

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.094



黏性土中开口与闭口模型管桩受力性状 试验研究

张明义^{1a,1b}, 孙绍霞^{1a}, 王永洪^{1a,1b}, 桑松魁^{1a}, 苗德滋^{1a}, 杨炳康²

(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. 青岛科尼乐机械设备有限公司, 山东 青岛 266107)

摘要:为研究开口和闭口试桩在黏性土体静力沉桩过程中荷载传递规律及承载性能的差异性,采用桩身开槽预埋增敏微型光纤光栅传感器的方法,针对黏性地基土,开展两组不同桩端形式模型试桩承载性能对比试验,测得沉桩过程中压桩力、桩端阻力、桩侧摩阻力及桩身轴力发展变化规律。结果表明:光纤光栅传感器可实时监测沉桩过程中桩身受力状态;开口和闭口模型管桩的压桩力、桩端阻力等荷载均随着沉桩深度的增加呈增长趋势,而不同贯入深度下的桩身轴力却逐渐递减;黏性土中的静力压桩、开口管桩和闭口管桩的桩端阻力占比均超过 50%;在桩侧摩阻力发挥上,双壁开口模型管桩外管是内管的 3 倍。当开口管桩贯入深度达到最大值 90 cm 时,土塞高度稳定在 33 cm,此时,桩侧单位侧摩阻力的分布呈下大上小的形式。

关键词:黏性土;静力沉桩;模型管桩;受力性状

中图分类号: TU473 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2019)05-0049-10

Experimental study on bearing behavior of open and closed model pipe piles in cohesive soil

Zhang Mingyi^{1a,1b}, Sun Shaoxia^{1a}, Wang Yonghong^{1a,1b}, Sang Songkui^{1a},
Miao Dezi^{1a}, Yang Bingkang²

(1a. School of Civil Engineering; b. Collaborative Innovation Center for Engineering Construction and Safety of Blue Economic Zone, Shandong Province, Qingdao 266033, Shangdong, P. R. China; 2. Qingdao Konyile Machinery Equipment Co., Ltd., Qingdao 266107, Shandong, P. R. China)

Abstract: In order to study the load transfer pattern and the bearing capacity difference between the open test pile and the closed test pile in the static pile sinking process in the cohesive soil, the method of pre-

收稿日期: 2019-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(4177231, 51778312, 51809146); 青岛市博士后应用研究(2018101); 山东省重点研发计划(2017GSF16107, 2018GSF117010, 2018GSF117008, 2018GSF122002); 山东省自然科学基金(ZR2017PD011)

作者简介: 张明义(1958-), 男, 博士, 教授, 主要从事地基基础与城市地下工程研究, E-mail: zmy58@163.com.
王永洪(通信作者), 男, 博士, E-mail: hong7986@162.com.

Received: 2019-01-18

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 4177231, 51778312, 51809146); Qingdao Postdoctoral Applied Research Funding Project (No. 2018101); Shandong Key Research and Development Program Project (No. 2017GSF16107, 2018GSF117010, 2018GSF117008, 2018GSF122002); Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2017PD011)

Author brief: Zhang Mingyi (1958-), PhD, professor, main research interests: foundation and urban underground engineering, E-mail: zmy58@163.com.

Wang Yonghong (corresponding author), PhD, E-mail: hong7986@163.com.

embedded sensitized micro-fiber grating sensor is adopted in this paper. In the foundation soil, a comparison test of the bearing capacity of the test piles in different pile end models was carried out. The variation of pile force, pile end resistance, pile side friction resistance and pile axial force was measured. The testing results show that the fiber Bragg grating sensor can monitor the pile body stress state in the pile sinking process in real time; the pile bearing capacity and pile end resistance of the open and closed model pipe piles all increase with pile depth, with different magnitudes. The axial force of the pile under the depth is gradually decreasing; the ratio of the pile end resistance of the open pipe pile and the closed pipe pile is more than 50%; the double-walled open-ended model pipe pile is used for the pile side friction resistance, of which the outer tube is 3 times as much as the inner tube. When the penetration depth of the open pipe pile reaches a maximum of 90 cm, the height of the soil plug is stable at 33 cm. Consequently, the distribution of the side frictional resistance of the pile side increase from the top to the bottom.

Keywords: cohesive soil; static pile sinking; model pipe pile; stress trait

静力压桩一般是指压桩机械利用自身所携带的配重,用夹具紧紧夹住钢筋混凝土桩或钢管桩将其缓慢压入土层的一种沉桩工艺,凭借对环境污染小、施工操作简便、施工速度快、施工时没有振动和噪音、综合经济效益高等优点,在广东、浙江、上海等软土地区以及青岛地区部分桩基工程中得到广泛应用^[1-2]。众多学者通过现场试验和室内试验对静压桩的桩身受力状态进行了研究。张明义等^[3]在不同场地进行了预制方桩的静力压桩试验,对桩的实际受力状态与静力触探曲线进行了对比,并对不同土层的残余应力进行了监测。马海龙等^[4]通过对开口和闭口形式的模型桩进行原位静压沉桩试验,从时效性方面分析其对桩身承载力的影响。鉴于现场试验的工程地质条件复杂、耗费资金大、土层复杂多变、各种不确定性因素较多等情况,很多学者通过简化现场复杂的土层条件,在室内采用按比例缩尺的模型箱和模型桩进行室内模型槽试验或离心模型试验。Paik等^[5]研究了土塞对开口管桩承载力的影响,并结合室内模型桩试验,提出了桩端承载力和开口端桩承载力的新经验关系式。刘锟等^[6]通过室内模型试验研究不同桩端土层对钻孔灌注桩承载性的影响,建立了桩侧摩阻力-桩土相对位移的归一化关系。李镜培等^[7]采用离心模型试验研究了饱和黏土贯入过程的土压力,通过CPTU试验研究侧摩阻力、锥头阻力贯入过程变化规律,最后与圆孔扩张理论值相对比。刘清秉等^[8]通过离心模型静力触探试验研究了砂土颗粒形状对沉桩过程锥端阻力的影响并进行量化分析,得出的计算值与实测值相吻合。目前,大多数室内模型试验从桩身材料、地基土层、管桩壁厚、桩径、桩长等单一或多个方面研究沉桩过程中桩身荷载传递规律^[9-11],但对开口和闭口管桩在静压沉桩过程受力状态研究较少。且室内静力沉

