

静压桩贯入试验增敏型 FBG 传感器的研制及应用

王永洪^{1,3}, 张明义^{1,2}, 张春巍¹, 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. 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; 3. 青岛理工大学 琴岛学院 土木工程系, 山东 青岛 266106)

摘要:介绍了光纤光栅的基本原理及优点,设计了基于光纤光栅技术的增敏型应变传感器,并对其工作特性进行了分析。应用增敏型光纤光栅传感器,测试了静压桩贯入过程中模型桩的桩身应力变化。试验结果表明,使用光纤光栅传感器对模型试验中静压桩贯入过程桩身应力监测时需进行增敏。增敏型光纤光栅传感器为模型试验中静压桩贯入过程监测及分析提供了一种新的工具,是监测模型桩静压贯入过程的理想器件。

关键词:静压桩;贯入模型试验;增敏;光纤布喇格光栅(FBG)传感器

中图分类号:TN384

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.01.013

Development and Application of FBG Sensors With Enhanced Sensitivity for Jacked Pile Driving Test

WANG Yonghong^{1,3}, ZHANG Mingyi^{1,2}, ZHANG Chunwei¹, BAI Xiaoyu^{1,2}, SANG Songkui¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 2. Collaborative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 3. Dept. of Civil Engineering, Qindao College, Qingdao Technological University, Qingdao 266106, China)

Abstract: The basic principle and advantages of fiber grating are introduced. A strain sensor with enhanced sensitivity is designed based on the fiber Bragg grating (FBG) technology and the operating characteristics are analyzed. The stress variations of the model pile during jacked pile driving process are tested by FBG sensor with enhanced sensitivity. The results indicate that the sensitivity of FBG sensor for the model test during jacked pile driving process should be enhanced. The FBG sensor with enhanced sensitivity provides a new tool for monitoring and analyzing the jacked pile driving process during the model test, and is an ideal device for monitoring the jacked pile driving process of the model pile.

Key words: jacked pile; driving model test; enhanced sensitivity; fiber Bragg grating (FBG) sensor

0 引言

光纤布喇格光栅(FBG)作为一种新的研究领域的光纤传感技术,FBG传感器易与光纤熔接,可以多个光栅同时写入^[1],FBG应变传感器被广泛应用到实际工程中,并取得了很好的测试效果^[2-4]。但由于室内试验模型桩尺寸小,贯入过程压桩力小,模型桩应变值小,对传感器的尺寸和灵敏性要求更高,FBG传感器近年来也被用在室内模型试验中^[5-8],但存在FBG传感器粘结影响测试结果,裸光纤纤细易断等问题,因此有必要对FBG传感器在静压模型桩试验的应用进行深入研究。

为了进一步完善FBG传感器在静压模型桩贯入试验中的应用,本文设计了两端夹持套管封装的增敏型FBG应变传感器,该传感器不但尺寸小,而且还具有应变放大机制,测试精度高,也可以通过改变封装工艺参数调节应变传递率,并提出了可靠的安装工艺,成功地应用到静压模型桩贯入试验中,用于准确测试静压模型桩贯入过程中桩身应力变化。

1 增敏型 FBG 应变传感器的研制

1.1 光纤光栅工作原理

FBG利用了锗、磷等光纤材料的光敏性,使人

收稿日期:2017-09-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778312,41502304);山东省重点研发计划资助项目(GG201703200019);山东省自然科学基金资助项目(ZR2016EEP06)

作者简介:王永洪(1984-),男,山东东营人,博士生,主要从事土力学与桩基础工程。通信作者:张明义(1958-),男,山东青州人,教授,博士生导师,主要从事地基基础与桩基础工程研究。

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,可以多个光栅同时写入,实现分布式传感,如图 1 所示,图中, I_i 为光源光谱; I_r 为反射光谱; I_t 为传导光谱; λ 为光纤光栅波长; λ_0 为光纤光栅中心波长。纤芯的明暗交替表示折射率的周期性变化^[9], Δ 为栅距, FBG 的波长移动与 FBG 轴向应变和温度变化有以下关系:

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

式中: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ 为光纤光栅波长变化率; 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。

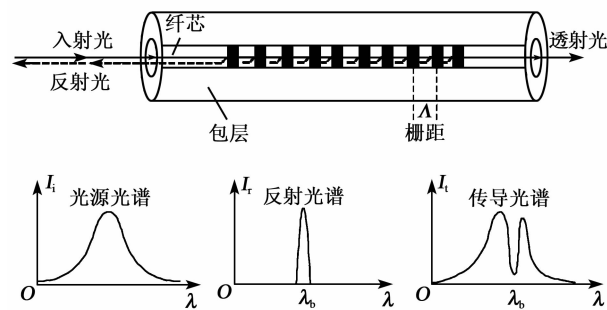


图 1 FBG 准分布式测量原理

室内试验温度变化不大,可忽略不计,因此不考虑外界温度变化时,令光纤光栅应变传感灵敏度系数 $K_\varepsilon = \eta\lambda_0$, 可得

$$\Delta\lambda = K_\varepsilon \cdot \varepsilon \quad (2)$$

1.2 增敏型 FBG 传感器设计和参数

增敏型 FBG 应变传感器工作原理结构图如图 2 所示。由图可知,传感器由光纤光栅、两个夹持套管和尾纤组成。将光纤光栅两端光纤用粘结剂固定在夹持套管内,避免了粘结剂对光纤光栅应变传递的影响^[10]。传感器既可以通过夹持支座固定在测试构件上,也可以埋入结构中,假设测试构件在两夹持支座之间发生轴向变形 ΔL , 相应夹持套管和光纤光栅变形分别为 ΔL_s 和 ΔL_f , 光纤和夹持套管内粘结剂不发生变形,传感器中夹持套管变形可忽略不计,夹持支座之间的变形全部由光纤光栅产生,即传感器变形与测试构件变形关系为

$$L\varepsilon' = L_f\varepsilon_f \quad (3)$$

式中: L_f 为夹持套管之间光纤光栅距离; L 为两夹持支座之间距离; ε_f 为夹持套管之间光纤光栅应变; ε' 为测试构件的应变。

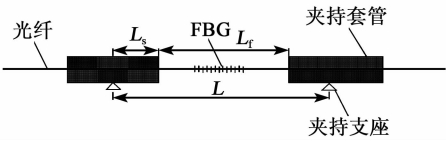


图 2 增敏型 FBG 传感器工作原理结构图

传感器中光纤纤芯为纯石英,其中心波长处于 1 550 nm 波段时, $K_\varepsilon \approx 1.2 \text{ pm}/\mu\varepsilon$, 根据式(3)可得

$$\varepsilon' = \frac{L_f}{L}\varepsilon_f = \frac{L_f \Delta\lambda_{\text{FBG}}}{1.2L} \quad (4)$$

式中 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 为光纤光栅波长变化。

由式(4)可知,改变 L_f 与 L 的比值,可以调整传感器的灵敏度系数。

增敏型 FBG 应变传感器照片如图 3 所示,由图可知,两侧夹持套管采用 1.7 mm 不锈钢管,传感器黑色的内部是光纤光栅所在位置,光纤光栅标距为 23 mm,纤芯采用裸光纤光栅,尾纤采用 0.9 mm 松套管保护。

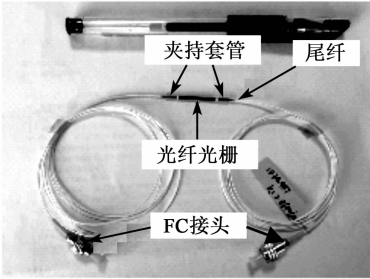


图 3 增敏微型 FBG 应变传感器照片

根据增敏型 FBG 应变传感器工作原理,传感器波长是通过标定裸光纤光栅实现的^[10], 标定试验结果表明,各传感器具有很好的线性拟合度,线性相关系数接近 1。3 个增敏型 FBG 应变传感器样品的具体性能指标如表 1 所示。

