

桑松魁,康文,王永洪,等.基于光纤传感技术静压 PHC 管桩贯入过程试验[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(2): 28-36. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.005

SANG S K, KANG W, WANG Y H, et al. Experimental Research Based on Optical Fiber Sensing Technology for Static Pressure PHC Pipe Pile Infiltrating Process [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(2): 28-36. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.005

基于光纤传感技术静压 PHC 管桩贯入过程试验

桑松魁¹,康文³,王永洪^{1,2*},白晓宇^{1,2},张明义^{1,2},苗德滋¹,杨苏春¹

(1.青岛理工大学 土木工程学院,山东 青岛 266033;

2.青岛理工大学 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.青岛市市北区历史城区管理委员会,山东 青岛 266000)

摘要:为探讨桩端阻力和桩侧摩阻力对静压桩贯入机制的影响以及贯入过程中的荷载传递规律,通过在桩身埋设光纤光栅(FBG)传感器,对足尺闭口 PHC 管桩静力压入层状土地基的沉桩过程进行监测.试验结果表明:光纤光栅传感器的稳定性好、抗干扰性强,对桩身应力的监测效果较好;压桩力的变化规律基本反映了土层的分布情况,桩端土层的软硬程度制约着压桩力的变化;桩端由黏土层进入到粉土层时,压桩力平均增加 2.5 倍,桩侧摩阻力平均增加 1.7 倍且占沉桩阻力的 44.99%;桩端阻力受桩端土性的影响较大,粉土层的桩端阻力约为黏土层的 2 倍且占沉桩阻力的 59.84%;桩端由硬土层进入软土层时,需考虑沉桩速度和桩身表面切向力对桩侧摩阻力的影响;在沉桩过程中,随着贯入深度的增加,同一标高处桩侧水平应力逐渐释放,桩侧摩阻力不断减小且其退化现象明显.

关键词:FBG 传感器;静力压入;闭口 PHC 管桩;桩身应力;侧摩阻力

中图分类号:TU473 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2021)02-0028-09

Experimental Research Based on Optical Fiber Sensing Technology for Static Pressure PHC Pipe Pile Infiltrating Process

SANG Songkui¹, KANG Wen³, WANG Yonghong^{1,2}, BAI Xiaoyu^{1,2},
ZHANG Mingyi^{1,2}, MIAO Dezi¹, YANG Suchun¹

(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 University of Technology, Qingdao 266033, China;

3. Management Committee of Historic District, Shibei District, Qingdao 266000, China)

Abstract: To explore the influence of the tip resistance and pile side friction for the mechanism of static pressure pile penetration and the load-transfer rule during the penetration process, the pile-sinking process was monitored, that of pressing a fully-closed PHC pipe pile in a layered soil foundation with static pressure successfully, through the method of burying FBG fiber grating sensors in a pile. The experimental results show that the fiber grating sensor has better stability, strong anti-jamming performance, and is good at monitoring the

收稿日期:2018-10-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778312);山东省重点研发计划资助项目(2018GSF117010)

*通信作者,E-mail:hong7986@163.com

effect on the pile stress. The shifty law of the pile force basically reflects the distribution of the soil layer, and the hardness of the soil layer at the pile end limits the value of pile force. When the pile end enters the silt layer from the clay layer, the pressure pile force increases by an average of 2.5 times and the pile side friction increases by an average of 1.7 times, 44.99% of the pile resistance. The pile-end resistance is affected by the pile end soil obviously, and the resistance at the end of silt layer is about twice that that in clay layer, 59.84% of the pile resistance. When the pile end enters into soft soil layer from hard soil layer, the impact of pile driving speed and the tangential force on the surface of pile body must be considered. During the pile-sinking process, as the increase of the depth of penetration, the horizontal stress on the pile side at the same elevation is gradually released, and the friction resistance at the pile side degrades significantly.

Keywords: FBG fiber optic sensor; jacked pile; closed PHC pipe pile; pile stress; side friction resistance

