



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405637

引用格式:周友飞,刘成龙,吕海亮,等.复杂软弱土-砂土地基中劲性复合桩承载力性能数值分析[J].科学技术与工程,2025,25(19):8187-8197.

Zhou Youfei, Liu Chenglong, Lü Hailiang, et al. Numerical analysis on bearing capacity of rigid composite pile in complex soft soil-sandy soil foundations[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(19): 8187-8197.

复杂软弱土-砂土地基中劲性复合桩 承载力性能数值分析

周友飞¹, 刘成龙², 吕海亮¹, 陈海龙², 刘佳¹, 陈胜³, 张晋⁴, 李彪^{4*}

(1. 中交一公局海威工程建设有限公司, 北京 110112; 2. 中交一公局集团有限公司, 北京 110105;

3. 淮安市博彦土木工程科学研究院有限公司, 淮安 320800; 4. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 武汉 430068)

摘要 劲性复合桩是在水泥土搅拌桩中沉入刚性桩形成的一种新型复合桩型。为研究其在复杂软弱土-砂土地基中的承载特性,基于有限元软件 ABAQUS 建立劲性复合桩数值分析模型,分析芯桩长度和直径、水泥土桩长、直径和弹性模量、水泥土-预应力高强混凝土桩界面以及水泥土-土体界面剪切强度对其承载性能的影响规律。结果表明:劲性复合桩承载性能和经济优势显著;复合桩承载力随各研究参数增大而不断增大,但超过一定范围后,改变研究参数对承载力的提升有限;随着荷载增加,复合桩轴力分布曲线的斜率不断增大,PHC(pre-stressed high-strength concrete)芯桩承担的荷载比例为 93.32%~95.40%;当荷载超过 4 000 kN 后,水泥土桩在深度 10~16 m 范围内轴力急剧增大,芯桩/水泥土桩轴向应力比在深度约 10 m 附近发生明显突变;研究成果可为劲性复合桩的工程设计及应用提供参考。

关键词 劲性复合桩;软土地基;数值分析;承载力;传力机制

中图分类号 TU473.1;

文献标志码 A

Numerical Analysis on Bearing Capacity of Rigid Composite Pile in Complex Soft Soil-sandy Soil Foundations

ZHOU You-fei¹, LIU Cheng-long², LÜ Hai-liang¹, CHEN Hai-long², LIU Ji¹,
CHEN Sheng³, ZHANG Jin⁴, LI Biao^{4*}

(1. Haiwei Engineering Construction Co., Ltd., of FHEC of CCCC, Beijing 110112, China;

2. China First Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 110105, China;

3. Huai'an Boyan Research Institute of Civil Engineering Co., Ltd., Huai'an 320800, China;

4. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

[Abstract] The stiffly-expanded composite pile is a new type of composite pile formed by sinking rigid pile in cement soil mixing pile. In order to study its bearing characteristics in complex soft soil-sandy soil foundation, a numerical analysis model of rigid composite pile was established based on finite element software ABAQUS, with the effect of core pile length and diameter, soil-cement pile length, diameter and elastic modulus, as well as soil-cement and pre-stressed high-strength concrete (PHC) pile interface and soil-soil interface shear strength on the bearing performance was analyzed. The results show that the bearing capacity and economic advantages of the stiffened composite pile are obvious. The bearing capacity of composite pile increases with the increase of research parameters, but the improvement is limited by changing the research parameters beyond a certain range. With the increase of load, the slope of axial force distribution curve of composite pile increases, and the load proportion of PHC core pile is about 93.32%~95.40%. When the load exceeds 4 000 kN, the axial force of soil-cement pile increases sharply within the depth range of 10~16 m, and the axial stress ratio of core pile/soil-cement pile changes significantly near the depth of about 10 m. The research outcomes could provide references for the engineering design and application of the stiffly-expanded composite piles.

[Keywords] rigid composite pile; soft foundation; numerical analysis; bearing capacity; load transfer mechanism

收稿日期: 2024-07-26 修订日期: 2025-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(52308248)

第一作者: 周友飞(1981—),男,汉族,江苏滨海人,高级工程师。研究方向:建筑工程管理。E-mail:529338697@qq.com。

*通信作者: 李彪(1990—),男,汉族,河南桐柏人,硕士,副教授。研究方向:混凝土材料与结构。E-mail:libiao@hbut.edu.cn。

在中国沿江沿海地区广泛分布着由淤泥、杂填土或其他高压缩性土层构成的软土地基,具有强度低、压缩性高、承载力低、沉降量大等不良工程特性,对建筑安全造成不利影响^[1]。水泥土搅拌桩是一种较为常用的地基处理手段,但其桩身强度受土质和施工工艺影响较大,当承载力或沉降要求较高时难以适用。预应力高强混凝土(pre-stressed high-strength concrete, PHC)管桩具有工效高、强度和刚度大等优点,但施工时的挤土效应会对工程自身及周边建筑物产生影响,有时还需要进行引孔作业,降低了施工效率。此外,由于软土条件下桩侧摩阻力较小,PHC桩身强度未能充分发挥,经济性不理想,而其他刚性桩也存在类似问题^[2]。因此,对于软弱土地基,单一桩型具有明显局限性。劲性复合桩是在水泥土搅拌桩初凝之前插入预制混凝土桩,形成芯桩与水泥土共同工作、承受荷载的新桩型^[3],可以充分发挥预制混凝土桩的高承载特性,降低工程成本^[4],受到广泛关注。

近年来,国内外学者采用试验研究、数值模拟和理论分析等对劲性复合桩承载特性等开展了系列研究工作,取得了较为丰富的研究成果。在试验研究方面,李俊才等^[5-6]采用现场荷载试验和数值模拟研究了管桩水泥土复合桩的荷载演变机制,结果表明:管桩是上部荷载的主要承担者,复合桩表现出摩擦桩的工作特性。宦雯等^[7]采用现场静载和管桩-水泥土黏结强度试验,研究了复合桩在粉土粉砂地层中的极限承载力,并提出了管桩水泥土复合基桩承载力计算公式。周威等^[8]通过同直径多桩型现场单桩荷载试验,发现劲性复合桩的极限承载力是同直径灌注桩的1.39~1.69倍,水泥土的重组固化效应和扩散层效应是劲性复合桩具有优异力学性能的主要原因^[9]。朱锐等^[10]通过劲性复合桩挤土效应和静力触探试验,研究了复合桩成桩过程中桩周土孔隙水压力和有效应力的变化规律。结果表明:劲性复合桩挤土效应沿桩径方向逐渐减小,沿桩长方向逐渐增大;在成桩过程中,周围土层的有效应力增长了12%~

