

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.075



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



均质黏性土中静压沉桩桩土界面孔压增量及有效土压室内试验研究

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

(1. 青岛理工大学 a. 土木工程学院; b. 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; 2. 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; 3. 同济大学 土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 研究饱和黏性土中静压沉桩引起的桩土界面孔压增量及有效径向应力的变化规律对工程实践具有重要意义。利用自制的大比例模型试验系统, 通过双壁开口和闭口管桩, 实现了开口和闭口桩桩身表面嵌入式安装微型测试元件, 得到了考虑孔压增量的桩土界面有效径向应力的变化规律。研究表明: 入土深度越大, 桩土界面孔压增量及有效径向应力越大, 闭口桩桩土界面超孔压大于开口桩; 桩身上部桩土界面超孔压和有效径向应力小于桩身下部; 同一入土深度, 随着桩身 h/L 的增加, 桩土界面土压力存在侧压力“退化”的现象; 特定试验条件下, 闭口和开口桩桩土界面超孔压与上覆有效土体自重比值最大值分别是 61.2% 和 52.1%, 桩土界面有效径向应力是超孔压的 3.76~5.46 倍。桩土界面超孔压和有效径向应力与桩身 h/L 位置有关。

关键词: 静压沉桩; 开口管桩; 闭口管桩; 有效土压力; 桩土界面; 室内试验

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)06-0100-07

Experimental investigation on jacked pile-sinking induced pore pressure and effective radial stress at pile-clayey soil interface

WANG Yonghong^{1a,1b}, XU Zeqiang^{1a}, ZHANG Mingyi^{1a,1b}, ZHANG Teng^{1a},
YIN Jichao^{1a}, WU Jiangbin², WEI Jiabin³

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Collaborative Innovation Center for Engineering Construction and Safety of Blue Economic Zone, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, P. R. China; 2. Shanghai Underground Space Engineering Design & Research Institute, East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, P. R. China; 3. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: It's of great significance for engineering practice to study the variation of pore water pressure increment and effective radial stress at the pile-soil interface caused by jacked pile-sinking in saturated clayey soil. Embedded installation of micro test elements on the surface of the open and closed piles was realized. Then the effective radial stress of the pile-soil interface considering the increase of pore pressure was successfully

收稿日期: 2022-04-06

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFE0113400)

作者简介: 王永洪(1984-), 男, 博士, 主要从事土力学与桩基础工程、岩土工程测试研究, E-mail: hong7986@163.com.

Received: 2022-04-06

Foundation item: National Key Research and Development Plan (No. 2021YFE0113400)

Author brief: WANG Yonghong (1984-), PhD, main research interests: soil mechanics and pile foundation engineering, geotechnical engineering testing, E-mail: hong7986@163.com.

obtained by using large-scale model test system and double-walled open and closed model pipe pile. The results show that the excess pore water pressure and effective radial stress of pile-soil interface increase with the embedded depth. The excess pore water pressure at the pile-soil interface of closed pile is greater than open pile. The excess pore water pressure and effective radial stress of upper part of pile is less than lower part of pile. At the same depth of penetration, with the increase of h/L of the pile body, there is a phenomenon of lateral pressure “degradation” in the soil pressure of the pile-soil interface. Under specific test conditions, the maximal ratio of excess pore water pressure of pile-soil interface and effective pressure of superimposed soil of open and closed pile are 61.2% and 52.1%. The effective radial stress of the pile-soil interface is 3.76-5.46 times of excess pore water pressure. Therefore, the change of excess pore water pressure and effective earth pressure of pile-soil interface are related to variation of pile locations of h/L at different penetration depths.

