

# 低温敏 FBG 应变传感器在静压 PHC 管桩贯入实验中的应用

王永洪<sup>1,2</sup>, 张明义<sup>1,2</sup>, 张春巍<sup>1,2</sup>, 白晓宇<sup>1,2</sup>, 刘倩<sup>3</sup>

<sup>1</sup>青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033;

<sup>2</sup>青岛理工大学蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033;

<sup>3</sup>深圳市简测科技有限公司, 广东 深圳 518061

**摘要** 与普通光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器相比,低温敏 FBG 应变传感器对温度灵敏性低、对应变灵敏性高。故将低温敏 FBG 应变传感器应用于静压 PHC 管桩贯入过程中,监测了 PHC 管桩静压贯入过程中的桩身应力、桩端阻力和桩侧摩阻力的变化。实验结果表明:低温敏 FBG 应变传感器可以较好地静压 PHC 管桩贯入过程进行监测,为静压 PHC 管桩贯入过程监测及分析提供了新的测试器件。

**关键词** 传感器; 低温敏; FBG 应变传感器; 静压 PHC 管桩; 贯入实验

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.040602

## Application of FBG Strain Sensor with Low Temperature Sensitivity in Static Pressure PHC Pipe Pile Penetration Test

Wang Yonghong<sup>1, 2</sup>, Zhang Mingyi<sup>1, 2</sup>, Zhang Chunwei<sup>1, 2</sup>, Bai Xiaoyu<sup>1, 2</sup>, Liu Qian<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China;

<sup>2</sup>Collaborative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China;

<sup>3</sup>Shenzhen Jian Ce Co., Ltd., Shenzhen, Guangzhou 518061, China

**Abstract** Compared to common fiber Bragg grating (FBG) strain sensor, the FBG strain sensor with low temperature sensitivity has low sensitivity to temperature and high sensitivity to strain. We apply the FBG strain sensors with low temperature sensitivity to static pressure PHC pipe pile penetration test, and monitor the variations of force of pile shaft, toe resistance of pile, and side resistance of pile during the static pressure penetration of the PHC pipe pile. The experimental results indicate that application of FBG sensor with low temperature sensitivity on monitoring static pressure PHC pipe pile during penetration process is suitable, which provides a new testing device for monitoring and analyzing on static pressure PHC pipe pile during penetration process.

**Key words** sensors; low temperature sensitivity; fiber Bragg grating strain sensor; static pressure PHC pipe pile; penetration test

**OCIS codes** 060.2280; 060.2300; 060.2370

## 1 引言

静压 PHC 管桩(高强预应力混凝土管桩)具有

承载力高、施工噪音低、对桩身破坏性小、不污染环境、能显示压桩力等优点,在国内外得到广泛应用<sup>[1]</sup>。国内外学者对静压管桩贯入过程进行了深入

收稿日期: 2017-09-25; 收到修改稿日期: 2017-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(51778312)、山东省重点研发计划(GG201703200019)、山东省自然科学基金青年基金(ZR2016EEP06)

作者简介: 王永洪(1984—),男,博士研究生,讲师,主要从事岩土工程测试方面的研究。E-mail: hong7986@163.com

导师简介: 张明义(1958—),男,博士,博士生导师,主要从事地基基础及桩基础方面的研究。E-mail: zmy58@163.com

研究<sup>[2-4]</sup>,对管桩压桩力估算不准确,应力测试没有合理方法,对沉桩阻力构成认识不足,是目前制约静压管桩研究和应用的瓶颈问题。

光纤光栅具有抗电磁干扰能力强、体积小、重量轻,以及可远距离测量等优点<sup>[5-8]</sup>,使光纤光栅传感技术在工程领域的应用越来越被广泛<sup>[9-13]</sup>。普通光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器有表面式和埋入式两种安装方式。郭永兴等<sup>[12]</sup>提出了两端机械螺纹固定的表面式应变传感器,具有应变放大和灵敏性高的特性,将其成功应用于高速公路桥梁工程中。任亮等<sup>[14-16]</sup>研制了夹持式增敏微型FBG应变传感器,将其成功应用在地震模型实验、大坝模型实验和复合材料固化过程中。薛俊华等<sup>[17]</sup>利用内、外管热膨胀系数的不同研制了对温度敏感性低的双金属FBG应变传感器。文献<sup>[18-19]</sup>研制了FBG应变、位移和新型渗压传感器,并埋入到隧道涌水模型中测试开挖隧道过程中的应变、位移和渗压。

