

文章编号: 1001-3806(2017)01-0129-04

## FBG 传感器关于裂缝及损伤的监测应用研究

田石柱<sup>1,2</sup>, 邱伟宸<sup>1</sup>, 温科<sup>3</sup>, 曹长城<sup>4</sup>

(1. 苏州科技学院 土木工程学院, 苏州 215011; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090; 3. 无锡锡山三建实业有限公司, 无锡 214000; 4. 苏州地福房地产开发有限公司, 苏州 215000)

**摘要:** 为了满足结构健康监测的需求, 采用试验方法研究了准分布式光纤布喇格光栅(FBG)传感器在裂缝监测和损伤定位中的应用。以钢筋混凝土简支梁和工字型钢梁为试验对象, 对梁关键部位划分单元进行多点监测, 取得了其应变变化的数据, 并进行了分析以实现裂缝监测和损伤定位。结果表明, 准分布式 FBG 传感器能够较为准确地对裂缝的发生及所测区域的损伤情况实现定位。

**关键词:** 光纤光学; 结构健康监测; 准分布; 裂缝; 损伤**中图分类号:** TP212.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.01.026

### Application research on FBG sensor in the monitoring of fracture and damage

TIAN Shizhu<sup>1,2</sup>, QIU Weichen<sup>1</sup>, WEN Ke<sup>1</sup>, CAO Changcheng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Xishan No. 3 Construction Industrial Co. Ltd., Wuxi 214000, China; 4. Suzhou Difu Real Estate Development Co. Ltd., Suzhou 215000, China)

**Abstract:** In order to meet the needs of structure health monitoring, the application of quasi-distributed fiber Bragg grating (FBG) sensor in crack monitoring and damage localization was studied in experimental method. By choosing the simply supported reinforced concrete beam and an H-shaped steel beam as the test object, the key location of the beam was divided into several units of multi-point monitoring to obtain the data of the strain. The data was analyzed to achieve the crack monitoring and damage location. The results show that quasi-distributed FBG sensor can accurately locate the occurrence of cracks and damage of the measured area.

**Key words:** fiber optics; structural health monitoring; quasi-distribution; crack; damage

## 引言

数十年来, 建筑业伴随着中国国民经济得到了飞速发展, 大量的重大工程结构纷纷涌入公众视野<sup>[1]</sup>。时至今日, 这些重大工程结构已经各自进入了其服役的中期或中后期, 及时获取这些结构服役期间的状态信息以确保它们的安全运营显得尤为重要, 因此, 结构健康监测 (structural health monitoring, SHM) 逐渐开始受到社会各界的广泛重视<sup>[2-3]</sup>。在健康监测系统的实际应用中, 传统的传感器如电阻应变片、钢弦计等, 由于其耐久性和稳定性难以满足长期健康监测的需要, 限制了健康监测领域的发展<sup>[4]</sup>。随着我国对智能材料研究工作的深入开展, 光纤布喇格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 以其轻质柔软、精度高、抗电磁干扰、抗零飘等优越特性脱颖而

出, 已被长期结构健康监测作为局部监测的首选敏感元件, 被认为是目前最有前景的传感器之一<sup>[5]</sup>。经过了国内外学者的大量研究, 光纤光栅传感器在许多方面得到了发展, 如光纤光栅的封装工艺、应变传递机理、应变传感特性等。由于结构健康监测需求日益增加, 普通的单点式监测在某些方面如裂缝监测、损伤定位等已经达不到预期的理想监测效果。专家学者根据传感器的复用理论提出了 FBG 的准分布方式, 将单点的参量测量拓扑为多点的网络监测。本文中在此理论上进行了钢筋混凝土梁的裂缝监测试验和工字型钢梁的损伤定位试验, 将构件的关键部位进行单元划分并以准分布式 FBG 传感器进行覆盖, 通过多点即时监测, 利用各测点光栅的应变变化进行分析, 从而裂缝监测和损伤定位<sup>[6-8]</sup>。

## 1 准分布式 FBG 传感器

### 1.1 FBG 传感器的工作原理

光纤布喇格光栅其工作原理是通过对光栅中心反

作者简介: 田石柱 (1962-), 男, 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

收稿日期: 2015-12-24; 收到修改稿日期: 2016-02-29

射波长的测量从而得到目标参量,其中心波长  $\lambda_B$  与光栅周期  $\Lambda$ 、纤芯有效折射率  $n_{eff}$  满足如下关系:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

