

基于光纤布拉格光栅传感器的 PHC 管桩现场 静压贯入试验研究

马加骁¹, 王永洪^{1,2*}, 张明义^{1,2}, 白晓宇^{1,2}, 桑松魁¹

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

摘要 为探究光纤光栅(FBG)传感技术在预应力高强度混凝土管桩(PHC管桩)静压贯入特性现场测试中的适用性及实施温度补偿的必要性,对2根闭口PHC管桩进行了现场静压沉桩试验。将FBG温度传感器、低温敏FBG应变传感器采用刻槽法对称安装于PHC管桩的桩身两侧,通过光纤光栅解调仪对静压过程中的温度变化及桩身应变状态进行监测。试验结果表明,在沉桩过程中桩周土体温度变化高达2.62℃,需采取温度补偿措施,以确保FBG应变传感器测试结果的准确性;试验中24个低温敏FBG应变传感器全部存活,能够对静压过程中的桩端阻力、桩身轴力、侧摩阻力及单位侧摩阻力的变化规律进行动态、实时监测;且此传感器具有温度补偿的功能,能够较好地满足现场试验的测试需求,为FBG传感技术在岩土工程现场测试中的应用提供了新方法。

关键词 光纤光学; 光纤光栅传感技术; 高强度混凝土(PHC)管桩; 静压桩; 传感器; 测试分析

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1206004

Static-Pressure Penetration Field Test of PHC Pipe Pile Based on Fiber Bragg Grating Sensor

Ma Jiachao¹, Wang Yonghong^{1,2*}, Zhang Mingyi^{1,2}, Bai Xiaoyu^{1,2}, Sang Songkui¹

¹ School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China;

² Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao, Shandong 266033, China

Abstract Herein, two closed prestressed high-strength concrete (PHC) pipe piles were tested under static pressure at the construction field to explore the applicability of fiber Bragg grating (FBG) sensing technology and elucidate the necessity of temperature compensation. FBG temperature sensor and low-temperature-sensitive FBG strain sensor were symmetrically installed on both sides of the PHC pipe pile using the grooving method. The temperature change and strain state of the pile under static pressure were measured using FBG demodulator. The test result indicates that during the process of pile sinking, the temperature variation of the soil around the pile is 2.62 °C. Further, the accuracy of the test results of the low-temperature-sensitive FBG strain sensor will be affected if no temperature compensation measures are undertaken. In this test, all low-temperature-sensitive FBG strain sensors survived, facilitating dynamic and real-time monitoring of the change law of pile-tip resistance, pile-axial force, side-friction resistance, and unit-side friction resistance under static pressure. Moreover, the sensor possessed the function of temperature compensation, which can comply with field test requirements, providing a new method for the application of FBG sensing technology in geotechnical engineering field tests.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating sensing technology; prestressed high-strength concrete (PHC) pipe pile; static-pressure pile; sensor; test analysis

OCIS codes 060.2280; 060.2300; 060.2370

收稿日期: 2020-03-06; 修回日期: 2020-03-16; 录用日期: 2020-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(51778312)、山东省重点研发计划(2017GSF20107, 2018GSF117010)

* E-mail: hong7986@163.com

1 引 言

预应力高强度混凝土管桩(PHC管桩),是通过先张法预应力和离心成型工艺制成的预制管桩,具有承载力高、造价经济、适用范围广等诸多优点^[1-2]。PHC管桩多采用静压法压桩入土,在施工过程中由于桩身受力状态较为复杂,易出现各种质量问题。因此,对PHC管桩在静压沉桩过程中的贯入特性进行研究具有重要的工程意义。

近年来,光纤传感技术迅速发展,与传统电类传感器相比,基于此类技术的传感器具有监测范围广、抗干扰能力强、测试精度高等优点,被广泛应用于工程监测中^[3-5]。Klar等^[6]将光纤安装于钢筋笼上,利用布里渊时域反射计(BOTDR)分布式传感系统,对桩身的应变状态进行了监测。Ding等^[7]采用受激布里渊时域分析技术,对水泥土搅拌桩的应变状态进行了研究。Guo等^[8]利用激布里渊频域分析技术结合钢筋计对单桩的应力、应变状态进行了监测,发现此传感技术与钢筋计相比具有较高的精度和抗干扰能力。缪长健等^[9]在PHC管桩制作过程中将光纤预埋于桩身,采用激布里渊频域分析技术对超长PHC管桩的内力分布及变化规律进行了监测。为进一步提高测试精度及分辨率,众多学者将光纤布拉格光栅(FBG)传感技术用于工程监测中。Lee等^[10]利用应变片和FBG应变传感器,对PHC管桩在静载荷试验中的应变状态进行了监测,通过对比发现FBG传感器的监测效果较好。朱友群等^[11]采用FBG布里渊光时域分析(FBG-BOTDA)传感技术,对击桩入土过程中桩身裂缝、破坏等质量问题进行了监测和研究。寇海磊等^[12]采用刻槽法将FBG应变传感器安

