

DOI: 10.11779/CJGE201905019

黏性土中单桩贯入桩-土界面超孔压和土压 测试现场试验

王永洪^{1, 2}, 张明义^{1, 2}, 刘俊伟^{1, 2}, 白晓宇^{1, 2}, 杨苏春¹, 桑松魁¹, 闫楠³

(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. 青岛大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266071)

摘要: 黏性土地基中静压桩沉桩过程桩-土界面受力变化是岩土工程中常见的问题。在东营某工地黏性土地基中进行了足尺静压桩的贯入试验, 重点监测了桩身不同 h/L 位置处桩-土界面超孔隙水压力和土压力随入土深度的变化规律, 并分析了桩身不同 h/L 位置处桩-土界面超孔隙水压力与上覆土体有效压力的关系, 在同一入土深度桩-土界面土压力的变化特性, 重点研究了影响桩-土界面有效土压力分布的原因。测试结果表明: 沉桩引起的桩身不同 h/L 位置处桩-土界面超孔隙水压力与上覆土体有效压力比值最大是 1.08, 且该比值沿桩身向上逐渐减小; 同一入土深度桩身不同 h/L 位置处桩-土界面土压力存在“侧压力退化”现象, 且随着 h/L 的增加, 该退化现象会越来越明显, $h/L=11/12$ 位置处桩-土界面土压力仅约为 10 kPa; 除 $h/L=11/12$ 位置处, 桩身其它不同 h/L 位置处桩-土界面有效土压力是桩-土界面超孔隙水压力的 1.88~2.20 倍。研究成果对黏性土地基中静压桩施工和承载力确定具有一定的工程指导意义。

关键词: 静压桩; 沉桩过程; 桩-土界面; 超孔隙水压力; 土压力; 现场试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)05-0950-09

作者简介: 王永洪(1984—), 男, 山东东营人, 博士, 讲师, 从事土力学及桩基础领域的研究。E-mail: hong7986@163.com。

Field tests on excess pore pressure and soil pressure of pile-soil interface for a single pile during pile-sinking in clay

WANG Yong-hong^{1, 2}, ZHANG Ming-yi^{1, 2}, LIU Jun-wei^{1, 2}, BAI Xiao-yu^{1, 2}, YANG Su-chun¹,
SANG Song-kui¹, YAN Nan³

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China; 2. Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao 266033, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: Stress change of pile-soil interface for jacked-in piles during pile-sinking in clay is a topic of concern in the geotechnical engineering. A full-scale jacked-in pile is penetrated into the clay in Dongying city of China and studied by monitoring the laws of the excess pore water pressure and soil pressure of pile-soil interface with depth at different pile locations of h/L . The relationship between the excess pore water pressure of pile-soil interface and the effective pressure of superimposed soil at different pile locations of h/L and the characteristics of soil pressure of pile-soil interface at the same penetration depth are analyzed. Especially the causes to influence the distribution of the effective soil pressure of pile-soil interface are studied. The test results show that the maximum ratio of the excess pore water pressure of pile-soil interface to the effective pressure of superimposed soil during pile-sinking is 1.08 at different pile locations of h/L and decreases gradually along the pile from pile tip to pile top. The soil pressure of pile-soil interface presents “lateral pressure degradation” with the relative depth of the increasing pile tip (h/L) at the same penetration depth. The “lateral pressure degradation” presents obviously with the relative depth of the increasing pile tip (h/L). The effective soil pressure of pile-soil interface is only 10 kPa at the location of $h/L=11/12$, and that of certain interface at other different pile locations of h/L is 1.88~2.20 times the excess pore water pressure of pile-soil interface. The proposed solution

is of great engineering significance for jacked pile construction and bearing capacity design in clayey foundation.

Key words: jacked-in pile; pile-sinking; pile-soil interface; excess pore water pressure; soil pressure; field test

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778312, 41772318, 51809146);
山东省重点研发计划资助项目(2018GSF117010, 2018GSF117008,
2017GSF16107)

收稿日期: 2018-06-04

*通讯作者(E-mail: zjuljw@126.com)

0 引言

静压桩沉桩过程引起的超孔隙水压力和土压力,通过理论推导、室内试验和现场试验等方法研究发现两者在桩周土体和桩-土界面有较大差别^[1]。许多学者采用理论方法进行了研究,Vesic^[2]提出了采用圆柱孔扩张理论估算单桩贯入过程桩侧土中应力,并用室内和现场试验进行了验证。Cao等^[3]基于土体为初始各向同性体,用圆孔不排水扩张解答了沉桩扩孔,研究了饱和黏土中的静压沉桩效应。王育兴等^[4]结合孔穴扩张理论用水力压裂理论解答了沉桩引起的超孔隙水压力沿桩身径向和竖向分布规律,与实测数据较吻合。王伟等^[5]给出了饱和软黏土中沉桩超静孔压受时间、深度参数影响的固结效应三维解,根据桩周曼德耳效应提出了群桩施工超静孔压的产生和消散的综合过程。曹权等^[6]根据孔压静力触探试验与桩的贯入过程的相似性,基于小孔扩张理论分析桩、锥不同位置产生的孔隙水压力关系,并考虑软化系数和孔径的影响,认为孔压静力触探试验预估桩周孔隙水压力是可行的。高子坤等^[7-9]分别从变分原理、考虑桩体几何特征和岩土抗拉模量修正3个方面,进一步推导了柱孔扩张的特性和解答,得到沉桩侧向挤土压力沿径向和深度的变化规律,并与现有理论和Ansys计算结果进行验证,对压桩挤土施工、桩基设计和防护措施具有较大指导作用。李镜培等^[10]采用修正剑桥模型,同时考虑土体三维强度特性,得到超孔隙的柱孔扩张解答,通过建立考虑竖向和径向的空间轴对称固结方程,获得超孔压消散的级数解答。李林等^[11]考虑黏土地基的各向异性解答了静压沉桩的扩孔问题,并通过静压沉桩离心模型试验进行验证,对桩周孔压、土体应力和沉桩阻力进行了深入研究。

