

# 基于长标距FBG传感器宏应变技术的损伤识别研究

田石柱<sup>1,2</sup> 温科<sup>1</sup> 王大鹏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>苏州科技学院土木工程学院, 江苏 苏州 215011

<sup>2</sup>哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090

**摘要** 重大工程结构在服役期间常遭受各种作用而导致抗力衰减。一旦这些结构失效,将会导致区域功能瘫痪和生态灾难,造成巨大的经济损失和人员伤亡,因此为重大工程结构建立一套健康监测具有重要的现实意义。损伤识别是结构健康诊断的核心技术之一,而准确地测量结构的响应信息是损伤识别方法有效的前提。结构荷载的复杂性致使结构损伤具有不可预见性,如果采用电阻应变片技术,其准确性和工程量之大对于工程应用来说是不可取的。采用准分布式长标距光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器,并结合其在组合梁中损伤识别的应用以验证其性能。试验结果表明,随着标距的增加,准分布式长标距FBG应变传感器损伤识别的效率降低。

**关键词** 光纤光学;传感器;损伤定位;宏应变;结构健康监测

中图分类号 TP212.9; P315.73 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.010604

## Study on Damage Detection Based on Long-gage Fiber Bragg Grating Sensor

Tian Shizhu<sup>1,2</sup> Wen Ke<sup>1</sup> Wang Dapeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215011, China

<sup>2</sup>School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China

**Abstract** With the construction of a number of massive projects, the structure failure becomes more common and will probably lead to huge economic losses and casualties. It has important and practical significance to establish a complete set of structural health monitoring system for these massive projects. Damage detection is one of the core technologies for structural health identification. Although a variety of damage identification methods have been developed, accurately measuring the response of the structural information is still the premise of the effectiveness of damage identification. Damage in the massive structures cannot be predicted, so it is not advisable to perform health monitoring by means of strain gauges. We use quasi-distributed long-gage optical fiber Bragg grating (FBG), combined with the damage detection application in simply supported steel-concrete composite beam, to verify the performance of such a sensor. The test results show that damage identification efficiency is reduced with the increase in length of the quasi-distributed long-gage FBG strain sensor gage.

**Key words** fiber optics; sensor; damage detection; macro-strain; structural health monitoring

**OCIS codes** 060.3735; 050.2770; 130.6010

## 1 引言

近年来,光纤光栅传感技术迅速发展,引起了研究者的广泛关注,人们希望由此获得传感技术的创新。光纤光栅传感器自身拥有高精度和动态测试的能力,被认为是最有前景的传感器之一。光纤光栅传感器在许多方面得到了发展,如应变、温度、加速度、角度、裂缝等方面的测量。近年来,一些研究者提出在结构损伤识别中应用长标距<sup>[1-6]</sup>光纤光栅应变传感器<sup>[7]</sup>,也有一些研究者提出新型的传感器<sup>[8-10]</sup>和新型的测量方

收稿日期: 2013-07-12; 收到修稿日期: 2013-09-02; 网络出版日期: 2013-12-29

基金项目: 第八批江苏省“六大人才高峰”项目(2011-JZ-013)、住房和城乡建设部研究开发项目(2012-K8-18)、苏州科技学院基金(XKY201007)

作者简介: 田石柱(1962-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事结构智能健康监测、结构抗震试验及振动控制方面的研究。E-mail: tianshizhu@mail.usts.edu.cn

法<sup>[11-12]</sup>。本文提出利用中性轴作为损伤指标,利用光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器测得的宏应变数据定位组合梁横截面的中性轴位置,通过横截面中性轴位置是否发生变化来确定组合梁是否发生损伤。

