

# 静压桩贯入及加载过程桩土界面受力特性研究

王永洪<sup>1,2</sup>, 桑松魁<sup>1</sup>, 张明义<sup>1,2</sup>, 白晓宇<sup>1,2</sup>, 杨苏春<sup>1</sup>, 苗德滋<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学土木工程学院 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 青岛, 266033)

**摘要** 通过在桩身表面安装微型硅压阻式压力传感器测得桩土界面孔压增量和径向应力, 研究静压桩桩土界面的受力特性。针对双壁开口和闭口模型管桩, 采用桩身开孔嵌入套筒式安装方法, 通过全方面监测静压沉桩、超孔压消散及加载阶段受力特性, 进行了开口和闭口静压桩贯入及加载全过程的受力特性室内模型对比试验。试验结果表明: 同一入土深度处, 开口和闭口静压桩桩土界面总径向应力均随着  $h/L$  ( $h$  为传感器距离桩端的高度;  $L$  为桩长) 的增加而减小; 不同桩端形式下超孔压消散期在不同  $h/L$  位置处沉桩阶段与沉桩结束后的有效径向应力之比均在  $0.6 \pm 0.1$ ; 桩土界面总径向应力的变化值在桩端位移达到  $1.0 \text{ mm}$  左右时发生突变, 加载结束后, 同一深度处桩土界面总径向应力变化值随着  $h/L$  的增加而减小。该研究结果对于静压桩施工和设计具有工程参考价值。

**关键词** 开闭口静压桩; 贯入及加载; 桩土界面; 受力特性; 模型试验

**中图分类号** TH823; TH473

## 引言

国内外学者对于静压桩施工引起的孔压增量<sup>[1-3]</sup>和径向应力<sup>[4-5]</sup>开展了深入的理论研究。由于实际工程状况复杂, 理论公式和数值模拟无法真实反映桩土界面孔压增量和径向应力的分布。因此静压桩沉桩过程的受力特性试验研究更具有工程指导意义。传统测试方法是在桩周受影响的土层中埋置孔隙水压力计和土压力计。学者们分析了在沉桩过程中不同距离和深度处桩周超孔隙水压力和土压力的变化规律<sup>[6-11]</sup>, 发现静压桩贯入引起的桩土界面处与桩周土体的孔压增量和径向应力有所不同<sup>[12]</sup>, 并对桩土界面孔压增量和径向应力进行了测试。Bond 等<sup>[13-14]</sup>通过室内模型试验研究了沉桩及静载全过程的桩土界面受力特性。叶真华等<sup>[15]</sup>进行了桩侧土压力增量测试的室内模型试验, 分析了侧摩阻“折减”与侧压力的关系。李雨浓等<sup>[16]</sup>通过离心模型试验研究了静压桩贯入、静置稳定和加载阶段不同深度径向应力的表现特征。Lehane<sup>[17]</sup>通过现场试验, 得到了不同桩身位置  $h/B$  ( $h$  为传感器距离桩端的高度;  $B$  为桩身直径) 处桩土界面径向应力的变化规律。王永洪等<sup>[18]</sup>现场测得了静压预应力高强混凝土 (pre-stressed high-strength concrete, 简称

PHC) 管桩沉桩过程桩土界面超孔压和土压力, 并分析了桩土界面有效土压力随  $h/L$  ( $h$  为传感器距离桩端的高度;  $L$  为桩长) 的变化规律。可以看出, 目前针对静压桩桩土界面受力特性的多数试验研究没有考虑开口对静压桩桩土界面孔压增量和径向应力的影响, 且多数研究仅考虑沉桩过程。

笔者在考虑桩端形式为开闭口静压桩、超孔压消散及加载阶段的基础上, 基于微型硅压阻式压力传感器测试系统 (micro-electro-mechanism system, 简称 MEMS), 得到了静压桩全过程的桩土界面受力特性。笔者通过研制双壁开口模型管桩, 采用桩身表面开孔嵌入套筒式安装方式, 对开闭口静压桩的桩土界面孔压增量和径向应力进行了研究, 具有一定的工程实际意义。