63%,桩侧摩阻力显著提升。

在数值模拟研究方面,曹战峰等^[11]建立了等芯长柔刚复合桩及PHC管桩ABAQUS有限元模型并进行数值模拟,发现等芯长柔刚复合桩的极限承载力相比于PHC管桩提高了约30%。鲍鹏等^[12]基于ANSYS软件建立三维有限元模型,研究了劲性搅拌桩复合静动力承载性能,发现劲性搅拌桩所承担的荷载主要由侧摩阻力分担,且存在最佳内外芯桩长度比和最优截面含芯率。王建等^[13]对黏土地基中劲性复合桩水平承载性能进行了数值模拟分析,基于计算结果,提出了水平极限承载力计算方法。朱庆华等^[14]基于ABAQUS有限元模型研究了劲性搅拌桩复合地基的承载特性,发现复合地基的桩土应力比随着垫层厚度增加而减小。此外,李立业等^[15]结合工程实例基于代表性规范中承载力的计算方法提出了改进的计算公式。

综上所述,关于劲性复合桩承载性能的研究已取得了一定成果,但研究多聚集在单一土层或多种土层,针对复杂软弱土-砂土地基环境中的研究较少,复合桩的承载性能演变规律以及荷载传递机理不清楚。鉴于此,结合实际工程,采用ABAQUS有限元软件对劲性复合桩进行有限元建模和分析,研究复杂软弱土+砂土地质条件下劲性复合桩的承载性能,揭示其荷载传递机理以及承载力形成机制,可为同类工程设计和应用提供参考。

1 工程概况

拟建工程位于江苏泰州高港区永安洲镇,总用地面积为129 940 m²,总建筑面积为349 937 m²,由20栋住宅楼、12栋商业楼及机动车地库组成。拟建场地在垂深50.0 m深度范围内的地基土为第四系全新统冲积相沉积层,主要由黏性土、粉性土、砂性土组成,共计八个地质层组,地质条件复杂,地表以下10 m范围内有较厚软土层,稳定性较差,为抗震不利地段,10 m深度以下开始为砂土层,地基土物理力学参数见表1。

表1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

层号	土层	层厚/m	重度 γ / (kN·m ⁻³)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)	压缩模量 E_s /MPa	泊松比 ν	承载力特征值 f_{ak} /kPa	静探比贯入 阻力值/MPa
1	杂填土	2.4	18.0	16.8	10.5	3.2	0.35	70	1.101
2	淤泥质粉质黏土	5.8	17.8	13.8	6.3	3.1	0.42	60	0.524
3	粉质黏土夹粉砂	1.6	18.1	19.1	12.3	3.5	0.40	80	1.438
4	粉砂夹粉质黏土	1.5	18.4	6.1	27.6	7.5	0.40	130	4.579
5-a	粉土夹粉质黏土	1.7	18.2	13.5	20.3	6.5	0.40	110	3.386
5	粉砂夹粉土	4.2	18.5	4.5	30.5	10.5	0.40	170	7.234
6	粉砂	8.4	18.2	3.1	32.5	13.5	0.30	200	10.076
7	粉细砂	11.3	18.2	1.5	35.2	14.0	0.30	210	10.727
8	粉细砂	未击穿	18.3	1.4	36.8	16.0	0.30	220	15.053

拟建工程所处场地的软土层厚度较大、压缩性高、承载力低,基础需采用桩基础,要求单桩承载力特征值在 2 000 kN 以上。根据勘察资料,如采用 PHC 管桩,由于桩侧阻较小,单根预制桩长度较长,穿越砂层具有较大难度,可能需要引孔作业,将大大延长桩基施工时间。考虑到单桩承载力、施工工期与成本等因素,工程拟采用劲性复合桩作为建筑物基础,所选用的劲性复合桩为水泥土搅拌桩内插 PHC500AB(125)型预制管桩,其中水泥土搅拌桩直径为 900 mm,预制管桩直径为 500 mm,两桩桩长均为 18 m。

2 劲性复合桩有限元建模

2.1 模型建立

采用 ABAQUS 有限元软件建立劲性复合桩-土体三维弹塑性分析模型,如图 1 所示。考虑到计算效率,根据对称性,选取 1/4 复合桩进行建模。模型主要包含水泥土桩、管桩、土体和刚性荷载板,其中,土体模型采用圆柱形,为尽量减小边界效应的影响,土体水平方向尺寸取 20 倍水泥土桩半径,为 9 m,深度方向尺寸按桩端距离模型底部 10 倍桩径确定,为 22 m。水泥土桩、PHC 桩、土体和荷载板均采用 C3D8R 单元。模型共包含 91 386 个节点,83 292 个单元。

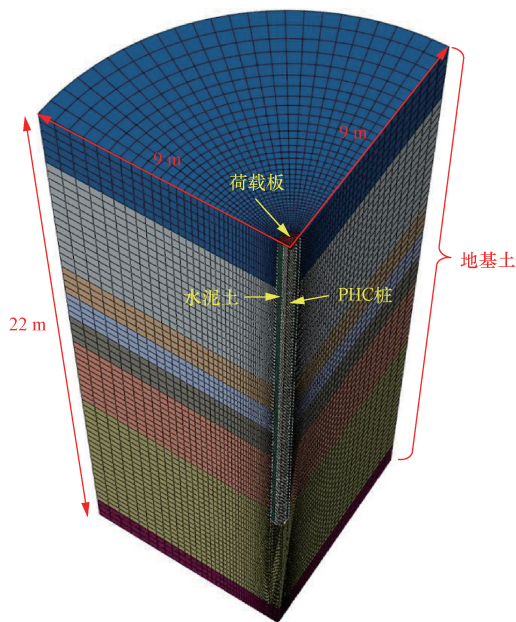


图 1 劲性复合桩有限元分析模型

Fig. 1 Finite element model of composite pile

2.2 材料本构模型及参数选取

材料本构模型的正确选取是模型计算结果可靠的前提。根据场地环境,土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型,材料参数取值见表 1,其中土体弹性模

量取为 3~5 倍压缩模量^[16]。参考已有研究工作,PHC 桩在承受竖向荷载时,桩身通常不会进入塑性状态,可采用线弹性模型;当承受水平荷载时,可采用混凝土塑性损伤 (concrete damaged plasticity model, CDP) 模型模拟混凝土开裂后的非线性行为,而钢筋可采用理想弹塑性模型^[17]。初步计算结果表明,在加载过程中 PHC 桩身混凝土和钢筋均未进入塑性状态,因此混凝土和钢筋均采用线弹性模型。对于水泥土,其力学性能介于土体和素混凝土之间,其本构模型主要有 Mohr-Coulomb (M-C) 模型^[5,18]和 CDP 模型^[14]两种。考虑到 M-C 模型参数相对容易确定,本文采用 M-C 模型,其材料参数取值参考文献^[19]。荷载板采用线弹性模型。除土体外,各材料参数取值见表 2。

表 2 模型材料参数

Table 2 Material parameters of models

类别	密度 γ / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 E /MPa	泊松比 ν	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)
PHC 桩身混凝土 (C80)	2 500	38 000	0.2	—	—
PHC 桩钢筋	7 800	200 000	0.3	—	—
水泥土桩	2 000	500	0.3	400	30
荷载板	7 800	200 000	0.2	—	—

2.3 模型边界条件与接触

考虑复合桩实际工作状态,在土体模型底部施加固定约束,外侧施加径向约束,对称面施加对称约束,模型顶部为自由边界。荷载主要包括桩身自重和竖向荷载,其中自重通过设置重力加速度施加,竖向荷载则通过在刚性荷载板中心施加集中力进行加载,最大竖向荷载为 5 500 kN,共分 22 级施加,每级增加 250 kN。

