

城市轨道交通深厚软土地层地下车站 超长钻孔灌注桩承载-沉降特性分析

朱海星¹ 丁春林¹ 陆玉和² 李桂颖²

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海; 2. 中国中铁四局集团第四工程有限公司, 230001, 合肥)

摘要 [目的]为有效控制软土地层深基坑开挖及使用过程中车站结构的变形,同时增大坑底承载力,需对上部含有空桩的超长钻孔灌注桩(以下简称“超长桩”)承载-沉降特性进行深入研究。[方法]以某城市轨道交通双线L型交叉换乘车站为例,采用自平衡法静载试验和数值模型对超长桩承载-沉降特性的影响因素进行分析,并探究超长桩承载特性与桩身长度、桩身刚度及桩身直径之间的关系。[结果及结论]静载试验表明:上部含有空桩的超长桩在荷载箱等量增荷加载过程中,桩顶位移及其增速均逐渐增大,在卸荷过程中桩顶出现位移回弹现象。数值模拟分析表明:超长桩的桩身轴力从桩顶到桩端呈逐渐减小趋势,在桩顶极限荷载作用下,桩身上部的轴力远大于桩端;桩身长度和桩身刚度变化会影响上部含有空桩的超长桩承载-沉降特性,桩身刚度改变对其造成的影响很小。

关键词 城市轨道交通; 地下车站; 超长钻孔灌注桩; 承载-沉降特性; 深厚软土地层

中图分类号 U443.15⁺4:U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.025

Analysis of Bearing-settlement Characteristics of Extra-long Bored Piles in URT Deep Soft Stratum Underground Station

ZHU Haixing¹, DING Chunlin¹, LU Yuhe², LI Guiying²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 2. The Fourth Engineering Co., Ltd. of China Tiesiju Civil Engineering Group, 230001, Hefei, China)

Abstract [Objective] To effectively control the deformation of station structure during the excavation and usage of deep foundation pit in soft soil stratum, and to increase the bearing capacity of foundation pit bottom, it is necessary to conduct an in-depth study of the bearing-settlement characteristics of extra-long bored piles (hereinafter as EBP) with void in the upper part. [Method] Using an urban rail transit double-line L-shaped cross transfer station as example, the influencing factors of the bearing-settlement characteristics of EBP are analyzed

through static load tests by self-balanced method and numerical modeling. The relationship between the bearing characteristics of EBP and the pile length, pile stiffness, and pile diameter is explored. [Result & Conclusion] The static load test results indicate that, during the incremental loading in load box of EBP with void in upper part, both the pile top displacement and the displacement growth rate gradually increase, with pile top exhibiting displacement rebound phenomenon during unloading. Numerical simulation analysis shows that the axial force of EBP shaft decreases gradually from pile top to pile end. When the pile top is under ultimate load, the axial force at pile shaft upper part is significantly greater than at pile end. Changes in pile shaft length and stiffness affect the bearing-settlement characteristics of extra-long piles with void in upper part, while changes in pile shaft stiffness have little impact.

Key words urban rail transit (URT); underground station; extra-long bored pile; bearing-settlement characteristics; deep soft soil stratum

超长钻孔灌注桩(以下简称“超长桩”)可以有效控制软土地层深基坑开挖及使用过程中车站结构的变形,同时增大坑底承载力。现场试桩试验是研究超长桩承载性能和验证控制变形有效性的重要手段。地下车站基坑工程施工场地有限,人流密集,现场试桩难度极大,因此大部分学者采用理论分析、模型试验或数值分析的方法对其进行研究。文献[1]根据与超长桩桩侧土工作形状相适应的弹性-软化-稳定三阶段荷载传递模型,提出相应超长桩荷载传递分析方法。文献[2]采用非线性弹性 Duncan-Chang 模型,桩土界面采用 Goodman 接触单元对桩土的相互作用进行非线性有限元理论计算。文献[3]基于突变理论,推导得到超长桩竖向极限承载力的预测计算方法。文献[4]运用有限元数值软件,对直桩和斜桩分别在竖向荷载和水平荷载作用下的承载特性进行对比分析。文献[5]使用

