

Doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.139

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 不同直径单桩静压贯入力学特性模型试验研究

王永洪<sup>a,b</sup>, 张明义<sup>a,b</sup>, 孙绍霞<sup>a</sup>, 白晓宇<sup>a,b</sup>, 苗德滋<sup>a</sup>

(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)

**摘要:**为探讨不同桩径静力压入单桩的贯入力学特性,设计了不同桩径的模型桩,基于光纤光栅(Fiber Bragg Grating,简称FBG)传感技术,开展了黏性土中静压贯入两种不同直径单桩的模型试验研究。结果表明:试桩的压桩力基本呈线性增加趋势,桩径越大,压桩力越大;桩径不同会影响单桩的荷载传递性能,由于桩径越大挤土效应越明显,沿深度方向的桩身轴力传递性能优于小桩径桩;桩身单位侧摩阻力随深度增大而增大,桩径越大,对土体的侧向挤压力越大,桩身单位侧摩阻力越大;同一深度,两种不同直径单桩桩身单位侧摩阻力都出现“侧阻退化”现象,“侧阻退化”现象随着贯入深度的增加越明显,且桩径越大,桩身单位侧摩阻力退化越显著;均质黏性土地层静压沉桩阻力主要为桩端阻力,沉桩结束时,试桩桩端阻力占沉桩阻力的比例分别为59.5%和66.2%,不同的桩身直径既影响桩端阻力,又影响桩侧阻力。确定静压贯入沉桩阻力时,考虑基于黏性土的侧阻退化后实际值更为合理。

**关键词:**静压沉桩;桩径;侧阻退化;模型试验;沉桩阻力

**中图分类号:** TU473.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2020)01-0009-09

## Model test study on single piles with different diameters subjected to penetration mechanical characteristics of jacked pile

Wang Yonghong<sup>a,b</sup>, Zhang Mingyi<sup>a,b</sup>, Sun Shaoxia<sup>a</sup>, Bai Xiaoyu<sup>a,b</sup>, Miao Dezi<sup>a</sup>

(a. College of Civil Engineering; b. Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, P. R. China)

**Abstract:** Model tests are carried out on the jacked single piles of different diameters under model pile of different diameters in clayey soil, which aims to investigate the penetration mechanical mechanism. The results show that pile driving pressure of test pile shows linear increase. The load transfer performance of test piles will be affected by different diameters, and the axial force transfer capability of large diameter in the depth direction is better than that of small diameter since the compacting effect is more obvious. Unit

**收稿日期:** 2019-05-05

**基金项目:** 国家自然科学基金(51778312、41772318);山东省重点研发计划(2017GSF16107、2018GSF117010);山东省自然科学基金(ZR2016EEP06)

**作者简介:** 王永洪(1984-),男,博士,主要从事土力学及桩基础研究, E-mail: hong7986@163.com。

白晓宇(通信作者),男,博士(后),副教授, E-mail: baixiaoyu538@163.com。

**Received:** 2019-05-05

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51778312, 41772318); Shandong Key Research & Development Project (No. 2017GSF16107, 2018GSF117010); Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2016EEP06)

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

Bai Xiaoyu (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: baixiaoyu538@163.com.

skin friction of pile increases gradually as the depth increases, which is larger due to the lateral extrusion force increases as the diameter increases. At the same depth, unit skin friction of two different diameters pile demonstrates “friction fatigue”, which also decreases obviously as the depth increases. At the same time, the “friction fatigue” is more obvious as the pile diameter increases. In homogeneous clays, the piling resistance mainly includes the end resistance. The end resistance of test pile accounts for 59.5% and 66.2% of the piling resistance when sinking pile ends. The end resistance and the shaft resistance are influenced by the pile diameter. For the confirmation of the jacked piling resistance, it is more rational to consider the actual value with the friction fatigue of clayey soil.

**Keywords:** jacked pile; pile diameter; friction fatigue; model tests; piling resistance

静压沉桩过程中桩身受力复杂, 桩端破土受到桩端阻力, 桩身与土产生滑动摩擦并受到桩外侧阻力<sup>[1]</sup>。通过试验研究静压沉桩的受力机制, 对深入认识静压沉桩过程的贯入机制及静压桩施工中承载力的确定具有重要价值。

