d, \quad A_2 = \left(\frac{1}{3S_2} - \frac{1}{2l \tan \varphi} \right) d$$

$$A_3 = \left(\frac{1}{3\sqrt{S_1^2 + S_2^2}} - \frac{1}{2l \tan \varphi} \right) d$$

3.3 S_g/D_H 对群桩效应系数的影响

分别采用上述3种方法计算 $C_{ref}/S_u=40$ 时不同

S_g/D_H 下 HSCMP 群桩的群桩效应系数, 结果如图 9 所示。由图 9 可知, 随着 S_g/D_H 的增大, HSCMP 群桩的群桩效应系数也随之增大。这是因为当 S_g/D_H 增大时, 基桩的相互作用会减弱, 导致应力叠加效应衰减。此外, 在 $S_g/D_H \leq 2$ 时, 3 种方法的计算结果和数值模拟结果都十分接近, 尤其当 S_g/D_H 为 1.5 时, 应力叠加法与数值模拟法计算结果仅相差 3%; 但当 $2 < S_g/D_H < 3$ 时, 应用实体周长法与数值模拟所得结果差别不大, S_g/D_H 为 3 时, 结果相差 12% 左右; 当 $S_g/D_H \geq 3$ 时, 数值模拟结果曲线趋于平缓, 更加接近应力叠加法, S_g/D_H 达到 5 时, 误差不到 8%。综合看来, 考虑全面的应力叠加法可以作为计算 HSCMP 群桩的群桩效应系数的依据。

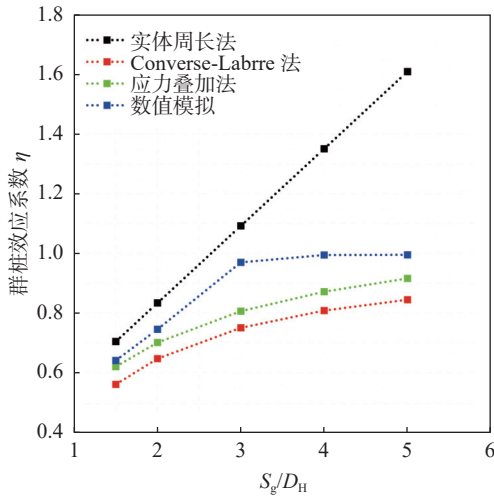


图 9 群桩效应系数对比图

3.4 C_{ref}/S_u 对群桩效应系数的影响

采用式(1)计算不同 S_g/D_H 的 HSCMP 群桩效应系数随 C_{ref}/S_u 的变化规律, 结果如图 10 所示。由图 10 可知, 当 S_g/D_H 为 1.5 和 2 时, 水泥土强度的增加明显降低了群桩效应系数, 特别是 S_g/D_H 为 1.5, C_{ref}/S_u 由 5 增加到 10 时, 群桩效应系数降低了 20%; 而 $S_g/D_H \geq 3$ 时, 群桩效应系数基本保持在 0.95 左右; 当 $C_{ref}/S_u \geq 40$ 时, 水泥土强度对群桩效应系数的影响几乎不存在。这是因为 HSCMP 群桩破坏模式会随 C_{ref}/S_u 发生改变。两桩相距太近时, 被握裹的桩间土沉降增加, 以侧摩阻力的形式施加在水泥土柱, 导致螺旋桩芯-水泥土柱的界面破坏提前; 而在 $C_{ref}/S_u \geq 40$ 时, 群桩破坏模式不会再发生改变, 表现为桩-土界面破坏。

4 结论

(1)在一定界限范围内, HSCMP 群桩效应与水泥土强度和桩间距密切相关。 C_{ref}/S_u 不变的情况下,

当 $S_g/D_H < 4$ 时, 群桩承载力随 S_g/D_H 增大而增大, 当 $S_g/D_H \geq 4$ 时, 群桩效应消失; S_g/D_H 不变的情况下, 当 $C_{ref}/S_u < 40$ 时, 群桩承载力随 C_{ref}/S_u 增大而增大, 当 $C_{ref}/S_u \geq 40$ 时, 群桩承载力不再发生变化。

