

潜孔冲击水泥土复合预制桩承载特性研究

孙雅珍¹, 李卿辰¹, 耿琳^{2,3}, 魏少伟^{2,3}, 姚建平^{2,3}

(1. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 北京铁科特种工程技术有限公司, 北京 100081;
3. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 北京 100081)

摘要 目的 研究荷载下潜孔冲击水泥土复合预制桩(DJC桩)的承载特性,为该新型桩的工程设计提供参考。方法 结合浙江石化炼化一体化项目,通过室内模型试验、数值模拟和现场试验3种方法研究该桩的荷载传递机理,并基于PLAXIS软件分析芯长比、含芯率和界面参数对DJC桩承载特性的影响。结果 竖向荷载下管桩承担主要荷载,管桩轴力约是水泥土桩轴力的1.8倍,管桩轴力与水泥土轴力分布规律相似;内侧摩阻力和外侧摩阻力均随深度呈现先递增后递减的趋势,内侧摩阻力约是外侧摩阻力的1.75倍;桩基整体质量较好,芯长比、含芯率和界面参数对桩基承载特性均有影响,但含芯率的影响更大,合理的含芯率在0.5~0.6。结论 DJC桩能有效地解决复杂地层下的地基处理问题,芯长比和含芯率取值可为实际工程提供参考。

关键词 潜孔冲击水泥土复合预制桩(DJC桩);承载特性;荷载传递机理;界面接触本构

中图分类号 TU473

文献标志码 A

Research on Vertical Bearing Characteristics of Down the Hole Jet Grouting Composite Prefabrication Pile

SUN Yazhen¹, LI Qingchen¹, GENG Lin^{2,3}, WEI Shaowei^{2,3}, YAO Jianping^{2,3}

(1. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;
2. Beijing Tieke Special Engineering Technology Corporation Limited, Beijing, China, 100081; 3. Railway Construction Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing, China, 100081)

Abstract: The bearing characteristics of DJC piles under load are studied to provide reference for the engineering design of this new type of piles. To explore the bearing characteristics and the load transfer mechanism of DJC piles, a series of indoor model tests, numerical simulations and field tests were performed. Combined with the Zhejiang petrochemical refining and chemical integration

收稿日期:2022-02-14

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(51825803);中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(N2019G60)

作者简介:孙雅珍(1969—),女,教授,博士,主要从事地下工程等方面研究。

project, the effects of core length ratio, core content, and interface parameters on the bearing characteristics of DJC piles were analyzed based on PLAXIS software. A comparison of the axial forces of pipe pile and cement-soil pile confirms that the main load under the vertical load is borne by the pipe pile, which is about 1.8 times that of the cement-soil pile, and the distribution law of the axial force of the pipe pile is similar to that of the cement-soil pile. Both the inner and the outer friction resistance increase first and then decrease with the increasing depth, and the inner friction resistance is about 1.75 times outer. Furthermore, the overall quality of the pile foundation is good, and the bearing characteristics of the pile foundation are affected by the core length ratio, the core content ratio, and the interface parameters. Among the parameters, the core content ratio, with the reasonable range of 0.5 ~ 0.6, has a wider range of influence. DJC pile can effectively solve the problem of foundation treatment under complex formation, and the value of core length ratio and core content can provide reference for actual engineering.

Key words: DJC pile; bearing behavior; load transfer mechanism; interface contact constitutive

在实际工程中,高速铁路地基处理主要有 CFG 桩和预制混凝土管桩等方式,但 CFG 桩易出现质量差,施工扰动高等问题。管桩强度虽然较高,可造价高并且桩身承载力往往没有充分发挥,而劲性复合桩可以充分发挥两种桩的优点,补足缺点。劲性复合桩通常指在水泥搅拌桩中插入预制管桩形成的刚性复合桩,通过内外界面提供的侧摩阻力以及高强度的内芯来承担主要荷载,是一种有效的地基处理方式^[1]。