采用试验方法研究沉桩产生的超孔隙水压力和土压力,桩周土体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,分析在沉桩过程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。Roy等^[12]对静压桩稳态贯入的桩周土体孔隙水压力进行了现场测试。Hwang等^[13]通过在桩周围一定距离受影响的土层中埋置传感器,对沉桩过程足尺桩孔隙水压力和土压力试验观测,发现孔压和土压的动态变化与桩的贯入过程密切相关。Pestana等^[14]在软黏土地基上进行了沉桩时的孔隙水压力和周围土体水平变形的测试。唐世栋等^[15-17]分别在测量桩外壁和桩群内土体中不同位置和深度处布设了土压力盒和孔隙水压力计,现场实测了单桩和群桩施工过程桩侧土中超孔隙水压力和土压力变化规律,并推算出了桩-土界面处

的超孔隙水压力和土压力。周火垚等^[18]通过足尺静压桩压入试验,监测了压桩过程饱和软黏土地基中侧向位移、孔隙水压力和地面隆起随深度和距桩轴不同距离的变化规律。胡向前等^[19]研究了打设排水板后单桩和群桩施工产生的超孔隙水压力分布及消散规律,得到了对桩基施工有指导作用的合理桩距和时间间隔。张忠苗等^[20]在现场试验场地中央和防挤沟两侧埋设了6个土压力计和6个孔隙水压力计,并在桩端安装了土压力计,成功测试了静压开口管桩沉桩过程中桩端及桩周一定距离土体中有效径向土压力随沉桩过程的动态变化。李国维等^[21]研究了PHC管桩沉桩过程挤土效应对老路路堤的影响,通过现场监测孔隙水压力和土体水平位移随深度和水平方向的变化规律,发现软土路堤拓宽静压PHC管桩施工对老路路堤影响小。邓俊杰等^[22]实测了桩液压高频振动沉桩桩周土体超孔隙水压力随深度上升及消散过程,并通过静载试验比较了与锤击法和静压法极限承载力大小。

桩-土界面测试则需要特定的传感器植入,通过测试紧邻桩身的传感器来实现。Bond等^[23-24]在桩身同时安装多种传感器,全面而精确地测量了静压过程和静载试验过程桩-土界面剪应力、孔隙水压力和环向土的有效应力。Lehane^[25]通过现场试验,得到了不同位置的桩侧传感器在同一入土深度,桩-土界面土压力随着 h/B 增加而减小的结论。郑华茂^[26]利用镶嵌界面土压力计的试验方法进行砂土中的室内模型试验,研究了静压桩在压入和加载过程中桩-土界面受力特性。李雨浓等^[27]进行了静压沉桩离心模型试验,用模型桩嵌入式土压力传感器测量径向应力,分析了桩贯入、静置稳定及加载阶段径向总应力和桩侧摩阻力的分布规律。

大多数桩基础处于黏性土中,黏性土中桩基础沉桩过程受桩-土界面超孔隙水压力的影响很大,桩-土界面有效土压力随着超孔隙水压力的消散而不断增加,作用于桩身有效土压力变大使桩-土界面抗剪强度随之增加。目前针对桩-土界面研究黏性土中沉桩过程超孔隙水压力的较为缺乏,黏性土中桩-土界面剪切过程有效土压力变化更加深入地研究显得非常迫切。针对桩-土界面孔隙水压力和土压力问题,国内外学者采用现场试验方法展开研究和讨论的较少,监测沉桩过程桩-土界面超孔隙水压力和土压力变化规律是很多研究者希望实施的计划。本文通过现场试验测试沉桩过程瞬时产生的桩-土界面孔隙水压力和土压力,研究沉桩过程桩-土界面超孔隙水压力、桩-土界面土压力及桩-土界面有效土压力变化规律,对优化静压桩设计和施工具有重要的工程应用价值。

表 1 地基土层及物理力学指标
Table 1 Physical and mechanical properties of soil layers

土层名称	平均 层厚 /m	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	含水率 $w/\%$	孔隙比 e	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	黏聚力 c/kPa	内摩 擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	压缩 模量 E_s/MPa	固结系数 $C_v/(10^{-3}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	承载力 特征值 f_{ak}/kPa
素填土	2.44	17.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
粉土	1.45	18.6	27.7	0.792	28.5	19.6	10.0	18.9	6.0	3.14	95
粉质黏土	1.31	18.4	30.8	0.877	32.3	19.9	17.7	8.7	3.0	2.15	80
粉土	2.39	18.8	28.0	0.796	28.9	20.0	9.5	19.9	6.5	3.52	100
粉质黏土	3.66	18.3	31.5	0.892	32.3	19.8	18.8	7.2	3.0	2.34	80
粉土	2.39	18.8	28.0	0.793	28.9	19.9	10.0	20.3	7.0	3.21	120
粉质黏土	7.17	18.5	30.8	0.869	32.6	19.9	18.3	10.3	3.8	2.45	88
粉土	1.49	18.8	27.7	0.789	28.6	19.7	10.7	20.3	7.0	3.67	120
粉土	1.54	19.0	27.0	0.754	28.7	20.2	11.7	22.0	7.5	3.88	160
粉砂	17.68	19.3	24.0	0.692	—	—	5.0	34.0	10.3	6.21	220

1 现场试验

1.1 工程地质概况

某高层住宅楼建设工程场地位于东营市河口区，场地地貌单元属于黄河三角洲第四纪冲积平原，地貌类型单一，地层结构比较简单，横向分布较均匀，纵向逐层分布。根据勘探查明，场地地层除表层为素填土外，其下地层均由黄河三角洲第四纪冲积的粉土、粉质黏土和粉砂土层构成。按其冲积成因类型及物理力学指标，将纵向 30 m 内地基土层分为 10 层，各地基土层及物理力学指标见表 1。该场地地下水位为 0.30~3.00 m。