Keywords: jacked pile-sinking; open-end pile; close-end pile; effective earth pressure; pile-soil interface; indoor test

在饱和黏性土地基中,对静压桩沉桩效应及长期承载力的发挥产生影响的重要因素是桩土界面超孔隙水压力和土压力^[1-3]。学者们采用理论方法研究静压管桩贯入过程土压力变化^[4-6]。理论研究方法包括:圆孔扩张理论^[7-9]、应变路径法^[10-11]和有限单元法^[12-13]。然而,理论公式和数值模拟难以完全模拟现场的沉桩过程和真实反映桩周超孔隙水压力和土压力的分布。

许多学者通过试验研究了桩周孔压增量和径向应力的变化规律。Hwang等^[14]、Pestana等^[15]和Yang等^[16]实测了超孔隙水压力,发现距桩轴距离大于15倍桩径的超孔隙水压力很小,随着长径比增加,桩身径向应力衰减效应越明显,沉桩深度达到孔压计和土压力计埋置深度时超孔隙水压力和土压力达到最大值。唐世栋等^[17]、张宇超等^[18]、周火焜等^[19]、胡向前等^[20]、张忠苗等^[21]、李国维等^[22]通过现场试验研究了桩周孔压增量、径向应力及位移变化。静压桩贯入过程中超孔隙水压力和土压力在桩周土体和桩土界面有较大差别。Bond等^[23-24]测试了沉桩过程的桩土界面孔压增量和径向应力变化。王永洪等^[25-26]通过室内模型试验对黏性土中沉桩过程桩土界面超孔隙水压力和土压力进行研究。为了深入研究黏性土中桩土界面受力特性,笔者开展均质黏性土中静压沉桩室内模型试验,在模型管桩桩身表面嵌入式安装微型测试元件,获得了开口和闭口管桩沉桩过程桩土界面孔压增量和径向应力变化规律。

1 试验方案

1.1 试验仪器

为便于观察沉桩过程,试验模型箱的正面安装尺寸为500 mm×500 mm的钢化玻璃窗。加载系统主要由反力架和横梁、液压千斤顶、电控系统、静载

控制系统等组成,以实现试验模型桩的静力沉桩过程^[27]。大比例模型试验装置如图1所示。

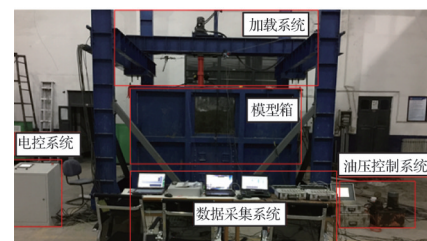


图1 大比例模型试验装置

Fig. 1 Large proportion model test device

1.2 试验制备

进行压桩试验前,对模型箱中的土体进行采样,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[28]进行室内土工试验,测定其相关的土样参数,测试结果:相对密度2.73,密度18.2 g/cm³,含水率34.8%,黏聚力14.4 kPa,内摩擦角8.6°。

1.3 模型桩及传感器安装

室内模型试验共有2根试桩TP1(闭口)、TP2(开口),试桩TP1桩端安装与桩身等直径的底板。模型管桩采用铝制材料,弹性模量为72 GPa、泊松比为0.3。试桩TP1和TP2桩长均为1 000 mm,内、外径分别为100、140 mm。双壁模型管桩的结构示意图如图2所示。在模型桩桩身表面 $h/L=1/20、1/10、1/5、2/5、3/5、9/10$ (h 为传感器距桩端高度, L 为模型桩桩长)位置处安装传感器,传感器布设如图3所示。

1.4 试验方案

为了充分利用模型箱空间,沉桩桩位布置见图4。试验分别对1根闭口桩TP1和1根开口桩TP2进行沉桩试验,沉桩深度为900 mm,沉桩速度为300 mm/min。静压沉桩过程为:先将液压千斤顶定位到沉桩位置;再将试验桩放至桩位,并检查试验

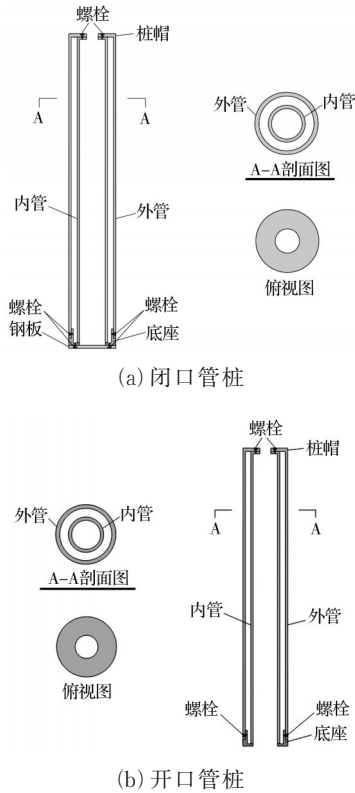


图 2 双壁模型管桩结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of double-wall model pipe pile structure

