

王永洪,徐泽强,张明义,等. 开闭口静压管桩贯入过程桩土界面土压力试验 [J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2022, 37(1):36-42. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.01.006

WANG Y H, XU Z Q, ZHANG M Y, et al. Experimental Study on Earth Pressure of Pile-Soil Interface During Penetration of Opening and Closed Static Pressure Pipe Pile [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 37(1):36-42. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.01.006

开闭口静压管桩贯入过程桩土界面土压力试验

王永洪^{1,2*}, 徐泽强¹, 张明义^{1,2}, 吴江斌³, 张腾¹, 银吉超¹, 魏家斌⁴

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033;

2. 山东省高等学校蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033;

3. 华东建筑设计研究院有限公司 上海地下空间与工程设计研究院, 上海 200002;

4. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要:为更好地研究静压管桩贯入过程桩土界面土压力,采用安装在桩身表面的不同位置处的微型硅压阻式土压力传感器对沉桩过程中桩土界面土压力进行了监测,研究了黏性土体中开闭口静压桩径向土压力以及不同位置处桩土界面土压力与桩侧土覆土重比值($\Delta\sigma/\sigma_s$)的变化规律.研究表明:沉桩过程中开口桩 M1 和闭口桩 M2 的桩土界面土压力变化规律基本相同,均是随着沉桩深度的增加近似呈线性增长的趋势,沉桩结束时离桩端不同距离的传感器测得的土压力最大值介于 4.54~20.03 kPa.同一深度处的径向土压力均呈递减趋势,出现“侧压力退化”现象,退化幅度介于 15.2%~71.4%. $\Delta\sigma/\sigma_s$ 沿桩身向下逐渐增大,试桩 M1, M2 的最大值分别为 1.28, 1.31. 研究结果对实际工程中直径大海洋钢管桩径向土压力的确定具有重要的借鉴意义.

关键词:开闭口静压桩;硅压阻式土压力传感器;桩土界面土压力;侧压力退化

中图分类号:TU473 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2022)01-0036-07

Experimental Study on Earth Pressure of Pile-Soil Interface During Penetration of Opening and Closed Static Pressure Pipe Pile

WANG Yonghong^{1,2}, XU Zeqiang¹, ZHANG Mingyi^{1,2}, WU Jiangbin³, ZHANG Teng¹, YIN Jichao¹, WEI Jiabin⁴

(1. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China;

2. Collaborative Innovation Center for Engineering Construction and Safety of Blue Economic Zone, Qingdao 266033, China;

3. Shanghai Underground Space Engineering Design & Research Institute, East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China;

4. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to better study the earth pressure at the pile-soil interface during the penetration of static pressure pipe piles, the micro-silicon piezoresistive earth pressure sensors with installed at different positions on the surface of the pile were used to monitor the soil pressure of the pile-soil interface during the pile-sinking process, and the variation of radial earth pressure at the pile-soil interface of static pressure piles in cohesive soils were studied. The results show that the variation of earth pressure at pile-soil interface of the opening piles

收稿日期:2019-07-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(4177231;51778312;51809146);山东省重点研发计划项目资助(2017GSF16107;2018GSF117010;2018GSF117008)

*通信作者, E-mail: hong7986@163.com

M1 and closed M2 are basically the same, which is a linear growth trend with the increase of the pile depth. At the end of the pile sinking, the maximum values of earth pressure measured by sensors at different distances from the pile end are between 4.54~20.03 kPa. The radial earth pressure at the same depth shows a decreasing trend, and there is a phenomenon of "side pressure degradation", which range is between 15.2%~71.4%. The $\Delta\sigma/\sigma_x$ gradually increases along the pile body, and the maximum values of test piles M1 and M2 are 1.28 and 1.31 respectively. The research results have important referential significance for the determination of radial earth pressure of large diameter marine steel pipe piles in actual engineering.