桩试验的测试元件大多采用应变片,但传统的测试元件易受环境影响,成活率、可靠性均较低^[12-13]。

为研究开口和闭口静压桩的贯入机理^[14],借助青岛理工大学研制的模型试验系统进行了黏性土中大比例的室内沉桩试验,采用管桩表面开浅槽、粘贴放入光纤光栅传感器的方法,研究开口和闭口模型管桩在贯入过程中的压桩力、桩端阻力、桩侧摩阻力、桩身轴力随沉桩深度的变化规律。

1 试验准备

试验场地位于青岛理工大学动力实验中心,试验所用仪器为青岛理工大学研制的大比例模型试验系统。

1.1 试验系统

该系统主要包括加载系统、数据采集系统、模型箱。其中,加载系统主要由电控系统、液压千斤顶、横梁和反力架等组成。数据采集系统采用FS2200RM光纤光栅解调仪、DH3816N静态应变采集仪对试验数据进行实时、同步、精确采集;试验所用模型箱由钢板焊成,其尺寸为3 m×3 m×2 m(长×宽×高),为便于观察沉桩过程,正面采用钢化玻璃窗,如图1所示。

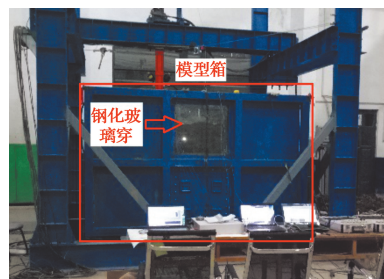


图1 试验模型箱

Fig. 1 Test model box

1.2 地基土的制作

室内模型试验所用的土样取自青岛某住宅工程现场粉质黏土层,试样运至实验室后,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)^[15],对土样烘干、

粉碎、过筛 3 道工序制成重塑土样并覆盖多层薄膜,静置大约 30 d 后,正式进行压桩试验。相关的物理力学参数见表 1。

表 1 土样物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil samples

相对密度 d_s	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{cm}^{-3})$	含水率 $\omega/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	压缩模量 E_{s1-2}/MPa
2.73	18.0	34.8	43.2	21.2	22	14.4	8.6	3.3

1.3 模型桩

室内试验进行两根双壁铝制材料模型桩的静力压桩试验,桩管壁厚度均为 3 mm,管桩长度均为 1 000 mm,模型桩根据桩端形式分为开口、闭口两种形式,两种管桩均通过内六角螺栓与管桩桩端相连;开口桩端处内管与底座之间有微小缝隙,为防止沉桩过程中进入黏土影响测试效果,使用密封胶进行填充密封。其中,模型具体参数见表 2,双壁模型管桩的结构示意图见图 2。

具体安装流程为:1)先在外管表面开一条 2 mm×2 mm(宽度×深度)的浅槽。2)FBG 传感器安装前使用酒精和棉球将安装槽清洗干净。3)FBG 传感器从桩端至桩顶编号依次为 1#~6#,传感器沿管桩桩身方向总体呈下密上疏分布,传感器间距如图 3 所示。4)FBG 传感器在安装时,用棉棒分别夹住光纤光栅两端,先用 704 胶粘贴一端,为扩大量程,需移动未胶结的另一端进行预拉伸,当波长增长 2 nm 左右时,停止预拉伸,用胶水粘结固定自由端。5)FBG 传感器全部安装结束后,FBG 传感器的 FC 接头使用酒精和棉球清洗干净,连接 FS2200RM 光纤光栅解调仪,检测其成活率,待成活率满足要求后,使用环氧树脂胶和植筋胶进行封装,使其表面与桩身表面齐平。FBG 传感器的部分参数见表 3,FBG 传感器的桩身布设见图 3。

表 2 模型管桩参数表

Table 2 Model Pipe Pile Parameter Table

试桩编号	外径/mm	内径/mm	桩端形式	弹性模量/GPa	泊松比
TP1	140	80	开口	72	0.3
TP2	140	80	闭口	72	0.3

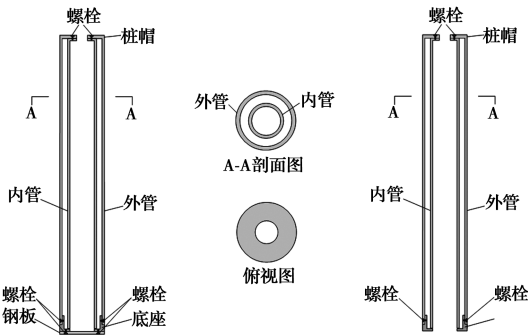


图 2 双壁模型管桩结构示意图

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

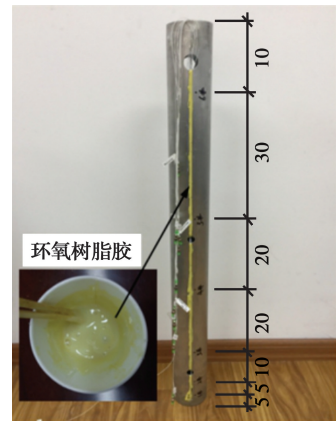


图 3 FBG 传感器布设图(单位:cm)

