

增敏微型 FBG 应变传感器在预制桩模型实验中的应用

王永洪^{1,2}, 张明义^{1,2}, 张春巍^{1,2}, 白晓宇^{1,2}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 在静压预制桩沉桩过程中,采用一种增敏微型光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器测试桩身的受力情况。利用在模型桩桩身表面开槽埋设 FBG 传感器的方式,通过压桩贯入模型实验,实时测试了模型桩桩身在贯入过程中的受力状态,分析了桩身轴力和桩侧摩阻力随贯入深度变化的规律。实验结果表明:该传感器预埋到模型桩桩身表面能很好地与桩体结合,可以精确测试模型桩桩身的受力变化,并且在模型实验中预制成功率高、安装灵活。

关键词 传感器;增敏;光纤布拉格光栅;应变传感器;静压预制桩;模型实验

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.050606

Application of Enhancement Micro FBG Strain Sensor in Model Experiment of Static Pressure Precast Pile

Wang Yonghong^{1,2}, Zhang Mingyi^{1,2}, Zhang Chunwei^{1,2}, Bai Xiaoyu^{1,2}¹School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266033, China;²Collaborative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266033, China

Abstract A kind of enhancement micro fiber Bragg grating (FBG) strain sensor is used to test static pressure precast pile force during precast pile driving. We make a groove on the surface of the model pile body to bury FBG strain sensor, use static pressure precast pile penetration model experiment to test stress states in real time, and analysis profiles of axial force of pile shaft and side friction of pile with embedded depth. Experiment results show that the enhancement micro FBG strain sensor can be embedded well with model pile and can test stress states of model pile exactly. In addition, this kind of FBG sensor shows advantages of high prefabricated success rate and easy installation.

Key words sensors; enhancement; fiber Bragg grating; strain sensors; static pressure precast pile; model experiment

OCIS codes 060.2280; 060.2300; 060.2370

1 引言

静压桩模型实验中测量桩身应力常采用应变片和光纤光栅技术。张建新等^[1]通过在模型桩身粘贴电阻应变片测量桩身应力,在桩底埋设压力盒测量

桩端阻力,深入研究了桩端阻力和桩侧摩阻力的相互作用。周健等^[2]在模型桩上粘贴应变片,揭示了密实砂土中静压桩沉桩过程的动端阻力和动侧摩阻力的变化规律。李雨浓等^[3]在模型管桩不同位置粘贴应变片,测得相应断面处桩身应力,进行了层状地基

收稿日期: 2017-11-05; 收到修改稿日期: 2017-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(51778312)、山东省重点研发计划(2017GSF16107)、山东省自然科学基金项目(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技术方面的研究。

E-mail: hong7986@163.com

导师简介: 张明义(1958—),男,博士,教授,主要从事地基基础与岩土工程测试技术方面的研究。

E-mail: zmy58@163.com

静压桩贯入机理室内模型实验研究。赵春风等^[4]采用内部插入的方式在桩芯内部粘贴应变片,提高了应变片的预制成功率,通过测量桩身应力研究了竖向和弯矩荷载作用下单桩的水平荷载特性。

光纤光栅是一种新的光纤传感技术,光纤光栅传感器具有易于光纤熔接,可实现多个光栅同时写入^[5-8]的特点,近年来被频繁用于模型实验中。冯春等^[9]在槽钢上切槽埋设光纤布拉格光栅(FBG)传感器并进行反复击打实验,研究表明光纤光栅传感系统可以很好地应用于打入预应力大的强混凝土(PHC)管桩中。李世海等^[10]将光纤光栅传感技术应用于抗滑桩模型实验中,并与应变片测试结果进行对比,发现FBG传感器和应变片选择不同的黏结剂时黏结效果不同。朱友群等^[11]将FBG和布里渊光时域分析(BOTDA)传感监测技术联合应用到管桩打入模型实验中,用黏结剂涂覆传感光纤,结果显示FBG传感技术可以较好地监测管桩桩身应力的变化情况。