目前,劲性复合桩在国内外已有大量的工程应用。在国外,由日本发明的 SMW 工法,通过在水泥土桩凝固之前插入高强度的 H 型钢从而形成的一种劲性复合桩^[2];随之该团队又发明肋型钢管水泥土桩,此类桩基本身的完整性较好且芯桩承载力高^[3]。除此之外,欧美地区普遍采用一种名为 Pin Pile 的桩基,是将预制好的管桩插入钻孔灌注桩并浇筑而形成的一种劲性复合桩^[4]。在国内,某公司提出一种新型的组合桩——高喷插芯组合桩(JPP 桩)^[5]。

随着我国铁路的高速发展,高速铁路的建设也开始向丘陵、山地等地区逐渐扩展。常用的劲性复合桩,如 SMW 工法桩, JPP 桩等虽然能进行有效的地基处理,但在碎石土、抛石土层、卵砾层、岩溶地区、杂填土和基岩等复杂地层情况下,施工容易出现成孔难,钻

孔塌陷、水泥浆液流失等问题,使得水泥搅拌桩无法成型或质量不可靠。针对此类问题,郇盼^[6]提出了一种新型桩——潜孔冲击水泥土复合预制桩(DJC 桩),该新型桩通过潜孔冲击工艺在复杂地层下顺利成孔,并采用高压旋喷工艺喷射浆液,形成搅拌桩后插入预制管桩成型。这样把高压旋喷桩旋喷直径大、表面积大的优势和芯桩强度高的优势有机结合起来,两者取其长,避其短,达到提高承载力、节约造价的目的^[7]。

DJC 桩作为一种新型桩,其荷载传递机理尚不明确。基于此,笔者开展了关于 DJC 桩的室内缩尺模型试验和数值模拟的研究;结合相似比理论^[8]确定试验桩的材料和尺寸,开展竖向荷载下 DJC 桩的承载特性研究;通过将实测值与有限元的结果对比,证实数值计算的合理性;在此基础上对比分析不同桩基的承载变形特性,体现出 DJC 桩沉降控制的优越性,并分析芯长比、含芯率和界面参数对 DJC 桩承载能力的影响。研究表明, DJC 桩能有效地解决复杂地下层的地基处理问题。

1 模型试验

1.1 试验设备和试验材料

本次试验模型箱的长×宽×高分别为 0.5 m×0.5 m×1.5 m。缩尺试验模型箱的四周均采用有机玻璃围挡,有机玻璃壁厚 3 cm。

为了真实反映 DJC 桩在复杂地层下的加固情况,本次试验土体和桩基的材料应尽可能与原材料相近。本次模型试验通过相似第二定理推导准则(也称 π 定理)^[9] 确定试验相似比。考虑到实际工程中水泥土桩直径 800 mm, 预制管桩直径 300 mm, 桩长 22.5 m, 结合模型箱尺寸和边界效应, 计算出模型试验的几何相似比 $C_L = 25$, 试验桩桩长 900 mm。水泥土桩弹性模量为 400 MPa, 预制管桩弹性模量为 36 GPa, 由于本次试验芯桩直径较小, 芯桩中挤压进入的水泥土含量较少, 因此选用实心材料代替管桩。结合原材料的重度以及试验中土体的承载力, 模型桩采用石蜡和尼龙棒作为相似材料进行制作, 结合各方因素确定强度相似比为 $C_E \approx 10$ 。

为符合 DJC 桩在复杂地层下的处理情况, 模型箱土体持力层选用强度较高的砂层, 加固区选用软土。试验土体的参数如表 1 所示。软土选用高岭土和标准砂按干比重 1:4 的人工配比进行模拟, 砂层选用级配良好的石英砂。

表 1 试验土体基本物理力学指标

Table 1 The basic physical and mechanical indexes of test soil				
模型材料	重力密度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / ($^\circ$)	弹性模量 E / MPa
软土	16.8	3.8	24	2.4
砂层	21.2	8.5	35	8.5

1.2 试验方案

为检测不同荷载作用下桩基的受力, 应在水泥土桩和管桩上布设应变片。本次试验采用间接测量法, 即通过 PVC 管内部粘贴应变片间接测量水泥土桩的应变。具体操作为采用刀具将管沿竖向方向剖开, 在管内壁固定应变片后, 将管合拢并采用胶布固定。应变片从桩底开始粘贴, 每隔 20 cm 布设一个, 共固定 10 个应变片。