Fig. 3 Layout of the FBG sensor (unit: cm)

2 室内静力沉桩试验

2.1 光纤光栅传感器的布设

试验采用深圳简测科技公司生产的 JMFSS-04 增敏微型光纤光栅传感器(以下简称 FBG 传感器)测桩身应力。其中,模型桩 TP1 需要在模型桩内管和 外管各粘贴安装 6 个 FBG 传感器,总共 12 个传感器;模型桩 TP2 只在外管粘贴 6 个 FBG 传感器。

表 3 增敏微型 FBG 传感器参数表

Table 3 Sensitization micro FBG sensor parameter table

参数类型	波长间	中心波	量程/ $\mu\epsilon$	分辨率/ $\mu\epsilon$	使用温
	隔/nm	长/nm			
参数大小	± 3	1 510~1 590	$\pm 1 500$	1	-30~120

2.2 桩位的选择

依据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[16]中基桩的最小中心距为4倍桩径的规定,试验的两组模型管桩均布置在模型箱的中心位置,可忽略边界效应^[17]。

2.3 试验过程

在地基土制备完成后大约30 d,进行两根试验桩的静力沉桩试验。沉桩过程包括:1)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。2)打开系统主机,通过油泵控制千斤顶上升到一定高度,将试桩直立放到待压桩位,使用磁性盒式水平尺吸附在管桩桩身表面上,确定管桩是否垂直,防止发生偏心受压。3)待确定管桩直立后,再次通过系统主机控制油泵进行加压,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。4)将每个FBG传感器的传输线依次与其对应的采集仪器连接。5)待确认连接无误且参数调整完毕后,正式进行压桩试验前进行数据采集。6)整个沉桩过程分两次完成,中间一次停顿以增加千斤顶的下落高度,沉桩速率为300 mm/min,加载过程如图4所示。



图4 试验加载过程

Fig. 4 Test loading process

3 FBG 传感器数据处理

为研究不同桩端形式对桩侧单位摩阻力的影响,试桩通过桩身表面粘贴FBG传感器,并在沉桩过程中使用FS2200RM光纤光栅解调仪测得的光纤波长差 $\Delta\lambda_B$,依次通过式(1)~式(4)推算桩侧单位摩阻力。

应变变化值 $\Delta\lambda_B$ 的表达式为

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\lambda_B\Delta\varepsilon = K_e\Delta\varepsilon \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为波长差,nm; P_e 为光栅有效弹光系数; λ_B 为光线光栅中心波长,nm; $\Delta\varepsilon$ 为应变变化值; K_e 为灵敏度系数,pm/ $\mu\varepsilon$ 。

沉桩过程中桩身轴力 N 的表达式为

$$N_i = E_c\Delta\varepsilon A_p \quad (2)$$

式中: N_i 为第 i 个FBG传感器位置的桩身轴力,kN; E_c 为桩身混凝土弹性模量,MPa; $\Delta\varepsilon$ 为桩身应变变化值; A_p 为桩身横截面面积, mm^2 。

静力沉桩过程中的桩侧单位摩阻力的表达式为

$$Q_i = N_i - N_{i+1} \quad (3)$$

$$q_i = \frac{Q_i}{ul_i} = \frac{N_i - N_{i+1}}{\pi D l_i} \quad (4)$$

式中: Q_i 为第 i 截面的侧摩阻力,kN; q_i 为第 i 截面单位侧摩阻力,kPa; u 为桩的周长,m; l_i 为第 i 与 $i+1$ 截面之间的距离,m; D 为桩径,m。

4 试验结果及分析

4.1 沉桩过程压桩力分析

静力沉桩过程中的压桩力主要由桩侧摩阻力和桩端阻力组成,针对此次试验黏性土体环境,为了更好地观察沉桩过程不同桩端形式对试桩TP1和TP2压桩力的影响,绘制图5,以示意静力沉桩过程中压桩力变化。

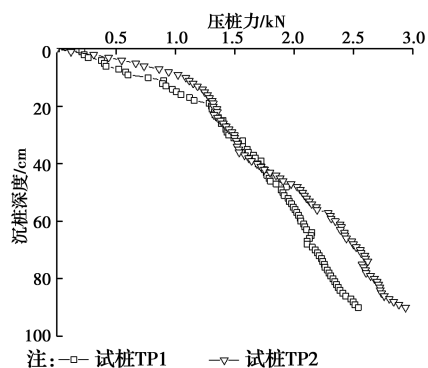


图5 静力沉桩过程压桩力变化

Fig. 5 Variation of pile force during static pile driving

由图5可以看出,两根试验管桩的压桩力均随着沉桩深度的增加近似呈线性增大趋势,且在其他条件相同的情况下,在整个沉桩过程中,试桩TP2比试桩TP1压桩力大,这是因为试桩TP1为开口管桩,桩底会逐渐形成土塞,土塞的形成需要一个过程,并且即使土塞高度逐渐趋于稳定,也达不到闭口管桩的封闭效果,所以,开口管桩的压桩力小于闭口

管桩^[18]。由图 5 还可以看出,沉桩深度到达 30 cm 时,两根试桩的压桩力出现相近现象,此现象持续至沉桩深度约 50 cm 左右,其相应压桩力变化范围为 1.3~1.6 kN;当沉桩深度为 90 cm 时,试桩 TP2 的最终压桩力为 2.94 kN,比相同直径、桩长的试桩 TP1 最终压桩力 2.54 kN 高出 16%,说明要达到同一贯入深度,闭口管桩需要更大的压桩力。