1.2 试桩条件

考虑拟建建筑物结构形式及荷载情况，结合场地岩土工程条件及当地建筑经验，该场地采用 PHC-400AB-95 型预应力混凝土管桩，混凝土强度等级为 C80，桩径为 400 mm，壁厚为 95 mm，施工方法为静力压入法。为了获取沉桩过程桩-土界面超孔隙水压力和土压力变化规律，选择足尺 PHC 管桩进行现场测试，编号为 T1，T1 测试桩以 6 层粉土为持力层，单节桩长 12 m，桩入土深度为 12 m，设计单桩承载力极限值为 400 kN。

本试验研究单桩静力压入过程桩-土界面超孔隙水压力和土压力变化，在其它工程桩压桩前先压入 T1 测试桩。根据已有测试结果^[12]，沉桩挤土效应水平距离一般不超过 15 d。因此，T1 测试桩桩间距约 20 m，避免测试桩在压入过程时受邻桩的影响。T1 测试桩压桩持续时间为 700 s。

1.3 测试系统

针对静压桩贯入机制和沉桩过程桩土作用效应，本次试验建立了完整的高速静态测试系统，本文研究重点为沉桩过程桩-土界面受力特性，因此着重介绍

桩-土界面孔隙水压力和土压力的测试系统。布设孔隙水压力和土压力传感器对沉桩过程的孔隙水压力和土压力进行测试，传感器全部布设在桩身表面的不同桩端相对距离 h/L 位置处（ h 为传感器距桩端的距离； L 为测试桩的桩长），孔隙水压力和土压力传感器在桩身同一 h/L 位置处两侧对称安装。为了避开 PHC 管桩端头板，距离桩端 200 mm 处布设底端孔隙水压力和土压力传感器。T1 测试桩孔隙水压力和土压力传感器各 6 个，对应 h/L 为 1/60，1/20，7/60，1/4，31/60，11/12。

实际测试中，影响孔隙水压力和土压力传感器可靠性的因素很多，如传感器尺寸、布设方式、温度、黏性土体的涂膜作用和滞后性等。本次试验采用硅压阻式高频响动态微型孔隙水压力和土压力传感器，其有效测试频响范围均为 0~2 kHz，直径均为 20 mm，高度为 12 mm，温度补偿范围为-25℃~50℃。硅压阻式高频响动态微型孔隙水压力和土压力传感器的测试原理是利用多晶硅为弹性体，采用先进微型化制作工艺集成硅膜片作为敏感元件制成，利用多晶硅的压阻效应，多晶硅材料受力后引起的几何形变远远小于其引起的电阻率变化，其压阻系数较大，提高了硅压阻式传感器灵敏度系数，也避免了传感器膜片变形产生土拱效应带来测量误差。本次试验数据采集设备采用两台 8 通道 CF3820 高速静态信号测试分析仪，采集频率设为 100 Hz。T1 测试桩传感器沿桩身表面的布设见图 1。

1.4 传感器埋设工艺

成功实现桩-土界面测试的关键是传感器的布设工艺，孔隙水压力和土压力传感器布设工艺如图 2 所示。孔隙水压力和土压力传感器布设时，为使传感器表面与桩身表面齐平，先在桩身表面用开孔器开孔，开孔直径为 20 mm，深度为 12 mm，开孔尺寸需严格按照传感器尺寸设计。然后将传感器传输线从孔内引

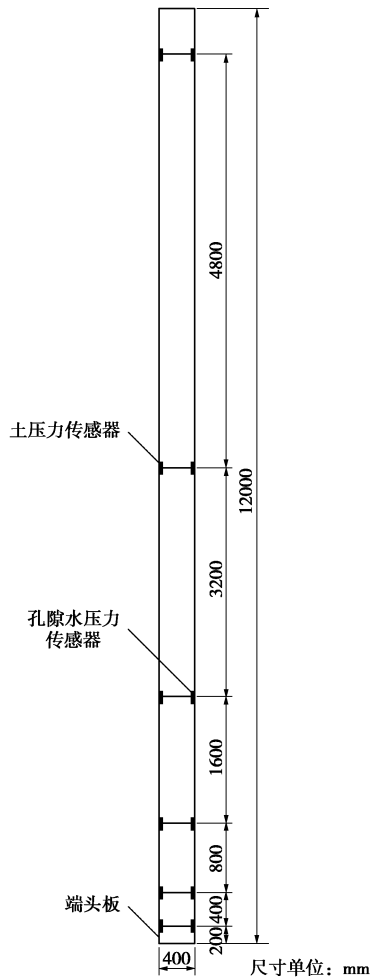


图1 孔隙水压力和土压力传感器沿桩身布设示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pore water pressure and soil pressure sensors along pile

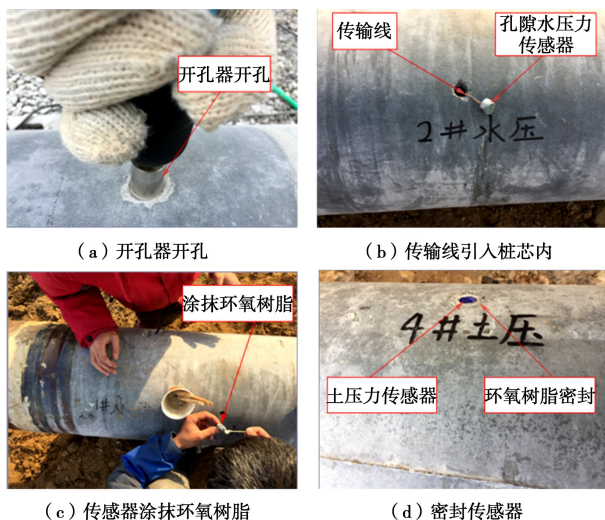


图2 孔隙水压力和土压力传感器布设

Fig. 2 Layout of pore water pressure and soil pressure sensors. The sensors are installed in the pile core, and the epoxy resin is applied to the sensor side, and the epoxy resin will be used to seal the sensor around the hole. In addition, the pore water pressure sensor surface is protected by transparent plastic to prevent the pile from being blocked by epoxy resin before the pile is driven, and the pore water pressure sensor is removed before the pile is driven.

