

软弱土地区PHC管桩复合地基加固参数研究

管大刚¹, 张乾辉¹, 张磊^{2*}, 陈保国², 闫腾飞²

¹中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都

²中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉

Email: *changlei_zhang@qq.com

收稿日期: 2020年10月6日; 录用日期: 2020年10月22日; 发布日期: 2020年10月29日

摘要

软弱土地区PHC管桩在不同设计参数下的工作性状和加固效果是实际工程关注的重要问题。结合实际工程项目, 采用有限元数值模拟, 研究地基沉降、管桩沉降、管桩轴力、桩土应力比等随上部荷载、桩长、桩间距等设计参数的变化关系, 优化桩长桩间距设计。结果表明: PHC管桩加固填海区软土地基, 可有效减小总沉降。桩长对软弱土地区PHC管桩复合地基变形、管桩受力、桩土应力比的影响显著。地基沉降随桩长增大而减小, 但减小幅度放缓。同一工况下, 管桩轴力均先增大后减小。在有效桩长范围内, 增大桩长可以有效的减小地基变形, 桩土应力比增长较快。在一定桩间距范围内, 桩间距对工程沉降特性影响较大。随着桩间距增大, 桩身最大轴力增长较快。

关键词

PHC管桩, 软弱土, 数值模拟, 地基加固, 变形

Research on Reinforcement Parameters of PHC Pile Composite Foundation in Soft Soil Area

Dagang Guan¹, Qianhui Zhang¹, Lei Zhang^{2*}, Baoguo Chen², Tengfei Yan²

¹Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu Sichuan

²Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei

Email: *changlei_zhang@qq.com

Received: Oct. 6th, 2020; accepted: Oct. 22nd, 2020; published: Oct. 29th, 2020

*通讯作者。

文章引用: 管大刚, 张乾辉, 张磊, 陈保国, 闫腾飞. 软弱土地区 PHC 管桩复合地基加固参数研究[J]. 土木工程, 2020, 9(10): 1127-1135. DOI: 10.12677/hjce.2020.910117

Abstract

The working behavior and reinforcement effect of PHC pile under different design parameters in soft soil area are important issues of practical engineering. Combined with the actual engineering project, the finite element numerical simulation is used to study the relationship between the foundation settlement, pipe pile settlement, pipe pile axial force, pile-soil stress ratio with the upper load, pile length, pile spacing and other design parameters, so as to optimize the design of pile length pile spacing. The results show that PHC pipe pile can effectively reduce the total settlement of soft soil foundation in reclamation area. The influence of pile length on PHC pipe pile composite foundation deformation, pile stress and pile-soil stress ratio is significant. The settlement of foundation decreases with the increase of pile length, but the decreasing range slows down. Under the same working condition, the axial force of pipe pile increases first and then decreases. In the range of effective pile length, increasing the pile length can effectively reduce the foundation deformation, and the pile-soil stress ratio increases rapidly. In a certain range of pile spacing, the pile spacing has a great impact on the settlement characteristics of the project. With the increase of pile spacing, the maximum axial force increases rapidly.

Keywords

PHC Pile, Soft Soil, Numerical Simulation, Foundation Reinforcement, Deformation

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着中国基础设施建设的快速发展,复合地基被广泛应用于各种软弱土地基处理中,以满足建(构)筑物的承载力要求和工后沉降。工程实践推动着复合地基理论和设计的不断向前发展,复合地基承载力的确定、荷载传递机制、有效桩长桩间距的优化等一直为学界研究热点。