## 1 硅压阻式压力传感器工作原理

### 1.1 硅压阻式压力传感器基本原理

硅压阻式压力传感器是利用多晶硅材料灵敏度系数高的压阻效应, 将硅压力膜片制作成带有 4 个绝缘层二氧化硅压敏电阻的敏感元件, 通过惠斯通电桥使硅膜片 4 个压敏电阻输出不同电压, 根据电

压值确定硅膜片的应变值,从而得到传感器的灵敏度系数。硅压阻式压力传感器结构如图 1 所示。惠斯通电桥电路<sup>[19]</sup>如图 2 所示。

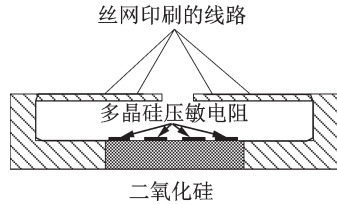


图 1 硅压阻式压力传感器结构

Fig.1 Structure diagram of silicon piezoresistive pressure sensors

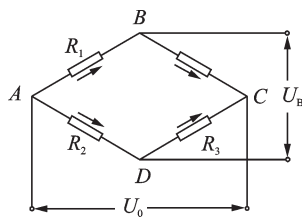


图 2 惠斯通电桥电路

Fig.2 Wheatstone bridge circuit

惠斯通电桥输出的电压为

$$U_0 = \frac{[(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 - \Delta R_2)(R_4 - \Delta R_4)]}{(R_1 + R_2 + \Delta R_1 - \Delta R_2)(R_3 + R_4 + \Delta R_3 - \Delta R_4)} U_B \quad (1)$$

其中:  $U_B$  为电源电压;  $U_0$  为输出电压;  $R_1 = R_3 = R_2 = R_4 = R$ ;  $\Delta R_i = RGF\epsilon_i, i = 1, 2, 3, 4$ ;  $\epsilon_i$  为第  $i$  个电阻的应变值, 于是有

$$U_0 = \frac{1}{4} GF \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3 - \epsilon_2 - \epsilon_4}{\left[1 + \frac{1}{2}(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4)\right]} U_B \quad (2)$$

传感器设计时使 4 个电阻应变值满足  $\epsilon_1 = \epsilon_3 = -\epsilon_2 = -\epsilon_4 = \epsilon$ , 则式(2)变为

$$U_0 = GF\epsilon U_B \quad (3)$$

其中:  $GF$  为应变系数,  $GF = 1 + 2\nu + \pi E$ 。

多晶硅材料的应变系数范围为 72.4~149.6, 而金属材料的应变系数范围为 1.5~2.0。可见, 多晶硅材料比金属材料具有更高的灵敏度系数。

### 1.2 土压力及孔隙水压力传感器

硅压阻式压力传感器是以多晶硅作为压敏电阻, 采用 MEMS 微型化制作工艺集成。土压力传感器利用丝网印刷线路将集成硅膜片上的 4 个电阻进行连接, 外部封装采用金属外壳。孔隙水压力传感器与土压力传感器不同的是在其端部放置透水石,

孔隙水由透水石进入, 并引起多晶硅压敏电阻受力变化, 出现方式均采用底部出线。硅压阻式压力传感器封装结构如图 3 所示。微型硅压阻式压力传感器照片如图 4 所示。