可见,布喇格光栅中心波长取决于光栅周期和光纤有效折射率,任何使这两个参量变化的外界因素都会引起波长变化<sup>[9]</sup>。其中,应变和温度是能够显著改变布喇格光栅中心波长的两个物理量。波长漂移与应变和温度的关系如下:

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\Delta\varepsilon\lambda_B + (\alpha + \xi)\Delta T\lambda_B \quad (2)$$

式中,  $\Delta\varepsilon$  是轴向应变变化量,  $\Delta T$  是温差,  $P_e$  是光纤有效弹光系数,  $\alpha$  和  $\xi$  分别是光纤的热膨胀系数和热光系数。

### 1.2 基于波分复用的准分布式 FBG 传感器

FBG 传感器具有波长编码的特性,使得波分复用方案在 FBG 传感器的准分布方式中得到了研究及应用<sup>[10-11]</sup>。在该方案中,多个光纤光栅沿着同一根光纤分布,每个光栅都有各自的中心波长且互不重复,因此各光栅的反射光谱相互独立<sup>[12]</sup>。在一根或者多根光纤上布置若干个光纤光栅,通过光纤光栅解调仪进行数据采集继而传输至控制室完成数据的保存和分析,即可实现平面或空间中的准分布传感系统<sup>[13-15]</sup>。如图 1 所示,在大范围内通过该方案可以实现多点实时监测。

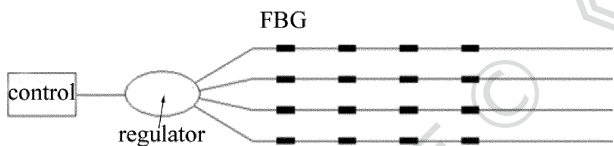


Fig. 1 Quasi-distributed sensor network

本文中,光纤光栅解调仪采用美国 MOI 公司生产的 SM130 光纤光栅传感解调仪,分辨率小于 1pm,精度小于 10pm,扫描频率为 1kHz;数据采集软件为 Enlight v1.138。

图 2 中,若将待测区划分成 10 个单元,将带有 10

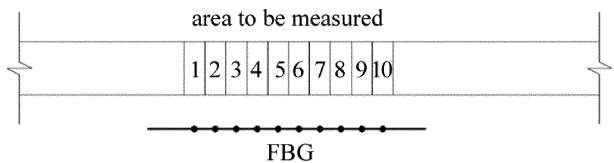


Fig. 2 Sketch map of quasi-distributed FBG sensor

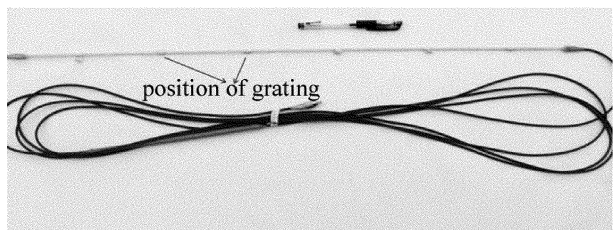


Fig. 3 Quasi-distributed FBG sensor packed by fiber reinforced polymer

个光栅的准分布式光纤布喇格光栅传感器中粘贴于该待测区,保证每个光栅均处于各自所在单元中心。由于整个光纤部分与待测区用胶水完全固定,故所测得应变实际为点应变。本文中,准分布式 FBG 传感器均采用纤维增强复合材料进行封装,外观如图 3 所示。

## 2 试验方案

### 2.1 裂缝监测试验

试验对象为一个钢筋混凝土简支梁,混凝土强度等级为 C25,纵向受力钢筋等级为 HRB335,表 1 为该梁的截面参量。在跨中的 780mm 上设置分配梁,在分配梁跨中施加集中荷载,试验系统示意图见图 4。

Table 1 Interface parameters of concrete beam

bottom steel	top steel	stirrup of encryption area
21 $\phi$ 2	2 $\phi$ 8	$\phi$ 8@80
width of beam	height of beam	thickness of protective layer
120mm	160mm	25mm



