

## 光纤光栅传感技术在抗滑桩模型实验中的应用\*

李世海<sup>1</sup>, 魏作安<sup>1</sup>, 张俊红<sup>2</sup>, 许利凯<sup>1</sup>

(1 中国科学院 力学研究所, 北京 100080; 2 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 光栅传感技术作为一种全新的测试技术, 它具有很多优点。在抗滑桩模型实验测试中应用了该项技术。首先, 将 FBG 传感器与电测传感器在抗滑桩上进行标定, 得出两者的关系大致为  $1.143 \times 10^{-6} / \text{mm}$ ; 然后, 将标定好的 FBG 传感器应用于模型实验测试中。通过实验测试不仅获得了抗滑桩在不同条件下的受力状态, 而且, 摸索到了光栅传感技术的一些使用经验和需要注意的事项, 这些可为类似的测试所借鉴。

**关键词:** 光纤光栅传感技术; FBG 传感器; 抗滑桩; 模型实验

**中图分类号:** TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 9787(2006)03 - 0084 - 02

## Application of fiber grating sensing technology in model experiment of anti-landslide piles\*

LI Shi-hai<sup>1</sup>, WEI Zuo-an<sup>1</sup>, ZHANG Jun-hong<sup>2</sup>, XU Li-kai<sup>1</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The fiber grating sensing technology is a new testing technology, which has a large number of advantage. The testing application about FBG technology on stabilizing pile model test is introduced. Firstly, the FBG sensors is calibrated with the common electricity sensors in stabilizing pile, and the relation fomula about them is gained, which is about  $1.143 \times 10^{-6} / \text{mm}$ . Then, the FBG sensors are used in the experiment. The test results show that not only the exact state of stabilizing pile stress distribution in different situation are obtained, but also many of experiences and needing attentive issues are obtained as well, which is a useful reference in similar testing.

**Key words:** fiber grating sensing technology; FBG sensor; stabilizing pile; model test

### 0 引言

随着科学技术的发展, 测试技术也越来越朝着高精度、小型化和智能化方向发展, 新型的传感器的研制也是当代测试技术的重要发展内容<sup>[1]</sup>。将光栅传感技术开发成一种新的测试技术, 正是这种发展趋势的具体体现。Bragg 光栅传感器不仅在通讯领域有着广阔的应用前景, 而且, 还因其有反射波长会随着温度、应力的变化而发生改变的特点, 所以, 被用来制成测量传感器用于工程的健康监测。文献 [1] 介绍了近年来国外将 Bragg 光栅传感器应用于大结构监测的进展。国内目前仍处于实验研究阶段, 离实用化还有很大的距离<sup>[2,3]</sup>。本文介绍了光纤光栅传感技术在滑坡防治抗滑桩结构模型实验测试中的应用情况。通过实验测试, 不仅获得了抗滑桩在滑坡体作用下的受力状态, 而且, 摸索到了光栅传感技术的一些使用经验和需要注意的事项, 为把该项技术应用于实际工程测试作了一些探索。

### 1 Bragg 光栅传感技术在抗滑桩模型实验中的应用

目前, 在滑坡灾害防治中, 抗滑桩已成为一种主要的防治技术措施被广泛使用<sup>[4]</sup>。滑坡体与抗滑桩是一个相互作用的复杂系统<sup>[5]</sup>。为此, 本文通过滑坡物理模型实验, 对抗滑桩在滑坡防治中的作用机理进行更深入的研究与探讨。实验原理如图 1 所示, 在模拟滑坡的基础上, 对抗滑桩

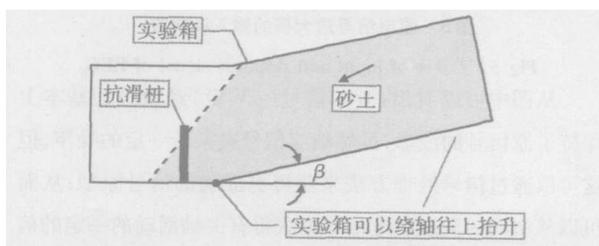


图 1 滑坡中抗滑桩作用的物理模型原理图

Fig 1 Principle diagram of physics model about anti-landslide pile action in landslide