诸多学者对各式复合地基的承载力、变形及受力特性进行了深入研究。闫楠[1]对青岛某厂区的6根水泥土搅拌桩单桩及2组3桩水泥土搅拌桩复合地基进行竖向抗压静载荷试验,并采用修正双曲线模型预测单桩和复合地基的极限承载力。肖耀廷[2]利用桩身强度控制法提出了柔性桩复合地基的上边界解;基于桩土应力单独作用的模式提出了柔性桩复合地基有效桩长的计算方法;利用侧摩阻力折减法提出了软土地区刚性桩有效桩长的计算方法。傅栋梁[3]等结合工程实例,对泥炭土地区道路地基处理方案进行比选,分析计算确定预应力管桩复合地基的设计参数,对施工中应重点注意的问题进行总结。常远[4]提出了按桩和土承担荷载各自位移相叠加的方法计算建筑物沉降,引入面积比和桩距比的概念分析桩基础沉降变化规律,基于变刚度调平理念提出新的基础布桩方案,提出有效减小不均匀沉降的变桩距设计方法。B. Chevalier [5]同时进行试验和有限元对比研究刚性桩复合地基荷载传递规律。袁曦明[6]以广州市南沙地区淤泥质土的处理为例,研究深层水泥土搅拌桩复合地基产生变形的各种影响因素。陈亚楠[7]研究指出一定桩长范围内,复合地基承载力随着桩长的减少而减小且幅度较大,桩分担的荷载显著减小,而土分担的荷载几乎没有变化。胡江洋[8]等运用有限元软件建立砾石桩复合地基数值分析模型,考虑砾石桩复合地基在施工期和运营期排水固结的前提下,对上部路基荷载作用下砾石桩复合地基桩土的承载性状、沉降性状、应力分担等作用性状进行分析。

PHC 桩单桩承载力高、抗弯性能好, 目前被广泛地用于实际工程中。从现阶段复合地基研究来看, 研究重点多集中于刚柔性桩荷载传递规律及承载试验研究, 对 PHC 桩复合地基的沉降特性和力学特性研究滞后。本文以深圳市固戍二期水质净化厂工程为背景, 分别分析了不同荷载条件下、不同桩长、不同桩间距条件下地基力学性状和承载特性。着重研究不同工况下地基沉降、管桩沉降、管桩轴力、桩土应力比变化规律, 优化桩长桩间距设计, 为同类工程提供经验参考。

2. 数值模拟

2.1. 工程概况

固戍水质净化厂二期选址位于宝安区西乡街道现状固戍水质净化厂一期项目用地以西(图 1), 总占地面积 15.14 公顷, 采用双层上盖形式, 中间为停车场, 上层覆土建设市政公园。其施工场地位于填海区软弱土地带, 基础置于粘性素填土、淤泥之上, 多为软弱不良地基土, 不满足承载力要求, 需进行大面积地基加固处理。面临加固区域大、施工工期短、成本高等问题, 为确定不同荷载、桩长、桩间距下地基加固效果, 达到技术安全与经济合理的双重目的, 进行此次相关模拟研究。土层参数如表 1 所示, 设计采用 PHC 管桩加固地基。管桩外径 400 mm, 壁厚 95 mm。碎石垫层厚度 300 mm。



Figure 1. Location of the construction site
图 1. 施工场地位置

2.2. 数值建模

采用数值分析软件 Midas GTS 建立三维数值分析模型, 采用单一变量法, 分析不同荷载不同桩长桩间距下地基沉降特性和力学规律。标准模型计算深度取 30 m, 宽度取 12 m, 设 9 根管桩, 矩形布置, 桩长 16 m, 间距 2.3 m, 碎石垫层厚 0.3 m, 地基上部设均布荷载 100 kPa (模型图见图 2), 其它工况均在此基础上改变单一变量进行模拟对比分析, 由于群桩数量较多, 管桩的沉降和力学分析取中间桩进行分析。土层与垫层采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性本构模型、实体单元模拟, 管桩采用梁单元加软件自带的桩界面接触单元模拟。底面约束水平和竖向位移, 侧面约束水平位移, 模型上表面为自由边界。主要物理、力学参数见表 1。

对于未采取管桩进行复合地基加固和加固两种方案分别进行数值模拟计算, 结果表明(图 3): 采取 PHC 管桩加固的地基沉降明显小于未加固方案的沉降, 加固效果明显。两种方案沉降发展趋势相同, 均呈漏斗形, 最大沉降点均位于地基中部。经加固后的最大地基沉降量比未做加固的最大值减小了 59.9%。可见加固效果明显, 一方面管桩插入土体可与地基土共同承担荷载, 增强整体承载能力, 另一方面复合