学者们对静压桩贯入机制, 尤其在圆孔扩张理论方面进行了系列研究, 并取得了一定成果<sup>[2-5]</sup>。在现场试验方面, 张明义等<sup>[6]</sup>在现场足尺静压桩桩底安装自制传感器、桩顶同步读取压桩力进行试验, 并分离桩侧总摩阻力和桩端阻力。寇海磊等<sup>[7]</sup>通过 PHC 管桩桩身刻槽埋入 FBG 传感器, 分离了沉桩过程的桩端阻力和桩侧摩阻力。胡永强等<sup>[8]</sup>对模型桩进行了现场静力压入及载荷试验, 研究了穿过不同土层时桩端阻力和桩侧阻力的变化机理, 提出了根据终压桩侧摩擦情况判断承载力时效性的方法。在数值分析方面, 张明义等<sup>[9]</sup>提出了利用 ANSYS 软件的位移贯入法数值计算模拟方法, 比较接近静力压桩沉桩结果。叶建忠等<sup>[10]</sup>利用二维颗粒流理论模拟了静压沉桩过程, 研究了沉桩过程中桩体力学行为表现及受沉桩影响的桩周土体细观结构。寇海磊等<sup>[11]</sup>通过分段采用不同本构模型, 利用 ABAQUS 模拟了层状地基土中静压桩连续贯入过程, 得到了静压沉桩阻力在软硬交互层状土中的变化规律。离心模型试验可以更好地模拟实际工程中的自重应力, 得到了众多学者的青睐。Nicola 等<sup>[12]</sup>在砂土中进行了开口管桩沉桩离心模型试验, 研究了管桩贯入砂土中的力学性状。Lehane 等<sup>[13-14]</sup>分别进行了干砂中开口管桩和固结砂土中闭口钢方桩的离心模型贯入试验, 研究了干砂中不同桩周土体应力、桩径和壁厚的沉桩力学特性, 得到了固结砂土中桩侧水平有效应力增大的影响因素。刘清秉等<sup>[15]</sup>进行了不同密实度砂样的离心模型试验, 得到了不同颗粒形状对闭口静压桩端阻力的影响。李雨浓等<sup>[16]</sup>进行了高岭黏土中静压沉桩离心模型试验, 利用模型桩头荷重传感器和桩底端阻力测试元件测试了贯入过程中的沉桩阻力和桩端阻力。

室内沉桩模型试验是研究静压沉桩贯入力学机制最直接的方法, 众多学者通过室内模型试验对静

压沉桩问题进行了研究。Kenneth 等<sup>[17-18]</sup>在砂土管桩贯入模型试验中发现, 在某一固定深度处, 随着  $h/D$  的增加, 桩侧动摩阻力不断减小, 并对密砂中桩侧摩擦疲劳效应进行了研究。White 等<sup>[19]</sup>进行了一系列平面应变标定槽试验, 研究了砂土中桩尖贯入机理和桩土界面贯入特征。周健等<sup>[20-21]</sup>分别进行了研究均质和分层砂土中静压沉桩过程力学特性的模型试验, 发现均质和分层砂土中桩端阻力均存在临界深度现象, 均质砂土中桩侧摩阻力存在摩擦疲劳现象, 极限端阻所需刺入深度分层砂土小于均质砂土。肖昭然等<sup>[22]</sup>通过室内模型装置研究了砂土中静压沉桩机理, 得到了静压沉桩过程围压和摩阻力的关系。周航等<sup>[23]</sup>通过异形截面桩透明土沉桩模型试验, 开展了圆形桩和 XCC 桩沉桩挤土试验, 并将模型试验得到的沉桩挤土位移场分布规律与理论计算位移对比验证。李雨浓等<sup>[24]</sup>进行了均质和双层高岭黏土中静压沉桩特性模型试验, 研究了沉桩过程桩侧摩阻力发挥程度及不同桩型沉桩终压力与桩承载力的关系。

从以上研究可以看出, 目前, 静压沉桩贯入机制的模型试验研究仍主要集中在砂土中, 黏性土层中的静压沉桩贯入模型试验研究还较少, 且考虑桩径影响的静压沉桩贯入特性尚缺乏深入的研究。同时, 采用传统的电测类传感器进行测试的居多, 尚未将光纤光栅传感技术应用到静压沉桩贯入机制的模型试验测试中。桩的贯入使桩尖和桩周土体不断受到挤压, 造成桩周土体应力状态不断变化, 静压沉桩时, 桩端阻力和桩侧阻力动态变化, 进行模型试验时, 传统的测试传感器会造成较大误差, 使测量值与实际值相差较大。光纤光栅传感器体积小、质量轻、抗电磁干扰能力强, 在一根光纤中可以写入多个光栅, 光纤光栅传感技术已应用在很多工程结构中<sup>[25-27]</sup>。静压桩模型试验中采用光纤光栅传感技术, 在测试过程中可以克服土颗粒运动对桩端和桩身产生的严重扰动。笔者基于黏性土, 联合使用增敏微型光纤光栅应变传感器和双膜片温度自补偿型光纤光栅土压力传感器, 考虑桩径的影响, 开展了不同桩径条件下静压沉桩贯入力学特性的室内模型试验研究。

## 1 静压沉桩模型试验

### 1.1 试验装置

室内模型试验采用青岛理工大学大比例模型试验系统。大比例模型试验系统主要由模型箱、加载系统和数据采集系统 3 部分组成,其中,模型箱由钢板焊接而成,其长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 2 800 mm $\times$ 2 800 mm $\times$ 2 000 mm,模型箱壁厚为 6 mm,底板厚度为 14 mm,模型箱正面设有可视化窗口和可拆卸式卸土开口,模型箱放置在尺寸为 4 000 mm $\times$ 4 000 mm (长 $\times$ 宽)工字钢焊接而成的底座上,如图 1 所示。加载系统由反力架和动力装置组成,反力架由 4 个反力柱、2 个反力主梁、1 个反力次梁和齿轮齿条传动装置组成。动力装置由高压油泵、大行程液压油缸、PLC 控制系统和人机界面操作平台等组成。加载系统横梁上面放置加载液压千斤顶,液压千斤顶前后移动由电控系统控制横梁实现,液压千斤顶左右移动由电控系统直接控制,加载系统如图 2 所示。