模型中共有两个接触面:水泥土桩-土体接触面和水泥土桩-PHC 桩接触面。对于前者,当前主要采用绑定接触^[18,20]和库伦摩擦模型^[14]两种方式,但均存在一定局限性。其中,绑定接触忽略了桩-土接触面的相对运动,而库伦摩擦模型则忽略了接触面的黏聚力。文献^[21]表明,水泥土-土体的界面抗剪强度基本符合关系式

$$\tau = c + \mu p \quad (1)$$

式(1)中: τ 为切向力; μ 为摩擦系数; p 为法向压力; c 为黏聚力,其取值为 10~40 kPa。可以看出,水泥土桩-土体接触面性能介于绑定接触和库伦摩擦模型之间。然而,ABAQUS 软件中的摩擦模型未能涵盖式(1)所示有黏聚力的摩擦行为,但提供了针对不同法向压力设置不同摩擦系数的功能。为此,可通过引入不同法向压力下的等效摩擦系数(μ')来解决,即

$$\tau = c + \mu p = \left(\frac{c}{p} + \mu \right) p = \mu' p \quad (2)$$

文献[22]表明,水泥土桩-PHC 桩的接触面存在明显的黏结-滑移特性。参考文献[16,23],选用黏结-滑移摩擦模型,摩擦系数取 0.4。对于 Cohesive 和损伤演化行为,参考文献[22],水泥土和混凝土界面黏结强度取为 200 kPa,达到黏结强度时切向位移取为 1.6 mm,最大切向位移取为 2 mm。

2.4 数值分析流程及验证

图 2 为常规桩-土接触分析流程,主要包含地应力平衡、建立桩-土接触和施加荷载两个分析步。然而,应用上述分析流程计算时发现,当桩长较长、桩底土质较弱时,多次出现桩底土发生向上竖向位移,周围土体产生塑性变形,当塑性变形较大时导致计算不收敛[图 2(c)]。其原因主要在于,当激活桩并撤去桩底临时土压力时,桩底土体会有向上的运动趋势,由于桩侧摩擦阻力的作用,传递到桩底的

竖向力较为有限,不足以抵消桩底土的上拱运动,当土体较软弱时,可能会引起桩底周围土体较大的塑性变形。即:撤去的桩底临时土压力没有得到及时平衡而导致计算失败。

在劲性复合桩施工时,水泥土未凝固处于流体状态,此时桩底土压力已得到平衡,而桩侧没有摩阻力;待水泥土凝固后,才开始建立桩侧接触关系。基于以上分析,本文提出两阶段接触分析流程,可有效解决劲性复合桩分析中的收敛困难问题,如图 3 所示。具体为:首先按照如图 2(a)所示进行地应力平衡,再按如图 3(a)所示建立桩底接触,激活桩后,维持桩侧临时约束,只撤去桩底临时土压力,并建立桩底接触,此时由于桩侧没有摩阻力,桩底的上拱趋势会由自身重量进行有效抑制;随后,建立如图 3(b)所示桩侧接触,解除桩侧临时约束,建立桩侧接触关系;最后如图 3(c)所示施加荷载。

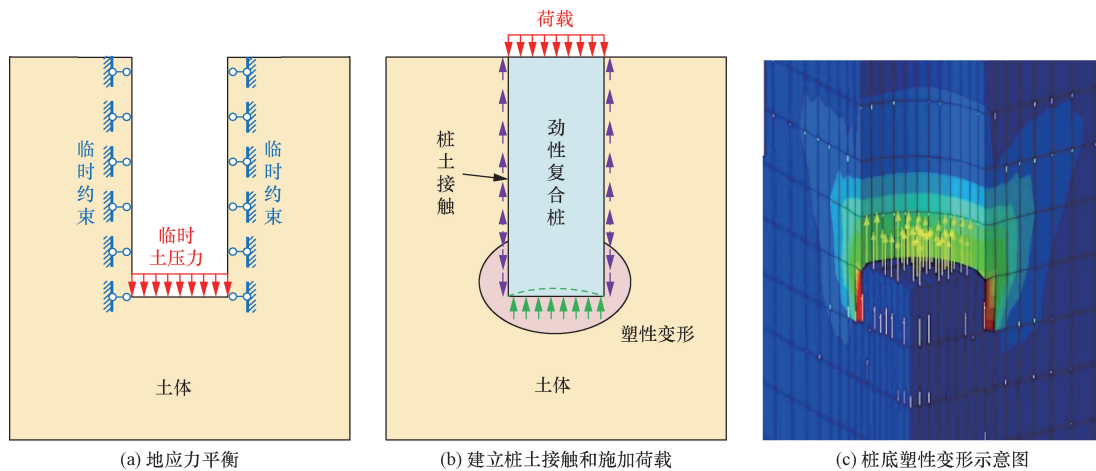


图 2 常规桩土接触分析流程及存在的问题

Fig. 2 Common contact analysis procedure and existing problems of column and soil

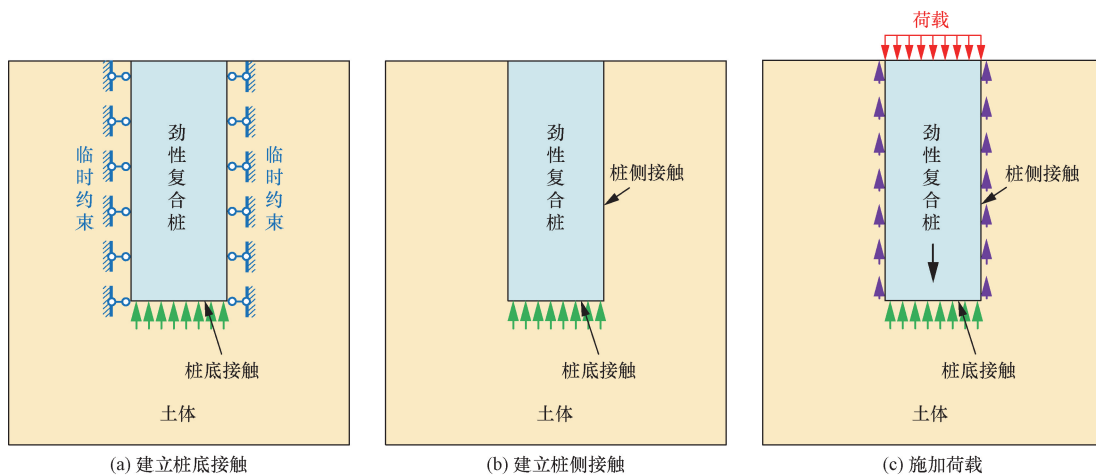


图 3 两阶段接触分析流程

Fig. 3 Two-stage contact analysis procedure

为验证所提有限元建模分析方法的准确性,对文献[5]中试验测试结果进行对比分析。所选用劲性复合桩为PHC 500AB(125)-15 m管桩,压入直径为900 mm、长度为18 m的水泥土桩。模型计算与试验数据对比结果见图4。由图4可知,有限元模拟得到的荷载-沉降($Q-s$)曲线与试验结果吻合良好,可用于劲性复合桩承载性能的分析。