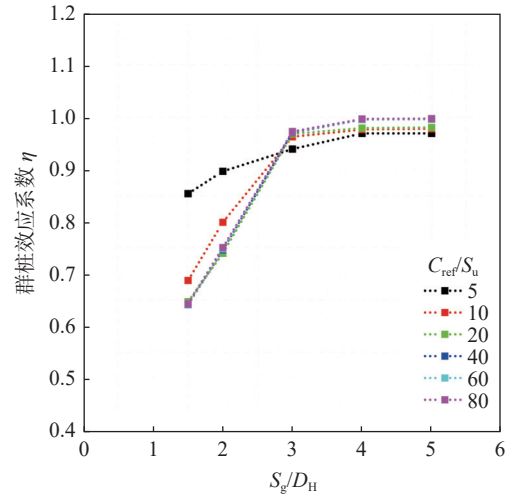


图 10 群桩效应系数与水泥土强度的关系

(2)数值模拟与群桩效应系数理论计算结果对比表明, $S_g/D_H \leq 2$ 时, 几种计算结果相近; $S_g/D_H = 3$ 时, 实体周长法与数值模拟结果差别不大; S_g/D_H 趋向于 5 时, 数值模拟结果与应力叠加法所得结果接近。

(3)HSCMP 群桩基础的破坏模式受桩间距与水泥土强度的共同影响, 过小的桩间距产生的应力叠加会加速螺旋桩芯-水泥土柱的界面破坏, 而当 $C_{ref}/S_u \geq 40$ 时, HSCMP 群桩基础破坏模式不会再发生改变, 表现为桩-土的界面破坏。

参考文献

- [1] JGJ/T 327—2014 劲性复合桩技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- [2] 鲍鹏, 姜忻良, 盛桂琳. 劲性搅拌桩复合地基承载性能静动力分析 [J]. 岩土力学, 2007(1): 63-68,82.
- [3] 郑刚, 张华. 型钢水泥土复合梁中型钢-水泥土相互作用试验研究 [J]. 岩土力学, 2007(5): 939-943,950.
- [4] 顾士坦, 施建勇, 王春秋, 等. 劲性搅拌桩芯桩荷载传递规律理论研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2473-2478.
- [5] 李丹, 王吉霖, 谭玄, 等. 混凝土芯水泥土搅拌桩群桩复合地基的承载特性 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(9): 118-123.
- [6] 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.
- [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] 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.
- [10] 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.
- [11] 汤 斌, 陈晓平. 群桩效应有限元分析 [J]. *岩土力学*, 2005, 26(2): 299-302.
- [12] 张治国, 张 瑞, 黄茂松, 等. 基于差异沉降和轴向刚度控制的竖向荷载作用下群桩基础优化分析 [J]. *岩土力学*, 2019, 40(6): 2354-2368.
- [13] 邵 康, 苏 谦, 刘凯文, 等. 竖向受压下考虑安装扰动螺旋钢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.
- [14] HO H M, MALIK A A, KUWANO J, et al. Influence of helix bending deflection on the load transfer mechanism of screw piles in sand: Experimental and numerical investigations[J]. *Soils and Foundations*, 2021, 61(3): 874-885.
- [15] ZHOU J, YU J, GONG X, et al. The effect of cemented soil strength on the frictional capacity of precast concrete pile-cemented soil interface[J]. *Acta geotechnica*, 2020, 15: 3271-3282.
- [16] 徐志军, 郑俊杰, 边晓亚, 等. 基于不同失效准则的群桩可靠度分析 [J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(5): 819-825.
- [17] 邓友生, 龚维明, 袁爱民. 超长直径钻孔灌注桩群桩效应系数研究 [J]. *重庆建筑大学学报*, 2007(6): 84-87,97.

收稿日期: 2023-05-06