

# 基于 FBG 传感技术的静压沉桩贯入特性测试研究\*

王永洪<sup>1,2</sup>, 马加骁<sup>1</sup>, 张明义<sup>1,2</sup>, 白晓宇<sup>1,2</sup>, 苗德滋<sup>1</sup>, 桑松魁<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** 由于静压沉桩贯入机理复杂, 桩端形式不同是引起静压沉桩贯入特性不同的主要原因之一, 故提出了一种应用光纤光栅 (fiber Bragg grating, 简称 FBG) 传感技术监测不同桩端形式静压沉桩贯入特性的新方法。将增敏微型光纤光栅传感器粘贴在开口桩内管外壁, 外管外壁通过开槽预埋光纤光栅传感器, 分别通过监测内管外壁和外管外壁的竖向变形来分析静压沉桩贯入特性。通过在桩顶和桩端分别安装双模式温度自补偿型光纤光栅土压力传感器和全截面动态轮辐压力传感器的对比分析, 说明了该方法适用于开闭口桩静压沉桩测试, 为光纤传感技术在岩土工程中的广泛应用提供了新思路。

**关键词** 光纤传感技术; 开闭口桩; 静压沉桩; 轮辐传感器; 土压力传感器

**中图分类号** TH823; TH473

## 引言

静压桩因具有施工便捷、承载能力高、贯入能力强、绿色环保等优势, 在沿海地区城市基础建设过程中应用日趋广泛<sup>[1]</sup>。按桩端形式的不同, 预制管桩可分为开口桩和闭口桩, 由于两种管桩在静压沉桩过程中的贯入特性有所差异且较为复杂, 在静压施工中常出现沉桩困难、超压、桩身破坏、桩头压碎等多种质量问题<sup>[2-4]</sup>。因此, 研究开闭口静压桩贯入特性对静压桩设计与施工具有指导意义<sup>[5]</sup>。

静压沉桩贯入特性受到土塞效应等因素的影响, 开口管桩和闭口管桩贯入特性存在较大差异<sup>[6-7]</sup>。不同桩端形式的桩体贯入受力环境复杂, 开展开闭口静压桩贯入特性模型试验时, 桩体贯入模型试验系统的开发成为试验成败的关键<sup>[8]</sup>。

国内外众多学者通过各种测试方法研究了不同桩端形式下的静压沉桩贯入特性, 其中传统的电测类测试传感器应用较多。文献[9-10]在砂土中进行了开口桩和闭口桩的静力压入贯入特性, 通过在开口桩内管下部安装应变片测量土塞阻力, 在外管端部和桩身安装应变片测量桩端阻力和桩侧阻力。Kenneth 等<sup>[11]</sup>通过在模型桩顶部和底部安装应变片, 在桩壁预钻孔中安装土压力传感器和孔隙水压

力传感器, 在砂土中进行了贯入过程闭口模型桩试验, 研究了摩擦疲劳对砂土中桩承载力的影响。施峰等<sup>[12]</sup>在预应力高强混凝土 (pretensioned high strength spun concrete, 简称 PHC) 管桩桩身埋设了钢筋计, 研究了 PHC 管桩荷载传递机理。张忠苗等<sup>[6]</sup>在开口管桩桩端对称安装振弦式土压力传感器, 测定了开口管桩沉桩过程中管壁端阻。周健等<sup>[13]</sup>进行了砂土中静压沉桩模型试验, 通过在模型管桩桩身粘贴微型应变片, 研究了沉桩过程中动端阻力和动侧摩阻力的变化规律。曹兆虎等<sup>[14]</sup>基于透明土和粒子图像测速 (particle image velocimetry, 简称 PIV) 技术, 通过桩基贯入试验对比分析了在贯入过程中开口和闭口管桩挤土效应的差异。李雨浓等<sup>[15-16]</sup>通过室内模型试验和离心模型分别进行了静压沉桩及静载试验, 在模型桩头放置荷重传感器, 桩身安装应变片和土压力传感器, 测试了贯入过程中的沉桩阻力和径向应力。叶真华等<sup>[17]</sup>进行了不同桩端条件的室内模型试验, 通过在模型桩桩身布置应变片和土压力盒, 测量了黏土中桩端位于不同持力层的桩端应力和桩侧土压力增量。