Keywords: opening and closed static pressure pile; silicon piezoresistive earth pressure sensor; earth pressure at pile-soil interface; lateral pressure degradation

静力压桩因其承载力高、施工操作简便、施工速度快、振动和噪音小等优点,在我国广东、浙江、上海等软土地区以及青岛地区部分桩基工程中广泛应用^[1-3].沉桩过程中土压力变化复杂,尤其对于一些特殊地基土层,国内外很多学者做了大量的现场试验、室内模型试验,对沉桩过程引起的桩周土体土压力进行了一系列研究并取得了一定的研究成果.王永洪等^[4]在东营某黏性地基土工程现场通过桩身安装硅压阻式土压力传感器,对试桩不同 h/L 位置处桩-土界面的土压力随入土深度的变化规律进行了研究;唐世栋等^[5-6]在宁波某综合楼场地灌注桩桩身外壁安装小型压力盒监测了侧压力增量随桩距比的变化规律并与理论估算值做了比较,并研究了桩基施工时侧向土压力增量的估算方法;张忠苗等^[7]在杭州郊区某建筑工地上在预应力空心开口管桩周围土体安装土压力盒,对径向土压力、径向有效应力随沉桩深度变化规律进行了研究;Hwang 等^[8]通过在桩周围一定距离土体中埋设土压力传感器,对沉桩过程足尺桩静力沉桩过程土压力进行监测,发现土压变化与沉桩过程有关;贾志刚等^[9]对 PHC 管桩沉桩过程中的挤土效应进行了监测与分析;雷练武等^[10]通过现场试验研究发现采用应力释放孔可有效地解决挤土效应的问题.

鉴于现场试验不可控因素较多,很多学者通过简化现场复杂的土层条件进行室内模型试验,探讨了静力沉桩过程中引起的土压力.张亚国等^[11]采用离心模型试验,通过在饱和粉质黏土周围安装总应力传感器(TST)对沉桩挤土应力进行了研究,并利用圆孔扩张模型进行修正;李镜培等^[12]采用静压桩离心模型试验沿桩身不同深度和不同径向位置布置土压力盒监测沉桩过程中桩周土体土压力的变化情况;Azzouz 等^[13]采用 PLS 装置进行了 2 种黏土的沉桩模型试验,测量了沉桩过程中的总水平应力;Lehane 等^[14]以砂土为地基,研究了不同桩径不同壁厚对开闭口静压管桩贯入特性的影响;White 等^[15]通过离心和平面应变室内模型试验,研究了砂土密实度对静压桩贯入机制的影响

上述专家学者对静压桩的研究取得了一定成果,但目前测量沉桩过程中的土压力多是采用在桩周土体埋设土压力计的方法.这种方法是通过测得桩周土体应力,进而计算得到桩侧径向土压力.鉴于传统方法不能直接测量桩土界面土压力,在本文开展的大型室内模型试验中,选用灵敏度高、长期稳定性好的硅压阻式土压力传感器,将其安装在桩身能直接量测桩土界面土压力,从而进行沉桩过程中桩土界面土压力分布规律的研究.

1 试验概况

供试土样取自工程现场的粉质黏土层,经烘干、粉碎、重塑并洒水覆盖薄膜,静置 30 d 土体得到充分固结后进行沉桩试验.土样力学参数重度为 18 kN/m^3 ,含水率为 34.8%,黏聚力为 14.4 kPa,摩擦角为 8.6° ,压缩模量为 3.3 MPa.上述数据是根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)^[16]通过直剪仪固结快剪(CU)试验测得的有效应力指标.试验装置主要由模型箱(长、宽、高分别为 3,3,2 m)、加载系统(主机箱、横梁、电控系统、液压千斤顶和反力架)、数据采集系统组成.试验装置如图 1 所示.