传感器粘贴在模型桩表面容易受土地摩擦的影响,预制成功率较难达到100%,且粘贴工作繁琐。

本文为了研究预制静压桩沉桩过程桩身受力情况,尝试性地在模型桩表面开槽埋设增敏微型FBG应变传感器,结果表明该方法不仅提高了测试精度和工作效率,还推动了FBG传感技术在模型桩实验中的应用。

2 FBG 传感器工作原理

2.1 测量原理

FBG利用了锗、磷等光纤材料的光敏性,使入射光写入纤芯内并与其掺杂粒子相互作用,致使纤芯折射率发生周期性变化,在纤芯内形成具有空间相位的光栅。采用多个光栅同时写入,实现分布式传感,测量原理如图1所示,图中纤芯的明暗交替表示折射率的周期性变化^[11-12]。FBG的波长变化率与FBG轴向应变和温度变化之间的关系为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = \eta\varepsilon + \gamma(T - T_0), \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda/\lambda_B$ 为光纤光栅波长变化率; λ_B 为光纤光栅的中心波长; η 为应变系数; γ 为温度系数; ε 为光纤轴向应变; $T - T_0$ 为温度变化值。

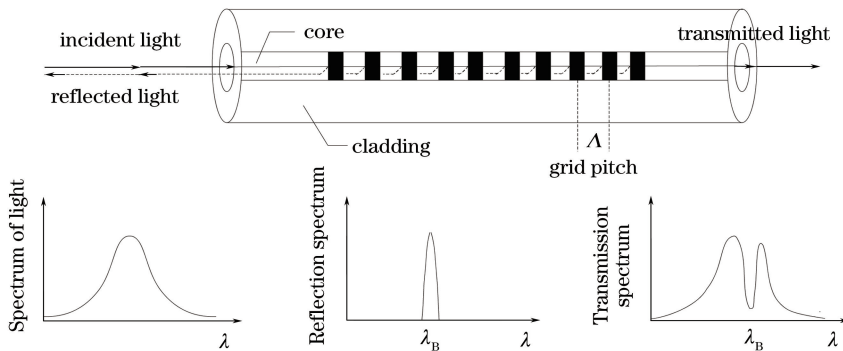


图1 FBG 准分布式测量原理

Fig. 1 Measurement principle of quasi-distributed FBG

2.2 数据分析原理

光纤光栅技术基于光的全反射现象,把被测的应变、温度等物理量调制为传输光波的某一参数,使应变、温度等被测物理量随光波长的变化而变化,通过对调制的光波长信号进行检测,最终转化为被测量的物理量^[13-14]。

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon \Delta\varepsilon + K_T \Delta T, \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为光栅中心波长变化量; K_ε, K_T 分别为应变、温度灵敏度系数; $\Delta\varepsilon, \Delta T$ 分别为被测结构应变、温度的变化量。

根据(1)式可知,采用光纤传感技术测试模型桩贯入过程的应变变量时,因室内温度变化不大,不考虑因温度变化引起的波长变化量,因此模型桩内没有

埋设温度传感器,贯入实验的应变计算公式为

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_B}{K_\varepsilon}. \quad (3)$$

3 标定实验与结果分析

增敏微型FBG应变传感器纤芯采用裸光纤光栅,光纤光栅涂覆层采用Polyamide聚酰胺,封装材料包裹层采用纤维增强复合材料(FRP),消除了黏结剂对FBG传感器应变信号传输的影响,通过调节封装工艺中裸光纤光栅的参数,可以改变FBG传感器的应变灵敏度系数。从光纤光栅传感器工作原理可以看出,增敏微型FBG应变传感器波长是通过标定裸光纤光栅实现的,由标定实验