近年来, 光纤光栅传感器由于其质量轻、抗电磁干扰能力强、受温度影响小及可以多个光栅串联等优点, 因此光纤光栅传感技术在工程中得到广泛应

\* 国家自然科学基金资助项目 (51778312, 51708316); 山东省重点研发计划资助项目 (2017GSF20107, 2018GSF117010); 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2016EEP06)

收稿日期: 2019-07-16; 修回日期: 2019-12-27

用<sup>[18-22]</sup>。对于静压沉桩室内试验系统,模型桩直径小且桩身应变小,桩周土挤压桩身表面传感器,因此需要采用增敏微型光纤光栅传感器,可以增加传感器测试精度,同时为了避免桩身数据线分布过多,采用多个准分布式光纤光栅传感器进行串联。对于开口管桩内、外管均需安装传感器,尤其是对于外管,如何在测试过程中克服土颗粒运动对桩身产生的严重扰动且不损伤传感器至关重要。本研究以开闭口模型桩为研究对象,基于黏性土和光纤光栅传感技术,运用增敏微型布拉格光纤光栅应变传感器和双模式温度自补偿型光纤光栅土压力传感器,对其在静压沉桩过程中的适用性问题进行研究。

## 1 FBG 传感器工作原理

### 1.1 FBG 基本传感原理

光栅能够对符合条件的光进行反射,且反射光的中心波长受温度、应变的影响,通过监测反射光中心波长的变化,即可知相关参量的变化。传感公式为

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

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda \quad (2)$$

其中: $\lambda_B$ 为光纤光栅波长(nm); $n_{\text{eff}}$ 为光纤光栅有效折射率; $\Lambda$ 为光栅周期; $\Delta\lambda_B$ 为波长偏移量(nm); $\Delta n_{\text{eff}}$ 为有效折射率变化量。

### 1.2 FBG 应变传感器工作原理

本试验所用FBG应变传感器为微型传感器,其长度及直径仅为16,2 mm,尺寸小便于安装在模型桩的管壁上,且通过增敏封装原理提高了其应变灵敏度。传感器变形全部由两端夹持套管间的光纤光栅产生,传感器通过夹持支座与测试构件固定并实现变形协调统一。

光纤光栅的应变为式(3),构件及光纤光栅的应变满足式(4)。联立式(3),(4),则构件的应变为式(5)

$$\Delta\lambda = K_\epsilon \epsilon \quad (3)$$

$$L\epsilon_{\text{gi}} = L_f \epsilon_f \quad (4)$$

$$\epsilon_{\text{gi}} = \frac{L_f}{L} \epsilon_f = \frac{L_f \Delta\lambda_{\text{FBG}}}{1.2L} \quad (5)$$

其中: $K_\epsilon$ 为应变灵敏度系数(nm/ $\mu\epsilon$ ), $K_\epsilon \approx 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ;  $L_f$ 为两端套管之间的距离(mm); $L$ 为支座之间距离(mm); $\epsilon$ 为光纤光栅轴向应变( $\mu\epsilon$ ); $\epsilon_f$ 为套管之间光纤光栅应变( $\mu\epsilon$ ); $\epsilon_{\text{gi}}$ 为构件应

变( $\mu\epsilon$ ); $\Delta\lambda$ 为光纤光栅波长变化(nm); $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 为套管之间光纤光栅波长变化(nm)。

### 1.3 FBG 土压力传感器工作原理

本研究采用双模片温度自补偿型FBG土压力传感器测量压桩力,双模式FBG土压力传感器参数如表1所示。

表1 双模式FBG土压力传感器参数

Tab.1 Dual-diaphragm FBG soil pressure sensor parameters

位移灵敏度系数/ (nm·MPa <sup>-1</sup> )	温度灵敏度系数/ (nm·°C <sup>-1</sup> )	温度补偿灵敏度系数/ (nm·°C <sup>-1</sup> )	量程/ MPa	分辨率/ %	精度/ %
1.652	0.028	0.011	1.0	0.1	0.5

