

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.02.001

楔形管桩沉桩挤土效应试验研究

邹长春^{1,2}, 何杰¹, 刘孟鑫¹, 熊猛¹, 郭端伟¹, 吴政¹

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 广东和立土木工程有限公司, 广东 广州 511430)

摘要: 为深入研究预应力混凝土楔形管桩在静力沉桩过程中的沉桩挤土效应, 基于室内模型试验, 对比分析直型管桩与楔形管桩在沉桩过程中挤土效应的差异, 着重探讨楔角对楔形管桩沉桩特性的影响。结果表明: 楔形管桩贯入阻力曲线呈斜“Z”型, 直型管桩贯入阻力在沉桩中后期出现48.5%幅度的减小, 楔形侧壁对土体的挤压效应是楔形管桩较大贯入阻力和较高竖向承载力的主要来源; 无论径向还是竖向位移, 沉桩前期楔形管桩位移较小, 位移增长主要在中后期, 挤土效应较直型管桩明显, 而直型管桩沉桩过程中位移表现为先增大后减小, 挤土范围小于一般桩体; 楔形管桩桩身应变随沉桩深度和楔角的增加而增大, 量值上远大于直型管桩; 针对两种桩型“应力集中”现象出现的不同位置, 对管桩桩身强度设计给出了建议。

关键词: 预应力混凝土楔形管桩; 挤土效应; 贯入阻力; 土体位移; 桩身应变

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2022)02-0001-07

引文格式: 邹长春, 何杰, 刘孟鑫, 等. 楔形管桩沉桩挤土效应试验研究[J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(2): 1-7.

An Experimental Research on Soil Compacting Effect of Tapered Pipe Piles

ZOU Changchun^{1,2}, HE Jie¹, LIU Mengxin¹, XIONG Meng¹, GUO Duanwei¹, WU Zheng¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Guangdong Heli Civil Engineering Co., Ltd., Guangzhou 511430, China)

Abstract: In view of an inquiry into the soil compacting effect of prestressed concrete tapered pipe piles in the process of static pile driving, and based on the indoor model test, a comparison, as well as an analysis, has been made of the difference of soil compacting effect between straight pipe piles and tapered pipe piles in the process of pile driving, followed by an emphatic discussion of the influence of tapered angle on the pile sinking characteristics of tapered pipe piles. The results show that the penetration resistance curve of tapered pipe piles shows an inclined “Z”, and the penetration force of straight pipe piles decreases by 48.5% in the middle and later stage of pile sinking, with the squeezing effect of sloping sidewall on soil being the main source of the great penetration resistance and high vertical bearing capacity of tapered pipe pile; regardless of the radial or vertical displacement, the displacement of wedge-shaped pipe piles in the early stage of pile sinking is small, and the displacement increase is mainly in the middle and late stage. The soil squeezing effect is more obvious than that of straight pipe piles, while the displacement of straight pipe piles shows an initial increasing trend and a subsequent decreasing trend, with the soil squeezing range smaller than that of ordinary pile. The strain of wedge-shaped pipe piles increases with the increase of pile sinking depth and

收稿日期: 2021-04-07

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ6007)

作者简介: 邹长春(1996-), 江西抚州人, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为地基与基础工程,

E-mail: 1757643760@qq.com

通信作者: 何杰(1976-), 湖南汨罗人, 男, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为地基处理技术,

E-mail: 82017333@qq.com

wedge angle, which is much larger than that of straight pipe piles. According to the different positions of the “stress concentration” of the two types of piles, some suggestions are given for the strength design of pipe piles.