Fig. 4 Schematic diagram of crack monitoring test system

将集中荷载通过分配梁施加于试验构件,由此构件在分配梁支座之间的区段中产生纯弯段。将此区段划分为 6 个单元,依次记为  $C_1 \sim C_6$ ,并在表面粘贴准分布点式 FBG 传感器。传感器内包含 6 个光栅,记为  $F_1 \sim F_6$ ,各光栅的中心波长分别为 1526.260nm,1550.582nm,1559.553nm,1571.532nm,1577.473nm 和 1580.380nm,光栅的位置由各个单元的中心确定。

### 2.2 损伤定位试验

试验对象为工字型简支钢梁,表 2 为该梁的截面参量。工字梁跨度为 1820mm,在跨中的 780mm 上设置分配梁,在分配梁跨中施加集中荷载,试验系统示意图见图 5。

Table 2 Interface parameters of H-shaped steel beam

height	width	thickness of web	average thickness of flange
180mm	94mm	6.5mm	10.7mm

将在分配梁区段内的钢梁跨中部分划分为 12 个单元,记为  $C_1' \sim C_{12}'$ ,本试验中采用切除部分工字钢上下翼缘的方式构造损伤,设定 3 种工况:(1)无损伤(记为  $W_1$ );(2)有一处损伤,在  $C_4'$ 处(记为  $W_2$ );(3)有两处损伤,分别在  $C_4'$ 和  $C_8'$ 处(记为  $W_3$ )。试验中

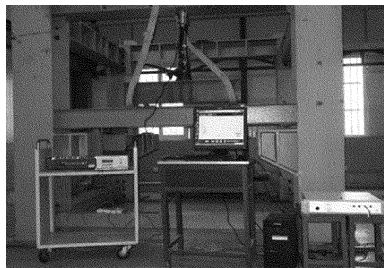


Fig. 5 Schematic diagram of damage location test system

准分布 FBG 传感器中共有 6 个光纤光栅, 记为  $F_1 \sim F_6$ , 中心波长分别为 1526.576nm, 1550.962nm, 1559.936nm, 1571.899nm, 1577.811nm 和 1580.709nm, 传感器沿钢梁纵向粘贴在下翼缘中心, 每个光栅落于两个单元中心。图 6 为传感器布置示意图。

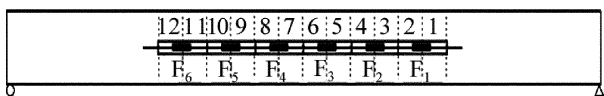


Fig. 6 Diagrammatic sketch of the location of sensors

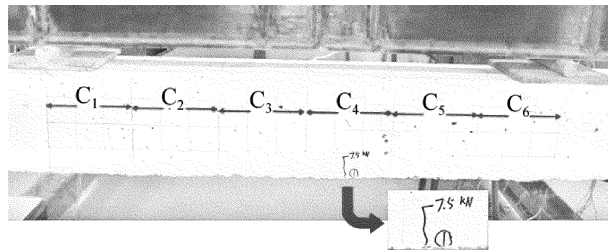


Fig. 7 Position of the first crack

### 3 试验结果与数据分析

#### 3.1 裂缝监测试验数据分析

试验采用逐级加载, 每级 2.5kN。通过目测, 荷载加载至第 3 级 (即 5kN ~ 7.5kN) 时, 在  $C_4$  中产生了裂缝。故取出 0kN ~ 7.5kN 共 3 级加载下的各测点应变数据 (见表 3) 进行分析。

Table 3 Strain values of each grating

load/kN	strain values of each grating/ $\mu\epsilon$					
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$
0	0	0	0	0	0	0
2.5	51.75	53.3	54.17	44.86	45.05	44.95
5	116.7	125.83	123.79	96.02	98.34	92.82
7.5	221.84	274.95	259.71	279.8	181.36	144.27

在第 1 级荷载 (0kN ~ 2.5kN) 加载中, 由于在纯弯段内各测点应变均相等, 试验数据中各测点应变增量在  $44.86\mu\epsilon \sim 54.17\mu\epsilon$  之间, 波动范围较小, 混凝土基本处于弹性阶段, 与实际情况相符。