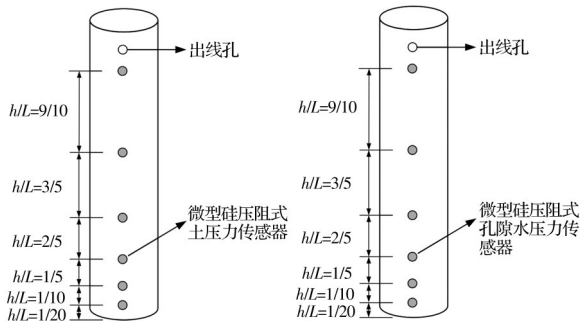
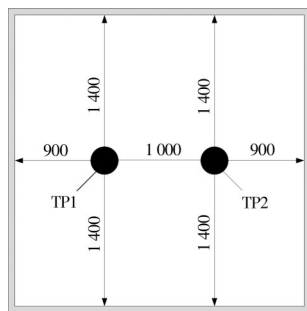


图 3 传感器布设

Fig. 3 Sensor placement

桩是否垂直;待将传感器的传输线连接到对应采集仪上,进行试验前调试并开始采集数据;最后通过油泵加压使液压千斤顶缓慢、匀速下降进行沉桩。



单位: mm

图 4 桩位布置

Fig. 4 Layout of pile position

2 试验结果分析

2.1 沉桩过程的压桩力

从图 5 可以看出,2 根模型桩压桩力随沉桩深度的变化规律相似。在沉桩初期 0~20 cm 深度范围,桩端破土贯入,破坏土体原有的结构,压桩力迅速增大,呈现出近似线性增长的现象。由于桩端形式的不同,开口桩 TP2 压桩力小于闭口试桩 TP1。分析原因为开口管桩 TP2 在沉桩过程中会逐渐形成土塞,导致桩端封闭效果不如闭口管桩,开口管桩的压桩力小于闭口管桩。随着沉桩深度的增加,压桩力增长速率降低。当沉桩结束时,试桩 TP1 和 TP2 压桩力分别为 2.938、2.538 kN,这是因为开口管桩在沉桩过程中会形成土塞,沉桩阻力相对闭口管桩较小,从而压桩力较小。

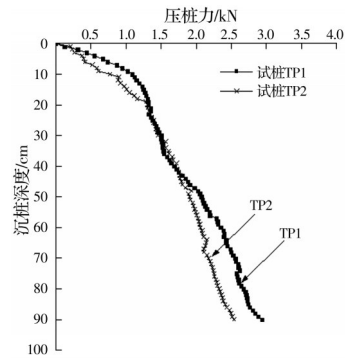


图 5 压桩力

Fig. 5 Pile driving pressure

2.2 桩土界面超孔隙水压力结果分析

沉桩过程中试桩 TP1 和 TP2 孔隙水压力传感器量测的孔隙水压力总量与入土深度的关系如图 6 所示。由图 6 可知:与试验土样的静止水压力相比,不同 h/L 位置处 1#~5# 传感器测得的桩土界面孔隙水压力总量较大,桩土界面孔隙水压力随着入土深度的增加近似呈线性增加,这与王育兴等^[29]研究结论一致。分析原因为:试验所用土样为均质土,试桩入土深度较小时,桩周上覆土重较小,水平侧压力小,孔隙水的消散较快,桩土界面孔隙水压力较小;随着入土深度的增加,桩周上覆土重逐渐增大,水平侧压力也随之增大,因此桩土界面孔隙水压力近似呈线性增加。

从图 6 还可以看出,沉桩结束时闭口试桩 TP1 桩身 $h/L=1/20、1/10、1/5、2/5、3/5$ 位置处的传感器测得的桩土界面孔隙水压力分别为 12.71、11.2、9.35、6.66、3.8 kPa,开口试桩 TP2 对应的桩土界面孔隙水压力分别为 12.08、10.68、9.24、6.56、3.87 kPa,