4.2 沉桩过程桩端阻力分析

对试桩 TP1、TP2 分别进行室内静力沉桩试验,通过整理资料可以看出,最大桩端阻力由桩底 1# FBG 传感器的数值表示,不同试桩在沉桩过程中的桩端阻力变化趋势反映出不同桩端形式对其荷载传递方式的影响,静力沉桩过程桩端阻力变化如图 6 所示。

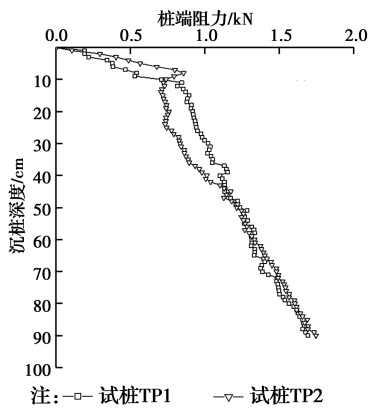


图 6 静力沉桩过程桩端阻力变化

Fig. 6 Change of pile end resistance during static pile sinking

由图 6 可以看出,当沉桩深度小于 10 cm 时,试桩 TP1 的桩端阻力小于试桩 TP2,主要是因为试桩 TP1 为开口管桩,在刚开始沉桩时,土塞高度较低,未完全形成,桩端阻力均未充分发挥,故其端阻力较小;当沉桩深度为 10~45 cm 时,出现试桩 TP1 的桩端阻力大于试桩 TP2 的情况,分析其原因:随着沉桩深度的增加,试桩 TP1 的土塞逐渐形成,高度变化较小,从而使桩端阻力逐渐增大;当沉桩深度大于 45 cm 时,试桩 TP1 的桩端阻力逐渐接近试桩 TP2,且呈线性增大趋势。闭口管桩试桩 TP2 从 1.10 kN 增至 1.75 kN,桩端阻力增长幅度约 37%,开口管桩试桩 TP1 从 1.13 kN 增至 1.70 kN,此阶段开口管桩桩端阻力增长幅度约 29%,其原因是:此时土塞高度基本稳定,闭塞效果增加,使得开口管

桩与闭口形式管桩端阻力差别甚小。由图 6 还可以看出,两根试桩达到最大沉桩深度时,试桩 TP1 桩端阻力达到 1.70 kN,试桩 TP2 桩端阻力达到 1.75 kN,开口管桩的桩端阻力略小于闭口管桩,说明开口管桩在黏性土中形成了稳定的土塞,其沉桩特性与闭口管桩非常相似,分析认为:此时土塞与桩管的内壁没有相对滑移,桩的承载力由桩端全截面承受的阻力和桩侧摩阻力构成^[19]。对于实际工程中以承受桩端阻力为主的管桩建议做成开口形式,可节约成本。

4.3 沉桩过程桩侧摩阻力分析

试桩 TP1、TP2 静力沉桩过程中的总桩侧摩阻力是通过桩身表面粘贴 FBG 传感器,并由 FS2200RM 光纤光栅解调仪测得的光纤的波长差,由式(1)~式(3)换算得到。其中,试桩 TP1 为双壁开口管桩,为研究其内、外管侧摩阻力的分布,在内、外管按相同间距沿桩身均匀布置 FBG 传感器,试桩 TP1 内、外管侧摩阻力分布如图 7 所示。

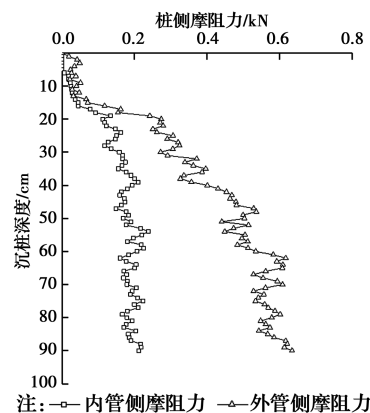


图 7 试桩 TP1 内、外管侧摩阻力分布

Fig. 7 Distribution of side frictional resistance of inner and outer tubes of test pile TP1

由图 7 可以看出,试桩 TP1 的内、外管侧摩阻力均随着沉桩深度的增加而增大,且外管侧摩阻力大于内管侧摩阻力,与刘清秉等^[8]研究的结论一致。当试桩 TP1 的沉桩深度在 10 cm 以内时,内、外管侧摩阻力均较小,基本不超过 0.1 kN。当沉桩深度超过 20 cm 时,外管侧摩阻力远大于内外管侧摩阻力,且外管的侧摩阻力从 0.21 kN 增至 0.63 kN,增长幅度约 66.7%,可以看出,此阶段增长速度较快;内管侧摩阻力从 0.04 kN 增至 0.07 kN,增长幅度约 45.7%,可以看出,内管侧摩阻力增长速率远

小于外管。当沉桩深度到达 90 cm 时,内、外管侧摩阻力达到最大值,分别为 0.21 kN 和 0.63 kN,外管侧摩阻力是内管侧摩阻力的 3 倍;说明开口试桩在沉桩过程中内壁摩阻力也逐渐发挥着传递上部荷载的作用,当土塞高度趋于稳定时,内管摩阻力固定在 0.2 kN 左右,而外管在桩侧摩阻力发挥方面则始终起主导作用。