Keywords: prestressed concrete tapered pipe pile; soil compacting effect; penetration resistance; soil displacement; pile strain

0 引言

预应力混凝土管桩是目前较为常见的一种桩型,具有桩体强度高、生产规模化、施工周期短、适应性强等诸多优点,现已被广泛应用于我国沿海、滨海等软土地基区域。相关学者采用试验研究、数值模拟等方法,分析了预应力管桩在荷载作用下桩身轴力、侧摩阻力等的演化规律,探讨了其桩土荷载传递机理^[1-5]。随着人们认知的加深,越来越多的研究致力于开发新技术新方法以提高桩体承载性能和减少工程造价。目前,异形管桩通过改变桩侧表面积从而提高桩体竖向承载力的方法得到了关注:董全杨等^[6]、刘东辉^[7]、杨成斌等^[8]均发现,相比于普通管桩,异形管桩单桩竖向极限承载力有较大提升。

静力沉桩过程中,桩周土体因受到径向挤压和竖向剪切作用,土体运动产生挤土位移,土体原始结构遭受破坏,同时产生较高的超孔隙水压力,对沉桩周边工程环境造成很大影响。

国内外研究者对沉桩挤土效应做了大量研究。典型如:W. S. Housel等^[9]在黏土中沉桩,研究黏土的不排水抗剪强度随打桩时间变化规律;Hwang J. H.等^[10]结合现场实测资料,研究打桩阻力与地质条件之间的关系;张忠苗等^[11]对开口管桩的土塞效应进行研究,发现土塞高度受土层条件影响较大;王育兴等^[12]基于圆孔扩张理论和水力压裂理论,分析了沉桩引起土体应力的变化,获得沉桩瞬时超孔隙水压力分布规律;周火焜等^[13]通过饱和软黏土足尺试验,探讨了沉桩过程中土体位移变化情况。但对于异形桩的沉桩挤土效应,国内外并无太多可借鉴的应用成果。目前仅有少数学者做了一些探究^[14-17]。叶俊能等^[18]研究了竹节桩复合地基沉桩过程中的超孔隙水压力分布规律;周航等^[19]基于透明土技术,研究了矩形桩沉桩过程中土体位移情况,结果表明,挤土位移场可分为靠近桩身的过渡区域和远离桩身的圆孔扩张区域。

本文基于室内大比例模型试验,对楔形管桩的沉桩挤土效应展开研究,以揭示静力沉桩过程中,桩贯入阻力、桩周土位移和桩身应变等随深度变化规律,

着重探讨不同楔角对楔形管桩沉桩效应特点的影响,以期进一步推动楔形管桩技术的后续发展。

1 模型试验

1.1 试验概况

为探讨预应力混凝土楔形管桩的沉桩效应,对比楔形管桩和等截面管桩在沉桩挤土规律方面的差异,共设置3组试验,桩型选用半模开口管桩,具体尺寸参数见表1。

表1 试桩尺寸参数
Table 1 Size parameters of test piles

编号	桩型	桩长/cm	楔角/(°)	直径/cm		壁厚/cm
				桩顶	桩端	
T1	楔形管桩		1.2	8.35	5.00	
T2	楔形管桩	80	1.5	9.19	5.00	1.2
U1	直型管桩		0	6.68	6.68	

模型试验在 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ (长×宽×高)的模型箱内进行,模型箱由支架、铁制底板和四面钢化玻璃组成,试验场地布置如图1所示。填土方式采用分层填筑,每做完一根试桩,将模型箱内土料倒出,翻捣均匀重新分层回填,试验中在每层土体顶面上覆钢板以控制压实度,并通过控制装填高度和压实后高度来控制土料的均匀性。参照《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2011)中关于土类的划分方法,试验用土的塑性指标大于10、小于17,故为粉质黏土。土的主要物理力学参数见表2。

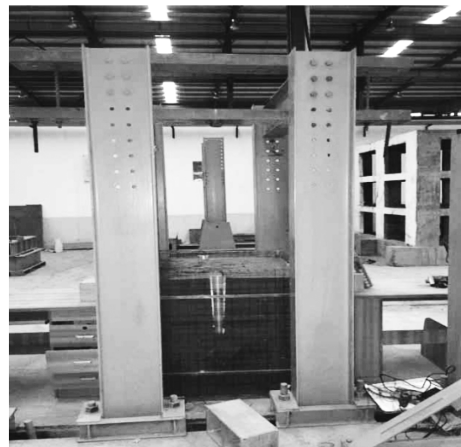


图1 试验场地布置图

Fig. 1 Layout of the test site

表2 土的主要物理力学参数

Table 2 Main physical and mechanical parameters of the soil

含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	液性 指数 I_L	塑性 指数 I_p	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	压缩模量 E_s/MPa
16	1.76	0.4	16	39.82	13.08	2.1