测试数据可以绘制所标定 FBG 传感器的波长与裸光纤光栅波长的关系曲线,受篇幅所限仅给出3个

FBG 传感器的标定测试结果与拟合曲线,如图 2 所示。

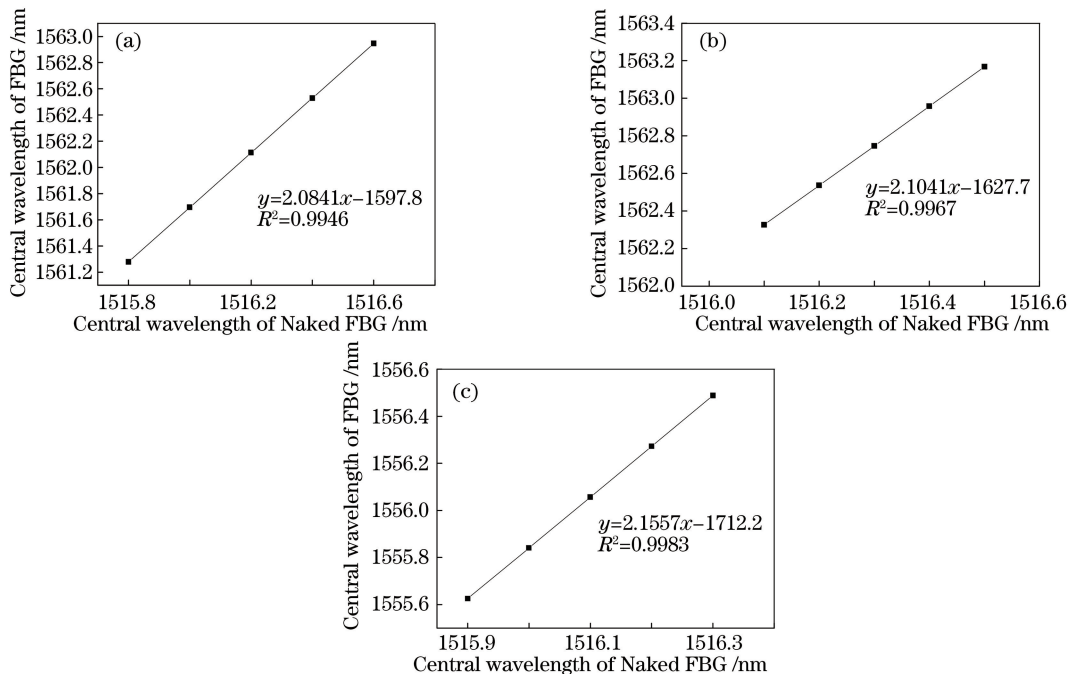


图 2 FBG 传感器的标定测试结果与拟合曲线。(a) FBG 1;(b) FBG 2;(c) FBG 3

Fig. 2 Calibration test results of the FBG sensor and fitting curves. (a) FBG 1; (b) FBG 2; (c) FBG 3

由图 2 可以看出,FBG 1、FBG 2 和 FBG 3 的中心波长 y 与裸光纤光栅的中心波长 x 的关系分别为 $y = 2.0841x - 1597.8$ 、 $y = 2.1041x - 1627.7$ 和 $y = 2.1557x - 1712.2$,线性度 R^2 分别为 0.9946、0.9967 和 0.9983,表明具有很好的拟合度。裸光纤光栅的应变灵敏度系数为 $1.2 \text{ pm} \cdot (\mu\epsilon)^{-1}$,所标定 FBG 1、FBG 2 和 FBG 3 的灵敏度系数分别为 2.50, 2.52, $2.59 \text{ pm} \cdot (\mu\epsilon)^{-1}$ 。