预应力高强度混凝土管桩(PHC)具有承载力高、保护环境、贯入力强等优点,成为桩基础工程中常用的桩型^[1].鉴于管桩的制作和自身的特点以及传统的测试元件易受环境的影响,传统的测试元件成活率与可靠性相对较低,应力测试比较困难.目前,对静压管桩贯入全过程承载力现场试验的研究较少,诸多学者主要以室内模型试验研究为主.室内模型试验方面,李雨浓等^[2]通过室内模型试验,模拟了层状土中的静力压入模型桩,分析了沉桩过程中的压桩力、桩端阻力及桩侧摩阻力随贯入深度的变化规律,此方法与实际情况虽然较为贴近,但是由于现场中的土层是渐变,所以与现场土层相比还有一定的局限性;胡立峰等^[3]在钢管模型桩内壁粘贴应变片,研究了贯入过程中桩端阻力以及桩侧摩阻力随深度的变化规律;周健等^[4]通过室内模型试验以及 PFC^{2D}颗粒流软件,对砂土中静压桩的贯入过程进行模拟分析,揭示了沉桩过程中的桩端阻力、桩侧摩阻力随贯入深度的变化规律及临界深度.现场试验方面,张明义等^[5]通过安装自制的桩端压力传感器测出贯入过程中的桩端阻力以及沉桩过程中的压桩力,从而将桩端阻力与桩侧摩阻力分离,分别研究它们随贯入深度的变化规律;施峰等^[6]将安装钢筋计的钢筋笼插入管桩桩芯内,浇筑混凝土与管桩合为一体,实测压桩力与贯入深度的关系,分析桩侧摩阻力、桩端阻力的变化规律,但该方法增大了管桩的刚度,改变了桩体的受力状态;胡永强等^[7]从摩擦学的角度分析了端承型静压桩在沉桩过程中桩侧摩阻力的变化规律,并进一步研究了沉桩结束后桩侧摩阻力对承载力时效性的影响,解释了诸多用传统理论难以合理解释的现象.

近几年来,随着光纤传感技术的不断发展以及测试方法的日益完善,光纤测试元件正逐渐代替传统测试元件^[8-10].与传统测试元件相比,光纤测试元件具有抗干扰强、精度高、稳定性好等优点,当瞬时荷载作用于建筑物时,光纤测试元件能够很好地监测出应力与温度^[11-12].寇海磊等^[13]通过在 PHC 管桩桩身上开槽埋入光纤光栅传感器,对贯入成层土地基中的开口 PHC 管桩进行了监测,得到桩侧摩阻力与桩端阻力随贯入深度的发展变化规律;朴春德等^[14]采用光纤传感器对钻孔灌注桩桩身应力及桩侧摩阻力进行监测,得到了较好的结果;余小奎等^[15]利用光线传感技术中的布里渊光时域反射计(BOTDR)对锤击 PHC 管桩成功进行测试;宋建学等^[16-18]采用光纤测试技术对静载阶段的桩身应力进行监测,取得的效果较为理想.光纤传感技术在桩基工程中已取得一定的成果,但是现有研究均未考虑由于土层深度的增加,桩身温度变化引起桩身应变的问题.本文为了避免温度的影响,采用了低温敏型 FBG 传感器,FBG 传感器可以通过自身的构造消除由于温度变化而引起的桩身应变,从而实现了剔除由温度变化引起的桩身应变,使得研究结果更符合实际,所得规律与结论更具有说服力.

本文利用低温敏型 FBG 传感器对闭口 PHC 管桩静力压入成层土地基桩身应力及桩侧摩阻力进行监测,从压桩力、桩身应力、桩身阻力等方面分析了静压桩的沉桩过程及荷载传递.

1 FBG 光纤传感原理

FBG 传感器以其灵敏度高、布置形式灵活、能够实现实时监测等优点,在土木工程领域得到广泛应用.其基本原理是根据测量结果会因环境温度或应变的变化来改变其反射波的波长,反射回去的中心波长符

合以下公式:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda. \quad (1)$$

式中: λ_B 为光线光栅的中心波长; n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率; Λ 为光纤光栅栅距.

当 FBG 传感器受到温度变化或者受到拉、压力作用时,会引起光栅栅距发生变化,从而改变光纤纤芯的有效折射率,光纤光栅的中心波长与应变的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\Delta\varepsilon + (\alpha_f + \zeta)\Delta T. \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为中心波长的变化量; p_e 为光栅的有效弹光系数; $\Delta\varepsilon$ 为应变变化值; α_f 为光栅热膨胀系数; ζ 为光栅热光系数; ΔT 为温度变化量.

为了除去由于外界温度以及热光效应所引起的光纤光栅中心波长的变化,利用传感器内部构造中的夹持钢管与夹持支座产生膨胀所引起的光栅波长变化量与其抵消,从而解决了由于外界温度变化引起的光纤光栅中心波长的变化^[19],计算公式如式(3)所示.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = S_\varepsilon\left(\Delta\varepsilon + \frac{-2\alpha_2L_2 + \alpha_1L_1}{L_f}\Delta T\right) + S_T\Delta T = S_\varepsilon\Delta\varepsilon + \left(S_\varepsilon\frac{-2\alpha_2L_2 + \alpha_1L_1}{L_f} + S_T\right)\Delta T. \quad (3)$$

式中: S_ε 为应变敏感系数, $(\mu\varepsilon)^{-1}$, $S_\varepsilon = 1 - p_e = 0.784$; α_1, α_2 为外界构件与夹持构件的热膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$, $\alpha_1 = 10 \times 10^{-6}$, $\alpha_2 = 11 \times 10^{-6}$; L_1, L_2 为外界构件与夹持构件的长度, $L_1 = 100 \text{ mm}$, $L_2 = 50 \text{ mm}$; S_T 为温度敏感系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$, $S_T = \alpha_f + \zeta = 7.35 \times 10^{-6}$; L_f 为光纤光栅的长度, $L_f = 10.6 \text{ mm}$.