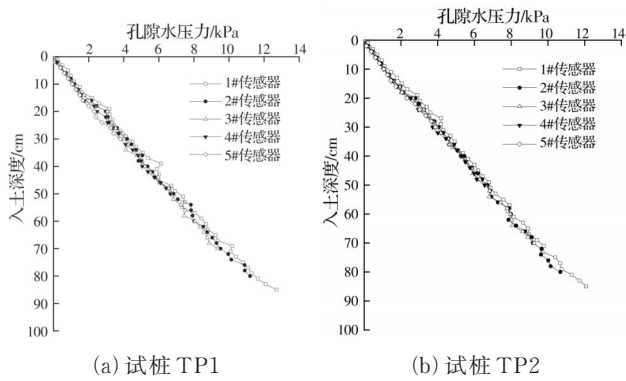


图6 试桩TP1和TP2沉桩过程中孔隙水压力分布图

Fig. 6 Pore water pressure distribution diagram of test pile TP1 and TP2 during sinking process

除 $h/L=3/5$ 位置处,同一 h/L 位置处闭口试桩 TP1 大于开口试桩 TP2 的桩土界面孔隙水压力^[19]。原因为闭口管桩对桩周土体挤压作用比开口管桩较大,桩周土体径向变形较大,致使闭口管桩 TP1 桩土界面孔隙水压力较大。在同一土层深度处,试桩 TP1 和 TP2 桩身 1#~5# 孔隙水压力传感器测得的桩土界面孔隙水压力较接近。以入土深度 30 cm 为例,试桩 TP1 沉桩过程中 1#~5# 传感器测得的桩土界面孔隙水压力分别为 4.12、4.19、4.01、3.8、3.8 kPa,最大相差仅 0.39 kPa,试桩 TP2 沉桩过程中 1#~5# 传感器测得的桩土界面孔隙水压力分别为 4.17、4.06、3.96、3.73、3.87 kPa,最大相差仅 0.3 kPa。

表1、表2分别为沉桩结束时,试桩 TP1 和 TP2 不同 h/L 位置处传感器测得的超孔隙水压力与其上覆有效土重比值表。由表1和表2可知,试桩 TP1 和 TP2 桩土界面超孔隙水压力与其上覆有效土重比值随入土深度增大而逐渐增大,试验结果与胡向前等^[20]研究结果相符。这是因为 h/L 较小位置处理深较大,上覆土重较大,桩土界面紧密程度增加,沉桩产生的孔隙水压力消散缓慢,导致超孔隙水压力逐渐增大。其中,闭口试桩 TP1 和开口试桩 TP2 在

表1 试桩 TP1 桩土界面超孔隙水压力与其上覆有效土重比值表

Table 1 Table of ratio of excess pore water pressure of pile-soil interface and overlying effective soil weight of test pile TP1

传感器位置 h/L	超孔隙水压力/ kPa	上覆有效土重/ kPa	比值/%
1/20	4.21	6.88	61.2
1/10	3.2	5.76	55.6
1/5	2.35	4.64	50.6
2/5	1.66	3.52	47.2
3/5	0.79	2.4	32.9

$h/L=1/20$ 时桩土界面超孔隙水压力与其上覆有效土重比值最大值分别为 61.2%、52.1%,两试桩相差 9.1%;在 $h/L=1/10$ 、 $1/5$ 、 $2/5$ 位置处桩土界面超孔隙水压力与其上覆有效土重比值比较接近,均在 44.3%~55.6% 范围内,但闭口试桩始终大于开口桩。由于表层土体隆起, $h/L=3/5$ 位置处孔压消散快,闭口试桩 TP1 和开口试桩 TP2 桩土界面超孔隙水压力与其上覆有效土重比值仅为 32.9%、36.3%。

表2 试桩 TP2 桩土界面超孔隙水压力与其上覆有效土重比值表

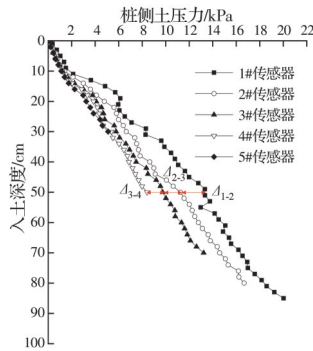
Table 2 Table of ratio of excess pore water pressure pile-soil interface and overlying effective soil weight of test pile TP2