双模式FBG土压力传感器应变公式为

$$\epsilon = \left[ \lambda - \lambda_0 - (\lambda_t - \lambda'_t) \frac{1}{a} b \right] / K \quad (6)$$

其中: $\lambda$ 为光纤光栅的波长(nm); $\lambda_0$ 为光纤光栅的初始波长(nm); $\lambda_t$ 为温度补偿波长(nm); $\lambda'_t$ 为温度补偿初始波长(nm); $a$ 为土压力传感器Bragg光栅温度补偿灵敏度系数; $b$ 为土压力传感器Bragg光栅灵敏度系数; $K$ 为土压力传感器Bragg光栅位移灵敏度系数。

## 2 试验方案

### 2.1 试验设计

模型试验在室内大比例模型试验系统上完成<sup>[23]</sup>。试验用土样取自某工程粉质黏土,通过烘干、破碎、铺设和洒水4道工序进行重塑。为了精准测试开口管桩贯入阻力,设计了内、外管分离的双壁开口模型管桩。不同桩端形式模型管桩参数见表2。

表2 模型管桩参数表

Tab.2 Model pipe pile parameter table

试桩编号	外径/ mm	内径/ mm	桩长/ mm	桩端形式	弹性模量/ GPa	泊松比
TP <sub>1</sub>	140	80	1 000	开口	72	0.3
TP <sub>2</sub>	140		1 000	闭口	72	0.3

### 2.2 桩身应力测试技术

为了测得静压沉桩贯入阻力,开口模型桩内外管对称布置增敏微型FBG应变传感器,在内管外壁

直接粘贴,在外管外壁开槽后预埋并用环氧树脂封装。闭口模型桩在外管对称布设光纤光栅应变传感器。增敏微型FBG应变传感器布设如图1所示。

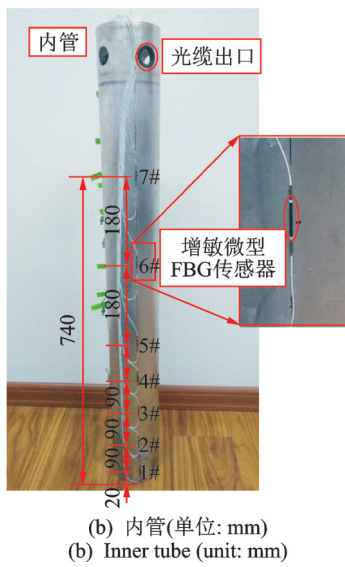
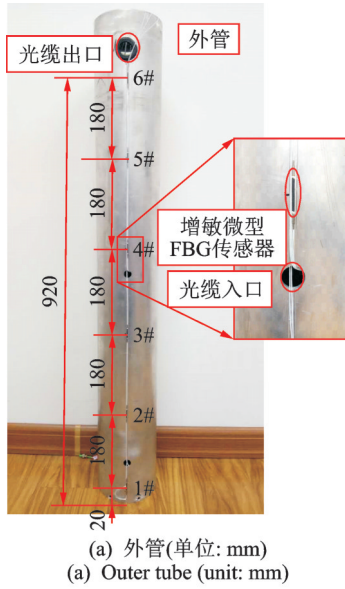


图1 FBG传感器布设

Fig.1 FBG sensors installation

### 3 试验数据分析

在静压沉桩试验过程中,安装于桩身FBG应变传感器的应变值为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_\epsilon\Delta\epsilon + K_T\Delta T \quad (7)$$

其中: $\Delta\lambda_B$ 为光纤光栅波长变化量(nm); $\lambda_B$ 为光纤光栅波长(nm); $\Delta\epsilon$ 为应变值( $\mu\epsilon$ ); $\Delta T$ 为温度变化值( $^\circ\text{C}$ ); $K_\epsilon, K_T$ 为应变、温度灵敏度系数(nm/ $\mu\epsilon$ )。