本次试验位移测量采用图像二维位移测量仪。在模型桩顶端粘贴 40 mm 直径的靶

标用于仪器的识别, 从而记录下加载后桩端的沉降变化数据。

本次缩尺模型试验的加载示意图如图 1 所示。考虑到加载仪器中钢板和桶的自重, 因此试验的初始荷载应为钢板和桶的重力, 转化后初始竖向荷载为 38.5 N。之后使用分级加载的方式, 加载仪器采用砝码, 每次加载为 10 N, 共计加载五次, 直至 78.5 N。在每次加载后, 维持一定时间后待应变片数据稳定后才可进行下次加载, 记录下每次加载时的试验数据^[10]。其中, 沉降数据通过图像二维位移测量仪直接读取, 应变片数据通过应力应变数据采集仪获取。

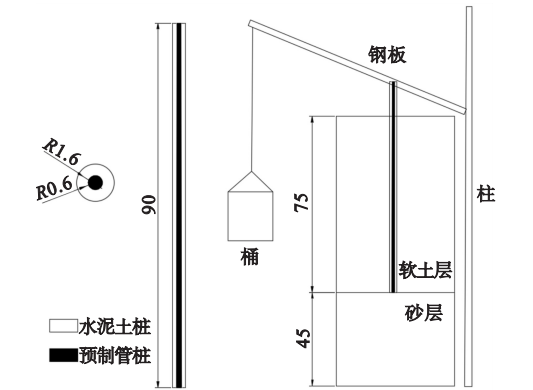


图 1 试验模型加载示意图

Fig. 1 The loading schematic diagram of test model

试验步骤如图 2 所示, 具体为: ①将 PVC 管表面打磨并粘贴应变片; ②将管桩放入未成型的水泥土桩中; ③试验桩放入模型

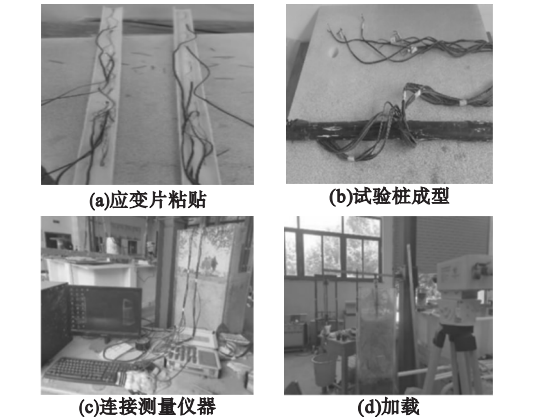


图 2 模型试验现场步骤

Fig. 2 The model test steps on site

箱中,并与上部钢板连接,连接测量仪器;
④加载并记录数据。

1.3 试验结果分析

1.3.1 承载力分析

图3为竖向荷载下桩基的荷载-沉降($Q-s$)曲线。模型桩的 $Q-s$ 曲线类似陡降型曲线,曲线的斜率随着荷载的增加逐渐增加。模型桩的 $Q-s$ 曲线可以分为两部分:在荷载加载到50 N之前,桩基竖向位移呈现曲线性变化,沉降速率减缓,主要是由于此时桩端竖向荷载在向下传递时由桩侧摩阻力所抵消,此时桩基沉降为4.8 mm。随着荷载的进一步增加,桩基沉降近似线性变化,沉降增

长速度明显骤增,此时桩身侧摩阻力已达到最大值,无法抵消竖向荷载,桩基沉降最终达到33.8 mm。

1.3.2 轴力分析

可通过荷载下桩身应变片的变化量计算出模型桩桩身轴力,如式(1)所示:

$$N_i = (E_s A_s + E_G A_G) \varepsilon_i.$$
 (1)

式中: N_i 为桩身上某一截面*i*处的轴力,N; E_s 为水泥土桩的弹性模量,Pa; A_s 为水泥土桩的截面面积; E_G 为管桩的弹性模量,Pa; A_G 为管桩的截面面积; ε_i 为桩身某一截面*i*处的应变值。

