

李雷. 钢管桩单桩复合地基加固隧道软土地基试验研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(1): 69-75. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.069

LI Lei. Experimental Study on the Improvement of Soft-Soil Tunnel Foundation by Composite Foundation with Steel Pipe and Single Piles[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(1): 69-75. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.069

钢管桩单桩复合地基加固隧道软土地基试验研究

李 雷

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 为了对宝兰客运专线王家沟隧道软弱地基进行加固处理, 并了解加固后的桩基受力状态, 通过现场试验及数值模拟, 研究钢管桩单桩复合地基的荷载沉降特性及钢管桩轴力、桩侧摩阻力以及桩身弯矩的变化规律。研究表明: 由现场试验所得的 $P-s$ (荷载-位移)、 $s-\lg t$ (位移-时间的对数) 以及 $s-\lg p$ (位移-荷载的对数) 曲线没有明显可以确定极限承载力的特征点, 根据规范采取控制沉降的方式给出极限承载力特征值为 200 kPa, 并可以此作为设计依据。根据数值模拟中钢管桩的总沉降量以及荷载沉降“归一化曲线”, 数值模拟可以作为现场试验的必要补充。数值模拟结果显示: 桩身轴力呈“D”状分布, 最大值为 59.8 kN; 在距桩顶 2 m 桩长范围内有负摩阻力产生, 其余部位均为正摩阻力, 负摩阻力最大值约为 130 kPa, 正摩阻力最大值约为 50 kPa, 且桩身中性点并不唯一; 桩身上部有弯矩产生, 但数值很小, 对钢管桩稳定性的影响可以忽略。

关键词: 软弱地基; 荷载沉降特性; 试验研究; 钢管桩复合地基

中图分类号: TU472

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)01-0069-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.069

Experimental Study on the Improvement of Soft-Soil Tunnel Foundation by Composite Foundation with Steel Pipe and Single Piles

LI Lei

(China Railway First Survey & Design Institute Group Co., Ltd., Xian 710043, Shaanxi, China)

Abstract: The load-settlement characteristics of a single-pile composite foundation with steel pipe piles are studied through field tests and numerical simulation with the aim of strengthening the weak foundation of a passenger-dedicated line tunnel and understanding the stress state of the pile foundation after reinforcement. The variation rule of side friction, axial force, and bending moment of the pile body are also discussed. Results show that the $P-S$, $S-\lg t$, and $S-\lg p$ curves obtained through field tests lack distinct feature points that are useful for determining ultimate bearing capacity. The characteristic value of the ultimate bearing capacity is 200 kPa in accordance with the code. Numerical simulation can be used as a necessary supplement to field tests in accordance with the total settlement of steel pipe piles in numerical simulation and the normalized curve of load settlement. Numerical simulation results show that the axial force distribution of

收稿日期: 2018-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(41562013); 国家档案局科技项目(2017-X-43)

作者简介: 李 雷(1970-), 男, 学士, 教授级高级工程师, 主要从事隧道与地下工程方面的设计与科研工作。E-mail: tyylilei@126.com.

the pile body has a D-shaped pattern and a maximum value of 59.8 kN. Negative skin friction resistance falls in the range of 2 m from the top of the pile with a maximum value of 130 kPa, and the rest of the pile exhibits positive friction resistance with a maximum value of 50 kPa. The neutral point of the pile is not unique. A small bending moment exists in the upper part of pile body, and its influence on the stability of the steel pipe pile can be neglected.