数值模拟方法,分析了超长桩在非均质土体条件下承受竖向荷载时,竖直桩基的荷载-沉降曲线、桩基荷载分担及桩体侧向受荷等工作特性。文献[6]通过室内模型试验,研究粉砂地层中超长桩的荷载-沉降关系、桩身轴力、桩侧摩阻力、桩身压缩变形、桩端阻力及桩土相对位移等承载性状及荷载传递规律。文献[7]对竖向荷载作用下不同桩体材料的超长桩进行模型试验研究,得到桩身材料的性质对超长桩承载和变形机理的影响规律。

为进一步研究超长桩在实际使用中的承载与变形特性,试桩试验必不可少。文献[8]以浙江舟山某工程项目为依托,选择1根典型摩擦桩采用自平衡法进行试桩研究,并对测试后的试桩进行二次堆载试验。文献[9]分别采用自平衡法和静载法进行试桩测试,对比研究桩基的荷载-位移曲线、桩身轴力等分布规律。文献[10]选取桩身长度92.0 m、桩身直径1.8 m的超长桩,采用自平衡法对其进行静载试验,并将桩身抗压极限承载力的实测值和规范计算值进行对比分析。

虽然超长桩在诸多方面已有相关讨论与研究,但对桩顶上部含有空桩的超长桩研究文献较少,空桩长度为20 m以上的超长桩研究更是少见。本文采用现场静载试验和数值模拟两种方法对上部含有空桩的超长桩承载-沉降特性进行研究,并探究超长桩承载特性与桩身长度、桩身刚度及桩身直径之间的关系。研究成果可为深厚软土地层城市轨道交通地下车站超长桩的工程设计与施工提供参考。

1 工程概况

某城市轨道交通地下车站为双线L型交叉换乘车站。其中:车站东西走向总长为256.00 m,深度约为30.00 m,且该段下穿高架桥梁,桥梁承台距车站基坑地下连续墙外侧仅0.60 m;车站南北走向总长为499.05 m,深度约为20.00 m。

该车站项目场地处于冲海积平原区,大范围分布软土层。软土层埋置厚度达80 m左右,具有易触变性、高压缩性及强度低等特性。车站项目具体土体物理力学参数如表1所示。车站项目场地地下水主要为孔隙潜水,上部土层透水性不佳,水量较小;赋存于基坑坑底的黏土和淤质土层中的孔隙潜水因地层渗透性微弱,水量贫乏。

对于深厚软土地层的地下车站,其地基承载力较差,为防止车站长期运营中的沉降变形,车站基

础采用超长桩,桩身长度约为70 m。钻孔灌注桩施工完成后,其上部含有长度为20~30 m空桩。车站与桩基位置如图1所示。针对上部含有空桩的超长桩承载-沉降特性研究,采用传统堆载法难以对桩顶施加有效荷载,故采用自平衡法进行试桩试验。

表1 车站项目土体物理力学参数

Tab.1 Soil mechanical and physical parameters of station project

土层	压缩模量/MPa	重度/(kN/m ³)	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
①黏土	3.24	18.40	0.35	16.70	8.72
② ₂ 淤泥	1.43	16.30	0.40	2.28	2.15
② ₃ 淤泥质黏土	3.49	18.80	0.40	14.32	7.76
③黏土	5.47	19.20	0.35	28.58	12.86
④黏土	5.30	19.50	0.35	29.55	11.88
⑤黏土	6.04	19.70	0.30	32.65	12.59
⑥黏土	5.79	19.70	0.30	35.00	15.40
⑦黏土	6.80	20.00	0.25	34.27	14.16
⑨含砾粉质黏土	6.08	20.10	0.25	33.00	14.20
⑩ ₂ 强风化凝灰岩	50.00	24.00	0.20	50.00	50.00