本文研究了基于光纤光栅传感技术、对温度灵敏度低、对应变灵敏度高的低温敏FBG应变传感

器,并将其预埋到静压PHC管桩上,监测静压PHC管桩沉桩过程桩身应力、桩端阻力和桩侧摩擦力的变化过程。

## 2 低温敏FBG应变传感器

### 2.1 工作原理

光纤光栅是利用掺铈、磷等光纤材料非线性吸收效应,采用紫外全息曝光法制成的一种纤芯折射率发生周期性变化的光栅。被光纤光栅反射回去的中心波长为 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ ,其中 $n_{\text{eff}}$ 为光纤纤芯有效折射率, $\Lambda$ 为光栅周期。FBG传感原理如图1所示,被测量物体的应变和温度变化都会引起光纤光栅中心波长的变化<sup>[6]</sup>,关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\Delta\varepsilon + (\alpha_f + \xi)\Delta T, \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为光纤光栅中心波长的变化量; $\lambda_B$ 为光纤光栅的中心波长; $\Delta\varepsilon$ 为应变变化值; $\Delta T$ 为温度变化值; $p_e$ 为光栅有效弹光系数; $\alpha_f$ 和 $\xi$ 分别为光栅热膨胀系数和光栅热光系数。

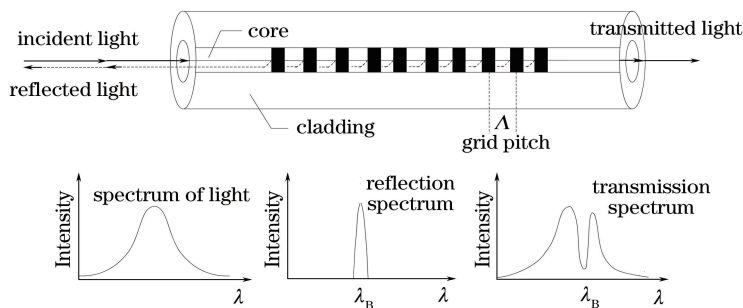


图1 FBG传感原理

Fig. 1 Sensing principle of FBG

低温敏传感器主要由2个夹持钢管、2个夹持支座、光纤光栅及封装部件组成,结构如图2(a)所示。光纤光栅两端用黏结剂固定于夹持钢管内,封装光纤光栅区域不与黏结剂接触,避免光纤光栅应变传递受黏结剂的影响<sup>[14]</sup>。当测试构件在两夹持支座之间发生轴向变形时,光纤和夹持钢管

内黏结剂不发生变形,传感器中夹持钢管变形可忽略不计,夹持支座的变形全部作用在光纤光栅上<sup>[15-16]</sup>。传感器的安装方式如图2(b)所示。两端夹持支座通过下部底座和上部固定扣件分别与传感器两端夹持钢管固定,夹持支座使用黏结剂与测试构件连接。

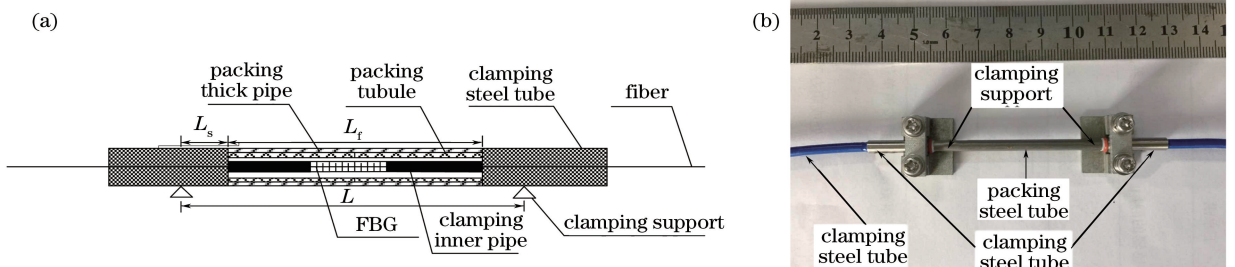


图2 低温敏FBG应变传感器(a)结构原理及(b)安装方式

Fig. 2 (a) Structure and (b) installation of FBG strain sensors with low temperature sensitivity