Keywords: railway tunnel; load-settlement characteristics; experimental research; composite foundation with steel pipe pile

0 引言

本文以宝兰客运专线王家沟隧道为工程背景,隧道围岩以Ⅳ、Ⅴ级为主^[1]。根据已经完成的大量基础性试验,分析该隧道地基土以砂(黏)质黄土为主,隧道地基富含地下水,水的存在极大降低了砂(黏)质黄土的强度,最终导致其承载能力明显不足。基于以上情形,为确保高铁后期的运营安全,保证地基沉降满足规范要求,拟对隧道软土地基进行加固处理。

多年高铁建设为软土地基的处理积累了丰富的工程经验^[2-5]。一般来说,处理后的人工地基可以分为均质地基和复合地基,钢管桩单桩复合地基属于刚性桩复合地基的一种^[6]。由于钢管桩单桩复合地基中的钢桩刚度大,荷载作用下压缩变形小,因而得到了越来越广泛的应用^[7-8]。

目前,有关钢管桩单桩复合地基的研究颇丰。吴亚平等^[9]通过室内试验,得出模型钢管桩桩身冻结力荷载传递函数曲线及桩端阻力荷载传递函数曲线。郑刚等^[10]对倾斜桩的承载力进行研究后得出:倾斜角度较小的桩基其承载能力仍然可以满足正常

使用要求。黄涛等^[11]对碎石填芯钢管桩加固液化土地基的效果和机理进行研究后得出:钢管桩采用碎石填芯不仅能够消除孔隙水压力,也能够减小桩体沉降。同时,贾媛媛等^[12]、翟恩地等^[13]分别对大直径钢管桩竖向和水平向的承载力特性影响进行了研究。孙会方等^[14]对钢管桩复合地基的作用机理以及承载力计算进行了研究。以上研究成果极大丰富了钢管桩加固软土地基的理论和实践经验,为在软土地区开展基础设施建设打下了坚实的基础。

本文拟通过钢管桩单桩复合地基的现场加载试验,研究其荷载沉降特性,并根据规范给出该隧道软地基处理后的承载力特征值。同时,通过补充数值模拟,研究钢管桩的桩身轴力、桩侧摩阻力分布以及桩身弯矩等内容。

1 现场试验

为获取钢管桩单桩复合地基的承载力特性曲线,在隧道内完成了原位钢管桩单桩复合地基加载试验。在试验之前首先完成了现场土样的室内土工试验,测得其主要物理力学参数(表1)。

表1 地基土物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of foundation soil

项目	密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水量 ω /%	干密度 /%	液限 W_L /%	塑限 W_P /%	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)	弹性模量 E /GPa
数值	1.69	21.17	1.39	31.96	16.40	29.20	22.32	0.2

1.1 试验准备

1.1.1 试验概况

试验所用钢管桩桩长 6.5 m,直径 0.159 m。试验开始前先开挖试坑,随后钢管桩入土并控制桩顶于设计标高,同时在桩顶铺设 100 mm 厚的级配碎石及中粗砂作为桩顶“褥层”,褥层上部放置刚性承压板用于传递上部荷载(面积 0.25 m^2)。试验所需荷载通过在刚性承压板上架设油压千斤顶和在其上部停放的重型机械来实现,上部重型机械最大可提供 1 300 kN 的反力。荷载大小通过压力传感器显示,桩顶沉降通过对称布置在刚性承载板的 4 个位移传感器测量。试验现场情况见图 1~2。



图1 钢管桩安放

Fig.1 Steel pipe pile placement



图 2 加载过程

Fig.2 Loading process

1.1.2 试验技术要点及控制标准

为了规范试验过程,获取准确可靠的数据,以下列出了试验数据采集方式及试验结束标准。

(1) 数据采集方式:

每施加一级荷载前后均应记录承压板沉降量,之后每半个小时记录一次。当一小时内沉降量小于 0.1 mm 时,即可进行下一级加载。

(2) 试验结束标准:

- ① 沉降突然增大,周围土体被挤出或承压板周围出现明显隆起;
- ② 承压板累积沉降量已大于其直径的 6%;
- ③ 已达加载反力装置的最大加载量。

1.1.3 试验结果分析

本次试验共有 15 个加载等级,累计荷载为 679 kPa。具体试验结果列于表 2,表中包含了每一级荷载下的本级沉降及累计沉降。

表 2 现场试验结果

Table 2 Field test results

荷载等级	累计荷载/kPa	本级沉降/mm	累计沉降/mm
第 1 级	45	1.48	1.48
第 2 级	90	1.84	3.32
第 3 级	136	1.58	4.90
第 4 级	181	1.37	6.27
第 5 级	226	2.10	8.37
第 6 级	271	1.79	10.16
第 7 级	317	1.87	12.03
第 8 级	362	1.64	13.67
第 9 级	403	1.46	15.13
第 10 级	452	2.33	17.46
第 11 级	498	1.51	18.97
第 12 级	543	2.14	21.11
第 13 级	588	1.74	22.85
第 14 级	633	1.30	24.15
第 15 级	679	1.29	25.44

根据《桩基工程手册》^[15]中的规定:在完成桩基加载试验后,需分别绘制 $P-s$ (荷载-位移)、 $s-lgt$ (位

移-时间对数)、 $s-lgp$ (位移-荷载对数) 曲线,以确定其极限承载力(图 3~5)。

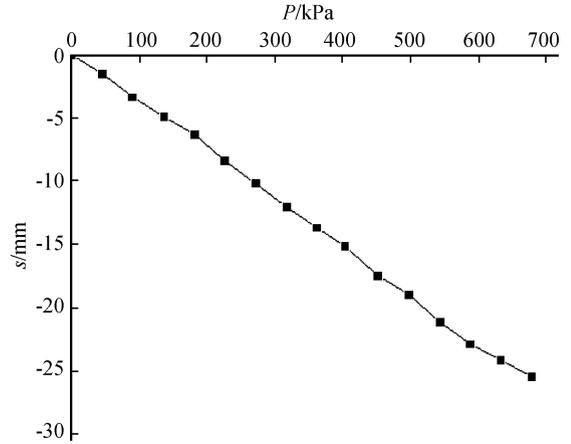


图 3 $P-s$ 曲线

Fig.3 $P-s$ curve

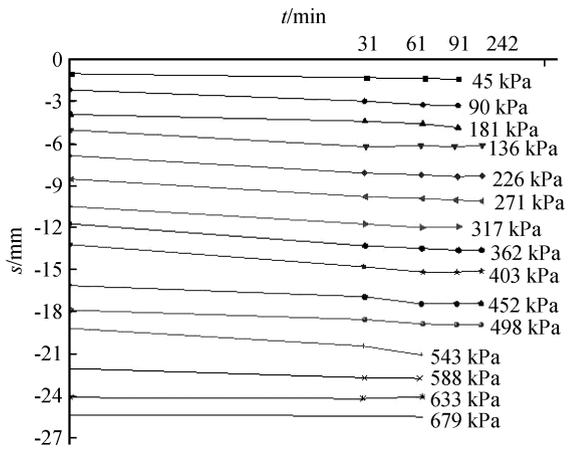


图 4 $s-lgt$ 曲线

Fig.4 $s-lgt$ curve

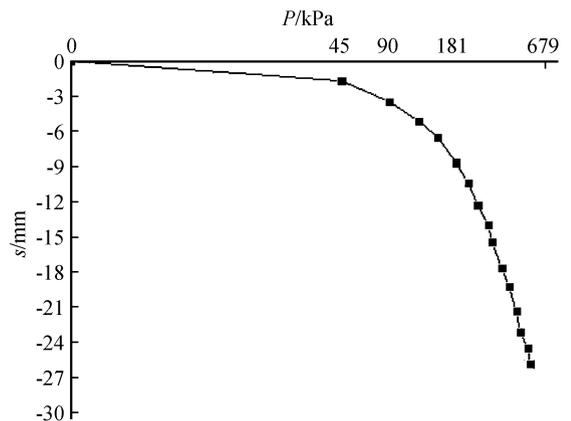


图 5 $s-lgp$ 曲线

Fig.5 $s-lgp$ curve

由图 3 可知:随着荷载等级的提高,竖向沉降呈线性增加,最大沉降量达 25.44 mm, $P-s$ 曲线变化没有“突降点”。由图 4 可知:随着荷载等级的增加,