图 1 模型箱图

Fig.1 Model table

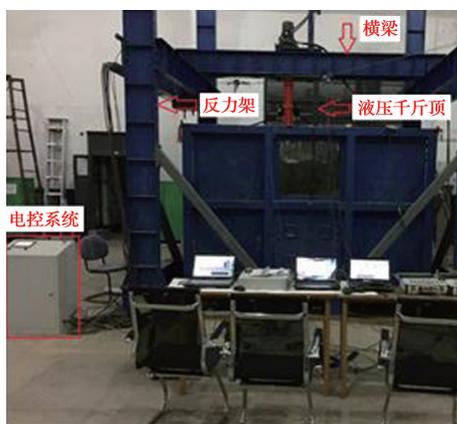


图 2 加载系统图

Fig.2 Loading system

### 1.2 模型桩及传感器安装

选用铝质圆管材料制作闭口模型桩,弹性模量 69 GPa,模型桩长度为 1 000 mm,直径分别为 140、100 mm,厚度为 3 mm。模型桩尺寸基于相似理论原理,根据模型箱尺寸、工程桩实际长径比、模型桩制作等因素确定。模型桩顶部通过桩帽连接形成水

平加载平台。模型桩对称布置 6 对增敏微型光纤光栅应变传感器,从桩端以上 20 mm 处每隔 180 mm 设置一对传感器。为确保传感器的成活率且便于安装,布设方式为桩身表面两侧对称开槽后封装,开槽宽度为 2 mm,深度为 2 mm。先将传感器一端夹持套管粘到槽体底部,另一端向外侧预拉伸 0.2~0.8 mm 后用胶固定,最后用环氧树脂封装。桩身中部和底部均开有直径为 5 mm 的进线孔,为了方便传感器导线引出,桩顶 6 cm 以下管桩对称开设两个直径为 30 mm 的圆形孔洞。桩身传感器布设如图 3 所示。试验光纤光栅应变测试采用 8 通道 FS 2200RM-Rack-Mountable Bragg Meter 解调仪,该仪器采集频率为 1 Hz,波长分辨率为 1 pm,精度为 2 pm,工作波长范围为 1 500~1 600 nm,动态范围为 $\pm 3$  nm。

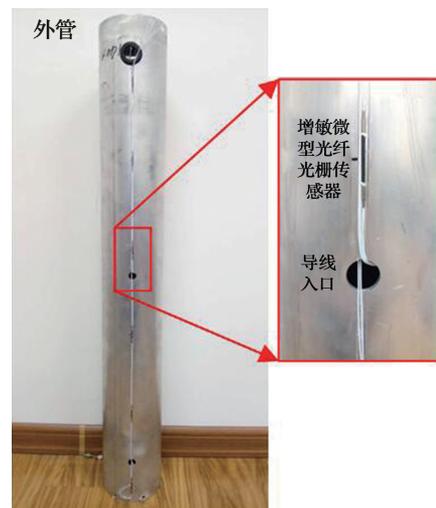


图 3 传感器布设图

Fig.3 Sensor installation

### 1.3 地基土制备

试验所用黏性土取自青岛某工程粉质黏土层,该土层介于流塑~软塑状态。地基制备采用分层填筑压实的方法<sup>[28]</sup>,选用人工压实和机器压实,如图 4 所示,地基土制备完成后,进行缓慢加水饱和,为了加速地基土的固结,在模型箱底部 5 cm 高度填砂夯实,预配好后静置 20 d,以保证地基充分固结。模型箱最上面 50 cm 高度不填土,用作试验准备。地基土基本物理指标见表 1。



(a) 人工压实

(b) 机器压实

图 4 地基土制备

Fig.4 Soil preparation

表 1 地基土物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of foundation soil

相对密度 $d_s$	重度 $\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	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	34.8	21.2	13.5	14.4	8.6	3.3

为了充分利用试验条件,模型桩在模型箱中间对称压桩,模型桩间距  $d_1 = 1\ 000$  mm,模型桩距箱壁较近距离为  $d_2 = 900$  mm,  $d_2/D_1 = 6.4$ ,  $d_2/D_2 = 9$ 。Yegian<sup>[29]</sup>通过有限元分析,Rao等<sup>[30]</sup>通过模型试验研究证明模型箱边界在桩体 6~8 倍桩径范围外即可忽略边界效应。基于此,试验选用的模型箱和模型桩在沉桩过程中可忽略边界效应。

#### 1.4 沉桩过程

沉桩前首先通过电控系统将加载横梁上的液压千斤顶移动到指定桩位,使千斤顶上升到一定高度,将试桩直立放到待压桩位,用吸附在管桩桩身表面上的磁性盒式水平尺检测管桩是否垂直,防止发生偏心受压。待管桩直立后,再次加压,使液压千斤顶缓慢匀速下降,直至将要接触管桩桩顶时停止加压。液压油缸选用大行程 1 000 mm,试验通过油泵加压使千斤顶逐渐降落,从而实现不间断静压贯入的加载方式,沉桩速度约为 300 mm/min。通过在桩顶加载平台设置温度自补偿光纤光栅土压力传感器测量沉桩过程中沉桩阻力的变化情况。