感器表面的透明塑料, 保证饱和黏性土中沉桩过程孔压测试的有效性。压桩前一天, 孔隙水压力传感器透水石内注满水, 用水浸泡 24 h 排除孔隙水压力传感器空腔里面的空气。

2 试验结果及分析

2.1 桩-土界面超孔隙水压力结果分析

为了分析单桩沉桩引起的桩-土界面超孔隙水压力, 本文采用的方法是沉桩时在桩身表面布设孔隙水压力传感器测得的瞬时孔隙水压力增量, 看成是单桩沉桩瞬时桩-土界面处引起的超孔隙水压力。本文根据布设在桩身不同 h/L 位置处的孔隙水压力传感器测得超孔隙水压力, 图 3 为沉桩过程 T1 测试桩-土界面超孔隙水压力测试时程曲线 (以 $h/L=1/60$ 和 $h/L=1/20$ 孔压传感器为例), 同时整理出 6 组超孔隙水压力与入土深度的关系, 如图 4 所示。图 4 中的桩-土界面超孔隙水压力为沉桩过程中的稳定值。原状土的静止水压力通过公式 $p_w = \gamma_w h$ 得出, 相对桩端距离 ($h/L=1/60$) 孔隙水压力传感器, 实测桩-土界面超孔隙水压力变化趋势与理论计算静止水压力结果非常接近。从图 4 中可以看出, 沉桩引起的桩-土界面超孔隙水压力随入土深度逐渐增加, 土质相差不大时, 与入土深度近似呈线性关系, 与唐世栋等^[15, 17]现场实测桩-土界面处产生的超孔隙水压力随测点的埋深增大而增加和王育兴等^[4]桩身表面超孔隙压力随深度增加而增大的研究结论一致。从图 4 中还可以看出, 桩身不同 h/L 位置处超孔隙水压力的增量幅值 (0 值到稳定值) 不同, 沿着桩身向上超孔隙水压力的增量幅值逐渐减小, 周火焘等^[18]通过现场实测发现不同深度的超孔压的平均增长梯度不同, 在桩基础的上部和下部较大, 本文试验测试结果与其类似。由于沉桩挤压对桩-土界面土体产生扰动, 同一入土深度处, 桩-土界面超孔隙水压力随着在桩身位置 h/L 变大而减小, 即沿着桩身向上逐渐减小, 且桩身位置 h/L 越大, 减小越明显。表 2 是不同位置处的 6 个传感器测得的超孔隙水压力约从 0 值到稳定值的平均增长梯度。表 2 中的数据显示, 在桩底部 (h/L 为 $1/60$, $1/20$, $7/60$) 附近超孔隙水压力的平均增长梯度 (单位时间内的增量幅值) 比桩中部 (h/L 为 $1/4$, $31/60$) 的大, 即沿着桩身向上超孔隙水压力桩顶部 (h/L 为 $11/12$) 附近的超孔隙水压力增量幅值仅约为 0.48。产生这种现象的原因可能是: 沉桩过程在深层土主要产生侧向位移, 在地面产生侧向位移的同时, 由于地面上覆土体有效压力小, 沉桩挤土引起的竖向有效应力会使地面产生隆起, 紧邻桩身表面的土体受到扰动后结构产生破坏, 因此桩顶部桩-土界面孔压会很快消散^[15, 18]。

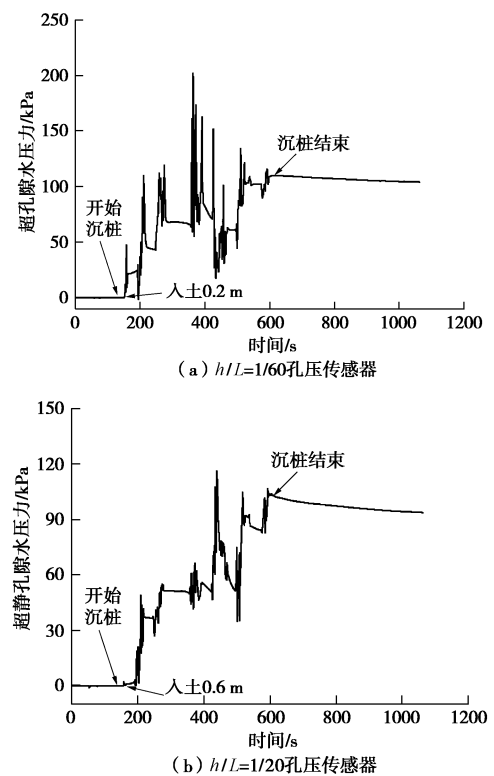


图 3 沉桩过程桩-土界面超孔隙水压力时程曲线

Fig. 3 Time-history curves of excess pore water pressure of pile-soil interface during pile-sinking

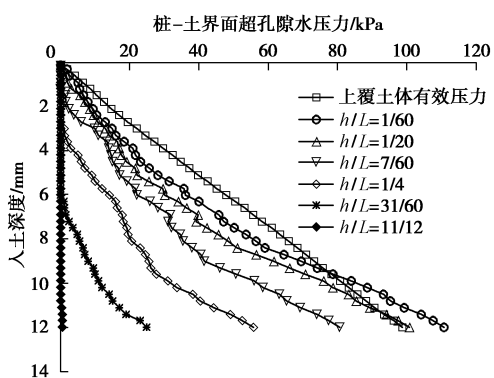


图 4 桩-土界面超孔隙水压力随入土深度变化曲线

Fig. 4 Variation curves of excess pore water pressure of pile-soil interface with depth