桩顶沉降也在近似均匀增加,在不同的荷载等级下,沉降随时间没有明显的变化,基本上呈一条直线,所有曲线尾部没有明显弯曲。同样在图5中的曲线也没有非常明显的“突变点”。所以,以上三种图形中并没有明显的特征点可以确定复合桩基的极限承载能力。结合《桩基工程手册》^[15]中的规定:可以通过控制沉降量来确定极限承载力,一般对于大直径桩来说沉降值通常在40~60 mm,当上部结构对沉降敏感时取低值,不敏感则取高值。但本次试验所用桩型为微型桩,考虑到高铁工后沉降要求,其极限承载能力建议取为400 kPa,在除以安全系数2以后,建议该场地条件下复合地基极限承载力特征值为200 kPa,并以此作为设计依据。

2 数值模拟研究

由于现场地基土体含水量较高,同时受到施工现场等多种不良因素的影响,未在桩身上黏贴应变片测量桩身应变。为了进一步了解该复合地基中钢管桩的受力情况,对上述试验进行相应的数值模拟是非常必要的。

2.1 钢管桩单桩复合地基加固原理

钢管桩单桩复合地基承载机理不同于普通的桩基工作原理。普通桩基在受到外荷载后,绝大部分

的荷载通过桩基本身将荷载扩散到周围的土层或桩端持力层,而钢管桩单桩复合地基通过在桩顶设置“褥层”,确保了桩土共同受力。因此,在建立钢管桩单桩复合地基的数值模型时需要考虑桩土共同受力的问题。本次数值模拟通过在对应于刚性承压板面积的土层上施加均布力,确保加载时桩土共同受力。

同时,模拟桩基在土体中的受力状态,首先需要解决在数值软件中如何模拟桩周以及桩端与土体的相互作用。目前在 Midas GTS NX 软件中较为普遍的方法有3种:第一种是直接在土体中建立梁单元模拟桩基,然后将桩基与土体直接进行耦合处理,桩土之间为刚性连接;第二种方法仍然采用梁单元模拟桩基,但需要在桩基周围建立桩单元(模拟相互接触)模拟桩土接触,同时需要在梁单元底部建立桩端单元模拟桩端与土的相互作用;第三种方法是使用实体单元建立桩基,通过在桩基周围设置界面单元模拟桩土接触。以上3种方法都可以模拟土中桩基,但是考虑到第一种方法不能模拟桩基在土中的滑移,第三种方法难以收敛,所以选择采用第二种方法进行模拟。

2.2 基本参数及加载工况

表1、3列出了数值模拟所需要的各项计算参数。表4列出了数值模拟的加载等级,数值模拟加

表3 数值模拟参数

Table 3 Numerical simulation parameters

单元类型	最终剪力 /kPa	剪切刚度模量 /(kN·m ⁻³)	法向刚度模量 /(kN·m ⁻³)	桩端承载力 /kPa	密度 /(g·cm ⁻³)	弹性模量 E /GPa	泊松比 μ
桩单元	30	2.68e7	2.68e8	-	-	-	-
桩端单元	-	-	-	98.9	-	-	-
钢管桩	-	-	-	-	7.85	206	0.28
地基土	-	-	-	-	1.69	0.2	0.45

表4 各级荷载作用下沉降值

Table 4 Settlement values under various loads

荷载等级	累计荷载/kPa	每级沉降/mm	累计沉降/mm
第1级	45	1.55	1.55
第2级	90	1.81	3.36
第3级	136	1.81	5.17
第4级	181	1.49	6.66
第5级	226	2.26	8.92
第6级	271	1.74	10.66
第7级	317	1.81	12.47
第8级	362	1.94	14.41
第9级	403	1.55	15.96
第10级	452	1.49	17.45
第11级	498	1.61	19.06
第12级	543	2.19	21.25
第13级	588	1.81	23.06
第14级	633	1.21	24.27
第15级	679	0.95	25.22