## 2.2 温度补偿原理

利用夹持钢管和夹持支座膨胀引起的光栅波长变化来抵消外界热膨胀和热光效应引起的光栅波长的变化,解决了因温度变化引起光纤光栅中心波长变化<sup>[17]</sup>的问题。(1)式可变为

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

式中:应变敏感系数  $S_\epsilon = 1 - p_e = 0.784 \mu\epsilon^{-1}$ ; 温度敏感系数  $S_T = \alpha_f + \xi = 7.35 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为外界构件和夹持部件的热膨胀系数,  $\alpha_1 = 10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\alpha_2 = 11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $L_1$  和  $L_2$  分别为外界构件和夹持部件的长度,  $L_1 = 100 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 50 \text{ mm}$ ;  $L_f$  为光纤光栅的长度,  $L_f = 10.6 \text{ mm}$ 。这些参数代入(2)式中可得

$$\left( S_\epsilon \frac{-2\alpha_2 L_2 + \alpha_1 L_1}{L_f} + S_T \right) \Delta T = 0, \quad (3)$$

故(2)式可变为

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

可见,低温敏 FBG 应变传感器的中心波长只受应变变化的影响。

## 3 低温敏 FBG 应变传感器的标定实验

### 3.1 温度标定

采用水浴加热的方法对低温敏 FBG 应变传感器进行温度标定,3 次温度实验获得的光纤光栅中心波长与温度的关系曲线如图 3 所示。应变传感器的温度灵敏度系数  $S_T = \Delta\lambda / \Delta T$ , 其中  $\Delta\lambda$  为中心波长

偏移量,  $\Delta T$  为温度增量。温度在  $20 \sim 120 \text{ } ^\circ\text{C}$  内变化, 光纤光栅波长平均变化  $0.078 \text{ nm}$ , 该低温敏 FBG 应变传感器的温度灵敏度系数为  $0.78 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。中心波长  $1550 \text{ nm}$  的裸光纤光栅温度灵敏度系数为  $10.8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , 低温敏 FBG 应变传感器的温度灵敏度为裸光纤光栅的  $7.2\%$ , 对温度的灵敏性显著降低。

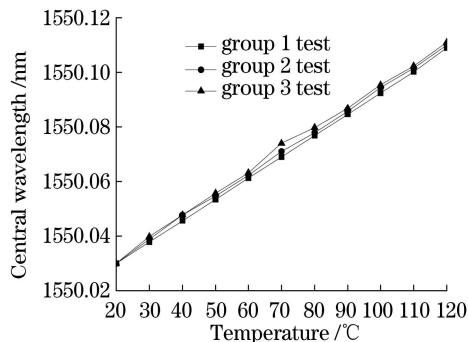


图 3 3 次温度实验的中心波长与温度的关系曲线

Fig. 3 Relationship between central wavelength variation and temperature under three temperature tests

### 3.2 波长标定

使用万能实验机对 3 个低温敏 FBG 传感器的中心波长与裸光纤光栅中心波长进行标定, 两者的关系曲线如图 4 所示。3 个传感器的中心波长  $y$  与裸光纤光栅的中心波长  $x$  的关系分别为  $y = 2.0841x - 1597.8$ ,  $y = 2.1041x - 1627.7$ ,  $y = 2.1557x - 1597.8$ , 线性度  $R^2$  均为  $0.9999$ , 可见线性拟合度均很好。所标定的 3 个传感器的应变灵敏度系数分别为  $2.50, 2.52, 2.59 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , 而裸光纤光栅的应变灵敏度系数为  $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , 可见, 该方法封装的低温敏 FBG 应变传感器的灵敏度高, 性能好。