装于PHC管桩的桩身表面,对静压过程中的PHC管桩的贯入机制进行了研究。Liu等^[13]通过FBG传感器对开口PHC管桩的残余应力进行了监测,并根据监测数据对沉桩阻力进行了分析和研究。由于FBG传感器对应变、温度双重敏感^[14],且在压桩贯入过程中存在一定的温度变化,若忽略温度的影响,会影响监测数据的准确性。目前基于FBG传感技术的PHC管桩贯入特性试验研究中,大多未进行温度补偿,部分学者采用加装FBG温度传感器的方法进行温度补偿^[15-16],但是此方法成本较高,且安装较为不便。

为此,本文将低温敏FBG应变传感器、FBG温度传感器用于PHC管桩的现场静压试验中,将两种传感器采用刻槽法安装于PHC桩身表面,通过FBG温度传感器对静压沉桩过程中桩侧土体的温度变化状态进行监测,以验证温度补偿的必要性。并通过低温敏FBG应变传感器对PHC管桩的静压贯入过程中的贯入阻力、桩身轴力的分布及变化规律进行监测和分析。

2 FBG传感器基本原理

2.1 低温敏FBG应变传感器的基本原理

低温敏FBG应变传感器主要由内管、外管、布拉格光栅、夹持套管组成,传感器的结构如图1所示。其温度补偿原理为:传感器的内管、外管采用热膨胀系数不同的材料制成,当传感器所处环境温度升高时,内管、外管均受热膨胀。外管沿轴向向外膨胀,施加给光栅拉应力,而内管具有较高的热膨胀系数,向内膨胀产生轴向收缩,能够抵消外管变形对光栅的影响,消除因温度改变引起光栅中心波长的变化,从而实现温度补偿。

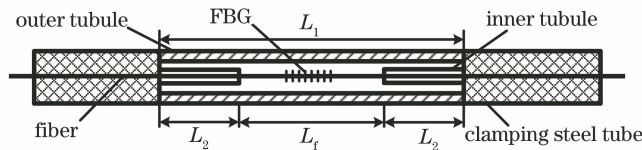


图1 低温敏FBG应变传感器结构图

Fig. 1 Structure diagram of the low-temperature-sensitive FBG strain sensor

由光纤布拉格光栅的工作原理可知,其中心波长变化量为^[17]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = S_\epsilon \Delta\epsilon + S_T \Delta T, \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为光栅中心波长的变化量; λ_B 为光栅中心波长; $\Delta\epsilon$ 、 ΔT 分别为应变、温度的变化量;应变敏感系数 $S_\epsilon = 1 - P_e = 1.24 \mu\epsilon^{-1}$,其中 P_e 为光栅有效弹光系数;温度敏感系数 $S_T = 10.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

低温敏FBG应变传感器在进行温度补偿时,内、外管的形变对光栅的应变状态存在一定的影响,根据材料力学的基本原理,可得传感器中心波长的变化为^[18]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = S_\epsilon \left[\Delta\epsilon + \frac{-2\alpha_2 L_2 + \alpha_1 L_1}{L_f} \Delta T \right] + S_T \Delta T = S_\epsilon \Delta\epsilon + \left[S_\epsilon \frac{-2\alpha_2 L_2 + \alpha_1 L_1}{L_f} + S_T \right] \Delta T, \quad (2)$$

式中： α_1 、 α_2 为外、内管的热膨胀系数， $\alpha_1 = 10.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ， $\alpha_2 = 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ； L_1 、 L_2 为外、内管的长度， $L_1 = 60 \text{ mm}$ ， $L_2 = 15.3 \text{ mm}$ ； L_f 为光纤光栅长度， $L_f = 29.4 \text{ mm}$ 。将各参数代入(2)式可得

$$S_\epsilon \frac{-2\alpha_2 L_2 + \alpha_1 L_1}{L_f} + S_T = 0. \quad (3)$$

由(3)式可知，传感器的中心波长漂移不受温度变化的影响，只与其应变状态有关，由此可得

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_\epsilon)\Delta\epsilon = S_\epsilon \Delta\epsilon. \quad (4)$$

2.2 FBG 温度传感器的基本原理

FBG 温度传感器为基于 FBG 传感技术的温度传感器，主要由内管、外管、封装细管、黏接剂、布拉格光栅、铠装光栅等构件组成，传感器的结构如图 2 所示。两端的内管与外管之间通过黏接剂固定，外管主要用于保护光纤光栅，内管用于封装布拉格光栅两端的光纤。