收稿日期: 2005 - 06 - 21

\*基金项目: 国家“973”计划资助项目 (2002CB412703); 中国科学院知识创新项目 (KJ CX2 - SW - L1)

的受力进行了测试。为了保证实验测试数据的准确,在实验中,同时采用了 FBG 传感器和电测传感器进行测试,并将 2 种测试结果进行分析比较。

### 1.1 FBG 传感器的标定

从上面光纤光栅测试技术原理可以看出:光纤光栅测试技术测出的数据是  $B_{ragg}$  波长的变化量,  $B_{ragg}$  波长的变化量与应变值的关系文献 [6] 认为,在  $B_{ragg}$  波长为 1500 nm 时,典型的温度和应变灵敏度分别为 0.011 nm/和 0.0012 nm。为了更准确地把光波波长的变化量转换成应变值,本文按照常规的材料力学实验,以待测抗滑桩的材料为原料,做了一个悬臂梁的标定实验,如图 2 所示。

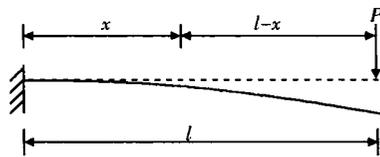


图 2 FBG 传感器的标定测试系统

Fig 2 Calibration test system of FBG sensor

由于实验基本在常温下进行,实验时,温差极微甚至为零,所以,在标定实验中,没有考虑温度补偿。通过对实验测试数据处理,求出 FBG 传感器的读数与应变之间的关系为

$$\lambda = 1143.15 \epsilon + 10582.6, \quad (1)$$

式中  $\epsilon$  为应变值,  $10^{-6}$ ;  $\lambda$  为波长读数的变化值, nm。

相关系数为  $r=0.99739$ ,表明式 (1) 的拟合度很好,可以作为相同条件下,FBG 波长变化值的实验数据转换成应变值使用。FBG 传感器的标定测试结果与拟合曲线见图 3。

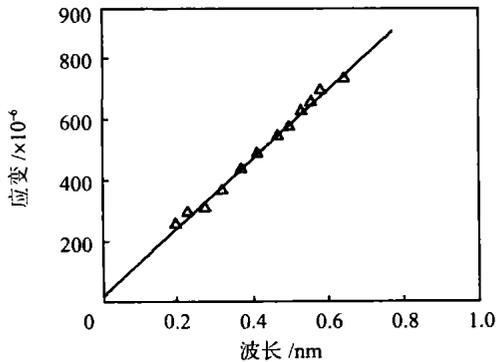


图 3 FBG 传感器的标定测试拟合曲线

Fig 3 Fitting of curve calibration test of FBG sensor

### 1.2 FBG 传感器与电测传感器的布置

为了保证试验测试数据的准确,在测试中,同时采用了 FBG 传感器和电测传感器进行测试,FBG 传感器和电测传感器在抗滑桩上的布置如图 4。由于测试中温度几乎没有变化,所以,没有布置光纤光栅温度传感器。

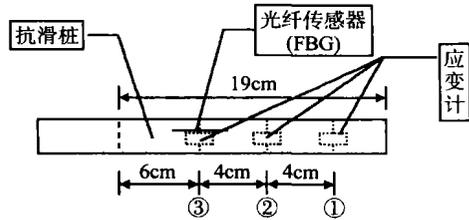


图 4 FBG 传感器和电阻应变计在桩身中的布置图

Fig 4 Distribution diagram of FBG sensor and resistance strain gauge on anti-pile

### 1.3 在抗滑桩模型实验中的测试结果及分析

模型实验中,按照事先设计的 4 大类 (3 种不同宽度的桩和无桩)、每大类分 2 组 (2 种不同的桩间距) 进行实验,共计完成 6 组实验测试,见表 1。其中,第 1 类实验 2 种传感器的测试结果如图 5。