## 2 试验结果分析

### 2.1 压桩力分析

图 5 为两种不同桩径模型桩贯入过程压桩力曲线。由图 5 可以看出,两根模型桩的压桩力均随沉桩深度增加而不断增大,TP1(桩径  $D = 140$  mm)、TP2(桩径  $D = 100$  mm)试桩压桩力变化趋势基本一致,随沉桩深度的增加,压桩力基本呈线性增加。压桩力在开始阶段上升较快,但当沉桩深度约 20 cm 时,TP1 压桩力出现拐点,随后压桩力增加缓慢,当沉桩深度约 40 cm 时,TP1 压桩力开始与 TP2 增加速率基本相等,当贯入量为 90 cm 时,TP1 压桩力比 TP2 增大了 31.3%。试验在浅层均质黏性土中进行,压桩力曲线变化不显著,但桩径对模型桩压桩力产生明显影响,贯入过程试桩 TP1 压桩力大于试桩 TP2。试桩 TP1 直径大,致使其在桩身与黏土接触面积大,侧摩阻力大;桩端面积大从而使桩端阻力大,故试桩 TP1 压桩力比 TP2 大。

### 2.2 桩身轴力分析

黏性土中模型桩桩身轴力-深度关系曲线如图

6 所示。由图 6 可见,不同的贯入深度下,桩身轴力

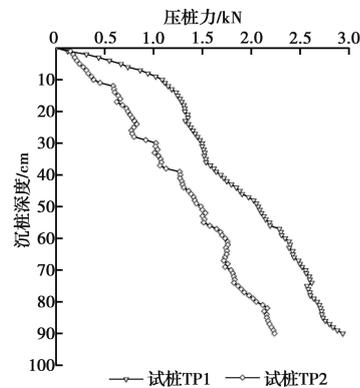
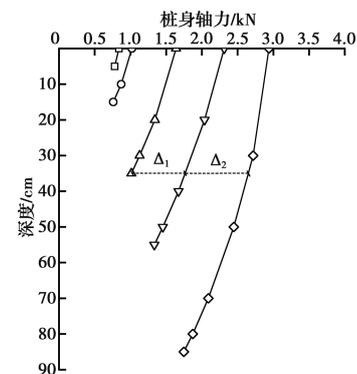
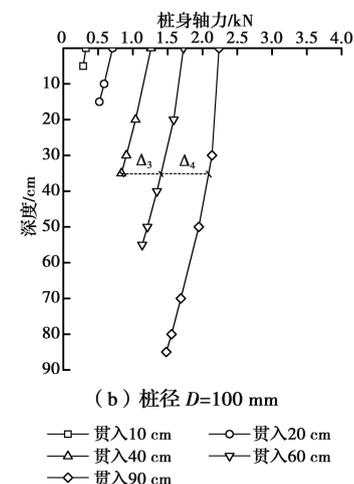


图 5 压桩力-深度关系曲线

Fig.5 Relation curves between pile driving pressure and depth of test piles

(a) 桩径  $D=140$  mm(b) 桩径  $D=100$  mm

—□— 贯入 10 cm    —○— 贯入 20 cm  
—△— 贯入 40 cm    —▽— 贯入 60 cm  
—◇— 贯入 90 cm

图 6 桩身轴力-深度关系曲线

Fig.6 Relation curves between axial force and depth of test piles

分布趋势基本一致:接近桩顶处轴力最大,基本与压桩力大小一致;随深度的增加,桩身轴力不断减小,衰减速度反映了桩侧摩阻力的分布情况。桩身轴力曲线大致呈线性分布,曲线的陡缓程度反映了桩侧摩阻力大小,曲线越陡,桩侧摩阻力越小,反之,桩侧摩阻力则越大。贯入初期,曲线较陡,随着贯入深度的增加,桩身轴力随着深度增加减小速率逐渐增加,即曲线逐渐变缓,说明桩侧摩阻力随着贯入深度的增加在逐渐发挥。桩径不同会影响桩身轴力传递性能,由图 6 可见,桩径  $D=140$  mm 的桩身轴力大于桩径  $D=100$  mm 的各截面桩身轴力,桩径越小,沿深度的桩身轴力传递性能越差,贯入初期,直径越大,桩身轴力衰减越快,这是因为桩径越大,挤土效应使得桩侧摩阻力越大,桩径越小,桩侧摩阻力越小,使桩身轴力相对桩径小的更容易向深度方向传递。

各截面桩身轴力随着贯入深度的增加而逐渐增大,且在同一深度处,桩身轴力随着贯入深度的增加增幅越明显。在深度 35 mm 处,随着贯入深度的增加,桩径  $D=140$  mm 的桩身轴力增幅依次为  $\Delta_1=0.75$  kPa、 $\Delta_2=0.89$  kPa,桩径  $D=100$  mm 的桩身轴力增幅依次为  $\Delta_3=0.57$  kPa、 $\Delta_4=0.68$  kPa。同时,桩径越大,桩身轴力增幅越显著,当贯入深度从 60 cm 增加到 90 cm 时,在同一深度 35 cm 处,桩径 140 mm 的桩身轴力增幅  $\Delta_2=0.89$  kPa,大于桩径 100 mm 的桩身轴力减幅  $\Delta_4=0.68$  kPa。