图4为不同荷载作用下水泥土桩和管桩的轴力变化曲线。由图可知,水泥土桩和管桩轴力的变化趋势均是随桩长增大而逐渐减小,并在桩底的位置处轴力均趋向于0。其中,管桩承担了上部的主要荷载并沿桩身逐渐减小,与此同时荷载也向水泥土桩逐渐扩散,继而向土体扩散,提高DJC桩的承载能力。水泥土桩和管桩轴力曲线斜率均呈现增长的趋势,这主要是由于桩侧摩阻力的产生。在上部竖向荷载作用下,桩周土为了抵抗上部荷载对桩体产生向上的抵抗力,使得轴力减小,侧摩阻力增大,并且在达到最大值后递减,此时轴力的变化趋势也随之减缓。

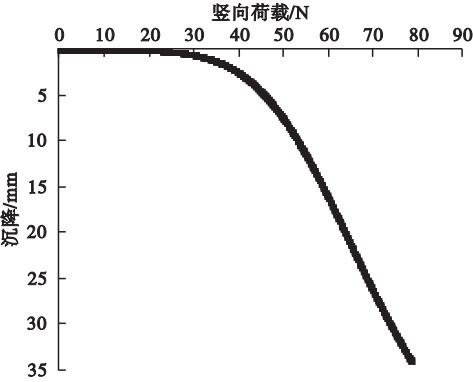


图3 荷载-沉降曲线
Fig.3 The load-settlement curve

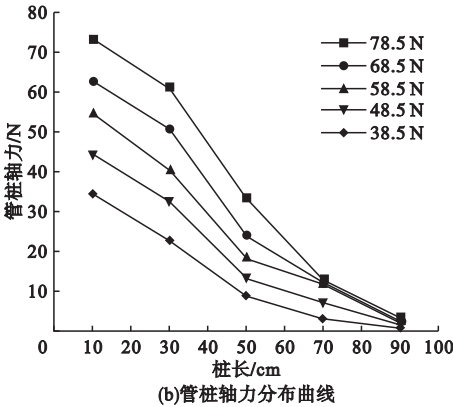
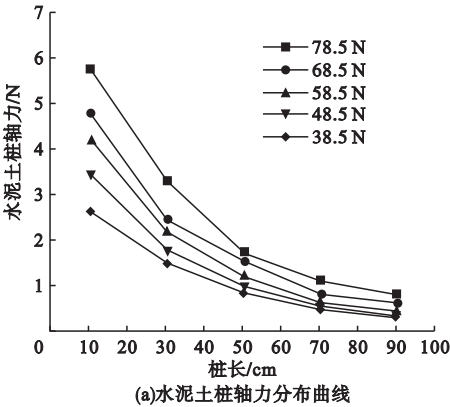


图4 桩身轴力分布曲线
Fig.4 The pile shaft force distribution curve

1.3.3 侧摩阻力分析

以每一段中点位置的侧摩阻力来代表着该段的侧摩阻力^[11]。通过桩身轴力的数值

计算得出模型桩桩身侧摩阻力,如式(2)和式(3)所示:

$$\pi d_1 L_i f_i = N_{i+1} - N_i.$$
 (2)

$$\pi d_2 L_i f_i' + N_i' = N_{i+1}' + \pi d_1 L_i f_i. \quad (3)$$

式中: d_1 为管桩直径; d_2 为水泥土桩直径; L_i 为第*i*断面与*i*+1断面之间的桩长; f_i 为内侧摩阻力; f_i' 为外侧摩阻力; N_i 、 N_i' 为第*i*断面管桩和水泥土桩轴力; N_{i+1} 、 N_{i+1}' 为第*i*+1断面管桩和水泥土桩轴力。

图5为不同荷载作用下侧摩阻力的变化曲线。其中,图5(a)为水泥土桩与桩周土表面上的侧摩阻力(简称外侧摩阻力)图,图5(b)为管桩与水泥土桩界面上的侧摩阻力(简称内侧摩阻力)图。侧摩阻力曲线的变

化趋势均是先增大后减小,外侧摩阻力在桩长20 cm附近时达到峰值,而内侧摩阻力在桩长35 cm附近时达到峰值,主要是由于内侧界面的抗剪强度大于外侧界面的抗剪强度,所提供的侧摩阻力也更大。其中,内侧摩阻力是外侧摩阻力的1.75倍。结合桩身轴力分布曲线可知,上部荷载主要由管桩承担,通过水泥土桩-管桩界面产生内侧摩阻力并将其余荷载传递至水泥土桩中,而水泥土桩通过桩-土界面进一步将荷载扩散至周围土体中,同时伴随侧摩阻力的产生。