由桩身应变变化可计算出桩身轴力变化,进而计算出桩身贯入过程中桩侧单位侧摩阻力的变化,

如式(8~10)所示

$$N_i = E\Delta\epsilon_i A \quad (8)$$

其中: $N_i$ 为桩身轴力(kN); $E$ 为弹性模量(MPa); $\Delta\epsilon_i$ 为应变值; $A$ 为横截面积( $\text{mm}^2$ )。

$$Q_i = N_i - N_{i+1} \quad (9)$$

$$f_i = F_i / Ul_i \quad (10)$$

其中: $Q_i$ 为桩侧摩阻力(kPa); $N_i, N_{i+1}$ 为截面轴力(kN); $f_i$ 为桩侧平均摩阻力(kPa); $U$ 为桩身周长(mm); $l_i$ 为截面之间距离(mm)。

### 3.1 桩端阻力和压桩力验证对比方法

本研究采用桩端安装全截面动态轮辐式压力传感器的方法进行桩端阻力验证,将桩端轮辐压力传感器与位于桩端最下面的FBG应变传感器测得的数据进行对比分析,全截面轮辐压力传感器安装如图2所示。压桩力验证方法是通过桩顶双模片温度自补偿型FBG土压力传感器测试数据,与位于桩端最上面的FBG应变传感器测得的数据进行对比分析,双模式温度自补偿FBG土压力传感器安装如图3所示。

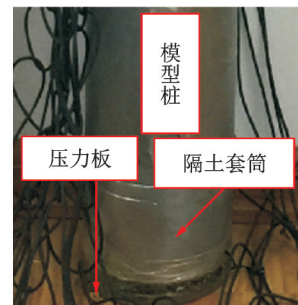


图2 全截面轮辐压力传感器安装

Fig.2 Total cross section wheel spoke pressure sensor installation of pile tip



图3 桩顶FBG土压力传感器布置

Fig.3 FBG soil pressure sensor emplacement of pile top

### 3.2 FBG 传感技术的验证与分析

由于全截面轮辐压力传感器与桩端FBG压力传感器之间存在20 mm的间距,可对沉桩初期桩端FBG传感器贯入土体前后的测试数据进行分析。试桩TP<sub>2</sub>各传感器测试数据如图4所示。

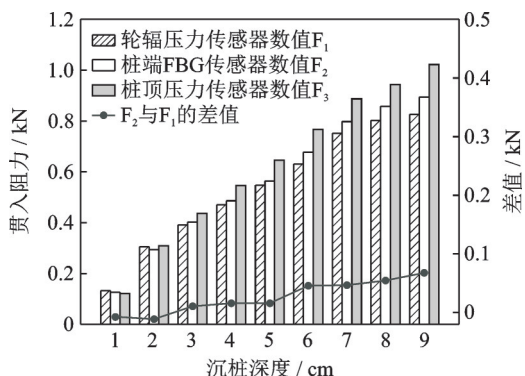


图4 试桩TP<sub>2</sub>各传感器数据验证分析  
Fig.4 Validation and analysis of test pile TP<sub>2</sub> sensor data

由图4可知:在沉桩深度为0~2 cm时,由于桩侧摩阻力发挥不充分,桩端FBG传感器与轮辐压力传感器测得的桩端阻力仅相差0.007,0.011 kN,且在此阶段桩端FBG传感器未贯入土体,桩顶FBG土压力传感器与桩端FBG传感器所测受力为桩身轴力,之间的差值小于0.015 kN。随沉桩深度的增加,桩侧摩阻力逐渐发挥作用,桩端FBG传感器与轮辐压力传感器测得的桩端阻力差值呈增大的趋势,符合静压桩的贯入特性。可见轮辐压力传感器、桩端FBG传感器、桩顶FBG土压力传感器所测数据具有可靠性,FBG传感器技术在此试验中具有可行性。

### 3.3 压桩力分析

压桩力与沉桩深度的变化规律曲线如图5所示,试桩TP<sub>1</sub>,TP<sub>2</sub>压桩力随沉桩深度的增加近似呈线性增大趋势。当沉桩结束时,开口桩压桩力小于闭口桩,分析原因为开口桩沉桩过程土塞高度增加且逐渐趋于闭塞,开口桩对桩周土体的剪切作用强且容易形成“井壁效应”。本试验条件下,沉桩开始阶段压桩力和桩身应力均较小,沉桩速度约为300 mm/min,随着贯入深度的增加,压桩力和桩身应力明显增大,至沉桩结束前减少至100 mm/min,本次试验均属于慢速贯入。