载等级与现场试验完全一致,共15级。

2.3 数值计算模型

模型在 X、Y、Z 方向的尺寸分别为 6 m、6 m、13 m。钢管桩采用 1D 梁单元,地基土采用 3D 实体单元,钢管桩每 0.1 m 划分一次网格,地基土每 0.3 m 划分一次网格,采用混合网格生成器生成。模型底部为竖向约束,周围为法向约束,上部为自由边界。网格划分效果见图6,图中模型顶面圆形区域为施加均布荷载部位。

2.4 结果分析

表4为数值模拟各级荷载作用下的本级荷载沉降及累计荷载沉降,图7为数值模拟荷载沉降曲线,图8为试验及数值模拟荷载沉降归一化曲线。

由表4可知:数值模拟荷载最终达到679 kPa,

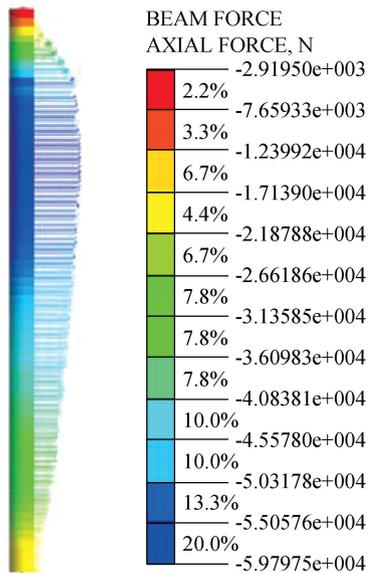


图10 桩身轴力云图

Fig.10 Axial force nephogram of pile

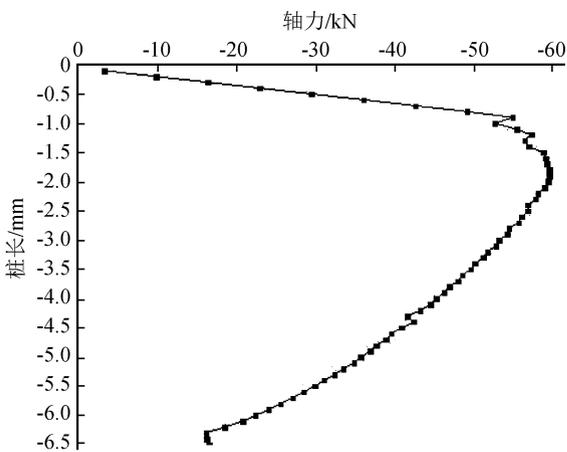


图11 轴力随桩长变化曲线

Fig.11 Change curve of axial force with pile length

为了进一步研究桩侧摩阻力的变化规律,在图10的基础上利用式(1)^[16]计算了每个单元的侧摩阻力,并绘制了桩侧摩阻力随桩长的变化曲线(图12)。

$$q_i = \frac{N_i - N_{i+1}}{\pi D l_i} \quad (1)$$

式中: q_i 为钢管桩第*i*段的桩侧摩阻力; N_i 为钢管桩第*i*段的桩身轴力; D 为钢管桩直径; l_i 为相邻单元桩身长度。

由图12可知:桩侧摩阻力随桩长的变化曲线共4次经过竖轴,说明在整个桩长范围有4个中性点,中性点并不唯一,其位置普遍分布在距离桩顶2.5 m的范围内。负摩阻力在距桩顶1 m范围内基本没有变化(130 kPa左右);其后随着埋深的增加急