地基中垫层的存在通过桩顶向上刺入极大改善了桩顶应力集中情况，降低了对桩顶的基底反力，使受力更加均匀，同时减小了刚性基础对桩的位移约束，使各桩体桩身最大应力更加均匀。

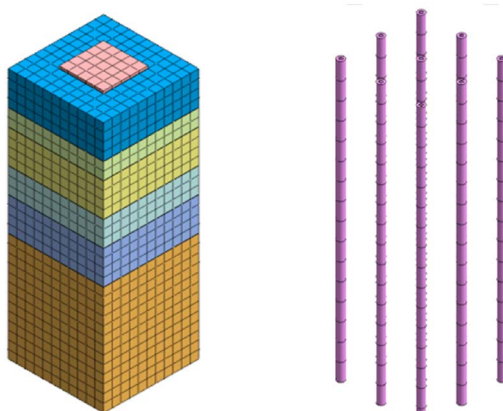


Figure 2. Numerical model
图 2. 数值模型

Table 1. Physical and mechanical parameters of formation
表 1. 地层物理力学参数

材料	泊松比	密度	弹性模量	粘聚力	摩擦角
		kg/m ³	/MPa	/KPa	/度
粘性素填土	0.34	1670	12.8	15	12
淤泥质土	0.30	1710	10.7	6	1.8
粘土质粗砂	0.32	1820	20.8	22	20
砂质粘性土	0.30	1830	18.4	21	23
全风化混合花岗岩	0.30	1900	28	24	23
砂土状强风化花岗岩	0.26	1930	40	30	32
垫层	0.28	2100	80	-	-
管桩	0.2	2500	38,000	-	-

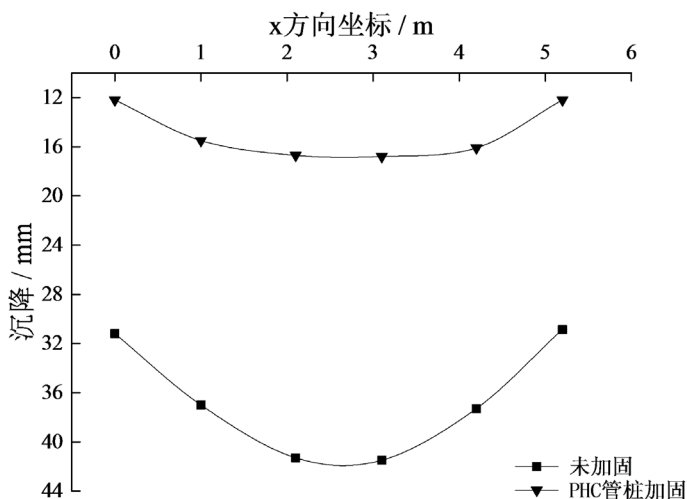


Figure 3. Comparison of vertical displacement of unreinforced and reinforced soil
图 3. 未加固和加固土体竖向位移比较

3. 不同荷载影响

考虑在垫层之上施加不同的外部荷载，荷载依次取值 80 kPa、100 kPa、120 kPa、140 kPa，不同荷载下地基最大沉降如图 4 所示。当荷载增大，土体会更加挤密，所以沉降值与上部荷载呈正相关关系，当荷载值相对于 80 kPa 依次增加 25%、50%、75% 时，沉降值依次为 18.8 mm、25.7 mm、29.8 mm，相比 80 kPa 下沉降值分别增加 34.3%、83.6%、112.9%。地基沉降量增加速率超过外加荷载增加速率。