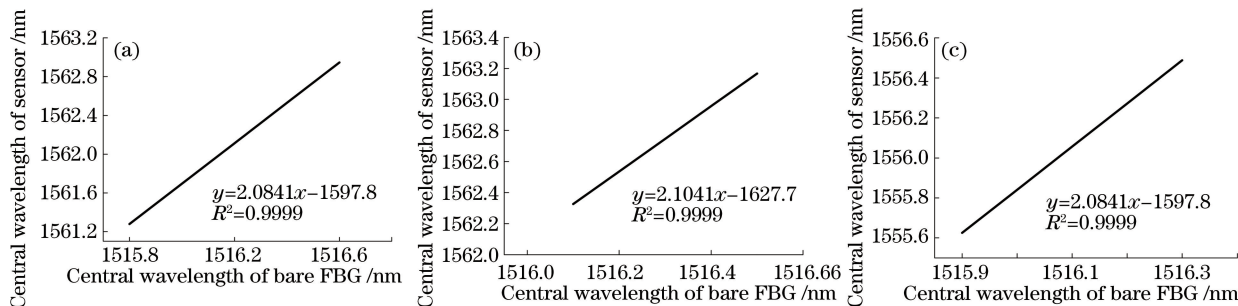


图 4 3 个传感器中心波长与裸光纤光栅中心波长的关系曲线。(a)、(b)、(c)分别为 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 传感器

Fig. 4 Relationship between the sensor central wavelength and bare FBG. (a)、(b)、(c) are sensors 1, 2, 3, respectively

## 4 静压 PHC 管桩贯入实验

### 4.1 传感器布设

本次实验所采用的静压 PHC 管桩 (PHC-400-AB-13, 杭州某公司), 通过布料、张拉、离心、养护、

脱模工序一次成型。管桩外径为  $400 \text{ mm}$ , 壁厚为  $95 \text{ mm}$ , 横截面积为  $91030 \text{ mm}^2$ 。

在 PHC 管桩桩身表面沿长度方向刻槽, 槽底部放入 AB 胶, 用环氧树脂封装并与桩身表面齐平, 使传感器与桩身成为一体。对 4 根 PHC 管桩 SZ1、

SZ2、SZ3、SZ4 进行实验；SZ1、SZ2 接桩后长度为 18 m，桩端进入圆砾层；SZ3、SZ4 单桩长度为 13 m，桩端进入粉质黏土层。根据土层分布情况，SZ1、SZ2 每根桩安装 9 个低温敏 FBG 应变传感器，SZ3、SZ4 每根桩安装 6 个低温敏 FBG 应变传感器。各传感器的中心波长在 1510~1590 nm 之间，经过标定测试实验后进行安装。埋入光纤光栅传感器的 PHC 管桩，如图 5 所示。

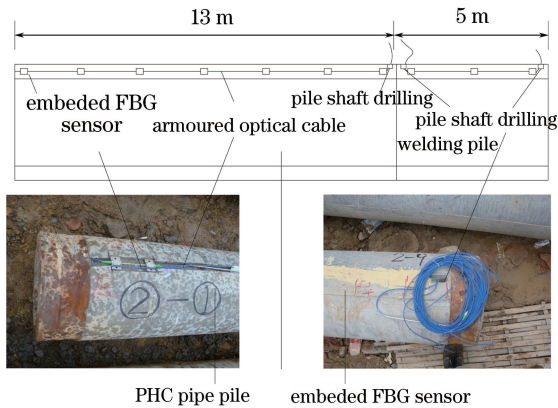


图 5 光纤光栅传感器分布示意图

Fig. 5 FBG sensors distribution diagram

接桩时先将导线从端头板预钻孔引进管桩空芯内，再通过上节桩空芯内绑石头的线将导线拉到顶部，确保导线长度足够与采集设备连接。第二节桩起吊完成后使铠装光缆穿过其桩身端头板的预钻孔后穿出，与第一节桩上的传感器同时插入光纤光栅解调仪。继续压桩，两节桩同时采集数据。