剧减小,最终全部转化为正摩阻力。正摩阻力随着埋深的增加而增大,最大值在50 kPa左右。

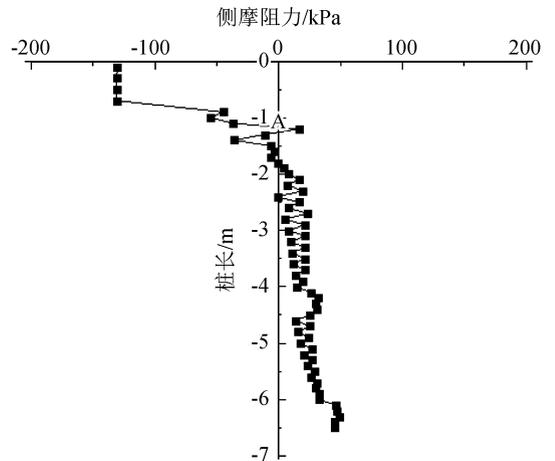


图12 侧摩阻力随桩长变化曲线

Fig.12 Change curve of side friction force with pile length

由图13可知桩身弯矩集中分布在距桩顶2 m范围内,2 m以下桩身弯矩为0,最大正弯矩为0.16 kN·m,最大负弯矩值为0.19 kN·m,弯矩很小,其对于桩的稳定性影响可以忽略不计。

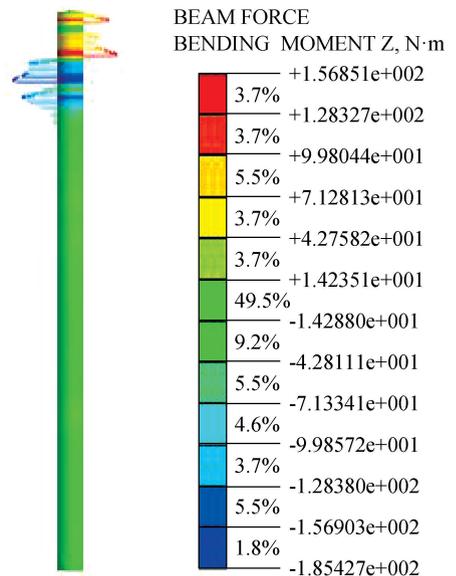


图13 弯矩随桩长变化云图

Fig.13 Change of bending moment with pile length

3 结论

(1) 钢管桩单桩复合地基现场试验的 $P-s$ 曲线、 $s-lgt$ 曲线以及 $s-lgp$ 曲线没有明显的可以确定极限承载力的特征点,根据规范,通过控制沉降的方法给出极限承载力特征值为200 kPa。

(2) 根据荷载沉降 $P-s$ 曲线和荷载沉降“归一

化曲线”可知:数值模拟与现场试验较为吻合,可以将其作为现场试验的必要补充。

(3) 钢管桩的桩身轴力呈“D”状分布,轴力最大值为 59.8 kN;在距桩顶 2 m 长度范围内会产生负摩阻力,其余均为正摩阻力,负摩阻力最大值约 130 kPa,正摩阻力最大值约 50 kPa;桩身中性点并不唯一。

(4) 桩身最大正弯矩为 0.16 kN·m,最大负弯矩为 0.19 kN·m,弯矩值很小,对钢管桩稳定性的影响可以忽略。

参考文献(References)

