

基于长标距光纤光栅传感器的钢梁损伤定位研究

田石柱^{1,2} 温科¹ 王大鹏¹

(¹ 苏州科技学院土木工程学院, 江苏 苏州 215011; ² 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要 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, 虽然已发展出多种损伤识别方法, 但准确地测量结构的响应信息是损伤识别方法有效性的前提。由于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, 其准确性和工程量对于工程应用来说是不可取的。采用准分布式长标距基于玻璃纤维增强复合材料封装的光纤布拉格光栅(GFRP-FBG)应变传感器, 并结合其在简支钢梁中损伤识别的应用以验证其性能。实验结果表明, 利用准分布式长标距 GFRP-FBG 应变传感器可有效预警损伤、定位损伤和判断抗弯刚度损伤程度。

关键词 光纤光学; 传感器; 损伤定位; 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/LOP50.040603

Study on Damage Location of Steel Beam Based on Long-Gage Fiber Grating Sensor

Tian Shizhu^{1,2} Wen Ke¹ Wang Dapeng¹

(¹ School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215011, China)
(² School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China)

Abstract It has important and practical significance to establish a complete set of health monitoring system for massive project structure. 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 the premise of the effectiveness of damage identification. Damage inside the structure cannot be predicted, so it is not advisable for health monitoring by means of strain gauges. We use quasi-distributed long-gage optical fiber Bragg grating based on glass-fiber reinforced composite material package (GFRP-FBG) and combine it with the damage detection application in simply supported steel beam to verify the performance of the quasi-distributed long-gage GFRP-FBG strain sensor. The test results show that using quasi-distributed long-gage GFRP-FBG strain sensor can effectively perform damage fore-warning and damage location, and estimate the damage degree of bending stiffness.

Key words fiber optics; sensor; damage location; strain; structural health monitoring

OCIS codes 060.3735; 050.2770; 130.6010

1 引言

重大工程结构如大跨度桥梁、高层建筑结构、大跨度网架结构和大型水利枢纽和大型海洋平台等, 具有投资大、使用期长等特点。这些结构一旦失效, 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, 可见保障它们的安全运营具有重要意义^[1]。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。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, 例如应变、温度、加速度、角度和裂缝等方面的测量。近年来, 一些研究

收稿日期: 2013-01-11; **收到修改稿日期**: 2013-01-29; **网络出版日期**: 2013-04-02

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)和苏州科技学院基金(XKY201007)资助课题。

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等方面的研究。E-mail: tianshizhu@mail.usts.edu.cn

者提出将长标距^[2~6]光纤光栅应变传感器^[7]应用在结构损伤识别中,并提出了一些新型传感器^[8~10]和新型测量方法^[11]。

本文采用准分布式长标距基于玻璃纤维增强复合材料封装的光纤布拉格光栅(GFRP-FBG)应变传感器,根据加载情况设置三种工况,将准分布式长标距 GFRP-FBG 应变传感器粘贴在简支钢梁表面。由于损伤识别的复杂性,故采用分步识别的方式,根据实验测得的宏应变以预警损伤,定位损伤,识别损伤程度。

2 基本原理

2.1 光纤光栅应变传感基本原理

光纤布拉格光栅(FBG)^[12]是最早发展出来的光纤光栅,属于波长调制型非线性作用的光纤传感器,也是应用最广泛的光纤光栅。目前,FBG 传感器的工作原理都是基于对光栅中心波长 λ_B 的测量,通过对由外界扰动引起的 λ_B 漂移量的测量,得到应力待测量。根据耦合模式理论, $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ 的波长就被光纤光栅反射回去(n_{eff} 为纤芯的有效折射率, Λ 为光栅周期)。

当传感器光栅周围的应力待测量发生变化时,将会引起光纤光栅 n_{eff} 或者 Λ 的改变,从而导致反射光的中心波长值发生漂移^[13]。

2.2 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 GFRP-FBG 应变传感器,故测得的应变称为宏应变。

由材料力学知梁截面 X 处的横截面上任一点的应变为

$$\epsilon_x = \frac{M_x y_x}{E_z} \quad (1)$$

式中 ϵ_x 为梁截面 X 处横截面上任一点的应变, M_x 为梁截面 X 处弯矩值, y_x 为梁截面 X 处横截面任一点至中性轴距离, E_z 为梁截面绕 Z 轴的抗弯刚度。(1)式是梁横截面任一点的理论应变,若将准分布式长标距 GFRP-FBG 应变传感器布置在梁的表面,可测得梁在荷载作用下的波长变化值,然后根据所测得的波长变化值 $\Delta\lambda_B$,由 $\epsilon = \Delta\lambda_B / K_\epsilon$ 求得宏应变,其中 K_ϵ 为传感器的灵敏度系数, ϵ 为宏应变。根据宏应变可推出在一个长标距传感器所布置范围内的梁的平均抗弯刚度:

$$\bar{E}_{m-n} = \frac{\int M_x y_x dx}{\bar{\epsilon}_{m-n} L_{m-n}} \quad (2)$$