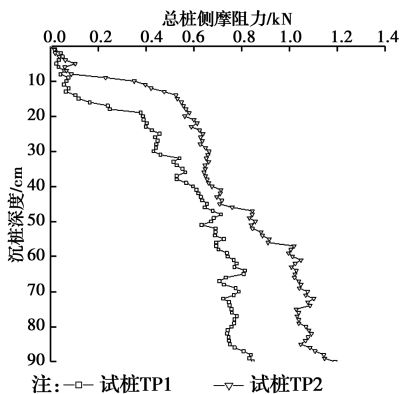


图 8 静力沉桩过程中总桩侧摩阻力变化

Fig. 8 Variation of friction resistance of total pile side during static pile sinking

由图 8 可以看出,试桩 TP1 的总桩侧摩阻力发展趋势与 TP2 相同,即:桩侧摩阻力随着沉桩深度的增加逐渐增大,且在同一沉桩深度处,TP2 的总桩侧摩阻力大于 TP1。原因是开口试桩 TP1 贯入过程切土能力强,所以,沉桩速度快且连续贯入,使得开口试桩在桩侧摩阻力的发挥上不如闭口试桩,因而数值上较小。

由图 8 还可以看出,桩端形式不管是开口还是闭口,在沉桩深度小于 10 cm 时,总侧摩阻力均较小,不超过 0.1 kN。这是因为,试桩入土深度较浅时,桩身与土之间未能紧密接触,桩身晃动导致浅层土松动,使得浅部土体总桩侧摩阻力较小。试桩 TP1 在 10~45 cm 沉桩深度范围内,总桩侧摩阻力的增长速率较快,分析认为:试桩 TP1 为开口管桩,在沉桩初期,土塞高度较小,桩侧摩阻力发挥主导作用,所以,桩侧摩阻力增长较快;当试桩 TP1 沉桩深度超过 45 cm 时,总桩侧摩阻力增长速度变缓,究其原因,当沉桩达到一定深度时,土塞已稳定,高度变化很小,具备了一定的闭口管桩效果,桩端阻力持续上升,承担了较大的压桩力,此时的桩侧摩阻力虽然持续增长,但增速降低。两根试桩在沉桩深度为

90 cm 时,总桩侧摩阻力均达到最大值,分别为 0.85 kN 和 1.19 kN,闭口试桩 TP2 的总桩侧摩阻力比开口试桩 TP1 高出 40%。

4.4 试桩桩身轴力结果分析

试桩 TP1 是开口双壁管桩,在静力沉桩试验过程,土塞的高度随着贯入深度依次增加情况见表 4。试桩 TP1、TP2 的桩身轴力通过式(1)和式(2)求出,绘制出的试桩 TP1 内、外管轴力、TP2 桩身轴力分布曲线见图 9~图 11 所示。

表 4 试桩 TP1 的土塞高度

Table 4 Soil plug height of test pile TP1

贯入深度/cm	土塞高度/cm
10	
20	14
40	22
60	28
90	33

由表 4 可以看出,黏性土体静力沉桩过程中,开口试桩 TP1 随着贯入深度的增加,土塞逐渐形成并趋于稳定,且在最大沉桩深度处,土塞高度达到最大值 33 cm。

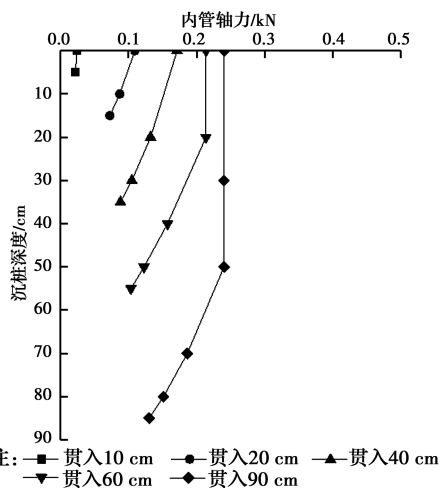


图 9 试桩 TP1 内管轴力分布图

Fig. 9 Axial force distribution diagram of inner tube of test pile TP1

由图 9、图 10 可以看出,试桩 TP1 内、外管轴力在不同贯入深度下均随着沉桩深度的增加而减小,且轴力的分布曲线斜率逐渐减小,说明桩侧摩阻力由上而下逐渐发挥作用,且随着沉桩深度增加、内管土塞高度逐渐增大并趋于稳定,相应的桩侧摩阻力就越大,对轴力的影响也越显著。从图中还可以看

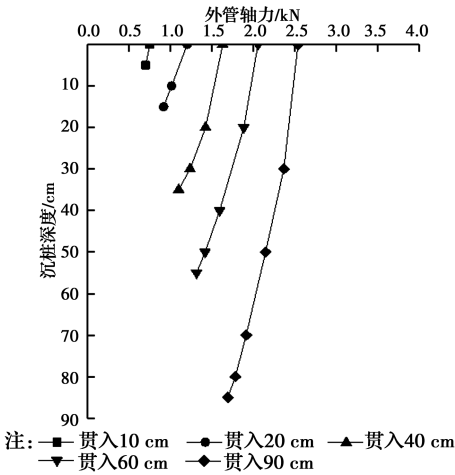


图 10 试桩 TP1 外管轴力分布图

Fig. 10 Axial force distribution diagram of test tube TP1 outer tube

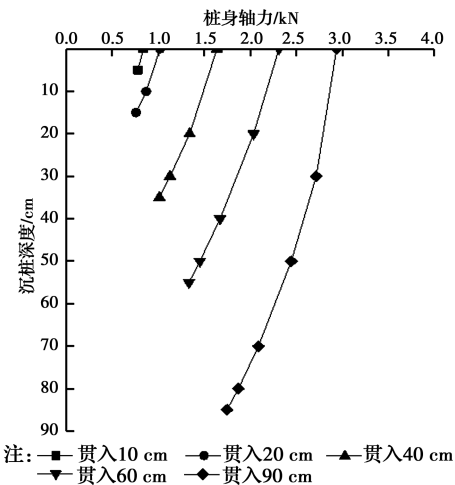


图 11 试桩 TP2 桩身轴力分布图

Fig. 11 Axial force distribution diagram of test pile TP2 pile

出,贯入深度从 10 cm 到 90 cm 的过程中,距桩端同一距离的内、外管截面轴力逐渐变大。这主要是因为,随着贯入深度的增加,土塞高度也随之增加并逐渐趋于稳定,此阶段土塞对内管的挤密作用越明显,导致黏聚力增加、侧压力不断增大,从而引起轴力变大。