## 2 基本原理

### 2.1 宏应变

传感器测得的应变是标距内的平均应变,本文采用的是准分布式长标距FBG应变传感器,故测得的应变称之为宏应变:

$$\bar{\varepsilon}_{m-n} = \frac{\int_m^n M_x y_x dx}{\bar{I}_{m-n} L_{m-n}},$$

式中  $M_x$  为梁截面  $X$  处的弯矩,  $y_x$  为梁截面  $X$  处横截面上任一点到中性轴的距离,  $\bar{\varepsilon}_{m-n}$  为梁截面  $m$ 、 $n$  范围内梁的宏应变(平均应变),  $\bar{I}_{m-n}$  为梁截面  $m$ 、 $n$  范围内梁的平均抗弯刚度,  $L_{m-n}$  为梁截面  $m$ 、 $n$  间的距离。

### 2.2 基于宏应变技术的中性轴定位损伤

由于结构横截面刚度减小,如行车道和主梁界面分离、裂缝出现等,会导致横截面中性轴的位置发生变化,因此,横截面中性轴可作为损伤指标。

## 3 试验方案与试验

试验基于长标距裸FBG传感器的组合梁损伤定位研究。利用准分布式长标距裸FBG应变传感器、光纤解调仪、计算机、反力架建立一健康监测系统,试验系统如图1所示。在组合梁的上下翼缘表面布置准分布式长标距裸FBG应变传感器,利用FBG应变传感器测得的宏应变数据定位组合梁横截面的中性轴位置,通过横截面中性轴位置是否发生变化来确定组合梁是否发生损伤。



图1 试验系统图

Fig.1 Photo of the testing system

### 3.1 试验构件

试验构件是一简支钢-混凝土组合梁,跨度为1700 mm,钢筋采用HPB235,混凝土板设计强度为C25,工字钢型号为20#,Q235。组合梁按弹性方法设计<sup>[13-14]</sup>,试件横截面尺寸及配筋详图如图2所示。

### 3.2 传感器

试验制作的准分布式长标距裸FBG应变传感器的平均标距分别为200 mm和300 mm,为便于叙述,两准分布式长标距裸FBG应变传感器依次定义为  $F_1$ 、 $F_2$ 。

$F_1$ 由2个中心波长分别为1542 nm和1547 nm的光纤光栅构成,各个光纤光栅平均标距为300 mm。为了便于叙述,将布置在上翼缘下表面的传感器各个光纤光栅按波长从小到大依次定义为  $F_{1t,1}$ 、 $F_{1t,2}$ ;将布置在下翼缘上表面的传感器各个光纤光栅按波长从小到大依次定义为  $F_{1b,1}$ 、 $F_{1b,2}$ ;

$F_2$ 由3个中心波长分别为1521 nm、1530 nm和1536 nm的光纤光栅构成,各个光纤光栅平均标距为200 mm。为了便于叙述,将布置在上翼缘下表面的传感器各个光纤光栅按波长从小到大依次定义为  $F_{2t,1}$ 、 $F_{2t,2}$ 、 $F_{2t,3}$ ;将布置在下翼缘上表面的传感器各个光线光栅按波长从小到大依次定义为  $F_{2b,1}$ 、 $F_{2b,2}$ 、 $F_{2b,3}$ 。如

$F_{1b,1}$  表示 FBG 应变传感器的平均标距为 200 mm, 粘贴在下翼缘上表面, 而下翼缘上表面总共贴了两个光栅, 1 表示在 3~4 单元处的光栅。