### 2.3 桩身单位侧摩阻力分析

根据桩身轴力可以计算出桩身单位侧摩阻力,图 7(a)、(b)分别是试桩 TP1、TP2 桩身单位侧摩阻力分布情况。从图 7 可以看出:

1) 同一贯入深度,桩侧摩阻力沿深度非均匀分布,深度越大,桩身单位侧摩阻力越大,桩身单位侧摩阻力逐渐发挥作用,这与 Iskander<sup>[31]</sup> 研究结果相似。分析认为,随着深度的增加,桩体对桩周土体的挤压作用越大,桩壁-桩周土的剪切力越大,桩身单位侧摩阻力越大。桩侧摩阻力随深度增长的速率变小,与寇海磊等<sup>[7]</sup> 在现场足尺静压沉桩试验中得到的“随着贯入深度的增加,桩侧单位摩阻力逐渐增加”的结论一致。在沉桩过程中,0~5 cm 处试桩 TP1、TP2 桩身单位侧摩阻力均较小,原因是压桩过程无法避免的偏心、静压桩浅部土体隆起及贯入初期桩身晃动等因素的影响,与李雨浓等<sup>[32]</sup> 进行的静压桩贯入室内试验和寇海磊等<sup>[7]</sup> 进行的现场足尺静压沉桩试验现象类似。

2) 同一深度下,桩径  $D=140$  mm 的桩身单位

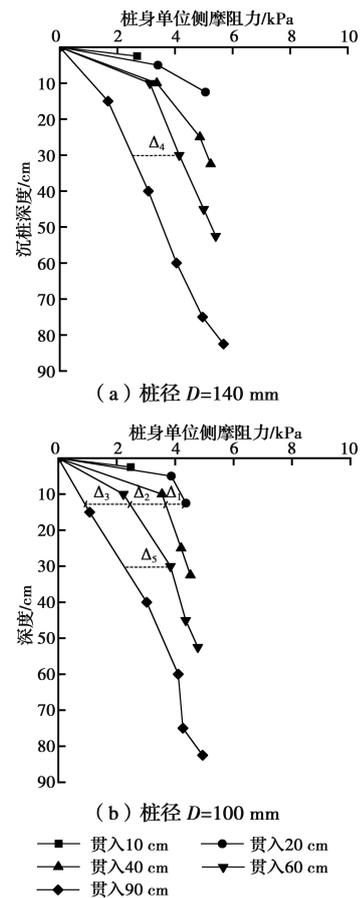


图 7 桩侧摩阻力-深度关系曲线

Fig.7 Relation curves between skin friction and depth of test piles

侧摩阻力比桩径  $D=100$  mm 的略大:桩径越大,桩体贯入过程对桩侧和桩端土挤密作用越大,提高了土体的侧向挤压力,使土体强度越高,最终导致桩身单位侧摩阻力越大。贯入深度 90 cm 时,对比直径为 140、100 mm 的两根试桩,桩身单位侧摩阻力分别为 5.68、4.94 kPa,说明由于尺寸效应影响,直径 140 mm 的桩体较 100 mm 的桩体挤土效应更明显。

3) 同一深度下,随着贯入深度的增加,桩身单位侧摩阻力发生明显弱化现象。这主要是因为当桩端达到某一深度时,挤土效应较为明显,桩身单位侧摩阻力达到最大值,随着桩端的贯入土颗粒重新排列,桩侧形成“土拱效应”,挤土效应减弱,相同深度处的桩身单位侧摩阻力逐渐减小,由此可得,黏性土中桩身单位侧摩阻力存在“侧阻退化效应”。以桩径 100 mm 为例,在同一深度 12.5 cm 处,随着贯入深度的增加,桩身单位侧摩阻力减幅依次为  $\Delta_1=0.71$  kPa、 $\Delta_2=1.23$  kPa、 $\Delta_3=1.54$  kPa。可见,随着贯入深度的增加,“侧阻退化”越明显,该现象已被 Kenneth 等<sup>[17]</sup>、周健等<sup>[21]</sup> 多次在试验中证实。同时,桩径越大,桩身单位侧摩阻力退化越显著,当贯入深度从 60 cm 增加

到 90 cm 时,在同一深度 30 cm 处,桩径 140 mm 桩身单位侧摩阻力减幅  $\Delta_4 = 2.52$  kPa,大于桩径 100 mm 桩身单位侧摩阻力减幅  $\Delta_5 = 1.59$  kPa。

#### 2.4 桩端阻力分析

图 8 为两种不同桩径模型桩贯入过程桩端阻力随沉桩深度的变化情况。由图 8 可以看出,两种模型桩桩端阻力随沉桩深度的增加呈现出近似线性增大的趋势,这是沉桩过程中对桩侧桩端土的压密效应所致。沉桩过程中,试桩 TP2 的桩端阻力小于试桩 TP1,且当沉桩深度大于 0.6 m 时,试桩 TP2 桩端阻力曲线的斜率有所降低,即桩端阻力增速变缓,这主要是试桩 TP2 桩径小于试桩 TP1,桩土接触面积小所致。对比不同直径的两根模型桩,沉桩结束时,桩端阻力分别为 1.48、1.78 kN。可以看出,在均质黏性土中,对于不同桩径的两根模型桩,其桩端阻力体现出了随桩径增大而增大的趋势,说明直径 140 mm 较直径 100 mm 模型桩挤土效应更为明显,沉桩时对桩侧桩端土体扰动更大。