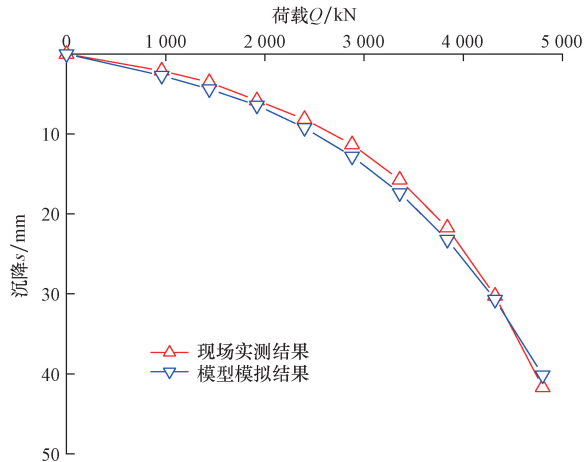


图4 试验和模拟得到的 $Q-s$ 曲线对比

Fig. 4 Comparison of $Q-s$ curve between test and numerical results

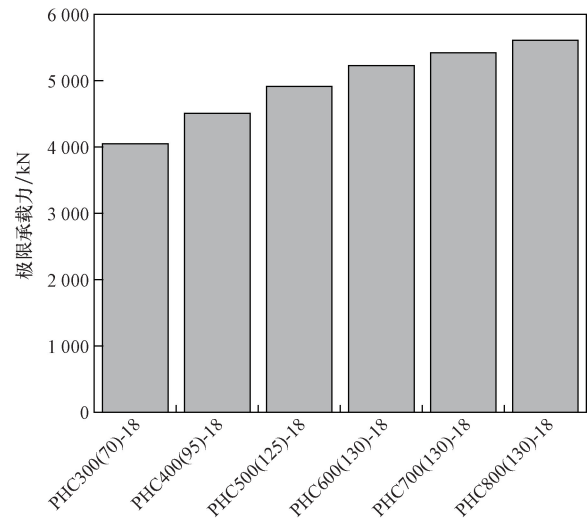
3 劲性复合桩承载性能分析

3.1 承载力影响因素分析

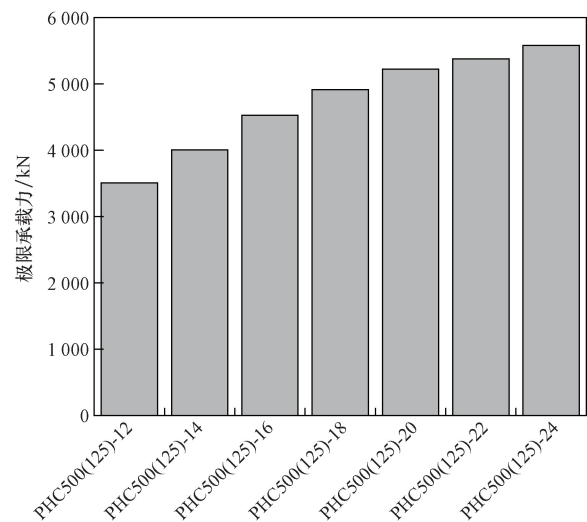
为研究劲性复合桩承载力的影响因素,考虑桩型、PHC 桩长和桩径、水泥土桩长和桩径、水泥土弹模和强度、水泥土-土黏聚力、水泥土-混凝土黏聚力等因素,共设置44种分析工况,运用上述有限元方法依次得到各工况的 $Q-s$ 曲线以及极限承载力,结果列于表3。为方便对比,在确定极限承载力时,统一按照桩顶位移40 mm进行计算。

3.1.1 芯桩参数的影响

图5(a)为PHC芯桩直径对劲性复合桩极限承载力的影响,PHC桩直径范围为300~800 mm,水泥土桩外径和桩长分别为900 mm和18 m。从图中可以看出,随着PHC桩径增大,复合桩承载力不断增大;当桩径小于500 mm时,增大桩径对复合桩承载力的提升较为明显;当PHC桩径超过600 mm后,进一步提升桩径对复合桩承载力的提升程度有限。图5(b)为PHC芯桩长度对劲性复合桩极限承载力的影响,桩长变化范围为12~24 m。由图可知,随着桩长度增大,复合桩承载力逐步上升。当PHC桩长小于20 m时,增大桩长对复合桩承载性能的提升较为明显,而桩长超过20 m后则极限承载力的变化不大。



(a) 芯桩直径的影响



(b) 芯桩长度的影响

图5 芯桩直径和长度对劲性复合桩承载性能的影响

Fig. 5 Effect of core pile diameter and length on the bearing capacity of composite pile

3.1.2 水泥土桩参数的影响

如图6所示为水泥土桩直径、桩长和水泥土力学性能对劲性复合桩极限承载性能的影响。由图6可知,复合桩承载力随着水泥土桩径增加大致呈线性增长趋势,随着水泥土桩长增大也不断增大,当桩长小于16 m时,增加水泥土桩长对复合桩承载性能提升较为明显;而水泥土桩长超过18 m后,增加桩长对复合桩承载性能的提升有限。此外,当水泥土的弹性模量达到300 MPa以后,水泥土力学性能指标对复合桩极限承载力的影响不明显。

3.1.3 接触面强度的影响

如图7所示为水泥土桩-土体接触面强度以及水泥土桩-PHC桩接触面强度对劲性复合桩极限承载力的影响。可以看出,桩-土接触面的黏聚力对复合桩承载性能的影响较为明显,尤其是当黏聚力低于20 kPa