一般大直径钢管桩的桩径在 3~6 m,桩长在 30~50 m^[17],本文按原型桩桩长为 35 m,桩径为 5 m,弹性模量 210 GPa,泊松比为 0.3,根据相似比理论确定几何相似比为 35,弹性模量相似比为 2.9,泊松比相似比为 1,模型桩采用铝制材料制作,弹性模量为 72 GPa,泊松比为 0.3,模型桩桩长均为 1 m,外径均为

140 mm,其中,M1 为开口桩,M2 为闭口桩,编号分别为 M1,M2.对不同桩端形式的模型桩沉桩过程中土压力的变化进行了监测.

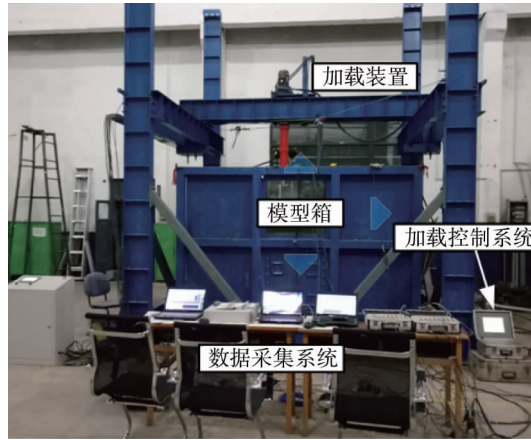


图 1 试验装置

2 传感器的介绍及布设位置

2.1 传感器的介绍

本次试验采用了能直接量测桩土界面土压力的微型硅压阻式土压力传感器,其封装结构图如图 2 所示.土压力传感器的直径为 20 mm,高度为 12 mm,精度为 0.1%,量程为 0~500 kPa,主要由金属保护外壳、硅晶片、观测电缆组成,采用应变全桥电路设计,可准确消除温度变化对测试的影响.

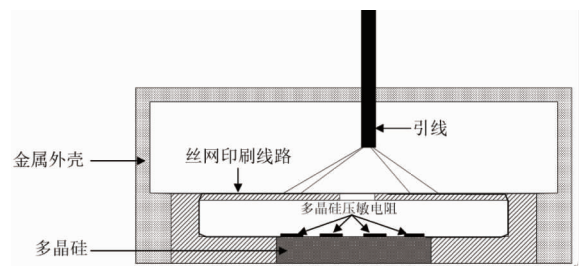


图 2 传感器封装结构

2.2 土压力传感器的布设

传感器的安装方法:首先设定传感器的安装位置,然后在安装位置处开凿孔洞,并焊接与传感器直径相同的圆柱套管,且与桩身表面齐平,再将每个传感器的传输线穿过空洞引到桩顶,之后将传感器用环氧树脂粘贴到孔洞,其表面与套管齐平,待环氧树脂凝固后用 704 胶将传感器封装.每根试桩上安装 6 个传感器,间距各不相同,从桩端到桩顶依次编号为 1#~6#,传感器的安装位置示意图如图 3 所示,安装过程如图 4 所示.

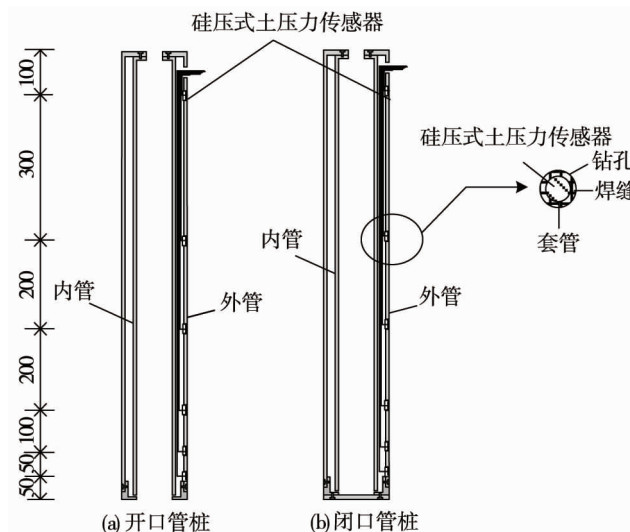


图 3 硅压式土压力传感器布设(单位:mm)