表 2 桩-土界面超孔隙水压力平均增长梯度
Table 2 Average gradients of excess pore water pressure of pile-soil interface

传感器位置		平均增长梯度 (kPa·min ⁻¹)	均值 (kPa·min ⁻¹)
桩底部	$h/L=1/60$	11.71	10.66
	$h/L=1/20$	10.92	
	$h/L=7/60$	9.36	
桩中部	$h/L=1/4$	7.31	6.16
	$h/L=31/60$	5.05	
桩顶部	$h/L=11/12$	≈ 0.48	≈ 0.48

将桩身表面不同 h/L 位置处的桩-土界面超孔隙水压力稳定值与相应位置处土的上覆土体有效压力进行比较,发现单桩沉桩引起的桩-土界面超孔隙水压力

与上覆土体有效压力之比与入土深度有关,沿入土深度逐渐增大,沉桩结束时 h/L 为 1/60, 1/20, 7/60, 1/4, 31/60, 11/12 位置处桩-土界面超孔隙水压力与上覆土体有效压力之比分别为 1.08, 1.02, 0.885, 0.719, 0.505, 0.057。唐世栋等^[17]和胡向前等^[19]均通过现场测试发现土体超静孔隙水压力和上覆土体有效自重之比与测点的埋深有关,沿深度逐渐增大,本文试验测试结果与以上现场测试和研究成果相符。其中,在 $h/L=1/60$ 和 $h/L=1/20$ 位置处桩-土界面超孔隙水压力与有效上覆压力较为接近,在 $h/L=7/60$, $h/L=1/4$ 和 $h/L=31/60$ 位置处桩-土界面超孔隙水压力与有效上覆压力均小于 1,对于粉土和粉质黏土,这是一个较安全的比值。而在浅层土中,地面产生隆起, $h/L=11/12$ 位置处(距地面 1.0 m)的桩-土界面孔隙水压力可以向上排水,排水条件好,孔压消散快,桩-土界面超孔隙水压力与有效上覆压力几乎为 0^[13, 24]。

桩-土界面超孔隙水压力稳定值沿桩身位置变化趋势归一化,如图 5 所示,其中,桩-土界面超孔隙水压力稳定值除以相应位置处上覆土体有效压力,桩身位置除以桩径。由图 5 可以看出,在桩身不同位置处的桩-土界面超孔隙水压力表现出一定的规律性,即不同桩身位置处的桩-土界面超孔隙水压力与相应位置处土的上覆土体有效压力的比值,沿桩身向上逐渐减小。这个变化规律可写成以下表达式:

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_{vo}(h)} \frac{h}{L} = \lambda \quad (1)$$

$$\Delta u = \lambda \frac{h}{L} \sigma'_{vo}(h) \quad (2)$$

式中 λ 为孔压参数,与土的参数有关; L 为桩长; h 为距桩端的距离; Δu 和 σ'_{vo} 分别表示在 h 处的桩-土界面超孔隙水压力稳定值和上覆土体有效压力。

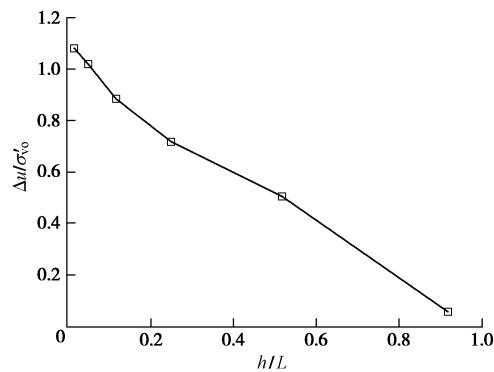


图 5 桩-土界面超孔隙水压力沿桩身变化趋势图

Fig. 5 Tendency of maximum excess pore water pressure of pile-soil interface with pile distance to pile-sinking for test pile T1

2.2 桩-土界面土压力结果分析

本文根据布设在桩身不同 h/L 位置处的土压力传感器测得桩-土界面土压力,图 6 为沉桩过程 T1 测试

桩-土界面土压力测试时程曲线 (以 $h/L=1/60$ 和 $h/L=1/20$ 土压力传感器为例), 图 7 为 T1 测试桩-土界面土压力随入土深度的变化曲线, 图 8 为 T1 测试桩侧 4 个不同位置处的桩-土界面土压力随土压力传感器入土深度的分布曲线, 由于 T1 测试桩 $h/L=1/60$ 和 $h/L=1/20$ 位置处的桩-土界面土压力传感器距离较近, 测得的土压力值相差不大, $h/L=11/12$ 位置处桩-土界面土压力较小, 因此只对桩侧 4 个不同位置处的土压力传感器进行分析。图 7, 8 中的桩-土界面土压力为沉桩过程中的稳定土压力。根据水平侧压力理论, 当取现场用土的内摩擦角 $\varphi=22^\circ$, 水平侧压力系数 $K_0=0.63$, 现场用土的饱和重度 $\gamma_{\text{sat}}=20 \text{ kN/m}^3$, 可得静止土压力理论计算值。相对桩端距离 ($h/L=3.5$) 土压力传感器, 实测桩-土界面土压力变化趋势与理论计算静止土压力结果非常接近。从图 7 中可以看出, 桩-土界面土压力随入土深度的增加近似呈线性增长。Lehane^[25]和李雨浓等^[27]分别通过现场试验和离心模型试验, 发现在桩贯入阶段, 桩身不同位置的总径向应力随着深度的增加而线性增加, 本文试验结果与以上结论一致。由图 7 可知, T1 测试桩在桩端入土深度 $H < h$ 时, 由于 h/L 位置处土压力传感器未入土, 因此桩-土界面没有产生土压力。当桩端入土深度 H 超过 h 时, T1 测试桩 h/L 位置处桩-土界面土压力均随入土深度的增加近似呈线性增长。当入土深度 H 分别为 12 m 时, T1 测试桩 h/L 为 $1/60, 1/20, 7/60, 1/4, 31/60, 11/12$ 位置处桩-土界面土压力分别约为 353.3, 338.7, 255.1, 161.5, 72.0, 10.6 kPa。由于 T1 测试桩 $h/L=1/60$ 和 $h/L=1/20$ 位置处的土压力传感器距离较近, 测得的桩-土界面土压力值相差不大, 随着土压力传感器对应桩身位置 h/L 越大, 桩-土界面土压力增幅越小。T1 测试桩 $h/L=11/12$ 位置处的桩-土界面土压力仅约为 10 kPa, 分析原因为: $h/L=11/12$ 位置处土压力传感器距离地面 1.0 m, 因开始贯入阶段桩身晃动明显和填土层的影响, 桩身上部土压力传感器与桩周土体接触不密实, 因此沉桩过程 $h/L=11/12$ 位置处桩-土界面土压力很小。