式中 $\bar{\epsilon}_{m-n}$ 为梁截面 m, n 范围内梁的宏应变(平均应变), \bar{E}_{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。

2.3 损伤指数法

结构损伤识别有其自身的特点:激励的不确定性、响应的不完备性以及识别问题的复杂性。若同时识别各种结构参数,问题会变得异常复杂。为了简单起见,本实验将结构抗弯刚度作为识别对象,而认为其他结构参数不变。定义损伤指数定义为

$$D_I = \frac{E - E^*}{E} \times 100\% \quad (3)$$

式中 D_I 为 I 单元损伤指数, E 为未损伤梁的抗弯刚度, E^* 为损伤梁的抗弯刚度。

3 实验方案与实验

采用准分布式长标距 GFRP-FBG 应变传感器,将其粘贴在预先设置的三种工况的梁下翼缘表面,通过测得的宏应变进行结构损伤识别。

3.1 实验系统



图1 实验系统

Fig. 1 Photo of the experimental system

采用反力架、光纤光栅解调仪和计算机构成实验系统,实验系统如图 1 所示。

3.2 实验构件

实验构件是一简支工字型钢梁,跨度为 1820 mm,工字钢型号为 18[#]。将梁的跨中 780 mm 区域分为 12 个单元(12×65 mm)。标距为 130 mm 的长标距 GFRP-FBG 应变传感器恰好可覆盖两个单元。试件下翼缘有 12 个直径为 8 mm 的圆孔,圆孔距邻近边的边距均为 25 mm(圆孔图示位置只是方便理解)。上下两排圆孔对称,圆孔中心距梁端尺寸如图 2 所示。实验构件有三种工况,依次为 C1、C2、C3,定义 C1 为无损伤, C2、C3 分别为切除单元 4 上下两侧翼缘 15 mm 和切除单元 4、8 上下两侧翼缘 15 mm 用以模拟损伤。试件工况如图 2~4 所示。

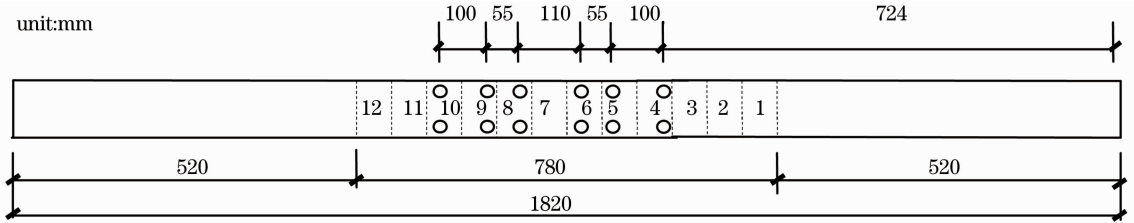


图 2 C1: 简支钢梁无损伤

Fig. 2 C1: no damage in the simply supported steel beam

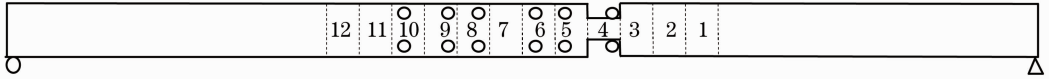


图 3 C2: 简支钢梁在单元 4 有一处损伤

Fig. 3 C2: one damage in the fourth element of the simply supported steel beam

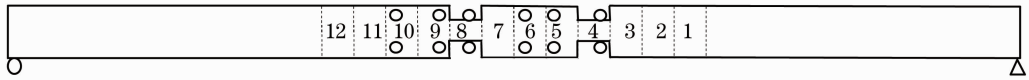


图 4 C3: 简支钢梁在单元 4、8 各有一处损伤

Fig. 4 C3: two damages in the fourth and eighth elements of the simply supported steel beam

3.3 传感器

本文所用的准分布式长标距 GFRP-FBG 应变传感器(图 5)是将表面式 GFRP-FBG 应变传感器标距拉伸,然后将其布置在一起而构成的。应变传感器由 6 个中心波长分别为 1526.576、1550.962、1559.936、1571.899、1577.811、1580.709 nm 的光纤光栅构成,各个光纤光栅标距为 130 mm。为了便于叙述,将各个光纤光栅按波长从小到大依次定义为 F1、F2、F3、F4、F5、F6。图 6、图 7 分别是长标距 GFRP-FBG 应变传感器示意图和准分布式长标距 GFRP-FBG 应变传感器示意图。