传感器位置 h/L	超孔隙水 压力/kPa	上覆有效 土重/kPa	比值/ %
1/20	3.58	6.88	52.1
1/10	2.68	5.76	46.5
1/5	2.24	4.64	48.3
2/5	1.56	3.52	44.3
3/5	0.87	2.4	36.3

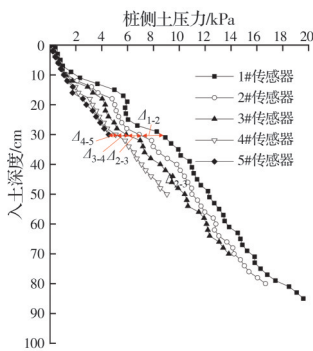
2.3 桩土界面径向土压力结果分析

图7为沉桩过程中试桩 TP1 和 TP2 桩身 1#~5# 土压力传感器量测的桩侧土压力。由图7可知:沉桩过程中桩侧土压力逐渐增大,与 Lenane^[30] 和李雨浓等^[31] 试验结果一致。当模型桩的贯入深度小于 10 cm 时,桩侧径向土压力较小,且其增长速度较低,主要是因为模型桩下沉对浅层土体造成的长时间的重复剪切作用,致使土体与管桩之间的黏结力降低,接触紧密程度降低,从而导致侧压力较小;当模型桩贯入深度超过 10 cm 时,径向土压力近似线性增长且增长速率较高。沉桩结束时闭口试桩 TP1 测得的桩土界面径向土压力分别为 20.03、16.68、13.23、8.42、5.1 kPa,开口试桩 TP2 对应的桩土界面径向土压力分别为 19.59、16.67、13.83、9.05、4.54 kPa。由试验结果可知:闭口桩和开口桩桩土界面径向土压力相差不大,闭口和开口桩均是距离桩端越远桩土界面径向土压力增幅越小,分析原因是桩土界面径向土压力受上覆土重的影响,距桩端越远上覆土重越小,挤土效应越弱导致径向土压力增幅越小。

为了解释桩侧土压力“退化”现象,将相邻传感器侧压力退化值用“ Δ ”符号在图7中进行标注。当入土深度在 50 cm 左右,闭口试桩 TP1 相邻传感器侧压力退化值分别为 $\Delta_{1-2}=2.08$ kPa, $\Delta_{2-3}=1.51$ kPa, $\Delta_{3-4}=1.36$ kPa。以开口试桩 TP2 入土深度为



(a) 试桩 TP1



(b) 试桩 TP2

图 7 试桩 TP1 和 TP2 沉桩过程中桩侧土压力分布

Fig. 7 Distribution of lateral earth pressure of test pile TP1 and TP2 during sinking process

30 cm 为例,相邻传感器侧压力退化值分别为 $\Delta_{1,2}=1.36$ kPa、 $\Delta_{2,3}=1.0$ kPa、 $\Delta_{3,4}=0.92$ kPa、 $\Delta_{4,5}=0.54$ kPa。由以上数据可以看出,在同一入土深度处,从桩端到桩顶桩侧土压力退化值逐渐减小。随着沉桩深度的增加,同一深度处的径向土压力呈递减趋势,出现土压力“退化”现象。分析原因为随着 h/L 增加,桩周土被不断剪切,桩土之间产生泥浆水膜,桩土接触紧密程度降低,使得桩土界面土压力释放。

2.4 桩土界面径向有效土压力结果分析

图 8 为闭口桩 TP1 和开口桩 TP2 桩土界面有效土压力与孔压增量的比较。从图 8 中可以看出,2 个试桩得到的有效土压力和桩土界面孔压增量相近,同一 h/L 位置处桩土界面孔压增量小于桩土界面有效土压力,随着 h/L 增大,桩土界面有效土压力递减速率大于桩土界面超孔隙水压力。将桩土界面有效土压力与桩土界面超孔隙水压力作比较, $h/L=9/10$ 位置处闭口桩 TP1 和开口桩 TP2 桩土界面有效土压力与孔压增量比值分别为 5.46、4.22,不同 h/L 位置处闭口桩 TP1 比值分别为 3.76、4.2、4.63、4.07,不同 h/L 位置处开口桩 TP2 比值分别为 4.47、5.22、5.17、4.8。