表3 分析工况及极限承载力
Table 3 Analysis working case and ultimate bearing capacity

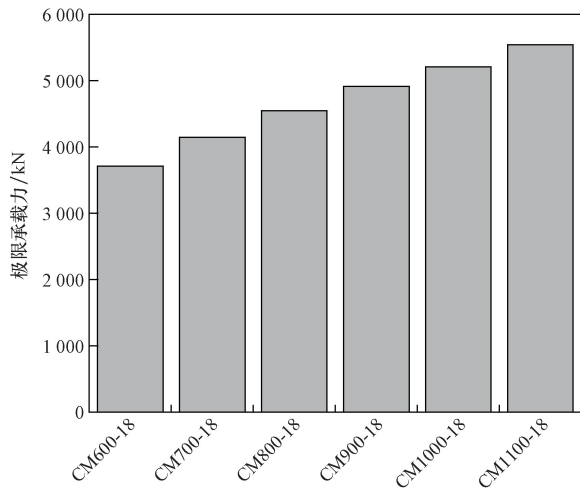
工况	PHC 桩直径 (壁厚)/mm	PHC 桩 长度/m	水泥土桩 直径/mm	水泥土桩 长度/m	水泥土弹模/ MPa	水泥土-土黏聚力/ kPa	水泥土-混凝土 黏聚力/kPa	极限承 载力/kN
1	500(125)	18	900	18	500	40	200	4 914
2	—	—	900	18	500	40	200	1 735
3	500(125)	18	—	—	—	40	200	2 256
4	800(130)	18	—	—	—	40	200	3 669
5	1 000(130)	18	—	—	—	40	200	4 601
6	500(125)	28	—	—	—	40	200	3 289
7	500(125)	38	—	—	—	40	200	4 249
8	300(70)	18	900	18	500	40	200	4 048
9	400(95)	18	900	18	500	40	200	4 509
10	600(130)	18	900	18	500	40	200	5 228
11	700(130)	18	900	18	500	40	200	5 420
12	800(130)	18	900	18	500	40	200	5 609
13	500(125)	12	900	18	500	40	200	3 506
14	500(125)	14	900	18	500	40	200	4 006
15	500(125)	16	900	18	500	40	200	4 528
16	500(125)	20	900	18	500	40	200	5 224
17	500(125)	22	900	18	500	40	200	5 379
18	500(125)	24	900	18	500	40	200	5 577
19	500(125)	18	600	18	500	40	200	3 710
20	500(125)	18	700	18	500	40	200	4 145
21	500(125)	18	800	18	500	40	200	4 547
22	500(125)	18	1 000	18	500	40	200	5 210
23	500(125)	18	1 100	18	500	40	200	5 543
24	500(125)	18	900	12	500	40	200	4 245
25	500(125)	18	900	14	500	40	200	4 401
26	500(125)	18	900	16	500	40	200	4 773
27	500(125)	18	900	20	500	40	200	5 023
28	500(125)	18	900	22	500	40	200	5 070
29	500(125)	18	900	24	500	40	200	5 080
30	500(125)	18	900	18	300	40	200	4 777
31	500(125)	18	900	18	400	40	200	4 836
32	500(125)	18	900	18	600	40	200	4 957
33	500(125)	18	900	18	700	40	200	5 000
34	500(125)	18	900	18	500	0	200	3 412
35	500(125)	18	900	18	500	10	200	3 997
36	500(125)	18	900	18	500	20	200	4 512
37	500(125)	18	900	18	500	30	200	4 723
38	500(125)	18	900	18	500	50	200	5 111
39	500(125)	18	900	18	500	60	200	5 295
40	500(125)	18	900	18	500	40	50	4 440
41	500(125)	18	900	18	500	40	100	4 542
42	500(125)	18	900	18	500	40	300	5 072
43	500(125)	18	900	18	500	40	400	5 147
44	500(125)	18	900	18	500	40	500	5 192

时,承载力下降显著;当黏聚力高于 20 kPa 后,黏聚力的增大与承载力的提升大致呈线性关系。此外,水泥土桩-PHC 桩接触面强度对复合桩极限承载力也有显著的影响,当黏聚力低于 100 kPa 时对承载力的影响较为明显;而当黏聚力超过 200 kPa 后,进

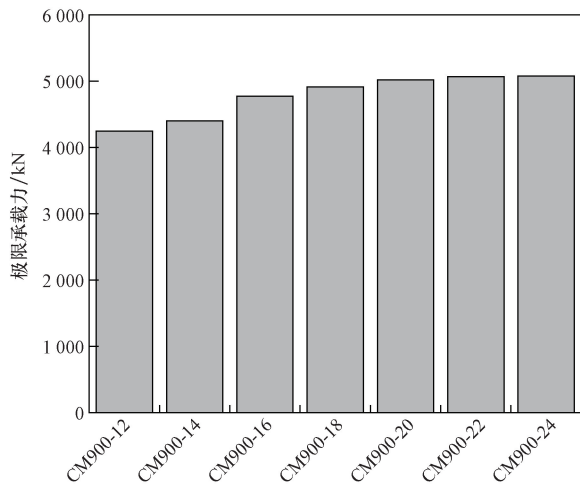
一步提升黏聚力对复合桩承载力的影响不大。

3.2 荷载传递机制分析

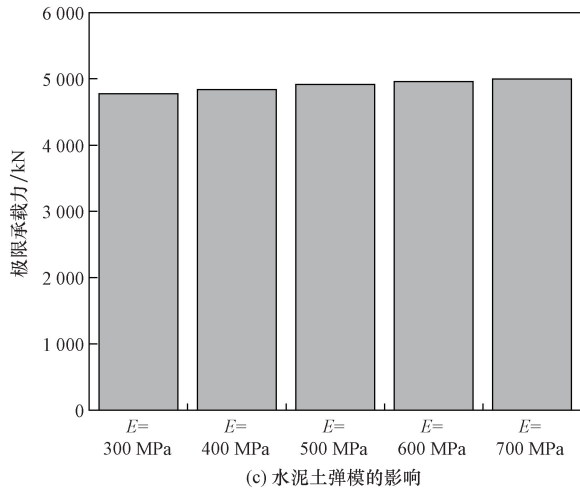
为进一步明确劲性复合桩受力过程中荷载的传递机制,对典型试件(表 3 中工况 1)为例,从桩身轴力分布、荷载分担比例、轴向应力比和界面剪应力



(a) 水泥土桩直径的影响



(b) 水泥土桩长度的影响



(c) 水泥土弹模的影响

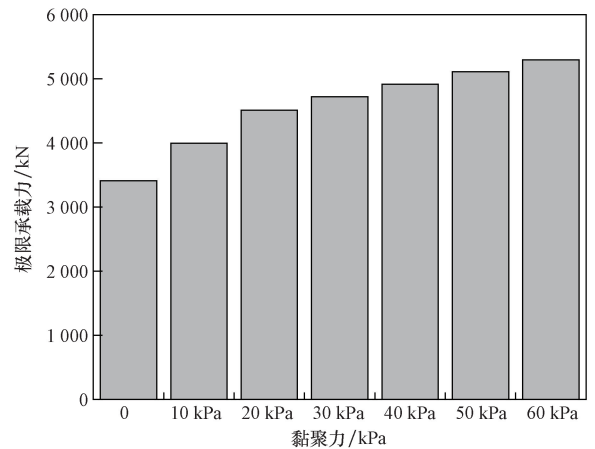
图6 水泥土桩参数对劲性复合桩承载性能的影响

Fig. 6 Effect of cement soil pile parameters on the bearing capacity of composite pile