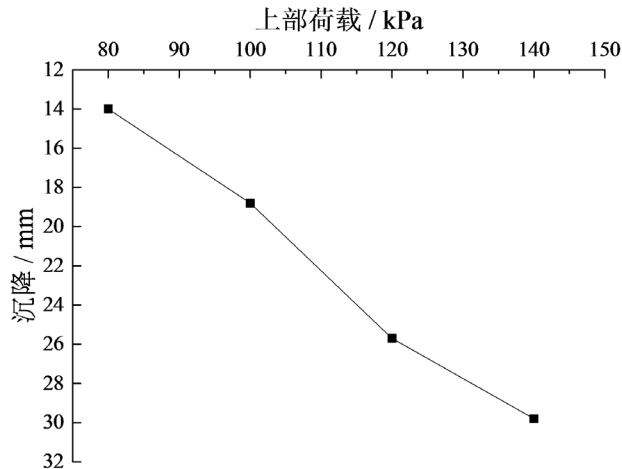


Figure 4. Maximum settlement of foundation under different loads
图 4. 不同荷载下地基最大沉降

荷载对管桩沉降影响如图 5 所示，同一荷载下，桩顶沉降大于桩端沉降，两者之差即为桩身压缩值，在外加荷载 80 kPa 时沉降沿桩身深度变化趋势最为平缓，桩顶沉降与桩端沉降差值仅为 1.48 mm，而后曲线变化幅度随荷载增大而增大，说明荷载对管桩沉降的影响主要在管桩上部。不同荷载下，管桩沉降随着荷载的增大而增大，但增大幅度不同。100 kPa 时桩顶沉降为 9.33 mm，120 kPa 时桩顶沉降为 12.05 mm，140 kPa 时桩顶沉降为 12.68 mm，相对于 80 kPa 时的桩顶沉降值依次增大 22.9%、58.7%、67.1%。荷载 120 kPa 增大到 140 kPa，桩顶沉降仅增加了 0.63 mm，桩端沉降增加了 0.19 mm，说明此时桩侧摩阻力已达到最大，桩端阻力发挥了较大作用。

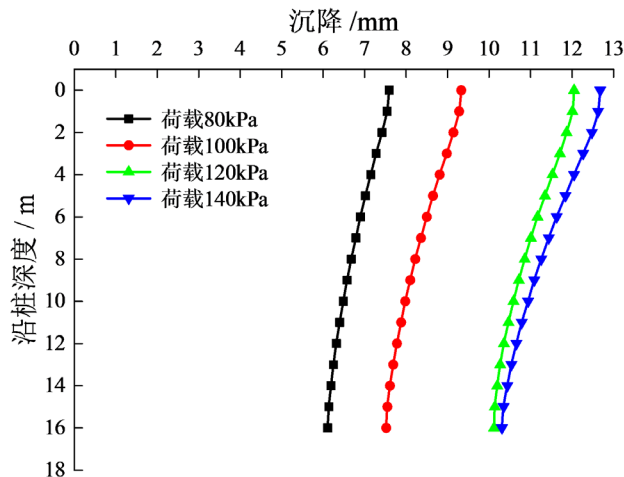


Figure 5. Settlement of pipe piles along depth under different loads
图 5. 不同荷载下管桩沿深度沉降

4. 不同桩长影响

保持各项参数不变, 改变单一变量因素管桩桩长, 分别取值 16 m、18 m、20 m、23 m、27 m。随着桩长增大, 桩土接触面积增大, 摩擦阻力增大, 桩端进入更坚硬的土层, 桩端阻力增大, 桩所分担荷载比例增大, 如图 6 所示, 地基最大沉降随管桩长度增大而减小, 桩长 16 m 时最大沉降量为 18.4 mm, 随管桩长度的增加, 最大值依次为 17.5 mm (18 m)/16.8 mm (20 m)/16.0 mm (23 m)/15.1 mm (27 m)。