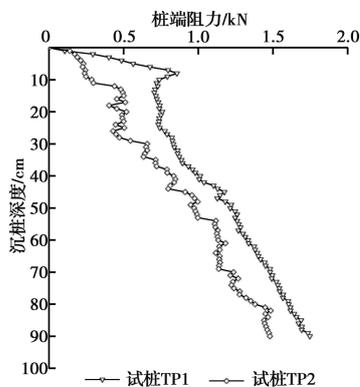


图 8 桩端阻力-深度关系曲线

Fig.8 Relation curves between pile end resistance and depth of test piles

#### 2.5 桩侧摩阻力分析

图 9 为两种不同桩径模型桩贯入过程中桩侧摩阻力随沉桩深度的变化情况。由图 9 可以看出,桩侧摩阻力均随沉桩深度的增加呈近似线性增长趋势。由于地表附近土体超固结比较高,因此,试验中 10~20 cm 桩侧摩阻力较大,桩径  $D = 140$  mm 模型桩表现更明显。桩径对桩侧摩阻力的影响较大,与桩端阻力相比,桩侧摩阻力变化较大。试桩 TP2 的桩侧阻力在沉桩过程中始终小于试桩 TP1,桩侧摩阻力随桩径的增大而增加,该现象与周健等<sup>[15]</sup>研究的不同直径单桩侧摩阻工作性状一致,这是因为试桩 TP2 直径小,桩身与土体接触面积小,即黏着和犁沟作用面积小,所以,试桩 TP2 侧阻力较试桩 TP1 小。试桩 TP2 直径小,沉桩过程中对桩周土的

扰动作用相对小,桩土接触相对紧密,且孔隙水压力上升慢,黏着犁沟作用较强,所以,侧阻力呈线性增长趋势。

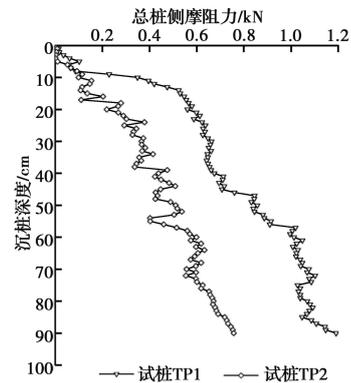


图 9 桩侧摩阻力-深度关系曲线

Fig.9 Relation curves between skin friction and depth of test piles

#### 2.6 沉桩过程中贯入阻力

图 10 为两种不同桩径模型桩沉桩过程中贯入阻力随沉桩深度的变化情况。由图 10 可以看出,TP1、TP2 试桩贯入总阻力为桩侧摩阻力和桩端阻力之和。贯入阻力与桩径密切相关,桩径越大,贯入阻力越大,特别是桩端阻力随桩径增大的趋势更明显。桩侧摩阻力与桩端阻力相比,其随深度增大的趋势及数值均小于桩端阻力,说明沉桩过程中的贯入阻力主要为桩端阻力。桩端阻力和桩侧阻力随桩径的增大而增加,该现象与周健等<sup>[33]</sup>研究的不同直径单桩侧摩阻和端阻力工作性状一致。在黏性土沉桩试验时,贯入阻力主要来源于桩端穿越土体时冲剪产生的桩端阻力,大于沉桩过程中产生的桩侧摩阻力。沉桩深度相同的条件下,试桩 TP2 的桩侧摩阻力发挥程度小于试桩 TP1,由此可得,桩侧摩阻力受到桩径的影响显著。

表 2 为沉桩结束时桩端阻力、桩侧摩阻力占贯入阻力的百分比。由表 2 可见,桩端阻力占沉桩阻力的比例随贯入深度的变化而变化,当沉桩结束时,试桩 TP1、TP2 的桩端阻力占沉桩阻力的比例分别为 59.5% 和 66.2%,可见,均质黏性土地层静压沉桩阻力主要为桩端阻力,沉桩过程中,桩侧阻力较小,与李镜培等<sup>[5]</sup>软土地层静压沉桩阻力主要为桩端阻力、桩侧阻力较小的研究结论一致。对桩端阻力而言,桩径不同时,试桩 TP2 的桩端阻力小于试桩 TP1。同时,沉桩深度相同的条件下,试桩 TP2 的桩侧阻力发挥程度小于试桩 TP1,桩侧阻力主要受到桩身直径影响。从以上分析可以看出,不同的桩身直径既影响桩端阻力又影响桩侧阻力。