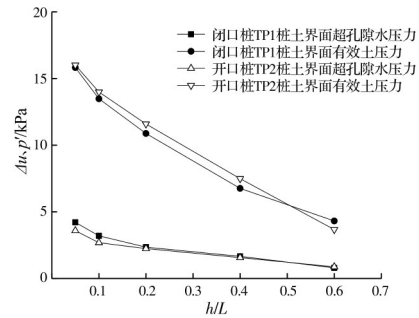


图 8 桩土界面有效土压力与超孔隙水压力的比较

Fig. 8 Comparison between effective soil pressure of pile-soil interface and excess pore water pressure

3 结论

通过开展均质黏性土体中静压沉桩室内试验,研究了沉桩过程中桩土界面超孔隙水压力和有效土压力的变化规律,得到以下结论:

1) 桩土界面孔隙水压力和孔压增量与入土深度成正比关系,在同一桩身位置处闭口试桩桩土界面孔隙水压力大于开口试桩,桩土界面孔隙水压力增量幅值均随着 h/L 增大而减小。

2) 桩土界面径向土压力在不同 h/L 位置处随着入土深度的增加呈线性增长趋势,桩土界面径向土压力受桩端形式影响不大,闭口和开口桩桩土界面径向土压力随着 h/L 增大而减小。

3) 闭口和开口桩桩土界面径向有效土压力均为桩土界面土压力的主要组成部分。随着 h/L 增大,桩土界面有效土压力递减速率大于孔压增量。

由于研究仅限于给定的均质黏性土、桩端形式不同的模型桩和 h/L 位置,其他不同土层、模型桩和 h/L 位置条件下的桩土界面土压力、超孔隙水压力及有效土压力的变化规律还有待进一步深入研究。

参考文献

- [1] CARTER J P, RANDOLPH M F, WROTH C P. Stress and pore pressure changes in clay during and after the expansion of a cylindrical cavity [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1979, 3(4): 305-322.
- [2] SHEN S L, HAN J, ZHU H H, et al. Evaluation of a dike damaged by pile driving in soft clay [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2005, 19(4): 300-307.
- [3] 龚晓南, 李向红. 静力压桩挤土效应中的若干力学问题 [J]. 工程力学, 2000, 17(4): 7-12.
GONG X N, LI X H. Several mechanical problems in compacting effects of static piling in soft clay ground [J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(4): 7-12. (in Chinese)
- [4] 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.
ZHANG Y G, LI J P. Distribution characteristics of stress and pore pressure induced by pile jacking [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2018, 52(12): 1587-1593. (in Chinese)
- [5] TEHRANI F S, HAN F, SALGADO R, et al. Effect of surface roughness on the shaft resistance of non-displacement piles embedded in sand [J]. Géotechnique, 2016, 66(5): 386-400.
- [6] 高子坤, 施建勇. 岩土抗拉模量值修正与桩土作用理论解答研究[J]. 力学学报, 2013, 45(5): 739-745.
GAO Z K, SHI J Y. Research of constitutive relation correction of geotechnical materials and theoretical solution due to pile-soil interaction [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(5): 739-745. (in Chinese)
- [7] CAO L F, TEH C I, CHANG M F. Undrained cavity expansion in modified Cam clay I: Theoretical analysis [J]. Géotechnique, 2001, 51(4): 323-334.
- [8] 张鹏远, 白冰, 蒋思晨, 等. 饱和黏土中球(柱)孔瞬时扩张及超孔隙水压力研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(1): 115-125.
ZHANG P Y, BAI B, JIANG S C, et al. The study of expansion of spherical cavity and excess pore water pressure about the spherical(cylindrical) cavity in saturated clay [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(1): 115-125. (in Chinese)
- [9] 李镜培, 方睿, 李林. 考虑土体三维强度特性的静压桩周超孔压解析及演变[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 847-855.
LI J P, FANG R, LI L. Variation of excess pore pressure around jacked piles considering the three-dimensional strength of soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 847-855. (in Chinese)
- [10] BALIGH M M. Strain path method [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(9): 1108-1136.
- [11] WHITTLE A J, SUTABUTR T. Prediction of pile setup in clay [J]. Transportation Research Record, 1999, 1663(1): 33-40.
- [12] CHOPRA M B, DARGUSH G F. Finite-element analysis of time-dependent large-deformation problems [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1992, 16(2): 101-130.
- [13] 鹿群, 龚晓南, 崔武文, 等. 饱和成层地基中静压单桩挤土效应的有限元模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3017-3020.
LU Q, GONG X N, CUI W W, et al. Squeezing effects of jacked pile in layered soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3017-3020. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] 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): 1-12.
- [16] YANG J, THAM L G, LEE P K, et al. Observed performance of long steel H-piles jacked into sandy soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(1): 24-35.
- [17] 唐世栋, 何连生, 傅纵. 软土地基中单桩施工引起的超孔隙水压力[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 725-729, 732.
TANG S D, HE L S, FU Z. Excess pore water pressure caused by an installing pile in soft foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 725-729, 732. (in Chinese)
- [18] 张宇超, 陆焯. 基于模型试验的桩周土压力[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2018, 24(2): 296-303.
ZHANG Y C, LU Y. Soil pressure induced by pile driving based on model test [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2018, 24(2): 296-303. (in Chinese)
- [19] 周火焱, 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 H Y, SHI J Y. 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. (in Chinese)
- [20] 胡向前, 焦志斌, 李运辉. 打设排水板后饱和软黏土中打桩引起的孔隙水压力分布及消散规律[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3733-3737.
HU X Q, JIAO Z B, LI Y H. Distribution and dissipation laws of excess static pore water pressures induced by pile driving in saturated soft clay with driven plastic drainage plates [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3733-3737. (in Chinese)
- [21] 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, 1440.
ZHANG Z M, XIE Z Z, LIU J W, et al. The earth pressure during pile driving in silty soil with mucky soil interbed [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(8): 1430-1434, 1440. (in Chinese)
- [22] 李国维, 边圣川, 陆晓岑, 等. 软基路堤拓宽静压PHC管桩挤土效应现场试验[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1089-1096.
LI G W, BIAN S C, LU X C, et al. Field test on extruding soil caused of PHC pipe pile driving by static pressure for improving soft foundation of widened embankment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1089-1096. (in Chinese)