表 1 增敏型 FBG 应变传感器性能指标

传感器编号	No. 1	No. 2	No. 3
量 程/ $\mu\varepsilon$	$\pm 1\ 000$	$\pm 1\ 000$	$\pm 1\ 000$
分辨率/ $\mu\varepsilon$	1	1	1
中心波长/nm	1 559.502	1 559.779	1 554.675
线性相关系数/%	99.99	99.99	99.99
灵敏度系数/($\text{pm}/\mu\varepsilon$)	2.50	2.52	2.59
接口方式	FC/APC	FC/APC	FC/APC

2 在静压桩贯入模型试验中的应用

2.1 模型试验概况

本试验加载装置及模型桶如图 4 所示,加载装置由反力架和油压千斤顶组成。模型桶直径为

Ø800 mm, 高为 1 200 mm, 模型桶内重塑黏性地基土, 为保证贯入过程中模型桩的垂直度, 在模型桶外壁焊接夹持导向装置。

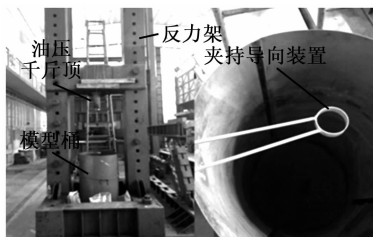


图4 加载装置及模型桶

2.2 增敏型 FBG 传感器安装工艺

本文试验采用直径为 Ø60 mm, 长为 700 mm 的实心尼龙棒作为模型桩, 在模型桩桩身两侧对称开槽封装传感器, 增敏型 FBG 传感器每 3 个进行串联, 每个传感器间距为 300 mm, 距离模型桩两端各 50 mm, 串联后的 FBG 传感器如图 5 所示。具体的 FBG 传感器安装流程如下:

1) 模型桩表面两侧开槽尺寸为 3 mm × 3 mm (宽度 × 深度), 在模型桩上标记出传感器位置。

2) 将槽体底部处理干净, 用粗砂纸打磨传感器放置位置, 去掉不平整的凹凸, 用酒精擦拭干净, 待表面干燥。

3) 在传感器放置位置间隔 23 mm (传感器间距) 点少量 495 胶, 将传感器两端夹持套管部分按在胶上, 轻轻向外侧给力, 使传感器有预拉应力, 同时将传感器两端尾纤也用胶粘贴到槽体底部, 其中传感器采集数据一侧尾纤采用铠装光缆, 铠装光缆在引出模型桩处穿过长度为 300 mm 的空心钢管, 防止其过度弯折而损坏。

4) 向槽体内灌入 704 胶进行封装, 封装后胶体与桩身表面齐平。增敏型 FBG 传感器安装结束如图 6 所示。

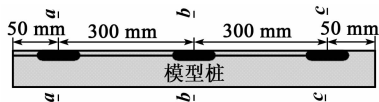


图5 串联后的 FBG 传感器

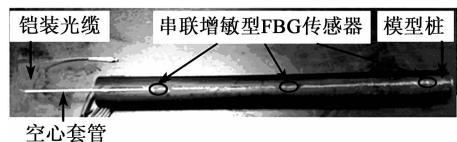


图6 模型桩及增敏型 FBG 应变传感器安装

2.3 试验结果及分析

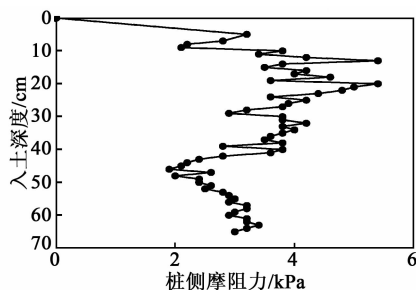
试验采用美国 Micro Optics 公司生产的光纤光

栅解调仪, 针对静压桩贯入模型试验, 建立由 FBG 传感器、光纤光栅解调仪及计算机组成的监测系统, 试验贯入过程如图 7 所示。开始前记录初始读数, 在加载过程中, 连续记录 FBG 传感器读数, 试验共做 3 组, 本文结果分析中用到的数据分析均为平均值。