4 FBG 传感器在模型实验中的应用

增敏微型 FBG 应变传感器结构示意图如图 3 所示,其直径为 2 mm,长度为 23 mm,尾纤为聚合物软管。增敏微型 FBG 应变传感器两端均由细径

管保护,既可以直接埋入结构中,也可以在细径管两端通过夹持支座做成夹持式传感器。将每 3 个 FBG 应变传感器串联在一起,串联后的 FBG 传感器如图 4。

为了准确得到预制桩静压沉桩过程荷载传递规律,采用直径为 60 mm,长度为 700 mm 的实心尼龙棒作为模型桩,在机床上对尼龙棒表面两侧对称开槽,开槽尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ (宽度 \times 深度)。将串联后的增敏微型 FBG 应变传感器分别埋于模型桩的两侧槽体内,底部与槽体粘贴并用环氧树脂封装,模型桩上端 FBG 应变传感器尾纤由空心钢套管保护,防止其过度弯折影响波长信号,模型桩及增敏微型 FBG 应变传感器安装如图 5 所示, a, b, c 分别代表两侧的测试点。

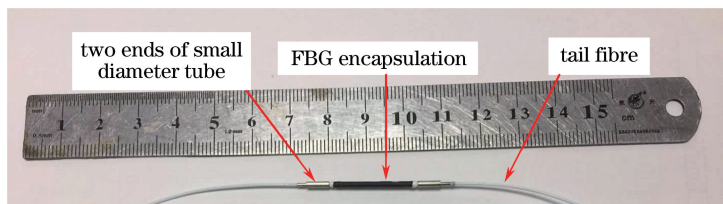


图 3 增敏微型 FBG 应变传感器结构示意图

Fig. 3 Structure schematic diagram of enhancement micro FBG strain sensor

实验过程如下。

1) 压桩前准备。为了模拟粉质黏土上覆土层自

重,在实验开始前,用 40 个质量为 5 kg 的混凝土试块均匀地压在模型地基土上面,避免了压桩力过小而

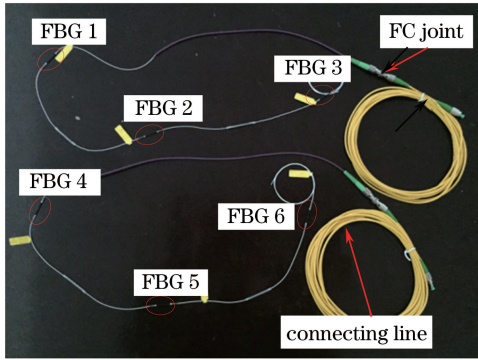


图 4 串联后的 FBG 应变传感器
Fig. 4 Series FBG strain sensors

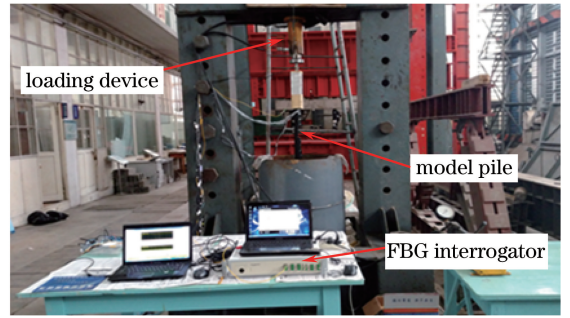


图 6 压桩过程
Fig. 6 Pressed pile process

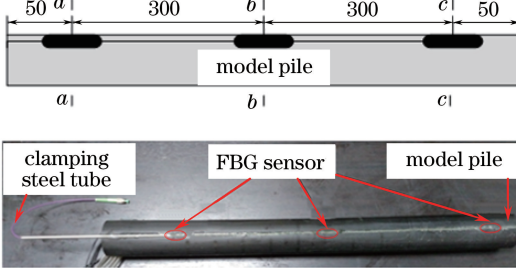


图 5 模型桩及 FBG 应变传感器安装
Fig. 5 Model pile and installation of FBG strain sensors

$$N = \sigma A, \tag{5}$$

式中： E 为模型桩的弹性模量； A 为模型桩桩身横截面面积，单位为 m^2 。