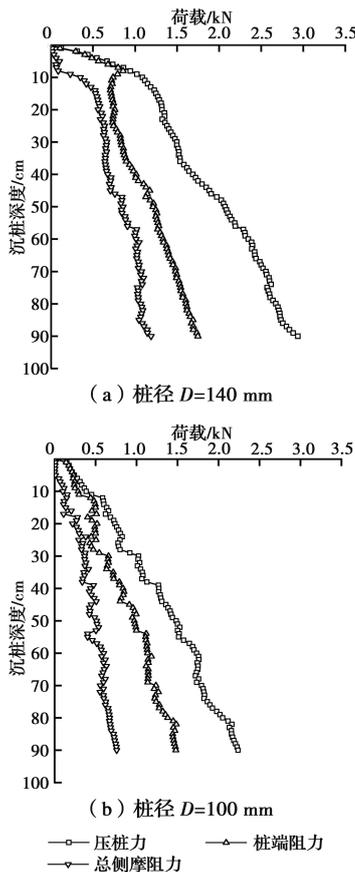


图 10 贯入阻力-深度关系曲线

Fig.10 Relation curves between penetration resistance and depth of test piles

表 2 沉桩结束时桩端阻力、桩侧阻力及占压桩力的百分比

Table 2 Percentage of pile end resistance and pile side resistance at the end of pile sinking

试桩 编号	沉桩阻力/ kN	桩端阻力/kN (百分比/%)	桩侧摩阻力/kN (百分比/%)
TP1	2.938	1.747(59.5)	1.191(40.5)
TP2	2.238	1.480(66.2)	0.757(33.8)

### 3 结论

1)在均质黏性土中开展了两根不同桩径模型桩的静压贯入特性模型试验研究,对比分析了桩身轴力传递特性、桩侧摩阻力发挥程度及沉桩阻力,与桩径为 100 mm 模型桩相比,桩径为 140 mm 的模型桩的压桩力、桩端阻力、桩侧摩阻力较大。桩径为 140 mm 的模型桩桩身轴力传递特性和桩侧摩阻力发挥程度优于桩径为 100 mm 的模型桩。

2)在均质黏性土地层中,静压沉桩阻力主要为桩端阻力,沉桩过程中,桩侧摩阻力较小,不同桩径对桩端阻力和桩侧摩阻力均有影响。与桩端阻力相比,桩径对桩侧摩阻力的影响较大。

3)随深度的增加,两种不同桩径桩身轴力不断减小,轴力减小的速率随深度增加而逐渐增加。在同一深度处,桩身轴力随着贯入深度的增加增幅越明显,且桩径越大,桩身轴力增幅越显著。

4)黏性土中,桩身单位侧摩阻力沿深度非均匀分布,深度越大桩身单位侧摩阻力越大。同一深度下,桩径越大,桩身单位侧摩阻力越大。随着贯入深度的增加,相同深度处的桩身单位侧摩阻力逐渐减小,桩身单位侧摩阻力存在“侧阻退化效应”,且桩径越大,退化越显著。

本文模型试验结果作为定性分析,定性地反映实际桩体的桩身轴力传递、桩侧阻力、桩端阻力等贯入特性。

#### 参考文献:

[ 1 ] GAVIN K G, LEHANE B M. The shaft capacity of pipe piles in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(1): 36-45.

[ 2 ] SAGASETA C, WHITTLE A J. Prediction of ground movements due to pile driving in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(1): 55-66.

[ 3 ] RANDOLPH M F. Science and empiricism in pile foundation design[J]. Géotechnique, 2003, 53(10): 847-875.

[ 4 ] 周航,孔纲强,刘汉龙.基于圆孔扩张理论的静压楔形桩沉桩挤土效应研究[J].中国公路学报,2014,27(4):24-30.

ZHOU H, KONG G Q, LIU H L. Study on pile sinking compaction effect of hydrostatic wedge pile using cavity expansion theory[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(4): 24-30. (in Chinese)

[ 5 ] 李镜培,李林,孙德安,等.饱和软土地层静压沉桩阻力理论研究[J].岩土工程学报,2015,37(8):1454-1461.

LI J P, LI L, SUN D A, et al. Theoretical study on sinking resistance of jacked piles in saturated soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8): 1454-1461.(in Chinese)

[ 6 ] 张明义,邓安福.预制桩静力贯入层状地基的试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(4):490-492.

ZHANG M Y, DENG A F. Experimental study on jacked precast piles in layered soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 490-492.(in Chinese)

[ 7 ] 寇海磊,张明义.基于桩身应力测试的静压PHC管桩贯入机制[J].岩土力学,2014,35(5):1295-1302.