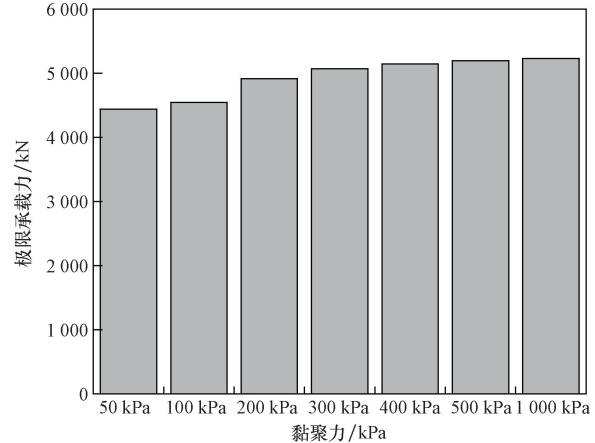
分布等方面开展进一步分析。

3.2.1 桩身轴力分布

如图8所示为不同荷载等级下劲性复合桩、芯桩和水泥土桩的轴力分布图。从图8(a)中可以看



(a) 土桩-土体接触面强度的影响

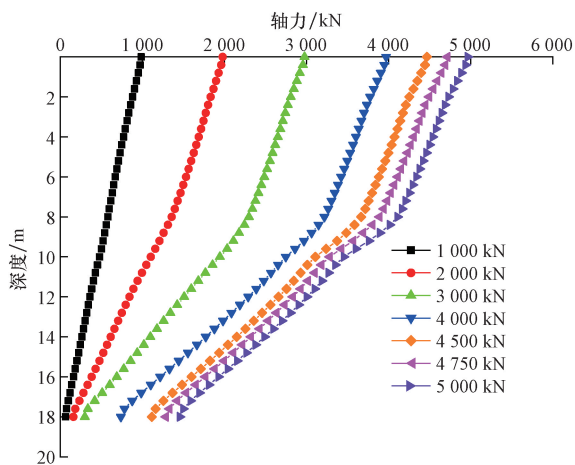


(b) 水泥土桩-PHC桩接触面强度的影响

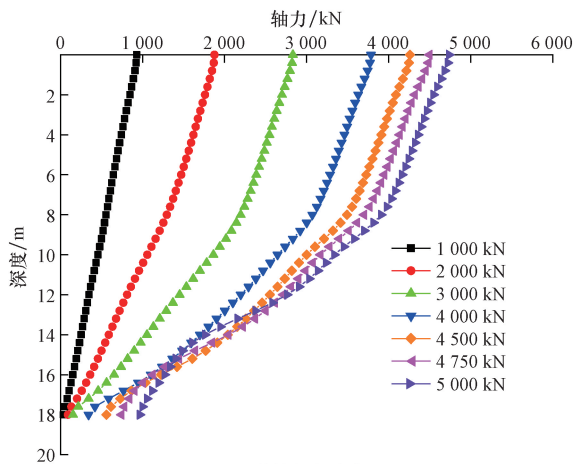
图7 接触面强度对劲性复合桩承载性能的影响

Fig. 7 Effect of contact strength on the bearing capacity of composite pile

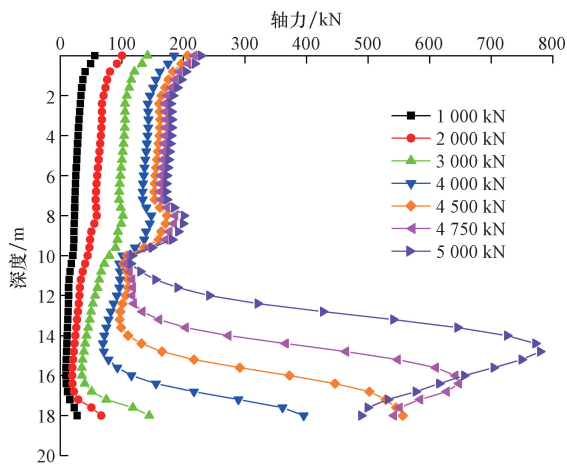
出,随着荷载增加,复合桩轴力分布曲线的斜率不断增大,体现了荷载自上而下传递以及复合桩桩侧摩阻力自上而下逐渐发挥的特点。当荷载超过4 000 kN后,桩侧摩阻力发挥较为充分,继续增加荷载,轴力分布曲线呈平行式右移,桩端阻力逐渐发挥作用,其值约占总荷载的28%,这主要是因为上层土体较为软弱,提供的侧摩阻力有限,致使桩端土承载力较高。PHC 芯桩轴力分布规律与复合桩轴力分布曲线变化规律相似,其不同之处在于,当荷载超过4 000 kN后,继续增加荷载,其轴力分布曲线的斜率进一步增大;芯桩端承力约占总荷载的19.2%。此外,从图8(c)可以看出,当桩顶荷载低于4 000 kN时,水泥土桩部分轴力分布曲线随荷载呈类“C”形态,表现为桩顶和桩底轴力大、中间轴力偏小的特点;当桩顶荷载超过4 000 kN后,水泥土桩的轴力分布曲线随着荷载增大出现较为复杂的变化规律,深度10~16 m范围内轴力急剧增大,其原因主要在于10 m以上的土层较软弱,无法继续承担荷载,荷载主要由10 m以下土层承担。



(a) 劲性复合桩轴力分布图



(b) 芯桩轴力分布图



(c) 水泥土桩轴力分布图

图8 不同荷载等级下劲性复合桩、芯桩及水泥土桩轴力分布图

Fig.8 Axial load distribution of composite pile, core pile and cement-soil pile under different load levels

3.2.2 荷载分担

500~5000 kN 各级荷载下管桩、水泥土桩顶荷载分担比例如表4所示。由表4可知,各级荷载下PHC 芯桩承担的荷载比例为93.32%~95.40%,水泥土桩承担的荷载比例为4.60%~5.68%。这主要在于,在劲性复合桩体系中,外围水泥土桩主要负责提供侧摩阻力,其承载比例很小,大部分荷载由管桩承担;随着上部荷载增大,管桩承担的比例逐渐增大,但当荷载超过4000 kN后,其增大幅度逐渐放缓。

3.2.3 轴向应力比

如图9所示为不同荷载下芯桩与水泥土桩轴向应力比沿深度的变化。从图9中可以看出,当土层分布较为复杂,土层材料性能存在较大差异时,芯桩与水泥土桩的轴向应力比随深度变化规律较为复杂,特别是在土体从软土变为砂土时(深度约10 m附近),轴向应力比出现较为明显的突变。当荷载超过2000 kN后,0~8 m范围内的轴向应力比分布随荷载增加变化不大,但10 m以下范围的轴向应力比分布差异较大,尤其是当荷载超过4000 kN后,此时上层软弱土体已无法提供足够承载力,新增荷载基本由10 m以下的砂土承担,轴向应力比随荷载增加呈明显降低趋势^[24-25]。

3.2.4 界面剪应力分布

如图10所示为不同荷载下水泥土桩-土体和水

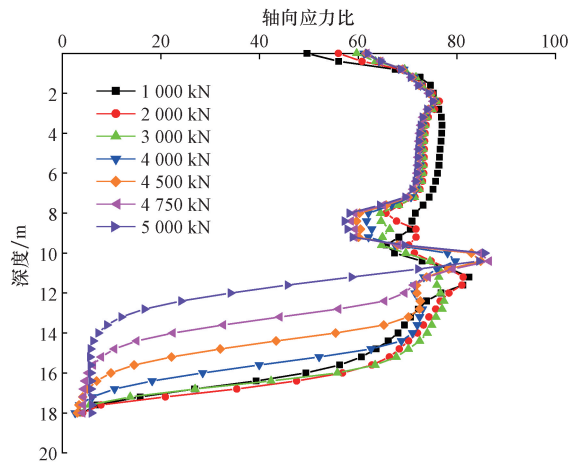


图9 不同荷载下芯桩与水泥土桩桩身应力比

Fig.9 Stress ratio between core pile and soil-cement pile under different loads

表4 管桩、水泥土荷载分担比

Table 4 Load taking ratio of PHC pile and cement-soil pile

构件	各级荷载(kN)分担比/%									
	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
PHC 桩	94.32	94.32	94.66	94.93	95.11	95.23	95.32	95.35	95.37	95.40
水泥土桩	5.68	5.68	5.34	5.07	4.89	4.77	4.68	4.65	4.63	4.60