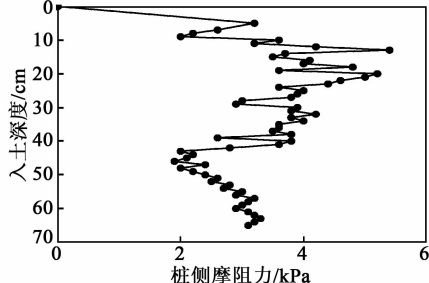


图7 贯入过程

模型桩两侧传感器全部存活, 测试桩侧阻力随深度变化曲线结果基本一致。模型桩桩侧阻力随深度变化曲线如图 8 所示, 图中的曲线表明桩侧单位摩阻力随着模型桩贯入深度的增加而发生变化。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, 在入土深度到 5 m 左右时单位面积桩侧摩阻力达到极限值, 之后随着入土深度继续增加而呈减小趋势^[9]。试验结果表明, 增敏微型 FBG 应变传感器在模型桩沉桩试验中可以很好地工作。



(a) 模型桩左侧桩侧阻力随深度变化曲线



(b) 模型桩右侧桩侧阻力随深度变化曲线

图8 桩侧阻力随深度变化曲线

3 结束语

应用增敏型光纤光栅应变传感器监测模型试验

中静压桩贯入过程中的桩身应力变化,并对所测得的桩身两侧应力变化进行对比。根据试验结果,模型桩两侧桩侧阻力随深度变化曲线结果基本一致,浅层桩侧摩阻力较小,在入土深度到 5 m 左右时单位面积桩侧摩阻力达到极限值,之后随着入土深度继续增加而呈减小趋势。该试验方法可用于监测模型试验静压桩贯入过程中桩身应力变化。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] KISTER G, WINTER D, GEBREMICHAEL Y M. Methodology and integrity monitoring of foundation concrete piles using Bragg grating optical fibre sensors[J]. Engineering Structures,2007,29(9): 2048-2055.
- [3] 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.
- [4] 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.
- ZHU Honghu, YIN Jianhua, JIN Wei, et al. Health monitoring of foundations using fiber Bragg grating sensing technology[J]. China Civil Engineering Journal, 2010,43(6):109-115.
- [5] 周智,何建平,欧进萍. 输油管道冻胀融沉监测的光纤布里渊传感技术[J]. 压电与声光,2010,32(4): 544-546.
- ZHOU Zhi, HE Jianping, OU Jinping. Brillouin fiber sensor technology for monitoring of oil pipeline's settlement and uplift induced by icing and thawing[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2010,32(4):544-546.
- [6] 包腾飞,钱飞. 混凝土裂缝分布式光纤光栅监测能力研究[J]. 压电与声光,2011,33(4):540-543.
- BAO Tengfei, QIAN Fei. Study on crack monitoring capability of distributed fiber Bragg grating sensors in concrete structures[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2011,33(4):540-543.
- [7] 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.
- WANG Jing, LIU Bin, SUI Qingmei, 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.
- [8] 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(增刊3): 695-702.
- ZHU Youqun, ZHU Honghu, SUN Yijie, 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. 3):695-702.
- [9] 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.
- ZHANG Zhenglin, WANG Yuan, LI Xiaolei, et al. Study on the application of FBG sensing technology in monitoring slope stability[J]. Journal of Optoelectronics · Laser,2016,27(8):838-844.
- [10] 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.
- REN liang, LI Hongnan, HU Zhiqiang, 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.