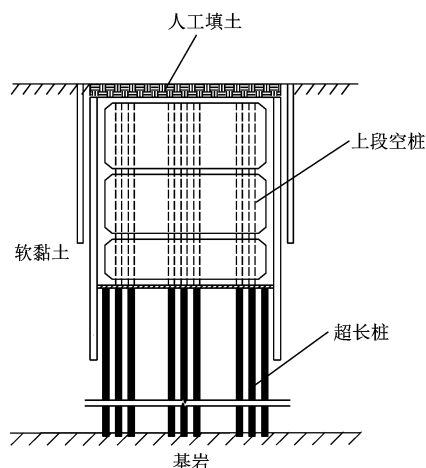


图1 车站与桩基位置剖面图

Fig.1 Profile diagram of station and pile foundation position

2 超长桩静载试验与结果分析

2.1 试验方法

为研究上部含有空桩的超长桩承载-沉降特性,开展桩身上部留有长度为20 m空桩的试桩试验。采用自平衡法,将自平衡荷载箱在混凝土浇筑之前埋入桩端以上12.9 m处,将加载箱的加压管以及位移、应力测试装置从桩体引到地面,然后灌注成桩。本次试桩的有效桩身长度为69.23 m,桩身直径为

1.20 m。

试桩采用组合式环形荷载箱,由加压泵在地面向荷载箱加压加载,荷载箱产生上下两个方向的荷载并传递到桩身。荷载箱加载按预估值 9 500 kN 来分级,分为 10 级,每级加载值为 950 kN。平衡状态下两个方向都应达到终止加载条件再终止加载。终止加载条件以及相应的极限加载值的取值按以下规定:

1) 总位移量大于或等于 40.0 mm,且本级荷载的位移量大于或等于前一级荷载位移量的 5 倍时,加载即可终止。取比终止加载时小一级的荷载为极限加载值。

2) 总位移量大于或等于 40.0 mm,且本级荷载下 24 h 后每小时的位移增量仍超过 0.1 mm,加载即可终止。取比终止加载时小一级的荷载为极限加载值。

3) 坚硬土层中,总位移量小于 40 mm,但荷载已大于或等于设计荷载乘以设计规定的安全系数,加载即可终止。取此时的荷载为极限加载值。

2.2 测量装置

1) 位移测量装置:采用百分表,量程为 0 ~ 50 mm,每根桩对应 5 只百分表,通过磁性表座将其固定在基准钢梁上。其中:2 只百分表用于测量桩身荷载箱处的向上位移,2 只百分表用于测量桩身荷载箱处的向下位移,1 只百分表用于测量桩顶向上位移。

2) 应力测量装置:在每个桩身断面上安装 4 个钢筋计,埋设在不同性质土层界面处,以测量桩在不同土层中的分层摩擦力。制作钢筋笼时,预留出各对称点位置的主筋,安装钢筋应力计后再将其焊接到钢筋笼上。

2.3 试验结果分析

本次试桩荷载箱的预估加载值为 9 500 kN,将其分成 10 级,每级加载值为 950 kN。在加载到第 11 级荷载 10 450 kN 时:下段桩 $Q-S$ (荷载-位移) 曲线呈缓变形, $S-\lg t$ 曲线呈平直形;上段桩 $Q-S$ 曲线呈缓变形, $S-\lg t$ 曲线呈平直形。由此可见,上段桩和下段桩位移走势都比较平缓, $Q-S$ 曲线呈缓变形,究其原因因为 Q 已达到荷载箱的最大加载值。根据 JT/T 738—2009《基桩静载试验 自平衡法》的规定,决定终止加载,取第 11 级荷载 10 450 kN 为最终加载值。

上段桩桩侧土极限摩阻力在第 11 级荷载

10 450 kN 的作用下,考虑自重和修正因子后,经计算约为 11 073 kN;下段桩极限承载力取对应于第 11 级荷载 10 450 kN。单桩竖向抗压极限承载力 P_u 为:

$$P_u = \frac{Q_{u,上} - W}{\gamma} + Q_{u,下} \quad (1)$$

式中:

$Q_{u,上}$ ——荷载箱上段桩的加载极限值;