对比图 10、图 11 可以看出,试桩 TP1 的外管轴力与 TP2 的桩身轴力分布规律相似,但闭口形式的模型管桩 TP2 在轴力分布上整体要比开口形式的试桩 TP1 大,说明不同的桩端形式会影响试桩沉桩过程中桩身轴力的传递。

4.5 试桩桩侧单位摩阻力结果分析

假定桩侧摩阻力沿管桩桩身均匀分布,根据各试桩沿桩身的轴力变化,按照式(3)、式(4)可以得到各试桩在不同贯入深度下的桩侧单位摩阻力随沉桩

深度的分布曲线,如图 12~图 14 所示。图中取上、下两相邻 FBG 传感器之间的中点作为该段深度对应的单位侧摩阻力的纵坐标,进行试桩 TP1 内管分布曲线的绘制。

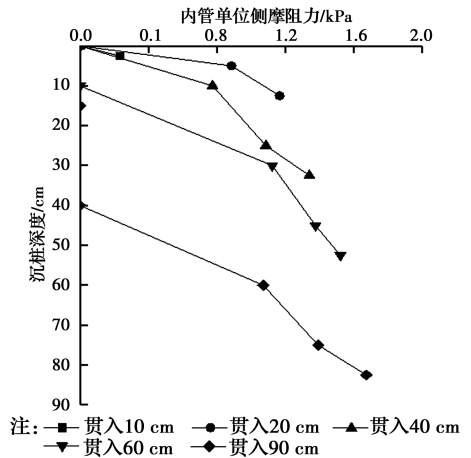


图 12 试桩 TP1 内管单位侧摩阻力分布图

Fig. 12 Distribution of the side frictional resistance of the inner tube of the test pile TP1

由图 12 可以看出,在不同贯入深度下,试桩 TP1 内管的单位侧摩阻力随沉桩深度的增加呈不均匀增大趋势,总体呈上小下大分布。分析其原因:在同一贯入深度下,随着沉桩的不断进行,沉桩深度不断增加,内管中的土塞不断形成,并且土塞高度不断上升,在这个过程中,下部土塞逐渐变得比上部密实,上层土体的扰动作用造成黏聚力一定程度降低,内摩擦角也相应地有所降低,而下部土塞对内管侧壁的挤压作用更明显,使得沉桩过程内管下部桩侧摩阻力逐步增大^[20]。

此外,比较不同贯入深度下桩端 1# 和 2# FBG 传感器之间的单位侧摩阻力可以发现,贯入深度从 10 cm 到 90 cm 的过程中,1# 和 2# FBG 传感器之间的单位侧摩阻力依次为 0.19、1.17、1.34、1.52、1.67 kPa;这表明随着贯入深度的增加,内管下部 1# 和 2# FBG 传感器之间的土塞高度逐渐上升且上升速度逐渐降低,从而受到土塞挤压更强烈,使得单位侧摩阻力总体呈不均匀递增趋势。

由图 13 可以看出,不同贯入深度下,外管的单位侧摩阻力随沉桩深度增加的变化趋势与内管相同。且当贯入深度达到最大 90 cm 时,桩侧单位侧摩阻力的分布呈下大上小的形式,与文献[21-22]提到的桩侧摩阻力三段式分布相似。即:当试桩贯入地面深度小于 10 cm 时,由于初始下沉过程桩身晃动、浅层土体位移,使得桩身与土体产生小缝隙,从

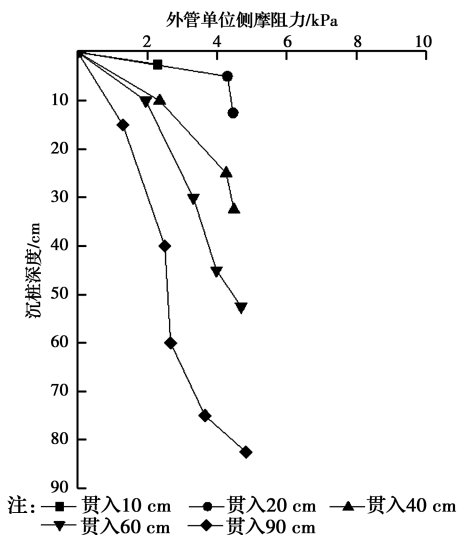


图 13 试桩 TP1 外管单位侧摩阻力分布图

Fig. 13 Distribution of the side frictional resistance of the outer tube of the test pile TP1