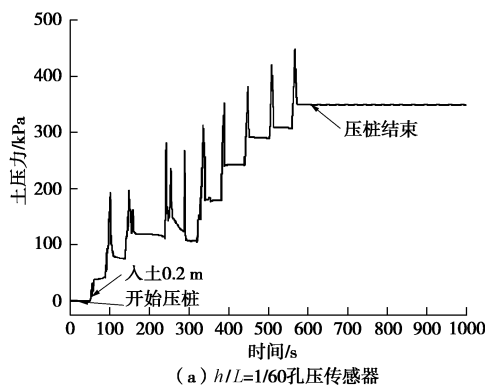
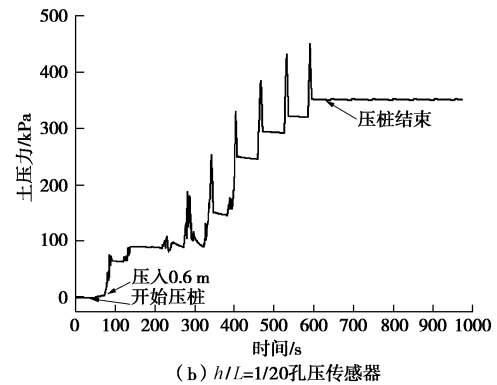
(a) $h/L=1/60$ 孔压传感器(b) $h/L=1/20$ 孔压传感器

图 6 沉桩过程桩-土界面土压力时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of soil pressure of pile-soil interface during pile-sinking

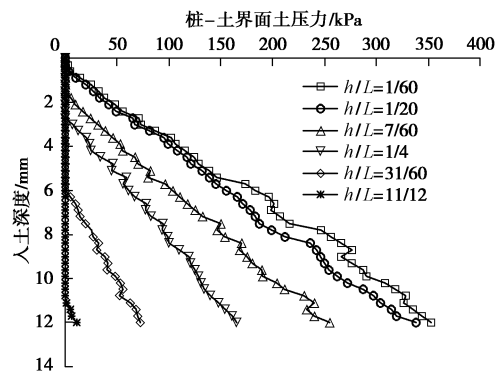


图 7 桩-土界面土压力随入土深度变化曲线

Fig. 7 Variation curves of soil pressure of pile-soil interface with depth

由图 8 可以看出, 随着 h/L 的增加, 直线斜率逐渐增大, 说明在同一入土深度处桩-土界面土压力随着 h/L 增大而减小, 分析原因为: 由于沉桩过程中桩-土界面土体受到被动挤压的同时发生剪切, 同时由于静力压桩机周期性的加卸载, 桩-土界面土体被往复剪切, 沉桩过程产生土体扰动和土颗粒重新排列导致桩-土界面土体强度会逐渐减小, 引起侧压力衰减, 因此随着桩端入土深度增加, 同一入土深度桩-土界面土压力存在“侧压力退化”现象, 且随着 h/L 的增加, 这种退化现象会越来越明显。Lehane^[25]现场试验和李雨浓等^[27]离心模型试验结果, 均为不同部位的桩侧元件在同一入土深度处, 总径向应力随着 h/B 的增加而减小, 本文试验结果与以上结论一致, 即不同位置处的桩侧传感器在同一入土深度, 测得的桩-土界面土压力随着 h/L 增加而减小。

由以上分析可得沉桩过程存在一个有效的桩端相对距离 h/L , 超过该相对距离后沉桩过程引起的桩-土界面土压力就很小, 本文研究结果与高子坤等^[7,9]、唐世栋等^[15]结论一致, 高子坤等考虑桩体几何特征和变分原理的静压沉桩挤土效应理论解答, 认为在地面处

得到的侧向应力趋于零,地面为自由面。唐世栋等实测的单桩沉桩产生的桩-土界面侧压力增量分布规律,即实测的桩-土界面处的扩张压力值与测点的埋深有关。因此在计算桩-土界面土压力时,有必要考虑桩的长度效应,以免对桩-土界面土压力估算过大。

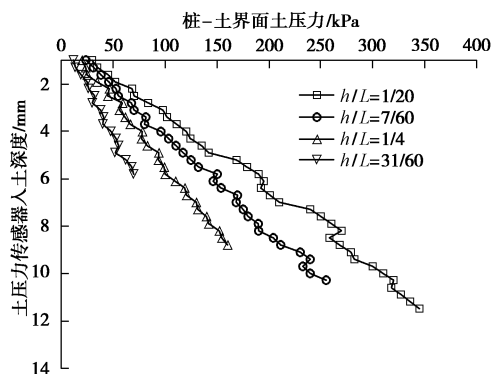


图8 桩-土界面土压力随土压力传感器入土深度变化曲线

Fig. 8 Variation curves of soil pressure of pile-soil interface with depth of soil pressure sensors