$Q_{u,下}$ ——荷载箱下段桩的加载极限值;

W ——荷载箱上段桩自重;

γ ——荷载箱上段桩桩侧阻力修正系数,根据荷载箱上部土的类型来确定,其中:黏性土、粉土 γ 为 0.8,砂土 γ 为 0.7,岩石 γ 为 1。若荷载箱上部有不同类型的土层, γ 取加权平均值。

根据式(1),求得 P_u 为 21 523 kN。

图 2 为试桩的 $Q-S$ 关系曲线。由图 2 可知:随着荷载箱荷载等级的等量增加,桩身位移量增大,增速变快;在卸载过程中,试桩也会出现一定程度的位移回弹现象。

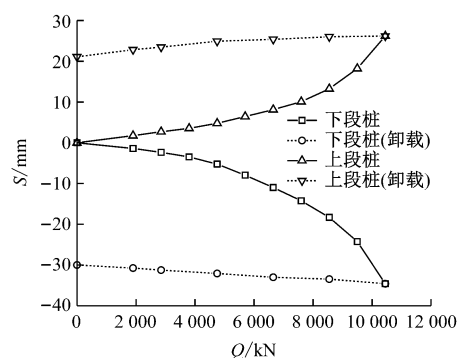


图 2 试桩 $Q-S$ 关系曲线

Fig. 2 $Q-S$ relationship curves of test piles

3 超长桩数值模拟分析

3.1 计算模型

为模拟现场试验中得到的超长桩的桩身应力及变形特征,研究桩身各参数对桩基承载受力特性的影响,采用 Midas GTS NX 有限元软件建立超长桩-土体相互作用的三维计算模型,如图 3 所示。此模型中,单桩采用三维单元,桩身采用弹性模型,材料选用 C35 混凝土,桩身直径为 1.2 m,桩身长度为 70.0 m。为避免边界约束对桩基加载模拟的影响,根据软件计算经验,桩对土体的影响范围为 10 倍以上桩身直径,计算模型尺寸取 30 m × 30 m × 140 m。土体采用三维实体单元和修正 Mohr-Coulomb 本构

模拟,具体参数取值和表 1 中实际场地土体物理学指标值一致。根据实际土层分布情况,对模型上表面施加 362.6 kN/m^2 的均布荷载,模拟桩顶以上 20 m 土体的竖向压力;考虑桩顶以上部分为泥浆,对桩顶单独施加 102.6 kN/m^2 的向上荷载以抵消均布荷载超出泥浆重度部分。考虑桩与周围土体材料性质相差大,当桩顶加载到某一临界值时,土体与桩身会在接触位置产生相对位移,因此模型中采用界面单元模拟桩土间的接触关系。

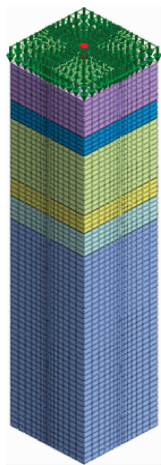


图 3 超长桩-土体三维计算模型图

Fig. 3 Three-dimensional calculation model diagram of extra-long pile and soil mass

由于模型整体尺寸较大,受力时土体符合半无限体条件,因此,位移采用自动边界约束,即对边界 4 个侧面施加法向约束,底面采用固定端约束。

3.2 加载方式

采用弹塑性有限元数值计算分析桩基承载受力性能时,一般考虑位移控制方法和荷载控制方法两种加载方式。由于超长桩的承载力受桩顶位移控制,本计算采用位移控制法进行加载,具体做法为:在桩顶分步施加竖向位移,位移总量为 7.2 cm ,分 36 步加载,每步施加 0.2 cm 位移,加载至结束。通过确定每步位移相应的荷载,确定桩基的承载受力特性。

3.3 计算结果分析

数值仿真模型在计算过程中,桩身轴力分布如图 4 所示。由图 4 可知:当桩顶位移达到 4.0 cm 时,荷载达到极限值 $22\,959 \text{ kN}$;桩身轴力从桩顶到桩端逐渐衰减,极限荷载作用下下部桩身的轴力远小于上部桩身的轴力,说明超长桩桩顶阻力很小,桩顶荷载大部分由桩侧摩阻力承担。