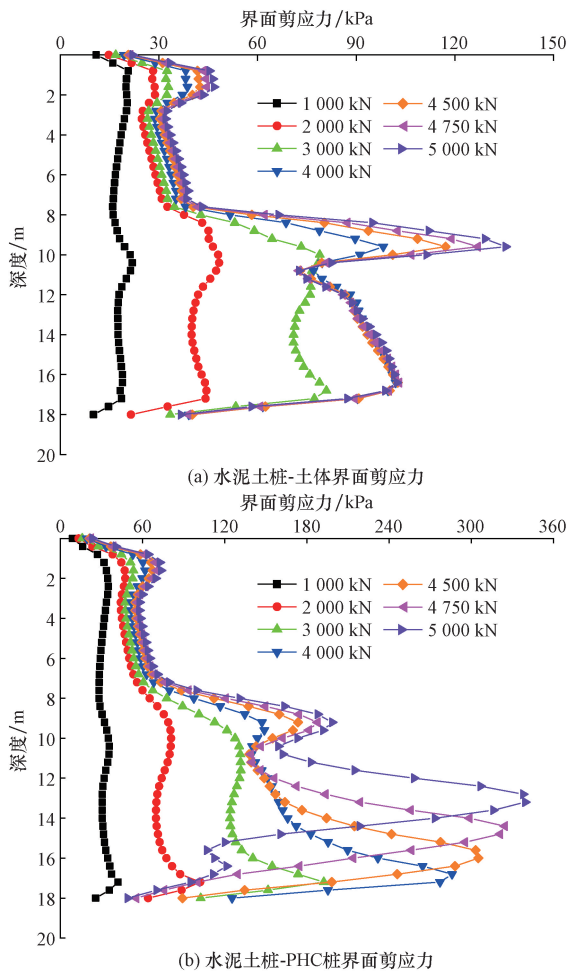


图 10 不同荷载等级下劲性复合桩、芯桩及水泥土桩轴力分布图

Fig. 10 Axial load distribution of composite pile, core pile and soil-cement pile under different load levels

泥土桩-PHC 桩两个界面的剪应力沿深度的分布图。由图 10 可知,在复杂土层条件下,桩侧土体提供的侧摩阻力沿深度的变化规律也较为复杂,在 0~3 m 和 8~10 m 范围内,桩侧摩阻力均呈现出先变大后变小的情况,当荷载超过 3 000 kN 后,该现象尤为明显,此时由于 10 m 以上软弱土层无法继续提供承载力,致使 10 m 以下的界面剪应力急剧增大。

3.3 经济技术分析

如图 11 所示为劲性复合桩与水泥土桩和 PHC 桩的承载性能对比结果。其中劲性复合桩为 PHC500(125)-18 管桩,和水泥土桩的直径为 900 mm、长度为 18 m。从图 11 中可以看出,在相同尺寸下,纯水泥土桩的承载力仅约为劲性复合桩的 1/3,PHC500 芯桩承载力不足劲性复合桩的 1/2;当 PHC500 桩长增大至 38 m,其承载力仍为劲性复合桩的 86% 左右,可见劲性复合桩的承载性能显著优于单一水泥土桩或 PHC 桩。此外,当桩长为 18 m 时,若达到相同承载能力,采用纯 PHC 桩需将桩径增大至 1 000 mm,此时

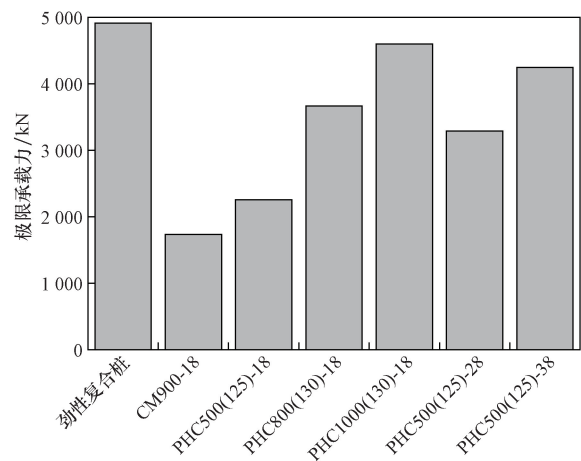


图 11 各桩型承载性能对比

Fig. 11 Comparison of bearing capacity of each pile type

PHC 管桩的造价约为 15 840 元,而劲性复合桩造价约为 7 101 元。由此可见,劲性复合桩具有更为显著的经济优势和承载性能。

4 结论

(1)考虑水泥土桩-土体接触面的性能,通过引入不同法向压力下的等效摩擦系数定义界面本构模型,建立劲性复合桩三维有限元分析模型,并提出“建立桩底接触-建立桩侧解除-施加荷载”的两阶段接触分析流程。所建立的有限元模型及其分析方法能够较好预测劲性复合桩的承载性能。

(2)随着 PHC 桩径和桩长增大,复合桩承载力不断增大,但当桩径超过 600 mm、桩长超过 20 m 后,改变桩径和桩长对复合桩承载力的提升程度有限;复合桩承载力亦随着水泥土桩径和桩长不断增大,但桩长超过 18 m 后,增加桩长对复合桩承载性能的提升有限,而水泥土弹性模量的影响不明显;当桩-土接触面黏聚力高于 20 kPa 时,黏聚力增大与承载力的提升大致呈线性关系;而水泥土桩-PHC 桩接触面弹性模量超过 200 kPa 后,其对复合桩承载力的影响不大。

(3)随着荷载增加,复合桩轴力分布曲线斜率不断增大,当荷载超过 4 000 kN 后,桩侧摩阻力发挥较为充分,而水泥土桩在深度 10~16 m 范围内轴力急剧增大;各级荷载下 PHC 芯桩承担的荷载比例为 93.32%~95.40%;在深度约 10 m 附近,芯桩与水泥土桩的轴向应力比发生明显突变。

(4)相同尺寸下,纯水泥土桩的承载力仅约为劲性复合桩的 1/3,芯桩承载力不足劲性复合桩的 1/2。相同承载能力下,劲性复合桩造价仅为 PHC 管桩造价的 48%,体现出更为显著的经济优势和承载性能。