传感器的布拉格光栅封装于细管内，封装细管的一端与内管连接，形成悬臂结构，且布拉格光栅两

端的光纤封装于内管中，布拉格光栅在细管中处于自由状态，以避免光栅产生应变影响测试结果，使 FBG 传感器仅对温度敏感。

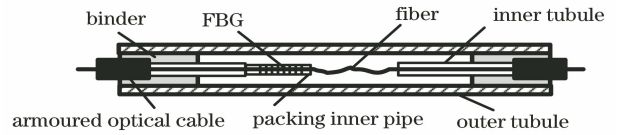


图 2 FBG 温度传感器结构图

Fig. 2 Structure diagram of FBG temperature sensor

2.3 FBG 传感器标定曲线

低温敏 FBG 应变传感器通过微机控制电子万能试验机(型号为 CMT5305)、标定板(钢板,长×宽×高为 400 mm×100 mm×5 mm)、光纤光栅解调仪(型号为 FS 2200RM Rack Mountable Bragg Meter, HBM 公司)和裸光栅进行应变标定。将 FBG 应变传感器、裸光栅沿标定板的长度方向安装于标定板的正面和反面,安装完成后采用万能试验机对标定板匀速拉伸,通过光纤光栅解调仪监测 FBG 应变传感器、裸光栅的中心波长,应变标定示意图如图 3 所示。

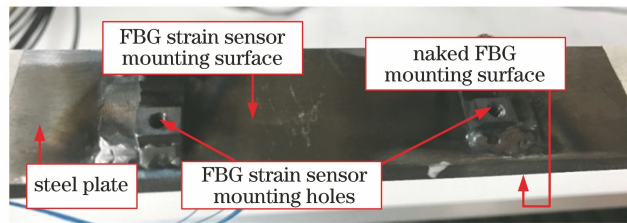


图 3 应变标定示意图

Fig. 3 Schematic diagram of strain calibration

标定曲线如图 4 所示,在此标定试验中,传感器与裸光栅的中心波长之间的线性关系为 $y = 4.1593x - 4827.7786$,线性决定系数 R^2 达 0.9998,由于标定所用裸光栅的应变灵敏度系数为 $1.20 \text{ } \mu\text{m}/\mu\epsilon$,故 FBG 传感器的应变灵敏度系数为 $4.9912 \text{ } \mu\text{m}/\mu\epsilon$,这说明低温敏 FBG 传感器具有较高的线性拟合度和应变灵敏度。

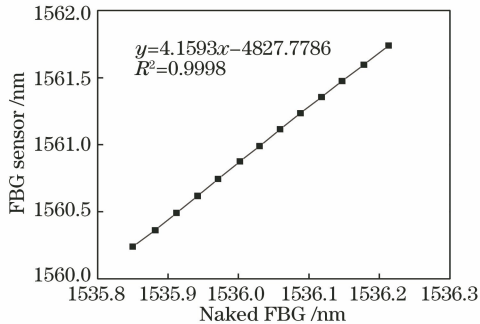


图 4 FBG 应变传感器应变标定曲线图

Fig. 4 Strain calibration curve of FBG strain sensor

低温敏 FBG 应变传感器、FBG 温度传感器通过恒温水浴加热箱、光纤光栅解调仪对不同温度下传感器中心波长的变化进行监测,得到其中心波长随温度的变化曲线如图 5 和图 6 所示。在 $20 \text{ } ^\circ\text{C} \sim 80 \text{ } ^\circ\text{C}$ 范围内,低温敏 FBG 应变传感器中心波长与温度之间的线性关系为 $y = 0.00127x + 1560.2163$,线性决定系数 R^2 达 0.9998,其温度灵敏度系数仅

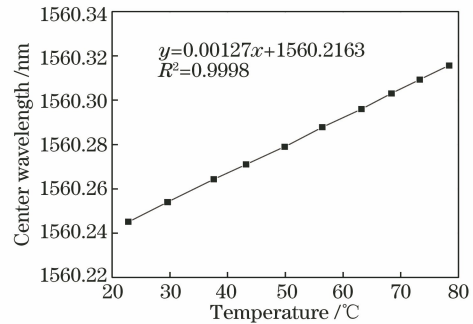


图 5 FBG 应变传感器温度标定曲线

Fig. 5 Temperature calibration curve of FBG strain sensor

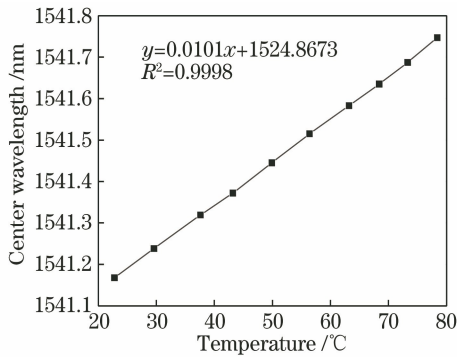


图 6 FBG 温度传感器温度标定曲线

Fig. 6 Temperature calibration curve of FBG temperature sensor

为 1.27 pm/°C,这说明该传感器的温度灵敏度系数较低,具有较好的温度补偿效果,可用于温度变化较

为明显的现场试验测试之中。FBG 温度传感器中心波长与温度之间的关系如图 5 所示,其线性关系为 $y = 0.0101x + 1524.8673$,线性决定系数 R^2 达 0.9998,温度灵敏度系数为 10.10 pm/°C,该传感器具有较高的温度灵敏性,可用于监测 PHC 管桩贯入过程中的土层温度变化情况。