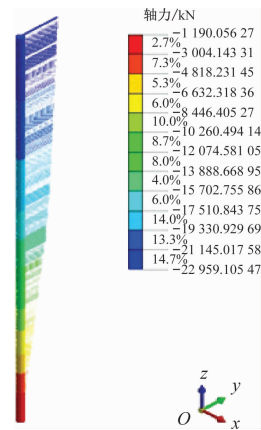


图 4 桩身轴力分布图

Fig. 4 Distribution diagram of pile shaft axial force

4 超长桩承载-沉降特性影响因素分析

4.1 桩身直径

为研究不同桩身直径对地下车站超长桩承载受力性能的影响,在模型仿真中,将桩身直径分别定义为 1.0 m 、 1.2 m 和 1.4 m 。根据计算结果绘制桩顶 $Q-S$ 关系曲线,如图 5 所示。由图 5 可以看出:在加载初期不同桩身直径下的桩顶荷载与位移呈线性关系,图中斜率与桩身直径有关,即桩身直径越大,单位荷载下桩顶位移越小。

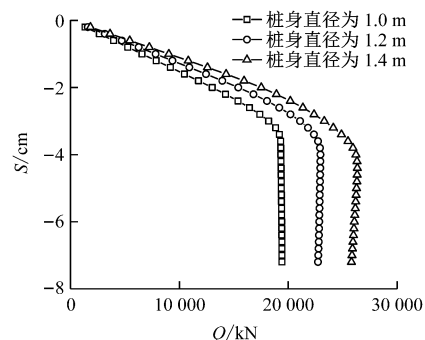


图 5 不同桩身直径下的桩顶 $Q-S$ 关系曲线

Fig. 5 $Q-S$ relationship curves of pile top with different pile shaft diameters

桩顶的极限荷载和极限位移与桩身直径关系,如图 6 所示。由图 6 可以看出:桩顶的极限荷载和极限位移亦与桩身直径有关。究其原因是,加载前期桩身压缩量较小,桩顶荷载主要由桩侧摩阻力承担。桩身直径的增大,必然使桩土之间的接触面积增大,桩侧摩阻力随之增大,单位位移下的承载力相应提高;当桩侧摩阻力达到极限值时,桩身直径的增加带来桩端接触面的增大,使桩端承受的荷载

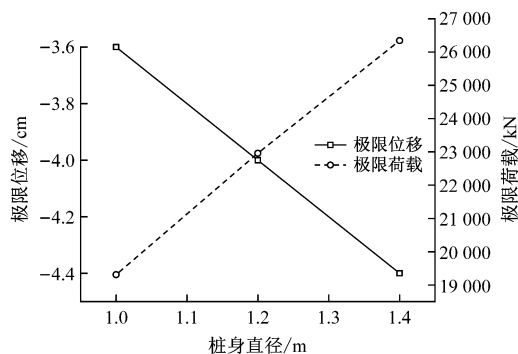


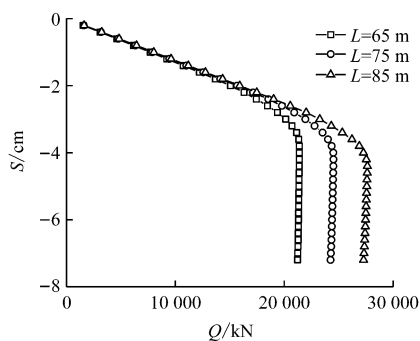
图6 桩顶极限位移、极限荷载与桩身直径关系图

Fig. 6 Diagram of relationship between pile shaft diameter and pile top ultimate displacement/ultimate load