1.2 测量元件布置

1.2.1 应变片

桩身应变的测量选用 BX120-0.5AA 型电阻应变片, 采用半桥接线方式接线, 并用 DH3815 静态应变测试分析系统进行应变采集。应变片粘贴位置如图 2 所示。

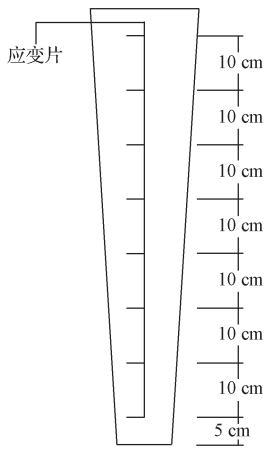


图2 应变片粘贴示意图

Fig. 2 Stick position of the strain gauge

1.2.2 位移测量

为了保证位移测量的精度, 在模型箱钢化玻璃外侧刻画边长为 1 cm 的正方形网格, 分别在距桩中心 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5, 9.5, 10.5 cm 处的土层表面布置长度为 1 cm 的大头针, 以网格参照人工读取大头针的位置信息, 从而能够较好地获得桩周表土径向和竖向位移。

1.3 加载及数据记录

在静力沉桩过程中, 严格按照国家标准《建筑桩基技术规范 (JGJ 94—2008)》执行。试验采用压力传感器和压力显示仪来量测沉桩贯入阻力, 每压完 1 节桩 (10 cm) 分别读取各仪器仪表的数值。

2 试验结果分析

2.1 沉桩贯入阻力变化规律

图 3 所示为各试桩沉桩贯入阻力随沉桩深度的变化曲线。据图 3 中的曲线可知, 预应力混凝土楔形管桩沉桩初始阶段 (约 0.15 倍桩长) 贯入阻力小于直型管桩的, 且楔角越大, 初始贯入阻力越

小。沉桩前期, 楔形管桩贯入阻力增长速率远大于直型管桩的, 此阶段沉桩施工难度较大, 且随着楔角的增加而急剧增加。当沉桩进行到后阶段时, 直型管桩贯入阻力开始减小, 减幅相较于上一级沉桩为 48.5%, 随后又逐渐增大, 这一趋势与张可能^[15]描述的有所不同, 可能是桩型和土质的差异导致。从整个沉桩过程来看, 楔形管桩贯入阻力变化曲线呈斜“Z”形, 前期和后期增长速率较快, 中期趋于稳定, 而直型管桩贯入阻力最大增幅出现在沉桩深度为 0.5 倍桩长时。