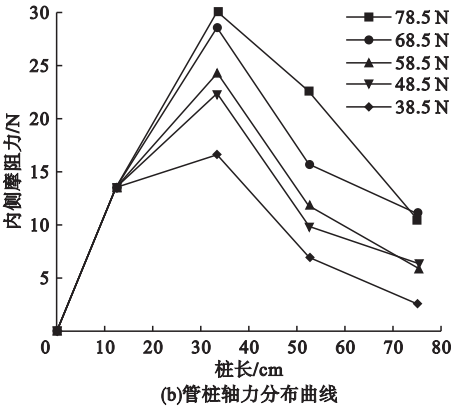
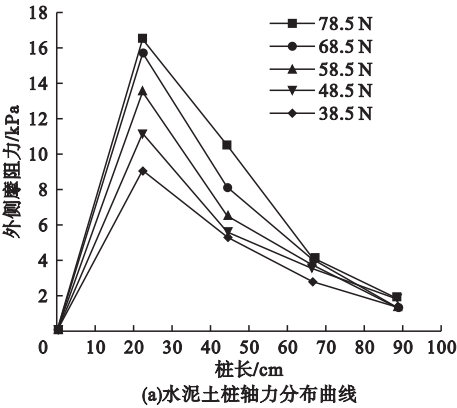


图5 侧摩阻力分布曲线

Fig. 5 The side friction resistance distribution curve

2 数值模型的建立与分析

2.1 材料本构

采用 PLAXIS 进行数值模拟时,土体使用土体硬化本构模型(HS 模型)^[12]。HS 模型是 Schanz 在前人的基础上通过双曲线公式对三轴剪切试验中土体的应力应变曲线进行拟合,从而提出的弹塑性本构模型^[13-14]。

2.2 界面接触模型

采用界面单元模拟水泥土桩与管桩的接触面。当无法通过试验手段获得界面参数时,可根据式(4)、式(5)所得^[15]。其中, R_{inter} 为折减系数,本次计算中的折减系数 R_{inter} 取值 0.67^[16]。

$$c_i = R_{inter} \cdot c_{soil}. \quad (4)$$

$$\tan \varphi_i = R_{inter} \tan \varphi_{soil} \leq \tan \varphi_{soil}. \quad (5)$$

式中:下标*i*代表界面单元的参数;下标 soil 代表土体单元的参数; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角。

2.3 模型试验的验证

为保证计算结果的准确性,通过 DJC 桩现场实测资料与有限元计算结果相对比,验证有限元模型的可靠性。

根据浙江石化 4 000 万 t/a 炼化一体化项目 DJC 桩单桩复合地基承载力现场试验,建立有限元模型,如图 6 所示。混凝土预制桩采用 PHC-400-AB-125,直径 400 mm,弹性模量为 3.8 GPa,水泥土桩直径为 1 000 mm,弹性模量为 400 MPa,有效桩顶标高为 96.95 m,桩长为 26.5 m。试验现场加载采用分级加载的方式,最大荷载为 5 400 kN。试验段地勘资料如表 2 所示。

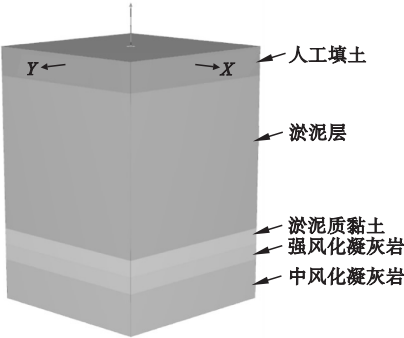


图 6 有限元模型

Fig. 6 The finite element model

表 2 试验段土体参数

Table 2 The soil parameters of the test section					
地层名称	层厚/ m	$E/$ MPa	$\gamma/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	$c/$ kPa	$\varphi/$ ($^{\circ}$)
① ₄ 人工填土	3.5	3.0	20.0	2	26
② ₂ 淤泥	19.0	2.8	16.8	3	23
③ ₃ 淤泥质黏土	2.0	3.8	18.5	3	24
⑤ ₂ 强风化凝灰岩	2.0	15	19.6	50	20
⑤ ₃ 中风化凝灰岩	5.0	400	25.0	150	30