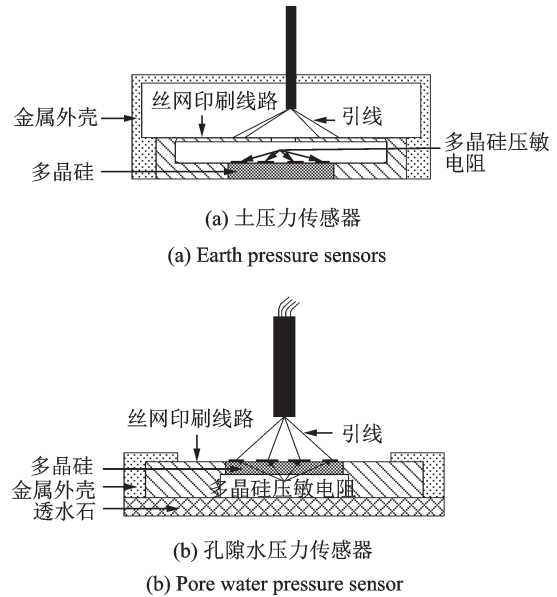
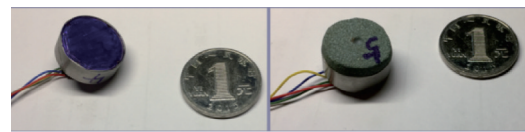


图 3 硅压阻式压力传感器封装结构

Fig.3 Encapsulation structure diagram of silicon piezoresistive pressure sensors



(a) 土压力传感器 (b) 孔隙水压力传感器  
(a) Earth pressure sensors (b) Pore water pressure sensor

图 4 微型硅压阻式压力传感器照片

Fig.4 Photos of micro silicon piezoresistive pressure sensors

## 2 模型设计

### 2.1 模型桩

笔者的模型试验采用的模型桩是直径为 140 mm, 长度为 1 000 mm 的铝制开闭口管桩, 模型管桩内、外管厚度均为 3 mm。图 5 为开闭口模型管桩结构示意图。可见, 模型桩为了满足微型传感器的安装空间, 避免进入管桩内部的土体损坏传感器, 内、外管之间的空隙为 20 mm, 开口管桩的桩端内管与底座间存在微小空隙。为防止沉桩过程进入黏性土体, 使用密封胶将其密封填充。在闭口管桩的桩端安装与桩身等直径的底板。硅压阻式传感器参数如表 1 所示。

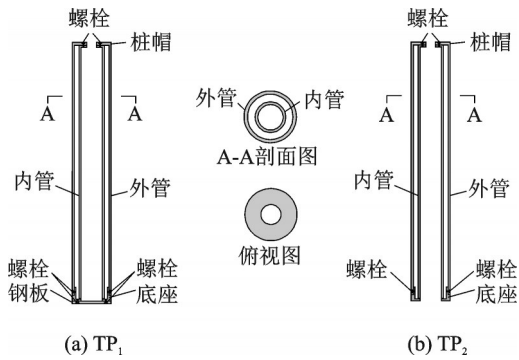


图 5 开闭口模型管桩结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of open-close model pile

表 1 硅压阻式传感器参数表

Tab.1 Silicon piezoresistive sensor parameter table				
传感器	尺寸 /mm	动态频响/kHz	精度 /%	工作电压/V
土压力	20×12	2 000	0.1	0~5
孔隙水压力	20×12	2 000	0.1	0~5

2.2 桩土界面受力测试技术

采用微型 MEMS 硅压阻式土压力传感器和孔隙水压力传感器测量桩身不同位置处的侧向压力和孔隙水压力。模型桩身传感器布置位置如图 6 所示。可见,传感器距离桩端距离分别为 50,100,200,400,600 和 900 mm,在桩身不同高度处对称安装 6 个土压力传感器和孔隙水压力传感器(1#~6#),分别测量桩身不同位置  $h/L=1/20,1/10,1/5,2/5,3/5,9/10$  ( $h$  为传感器距桩端的高度; $L$  为模型桩桩长)处的侧向压力和孔隙水压力。为了保证土压力和孔隙水压力测量结果的准确合理性,传感器受力面需

表 2 地基土物理力学参数

Tab.2 Physical and mechanical parameters of foundation soil								
相对密度 $d_s$	重度 $\gamma/(kN\cdot cm^{-3})$	含水率 $w/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	黏聚力 $c/kPa$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	压缩模量 $E_{s1-2}/MPa$
2.73	18.0	34.8	43.2	21.2	22.0	14.4	8.6	3.3