由图可知, 随桩长增大, 地基沉降量减小幅度放缓, 因此, 不能盲目地通过增加桩长来控制沉降量。

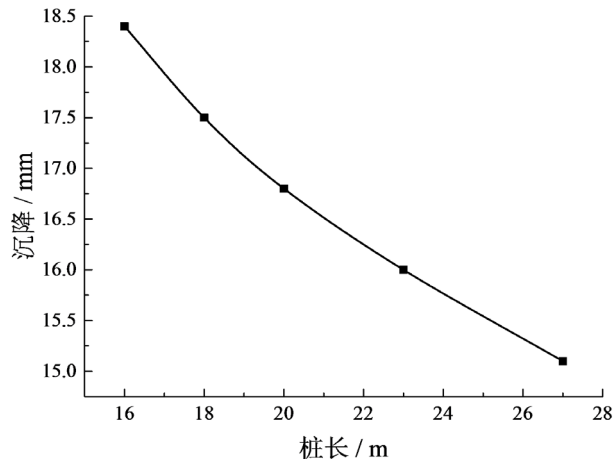


Figure 6. Maximum settlement of foundation under different pile lengths

图 6. 不同桩长下地基最大沉降

桩长对管桩桩身沉降的影响如图 7 所示。不同桩长下, 管桩沉降量随桩长的增大而减小。同一桩长下, 管桩桩顶沉降量最大, 随深度的增大沉降量减小, 说明桩体沉降量集中在桩体上部, 桩长 16 m 时桩顶沉降 9.33 mm, 18 m 时桩顶沉降 8.3 mm, 20 m 时桩顶沉降 7.47 mm, 23 m 时桩顶沉降 6.37 mm, 27 m 时桩顶沉降 4.99 mm, 相比桩长 16 m 时依次减小 11% (18 m)、19.9% (20 m)、31.7% (23 m)、46.5% (27 m)。

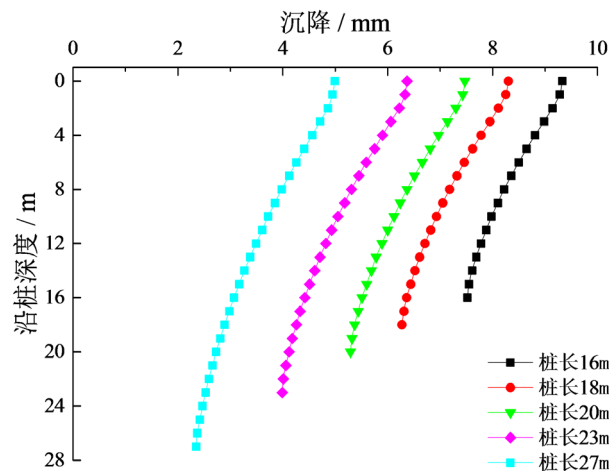


Figure 7. Settlement of pipe piles along depths under different pile lengths

图 7. 不同桩长下管桩沿深度沉降

桩长对于管桩轴力影响如图 8 所示, 不同桩长下管桩轴力沿深度变化趋势相同, 均先增大后减小, 约呈“弓”形。出现这种变化的原因主要是垫层及侧摩阻力的存在, 由于桩的刚度远大于土的刚度, 在

荷载作用下桩间土沉降量大于桩的沉降量, 桩顶向上刺入褥垫层, 褥垫层相对向下位移, 产生负摩阻力, 其决定了最大轴力位置不是桩顶, 而是桩顶下部某一位置处, 即中性点处。同时也减小了桩顶应力集中。桩深 4 m 处正处于淤泥层, 桩间土承载力弱, 桩的荷载分担比例大, 轴力较大。

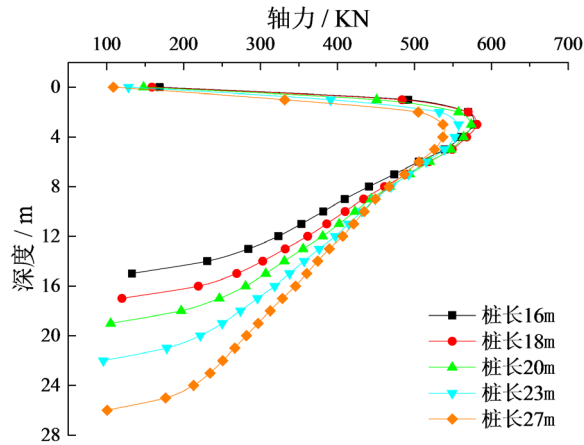


Figure 8. Axial force of pile body under different pile length along the depth curve
图 8. 不同桩长下桩身轴力沿深度曲线