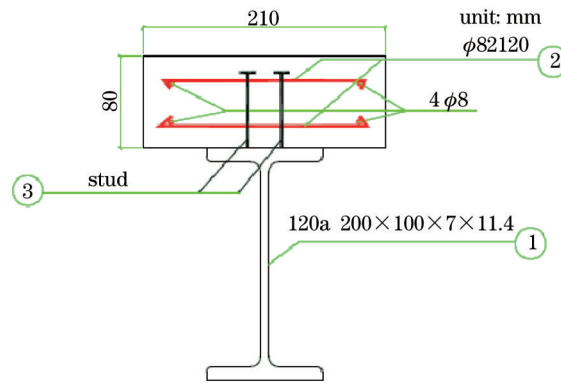


图2 试件横截面尺寸详图

Fig.2 Cross section size of specimen in detail

### 3.3 传感器布置

裸 FBG 应变传感器沿组合梁的纵向粘贴在工字钢梁的上翼缘的下表面、下翼缘的上表面和传感器布置方案如图 3 所示。

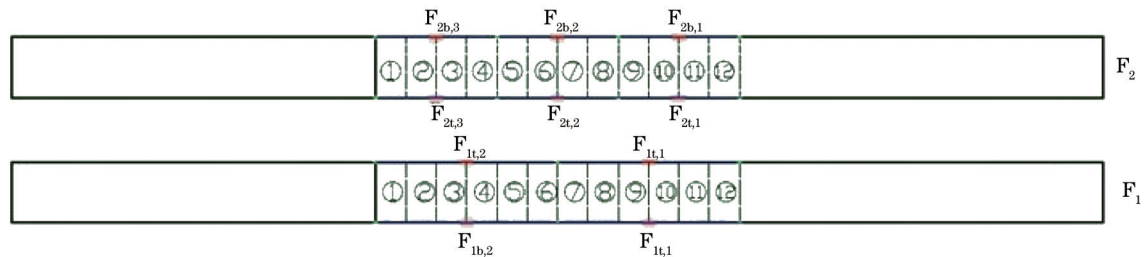


图3 传感器布置方案图

Fig. 3 Sensor placement scheme

### 3.4 试验加载制度

试验采用逐级加载方式, 每 2 kN 为一级, 加载至 154 kN。加载后待波长稳定再加下一级荷载。试验加载示意图如图 4 所示。

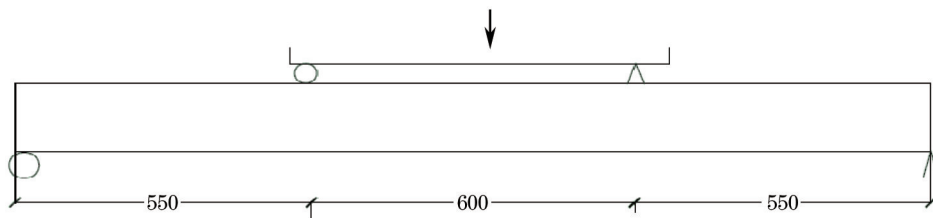


图4 试验加载示意图

Fig.4 Schematic of test loading

## 4 试验数据分析

利用中性轴作为损伤指标。首先, 根据准分布式长标距裸 FBG 应变传感器 ( $F_1$ 、 $F_2$ ) 测得的相应单元的宏应变绘制出组合梁横截面的应变图; 其次, 定位组合梁横截面中性轴位置; 最后, 判断组合梁是否损伤。试验完成后混凝土板与钢梁交界处如图 5 所示, 图 5 显示混凝土板与钢梁的交界面分离。试验数据分析如下。

在 0~154 kN 范围内, 根据  $F_{1,1}$  (标距 300 mm) 测得的 7~12 单元的宏应变定位组合梁的横截面中性轴; 根据  $F_{1,2}$  (标距 300 mm) 测得的 1~6 单元的宏应变定位组合梁的横截面中性轴。根据  $F_{2,1}$  测得的 1~4 单元的宏应变定位组合梁的横截面中性轴; 根据  $F_{2,2}$  测得的 5~8 单元的宏应变定位组合梁的横截面中性轴; 根据  $F_{2,3}$