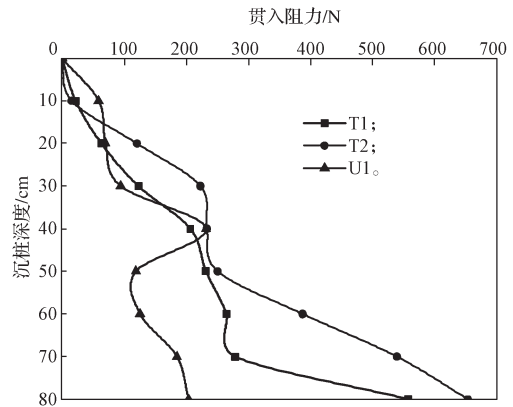


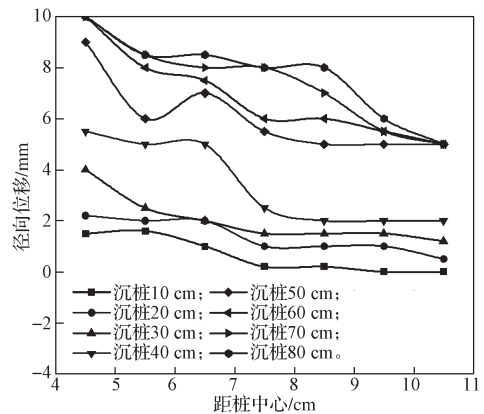
图3 贯入阻力随沉桩深度变化曲线

Fig. 3 Curves of penetration resistance with depth

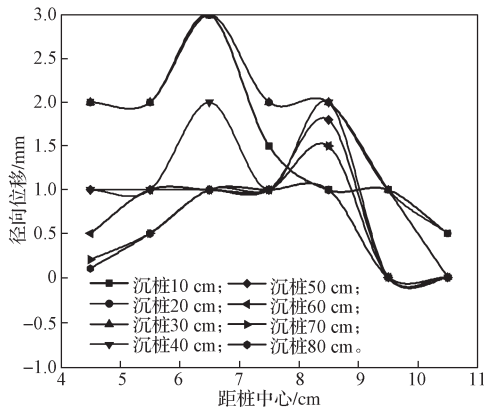
分析上述现象的原因, 楔形管桩由于楔角的存在, 沉桩时对侧壁的土体挤压效应相较于直型管桩更加明显, 且随楔角和深度的增加越来越大, 挤压产生的相互作用大大提高了桩体的贯入阻力, 同时也可以预知, 这种挤压效应在桩体承担竖向荷载时, 也能进一步提高楔形管桩的竖向承载能力。

2.2 径向位移分析

图 4、图 5 分别为不同桩型和不同间距试桩的径向位移变化曲线。



a) T2



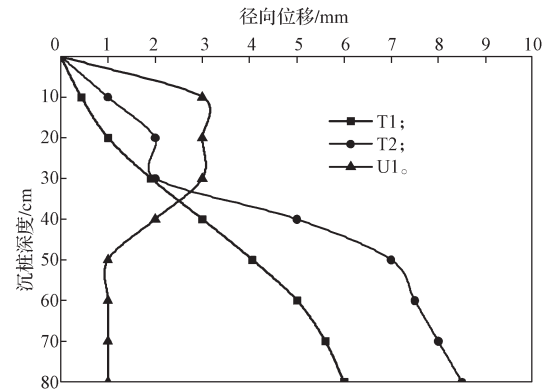
b) U1

图4 不同桩型的距桩中心 - 径向位移变化曲线

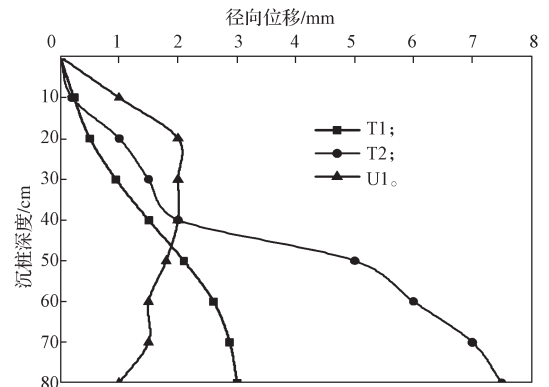
Fig. 4 Relation curves of distance pile center distance radial displacement of different pile types

由图4中不同桩型的距桩中心 - 径向位移变化曲线可知, T2桩与U1桩径向位移表现出较大差异。预应力混凝土楔形管桩随着桩身下沉, 各测点径向位移逐渐增大, 且距桩中心距离越远, 位移越小。直型管桩桩周表层土随沉桩的进行, 在测点范围内, 表土先向背离桩中心方向运动, 后又向桩中心靠拢, 最大径向位移出现在约距桩中心6.5 cm处, 位移大小为3 mm, 约0.045D (D为桩体平均直径)。直型管桩径向挤土范围约为10.5 cm, 即1.6D, 较一般桩体要小。产生这种现象主要是因为试桩为开口管桩, 且壁厚较薄, 沉桩过程中铲土效应显著, 对桩周土层的挤土作用较小。