- [1] 张荣.饱和黄土软基隧道处理方法的研究[D].兰州:兰州交通大学,2016.
ZHANG Rong. Research of the Method about Soft Base of Saturated Loess Tunnel Processing[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [2] 赵孝斌. 建筑工程中软土地基处理技术的应用分析探究[J]. 工程建设与设计, 2015, 5(2): 65-67.
ZHAO Xiaobin. Analysis of Soft Soil Foundation Treatment Construction Technology Application[J]. Construction & Design for Project, 2015, 5(2): 65-67.
- [3] 黄建国. 预应力管桩桩-网结构加固软基施工控制技术[J]. 铁道标准设计, 2006(9): 12-15.
HUANG Jianguo. Construction Control Technology for Reinforcement of Soft Foundation with Pile-Net Structure of Prestressed Pipe Piles[J]. Railway Standard Design, 2006(9): 12-15.
- [4] 张福海, 王保田, 王炳奇, 等. 大粒径碎石桩在饱和超软土地基中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(4): 430-434.
ZHANG Fuhai, WANG Baotian, WANG Bingqi, et al. Application of Large Grain-size Gravel Piles to Strengthening Saturated Super-soft Ground[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34(4): 430-434.
- [5] 黄铭, 徐永福, 黄刚, 等. 软土地基处理过程中搅拌桩下沉的机理和判别方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 325-329.
HUANG Ming, XU Yongfu, HUANG Gang, et al. Mechanisms and Identification Methods of Sinking of Mixing Piles during Process of Soft Soil Foundation Treatment[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(4): 325-329.
- [6] 乐大维. 钢管桩复合地基桩间距对沉降影响的离心试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
LE Dawei. Research on the Effect of the Pile Spacing on the Settlement of the Composite Foundation Using Steel Tube Based on Centrifugal Model Test[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [7] 廖从荣. 钢管桩在地基加固工程中的研究与应用[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
LIAO Congrong. Research and Application of Steel Pipe Piles in Foundation Reinforcement Engineering[D]. Changsha: Cen-

tral South University, 2006.

- [8] 彭文韬. 超长直径钢管桩竖向承载特性试验分析与预测方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
PENG Wentao. Study on Testing Analysis and Prediction Methods for Bearing Properties of Super-long and Large-diameter Steel Pipe Piles under Vertical Load[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [9] 吴亚平, 舒春生, 马巍, 等. 冻土中钢管桩荷载传递函数曲线研究[J]. 冰川冻土, 2007, 29(1): 21-25.
WU Yaping, SHU Chunsheng, MA Wei, et al. Study of the Load Transfer Curves of Steel Pipe Piles in Frozen Soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(1): 21-25.
- [10] 郑刚, 王丽. 竖向荷载作用下倾斜桩的荷载传递性状及承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 323-330.
ZHENG Gang, WANG Li. Load Transfer and Bearing Capacity of Inclined Pile under Vertical Load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(3): 323-330.
- [11] 黄涛, 牛琪瑛, 汤黄俊. 碎石填芯钢管桩加固抗液化特性的试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2016, 47(1): 32-35.
HUANG Tao, NIU Qiyang, TANG Huangjun. Study on Antiliquefaction Characteristics of Gravel-filled-Steel Tube Pile in Reinforcement Experiment[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2016, 47(1): 32-35.
- [12] 贾媛媛, 路军富, 赵冉, 等. 竖向荷载作用下大直径钢管桩承载力特性分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2012, 37(4): 744-750.
JIA Yuanyuan, LU Junfu, ZHAO Ran, et al. Load Bearing Capacity of the Large-diameter Steel Pipe Piles under Vertical Loads[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2012, 37(4): 744-750.
- [13] 翟恩地, 石世刚, 胡中波, 等. 基于荷载传递曲线的大直径钢管桩水平受力特性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(1): 1-11.
ZHAI Endi, SHI Shigang, HU Zhongbo, et al. An Analytical Method for Laterally Loaded Large-diameter Steel Pipe Piles Based on Load-transfer Curves[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(1): 1-11.
- [14] 孙会方, 张为民. 钢管桩复合地基的应用[J]. 工程勘察, 2003, 31(1): 49-51.
SUN Huifang, ZHANG Weimin. Application of Steel Pipe Pile Composite Foundation[J]. Engineering Investigation, 2003, 31(1): 49-51.
- [15] 史佩栋. 桩基工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 965-987.
SHI Peidong. Pile and Pile Foundation Handbook[M]. Beijing: China Communications Press, 2008: 965-987.
- [16] 张延杰. 强湿陷性黄土模型试验材料的研制与黄土地基单桩承载行为研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2011.
ZHANG Yanjie. Development of Model Test Material of Strongly Collapsible Loess and Study on Bearing Behaviors of Pile in Loess Subgrade[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2011.