图 7 为数值计算结果与实测值对比图。由图可知,数模计算与实测值结果较为吻合,但仍存在部分差异。这主要是由于实际施工中,水泥土桩在施工时采用的喷浆会对周围土体产生压力,使得桩侧土挤密,造成外侧摩阻力增大,同时在管桩打入未成型的水泥土桩时,会对水泥土桩产生挤压作用,使得水泥土桩被挤密,承载力提高,因此相比计算值,实测值较小些。

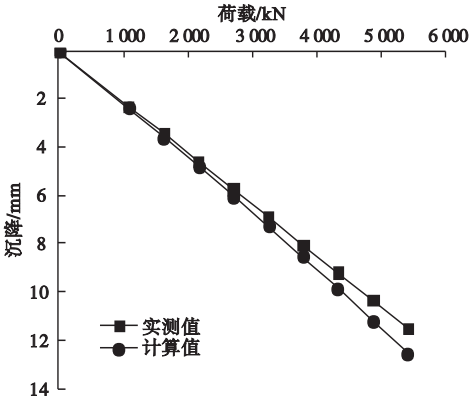


图 7 数值计算与实测值结果对比

Fig. 7 The comparison of numerical calculation and measured values

2.4 DJC 桩承载特性影响因素的分析

在数模模拟得到有效性验证的基础上,分析 DJC 桩承载特性影响因素,研究不同芯长比、含芯率以及界面参数对桩基的影响。其中,芯长比为管桩长度与水泥土桩长度的比值,含芯率为管桩横截面面积与 DJC 桩横截面面积的比值。在桩基顶面逐级加载进行模拟,每级加载 200 kN,直至桩体失去承载能力。

2.4.1 芯长比的影响

图 8 为不同芯长比条件下桩基的沉降变化曲线。由图 8 可知,芯桩能够增加 DJC 桩的承载能力,减少桩端的沉降。当芯长比为 0,桩基为水泥土桩时,桩身在 395 kN 时就已经发生破坏,沉降迅速增大。随着芯长比的逐渐增大,桩身破坏时的荷载大小也逐渐增加,说明桩基的承载能力随着芯长比的增加而增加,沉降随着芯长比的增加而减小。当芯长比从 0 提升至 1.0 时,DJC 桩的极限承载能力提高了 186.9%。

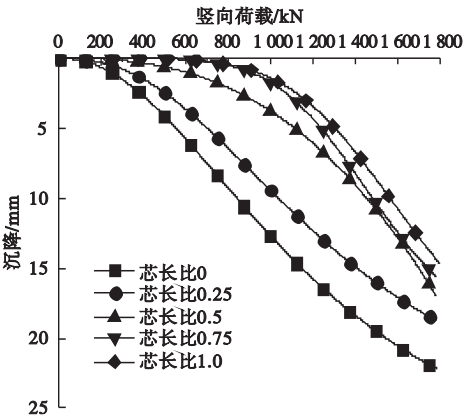


图 8 不同芯长比下桩基沉降变化

Fig. 8 The settlement changes of pile foundations with different core length ratios

2.4.2 含芯率的影响

图 9 为不同含芯率条件下桩基的沉降变化曲线。由图 9 可知,含芯率的增加能够显著提高 DJC 桩承载能力,说明管桩的横截面面积的变化对于 DJC 桩承载能力有较大的影响。当含芯率从 0% 提升至 56% 时,桩基