将各系数代入式(2)可知:

$$S_\varepsilon\frac{-2\alpha_2L_2 + \alpha_1L_1}{L_f} + S_T = 0. \quad (4)$$

由式(4)可知:传感器自身构造消除了因为温度变化而引起的光纤光栅中心波长的变化,从而也证明了低温敏型 FBG 传感器的光纤光栅中心波长的变化是由应变变化引起的,得出式(5).

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = S_\varepsilon\Delta\varepsilon = (1 - P_e)\Delta\varepsilon. \quad (5)$$

2 试验方案

2.1 试验场地

试验场地位于山东省东营市河口区湖滨路以西、河兴路以北.属于黄河三角洲第四纪冲积平原地貌,表层覆盖厚 0.9~5.3 m 回填土,场地内主要分布粉质黏土层和粉土层.地下水位埋深为 0.30~3.00 m.场地土层参数如表 1.

表 1 土层参数

土层名称	厚度 h/m	含水率 $w/\%$	重度 $r/(\text{kN}/\text{m}^2)$	孔隙比 e	黏聚力 c/kPa	内摩擦 角/ $^{\circ}$	压缩模量 E_s/MPa
①素填土	0.9~5.3	30.6	18.5	0.867	13.8	6.8	4.1
②粉土	0.3~2.5	28.8	18.6	0.803	8.7	20.1	8.1
②粉质黏土(夹)	0.3~1.1	31.5	18.3	0.890	16.9	7.3	4.6
③粉质黏土	0.3~1.9	30.9	18.3	0.876	17.6	7.4	4.8
④粉土	0.7~4.0	28.3	18.7	0.794	8.7	21.0	8.7
⑤粉质黏土	2.6~4.6	31.7	18.3	0.895	17.5	6.8	4.6
⑥粉土	0.8~3.8	28.3	18.7	0.793	10.3	20.6	10.2

2.2 试验设置

试验采用 PHC-A400(95) 型预应力混凝土管桩作为试验桩,桩长为 12 m,试桩编号分别为 P_1, P_2 , 为

了减小边界效应对沉桩过程的影响,试桩 P_1 与 P_2 之间的间距设置为 2 m (大于 4 倍的桩径),所以试桩 P_1 和 P_2 沉桩位置处各土层的厚度并不是完全一致,土层分布可能会存在较小的差异性,但贯入完成后桩端均位于粉土层.在安装传感器之前,首先在桩身划线定位,然后再用开槽机开深度为 2 cm 的浅槽,开槽之后将安放传感器的位置找平,其目的是使传感器安装平直,防止在压桩过程中传感器出现偏心受压现象.其次,将传感器的固定支座用植筋胶将其固定在浅槽内,待植筋胶产生强度之后再布置好光纤传感器 (FBG 传感器),光纤传感器的光缆线从桩顶钻孔引出,从靠近桩端的传感器进行编号,分别为 1[#], 2[#], 3[#], 4[#], 5[#], 6[#],并且在试桩 P_1 的 2[#]和 3[#]传感器的中间位置安装一个 FBG 温度传感器,监测沉桩过程中温度的变化.布置完毕之后用植筋胶将槽密封并使其与桩身表面齐平,安装过程如图 1 所示.在试验桩上设置 6 个测量断面,每个测量断面上安装 1 个 FBG 传感器,从桩端分别按照 1D, 2D, 4D, 8D, 12D (D 为桩身直径)的间距分布,如图 2 所示.桩端处传感器的中心距桩端的距离为 20 cm,避免桩端端头板的影响.