- KOU H L, ZHANG M Y. Penetration mechanism of jacked PHC pipe piles based on pile stress measurement [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35 (5): 1295-1302. (in Chinese)
- [8] 胡永强, 汤连生, 黎志中. 端承型静压桩沉桩贯入过程中桩侧阻力变化规律及其时效性试验研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2015, 54(1): 130-135.
- HU Y Q, TANG L S, LI Z Z. Experimental study on variation and time effect of shaft resistance of jacked pile installation [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2015, 54 (1): 130-135. (in Chinese)
- [9] 张明义, 邓安福, 干腾君. 静力压桩数值模拟的位移贯入法[J]. *岩土力学*, 2003, 24(1): 113-117.
- ZHANG M Y, DENG A F, GAN T J. Displacement penetration method used for numerical simulation to jacked pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(1): 113-117. (in Chinese)
- [10] 叶建忠, 周健, 韩冰. 基于离散元理论的静压沉桩过程颗粒流数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26 (Sup1): 3058-3064.
- YE J Z, ZHOU J, HAN B. Numerical simulation of punching processes by particle flow code based on discrete element method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26 (Sup1): 3058-3064. (in Chinese)
- [11] 寇海磊, 张明义, 张吉坤. 层状粘性土及砂土地基中静力压桩连续贯入的数值模拟[J]. *工程力学*, 2012, 29 (12): 175-181.
- KOU H L, ZHANG M Y, ZHANG J K. Numerical simulation of the successive penetration of jacked pile in layered cohesive soil and sand [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(12): 175-181. (in Chinese)
- [12] NICOLA A D, RANDOLPH M F. Centrifuge modelling of pipe piles in sand under axial loads[J]. *Géotechnique*, 1999, 49(3): 295-318.
- [13] 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.
- [14] LEHANE B M, WHITE D J. Lateral stress changes and shaft friction for model displacement piles in sand [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42 (4): 1039-1052.
- [15] 刘清秉, 项伟, LEHANE B M, 等. 颗粒形状对砂土抗剪强度及桩端阻力影响机制试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(2): 400-410.
- LIU Q B, XIANG W, LEHANE B M, et al. Experimental study of effect of particle shapes on shear strength of sand and tip resistance of driven piles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(2): 400-410. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] GAVIN K G, LEHANE B M. The shaft capacity of pipe piles in sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, 40(1): 36-45.
- [18] WHITE D J, BOLTON M D. Displacement and strain paths during plane-strain model pile installation in sand[J]. *Géotechnique*, 2004, 54(6): 375-397.
- [19] GAVIN K G, O'KELLY B C. Effect of friction fatigue on pile capacity in dense sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(1): 63-71.
- [20] 周健, 邓益兵, 叶建忠, 等. 砂土中静压沉桩过程试验研究与颗粒流模拟[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31 (4): 501-507.
- ZHOU J, DENG Y B, YE J Z, et al. Experimental and numerical analysis of jacked piles during installation in sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(4): 501-507. (in Chinese)
- [21] 周健, 李魁星, 郭建军, 等. 分层介质中桩端刺入的室内模型试验及颗粒流数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(2): 375-381.
- ZHOU J, LI K X, GUO J J, et al. Laboratory model tests and particle flow code numerical simulation of pile tip penetration in layered medium[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31 (2): 375-381. (in Chinese)
- [22] 肖昭然, 刘轶. 静力沉桩的室内模型试验装置研发[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(9): 1695-1698.
- XIAO Z R, LIU Y. Development of laboratory model test equipments for jacked piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(9): 1695-1698. (in Chinese)
- [23] 周航, 孔纲强, 崔允亮. 基于透明土的 XCC 桩沉桩挤土效应模型试验及其理论研究[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(7): 99-109.
- ZHOU H, KONG G Q, CUI Y L. Model test and theoretical study on XCC pile penetration effect based on transparent soil [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(7): 99-109. (in Chinese)
- [24] 李雨浓, LEHANE B M. 双层高岭黏土中沉桩特性模型试验[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2018, 48 (6): 1778-1784.

- LI Y N, LEHANE B M. Lateral stress for model jacked piles in two-layered kaolin clay[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48(6): 1778-1784.(in Chinese)
- [25] 闫光, 辛璟涛, 陈昊, 等. 预紧封装光纤光栅温度传感器传感特性研究[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(5): 967-971.
- YAN G, XIN J T, CHEN H, et al. Sensing properties of fiber grating temperature sensor package preload[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(5): 967-971.(in Chinese)
- [26] 张伟航, 江俊峰, 王双, 等. 面向海洋应用的光纤法布里-珀罗高压传感器[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0206001-1-0206001-9.
- ZHANG W H, JIANG J F, WANG S, et al. Fiber-optic fabry-perot high-pressure sensor for marine applications[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0206001-1-0206001-9.(in Chinese)
- [27] 李朋, 王来, 郭海燕, 等. 基于FBG传感技术的深海立管涡激振动测试研究[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(4): 756-763, 814.
- LI P, WANG L, GUO H Y, et al. Testing of vortex-induced vibrations of deep-Sea risers based on FBG sensing technology [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(4): 756-763, 814.(in Chinese)
- [28] 土工试验标准方法: 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] YEGIAN M, WRIGHTS G. Lateral soil resistance displacement relationships for pile foundation in soft clays [C]//Offshore Technology Conference, Houston, 1973.
- [30] 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.
- [31] ISKANDERM G, OLSON R E. An experimental facility to model the behavior of steel pipe piles in sand[R]. New York: Offshore Technology Research Center, 1995.
- [32] 李雨浓, 李镜培, 赵仲芳, 等. 层状地基静压桩贯入过程机理试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(6): 1409-1414.
- LI Y N, LI J P, ZHAO Z F, et al. Model test research on penetration process of jacked pile in layered soil[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(6): 1409-1414.(in Chinese)
- [33] 周健, 郭建军, 张昭, 等. 砂土中单桩静载室内模型试验及颗粒流数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1763-1768.
- ZHOU J, GUO J J, ZHANG Z, et al. Model test of single pile static load in sands and numerical simulation using particle flow code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1763-1768.(in Chinese)

(编辑 王秀玲)