极限承载能力增加 530.5%,与芯长比的变化对比,含芯率明显对 DJC 桩承载能力起到更大的作用。

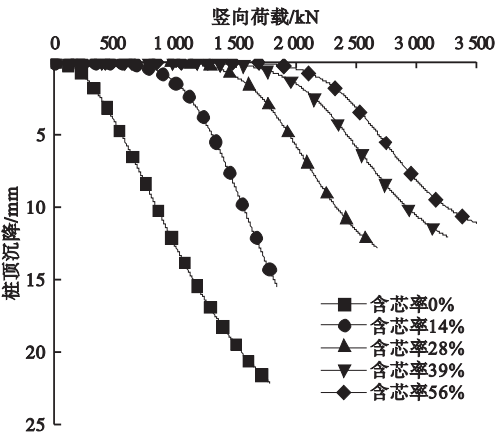


图9 不同含芯率下桩基沉降变化

Fig. 9 The settlement change of pile foundation under different core content

2.4.3 界面参数的影响

界面参数的计算结果如图10和11所示。由图可知,桩土界面参数的变化会对桩基沉降有一定影响,而对承载力影响较小,这主要是由于参数的变化幅度较小。其中,黏聚力 c 的取值会对沉降产生一定的变化,当 c 值从 2 ~ 10 时,沉降增加 1.5%,而 ρ 的取值变化对沉降的影响小于 0.5%,可以忽略不计。

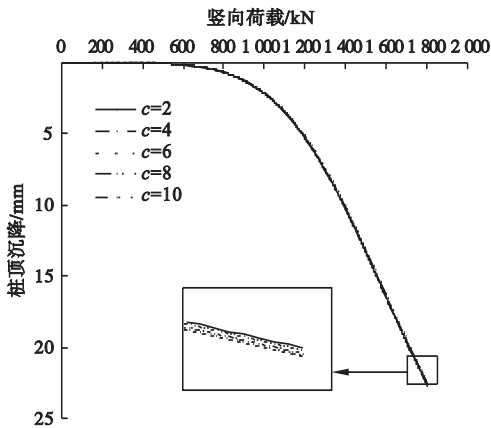


图10 不同黏聚力下桩基沉降变化

Fig. 10 The settlement changes of pile foundation under different cohesion

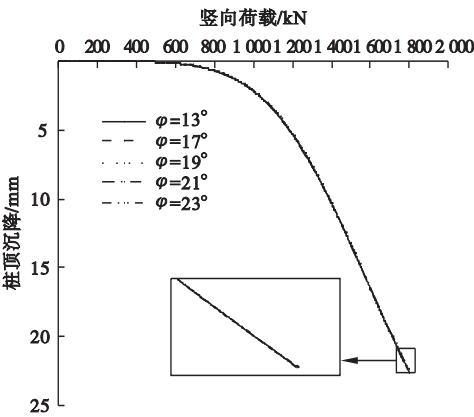


图11 不同内摩擦角下桩基沉降变化

Fig. 11 The pile settlement changes under different internal friction angles

3 结 论

(1)DJC 桩受竖向荷载作用时,上部荷载主要由管桩承担,并通过界面传递至水泥土桩和桩周土,有效提高了 DJC 桩的承载能力。

(2)管桩轴力和水泥土桩轴力沿桩长逐渐递减,并在桩底处均趋向于零,两者分布规律相似,管桩最大轴力约是水泥土桩轴力的 1.8 倍;桩身侧摩阻力在 DJC 桩上部达到峰值后逐渐递减,由于内侧界面强度大于外侧界面强度,使得内侧摩阻力约为外侧摩阻力的 1.75 倍。

(3)随着芯长比的增加,DJC 桩承载能力逐渐提高,沉降逐渐减小,极限承载能力提高;相比芯长比的影响,含芯率的变化对 DJC 桩承载能力起到更大的作用,合理的含芯率范围为 0.5 ~ 0.6。

(4)界面参数中黏聚力的变化对沉降有一定的影响,而内摩擦角对其影响较小;建议在进行界面分析时,应通过试验等其他手段更精确地测定黏聚力,若在条件受限的情况下,可以根据相关计算手册取值或根据现场经验取值。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 劲性复