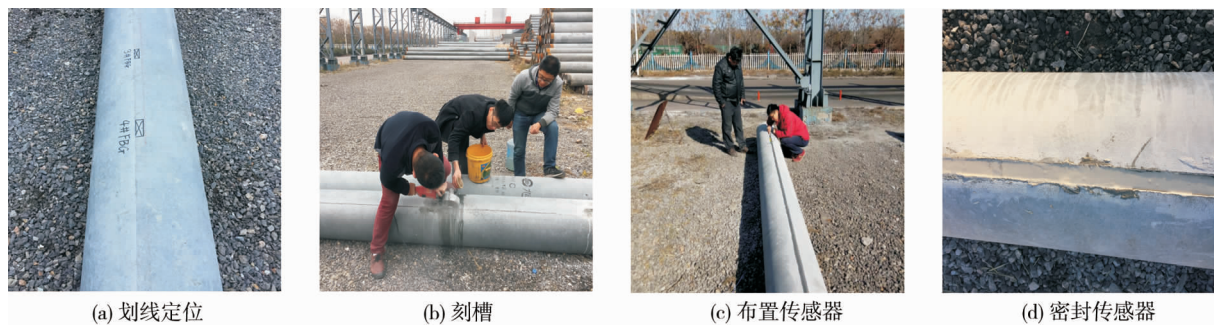


图 1 FBG 传感器安装过程

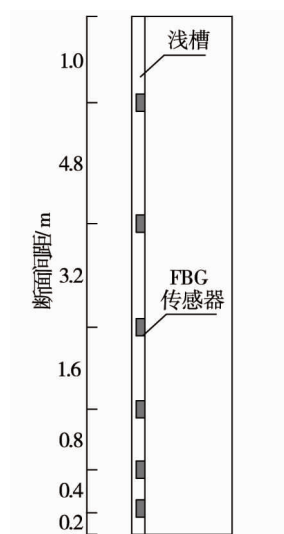


图 2 FBG 传感器布置

2.3 试验过程

试验采用 680 t 液压静力压桩机,最大行程为 1.8 m.由于静压机的自身原因,在沉桩过程中随着贯入深度的增加,贯入速率难以控制在固定值.沉桩速度约为 1.8~3.0 m/min,在沉桩初期由于贯入阻力较小,沉桩速度略大,后期随着贯入深度的增加,沉桩阻力也逐渐增加,沉桩速度也随之减小.Bond 等^[20]将贯入速率大于 0.4~0.6 m/min 定义为快速贯入,贯入速率为 0.005~0.1000 m/min 定义为慢速贯入,按照上述规定,本次试验沉桩过程均属于快速贯入.沉桩过程中以桩长作为终压控制标准.试验数据的采集采用葡萄牙生产的 FS 2200RM-Rack-Mountable Bragg Meter 解调仪直接采集到光纤光栅中心波长的波长差,根据式(5)得到贯入过程中的桩身应变.

3 试验结果分析

根据埋设的 FBG 温度传感器可测试出在沉桩过程中桩周土体温度的变化,由监测数据绘制出了温度差与压桩行程的变化曲线,如图 3 所示.

由图 3 可以看出:沉桩刚开始即 FBG 温度传感器刚刚入土时,温度差变化值较小,温度差在 0 °C 左右,这是因为地表土体与外界大气层会进行温度传递,导致地表土体的温度变化较小.随着桩身的不断贯入,温度差值逐渐增大,表明随着贯入深度的增加,桩周土体的温度逐渐升高,这是因为试验是在冬季进行的,随着贯入深度的增加,桩周土体的温度明显高于地表土体的温度,特别是桩身位于地下水水位以下时,桩周土体的温度差值增长较快.当沉桩时间达到 500 s 之后,温度差值增长较慢,说明超过一定深度之后桩周土体的温度变化较小,到沉桩结束时温度差值最大为 2.6 °C.

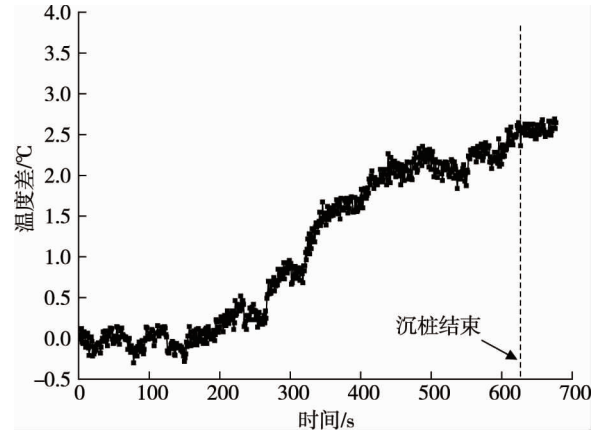


图 3 温度差与压桩行程的变化曲线

根据图 3 还可以看出:随着桩身的贯入,一定存在温度的变化.所以试验采用低温敏型传感器,此传感器可以通过自身的构造消除由于温度变化而引起的桩身应变,从而实现了剔除由温度变化引起的桩身应变.

根据试验所测数据与式(5)可得到桩身应变,由桩身应变可得到桩身应力、桩身轴力,计算公式如式(6)和式(7)所示.

$$\sigma = E\Delta\varepsilon; \quad (6)$$

$$N = \sigma A. \quad (7)$$

式中: σ 为桩身应力, kPa; E 为桩身弹性模量; $\Delta\varepsilon$ 为桩身应变变化值; N 为桩身轴力, kN; A 为桩身横截面积, m^2 .

根据桩身竖向荷载传递关系,可计算出桩侧单位摩阻力,计算公式如式(8)所示.

$$q_{sik} = \frac{N_i - N_{i+1}}{A_i}. \quad (8)$$

式中: q_{sik} 为第 i 分层桩侧单位摩阻力, kPa; N_i 为第 i 断截面轴力, kN; N_{i+1} 为第 $i+1$ 断截面轴力, kN; A_i 为第 i 分层桩侧表面积, m^2 .

3.1 压桩力随贯入深度的变化规律

根据试验数据,绘制得到的压桩力随贯入深度的变化曲线如图 4 所示.