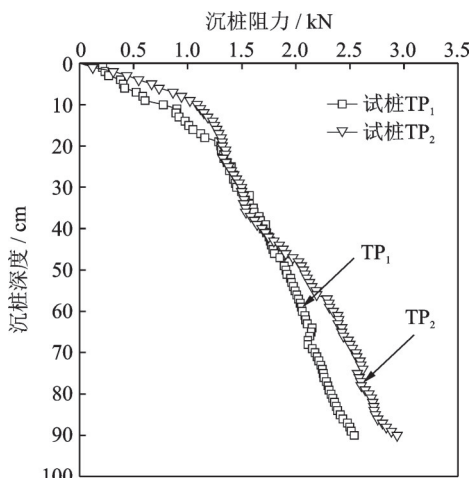


图5 压桩力随沉桩深度变化规律曲线  
Fig.5 Variation of pile driving pressure with depth

### 3.4 桩端阻力分析

图6为桩端阻力和端阻比随沉桩深度变化规律曲线。由图6可以看出,开始沉桩阶段开口桩TP<sub>1</sub>桩端阻力小于闭口桩TP<sub>2</sub>,随着沉桩深度的增加试桩TP<sub>1</sub>和TP<sub>2</sub>桩端阻力逐渐接近的过程,即开口桩TP<sub>1</sub>土塞形成,土塞阻力逐步发挥直至土塞高度不再变化为止。试桩TP<sub>1</sub>,TP<sub>2</sub>桩端比均随沉桩深度的增加,整体上呈减小的趋势。至沉桩后期,由于TP<sub>1</sub>的土塞高度趋于稳定,TP<sub>1</sub>与TP<sub>2</sub>的端阻比的变化规律基本一致。至沉桩结束时,试桩TP<sub>1</sub>,TP<sub>2</sub>的端阻比均大于58%,其承载特性均为摩擦端承型桩。

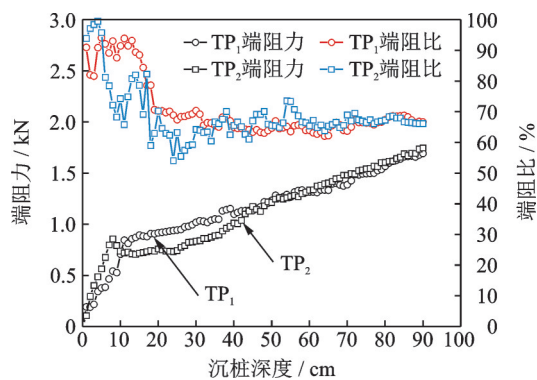


图6 桩端阻力和端阻比随深度的变化曲线  
Fig.6 Variation of pile end resistance and ratio with depth

### 3.5 桩侧总摩阻力分析

开口试桩TP<sub>1</sub>内、外管、闭口试桩TP<sub>2</sub>侧摩阻力及侧阻比随沉桩深度的变化曲线如图7、图8所示。由图7可知,开口管桩的侧摩阻力由内、外管的侧摩

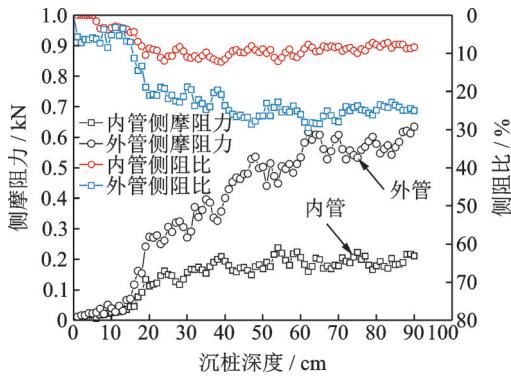


图7 开口试桩 TP<sub>1</sub> 内、外管侧摩阻力及侧阻比

Fig.7 Skin friction and ratio of inner and outer tube of open test pile TP<sub>1</sub>