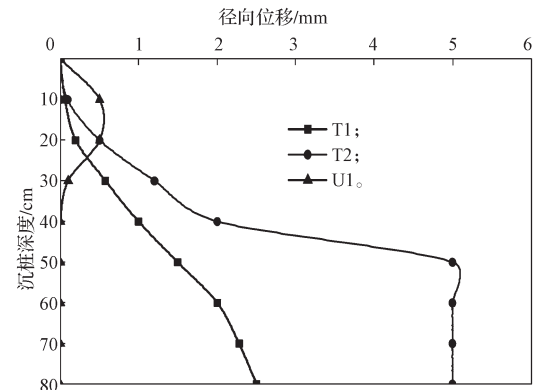
图5为不同间距下径向位移 - 沉桩深度曲线。据图5的径向位移 - 沉桩深度曲线可以看出, 不同间距的径向位移整体变化趋势一致, 沉桩初期, 直型管桩的径向位移迅速增加, 而楔形管桩的位移增长缓慢, 位移增加主要在沉桩中后阶段, 沉桩结束时, 楔形管桩的径向位移要远大于直型管桩的, 且楔角越大, 位移量值越大。



b) 距桩中心 6.5 cm



c) 距桩中心 8.5 cm



d) 距桩中心 10.5 cm

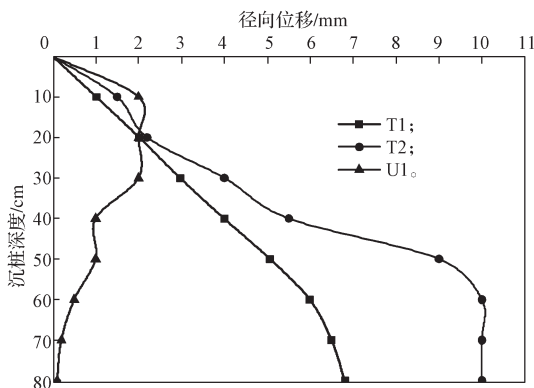
图5 不同间距下径向位移 - 沉桩深度变化曲线

Fig. 5 Radial displacement pile sinking depth curves under different spacing

由于缺乏较远径向距离处的位移测量值, 无法看出楔形管桩水平挤土范围, 但在最远测点处仍有5 mm的位移值, 可以预知楔形管桩的水平挤土范围要明显大得多。因此, 有理由认为预应力混凝土楔形管桩在水平向的挤土效应较直型管桩明显。

2.3 竖向位移分析

图6为试桩T2和U1在不同沉桩深度下桩周表土竖向位移曲线。



a) 距桩中心 4.5 cm

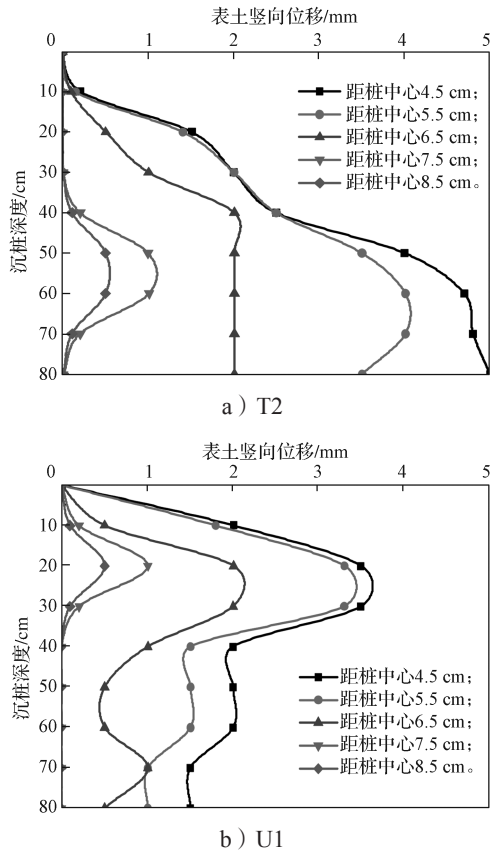


图6 不同桩型的试桩竖向位移-沉桩深度变化曲线
 Fig. 6 Vertical displacement sinking depth curves of test piles with different pile types