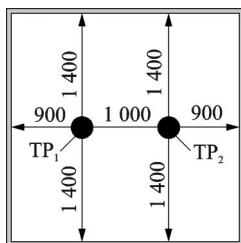


图 7 桩位布置示意图(单位: mm)

Fig.7 Layout of pile position(unit: mm)



(a) 土压力传感器 (b) 孔隙水压力传感器  
(a) Earth pressure sensors (b) Pore water pressure sensor

图 6 传感器布置位置(单位:mm)

Fig.6 Sensor placement(unit: mm)

与桩身表面完全齐平。压桩前 24 h 向孔隙水压力传感器透水石内注满水,以排除其内部的空气。

2.3 试验设计

本试验土样采用工程现场的粉质黏土层,土样介于流塑和软塑状态。将现场粉质黏土通过烘干、粉碎、过筛、洒水和静置,使土体固结,覆盖薄膜静置大约 30 d 以备试验。地基土物理力学参数如表 2 所示。本次沉桩试验过程中,加卸载次数为 1,模型桩沉桩深度为 900 mm,沉桩速度为 300 mm/min。为了充分利用本次试验条件,模型桩在模型箱中间压桩,桩位布置示意图如图 7 所示。2 个压桩位置相对较小距离为  $d_1=1\ 000\text{ mm}$ ,模型桩距箱壁最近处为  $d_2=900\text{ mm}$ ,  $d_1/D=7.2$ ,  $d_2/D=6.4$ , ( $D$  为模型桩桩径),均大于桩基模型试验中边界效应所要求的 2.82~3 倍的桩径<sup>[20-21]</sup>,即本次模型试验可以忽略边界效应。

本次试验在开口和闭口 2 种不同桩端形式下分别进行了模型桩试验,不同桩端形式下的压桩力曲线如图 8 所示。在沉桩试验结束后 30 d 进行加载试验,加载过程采用分级且逐级等量加载的方式,将每级加荷量定为 0.7 kN,首级加载量为 1.4 kN,每级荷载保持 1 h,当桩顶沉降量相对稳定时施加下一级荷载。

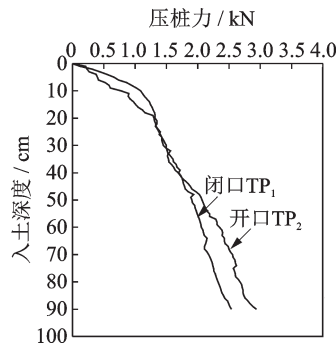


图 8 不同桩端形式下的压桩力曲线

Fig.8 Pile driving pressure in different pile forms

### 3 试验数据分析

#### 3.1 沉桩过程结果分析

根据试验结果可知,在静压沉桩过程中不同相对桩端距离( $h/L$ )位置处的土压力传感器测得的桩土界面总径向应力有所差异。图 9 为开口试桩 TP<sub>1</sub> 桩身 5 个不同位置处桩土界面总径向应力沿入土深

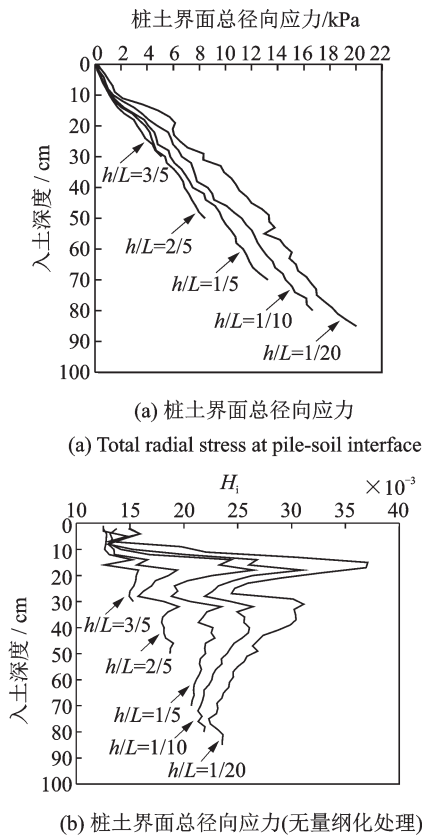


图 9 开口试桩 TP<sub>1</sub> 桩身 5 个不同位置处桩土界面总径向应力沿入土深度的分布曲线

Fig.9 The distribution curve of total radial stress of pile-soil interface at five different positions of open pile TP<sub>1</sub> along the depth of penetration