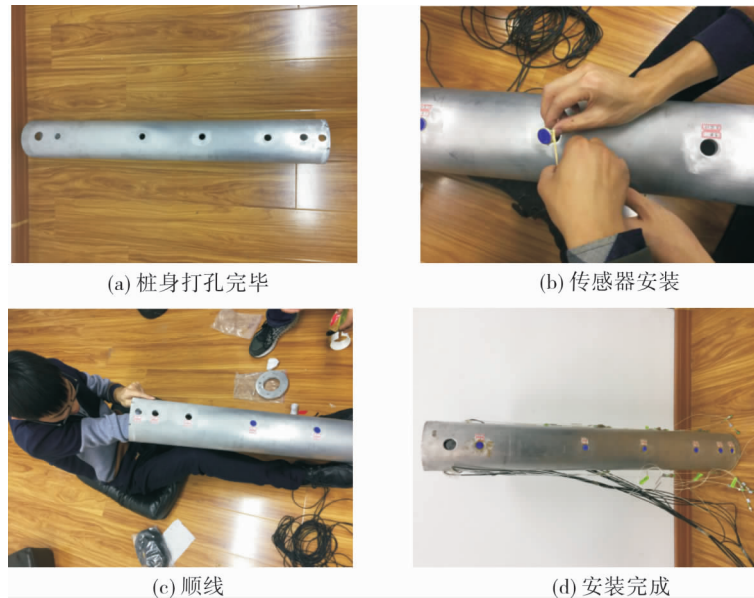


图 4 传感器安装过程

3 试验方案

依据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[18]中的基桩的最小中心距为 $4D$ 的规定,以及通过查阅相关文献^[19-20]可知:当桩距模型箱侧壁的距离 L 与桩径 D 之比大于 3 (即 $L/D > 3$) 时,可不考虑模型箱的边界效应.本次试验的 2 根试桩的位置距离模型箱内壁以及沉桩结束后桩端距离模型箱底均大于 700 mm ($5D$),均满足以上要求,因此可忽略边界效应.静力沉桩过程采用液压千斤顶对试桩加压,因其行程有限试验过程分 2 次完成.沉桩速度为 300 mm/min ,M1, M2 的沉桩深度均为 900 mm .

4 静力沉桩试验结果分析

4.1 桩土界面土压力结果分析

M1, M2 的桩土界面土压力由硅压阻式土压力传感器直接测得,6[#]土压力传感器因在桩刚入土处,未测得有效值.经过整理得 M1, M2 桩身 1[#]~5[#]土压力传感器测得的桩土界面土压力随入土深度的变化规律如图 5 所示.