表 1 边坡破坏时后槽抬升角 值

Tab 1 Back-slot uplifting angle values while slope sliding

桩的类别 与组别	类		类		类		类 (无桩) 组
	2B 组	4B 组	2B 组	4B 组	2B 组	4B 组	
(9)	30	25	25	20~25	25	20~25	10~20

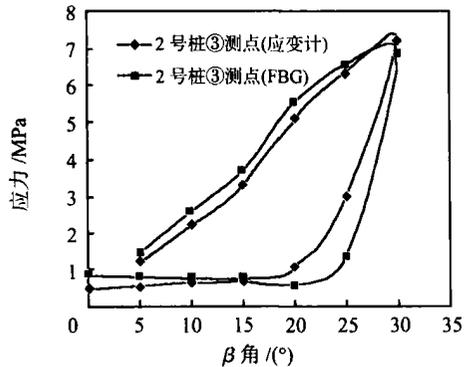


图 5 模型实验中 2 种传感器的测试结果

Fig 5 Test results of two sensors at model experiment

从图 5 中可以看出:

(1) 无论是加载 (滑面角 增加) 还是卸载 (滑面角 减小), FBG 传感器和电测 (电阻应变计) 传感器的测试结果基本一致;

(2) 抗滑桩 ③ 号测点的受力与滑面角基本成线性关系, 随着滑面角 增加, 抗滑桩 ③ 号测点的受力也随之增加;

(3) 卸载时即滑面角 减小, 抗滑桩 ③ 号测点的受力与滑面角的关系比较复杂。主要分 2 个阶段, 开始卸载时, 抗滑桩 ③ 号测点的受力随着滑面角 的减小而迅速减小, 当减小到达一定值后, 其受力基本与滑面角 的变化没有关系, 受力处于一个平稳状态;

(4) 抗滑桩的受力与整个滑坡体的下滑力有关, 抗滑桩不仅受到桩身周边土体的土压力的直接作用, 而且, 会受到桩后远距离非稳定下滑土体的滑坡推力的间接作用。

(下转第 88 页)

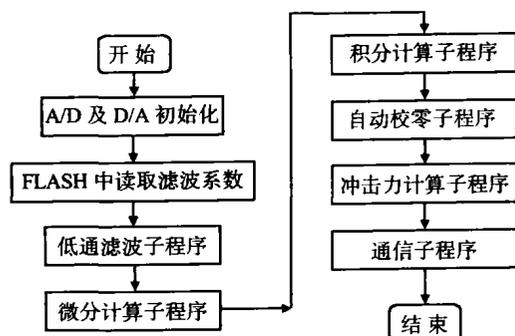


图 5 复合型传感器的程序框图

Fig 5 Program diagram of compound sensor

### 3 振动、冲击、倾角试验<sup>[4,5]</sup>

测量在不同加速度和倾角下传感器的输出如表 1 所示,传感器的测量角度范围为  $\pm 15^\circ$ ,最大绝对误差小于  $0.1^\circ$ ;同时,传感器解算出的角速率分辨力为  $0.1\%$ 。冲击

表 1 传感器在不同冲击和倾角条件下的输出

Tab 1 Outputs of sensor on condition of different shock and tilt angle

测量序号	输入值			测量值		
	角度 ( $^\circ$ )	加速度 ( $g_n$ )	时间 (ms)	角度 ( $^\circ$ )	振动加速度 ( $g_n$ )	冲击加速度 ( $g_n$ )
1	0.0	0	0.0	0.01	0.04	0.03
2	1.0	5	14.1	1.04	0.05	5.10
3	2.0	10	11.3	2.05	0.04	10.05
4	3.0	15	9.1	3.01	0.08	15.88
5	4.0	20	5.0	3.98	0.03	20.10
6	5.0	25	3.5	5.10	0.09	25.09
7	6.0	30	2.7	6.07	0.04	30.38

(上接第 85 页)