也相应增加,因此直径越大的超长桩的极限承载力越高。

4.2 桩身长度

本次试桩的试验长度为 69.9 m,上部含有长度为 20.0 m 的空桩。通过数值仿真软件,研究桩身长度分别为 65 m、75 m 及 85 m 时超长桩的承载受力特性。不同桩身长度下的桩顶 $Q-S$ 关系曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出:在加载初期,桩顶荷载与桩顶位移同样呈线性关系,不同桩身长度的超长桩桩顶 $Q-S$ 曲线斜率接近相同,即单位荷载下桩顶位移相同。桩顶的极限荷载和极限位移与桩身长度关系,如图 8 所示。由图 8 可以看出:桩顶的极限荷载和极限位移都与桩身长度有关。



注: L 为桩身长度。

图7 不同桩身长度下的桩顶 $Q-S$ 关系曲线Fig. 7 $Q-S$ relationship curves of pile top with different pile shaft lengths

究其原因为:加载初期桩身压缩量较小,轴力很少传递到桩端底部,桩身直径相同情况下,单位荷载下桩顶位移相同,对应的桩土之间摩擦界面相同;随着初期加载的进行,桩身长度越长,桩端阻力在总的荷载中所占比例越小;在加载后期,桩身长

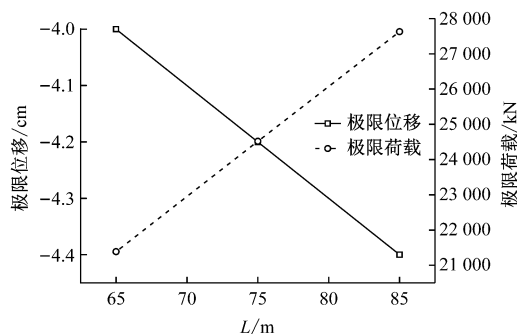
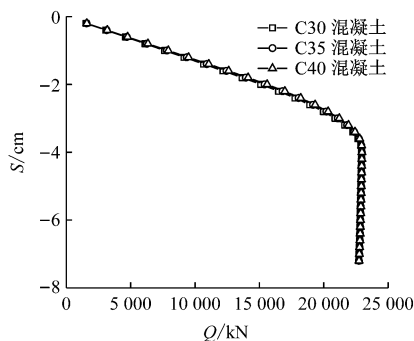
图8 桩顶极限位移、极限荷载与 L 关系图

Fig. 8 Diagram of relationship between pile shaft length and pile top ultimate displacement/ultimate load

度越长,产生的侧向受力面积越大,桩侧摩阻力越大,极限承载力也越大。

4.3 桩身刚度

超长桩桩身直径为 1.2 m,桩身长度为 70.0 m,桩身材料分别为 C30、C35 和 C40 混凝土时,桩顶 $Q-S$ 关系曲线如图 9 所示。由图 9 可以看出:超长桩弹性模量不能明显改变超长桩的承载受力特性。

图9 不同混凝土材料下桩顶 $Q-S$ 关系曲线Fig. 9 $Q-S$ relationship curves of pile top with different concrete materials

由于桩、土两种材料的弹性模量相差很大,在加载后期,超长桩周围土体进入塑性变形阶段后,桩身还处在压缩变形的弹性阶段,即超长桩弹性模量在比土体大得多的情况下变化,并不能影响桩自身的承载受力特性。

5 结论

1) 根据超长桩静载试验的桩顶 $Q-S$ 关系曲线:上部含有空桩的超长桩在荷载箱等量增荷加载过程中,桩顶位移增大,其位移增速亦逐渐变大;在荷载箱卸载过程中,桩顶位移会发生回弹现象。

2) 上部含有空桩的超长桩的桩身轴力分布从桩顶到桩端呈逐渐减小趋势,在桩顶极限荷载作用

下,桩身上部的轴力远大于桩端。因此,在实际施工过程中,深厚软土地下车站超长桩可在桩顶处对钢筋进行加密处理。

3) 上部含有空桩的超长桩,桩身直径和长度的改变会影响超长桩的承载-沉降特性。超长桩桩身直径越大,极限荷载越大,达到极限荷载时的极限位移也越大;超长桩桩身长度加长,桩顶极限荷载会提高,桩顶极限位移也会增大;超长桩桩身刚度对其桩顶极限荷载和极限位移的影响效果不明显。在深厚软土地层地下车站桩基设计过程中,应综合考虑承载-沉降特性,调整桩身长度和桩身直径的设计值,达到既安全又经济的目的。