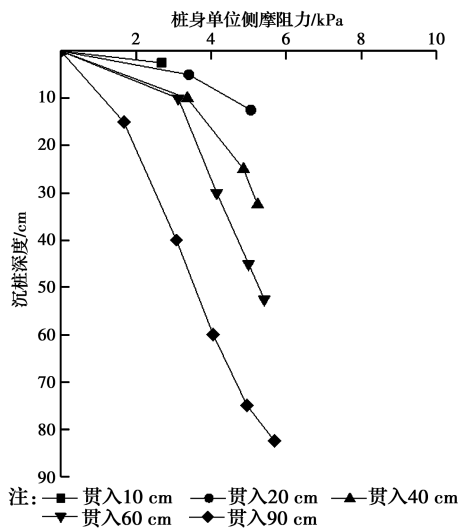


图 14 试桩 TP2 桩身单位侧摩阻力分布图

Fig. 14 Distribution of the side frictional resistance of the pile body of the test pile TP2

而此段桩侧摩阻力最小;在桩身中部区域,桩周土提供的水平侧压力较大,从而使单位侧摩阻力逐渐增大;在最大沉桩深度处即外管桩端部分,因桩-土直接接触的原因,此处的桩周土的水平侧压力达到最大值,对外管桩身的水平挤压更强烈,因此,单位侧摩阻力达到最大值。

另外,通过比较同一沉桩深度处的单位侧摩阻力分布可以发现,随着贯入深度的增加,同一沉桩深度处的单位侧摩阻力逐渐减小,即:桩侧摩阻力存在“退化效应”^[23]。原因可能是:贯入深度越大,上部土层的扰动程度远比下部土层严重,使得桩与土的接触空隙增大,内摩擦角有一定幅度的降低,导致桩侧摩阻力逐渐减少。另一个原因是,桩入土之前,桩身相对粗糙度较大;入土之后,由于细颗粒填充了桩身的凹凸表面使相对粗糙度减少,也会导致摩擦角减小,引起桩侧摩阻力退化。

观察图 14 中的试桩 TP2 桩身单位侧摩阻力分布曲线发现,其单位侧摩阻力随沉桩深度的变化规律与试桩 TP1 外管单位侧摩阻力分布相似。通过对比最大贯入深度下各试桩外管单位侧摩阻力的分布发现,最大贯入深度范围内,各单位侧摩阻力虽然均呈增大趋势,但在数值方面试桩 TP2 大于 TP1。这是因为试桩 TP1 是开口管桩,沉桩过程中桩端对土的剪切作用强烈,沉桩速度较快,因而单位侧摩阻力最小。

4.6 沉桩过程受力性状分析

图 15、图 16 所示为两根模型管桩在静力沉桩

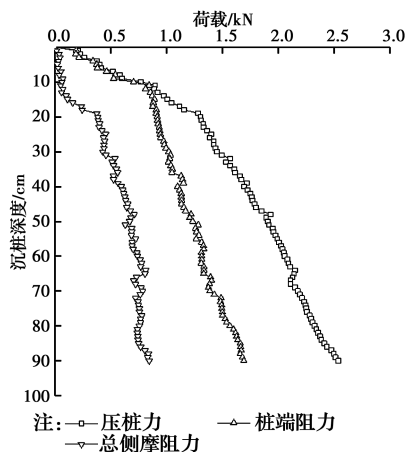


图 15 试桩 TP1 沉桩全过程荷载曲线

Fig. 15 Load curve of the whole process of test pile TP1 sinking pile

过程中总的受力状态。

由图 15、图 16 可以看出,两根试桩沉桩过程的压桩力、桩端阻力等荷载均随着沉桩深度的增加逐渐变大,且沉桩深度均小于 10 cm 时,压桩力等于桩端阻力。试桩 TP2 在压桩力、桩端阻力、桩侧摩阻力方面均比试桩 TP1 大,与蒋跃楠等^[9]的研究结果一致。这可能是由桩端形式导致的,试桩 TP1 为开口管桩,在沉桩过程中会形成土塞,经过量测,土塞高度随着管桩沉桩深度的增加逐渐趋于稳定,起到类似闭口管桩的效果,但因为土塞是逐渐形成的,所以,闭口效应较弱,导致试桩 TP1 的压桩力等荷载较小。沉桩结束时,两根试桩的桩端阻力、桩侧阻力占压桩力的百分比见表 5。

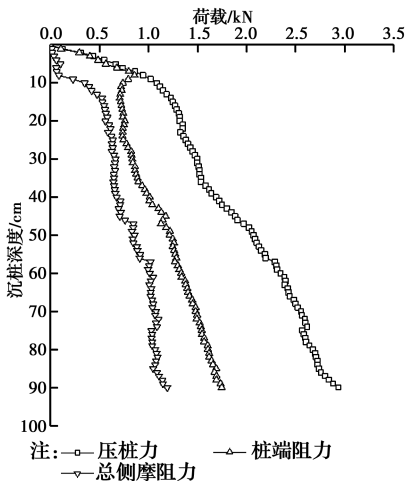


图 16 试桩 TP2 沉桩全过程荷载曲线

Fig. 16 Load curve of the whole process of test pile TP2 sinking pile

表 5 沉桩结束时桩端阻力、桩侧阻力占压桩力的百分比

Table 5 Percentage of pile end resistance and pile side resistance at the end of pile sinking

试桩 编号	压桩 力/kN	桩端阻 力/kN	百分比/%	桩侧摩 阻力/kN	百分比/%
TP1	2.538	1.692	66.7	0.846	33.3
TP2	2.938	1.747	59.5	1.191	40.5

由表 5 可知,黏性土中的静力压桩、开口管桩和闭口管桩的桩端阻力占比均超过 50%,即桩端阻力承担了大部分的压桩力。

5 结论

为研究不同桩端形式对桩基承载性状的影响,通过静力沉桩试验,对两根模型试桩荷载传递规律和承载性能进行对比分析,并针对黏性土地基情况,得到如下结论:

1)两根模型管桩的压桩力均随着沉桩深度的增加近似呈线性增大趋势,在沉桩深度达到 90 cm 时,试桩 TP1、TP2 压桩力均达到最大值,分别为 2.54、2.94 kN,闭口管桩比开口管桩高出 16%。

2)黏性土中的静力压桩,开口管桩和闭口管桩的桩端阻力占比均超过 50%,说明桩端阻力承担了大部分的荷载,表现出较好的端承特性,压桩力中的桩侧摩阻力占比小于 45%。

3)在不同贯入深度下,试桩 TP1 内、外管轴力和试桩 TP2 桩身轴力均随着沉桩深度的增加而不断递减,且轴力分布曲线的斜率逐渐减小。在贯入深度为 90 cm 时,土塞高度达到最大值 33 cm。

4)在最大贯入深度下,桩侧单位侧摩阻力呈下大上小的三段式分布形式。并且,随着贯入深度的增加,同一沉桩深度处的单位侧摩阻力逐渐减小,表明桩侧摩阻力存在“退化效应”。当双壁开口管桩 TP1 沉桩深度达到最大时,外管侧摩阻力是内管侧摩阻力的 3 倍。

参考文献:

- [1] 刘俊伟. 静压桩沉桩过程及承载力性状研究[D]. 山东青岛: 青岛理工大学, 2008.
LIU J W. Study on installation and bearing capacity character of jacked pile [D]. Qingdao, Shandong: Qingdao Tehcnology University, 2008. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] 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 static penetration of prefabricated pile into layered soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 490-492. (in Chinese)
- [4] 马海龙. 开口桩与闭口桩承载力时效的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(Sup2): 3349-3353.
MA H L. Field test on time effect of bearing capacity on end-open pile and end-closed pile [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (Sup2): 3349-3353. (in Chinese)
- [5] PAIK K, SALGADO R. Determination of bearing capacity of open-ended piles in sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(1): 46-57.
- [6] 刘钊, 赵春风. 不同桩端土承压钻孔灌注桩模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 490-495.
LIU K, ZHAO C F. Model test study of bored piles under different pile end soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 490-495. (in Chinese)
- [7] 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制研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(12): 4305-4312.
LI J P, CAO X B, LI L, et al. Centrifugal model test and mechanism study of jacked pile and CPTU penetration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (12): 4305-4312. (in Chinese)

- [8] 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)
- [9] 蒋跃楠, 黄广龙. 砂土中静压桩的桩端作用效应分析[J]. 建筑科学, 2016, 32(11): 74-82.
JIANG Y N, HUANG G L. Analysis of the effect of pile ends in static pressure piles in sand [J]. Journal of Building Science, 2016, 32(11): 74-82. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 钱峰, 刘干斌, 齐昌广, 等. 饱和黏土中静压沉桩模型试验及数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 56-61, 69.
QIAN F, LIU G B, QI C G, et al. Static pressure pile-sinking model tests and numerical simulation on saturated clay [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, 43(5): 56-61, 69. (in Chinese)
- [12] 鲁嘉, 喻军, 陈金祥, 等. 砂土中成桩工艺对桩基承载性能影响的室内模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 1055-1063.
LU J, YU J, CHEN J X. Laboratory model test research on influence of piling techniques on bearing performance of pile foundations in sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 1055-1063. (in Chinese)
- [13] 寇海磊, 张明义, 刘俊伟. 基于光纤传感技术静压桩承载力时效性机理分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1082-1088.
KOU H L, ZHANG M Y, LIU J W. Analysis of time-dependent mechanism of bearing capacity of static pressed pile based on optical fiber sensing technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1082-1088.
- [14] CHAN T H T, YU L, TAM H Y, et al. Fiber bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation [J]. Engineering Structures, 2006, 28(5): 648-659.
- [15] 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
Geotechnical test method standards: GB/T 50123-1999 [S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [16] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Technical Specifications for Building Pile Foundation: JGJ 94-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [17] 张涛. 地下结构振动台试验刚性模型箱边界效应研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
ZHANG T. Study on boundary effect of rigid model box for shaking table test of underground structure [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [18] 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.
- [19] YASUFUKU N, OCHIAI H, OHNO S. Pile end-bearing capacity of sand related to soil compressibility [J]. Soils and Foundations, 2001, 41(4): 59-71.
- [20] COOKE R W, PRICE G, TARR K. Jacked piles in London Clay: a study of load transfer and settlement under working conditions [J]. Géotechnique, 1979, 29(2): 113-147.
- [21] 李雨浓, 李镜培, 赵仲芳, 等. 基于静力触探试验的静压桩沉桩阻力估算[J]. 路基工程, 2010(3): 67-69.
LI Y N, LI J P, ZHAO Z F, et al. Estimation of resistance of static pressure pile sinking based on cone penetration test [J]. Subgrade Engineering, 2010(3): 67-69. (in Chinese)
- [22] 储王应, 王能民. 静力压桩沉桩阻力分析与估算[J]. 岩土工程技术, 2000, 14(1): 25-28.
CHU W Y, WANG N M. Analysis and estimation of resistance of piles in static piles [J]. Geotechnical Engineering Technology, 2000, 14(1): 25-28, 46. (in Chinese)
- [23] 董光辉, 张明义, 杨敏, 等. 考虑侧阻退化的静压桩沉桩阻力的计算公式及工程应用[J]. 结构工程师, 2008, 24(3): 113-116, 125.
DONG G H, ZHANG M Y, YANG M, et al. Study on penetration resistance of jacked piles considering friction fatigue [J]. Structural Engineers, 2008, 24(3): 113-116, 125. (in Chinese)