- [23] BOND A, JARDINE R. Shaft capacity of displacement piles in a high OCR clay [J]. *Géotechnique*, 1995, 45: 3-23.
- [24] BOND A J, JARDINE R J. Effects of installing displacement piles in a high OCR clay [J]. *Géotechnique*, 1991, 41(3): 341-363.
- [25] 王永洪, 张明义, 刘雪颖, 等. 基于桩土界面的静压桩沉桩效应与承载特性室内试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(10): 157-165.
WANG Y H, ZHANG M Y, LIU X Y, et al. Laboratory experimental study on pile jacking-in effects and capacity characteristics based on pile-soil interface [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(10): 157-165. (in Chinese)
- [26] 王永洪, 张明义, 刘雪颖, 等. 基于桩土界面应力测试的开闭口桩静力沉桩室内试验对比研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(2): 599-606.
WANG Y H, ZHANG M Y, LIU X Y, et al. Laboratory test comparative study on open-close piles during jacked pile-jacking based on pile-soil interface stress measurement [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(2): 599-606. (in Chinese)
- [27] 王永洪, 张明义, 孙绍霞, 等. 不同直径单桩静压贯入力学特性模型试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(1): 9-17.
WANG Y H, ZHANG M Y, SUN S X, et al. Model test study on single piles with different diameters subjected to penetration mechanical characteristics of jacked pile [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(1): 9-17. (in Chinese)
- [28] 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
Standard for soil test method: GB/T 50123—1999 [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)
- [29] 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 Y X, SUN J. 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. (in Chinese)
- [30] LENANE B M. Experimental investigations of pile behaviour using instrumental field piles [D]. London: University of London, 1992.
- [31] 李雨浓, LEHANE B M, 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.
LI Y N, LEHANE B M, LIU Q B. Centrifuge modeling of jacked pile in clay [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2018, 40(3): 285-292. (in Chinese)

(编辑 胡玲)