由图6可以看出,在加载过程中,无论是直型管桩还是楔形管桩,距桩中心越近,竖向位移越大。特别是,在第一级沉桩(10 cm)时,直型管桩竖向位移增长速率迅速增加,而楔形管桩位移基本为0。沉桩结束时,楔形管桩表土竖向位移达到最大值,而直型管桩则表现出与径向位移相同的趋势,随着沉桩的进行,竖向位移先增大后又减小,最大位移发生在第二/三级沉桩。在量值上,楔形管桩竖向位移要大于直型管桩,沉桩结束时,楔形管桩距桩中心4.5 cm处的竖向位移值为5 mm,而直型管桩仅为1.5 mm。分析其原因,可能是直型管桩沉桩初期土被桩体置换产生隆起,随后土体开始回弹,位移逐渐减小,而楔形管桩因其上大下小的截面,沉桩过程中对桩上部土体回弹产生阻力,故而竖向位移和对桩周土的扰动范围较直型管桩要大。

2.4 桩身应变分析

图7为各试桩沉桩过程中桩身应变变化曲线。由图7可知,楔形管桩桩身应变变化趋势整体一致,伴随沉桩深度的增加,桩侧摩阻力逐渐发挥出来,应变随之增大,由沉桩贯入力曲线也可以印证这点,且随楔角的增加而增大,应变峰值出现在桩体上半

部,距桩顶35 cm处。直型管桩桩身应变沿桩长表现为先快速增加后又逐渐减小,最大应变值出现在距桩顶55 cm处,其量值远小于楔形管桩。由此可见,针对不同桩型静力压桩过程中“应力集中”现象出现的位置,防止沉桩导致桩体破坏,保证沉桩质量,楔形管桩应加强桩身上半部强度,而直型管桩应提高中下部桩体强度。同时也说明沉桩过程中,楔形管桩与直型管桩桩侧摩阻力发挥程度存在显著差异,这也是现场施工值得注意的问题。

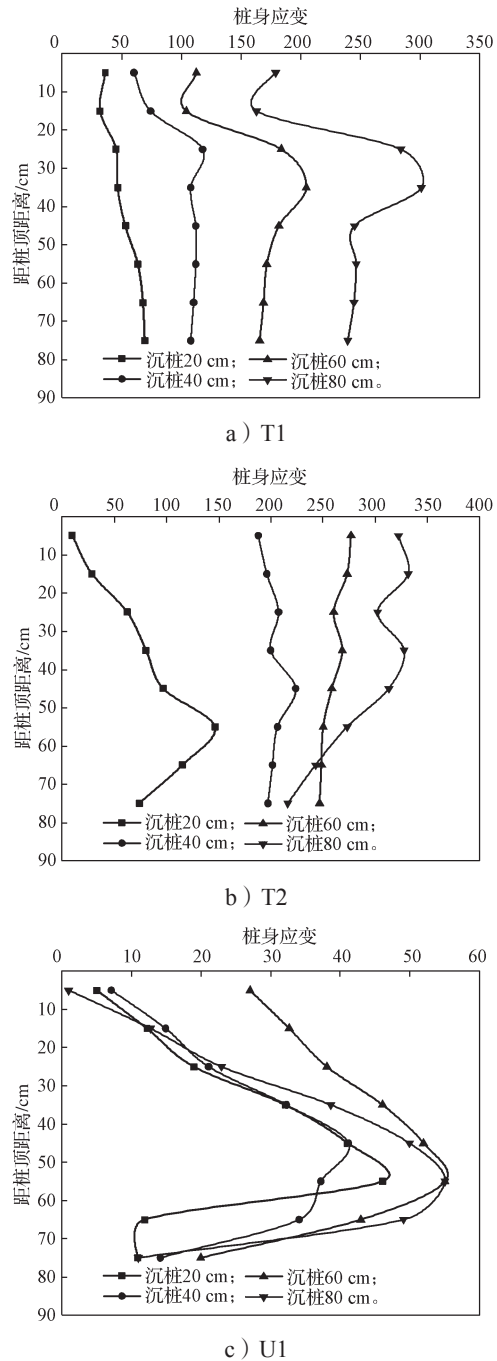


图7 不同桩型的试桩桩身应变-距桩顶距离变化曲线
 Fig. 7 Strain distance curves between pile body and pile top of test piles with different pile types