由图 4 可以看出:随着桩身贯入深度的增加,压桩力呈增大趋势,曲线的变化规律基本反映了土层的变化.在贯入深度小于 5 m 时,试桩 P_1 , P_2 的变化规律基本一致,且压桩力增加的幅度较缓慢.当桩身继续贯入,桩端在第④层土层下沉时,压桩力明显增加,试桩 P_1 的压桩力由 416.24 kN 增加到 1 159.92 kN,增加约 2.8 倍.试桩 P_2 的压桩力由 395.55 kN 增加到 855.37 kN,增加约 2.2 倍,平均增加约 2.5 倍.当桩身继

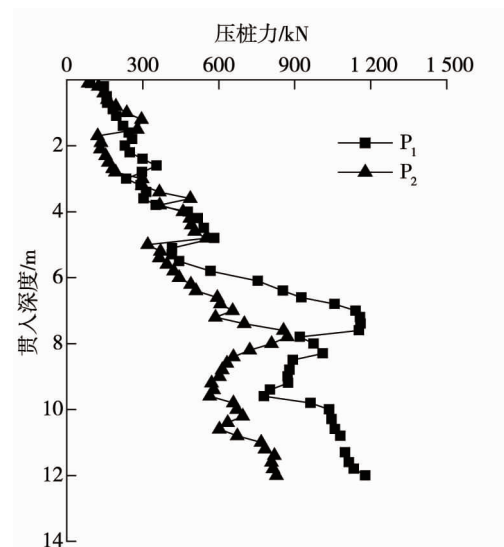


图 4 压桩力随贯入深度的变化曲线

续贯入,桩端进入粉质黏土层时,压桩力减小,试桩 P_1 的压桩力由 1 159.92 kN 减小到 778.26 kN,减小幅度约为 32.9%。试桩 P_2 的压桩力由 855.37 kN 减小到 564.74 kN,减小幅度约为 33.98%。当贯入深度超过 10 m 之后,即桩端进入粉土层,压桩力又逐渐增加。桩端从粉质黏土的软土层到粉土的硬土层时,压桩力增幅较大,继续贯入桩端进入黏土层时,压桩力又减小,当桩端再次进入粉土层时,压桩力又呈增大趋势,说明桩端土层的软硬程度制约着压桩力的变化,桩端所处的土层越硬,压桩力就越大。由于光纤光栅传感器解调仪的数据采集频率较低,导致压桩力在土层交界面处的数值发生突变。有关研究表明^[21],桩尖处于硬土层中且桩尖以下一定范围内存在软土层时,会显著地降低桩尖阻力。当桩尖以下 $2.5D$ (D 为桩身直径) 范围内存在软土层时,沉桩阻力主要取决于桩尖以下 $2.5D$ 范围内土层强度的平均值,这就是试桩 P_1 , P_2 的压桩力存在压力差的主要原因。

3.2 桩身轴力随贯入深度的变化规律

通过桩身布置的 FBG 传感器所测数据,可根据式(5)~式(7)计算得出不同截面处的桩身轴力,从而得到桩身在贯入不同深度时的桩身轴力图,未进入土层的 FBG 传感器所测试数据为压桩力,如图 5 所示。