测得的9~12单元的宏应变定位组合梁的横截面中性轴。具体结果如图6~10所示。



图5 混凝土板与钢梁的交界面分离示意图

Fig.5 Separation at the concrete slab and steel beam interface

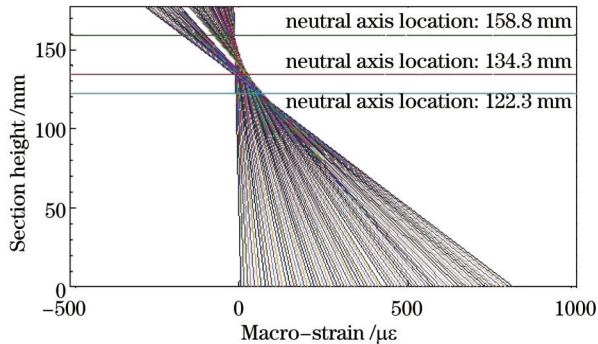


图6  $F_{1t,1}$ 与 $F_{1b,1}$ 测得的宏应变

Fig.6 Macro-strain measured by  $F_{1t,1}$  and  $F_{1b,1}$

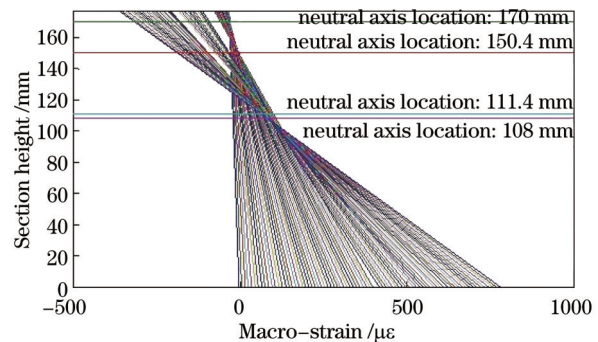


图7  $F_{1t,2}$ 与 $F_{1b,2}$ 测得的宏应变

Fig.7 Macro-strain measured by  $F_{1t,2}$  and  $F_{1b,2}$

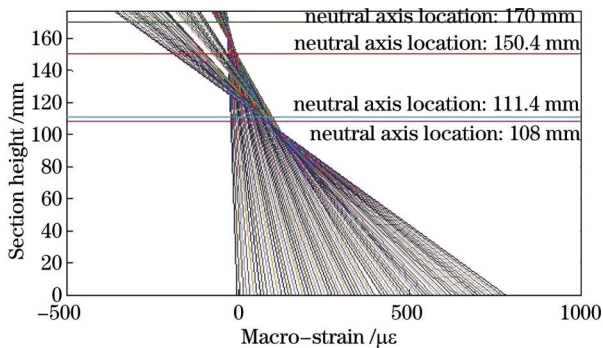


图8  $F_{2t,1}$ 与 $F_{2b,1}$ 测得的宏应变

Fig.8 Macro-strain measured by  $F_{2t,1}$  and  $F_{2b,1}$

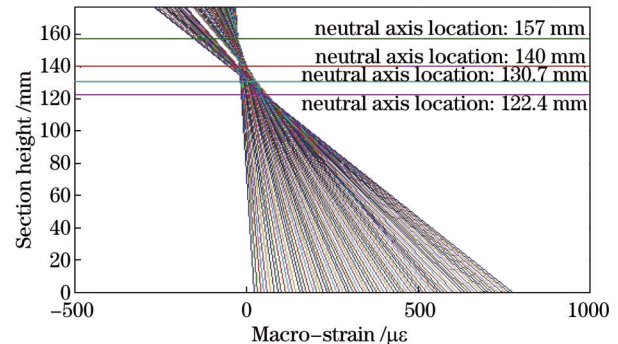


图9  $F_{2t,2}$ 与 $F_{2b,2}$ 测得的宏应变

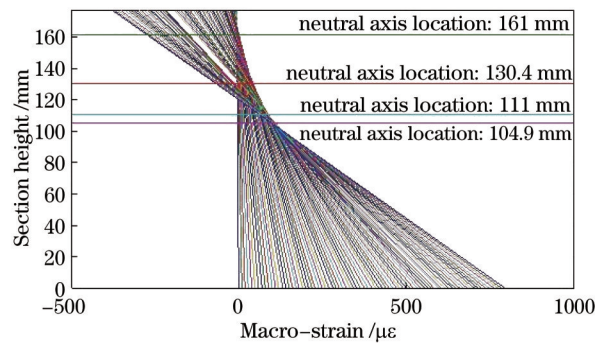
Fig.9 Macro-strain measured by  $F_{2t,2}$  and  $F_{2b,2}$