桩长对桩土应力比的影响如图 9 所示, 桩土应力比与桩长总体呈正相关关系, 当桩长从 16 m 增加到 23 m, 桩土应力比增长较快, 说明管桩桩顶的应力增长速度高于桩间土的应力增速, 应力更多地向桩顶集中, 桩土荷载分担比增大; 当桩长自 23 m 增加到 27 m, 桩土应力比增速较缓, 说明此时增加桩长对复合地基特性影响力降低。桩土应力比是反应地基优化设计的重要内容, 后期增加桩长对桩土应力比没有较大改变, 所以选择合适的桩长对于桩在复合地基中所分担荷载比例具有重要意义。

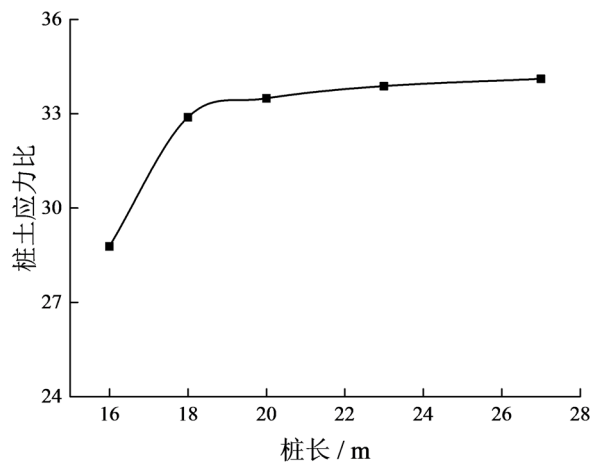


Figure 9. Pile-soil stress ratio under different pile lengths
图 9. 不同桩长下桩土应力比

5. 不同桩间距影响

保持桩长、桩径、垫层厚度、上部荷载等各项参数不变, 改变桩间距, 分别取值 1.6 m、1.8 m、2.0 m、2.3 m、2.5 m。随着桩间距的增大, 面积置换率降低, 地基最大沉降量随着桩间距增大而增大, 如图 10 所示, 在间距 1.8 m 以内地基最大沉降量几乎无变化, 间距 2.3 m 以内, 沉降量变化趋势较缓, 超过 2.3 m

之后, 沉降量迅速增大。桩间距 1.8 m 时沉降 12.3 mm, 2 m 时沉降 15 mm, 2.3 m 时沉降 18.4 mm, 2.5 m 时沉降 26.9 mm, 2.5 m 时相较于间距 2.3 m 时地基沉降值增加了 46.2%。可见, 并非桩间距越小, 沉降控制效果越好。桩间距过小, 不能有效发挥基础下桩间土承载能力。桩间距增大可降低成本, 但沉降增大较快。对于本工程条件, 桩间距控制在 2.3 m 是较为合理的。