参 考 文 献

- [1] 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.
Li Dan, Wang Jilin, Tan Xuan, et al. Bearing characteristics for composite pile foundation with concrete-cored deep chemical mixing pile[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(9): 118-123.
- [2] 闫楠,郑晨,白晓宇,等. 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.
Yan Nan, Zheng Chen, Bai Xiaoyu, et al. Field test on bearing capacity of composite foundation of cement-soil mixing pile[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(19): 247-253.
- [3] 李鹏,安红林,王柳媛,等. MC 劲性复合桩与钻孔灌注桩在某工程项目中应用对比分析[J]. 建筑科学, 2021, 37(11): 147-152.
Li Peng, An Honglin, Wang Liuyuan, et al. Comparative analysis of MC strength composite piles and cast in-place piles in an engineering project[J]. Building Science, 2021, 37(11): 147-152.
- [4] 陈家冬,别小勇,汪小健,等. 劲性复合桩承载性状及施工对环境的影响研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(21): 114-118.
Chen Jiadong, Bie Xiaoyong, Wang Xiaojian, et al. Study on bearing behavior of stiff composite pile and influence of its construction on environment[J]. Building Science, 2018, 48(21): 114-118.
- [5] 李俊才,张永刚,邓亚光,等. 管桩水泥土复合桩荷载传递规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 3068-3076.
Li Juncai, Zhang Yonggang, Deng Yaguang, et al. Load transfer mechanism of composite pile composed of jet-mixing cement and PHC pile with core concrete [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 3068-3076.
- [6] 李俊才,邓亚光,宋桂华,等. 素混凝土劲性水泥土复合桩承载机理分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 181-185.
Li Juncai, Deng Yaguang, Song Guihua, et al. Analysis of load-bearing mechanism of composite foundation of plain concrete reinforced cement-soil mixing piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 181-185.
- [7] 宦雯,李俊才,袁孝蓓,等. 管桩水泥土复合基桩极限承载力的设计计算[J]. 建筑科学, 2018, 34(5): 23-30.
Huan Wen, Li Juncai, Yuan Xiaopei, et al. Research on design calculations of ultimate bearing capacity of composite pile made up of jet-mixing cement and PHC pile with core concrete[J]. Building Science, 2018, 34(5): 23-30.
- [8] 周威,包华,彭杰,等. 劲扩复合桩竖向抗压承载特性对比试验[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(9): 3696-3701.
Zhou Wei, Bao Hua, Peng Jie, et al. Comparative experiment on the vertical compressive bearing characteristics of the expanded stiffened deep-cement-mixing pile[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(9): 3696-3701.
- [9] 包华,洪俊青,夏胞刚,等. 劲性复合桩外界面侧阻强化效应试验研究[J]. 建筑科学, 2022, 38(1): 107-113.
Bao Hua, Hong Junqing, Xia Baogang, et al. Experiment on the outer interface enhanced shaft-resistance effect of the stiffened deep-cement-mixing pile [J]. Building Science, 2022, 38(1): 107-113.
- [10] 朱锐,周峰,陈廷柱,等. 劲性复合桩挤土效应及承载力作用机制研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3577-3586.
Zhu Rui, Zhou Feng, Chen Tingzhu, et al. Soil squeezing effect and bearing mechanism of strength composite pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(12): 3577-3586.
- [11] 曹战峰,王强,张培聪,等. 等芯长柔刚复合桩承载力试验及模拟研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(17): 141-144.
Cao Zhanfeng, Wang Qiang, Zhang Peicong, et al. Experimental and simulation study on bearing capacity of equal core long flexible rigid composite pile [J]. Building Science, 2023, 53(17): 141-144.
- [12] 鲍鹏,姜忻良,盛桂林. 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.
Bao Peng, Jiang Xinliang, Sheng Guilin. Static and dynamic analysis of bearing capacity of composite foundation of concrete core mixing piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(1): 63-68, 82.
- [13] 王建,朱志慧,王洪玉,等. 黏土地基劲性复合桩水平承载性能数值分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(6): 1382-1389.
Wang Jian, Zhu Zhihui, Wang Hongyu, et al. Numerical analysis on lateral bearing capacity of stiffened deep cement mixing piles in clay[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(6): 1382-1389.
- [14] 朱庆华,朱志慧,左威龙,等. 劲性搅拌桩复合地基承载特性数值分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(1): 181-188.
Zhu Qinghua, Zhu Zhihui, Zuo Weilong, et al. Numerical analysis on bearing behaviors of composite foundation with stiffened deep cement mixing piles[J]. Journal of Henan Polytechnic University (National Science), 2022, 41(1): 181-188.
- [15] 李立业,刘松玉,章定文,等. 劲性复合桩承载力计算方法探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(S1): 43-47.
Li Liye, Liu Songyu, Zhang Dingwen, et al. Bearing capacity calculations of strength composite piles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S1): 43-47.
- [16] 王安辉,章定文,刘松玉,等. 水平荷载下劲性复合管桩的承载特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(4): 853-861.
Wang Anhui, Zhang Dingwen, Liu Songyu, et al. Bearing capacity behavior of strength composite pipe subjected to lateral loading [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(4): 853-861.
- [17] 蔡忠祥,刘陕南,黄绍铭,等. 预应力桩水平承载性状数值分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S1): 439-442.
Cai Zhongxiang, Liu Shannan, Huang Shaoming, et al. Numerical analysis of lateral response of prestressed piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 439-442.
- [18] 文磊,刘钟,马晓华,等. 粉土地基中劲性复合桩抗压承载特性与荷载传递机制研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(2): 511-524.
Wen Lei, Liu Zhong, Ma Xiaohua, et al. Compressive bearing capacity and load transfer mechanism of stiffened deep cement mixing pile installed in silt [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(2): 511-524.
- [19] 李建军,梁仁旺. 水泥土抗压强度和变形模量试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 473-477.
Li Jianjun, Liang Renwang. Research on compression strength and

- modulus of deformation of cemented soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(2): 473-477.
- [20] 李怡秋. 劲性复合桩竖向承载特性的分析与研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
- Li Yiqiu. Analysis and research on vertical bearing characteristics of strength composite piles [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018.
- [21] 胡光阳. 劲性复合桩内、外芯及桩周土接触面剪切特性试验研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2022.
- Hu Guangyang. Exeperimental study on shear characteristics of the contact surface of strength composite pile's inner and outer core and pile peri-pile soil [D]. Nanchang: East China University of Technology, 2022.
- [22] 俞建霖, 徐嘉诚, 周佳锦, 等. 混凝土芯水泥土复合桩混凝土-水泥土界面摩擦特性试验研究[J]. *土木工程学报*, 2022, 55(8): 93-104, 117.
- Yu Jianlin, Xu Jiacheng, Zhou Jiajin, et al. Exeperimental study on frictional capacity of concrete-cemented soil interface of concrete-cored cemented soil column[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, 55(8): 93-104, 117.
- [23] 朱志慧. 劲性复合桩复合地基工作特性研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- Zhu Zhihui. Study on working characteristics of the composite foundation with strength composite pile [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.
- [24] Jin Q, Cui X Z, Cui S Q, et al. *In-situ* evaluation and analysis of improvement effects of pervious concrete pile on alluvial silt ground [J]. *Geomechanics and Geoengineering*, 2019, 16 (3): 212-222.
- [25] Wang S, Lei X W, Meng Q S, et al. Model tests of single pile vertical cyclic loading in calcareous sand[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 39(6): 670-681.