2.3 桩-土界面有效土压力结果分析

由图4, 8可知,在整个入土深度范围内,桩-土界面超孔隙水压力均小于桩-土界面土压力,这说明沉桩引起的桩-土界面土压力中,除了产生超孔隙水压力外,还包括桩-土界面有效土压力。根据本试验测试的沉桩过程桩-土界面超孔隙水压力、静水压力和桩-土界面土压力,基于有效应力可以计算出桩-土界面有效土压力。图9为T1测试桩桩-土界面有效土压力随入土深度的变化曲线。由图9可知,沉桩引起的桩-土界面有效土压力随入土深度逐渐增加,与入土深度近似呈线性关系。

图10为桩身不同 h/L 位置处桩-土界面有效土压力与桩-土界面超孔隙水压力的比较。从图中可以看出,沉桩引起的桩身不同 h/L 位置处桩-土界面有效土压力和桩-土界面超孔隙水压力变化曲线相似,相应位置处桩-土界面超孔隙水压力小于桩-土界面有效土压力。桩-土界面有效土压力与桩-土界面超孔隙水压力相比,随着在桩身位置 h/L 变大,桩-土界面有效土压力“退化程度”大于桩-土界面超孔隙水压力“消散程度”,说明沉桩挤压对桩-土界面土体产生扰动,桩-土界面超孔隙水压力受到的影响程度大于桩-土界面有效土压力。

将桩-土界面有效土压力与桩-土界面土压力、桩-土界面超孔隙水压力作比较,发现浅层土 $h/L=11/12$ 位置处桩-土界面土压力与桩-土界面超孔隙水压力比值为26.50,其它桩身不同 h/L 位置处桩-土界面土压力与桩-土界面超孔隙水压力比值均在2.88~3.36之间。浅层土 $h/L=11/12$ 位置处桩-土界面有效土压力与

桩-土界面土压力比值接近1,其它桩身不同 h/L 位置处桩-土界面有效土压力与桩-土界面土压力比值均在65%~71%之间。除了 $h/L=11/12$ 位置外,其它桩身不同 h/L 位置处桩-土界面有效土压力是桩-土界面超孔隙水压力的188%~220%,以上均说明桩-土界面土压力主要由桩-土界面有效土压力组成,可以认为桩-土界面土压力随着入土深度的增加而增大主要体现在桩-土界面有效土压力的增大。桩-土界面有效土压力与桩-土界面超孔隙水压力的比值,在 $h/L=11/12$ 位置处出现了较大值,这是由于浅层土地面隆起, $h/L=11/12$ 位置处桩-土界面超孔隙水压力消散很快,桩-土界面有效土压力迅速增加造成的。

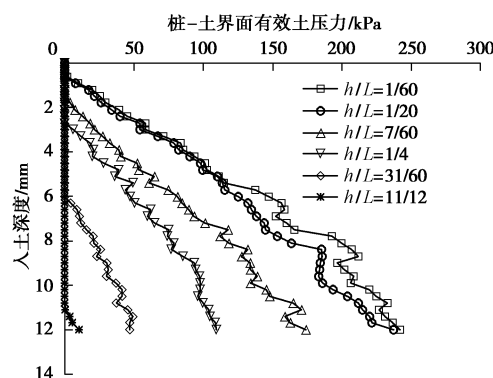


图9 桩-土界面有效土压力随入土深度变化曲线

Fig. 9 Variation curves of effective soil pressure of pile-soil interface with depth

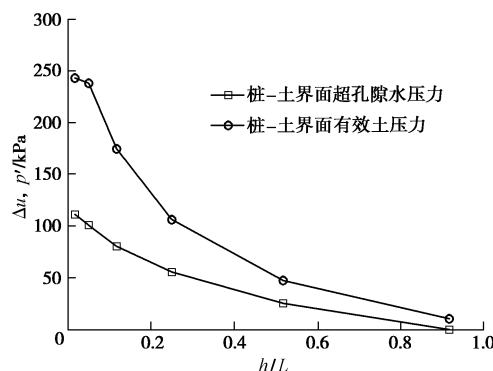


图10 桩-土界面有效土压力与超孔隙水压力的比较

Fig. 10 Comparison between effective soil pressure of pile-soil interface and excess pore water pressure

4 结论与建议

本文通过开展现场试验研究了黏性土地基中单桩沉桩过程桩-土界面超孔隙水压力、土压力及有效土压力变化规律。初步结论与建议如下:

(1) 沉桩引起的桩-土界面超孔隙水压力与入土深度近似呈线性增长关系,桩底部附近超孔隙水压力的平均增长梯度大于桩中部和桩顶部。沉桩引起的桩-

土界面超孔隙水压力与上覆土体有效压力比值最大是1.08, 且沿桩身向上而逐渐减小。

(2) 沉桩过程中桩身不同 h/L 位置处的桩-土界面土压力与入土深度近似呈线性关系, 同一入土深度桩-土界面土压力随着入土深度增加而减小, 桩-土界面土压力存在“侧压力退化”现象, 且随着 h/L 的增加, 这种退化现象会越来越明显。

(3) 沉桩过程桩-土界面土压力与桩端相对距离 h/L 有关, 沉桩对超过有效桩端相对距离 h/L 的桩身上部桩-土界面土压力影响微弱, 因此在计算桩-土界面土压力时, 有必要考虑桩的长度效应, 以免对桩-土界面土压力估算过大。

(4) 沉桩过程随着桩身位置 h/L 变大, 桩-土界面有效土压力“退化程度”大于桩-土界面超孔隙水压力“消散程度”。桩-土界面有效土压力与桩-土界面土压力比值基本在 65%~71%之间, 除了 $h/L=11/12$ 位置处出现了较大值, 桩-土界面有效土压力是桩-土界面超孔隙水压力的 1.88~2.20 倍。