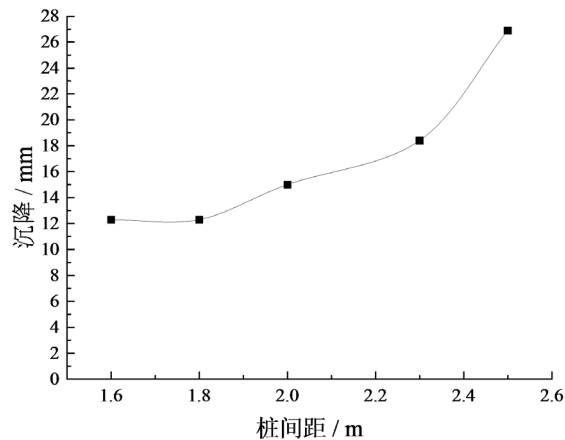


Figure 10. Maximum settlement of foundation under different pile spacing

图 10. 不同桩间距下地基最大沉降

不同桩间距下管桩轴力变化如图 11 所示, 桩间距增大, 复合地基单位加固面积上桩体置换率减小, 单位加固土面积上的桩体减少, 管桩轴力随着桩间距增大而增大, 且桩身中上部增幅较两端大, 相较于间距 1.6 m, 桩身最大轴力分别增加了 39.8% (1.8 m)、130.2% (2.0 m)、221.2% (2.3 m)。不同桩间距下, 桩土荷载分担比不同, 中性点位置不同致使其最大轴力所处位置并不在地下同一深度, 间距 1.6 m 时最大轴力约位于地下 1.65 m 处, 至间距 2.3 m 时最大轴力约位于地下 3.2 m 处, 中性点下移。不同桩间距下管桩轴力分布曲线高度相似, 同一桩间距下, 轴力先增大后减小。

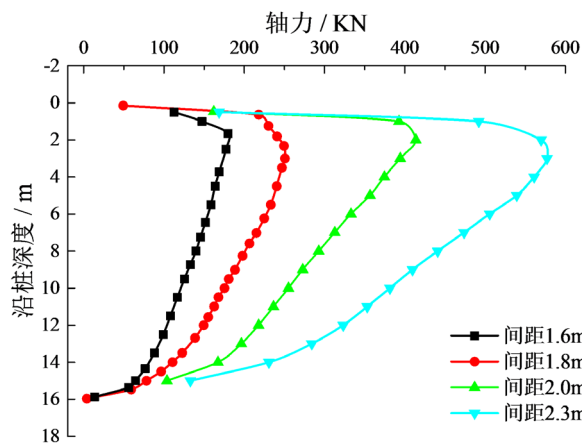


Figure 11. Axial force of pile body along depth curve under different pile spacing

图 11. 不同桩间距下桩身轴力沿深度曲线

6. 结论

1) PHC 管桩加固填海区软土地基, 可有效减小总沉降, 加固效果明显。经加固后的最大地基沉降量相比未做加固沉降值减小了 59.9%。

2) 桩长对软土地区 PHC 管桩复合地基桩间土沉降、管桩沉降、管桩轴力、桩土应力比影响显著。在有效桩长范围内,增大桩长可以有效的减小地基变形,但并非桩长越长,沉降控制效果越好。管桩轴力沿桩身深度先增大后减小,呈弓形。桩土应力比随桩长增大而增大,但趋势逐渐放缓。

3) 桩间距对本工程沉降特性影响较大,桩间距增大,复合地基单位加固面积上桩体置换率减小,间距 2.3 m 和间距 2.5 m 地基最大沉降量差值可达到 8.5 mm。随着桩间距增大,桩身最大轴力同样增长较快。对于本文条件模拟的工况,桩间距取 2.3 m 是较为合理的。

参考文献

- [1] 高闫楠,郑晨,白晓宇,张明义. 水泥土搅拌桩复合地基承载特性现场试验[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(19): 247-253.
- [2] 肖耀廷. 刚性基础复合地基传力机制及优化设计理论研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [3] 傅栋梁,刘力英,李翔. 昆明滇池泥炭土地区道路预应力管桩复合地基设计与应用[J]. 中国市政工程, 2015(4): 50-53+101.
- [4] 常远. 不同桩距桩基础在竖向荷载作用下沉降性能研究[D]: [硕士学位论文]. 开封: 河南大学, 2019.
- [5] Chevalier, B., Villard, P. and Combe, G. (2011) Investigation of Load-Transfer Mechanisms in Geotechnical Earth Structures with Thin Fill Platforms Reinforced by Rigid Inclusions. *International Journal of Geomechanics*, **11**, 239-250. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000083](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000083)
- [6] 袁曦明. 深层水泥土搅拌桩复合地基变形影响因素——针对广州市南沙地区淤泥质土处理分析[J]. 门窗, 2012(10): 112+115.
- [7] 陈亚楠. 沉降控制复合桩基中桩长对桩土荷载分担比的影响[J]. 中国市政工程, 2014(6): 44-45+97.
- [8] 胡江洋,刘锋,裘友强,刘军勇. 砾石桩复合地基桩土作用性状分析[J]. 路基工程, 2020(3): 22-25.