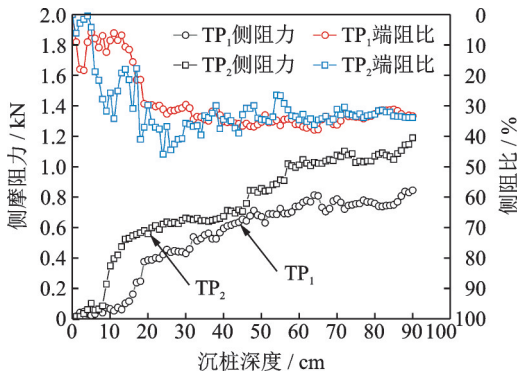


图8 侧摩阻力及侧阻比随沉桩深度变化曲线

Fig.8 Variation of skin friction and ratio with depth

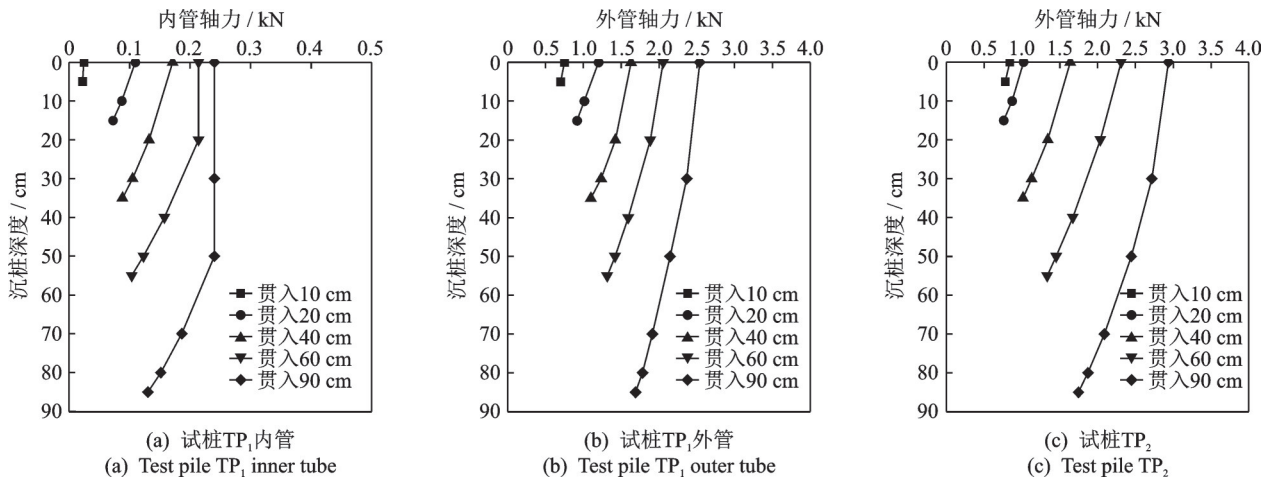


图9 桩身轴力变化曲线

Fig.9 Variation curves of axial force of pile

3.7 桩身单位摩阻力分析

试桩 TP<sub>1</sub>, TP<sub>2</sub> 桩身单位侧摩阻力随沉桩深度的分布曲线如图 10 所示。在不同贯入深度下桩身单位侧摩的变化规律存在一定的相似性。在同一贯入深度下,

阻力组成,随沉桩深度的增加外管侧摩阻力呈不断增长的趋势,而内管侧摩阻力至沉桩深度达 30 cm 后,由于土塞高度逐渐趋于稳定,内管侧摩阻力基本保持稳定。至沉桩后期,内、外管摩阻比基本稳定在 10%, 25%, 说明开口管桩的侧摩阻力以外管侧摩阻力为主。由图 8 可知,桩侧摩阻力受到桩端形式的影响,在同一沉桩深度,开口试桩 TP<sub>1</sub> 桩侧总摩阻力的发挥程度小于闭口试桩 TP<sub>2</sub>。