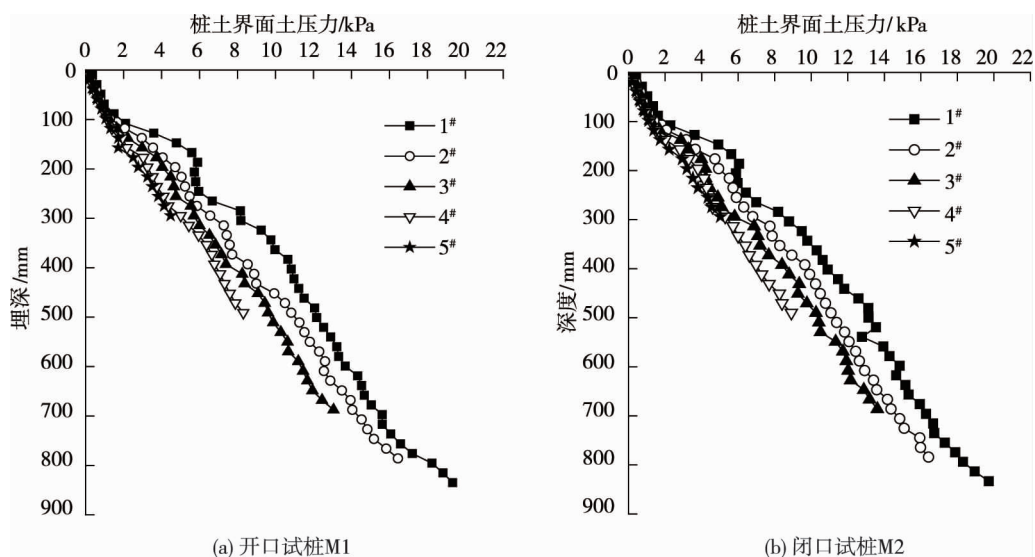


图 5 各试桩沉桩过程桩土界面土压力分布

从图5可以看出:试桩M1,M2桩身1#~5#土压力传感器测得的沉桩过程中桩土界面土压力的变化规律基本相同,均是随着沉桩深度的增加近似呈线性增长的趋势,这与文献[21]得到的沉桩土压力的分布规律相近.沉桩过程中M1,M2试桩不同位置处的传感器测得的土压力值闭口桩大于开口桩,说明开口桩的挤土效应较弱.从图5中还可以发现当各传感器埋深小于100mm时,桩土界面土压力较小,介于0.06~1.98kPa.分析其原因,沉桩过程中上部土体受到严重的扰动,致使土体与管桩之间接触不紧密,从而导致径向土压力较小.当各传感器埋深大于100mm时,随着管桩与土体挤密程度越来越大,桩土界面土压力继续增大,沉桩结束时,各传感器测得的径向土压力达到最大值,最大值介于4.54~20.03kPa.其原因是随着沉桩深度的增加,桩对周围土体的挤密作用较明显,桩与土接触较为紧密,上部覆土重逐渐增大,使得桩土界面土压力不断增大,沉桩结束时,各传感器的埋深达到最大,因此径向土压力值最大.

从图5可以得到:各个土压传感器测得的径向土压力的分布曲线可以发现,同一深度处,1#~5#传感器的径向土压力是逐渐减小的,出现“桩土界面土压力退化”现象,退化的幅度介于15.2%~71.4%,基本呈上部土体退化幅度大,下部土体退化幅度小的规律.产生“土压力退化”的原因是随着沉桩的进行,同一深度经历的摩擦次数不断增多,桩侧土体表面越来越光滑,使得桩-土界面接触不再紧密,产生一定的缝隙,引起应力释放,从而造成了同一深度处的侧压力随沉桩深度的增加而逐渐减小的现象.

4.2 桩-土界面径向压力沿桩身变化规律

桩-土界面径向土压力稳定值沿桩身位置变化趋势归一化如图6所示.不同桩身位置处的径向土压力与上覆土重的比值具有一定的规律性,此规律可表现为

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma_x} \frac{h}{L} = \lambda. \quad (1)$$

式中: $\Delta\sigma$ 为径向土压力稳定值; σ_x 为上覆土重; λ 为土压力系数; h 为距离桩端距离; L 为桩长.