3 试验方案

3.1 试验场地

试验场区位于东营市河口街道,属典型的黄河三角洲地貌,场地为住宅建设用地,拟采用预制桩。场地表层土为回填土,厚度为 0.9~5.3 m,其下以粉土、粉质黏土为主。地下水位埋深为 0.30~3.00 m,经土工试验可得,场地土层性质参数如表 1 所示。

表 1 土层性质参数

Table 1 Parameters of soils

Soil type	Soil description	Depth /m	Water content /%	Unit weight / (kN · m ⁻²)	Void ratio	Cohesion / kPa	Internal friction angle / (°)	Compression modulus /MPa
Fill	Soft plastic clay	0.9-5.3	30.6	18.5	0.867	13.8	6.8	4.1
Silty soil A1	Loose dense silty soil	0.3-2.5	28.8	18.6	0.803	8.7	20.1	8.1
Silty clay B1	Loose dense silty soil	0.3-1.1	31.5	18.3	0.89	16.9	7.3	4.6
Silty clay B2	Soft plastic clay	0.3-1.9	30.9	18.3	0.876	17.6	7.4	4.8
Silty soil A2	Medium dense silty soil	0.7-4.0	28.3	18.7	0.794	8.7	21	8.7
Silty clay B3	Soft plastic to flow plastic clay	2.6-4.6	31.7	18.3	0.895	17.5	6.8	4.6
Silty soil A3	Medium dense silty soil	0.8-3.8	28.3	18.7	0.793	10.3	20.6	10.2

3.2 传感器安装及静压沉桩

试验所用 PHC 管桩的型号为 PHC-A400-95-12,桩端形式为闭口桩,试桩编号分别为 TP1、TP2。由于在静压过程中桩身存在偏心荷载及挠曲变形,对测试结果存在一定的影响,故将传感器对称安装于桩身两侧,求其两侧的应变平均值作为此截面的应变值。

试验所用 FBG 应变传感器、FBG 温度传感器均由深圳简测科技生产,采用刻槽法安装。在桩身表面对开槽位置进行标记划线,在传感器安装位置进行定位标记。对两试桩均设置 6 个应变监测断面,由桩端至桩顶的间距为 1D、2D、4D、8D、12D,其中 D 为管桩直径,两侧传感器分别编号为 FBG 1~FBG 6、FBG 1'~FBG 6',FBG 温度传感器安装于 FBG 2、FBG 3 之间。

使用开槽机沿划线在桩身两侧开浅槽,浅槽的深度、宽度分别为 2 cm、2.5 cm,开槽后对浅槽进行清理,对传感器安装位置找平后,通过环氧树脂将传感器平行于桩身轴线方向安装于浅槽内,最后再采用环氧树脂填充浅槽,用以保护传感器及光纤,安装过程如图 7、图 8 所示。

静压机械为山河液压静力压桩机,可提供的最大压桩力为 6800 kN。通过吊装起重机将管桩吊装就位,压桩机的液压夹具夹紧桩身,通过液压缸对夹具施加垂直向下的推力,将管桩压桩入土,受压桩机行程限制,在沉桩后期需借助送桩器将整桩压入土体中。FBG 传感器的数据由光纤光栅解调仪采集,解调仪参数如表 2 所示。传感器安装位置及静力压桩示意图如图 9 所示。

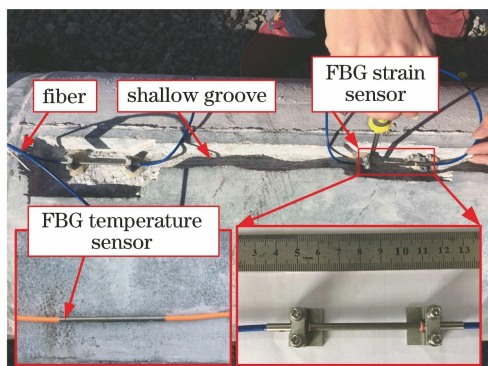


图 7 传感器安装示意图

Fig. 7 sensors installation



图 8 环氧树脂填充于浅槽

Fig. 8 Shallow groove filled with epoxy resin

表 2 光纤光栅解调仪参数

Table 2 Parameters of FBG demodulator

Sampling frequency /s ⁻¹	Dynamic range /nm	Range /nm	Accuracy /nm	Resolution /pm
1	±3	1500–1600	±2	1