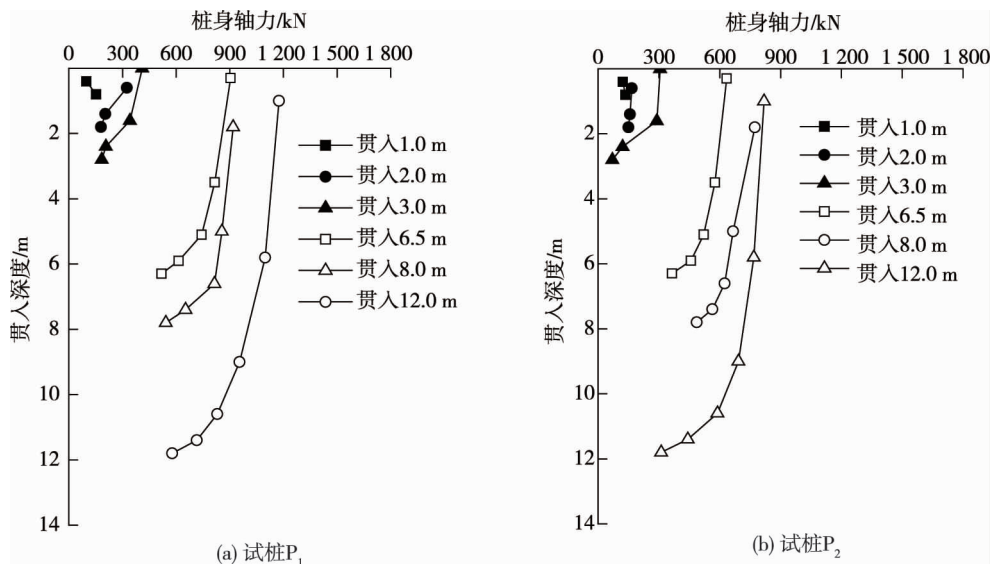


图5 贯入过程中桩身轴力分布

由图 5 可以看出:试桩 P_1 , P_2 的桩身轴力随贯入深度的变化规律相同。随着贯入深度的增加,未进入土层的 FBG 传感器所测试数据变大,即压桩力逐渐增大。桩身贯入深度超过 3 m 时,每条曲线斜率自上而下逐渐变缓,即桩身轴力自上而下依次传递,反映出桩侧摩阻力在逐渐发挥作用,同时也说明桩身下部桩侧摩阻力较桩身上部桩侧摩阻力逐渐增大,土层对桩侧摩阻力的发挥逐渐明显。在贯入初期,由于桩身晃动、填土层的密实度以及静力压桩机自身重力的影响,致使桩身轴力的分布规律不太明显。

3.3 沉桩过程中桩身阻力分析

3.3.1 桩端阻力随贯入深度的变化规律

贯入过程中桩端阻力根据桩端底部传感器测得的桩身轴力线性相关计算得出,如图 6 所示。

由图 6 可以看出:桩端阻力随贯入深度的变化在一定程度上反映了土层性质的不同。随着贯入深度的增加,桩端阻力呈增大趋势。当桩端贯入深度超过 5 m,进入粉土层时,桩端阻力明显增大,试桩 P_1 , P_2 的桩端阻力分别由 364.5, 234.64 kN 变化为 735.08, 489.85 kN,平均增加约 2 倍且占沉桩阻力的 59.84%。随着桩身继续贯入,桩端进入粉质黏土层中,桩端阻力明显减小,试桩 P_1 的桩端阻力减小幅度约为 40.6%,试桩 P_2 的桩端阻力减小幅度约为 44.3%。当桩身贯入超过 10 m 之后,桩端阻力又逐渐增加,从而也表明桩端阻力受土层软硬程度的影响较大。在土层交界面处,同样由于光纤光栅传感器解调仪的采集频率较低,导致桩端阻力数值发生突变。叶建忠等^[22]的研究表明,桩端阻力的影响因素有沉桩方式、桩身所穿过土层的剪切或压缩特性、进入持力层深度、桩的尺寸以及加载速率等。从而可以看出,贯入过程中桩端阻力