度的分布曲线。由图 9 可知:随着入土深度的增加,5 个不同  $h/L$  位置处传感器测得的桩土界面总径向应力近似呈线性增长趋势,但随着相对桩端距离( $h/L$ )的增大,桩土界面总径向应力增幅有所减小。不同  $h/L$  位置处的传感器在同一入土深度处,桩土界面总径向应力随着  $h/L$  的增加而越小。分析原因在于剪切作用使桩土界面土体发生径向收缩,桩周土体应力得到释放。将桩土界面总径向应力无量纲化处理,用  $H_i = (\sigma_r - u_0) / \sigma'_{v0}$  表示,其中:  $\sigma_r$ ,  $u_0$  和  $\sigma'_{v0}$  分别为传感器深度处的桩土界面总径向应力、超静孔隙水压力和上覆土体有效压力。分析可知,由于桩土界面处土体卸荷后发生回弹,因此在同一入土深度处,  $H_i$  随着  $h/L$  的增加而降低。

在闭口试桩试验中,不同位置处传感器测得的桩土界面总径向应力变化如图 10 所示。

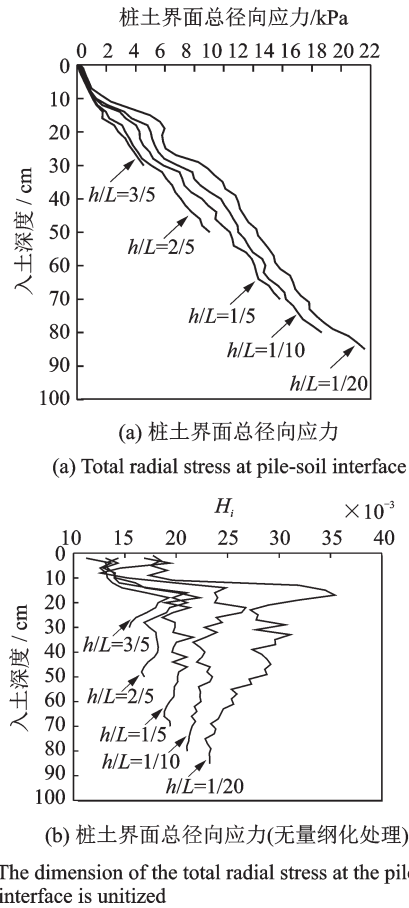


图 10 闭口试桩试验不同位置处传感器测得的桩土界面总径向应力变化

Fig.10 Variation of total radial stress at the pile-soil interface measured by sensors at different positions in the closed pile

#### 3.2 超孔隙压消散过程分析

沉桩结束后,超孔隙压消散期不同桩端形式桩土

界面总径向应力的分布曲线如图11所示。将超孔压消散期径向应力用  $H/H_i = (\sigma_r - u_0)/(\sigma_{ri} - u_0)$  表示,  $\sigma_{ri}$  为沉桩结束后的径向应力。可见,在沉桩结束后,  $H/H_i$  在超孔压消散期均减小, 大约为沉桩过程中的50%~60%。这说明随着孔压消散, 土的有效应力增加, 桩与土的接触力越来越大。笔者分析了在不同桩端形式下, 超孔压消散期在不同  $h/L$  位置处的传感器测得的  $H/H_i$  均为  $0.6 \pm 0.1$ 。