本文试验不仅测试了沉桩过程桩-土界面超孔隙水压力和桩-土界面土压力, 而且基于有效应力合理考虑桩-土界面有效土压力, 因此较为符合实际工程状况。桩-土界面有效土压力对应桩侧摩阻力, 桩侧摩阻力退化实质也是桩-土界面有效土压力的减小, 如何通过现场实测的桩-土界面有效土压力揭示黏性土地基中沉桩过程桩侧摩阻力发挥特性和桩-土界面受力机理有待进一步研究。桩-土界面有效土压力的变化规律对桩基础设计具有重要工程意义。

参考文献:

- [1] 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 Xiao-nan, LI Xiang-hong. Several mechanical problems in compacting effects of static piling in soft clay ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 17 (4): 7 - 12. (in Chinese))
- [2] VESIC A S. Expansion of cavities in infinite soil mass[J]. ASCE: JSMFD, 1972, 98(3): 265 - 290.
- [3] 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.
- [4] 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): 154 - 158. (WANG Yu-xing, 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): 154 - 158. (in Chinese))
- [5] 王 伟, 宰金珉, 王旭东. 沉桩引起的三维超静孔隙水压力计算及其应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 774 - 777. (WANG Wei, ZAI Jin-min, WANG Xu-dong. 3D calculation of excess pore water pressure due to driving pile and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 774 - 777. (in Chinese))
- [6] 曹 权, 施建勇, 雷国辉, 等. 基于孔压静力触探试验估算桩周土孔隙水压力[J]. 河海大学学报, 2011, 39(3): 306 - 310. (CAO Quan, SHI Jian-yong, LEI Guo-hui, et al. Prediction of excess pore water pressure caused by installing piles in soft clay based on piezocone penetration tests[J]. Journal of Hohai University, 2011, 39(3): 306 - 310. (in Chinese))
- [7] 高子坤, 施建勇. 基于变分原理的静压沉桩挤土效应理论解答研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 52 - 58. (GAO Zi-kun, SHI Jian-yong. Theoretical analysis of soil squeezing effect due to jacked piles based on variation principle[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(1): 52 - 58. (in Chinese))
- [8] 高子坤, 施建勇. 考虑桩体几何特征的压桩挤土效应理论解答研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 956 - 962. (GAO Zi-kun, SHI Jian-yong. Theoretical solutions of soil-squeezing effect due to pile jacking considering geometrical characteristics of a pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(6): 956 - 962. (in Chinese))
- [9] 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 Zi-kun, SHI Jian-yong. 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))
- [10] 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 - 854. (LI Jing-pei, FANG Rui, LI Lin. 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 - 854. (in Chinese))
- [11] 李 林, 李镜培, 孙德安, 等. 考虑天然黏土应力各向异性的静压沉桩效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 (5): 1055 - 1064. (LI Lin, LI Jing-pei, SUN De-an. Pile jacking-in effects considering stress anisotropy of natural clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2016, **35**(5): 1055 - 1064. (in Chinese))
- [12] ROY M, TREMBLAY M, TAVENAS. Development of pore pressures in quasi-static penetration tests in sensitive clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1982, **19**(1): 124 - 138.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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 Shi-dong, HE Lian-sheng, 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))
- [16] 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. (TANG Shi-dong, HE Lian-sheng, YE Zhen-hua. Increment of lateral pressure caused by installation of pile in soft foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(6): 752 - 755. (in Chinese))
- [17] 唐世栋, 王永生, 叶真华. 饱和软土地基中群桩施工引起的超孔隙水压力[J]. 同济大学学报, 2003, **31**(11): 1290 - 1294. (TANG Shi-dong, WANG Yong-xing, YE Zhen-hua. Excess pore water pressure caused by installing pile group in saturated soft soil[J]. Journal of Tong Ji University, 2003, **31**(11): 1290 - 1294. (in Chinese))
- [18] 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 Huo-yao, SHI Jian-yong. Test research on soil compacting effect on full scale jacked-in pile in saturated soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(11): 3291 - 3296. (in Chinese))
- [19] 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 Xiang-qian, JIAO Zhi-bin, LI Yun-hui. 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))
- [20] 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 Zhong-miao, XIE Zhi-zhuan, LIU Jun-wei, 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))
- [21] 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 Guo-wei, BIAN Sheng-chuan, LU Xiao-cen, et al. Field test on extruding soil caused of PHC pile pile driving by static pressure for improving soft foundation of widened embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(4): 1089-1096. (in Chinese))
- [22] 邓俊杰, 陈龙珠, 邢爱国, 等. 液压高频振动沉桩的饱和土超静孔压及单桩静载特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(2): 203 - 208. (DENG Jun-jie, CHEN Long-zhu, XING Ai-guo, et al. Experimental studies on pore pressure of saturated soils and bearing capacity of piles driven by high-frequency hydraulic vibrator[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(2): 203 - 208. (in Chinese))
- [23] BOND A J, JARDINE R J. Shaft capacity of displacement piles in a high OCR clay[J]. Géotechnique, 1991, **41**(3): 341 - 363.
- [24] BOND A J, JARDINE R J. Effects of installing displacement piles in a high OCR clay[J]. Géotechnique, 1995, **45**(1): 3 - 23.
- [25] LEHANE B M. Experimental investigations of pile behaviour using instrumental field piles[D]. London: University of London(Imperial College), 1992.
- [26] 郑华茂. 砂土中静压管桩模型试验及受力性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2015. (ZHENG Hua-mao. Model test and analysis of jacked tubular pile in sand[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015. (in Chinese))
- [27] 李雨浓, BARRY M LEHANE, 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 Yu-nong, BARRY M LEHANE, LIU Qing-bing, et al. Centrifuge modeling of jacked pile in clay[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, **40**(3): 285 - 292. (in Chinese))