在图6中, $F_{1t,1}$ 与 $F_{1b,1}$ 根据0~38 kN范围内的荷载作用下所测得的宏应变值定位中性轴位置 $y=158.8$  mm;根据40~108 kN范围内的荷载作用下所测得的宏应变值定位中性轴位置 $y=134.3$  mm;根据110~154 kN范围内荷载作用下所测得的宏应变值定位中性轴位置 $y=122.3$  mm。

图7中, $F_{1t,2}$ 与 $F_{1b,2}$ 根据0~38 kN范围内的荷载作用下所测得的宏应变值定位中性轴位置 $y=155.4$  mm;根据40~108 kN范围内的荷载作用下所测得的宏应变值定位中性轴位置 $y=129$  mm;根据110~154 kN范围内的荷载作用下所测得的宏应变值定位中性轴位置 $y=116.4$  mm。

图8中, $F_{2t,1}$ 与 $F_{2b,1}$ 根据0~38 kN范围内的荷载作用下所测得的宏应变值定位中性轴位置 $y=170$  mm;根据40~82 kN范围内的荷载作用下所测得的宏应变值定位中性轴位置 $y=150.4$  mm;根据84~108 kN范围内的荷载作用下所测得的宏应变值定位中性轴位置 $y=111.4$  mm;根据110~154 kN范围内的荷载作用下所测得的宏应变值定位中性轴位置 $y=108$  mm。

在图9中, $F_{2t,2}$ 与 $F_{2b,2}$ 根据0~38 kN范围内的荷载作用下所测得的宏应变值定位中性轴位置 $y=157$  mm;根据40~82 kN范围内的荷载作用下所测得的宏应变值定位中性轴位置 $y=140$  mm;根据84~108 kN范围内的荷载作用下所测得的宏应变值定位中性轴位置 $y=130.7$  mm;根据110~154 kN范围内的荷载作用下所测

图 10  $F_{2t,3}$  与  $F_{2b,3}$  测得的宏应变Fig.10 Macro-strain measured by  $F_{2t,3}$  and  $F_{2b,3}$ 

得的宏应变值定位中性轴位置  $y=122.4$  mm。

在图 10 中,  $F_{2t,3}$  与  $F_{2b,3}$  根据 0~38 kN 范围内荷载作用下所测得的宏应变值定位中性轴位置  $y=161$  mm; 根据 40~82 kN 范围内荷载作用下所测得的宏应变值定位中性轴位置  $y=130.4$  mm; 根据 84~108 kN 范围内荷载作用下所测得的宏应变值定位中性轴位置  $y=111$  mm; 根据 110~154 kN 范围内荷载作用下所测得的宏应变值定位中性轴位置  $y=104.9$  mm。

由图 6~10 结果分析如下。

在 0~38 kN 范围内, 根据  $F_1$ 、 $F_2$  测得的宏应变绘制出的中性轴位置基本相同, 可判断此荷载区间内组合梁无损伤, 恰与组合梁实际状态(此荷载区间内混凝土与工字钢交界面未分开)吻合。

在 40~108 kN 范围内, 由  $F_1$  所得的中性轴位置较之前有相当大的变化; 而在 40~82 kN 和 84~108 kN 范围内, 由  $F_2$  所得的中性轴位置较之前都有较大的变化。上述现象的原因与构件在 40~108 kN 区间内的荷载前期, 混凝土与工字钢交界面分离程度小, 而后期混凝土板与工字钢交界面分离程度较之前大这一事实相吻合。

在 110~154 kN 范围内, 由  $F_1$ 、 $F_2$  所得的中性轴位置较之前有变化, 亦与混凝土板与工字钢交界面分离程度吻合。

由上述分析可知, 标距为 300 mm 的  $F_1$  传感器识别损伤的能力较标距为 200 mm 的  $F_2$  传感器识别损伤的能力弱; 但其仍可有效地识别损伤。