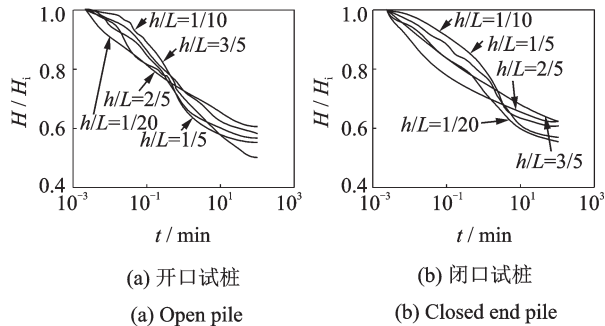


图11 沉桩结束后超孔压消散期不同桩端形式桩土界面总径向应力的分布曲线

Fig.11 The distribution curve of total radial stress at the pile-soil interface with different pile tip forms in the dissipation period of excess pore pressure after pile driving

### 3.3 静压桩加载试验

不同桩端形式下, 静压桩加载过程中桩土界面总径向应力的变化值与桩端位移的关系曲线如图12所示。可见, 桩土界面总径向应力的变化值  $\Delta\sigma_r$  在桩端位移达到1.0 mm(桩端最大位移的30%)左右时发生突变, 开口试桩和闭口试桩的突变最大值均发生在  $h/L=1/20$  位置处, 减小幅度分别为5.0 kPa和3.0 kPa, 开口试桩其他位置处减小幅度约为0.5~2.0 kPa, 闭口试桩其他位置处减小幅度约为0.2~1.5 kPa; 桩土界面总径向应力的变化值发生突

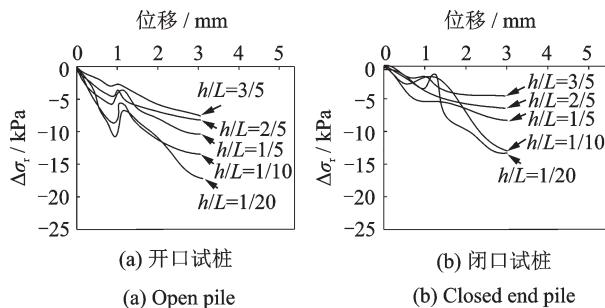


图12 静压桩加载过程中桩土界面总径向应力的变化值与桩端位移的关系曲线

Fig.12 The relationship between the variation value of the total radial stress at the pile-soil interface and the pile end displacement in the process of jacked pile loading

变, 原因是随着桩端位移的增大, 桩侧摩阻力逐渐增大, 当桩端位移达到1.0 mm(桩端最大位移的30%)左右时, 桩侧摩阻力也达到最大值, 且桩土界面径向应力越大, 突变值越大, 突变的位置发生在距离桩端较远处。突变结束后, 随着加载继续进行, 变化值  $\Delta\sigma_r$  逐渐减小, 且在不同位置处变化值  $\Delta\sigma_r$  减小速率均不同, 在加载结束后, 同一深度处变化值  $\Delta\sigma_r$  随着  $h/L$  的增加而减小。

## 4 结论

1) 静压沉桩过程中, 桩身不同位置处桩土界面总径向应力随着入土深度的增加, 近似呈线性增长的趋势; 在同一入土深度, 桩土界面总径向应力随着  $h/L$  的增加而变小。因此, 需要考虑桩的长度效应对桩土界面受力特性的影响。

2) 静压沉桩结束后, 在桩的超孔压消散期, 不同桩端形式下桩身不同位置处测得的  $H/H_i$  均减小, 为沉桩阶段的50%~60%。

3) 静压加载阶段, 当桩端位移达到桩端最大位移的30%左右时, 变化值  $\Delta\sigma_r$  发生突变, 且发现在  $h/L=1/20$  位置处, 开口试桩突变最大值为闭口试桩的1.7倍, 其他位置处减小幅度较接近。

4) 笔者室内模型试验由于采用的是低塑性黏土, 因此静压沉桩阶段、超孔压消散阶段和加载阶段, 桩身不同  $h/L$  位置处的桩土界面受力特性测试数值均小于现场试验值。