3 结论

1) 楔形管桩贯入阻力变化曲线呈斜“Z”型, 初始贯入阻力较直型管桩要小, 且与楔角呈负相关关系。随着沉桩深度的增大, 楔形管桩的贯入阻力增长速率远大于直型管桩的贯入阻力增长速率, 施工难度急剧增加; 直型管桩贯入阻力最大增幅在沉桩深度为0.5倍桩长时, 沉桩后阶段贯入阻力减小, 减小幅度较上一级沉桩为48.5%, 楔形侧壁对土体的挤压效应是楔形管桩相比于直型管桩较大贯入阻力和较高竖向承载力的主要来源。

2) 楔形管桩与直型管桩径向位移差异较为明显。沉桩初期, 楔形管桩径向位移增长速率较为缓慢, 随着桩身下沉, 楔形管桩各测点径向位移逐渐增大, 量值上与距桩中心距离成反比, 挤土效应较直型管桩显著; 直型管桩则表现为先远离桩中心, 后又向桩中心靠拢, 最大径向位移出现在距桩中心6.5 cm处, 位移值大小约为0.045D, 径向挤土范围为1.6D, 较一般桩体要小。

3) 无论是直型管桩还是楔形管桩, 距桩中心越近, 竖向位移越大。沉桩前期楔形管桩位移较小, 位移增长主要发生在沉桩中后期; 直型管桩竖向位移表现出与径向位移相同的变化趋势, 先增大后减小, 最大位移出现在第二/三级沉桩。

4) 楔形管桩桩身应变变化趋势整体一致, 应变随深度增加而增大, 直型管桩应变沿桩长呈现先增加后减小趋势, 最大值出现在距桩顶55 cm处。针对两种桩型静力压桩过程中“应力集中”现象出现的不同位置, 楔形管桩应加强桩身上半部强度, 直型管桩则需要提高中下部桩体强度。

本研究的试验结果, 可为现场沉桩施工提供参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 律文田, 王永和, 冷伍明. PHC管桩荷载传递的试验研究和数值分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 466-470.
LÜ Wentian, WANG Yonghe, LENG Wuming. Testing and Numerical Analysis of Load Transfer Mechanism of PHC Pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 466-470.
- [2] 刘争宏, 郑建国, 于永堂. 湿陷性黄土地 PHC 桩竖向承载性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊2): 111-114.
LIU Zhengong, ZHENG Jianguo, YU Yongtang. Vertical Bearing Behaviors of PHC Piles in Collapsible Loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 111-114.
- [3] 崔振清, 赵岗飞, 张孟喜, 等. 贯穿含深厚建筑垃圾土地基的预应力管桩承载力特性[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(增刊1): 33-37.
CUI Zhenqing, ZHAO Gangfei, ZHANG Mengxi, et al. Bearing Capacity of Pre-Stressed Pipe Pile in Soil with Construction Waste[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2011, 45(S1): 33-37.
- [4] 宋兵, 蔡健. 预应力管桩侧摩阻力影响因素的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊2): 3863-3869.
SONG Bing, CAI Jian. Research on Influence Factors of Side Soil Resistance of PHC Pipe Pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3863-3869.
- [5] 王钰, 林军, 陈锦剑, 等. 软土地基中PHC管桩水平受荷性状的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊1): 39-42.
WANG Yu, LIN Jun, CHEN Jinjian, et al. Field Test for the Behavior of Pre-Stressed Pipe Piles in Soft Subsoil Under Lateral Load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S1): 39-42.
- [6] 董全杨, 丁光亚, 孙宏磊, 等. 新型带肋预应力管桩承载性能研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1809-1815.
DONG Quanyang, DING Guangya, SUN Honglei, et al. Bearing Behavior of a New Type of Prestressed Pipe Pile with Rib[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1809-1815.
- [7] 刘东辉. 侧嵌式管桩受力性能及桩土相互作用试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
LIU Donghui. Research on Mechanical Performance and Experiment About Pile-Soil Interaction of Prestressed Concrete Pipe Pile with Side Embedded Precast Short Limb[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [8] 杨成斌, 张能钦, 谢文萃, 等. 预应力混凝土竹节桩承载性能对比试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(10): 1407-1410.
YANG Chengbin, ZHANG Nengqin, XIE Wenping, et al. Contrastive Experimental Study of Bearing Capability of Pre-Stressed Spun Concrete Bamboo-Shape Pile[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2016, 39(10): 1407-1410.
- [9] HOUSEL W S, BURKEY J R. Investigation to Determine the Driving Characteristics of Piles in Soft Clay[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics Foundations Engineering. New York: [s. n.], 1948: 146-154.
- [10] HWANG J H, LIANG N, CHEN C H. Ground Response During Pile Driving[J]. Journal of Geotechnical