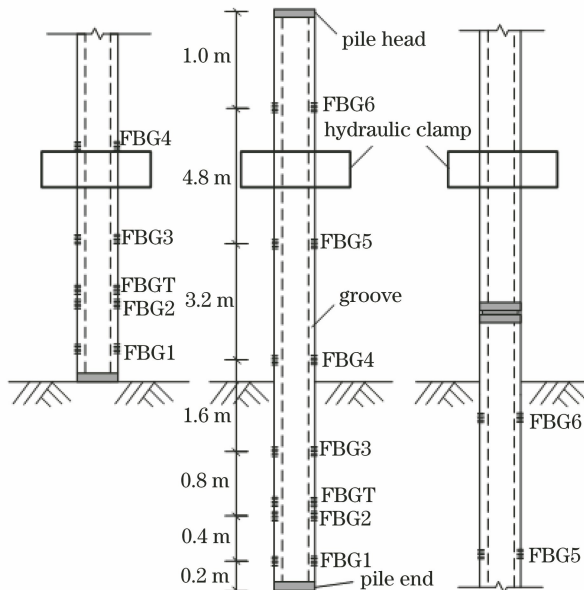
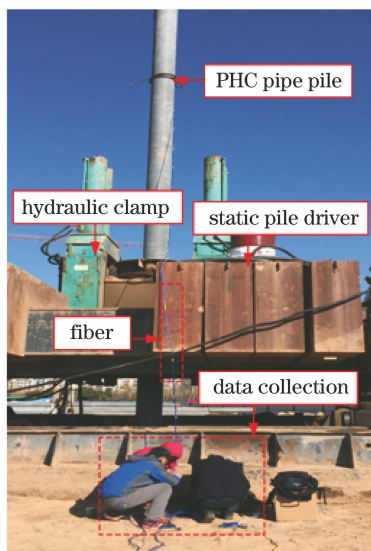


图 9 传感器安装位置及静力压桩示意图

Fig. 9 Schematic diagram of sensor installation position and static pressure pile

4 测试结果分析

4.1 温度变化分析

图 10 为沉桩过程中温差与时程的关系曲线,可见所用 FBG 温度传感器能够对土层温度变化进行连续动态的监测,具有较好的监测效果。在静压沉桩过程中,随着时间的推移,贯入深度增加,温差逐渐增大。本试验时间在冬季,地表温度较低,近地表的地层温度呈正梯度,越远离地表,温度越高。在沉桩前期 0~230 s 时,桩端处在温度日变化带范围内,此温度变化带内温度受气温的影响较大,由于贯入

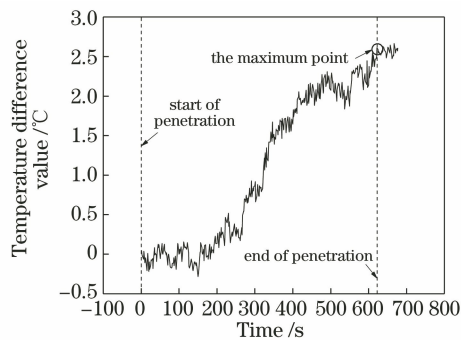


图 10 温差与时程关系曲线图

Fig. 10 Temperature difference versus time

时间较短,气温变化较小,故温差变化不明显。当桩端穿过温度日变化带后,温差迅速增大,直至沉桩结束时温差最大值达 2.62 ℃。

在基于 FBG 传感技术的室内静压试验研究中,由于在试验过程中温度波动较小,可忽略温度对 FBG 应变传感器中心波长的影响。但是,在现场静压试验中温差高达 2.62 ℃,若不考虑温度的影响,会影响 FBG 传感器应变监测的准确性,采用低温敏感型 FBG 应变传感器是一种合理且简便的温度补偿方法。

4.2 贯入阻力分析

端阻力由桩端的 FBG 应变传感器进行监测,以该截面的桩身轴力为端阻力,通过应变传感器的中心波长及应变,可得桩身轴力^[19],其表达式为

$$N = EA \Delta \epsilon, \quad (5)$$

式中: N 为桩身轴力; E 为桩身弹性模量; A 为桩身横截面积; $\Delta \epsilon$ 为桩身应变值。

沉桩阻力由静力压桩机监测,根据静压沉桩机理,桩身在贯入过程中所受侧摩阻力的表达式为

$$F_s = R - Q_s, \quad (6)$$

式中: F_s 为侧摩阻力; R 为沉桩阻力; Q_s 为端阻力。

在静压过程中,试桩 TP1、TP2 的压桩力、端阻力和侧摩阻力随深度的变化曲线,如图 11、图 12 所示,可见低温敏 FBG 应变传感器,能够对静压沉桩过程中的贯入阻力进行动态、精准的监测,能够较好地满足监测要求。由图 11、图 12 可知,试桩 TP1、TP2 的压桩力均随贯入深度的增加整体上呈增大的趋势,压桩力由桩端阻力、桩侧摩阻力组成,其变化受两种贯入阻力的共同影响,对贯入阻力的具体分析如下。