根据模型桩桩身竖向荷载传递关系，相邻两个测试点桩身轴力之差即为桩侧摩阻力，从而可以得到压桩过程中模型桩桩侧摩阻力随贯入深度变化的曲线。

压桩过程中，模型桩桩身轴力变化如图 7 所示，模型桩两侧变化规律基本一致。从图 7 可以看出，3 个测试点的桩身轴力都随贯入深度增加而增大，但各测试点桩身轴力沿贯入深度的变化趋势不完全一致：贯入深度在 $0 \sim 30$ cm 内， $a-a$ 和 $b-b$ 测试点斜率小， $c-c$ 测试点斜率较大， $a-a$ 和 $b-b$ 测试点桩身轴力增长速率明显小于 $c-c$ 测试点桩身轴力增长速率；贯入深度在 $30 \sim 70$ cm 内， $a-a$ 和 $b-b$ 测试点斜率变大， $c-c$ 测试点斜率反而减小， $a-a$ 和 $b-b$ 测试点桩身轴力增长速率大于 $c-c$ 测试点桩身轴力增长速率。在整个沉桩贯入过程，桩身上面的测试点始终大于桩身下面测试点的桩身轴力。

没有读数。模型桩放置到模型地基土的中心位置，调整千斤顶使其中心与模型桩的中心在同一直线。

2) 压桩过程。每压入 5 cm 记录一次压力数据显示仪上的压桩力，千斤顶满程须添加垫块后继续沉桩，直至实验结束，如图 6 所示。

3) 数据采集。在油压千斤顶下端面的中心位置放置压力传感器，采用压力数据显示仪采集数据，增敏微型 FBG 应变传感器采用美国微光光学 (MOD) 公司的光纤光栅解调仪采集数据。

测得各测试点光纤光栅应变传感器测得的应变值后，模型桩桩身应力 σ (单位为 MPa) 和桩身轴力 N (单位为 kN) 可分别表示为

$$\sigma = E \Delta \epsilon, \tag{4}$$

压桩过程中，模型桩桩侧摩阻力随贯入深度变化曲线如图 8 所示，两条曲线基本一致。图 8 曲线表明桩侧单位摩阻力随着模型桩贯入深度的增加是变化的。模型桩开始贯入时，由于压桩偏心和土体表面隆起等原因，桩土接触不够紧密，桩侧水平有效

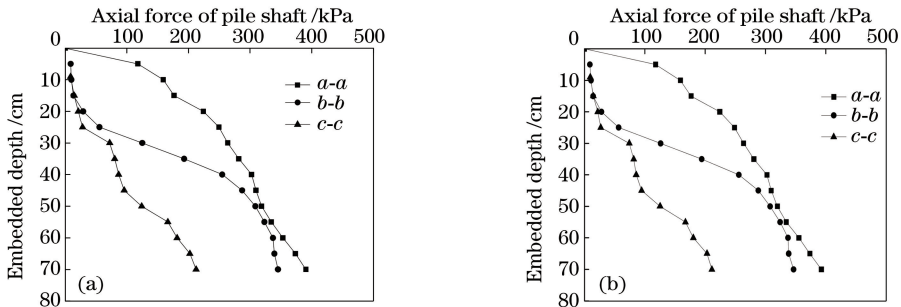
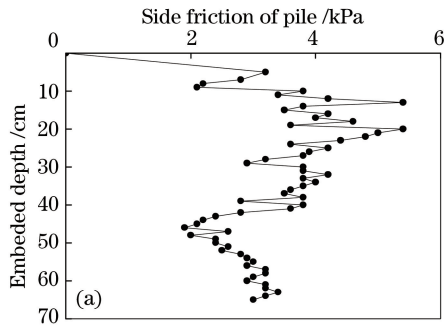


图 7 桩身轴力随贯入深度变化曲线。(a) FBG 1, FBG 2, FBG 3; (b) FBG 4, FBG 5, FBG 6

Fig. 7 Axial force of pile shaft versus embedded depth. (a) FBG 1, FBG 2, FBG 3; (b) FBG 4, FBG 5, FBG 6