参考文献

- [1] 李兴波. 多层地基中超长桩荷载传递机理的非线性计算方法[J]. 地质与勘探, 2009, 45(4): 474.
LI Xingbo. Nonlinear calculation method of load transfer mechanics for super-long pile in multi-layered soil[J]. Geology and Exploration, 2009, 45(4): 474.
- [2] 周万清, 李贤武. 软土地基超长 PHC 管桩的荷载传递机理分析[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(19): 4839.
ZHOU Wanqing, LI Xianwu. Bearing mechanism of super-long PHC pipe piles in soft soil foundation[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(19): 4839.
- [3] 姚文娟, 钟倩倩, 郭志兴, 等. 超长桩竖向极限承载力预测与动力稳定性分析[J]. 力学季刊, 2011, 32(4): 531.
YAO Wenjuan, ZHONG Qianqian, GUO Zhixing, et al. Prediction of vertical ultimate bearing capacity and dynamic stability analysis of super-long pile[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2011, 32(4): 531.
- [4] 刘炜. 近海风机基础大直径超长钢管桩承载特性数值模拟研究[J]. 施工技术, 2017, 46(24): 63.
LIU Wei. Numerical simulation study on bearing characteristics of large diameter superlong steel pipe pile of offshore wind turbine foundation[J]. Construction Technology, 2017, 46(24): 63.
- [5] 邓小雪, 李龙起, 张帅, 等. 竖向荷载作用下复杂群桩的变形及荷载分布[J]. 铁道建筑, 2019, 59(4): 53.
- DENG Xiaoxue, LI Longqi, ZHANG Shuai, et al. Deformation and load distribution of complex pile group under vertical load[J]. Railway Engineering, 2019, 59(4): 53.
- [6] 李希锴, 李永辉, 陈陆杰. 粉砂地层中超长桩承载特性室内模型试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(4): 33.
LI Xikai, LI Yonghui, CHEN Lujie. Indoor model experimental study on bearing characteristic of super-long piles in the silt sand stratum[J]. China Concrete and Cement Products, 2019(4): 33.
- [7] 李颖, 陈正发, 李晓红, 等. 不同桩体材料超长单桩室内模型试验[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2011, 25(4): 426.
LI Ying, CHEN Zhengfa, LI Xiaohong, et al. Model test study on simple super-long pile of different materials[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2011, 25(4): 426.
- [8] 罗士瑾, 程传国, 张海丰, 等. 自平衡试桩法在沿海软弱地层中的试验研究[J]. 海洋学研究, 2013, 31(4): 37.
LUO Shijin, CHENG Chuanguo, ZHANG Haifeng, et al. Experimental study on self-balanced test method in soft strata in the coastal area[J]. Journal of Marine Sciences, 2013, 31(4): 37.
- [9] 徐长节, 李碧青, 蔡袁强. 自平衡试桩的承载特性试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(7): 1262.
XU Changjie, LI Biqing, CAI Yuanqiang. Bearing behaviors of self-balanced pile[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(7): 1262.
- [10] 赵向阳, 刁莹露, 戴国亮, 等. 嘉绍通道长山河特大桥试桩静载试验研究[J]. 科技通报, 2012, 28(9): 147.
ZHAO Xiangyang, DIAO Yinglu, DAI Guoliang, et al. Study on the static load test on the piles of Jiashao Tongdao Changshan River Bridge[J]. Bulletin of Science and Technology, 2012, 28(9): 147.
- 收稿日期:2022-02-27 修回日期:2022-03-14 出版日期:2024-08-10
Received:2022-02-27 Revised:2022-03-14 Published:2024-08-10
- 通信作者:朱海星,硕士研究生,1423624006@qq.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com