#### 4.2 贯入过程数据分析

记录埋入 PHC 管桩桩身内各测点低温敏 FBG 应变传感器初始波长及贯入过程的波长变化值，根据(4)式把波长变化值换算成贯入过程各测点位置桩身应变值，用桩身应变值乘以桩身弹性模量计算出桩身应力，桩身应力乘以桩身横截面积得到各测点位置的桩身轴力。根据桩身竖向荷载传递关系，相邻两个截面处桩身轴力之差即为桩侧摩阻力。分析沉桩阻力，首先要分离桩端阻力，距离端头板 5 mm 处安装最底部的传感器，近似认为该传感器位于桩端底部，其读数即为桩端阻力。实验场地土层分布及物理力学指标如表 1 所示。SZ1 光栅的中心波长及贯入 18 m 时波长变化如表 2 所示。

表 1 实验场地土层分布及物理力学指标

Table 1 Soil distribution and physical-mechanical properties of subsoil at testing site

Soil number	Soil name	Soil thickness / m	Natural moisture content $w / \%$	Natural gravity / $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	Void ratio $e$	Soil proportion $G_s$	Plasticity index $I_p / \%$	Liquidity index $I_L / \%$	Compression modulus $E_s / \text{MPa}$
①	fill	0-3.3							
②	silty clay	0.3-5.8	25.7	19.36	0.73	2.72	12.6	0.64	4.5
③	sandy silt	3.5-12.0	31.2	18.52	0.87	2.69	6.9		5.5
④	silty clay	8.9-13.5	44.8	17.07	1.28	2.74	17.2	1.46	2.0
⑤	silty clay	12.8-15.7	23.4	19.77	0.67	2.72	12.8	0.58	7.5
⑥	round gravel	14.5-17.0							
⑦	round gravel and pebble	15.6-25.4							

表 2 SZ1 光栅的中心波长及 SZ1 光栅贯入 18 m 时的波长变化

Table 2 Center wavelength of SZ1 grating and wavelength change when the grating is injected to 18 m

Number	Center wavelength / nm	Wavelength change / nm
1	1514.091	0.484
2	1520.356	0.470
3	1524.984	0.440
4	1529.362	0.410
5	1534.987	0.381
6	1539.765	0.286
7	1544.578	0.223
8	1559.467	0.161
9	1565.864	0.097

##### 4.2.1 桩身应力

图 6 为桩身应力分布曲线。由图 6 可见，当桩身进入粉质黏土时，桩身轴力随贯入深度增加而减小，且减小幅度受桩周土层性状的影响，在桩端处最小。当贯入深度达到桩长时，各实验桩桩端处传感器获得的桩身轴力即桩端阻力，最大约为最大压桩力的 70%。SZ1、SZ2 桩端进入圆砾层，桩端阻力分别为 724.5 kN 和 684.1 kN，分别占压桩力的 79.1% 和 77.9%；SZ3、SZ4 桩端未进入圆砾层，桩端阻力分别为 577.5 kN 和 384.3 kN，分别占压桩力的 60.5% 和 55.7%。桩身应力在沉桩过程的变化表明，桩身应力变化与土层分布有关。