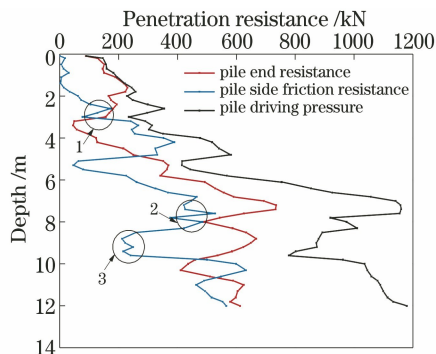


图 11 TP1 贯入阻力随深度变化曲线

Fig. 11 TP1 penetration resistance curve with depth

如图 11 所示,试桩 TP1 端阻力、侧摩阻力与压桩力的整体变化趋势具有一定相似性,但在不同贯入深度范围内,端阻力、侧摩阻力的变化存在一定的

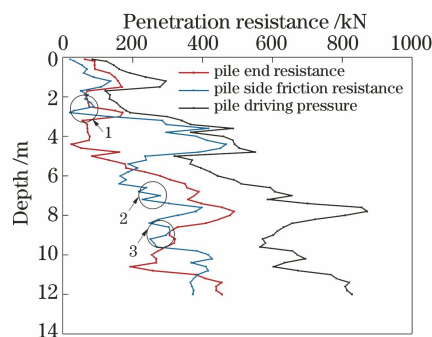


图 12 TP2 贯入阻力随深度变化曲线

Fig. 12 TP2 penetration resistance curve with depth

差异,这种差异可以通过摩擦、润滑理论进行解释和分析。在贯入深度为 0~2 m 时,由于贯入初期浅表层土与桩体之间的接触不充分,侧摩阻力未充分发挥作用,压桩力基本由端阻力承担,与李雨浓等^[20]通过静压贯入试验所得的结论一致。

端阻力减小对侧摩阻力的影响:当试桩贯入至 2~4 m、7~8 m、9~10 m 时,桩端土层较软,桩端阻力降低,导致贯入速度增大,桩土界面之间形成水膜,导致侧摩阻力降低,但受桩身切向力增大的影响,侧摩阻力又逐渐呈现增大的趋势。因此,端阻力的陡降,会使侧摩阻力先减少后增大,出现“Z”形变化曲线,如图 11 中 1、2、3 处标记所示。

端阻力增大对侧摩阻力的影响:当端阻力较小且贯入速度较快时,桩土界面之间的水膜逐渐增厚,侧摩阻力呈下降的趋势。当桩端贯入至较硬土层时,端阻力持续增长至一定数值时,管桩贯入速度降低,导致桩土界面之间水膜逐渐消散,侧摩阻力又逐渐增大,当贯入深度在 4~5.5 m、8~9 m 时,贯入阻力的变化规律均符合上述分析。

由图 12 可知,试桩 TP2 的端阻力、侧摩阻力、压桩力随深度的变化规律与试桩 TP1 较为相似,这是由于两桩处于同一试验场地内,土层分布及土体的力学参数大致相同。TP2 贯入阻力随深度的变化曲线中存在与 TP1 类似的“Z”曲线,如图 12 中 1、2、3 处标记所示,其变化规律同样可用摩擦、润滑理论进行解释,与胡永强等^[21]的研究结果一致,由此说明低温敏 FBG 应变传感器测试结果较好。

4.3 桩身轴力分析

PHC 管桩在静压沉桩过程中各传感器安装截面的桩身轴力,同样由(5)式进行计算,可得试桩 TP1、TP2 在不同贯入深度下的桩身轴力变化曲线,如图 13、图 14 所示。由图 13、图 14 可知,安装于试桩 TP1、TP2 上的 24 个 FBG 应变传感器全部存活,

且在整个静压沉桩试验过程中均未被损坏。这说明所用 FBG 应变传感器具有较高的抗震及轴向抗压性能,能够在试桩吊装、静压贯入过程中保持较高的存活率,所用传感器安装方法具有可行性,能够对 FBG 传感器进行有效的保护。