3.6 桩身轴力分析

试桩 TP<sub>1</sub>, TP<sub>2</sub> 桩身轴力随沉桩深度的分布曲线如图 9 所示。由图 9(a), (b) 可知,在沉桩过程中,试桩 TP<sub>1</sub> 内、外管轴力的变化存在差异,这是由于内、外管分别受土塞效应、挤土效应的作用所致。在每一贯入深度下,内管轴力从上到下不断递减,且轴力的分布曲线斜率逐渐减小,表明内管土塞形成即桩内侧摩阻力自上而下不断发挥的过程。由图 9(c) 可知,虽然试桩 TP<sub>2</sub> 与 TP<sub>1</sub> 的桩端形式不同,但是在相同贯入深度下,TP<sub>1</sub>, TP<sub>2</sub> 的桩身轴力在侧摩阻力的作用下均随深度的增加逐渐减小。受桩端形式的影响,试桩 TP<sub>1</sub> 外管桩身轴力小于试桩 TP<sub>2</sub>。

试桩 TP<sub>1</sub>, TP<sub>2</sub> 单位侧摩阻力随沉桩深度的增加总体呈上小下大分布。在相同贯入深度下,自桩端至桩顶桩身的单位侧摩阻力逐渐减小,随试桩逐渐被贯入土体,由于桩周土体不断被剪切、扰动,同一土层深度下的单位侧摩阻力均存在一定的“退化效应”。

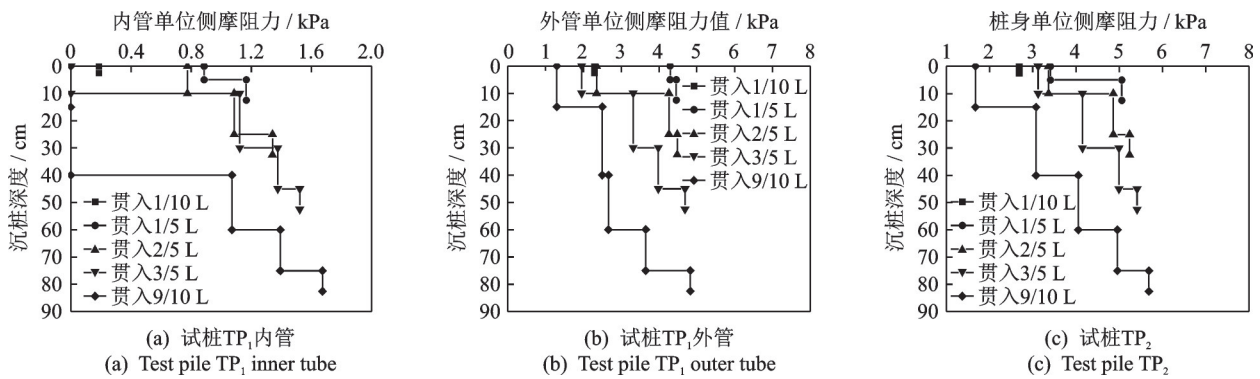


图10 桩侧单位侧摩阻力变化曲线

Fig.10 Variation curves of unit skin friction of pile

## 4 结束语

通过桩端全截面轮辐压力传感器和桩顶光纤光栅土压力传感器与桩身光纤光栅应变传感器的对比,充分说明了这种开闭口桩静压沉桩测试的新方法是可行的。本方法中用到了光纤光栅传感器,其优点使得该种测试静压沉桩体积小、安装方便、传输导线少、长期稳定性好、测试精度高,并且可以实现沉桩过程中的在线实时监测。本研究结果表明,该方法不仅可以用于不同桩端形式静压沉桩贯入特性的监测,而且可以用于大长细比的海洋风机钢管桩基础以及其他一些桩基础的变形情况监测。