与土层分布及土层的特性密切相关,这也是试桩 P_1 , P_2 的桩端阻力相差较大的主要原因。

3.3.2 桩侧摩阻力随贯入深度的变化规律

通过贯入过程的压桩力、桩端阻力随贯入深度的变化,可得出桩侧总摩阻力随贯入深度的变化,如图7所示。

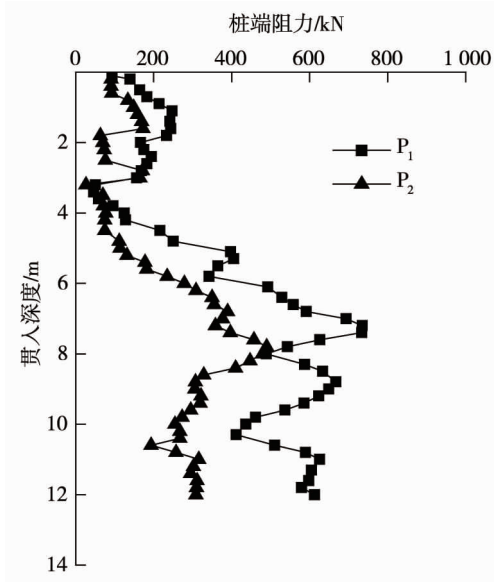


图6 桩端阻力随贯入深度的变化曲线

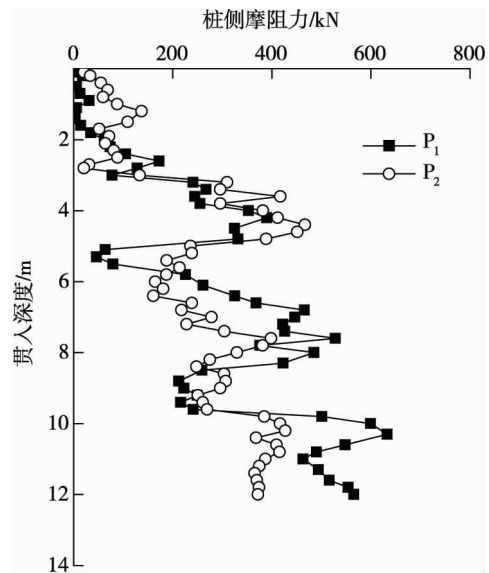


图7 桩侧总摩阻力随贯入深度的变化曲线

由图7可以看出:桩侧总摩阻力随着贯入深度的增加呈增大趋势.在贯入初期,由于桩身晃动以及浅部土体的隆起造成桩-土界面接触不紧密,使得径向有效应力较小或松弛,致使浅层桩侧摩阻力较小.随着桩入土深度的增加,桩侧摩阻力呈增加趋势,但与土层的分布密切相关.当贯入深度在4 m左右时,即桩端从粉土层进入粉质黏土层时,桩侧摩阻力出现先减小后增大的现象,这是由于桩端进入黏土层时,桩端阻力突然变小,沉桩速度急剧增大,桩-土之间会存在较厚的泥浆膜或水膜,使桩侧摩阻力减小;但同时桩端阻力的下降会导致桩身切向力增大,进而使桩-土之间的黏着力增大,因而出现侧摩阻力先减小后增大的现象^[7].当桩端阻力变化较小时,桩侧摩阻力又减小,说明此时沉桩速度达到最大并稳定,桩-土之间存在稳定厚度的泥浆膜或水膜,使桩侧摩阻力减小.随着桩身的继续贯入,当桩身进入粉土层时,桩侧摩阻力又逐渐增大,试桩 P_1 , P_2 的桩侧摩阻力分别由261.29, 238.91 kN变化为465.91, 398.36 kN,平均增加约1.7倍且占沉桩阻力的44.99%.分析原因:(1)当桩身由软土层进入硬土层时,会削弱“粘皮”或泥皮对桩身的润滑作用,从而使桩侧摩阻力增大;(2)由于桩身进入粉土层时桩周附有“粘皮”或泥皮,桩侧摩阻力不一定发生在桩-粉土之间,很可能发生在“粘皮”或泥皮与粉土体之间,相当于增大了摩擦接触面积,从而使桩侧摩阻力显著增大;(3)粉土层的抗剪强度和内摩擦角明显高于黏土层,致使桩身进入粉土层时桩侧摩阻力增大.由图7可知:随着桩身贯入深度的增加,桩侧摩阻力随贯入土层的变化而变化,但总体呈增长趋势.需要指出的是,在层状黏性土地基中静压沉桩时,摩擦情形更为复杂,需要更加深入地进行试验研究,探讨其发展机理。

根据桩身贯入过程中桩身轴力变化和土层的分布特征,桩身贯入不同深度时各土层的桩侧单位摩阻力可由式(8)计算得到,结果如图8所示。

从图8可以看出:在层状土中桩侧单位摩阻力并不是随着贯入深度的增加而逐渐增加,而是与土层的分布有关;随贯入深度的增加,桩侧单位摩阻力呈增大趋势,这是由于随着贯入深度的增加,上覆土层厚度越厚,水平土压力增加,致使桩侧单位摩阻力值总体呈增大趋势;在某一土层深度处,当桩身不同截面贯入通过时,桩侧单位摩阻力不断减小,说明在同一土层深度处,随着桩身贯入深度的增加,桩侧单位摩阻力出现退化现象.分析原因:(1)桩侧摩阻力是桩身外壁与桩周土体相互剪切形成的剪切力,随着桩身继续贯

入,桩侧土体不断被剪切,使径向有效应力不断被释放,从而使桩侧摩阻力不断减小;(2)桩身在贯入黏性土的过程中,随着贯入深度的增加,桩侧粗糙度逐渐减小并趋向光滑,从而使桩侧摩阻力减小;(3)在桩身贯入过程中,桩端附近的土体产生挤土效应,并随着桩端的贯入,桩侧土体受到强烈的挤压和剪切,土体发生重塑,桩侧土体的强度降为重塑土残余强度,使桩侧摩阻力减小。