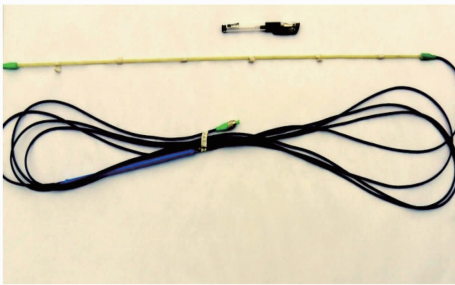


图 5 准分布式长标距 GFRP-FBG 应变传感器

Fig. 5 Photo of quasi-distributed long-gage GFRP-FBG

strain sensor

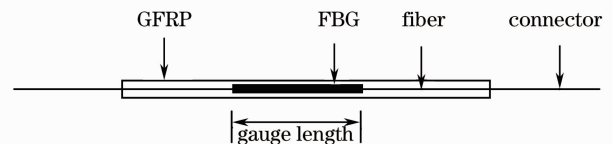


图 6 GFRP-FBG 应变传感器结构图

Fig. 6 Structure of GFRP-FBG strain sensor

3.4 传感器布置

准分布式长标距 GFRP-FBG 应变传感器沿梁的纵向中线粘贴在下翼缘表面上,传感器布置如图 8 所示。

3.5 实验加载制度

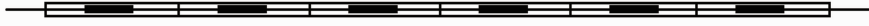


图7 准分布式 GFRP-FBG 应变传感器结构图

Fig. 7 Structure of quasi-distributed long-gage GFRP-FBG strain sensor

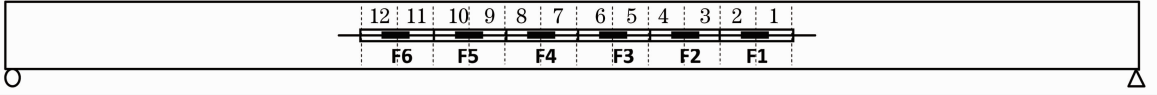


图8 传感器布置示意图

Fig. 8 View of sensor arrangement

实验采用逐级加载方式,每 4 kN 为一级,加载至 48 kN,每种工况重复实验三次。实验加载如图 9 所示。

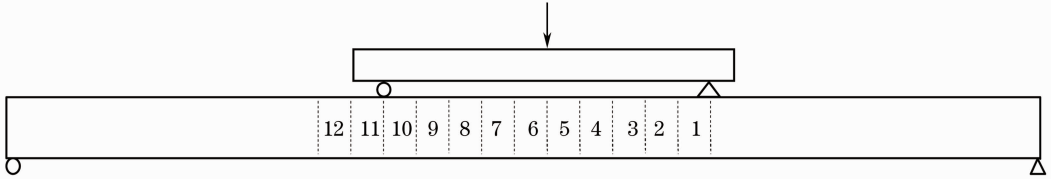


图9 实验加载示意图

Fig. 9 Schematic of loading in experiment

4 实验数据分析

4.1 损伤预警、损伤定位

根据实验,准分布式长标距 GFRP-FBG 应变传感器可测得其相应单元的宏应变。取某级荷载作用下的测量值做分析。数据分析结果如图 10 所示。

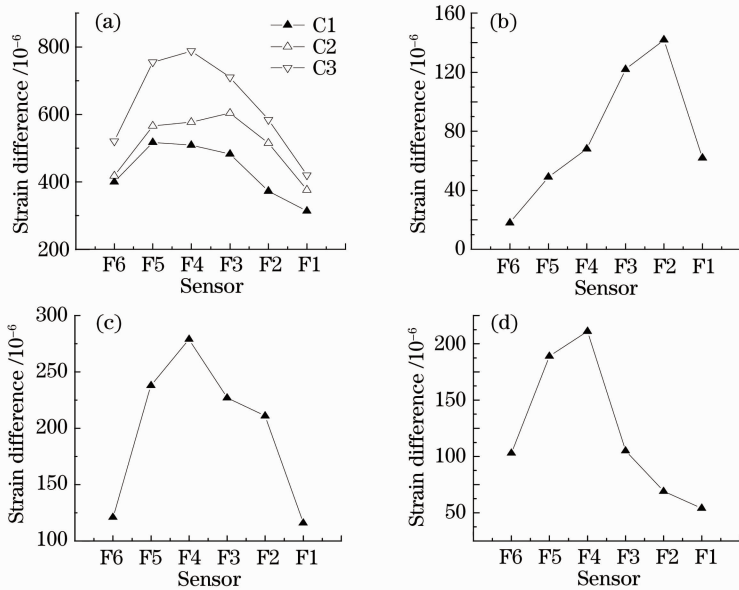


图 10 实验数据分析。(a) 三种工况下 F1~F6 相应单元的宏应变;(b) 工况 C1 和 C2 下 F1~F6 相应单元宏应变差值;
(c) 工况 C1 和 C3 下 F1~F6 相应单元宏应变差值;(d) 工况 C2 和 C3 下 F1~F6 相应单元宏应变差值