## 参 考 文 献

- [1] 张明义. 静压入桩的研究与应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004: 1-100.
- [2] 陆昭球, 高倚山, 宋铭栋. 关于开口钢管桩工作性状的几点认识[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 111-114.  
LU Zhaoqiu, GAO Yishan, SONG Mingdong. Some knowledge about working performance open-end steel pipe pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1): 111-114. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] SAGASET A C. Prediction of ground movements due to pile-driving in clay [J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2001, 127(1): 55-66.
- [5] 俞峰, 张忠苗. 混凝土开口管桩竖向承载力的经验参数法设计模型[J]. 土木工程学报, 2011, 44(7): 100-110.  
YU Feng, ZHANG Zhongmiao. A design framework for evaluating the vertical bearing capacity of open-end-
- ed concrete pipe pile from empirical correlations [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(7): 100-110. (in Chinese)
- [6] 张忠苗, 刘俊伟, 俞峰, 等. 静压预应力混凝土管桩土塞效应试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2274-2280.  
ZHANG Zhongmiao, LIU Junwei, YU Feng, et al. Research on plugging effect of jacked prestressed concrete pipe pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2274-2280. (in Chinese)
- [7] 谢永健, 王怀忠, 朱合华. 软黏土中PHC管桩打入过程中土塞效应研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1671-1675.  
XIE Yongjian, WANG Huaizhong, ZHU Hehua. Soil plugging effect of PHC pipe pile during driving into soft clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1671-1675. (in Chinese)
- [8] 王永洪, 张明义, 白晓宇, 等. 基于FBG传感技术的黏性土中静压沉桩阻力测试[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(5): 1120-1140.  
WANG Yonghong, ZHANG Mingyi, BAI Xiaoyu, et al. Sinking resistance of jacked piles in clayey soil based on FBG sensing technology [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(5): 1120-1140. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] GAVIN K G, LEHANE B M. The shaft capacity of pipe piles in sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(1): 36-45.
- [11] KENNETH G G, BRENDAN C O. Effect of friction fatigue on pile capacity in dense sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(1): 63-71.

- [12] 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.  
SHI Feng. Experimental research on load transfer mechanism of pretensioned high strength spun concrete piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 95-99. (in Chinese)
- [13] 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 Jian, DENG Yibing, YE Jianzhong, 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)
- [14] 曹兆虎, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 基于透明土的管桩贯入特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1564-1568.  
CAO Zhaohu, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, et al. Model tests on pipe pile penetration by using transparent soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1564-1568. (in Chinese)
- [15] 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 Yunong, LI Jingpei, ZHAO Zhongfang, 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)
- [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(3): 285-292.  
LI Yunong, LEHANE B M, LIU Qingbing. Centrifuge modeling of jacked pile in clay [J]. Chinese Journal of Engineering, 2018 (3): 285-292. (in Chinese)
- [17] 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), 2006, 25(2): 78-80.  
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), 2006, 25(2): 78-80. (in Chinese)
- [18] 魏广庆, 施斌, 胡盛, 等. FBG在隧道施工监测中的应用及关键问题探讨[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 571-576.  
WEI Guangqing, SHI Bin, HU Sheng, et al. Several key problems in tunnel construction monitoring with FBG [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 571-576. (in Chinese)
- [19] 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): 756-762.  
LI Peng, WANG Lai, GUO Haiyan, 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): 756-762. (in Chinese)
- [20] 马科夫·阿列克谢, 郭耀, 常天英, 等. 光纤布拉格光栅在冰声学性能测量中的应用[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 61-70.  
ALEXEY M, GUO Yao, CHANG Tianying, et al. Application of fiber Bragg grating in the measurements of acoustic properties of ice [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 61-70. (in Chinese)
- [21] 任亮, 夏梦颖, 姜涛, 等. 基于环向应变的燃气管道泄漏监测试验[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(5): 820-825.  
REN Liang, XIA Mengying, JIANG Tao, et al. Leakage detection of gas pipeline based on hoop strain monitoring [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(5): 820-825. (in Chinese)
- [22] 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.  
ZHANG Weihang, JIANG Junfeng, WANG Shuang, et al. Fiber-optic fabry-perot high-pressure sensor for marine applications [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0206001. (in Chinese)
- [23] 中华人民共和国行业标准编写组. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.



**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。曾发表《基于FBG传感技术的黏性土中静压沉桩阻力测试》(《振动、测试与诊断》2019年第39卷第5期)等论文。

E-mail: hong7986@163.com