## 5 结 论

采用准分布式长标距 FBG 应变传感器对组合梁结构中的损伤进行了探测和识别。准分布式长标距 FBG 应变传感器离损伤位置越远所测得的应变值变化越小, 故传感器所测范围有一定的限制, 倘若在预测部位全布传感器, 可解决此问题。对于弹性构件, 圆孔对传感器测量值有一定的影响, 尽管准分布式长标距 FBG 应变传感器受到邻近损伤部位的干扰, 仍可有效地预警损伤、定位损伤、识别损伤程度。

## 参 考 文 献

- 1 Jinping Ou, Hui Li. Structural health monitoring in mainland China: review and future trends[J]. Structural Health Monitoring, 2010, 9(3): 219-231.
- 2 Goutham R. Kirikera, O. Balogun, Sridhar Krishnaswamy. Adaptive fiber Bragg grating sensor network for structural health monitoring: applications to impact monitoring [J]. Structural Health Monitoring, 2011, 10(1): 5-16.
- 3 Suzhen Li, Zhishen Wu. Development of distributed long-gage fiber optic sensing system for structural health monitoring[J]. Structural Health Monitoring, 2007, 6(2): 133-143.
- 4 J P Conte, M Liu, D Inaudi. Earthquake response monitoring and damage identification of structures using long-gage fiber optic sensors[C]. 14th ASCE Engineering Mechanics Division Conference, 2000.
- 5 D Inaudi, N Casanova. Geo-structural monitoring with long-gage interferometric sensors[C]. SPIE, 2000, 3995: 164 - 174.
- 6 B Glisic, D Inaudi. Integration of long-gage fiber-optic sensor into a fiber-reinforced composite sensing tape[C]. SPIE, 2003, 5050: 179-186.

- 7 G M Kamath, Ramesh Sundaram, Nitesh Gupta, *et al.*. Damage studies in composite structures for structural health monitoring using strain sensors [J]. *Structural Health Monitoring*, 2010, 9(6): 497–512.
- 8 Zhang Xiaoli, Liang Dakai, Lu Jiyun, *et al.*. A high reliable optic fiber Bragg grating sensor network design[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(1):0105004.  
张晓丽, 梁大开, 芦吉云, 等. 高可靠光纤布拉格光栅传感器网络设计[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0105004.
- 9 Ni Min, Ran Zengling, Lu En, *et al.*. Fiber-optic tip pressure sensor fabricated by 157 nm laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(12): 120606.  
倪敏, 冉曾令, 鲁恩, 等. 157 nm 激光微加工制作的微光纤压力传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(12): 120606.
- 10 Lan Yuwen, Liu Bo, Luo Jianhua. Pressure sensor based on distributed-Bragg-reflector fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 629–631.  
兰玉文, 刘波, 罗建花. 基于分布布拉格反射光纤激光器的压力传感器[J]. *光学学报*, 2009, 29(3): 629–631.
- 11 Zhang Hao, Liu Bo, Jia Chenglai. A novel method for active fiber refractive index measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(s1): s100213.  
张昊, 刘波, 贾承来. 一种有源光纤折射率的新型测量方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(s1): s100213.
- 12 Tian Shizhu, Wen Ke, Wang Dapeng. Study on damage location of steel beam based on long-gage fiber grating sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(4): 040603.  
田石柱, 温科, 王大鹏. 基于长标距光纤光栅传感器的钢梁损伤定位研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(4): 040603.
- 13 Wang Lianguang. *Steel and Concrete Composite Structure Theory and Calculation* [M]. Beijing: Science Press, 2005. 47–49.  
王连广. *钢与混凝土组合结构理论与计算* [M]. 北京: 科学出版社, 2005. 47–49.
- 14 Nie Jianguo, Fan Jiansheng. *Steel and Concrete Structure* [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2008. 107–110.  
聂建国, 樊健生. *钢与混凝土组合结构* [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 107–110.