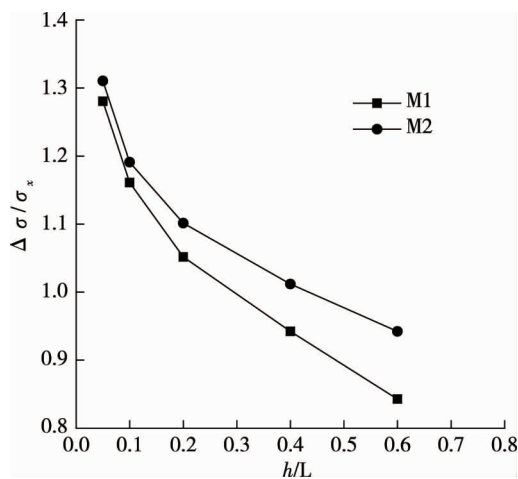


图6 径向土压力沿桩身变化趋势

由图6可得:试桩M1,M2桩-土界面径向土压力与桩侧土自重的比值($\Delta\sigma/\sigma_x$)沿桩身的变化规律基本一致,均是沿桩身向下逐渐增大,增大的速率介于0.35~2.40,两试桩的 $\Delta\sigma/\sigma_x$ 最大值分别为1.28,1.31.分析其原因,随着沉桩深度的增大,挤土效应逐渐加强,桩土界面土压力逐渐增大.同时还可以看出,距离桩端位置越小, $\Delta\sigma/\sigma_x$ 沿桩身增大的幅度越大,两试桩的最大幅度分别为118%,167%.同一位置处,相比试桩M2,试桩M1的 $\Delta\sigma/\sigma_x$ 较小,M2比M1大的幅度介于2.3%~11.9%,其原因是试桩M1是开口桩,在沉桩过程中挤土效应较弱,桩土界面土压力较小.另一方面, $\Delta\sigma/\sigma_x$ 沿桩身上小下大,从而说明了径向土压力的大小与土层的厚度有关.

4.3 试验结果与传统土压力

经试验测得的土压随深度的变化规律与传统的静止土压力变化规律相似,然而,沉桩过程是一个动态过程,不能直接用传统理论进行分析,将传统计算公式改为

$$\sigma_0 = \gamma h K'_0 \quad (2)$$

式中: σ_0 为土压力, kPa; γ 为土的重度, kN/m^3 ; h 为深度; K'_0 为沉桩过程中的土压力系数。

对其进行定量分析, 沉桩完成后, 开口桩 $K'_0 = 1.27$, 闭口桩 $K'_0 = 1.35$ 。相比于闭口管桩的侧土压力系数, 开口桩的侧土压力系数较小, 由此说明开口管桩在沉桩过程中, 挤土效应较小。计算结果与试验结果的比例系数 (k) 随深度变化的趋势如图 7 所示。

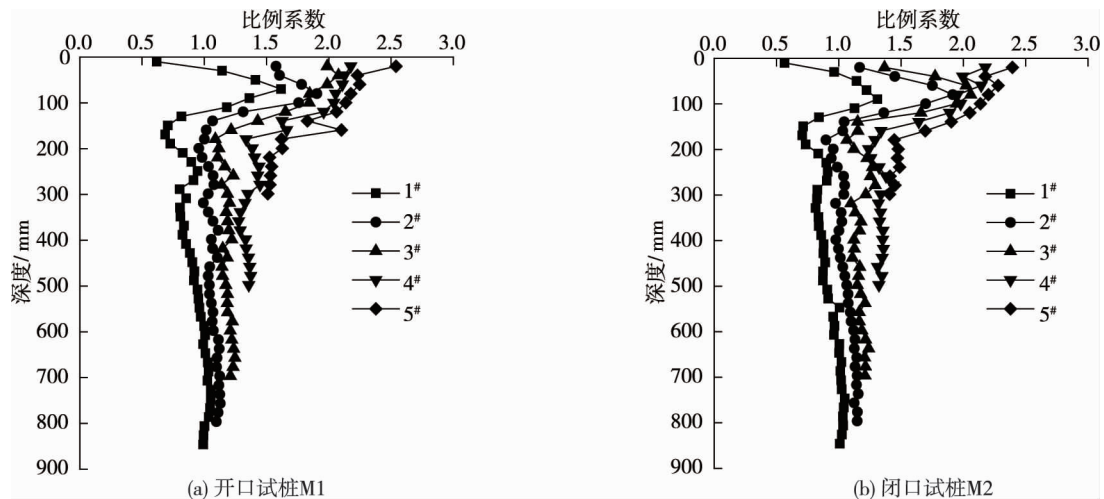


图 7 k 随深度变化的趋势

由图 7 可以看出, 当深度较小时, 由于桩身晃动严重, 土压力变化规律不明显, 计算结果与试验结果的比例系数 (k) 变化幅度较大。随着贯入深度逐渐增大, 桩端处的 k 逐渐趋向于 1, 而距离桩顶越近的传感器位置处的 k 值越大, 从而说明随着桩身逐渐贯入上部土层的土压力出现“退化”现象。这与上文分析结果一致。