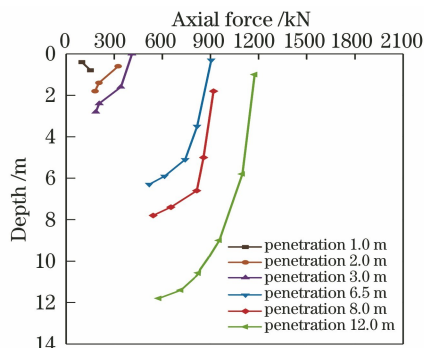


图 13 TP1 轴力变化曲线

Fig. 13 Axial force of pile TP1

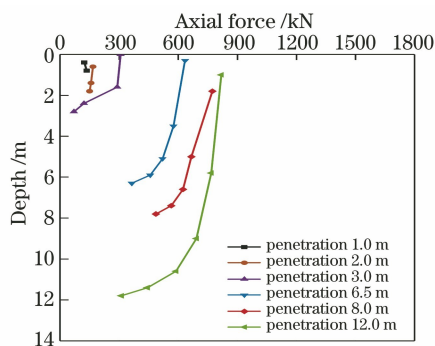


图 14 TP2 轴力变化曲线

Fig. 14 Axial force of pile TP2

如图 13、图 14 所示,试桩 TP1、TP2 的轴力变化及沿深度的分布规律相似,均随贯入深度的增加,处于同一深度处的轴力呈不断增加的趋势。在同一贯入深度下,在侧摩阻力的作用下,桩身轴力沿桩身自下而上非线性递减,这是由于桩周土体在桩体贯入过程中,受到持续的剪切作用,侧摩阻力降低,从而导致其轴力的减小速率不断降低,与寇海磊等^[12]现场静压桩试验结果一致。试桩 TP1、TP2 处在同一场区,两桩位处的土层分布大致相同,故在相同贯入深度下、相同桩身位置处的轴力数值相差较小,由此进一步说明 FBG 传感器的监测数据具有可靠性。

4.4 单位侧摩阻力分析

PHC 管桩在静压贯入过程中的单位侧摩阻力表达式为^[19]

$$q_i = \frac{Q_i}{ul_i} = \frac{N_i - N_{i+1}}{\pi D l_i}, \quad (7)$$

式中: q_i 为截面 i 的单位侧摩阻力; Q_i 为截面 i 的

侧摩阻力; N_i 为截面 i 的桩身轴力; u 为桩的周长; l_i 为截面 i 与 $i+1$ 之间的距离。

试桩 TP1、TP2 在不同贯入深度下单位侧摩阻力变化曲线,如图 15、图 16 所示。可见,试桩 TP1、TP2 单位侧摩阻力的变化趋势基本一致,且在相同贯入深度下的单位侧摩阻力值较为接近。在同一贯入深度下,单位侧摩阻力的大小、分布情况与土层性质、深度密切相关,整体上随深度的增加呈增长的趋势。在同一深度下,单位侧摩阻力随贯入深度的增加,桩周土体受到持续的扰动作用,桩土之间的接触作用逐渐降低,单位侧摩阻力出现不同程度的退化现象,与邢皓枫等^[22]采用 BOTDR 传感技术测得侧摩阻力的变化趋势一致。

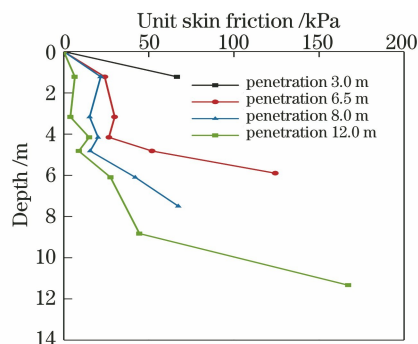


图 15 TP1 单位侧摩阻力变化曲线

Fig. 15 Unit side friction resistance of pile TP1

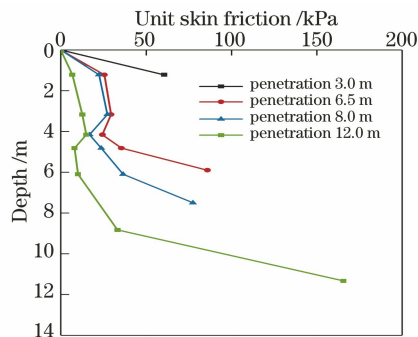


图 16 TP2 单位侧摩阻力变化曲线

Fig. 16 Unit side friction resistance of pile TP2

5 结 论

本试验通过刻槽法将 FBG 温度传感器、具有温度补偿功能的低温敏 FBG 应变传感器安装于 PHC 管桩的桩身两侧,对静压贯入过程中桩周土层的温度变化、桩身各处的应变状态进行了监测,通过试验数据分析可得结论如下:

1) 经 FBG 温度传感器监测数据的验证,可知在现场静压桩试验中土层温度变化较大,若不采取一定的温度补偿措施,会影响 FBG 应变传感器测试

数据的准确性。

2) 低温敏 FBG 传感器能够较好地满足现场试验中 PHC 管桩静压贯入特性的测试要求, 具有适用性和可行性, 能够对静压过程中管桩的贯入阻力及桩身应变进行动态、实时的监测。

3) 在静压贯入过程中, 压桩力、端阻力、侧摩阻力的变化规律受土层分布的影响较大, 桩身轴力均沿桩身自下而上非线性递减, 单位侧摩阻力则出现不同程度的退化。

4) 低温敏 FBG 传感器体积小, 安装方便, 便于温度补偿, 不仅可用于现场静压桩贯入特性的监测, 而且还可用于结构应变、边坡变形等受温度变化影响较大的工程监测之中。