应力松弛,浅层桩侧摩阻力较小。随着模型桩贯入深度增加,单位面积桩侧摩阻力也逐渐增加,在贯入深度到 5 m 左右时单位面积桩侧摩阻力达到极限



值,之后随着贯入深度继续增加而呈减小趋势。实验结果表明,微型增敏 FBG 应变传感器在模型桩沉桩实验中可以很好地工作。

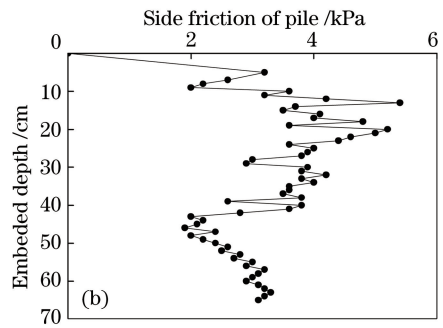


图 8 桩侧摩阻力随贯入深度变化曲线。(a) FBG 1,FBG 2,FBG 3;(b) FBG 4,FBG 5,FBG 6

Fig. 8 Profiles of side friction of pile with embedded depth. (a) FBG 1, FBG 2, FBG 3; (b) FBG 4, FBG 5, FBG 6

5 结 论

增敏微型 FBG 应变传感器具有增敏功能,其增敏系数可根据模型实验需要进行调节,尺寸小,安装方便,适用于室内模型实验。将其应用到模型桩沉桩实验中,在模型桩表面两侧对称开槽,将串联 FBG 传感器预埋到槽体内,两侧 FBG 传感器测试结果基本一致,表明 FBG 传感器与模型桩成为一体,同步变形,测试更加精确。同时,成功地将增敏微型 FBG 应变传感器用于静压预制桩沉桩过程中的桩身轴力和桩侧摩阻力测试,获得了静压预制桩沉桩过程桩身轴力和桩侧摩阻力变化规律,该结果对静压桩施工影响的预估和指导静压桩基础设计具有现实意义。

参 考 文 献

- [1] Zhang J X, Wu D Y. Research on interaction between resistance at pile and lateral resistance of pile [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2): 541-543.
张建新, 吴东云. 桩端阻力与桩侧阻力相互作用研究 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(2): 541-543.
- [2] Zhou J, Deng Y B, Ye J Z, *et al.* Experimental and numerical analysis of jacked piles during installation in sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(4): 501-507.
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.
- [3] 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.

- [4] Zhao C F, Wang W Z, Zhao C, *et al.* Lateral bearing capacity of single piles under vertical and moment load in sand [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(1): 184-190.
赵春风, 王卫中, 赵程, 等. 砂土中竖向和弯矩荷载下单桩水平承载特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(1): 184-190.
- [5] Ren L. Application of fiber Bragg grating sensing technology in structural health monitoring [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
任亮. 光纤光栅传感技术在结构健康监测中的应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [6] Sun S H, Yu Y L, 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.
- [7] 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.
- [8] 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(10): 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(10): 100606.
- [9] Feng C, Li S H, Liu T P, *et al.* Experimental study on burying technology of fiber grating sensor system in driven pile [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2009, 28(9): 12-15.
冯春, 李世海, 刘天苹, 等. 光纤光栅传感系统在打入桩中的埋设工艺试验研究[J]. *传感器与微系统*, 2009, 28(9): 12-15.
- [10] Li S H, Wei Z A, Zhang J H, *et al.* Application of fiber grating sensing technology in model experiment of anti-landslide piles [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2006, 25(3): 84-88.
李世海, 魏作安, 张俊红, 等. 光纤光栅传感技术在抗滑桩模型实验中的应用[J]. *传感器与微系统*, 2006, 25(3): 84-88.
- [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(Suppl. 2): 695-702.
朱友群, 朱鸿鹄, 孙义杰, 等. FBG-BOTDA 联合传感管桩击入土层模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(增刊 2): 695-702.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.