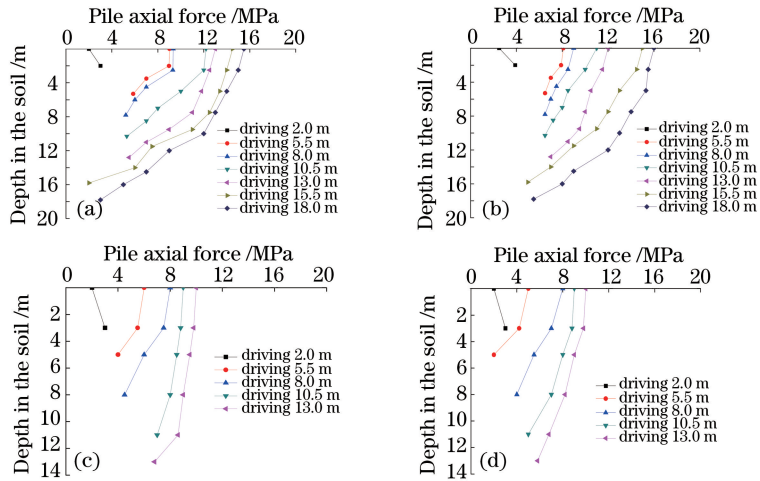


图6 桩身应力分布曲线。(a)、(b)、(c)、(d)分别为SZ1、SZ2、SZ3、SZ4管桩

Fig. 6 Variations of pile shaft force. (a), (b), (c), (d) are pile shafts SZ1, SZ2, SZ3, SZ4, respectively

#### 4.2.2 桩端阻力和桩侧摩阻力

图7表示贯入过程中桩端阻力和桩侧摩阻力沿贯入深度变化的曲线。由图7可见，SZ1、SZ2的桩端阻力、桩侧摩阻力存在明显的“转折点”，表明桩侧摩阻力的发挥接近极限，SZ1、SZ2出现在

圆砾层，侧摩阻力急速减小，桩端阻力对沉桩阻力的贡献逐渐增大；SZ3、SZ4的桩端阻力、桩侧摩阻力的“转折点”不明显，由于未进入持力层，侧摩阻力一直发挥较大作用，桩端阻力没有出现明显增大趋势。

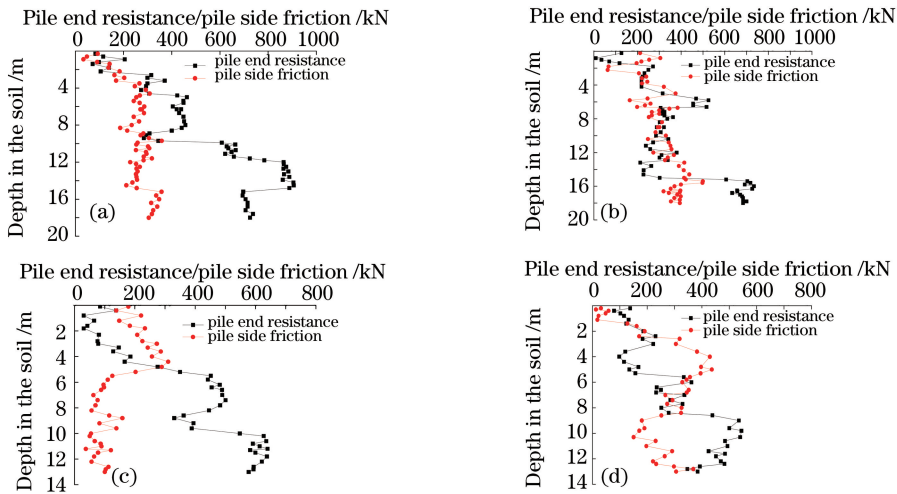


图7 贯入过程中桩端阻力和桩侧摩阻力随入土深度变化曲线。(a)、(b)、(c)、(d)分别为SZ1、SZ2、SZ3、SZ4管桩

Fig. 7 Variations of toe resistance and sides resistance during installation.

(a), (b), (c), (d) are pile shafts SZ1, SZ2, SZ3, SZ4, respectively

## 5 结论

将经过标定测试实验后的低温敏FBG应变传感器应用到静压PHC管桩贯入过程，在不同的土层分布及桩端的土层贯入实验中，低温敏FBG应变传感器成功地监测出桩身应力及桩端阻力、桩侧摩阻力的变化。后续工作将进一步研究传感器在桩身的安装工艺，提高传感器的成活率和准确性；在桩身同时安装传统电类传感器与FBG应变传感器，对比

测试结果，进一步优化低温敏FBG应变传感器。

## 参考文献

- [1] Zhang M Y. Research and application on the jacked piles[M]. Beijing: China Building Material Industry Press, 2004.  
张明义. 静力压入桩的研究与应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004.
- [2] Sheng D C, Eigenbrod K D, Wriggers P. Finite element analysis of pile installation using large-slip