参 考 文 献

- [1] Shi F, Hao S L. Field test for horizontal bearing capacity of PHC pipe piles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(S2): 617-622.
施峰, 郝世龙. PHC 管桩水平承载力试验研究 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(S2): 617-622.
- [2] Zhao M H, Zou X J, Luo S N. Analytical solution of the elastic displacement distribution in the surrounding soil of laterally loaded piles and its application [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(10): 108-112.
赵明华, 邹新军, 罗松南. 水平荷载下桩侧土体位移分布的弹性解及其工程应用 [J]. *土木工程学报*, 2005, 38(10): 108-112.
- [3] Jiang L, Zhang X Z, Wang J, et al. Real-time online detection of cutter wear based on fiber Bragg grating array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39 (12): 1206003.
蒋磊, 张学智, 王进, 等. 基于光纤布拉格光栅阵列的刀头磨损实时在线检测 [J]. *光学学报*, 2019, 39 (12): 1206003.
- [4] Yu J S, Liang D K. Impact load localization by using fiber Bragg gratings based on characteristics of skewness and kurtosis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328019.
喻俊松, 梁大开. 基于偏斜度、陡峭度特征的光纤布拉格光栅冲击载荷定位 [J]. *光学学报*, 2018, 38 (3): 0328019.
- [5] Markov A, Guo Y, Chang T Y, et al. Application of fiber Bragg gratings in the measurements of acoustic properties of ice [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35 (11): 1106001.
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): 1106001.
- [6] Klar A, Bennett P J, Soga K, et al. Distributed strain measurement for pile foundations [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2006, 159(3): 135-144.
- [7] Ding Y, Wang P, Yu S. A new method for deformation monitoring on H-pile in SMW based on BOTDA [J]. *Measurement*, 2015, 70: 156-168.
- [8] Guo Z S, Zhao Z Y. Application of distributed optical fiber sensing technique in pile foundation monitoring [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 189: 052074.
- [9] Miao C J, Shi B, Zheng X, et al. The inner force test of super-long PHC pile at sea based on BOFDA [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2018, 54(6): 1057-1063.
缪长健, 施斌, 郑兴, 等. 海上超长 PHC 管桩 BOFDA 内力测试 [J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2018, 54(6): 1057-1063.
- [10] Lee W, Lee W J, Lee S B, et al. Measurement of pile load transfer using the fiber Bragg grating sensor system [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41 (6): 1222-1232.
- [11] Zhu Y Q, Zhu H H, Sun Y J, et al. Model experiment study of pipe pile driving into soil using FBG-BOTDA sensing monitoring technology [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(S2): 695-702.
朱友群, 朱鸿鹄, 孙义杰, 等. FBG-BOTDA 联合感测管桩击入土层模型试验研究 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(S2): 695-702.
- [12] 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.
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.
- [13] Liu J W, Zhang Z M, Yu F, et al. Case history of installing instrumented jacked open-ended piles [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138(7): 810-820.
- [14] Cao H J, Si J H, Chen T, et al. Temperature and strain dual-parameter heterogeneous fiber Bragg grating sensor made by femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0702009.
曹后俊, 司金海, 陈涛, 等. 飞秒激光制备异质光纤光栅的温度应变双参数传感器 [J]. *中国激光*, 2018, 45(7): 0702009.
- [15] Wan L B, Wang D F. Research on temperature compensation of fiber Bragg grating strain sensor based on reference grating [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(1): 50-53.

- 万里冰, 王殿富. 基于参考光栅的光纤光栅应变传感器温度补偿[J]. 光电子·激光, 2006, 17(1): 50-53.
- [16] Zheng J B, Liu J, Ren J, et al. A novel temperature-independent double fiber Bragg grating strain sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(6): 2411-2413, 2417.
郑建邦, 刘嘉, 任驹, 等. 一种免受温度影响的双光纤光栅应变传感器[J]. 传感技术学报, 2006, 19(6): 2411-2413, 2417.
- [17] Wang Y P, Tang J, Yin G L, et al. The fabrication method and sensing application of fiber grating[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(5): 809-819.
王义平, 唐剑, 尹国路, 等. 光纤光栅制作方法及传感应用[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(5): 809-819.
- [18] Xue J H, Li C, Chen F Y, et al. Research of double metal tube type fiber Bragg grating strain sensor with low temperature sensitivity[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(10): 1387-1391.
薛俊华, 李川, 陈富云, 等. 低温敏的双管式光纤Bragg光栅应变传感器的研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(10): 1387-1391.
- [19] Wang Y H, Zhang M Y, Bai X Y, et al. Study of penetration characteristics and influence factor of jacked pile based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 4801-4812.
王永洪, 张明义, 白晓宇, 等. 基于光纤光栅传感技术的静压沉桩贯入特性及影响因素研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4801-4812.
- [20] 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.
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.
- [21] 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.
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.
- [22] Xing H F, Zhao H W, Ye G B, et al. Analysis of engineering characteristics of PHC pipe piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(1): 36-39.
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.