Fig. 10 Analysis of experimental data. (a) Corresponding macro-strains of sensing elements F1~F6 of three cases; (b) corresponding macro-strain differences of elements F1~F6 of cases C1 and C2; (c) corresponding macro-strain differences of elements F1~F6 of cases C1 and C3; (d) corresponding macro-strain differences of elements F1~F6 of cases C2 and C3

图 10(a)表明,F1~F6 在三种工况下所测得的相应单元的宏应变值有变化,可得知简支钢梁有损伤。由图 10(b)可知,F2 测得的单元 3,4 的宏应变值变化最大,其两侧单元的宏应变的变化值逐渐减小,而且随

着距离的增大,变化值减小。F3所覆盖的单元的宏应变变化值较F1所覆盖的单元的宏应变变化值大,因而可确定损伤邻近单元5,即单元4有损伤。

由图10(c)可知,F4测得的单元7,8的宏应变变化值最大。F3、F2所测的宏应变变化值随着与单元7,8距离增大的减小并不明显,由图10(d)可知,此现象是因为单元4损伤对F3、F2应变传感器的影响所致。F5所覆盖的单元的宏应变变化值较F3所覆盖的单元的宏应变差值大,因而可确定损伤邻近单元9,即单元8有损伤。

4.2 抗弯刚度损伤程度识别

根据(2)式可得各单元在某级荷载作用下的抗弯刚度值,如图11所示。由图可知工况C1下F1~F6所覆盖的各单元的抗弯刚度值的大小与相应单元的圆孔位置相吻合(如F1覆盖的单元无圆孔,相应的抗弯刚度值大;F3覆盖的单元有4个圆孔,相应的抗弯刚度值小)。可见试件下翼缘的圆孔对传感器测量值有一定的影响。尽管准分布式长标距GFRP-FBG应变传感器受到邻近损伤部位的干扰,由变化明显的抗弯刚度值仍可有效地识别损伤程度。

假定工况C1下是完整的构件,工况C2和C3下的抗弯刚度的损伤程度如表1所示。

由图11和表1可知,损伤程度识别效果不明显,因此,此法不能有效地识别梁的损伤程度。

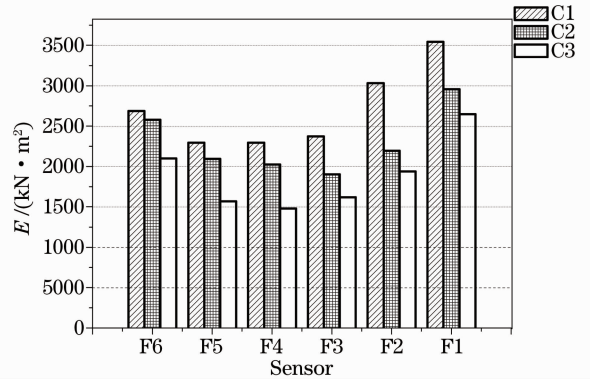


图11 由F1~F6所测得的宏应变计算得到的抗弯刚度

Fig. 11 Bending stiffness calculated by macro-strain measurement of sensors F1~F6

表1 抗弯刚度的损伤程度

Table 1 Damage degree of bending stiffness

Sensor	F6	F5	F4	F3	F2	F1
C1 damage degree	0.76	0.65	0.65	0.67	0.86	1.00
C2 damage degree	0.72	0.56	0.53*	0.47	0.58*	0.84
C3 damage degree	0.54	0.33	0.30*	0.35	0.50*	0.75

*: 此处为损伤位置。

5 结 论

采用准分布式长标距GFRP-FBG应变传感器进行了钢梁损伤定位实验研究。实验结果表明,1)准分布式长标距GFRP-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。2)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GFRP-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,尚不能有效地识别损伤程度。

参 考 文 献

- Jinping Ou, Hui Li. Structural health monitoring in mainland China: review and future trends[J]. *Structural Health Monitoring*, 2010, **9**(3): 219~231
- 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
- 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
- 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
- D. Inaudi, N. Casanova. Geo-structural monitoring with long-gage interferometric sensors[C]. *SPIE*, 2000, **3995**: 164~174
- 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 B. Culshaw. *Smart Structures and Materials* [M]. Boston: Artech House Publishers, 1996. 2~3
- 13 Li Hongnan, Ren Liang. *Optical Fiber Grating Sensing Technology of Structural Health Monitoring*[M]. Beijing: China Architecture & Building Industry Press, 2008. 16~17
李宏男, 任亮. 结构健康监测光纤光栅传感技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. 16~17