- frictional contact [J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, 32(1): 17-26.
- [3] White D J, Lehane B M. Friction fatigue on displacement piles in sand [J]. *Géotechnique*, 2004, 54(10): 645-658.
- [4] 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.
- [5] Sun S H, Yu Y H, Li H, *et al.* Detection technique of stress waves based on fiber Bragg grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0505002.  
孙诗惠, 余有龙, 李慧, 等. 基于光纤光栅的应力波检测技术研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0505002.
- [6] Du Y, Si J H, Chen T, *et al.* Quasi-distributed high temperature sensor based on fiber Bragg grating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 100606.  
杜勇, 司金海, 陈涛, 等. 准分布式光纤布拉格光栅高温传感器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 100606.
- [7] Guo Y X, Zhang D S, Zhou Z D, *et al.* Welding-packaged accelerometer based on metal-coated FBG [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(7): 070604.
- [8] Li J Z, Sun B C, Du Y L. Union self-compensated packaging of FBG strain sensor [J]. *Optoelectronics Letters*, 2014, 10(1): 30-33.
- [9] Pang X R, Wang D P. Oblique crack monitoring of concrete beam with macro FBG strain sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 120603.  
庞香润, 王大鹏. FBG 宏应变传感器的混凝土梁斜裂缝监测 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 120603.
- [10] Zhu H H, Yin J H, Jin W, *et al.* Health monitoring of foundations using fiber Bragg grating sensing technology [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(6): 109-115.  
朱鸿鹄, 殷建华, 靳伟, 等. 基于光纤光栅传感技术的地基基础健康监测研究 [J]. *土木工程学报*, 2010, 43(6): 109-115.
- [11] 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.  
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.
- [12] Guo Y X, Zhang D S, Zhou Z D, *et al.* A novel surface-mounted FBG strain sensor and its application in highway bridge engineering [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, 25(3): 435-441.  
郭永兴, 张东生, 周祖德, 等. 表面式 FBG 应变传感器及其在高速公路桥梁工程中的应用 [J]. *光电子 • 激光*, 2014, 25(3): 435-441.
- [13] Zhang Z L, Wang Y, Li X L, *et al.* Study on the application of FBG sensing technology in monitoring slope stability [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2016, 27(8): 838-844.  
章征林, 王源, 李小雷, 等. FBG 传感技术在边坡稳定性监测中的应用 [J]. *光电子 • 激光*, 2016, 27(8): 838-844.
- [14] Ren L, Li H N, Hu Z Q, *et al.* Development and application of FBG strain sensor with enhanced sensitivity in the model vibration experiment [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, 19(11): 1437-1441.  
任亮, 李宏男, 胡志强, 等. 一种增敏型光纤光栅应变传感器的开发及应用 [J]. *光电子 • 激光*, 2008, 19(11): 1437-1441.
- [15] Jia Z G, Ren L, Li H N, *et al.* Application of fiber Bragg grating sensors in monitoring curing process of carbon fiber composite [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(5): 1298-1303.  
贾子光, 任亮, 李宏男, 等. 应用光纤光栅传感器监测复合材料固化过程 [J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1298-1303.
- [16] Ren L, Jiang T, Li D S, *et al.* Application of small FBG strain sensors in dam model experiment [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2013, 33(2): 277-341.  
任亮, 姜涛, 李东升, 等. 微型 FBG 应变传感器在大坝模型实验中的应用 [J]. *振动、测试与诊断*, 2013, 33(2): 277-341.
- [17] 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.
- [18] Wang J, Liu B, Sui Q M, *et al.* Application of a novel fiber-optic grating seepage pressure sensor in

tunnel water gushing model [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2009, 20(10): 1286-1289.

王静, 刘斌, 隋青美, 等. 新型 FBG 渗压传感器在隧道涌水模型中的应用[J]. 光电子·激光, 2009, 20(10): 1286-1289.

[19] Jiang S C, Wang J, Sui Q M, *et al.* Developing of

micro FBG displacement sensor and its application to model experiment[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(3): 348-353.

蒋善超, 王静, 隋青美, 等. 微型 FBG 位移传感器研制及其在模型实验中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(3): 348-353.