- and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(11): 939-949.
- [11] 张忠苗, 刘俊伟, 俞峰, 等. 静压预应力混凝土管桩土塞效应试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2274-2280.
ZHANG Zhongmiao, LIU Junwei, YU Feng, et al. Research on Plugging Effect of Jacked Prestressed Concrete Pipe Pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2274-2280.
- [12] 王育兴, 孙钧. 打桩施工对周围土性及孔隙水压力的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 153-158.
WANG Yuxing, SUN Jun. Influence of Pile Driving on Properties of Soils Around Pile and Pore Water Pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 153-158.
- [13] 周火焜, 施建勇. 饱和软黏土中足尺静压桩挤土效应试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3291-3296.
ZHOU Huoyao, SHI Jianyong. Test Research on Soil Compacting Effect of Full Scale Jacked-in Pile in Saturated Soft Clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3291-3296.
- [14] 刘汉龙, 金辉, 丁选明, 等. 现浇X形混凝土桩沉桩挤土效应现场试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊2): 219-223, 228.
LIU Hanlong, JIN Hui, DING Xuanming, et al. Field Test Research on Squeezing Effects of X-Section Cast-in-Place Concrete Pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S2): 219-223, 228.
- [15] 张可能, 何杰, 刘杰, 等. 静压楔形桩沉桩效应模型试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(2): 638-643.
ZHANG Keneng, HE Jie, LIU Jie, et al. Model Experimental Research on Piling Effects of Static Piling in Soft Clay Ground with Tapered Pile[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(2): 638-643.
- [16] 杨庆光, 刘杰, 何杰, 等. 楔形与等截面静压桩沉桩贯入阻力对比研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 897-901.
YANG Qingguang, LIU Jie, HE Jie, et al. Comparative Research Onpenetration Resistance of Jacked Tapered Piles and Uniform Sectionpiles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 897-901.
- [17] 何杰, 刘杰, 陈科良, 等. 静压楔形桩挤土效应的室内模型试验[J]. 工业建筑, 2008, 38(1): 74-75, 109.
HE Jie, LIU Jie, CHEN Keliang, et al. Experiment of Compacting Effects of Static Piling in Clay Ground with Tapered Pile[J]. Industrial Construction, 2008, 38(1): 74-75, 109.
- [18] 叶俊能, 周晔, 朱瑶宏, 等. 竹节桩复合地基沉桩施工超孔隙水压力研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 103-110.
YE Junneng, ZHOU Ye, ZHU Yaohong, et al. A Study of the Excess Pore Water Pressure During Pile-Sinking Construction of Nodular Pile Composite Foundation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(1): 103-110.
- [19] 周航, 袁井荣, 刘汉龙, 等. 矩形桩沉桩挤土效应透明土模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4429-4438.
ZHOU Hang, YUAN Jingrong, LIU Hanlong, et al. Model Test of Rectangular Pile Penetration Effect in Transparent Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 4429-4438.

(责任编辑: 申剑)