## 参 考 文 献

- [1] CAO L F, THE C I, CHANG M F. Undrained cavity expansion in modified cam clay i: theoretical analysis [J]. *Geotechnique*, 2001, 51(4): 323-334.
- [2] 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 Qun, GONG Xiaonan, CUI Wuwen, et al. Squeezing effects of jacked pile in layered soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(11): 3017-3020. (in Chinese)
- [3] 李镜培, 唐剑华, 李林, 等. 饱和黏土中柱孔三维弹塑性扩张机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(2): 378-386.  
LI Jingpei, TANG Jianhua, LI Lin, et al. Time-dependent bearing capacity of a jacked pile based on the effective stress method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(2): 378-386. (in Chinese)
- [4] VESIC A S. Expansion of cavities in infinite soil mass

- [J]. Journal of the Soil Mechanical and Foundation Division, 1972, 98(3): 265-290.
- [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): 1-15.
- [6] HWANG J H, LIANG N, CHEN C S. Ground response during pile driving [J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2001, 127(11): 939-949.
- [7] 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 Geo-environmental Engineering, 2002, 128(1): 1-12.
- [8] YANG J, THAM L G, LEE P K K, et al. Observed performance of long steel H-piles jacked into sandy soils [J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2006, 132(1): 24-35.
- [9] 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): 725-732. TANG Shidong, HE Liansheng, FU Zong. Excess pore water pressure caused by an installing pile in soft foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 725-732. (in Chinese)
- [10] 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. ZHANG Zhongmiao, XIE Zhizhuan, LIU Junwei, 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. (in Chinese)
- [11] 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 Guowei, BIAN Shengchuan, LU Xiaocen, et al. Field test on extruding soil caused of PHC pile driving by static pressure for improving soft foundation of widened embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1089-1096. (in Chinese)
- [12] 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 Xiaonan, LI Xianghong. Several mechanical problems in compacting effects of static piling in soft clay ground[J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(4): 7-12. (in Chinese)
- [13] BOND A J, JARDINE R J. Shaft capacity of displacement piles in a high OCR clay[J]. Géotechnique, 1991, 41(3): 341-363.
- [14] BOND A J, JARDINE R J. Effects of installing displacement piles in a high OCR clay [J]. Géotechnique, 1995, 45(1): 3-23.
- [15] 叶真华, 周健, 唐世栋. 粘土中不同桩端条件下桩承载性状的模型试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(6): 733-737. YE Zhenhua, ZHOU Jian, TANG Shidong. Model test on pile bearing behaviors in clay under different pile tip conditions [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(6): 733-737. (in Chinese)
- [16] 李雨浓, BARRY M L, 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 Yunong, BARRY M L, LIU Qingbing, et al. Centrifuge modeling of jacked pile in clay [J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(3): 285-292. (in Chinese)
- [17] LENANE B M. Experimental investigations of pile behaviour using instrumental field piles [D]. London: University of London (Imperial College), 1992.
- [18] 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(5): 951-958. WANG Yonghong, ZHANG Mingyi, LIU Junwei, et al. Field tests on excess pore pressure and soil pressure of pile-soil interface for a single pile during pile-sinking in clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 951-958. (in Chinese)
- [19] 陆学斌. 多晶硅纳米薄膜压阻特性及其压力传感器应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [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. XU Guangming, ZHANG Weimin. Study on particle size effect and boundary effect in centrifugal model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(3): 80-86. (in Chinese)
- [21] RAO S N, RAMAKRISHNA V G S T, RAJU G B. Behavior of pile supported dolphins in marine clay under lateral loading [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(8): 607-612.



**第一作者简介:**王永洪,男,1984年11月生,博士、讲师。主要研究方向为岩土工程测试方面的研究。曾发表《基于FBG传感技术的砂土中管桩土塞效应测试研究》(《振动、测试与诊断》2019年第39卷第1期)等论文。

E-mail: hong7986@163.com

**通信作者简介:**白晓宇,男,1984年10月生,博士、副教授。主要研究方向为地基基础及地下工程。

E-mail: baixiaoyu538@163.com