### 2 应用光纤光栅测试技术遇到的一些问题

(1)将多个 FBG 传感器串联使用时,尽可能使它们之间的波长光谱有比较大的差异,以免在测试中产生数据混淆;

(2)FBG 传感器的粘接也是测试中的一个重要环节,何种环境条件下采用哪种粘接剂,均需要通过实验来确定;

(3)由于裸光纤的纤芯比较细,而且相对比较脆,使用中容易折断。所以,在使用中尽量不要折卷。

### 3 结束语

光纤光栅传感技术在工程测试方面还属于一种全新的技术。本文介绍了光纤光栅传感技术在滑坡防治抗滑桩结构模型实验测试中的应用情况,通过实验测试,获得了抗滑桩的精确受力状态,同时,发现光栅传感技术在实际使用中存在的一些问题和需要注意的事项,为普及该项技术的应用积累经验。

的测量范围为  $\pm 30 g_n$ ,最大绝对误差小于  $0.9 g_n$ 。在该设计中,如果汽车的角度相对于水平初始状态变化了  $\pm 7^\circ$  或者角速率值达到  $0.3\%$ ,时间是几秒钟,传感器在输出上述信号的同时,给出警告信息。

通常情况下,汽车的振动、冲击的频谱都在  $15 \sim 200 \text{ Hz}$  的频率范围内,因此,本设计的加速度传感器的频带也在  $0 \sim 200 \text{ Hz}$ ,能够满足汽车振动、冲击信号的检测。

### 4 结论

基于 MEMS 的复合传感器与基于 MEMS 的角速率、速度传感器一起组成汽车侧翻稳定控制系统——RSC 的检测部分,能够及时检测汽车在潮湿或结冰的路面,在加速、制动和滑行时汽车的运动信息。通过试验,取得了较好的效果,在实际应用中,可以根据车的种类、型号不同,加速度传感器的频带宽度可以调整,以满足测试精度的需要。

### 参考文献:

- [1] 董健,李昕欣,王跃林,等.曲面过载保护的的新型高  $g$  值冲击硅微机械加速度传感器的设计[J].机械强度,2003,25(2):148-150.
- [2] 韩宏,吴嘉澍.基于加速度计的数字式倾角仪的设计[J].传感器技术,2005,24(4):48-50.
- [3] 李跃进,杨银堂,朱作云,等.微机械加工硅电容式加速度传感器[J].传感器技术,2001,20(1):57-60.
- [4] 张威,张大成,王阳元.MEMS 概况及发展趋势[J].微纳电子技术,2002,(1):22-27.
- [5] 吴雄.汽车 MEMS 传感器的应用及发展[J].传感器世界,2002,(7):7-11.

### 作者简介:

曲国福(1966-),男,黑龙江肇东人,在读博士生,主要研究方向为智能检测与虚拟仪器,已公开发表论文 12 篇。

### 参考文献:

- [1] 赵山泉.光纤光栅传感技术在大结构监测中的应用进展[J].传感器技术,2004,23(6):5-7.
- [2] 唐炜,史仪凯.Bragg 光纤传感技术应用研究[J].光学精密工程,2002,10(1):79-83.
- [3] Li M, Zeng N, Shi C Z, et al. Fiber Bragg grating distributed strain sensing: an adaptive simulated annealing algorithm approach[J]. Optics & Laser technology, 2005, 37(7): 454-457.
- [4] 周德培,肖世国,夏雄.边坡工程中抗滑桩合理桩间距的探讨[J].岩土工程学报,2004,26(1):132-135.
- [5] 张友良,冯夏庭,范建海,等.抗滑桩与滑坡体相互作用的研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(6):839-842.
- [6] 李向舜.分布式光纤光栅传感器波长检测新技术简述[J].传感器世界,2003,(11):1-5.

### 作者简介:

李世海(1958-),男,河北沧州人,研究员,博士,中国科学院知识创新项目的首席科学家,主要从事爆炸力学与土力学、滑坡灾害等方面的研究工作。