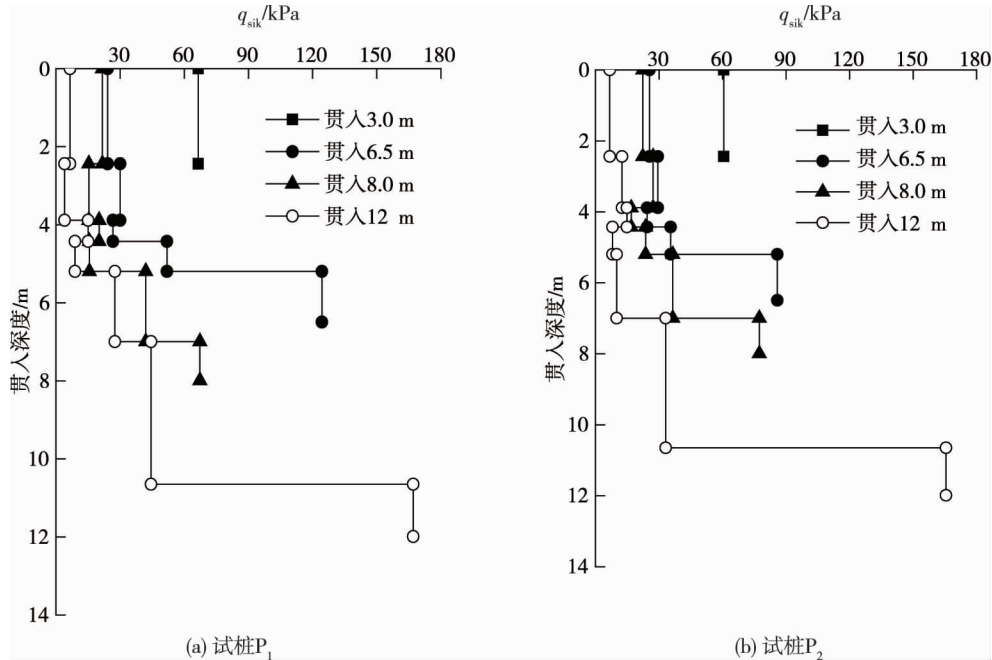


图 8 桩侧单位摩阻力桩身分布曲线

4 结论

1) 在 PHC 管桩表面刻槽埋设的低温敏型光纤光栅传感器,对静压沉桩过程中桩身应力的监测效果较好,并将桩端阻力与桩侧摩阻力成功分开研究,为研究静压桩的贯入过程奠定了基础。

2) 在静压桩贯入过程中存在温度的变化,在进行测试时需考虑去除温度变化的影响。

3) 土层的软硬程度制约着压桩力的变化,压桩力随深度的变化规律基本反映了土层的分布情况.当桩端由黏土层进入粉土层时,压桩力增加为原来的 2.5 倍。

4) 桩端阻力的大小与土层分布密切相关,受桩端土性的影响显著.桩端由黏土层进入粉土层时,桩端阻力增大为原来的 2 倍且占沉桩阻力的 59.84%,桩侧摩阻力增大为原来的 1.7 倍且占沉桩阻力的 44.99%.桩端由硬土层进入软土层时,桩侧摩阻力的变化应考虑沉桩速度和桩身表面切向力的影响。

5) 在某一标高随着桩身贯入深度的增加,桩-土之间不断地相互剪切,桩侧水平应力逐渐释放,致使桩侧单位摩阻力逐渐减小,表现出明显的桩侧摩阻力逐渐退化的现象。

参考文献:

- [1] Kou H, Chu J, Guo W, et al. Field study of residual forces developed in pre-stressed high-strength concrete (PHC) pipe piles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 53(4): 696-707.
- [2] 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.
- [3] 胡立峰,龚维明,过超,等.静压桩沉桩机理及承载力试验[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2009,10(6): 610-614.
- [4] 周健,邓益兵,叶建忠,等.砂土中静压桩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.

- [5] 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.
- [6] 施峰.PHC管桩荷载传递的试验研究[J].岩土工程学报,2004,26(1):95-99.
- [7] 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.
- [8] Gao L, Yang K, Chen X R, et al. Study on the Deformation Measurement of the Cast-In-Place Large-Diameter Pile Using Fiber Bragg Grating Sensors[J]. *Sensors*, 2017,17(3):505.
- [9] Doherty P, Igoe D, Murphy G, et al. Field validation of fibre Bragg grating sensors for measuring strain on driven steel piles[J]. *Géotechnique Letters*, 2015,5(2):74-79.
- [10] 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.
- [11] Bursi O S, Nicola F, Manuel F, et al. Structural monitoring for the cyclic behaviour of concrete tunnel lining sections using FBG sensors[J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2016, 23(4):749-763.
- [12] 裴华富,殷建华,朱鸿鹄,等.基于光纤光栅传感技术的边坡原位测斜及稳定性评估方法[J].岩石力学与工程学报,2010,29(8):1571-1576.
- [13] 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.
- [14] 朴春德,施斌,魏广庆,等.分布式光纤传感技术在钻孔灌注桩检测中的应用[J].岩土工程学报,2008,30(7):976-981.
- [15] 余小奎.分布式光纤传感技术在桩基测试中的应用[J].电力勘测设计,2006,13(6):12-16.
- [16] 宋建学,任慧志,赵旭阳.大直径超长后注浆钢筋砼桩身应变分布式光纤监测[J].平顶山工学院学报,2007,16(6):52-54.
- [17] Tester P, Klar A, St John H D, et al. Distributed strain measurement for pile foundations[J]. *Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering*, 2006, 159(3): 135-144.
- [18] 邢皓枫,赵红崑,叶观宝,等.PHC管桩工程特性分析[J].岩土工程学报,2009,31(1):36-39.
- [19] 王永洪,张明义,张春巍,等.低温敏FBG应变传感器在静压PHC管桩贯入实验中的应用[J].激光与光电子学进展,2018,55(4):67-73.
- [20] Bond A J, Jardine R J. Shaft capacity of displacement piles in high OCR clay[J]. *Geotechnique*, 1995, 45(1): 3-23.
- [21] 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.
- [22] 叶建忠,周健.关于桩端阻力问题的分析与研究现状[J].建筑科学,2006,22(2):64-68.