- 合桩技术规程:JGJ/T 327—2014 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical regulations for stiff composite piles:JGJ/T 327—2014 [S]. Beijing: China Construction Industry Press,2014.)
- [2] 王占生,潘皇宋,庄群虎,等. 基坑围护 SMW 工法桩施工对下卧盾构隧道变形影响分析[J]. 岩土工程学报,2019,41(增刊1):53-56.
(WANG Zhansheng, PAN Huangsong, ZHUANG Qunhu, et al. Analysis of influence of pile construction of foundation pit support SMW construction method on deformation of underlying shield tunnel [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2019, 41(S1): 53-56.)
- [3] 李立业. 劲性复合桩承载特性研究[D]. 南京:东南大学,2016.
(LI Liye. Research on bearing characteristics of stiff composite piles [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.)
- [4] SHIELDS D R. Buckling of micropiles [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2007, 133(3): 334-337.
- [5] 刘汉龙,任连伟,郑浩,等. 高喷插芯组合桩荷载传递机制足尺模型试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(5):1395-1401.
(LIU Hanlong, REN Lianwei, ZHENG Hao, et al. Full-scale model test research on the load transfer mechanism of high jet ferrule composite piles [J]. Rock and soil mechanics, 2010, 31(5): 1395-1401.)
- [6] 郇盼,张有祥,刘宏运,等. 潜孔冲击高压旋喷桩技术(DJP 工法)及其在复杂地层中的应用[J]. 地基处理,2020,2(1):71-77.
(HUAN Pan, ZHANG Youxiang, LIU Hongyun, et al. Down-the-hole impact high-pressure jetting pile technology (DJP construction method) and its application in complex formations [J]. Foundation treatment, 2020, 2(1): 71-77.)
- [7] 张亮,朱允伟,李楷兵,等. 潜孔冲击高压旋喷桩工法原理及特性研究[J]. 施工技术,2017,46(19):59-62.
(ZHANG Liang, ZHU Yunwei, LI Kaibing, et al. Research on the construction method and characteristics of down-the-hole impact high-pressure jetting piles [J]. Construction technology, 2017, 46(19): 59-62.)
- [8] XU Xiaobing, ZHANG Tengyao, WANG Jinchang, et al. Model tests on the bearing capacity of precast open-ended micro pipe piles in soft soil [J]. Proceedings of the institution of civil engineers-geotechnical engineering, 2020, 173(6): 500-518.
- [9] 刘福天,赵春风,王学知,等. 黏土中成桩工艺对桩承载性状影响试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2010,26(1):1-6.
(LIU Futian, ZHAO Chunfeng, WANG Xuezhi, et al. Influence test of pile forming process on pile bearing properties in clay [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(1): 1-6.)
- [10] 于丹,杜鹏祥,张海洋,等. 抗拔桩单桩承载特性试验及数值模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2014,30(5):818-825.
(YU Dan, DU Pengxiang, ZHAGN Haiyang, et al. Test and numerical simulation of bearing characteristics of uplift pile single pile [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 30(5): 818-825.)
- [11] 郑浩,刘汉龙,雷玉华,等. 高喷插芯组合桩水平承载特性大尺寸模型试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(1):217-223.
(ZHENG Hao, LIU Hanlong, LEI Yuhua, et al. High-spray core combination of pile level carrying characteristics large-sized model test research [J]. Rock and soil mechanics, 2011, 32(1): 217-223.)
- [12] 李连祥,成晓阳,刘兵. 复合地基支护结构永久性集约化设计分析[J]. 铁道科学与工程学报,2018,15(8):1971-1979.
(LI Lianxiang, CHENG Xiaoyang, LIU Bing. Analysis of permanent intensive design of composite foundation supporting structures [J]. Chinese journal of railway science and engineering, 2018, 15(8): 1971-1979.)
- [13] ROSINE L, TOMA S. Modelling of the effect of scale on the compressibility parameters of fine-grained soils [J]. Geomechanics and geoenvironment, 2019, 14(4): 262-270.
- [14] REBOLLEDO J F, LEON R F. Obtaining the mechanical parameters for the hardening soil model of tropical soils in the city of Brasília [J]. Soils and rocks, 2019, 42(1): 61-74.
- [15] ABDUL A F, OSMAN K. Non-linear soil-structure interaction analysis of railway bridge subjected to earthquake ground motions considering different types of soil [J]. Arabian journal of geosciences, 2021, 14(6): 1-11.
- [16] 任宇. 长期竖向循环荷载作用下桩的变形特性试验及理论研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
(REN Yu. Experimental and theoretical research on the deformation characteristics of piles under long-term vertical cyclic loading [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.)
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)