5 结论

1) 试桩 M1 和 M2 的桩土界面土压力的变化规律均是随着沉桩深度的增加近似呈线性增长的趋势。同一深度处的径向土压力随着沉桩深度的增加均呈递减趋势, 称之为“侧压力退化”。

2) 由于桩侧土压力沿深度逐渐增大, $\Delta\sigma/\sigma_x$ 沿桩身向下逐渐增大, 增大的速率介于 0.35~2.4; 且由于开口管桩的挤土效应较弱, 闭口管桩大于开口管桩的 $\Delta\sigma/\sigma_x$, 增大的幅度介于 2.3%~11.9%。

3) 本文研究的土压力与传统的静止土压力的变化规律相似, 但当开闭口的侧土压力系数分别为 1.27, 1.35, 试验测得的桩端处土压力与传统土压力计算值比较接近, 其比值近似为 1。

参考文献:

- [1] Pestana J M, Hunt C E, Bray J D. Soil deformation and excess pore pressure field around a closed-ended pile[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(1): 1-9.
- [2] 张明义. 静力压入桩的研究与应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004.
- [3] Murthy D S, Robinson R G, Rajagopal K. Formation of soil plug in open-ended pipe piles in sandy soils[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2018: 1-11.
- [4] 王永洪, 张明义, 刘俊伟, 等. 黏性土中单桩贯入桩-土界面超孔压和土压测试现场试验[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(1): 1-8.
- [5] 唐世栋, 何连生, 叶真华. 软土地基中桩基施工引起的侧向土压力增量[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 752-755.
- [6] 唐世栋. 桩基施工时侧向土压力增量的估算方法[J]. 工程勘察, 2006(12): 24-35.
- [7] 张忠苗, 谢志专, 刘俊伟, 等. 淤质与粉质互层土中管桩沉桩过程的土压力[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45

- (8): 1430-1434.
- [8] Hwang J H, Liang N, Chen C S. Ground response during pile driving[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(11): 939-949.
- [9] 贾志刚, 张瑞敏, 李科, 等. PHC管桩挤土效应环境监测与分析[J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(1): 92-96.
- [10] 雷练武, 吴爱梅, 吴瑾. 应力释放孔减小预制桩挤土效应的应用研究[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(3): 277-281.
- [11] 张亚国, 李镜培. 静压沉桩引起的土体应力与孔压分布特征[J]. *上海交通大学学报*, 2018, 52(12): 1587-1593.
- [12] 李镜培, 操小兵, 李林, 等. 静压沉桩与CPTU贯入离心模型试验及机理研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(12): 1-8.
- [13] Azzouz A S, Morrison M J. Field measurements on model pile in two clay deposits[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, 114(1): 104-121.
- [14] Lehane B M, Gavin K G. Base resistance of jacked pipe piles in sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(6): 473-480.
- [15] White D J, Bolton M D. Soil deformation around a displacement pile in sand[J]. *Physical modelling in geotechnics: ICPMG*, 2002, 2: 649-654.
- [16] 中华人民共和国行业标准编写组. 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [17] 俞剑, 黄茂松, 张陈蓉. 黏土中两种不同直径单桩水平循环加载模型试验与分析[J]. *岩土力学*, 2016, 37(4): 973-980.
- [18] 中华人民共和国行业标准编写组. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [19] Ovesen N K. The scaling law relationship—panel discussion [C]//Proc. 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1979, 4: 319-323.
- [20] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. *岩土工程学报*, 1996, 18(3): 80-86.
- [21] 李雨浓, 刘清秉. 黏土中静压沉桩离心模型[J]. *工程科学学报*, 2018, 40(3): 285-292.