在第 2 级荷载 (2.5kN ~ 5.0kN) 加载中,  $F_1 \sim F_3$  的应变增量在  $65\mu\epsilon \sim 72\mu\epsilon$  之间,  $F_4 \sim F_6$  的应变增量在  $48\mu\epsilon \sim 52\mu\epsilon$  之间, 明显两边的应变增量已经开始不再同步, 混凝土已经不再处于弹性阶段, 可以判断  $F_3$  和  $F_4$  所在单元范围内即将出现裂缝。

在第 3 级荷载 (5.0kN ~ 7.5kN) 加载中,  $F_1 \sim F_6$  的应变增量为:  $105\mu\epsilon, 149\mu\epsilon, 136\mu\epsilon, 183\mu\epsilon, 83\mu\epsilon$  和  $52\mu\epsilon$ 。此时  $F_4$  处应变发生了突变, 且其增量明显达到了各测点中的最大值, 可以判断此时裂缝在  $C_4$  处已经出现; 试验和分析结果与实际情况 (见图 7) 相符。

#### 3.2 损伤定位试验数据分析

试验采用逐级加载, 4kN 为 1 级, 加至 48kN, 任意选取第 11 级 (44kN) 荷载作用下 3 种工况中各光栅测

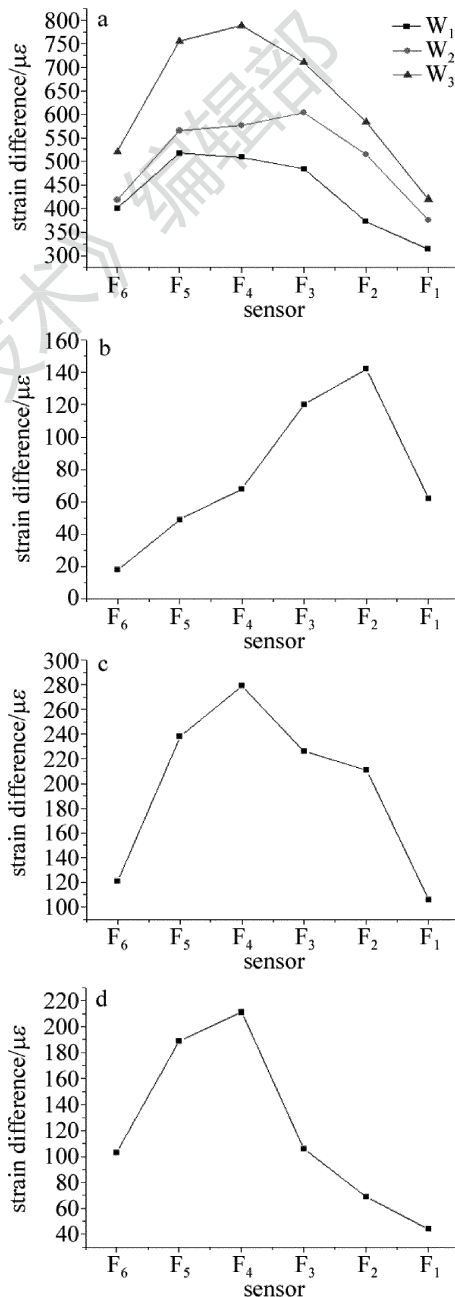


Fig. 8 Date of strains in measuring points

a—strains of measuring points under three cases b—between case 1 and case 2 c—between case 1 and case 3 d—between case 2 and case 3

点应变数据如图 8 所示。

图 8a 中,3 种工况下各测点应变不同,可知其中两种工况下的钢梁有损伤;图 8b 中, $F_2$  处应变变化最大, $F_3$  处应变变化明显大于  $F_1$ ,可知  $F_2$  覆盖的单元 ( $C_3'$  和  $C_4'$ ) 内有损伤且该损伤靠近  $F_3$  所覆盖的  $C_5'$ ,即  $C_4'$  损伤;图 8c 中, $F_4$  处应变变化最大,由于  $C_4'$  的损伤对  $F_3$  和  $F_5$  带来了影响,故两处应变变化相差不大,只能初步确定损伤发生在  $F_4$  所覆盖范围中;图 8d 中, $F_4$  处应变变化最大, $F_5$  处应变变化明显大于  $F_3$ ,因而可以确定  $C_8'$  有损伤。分析结果与实际情况相符。

#### 4 结 论

通过准分布方式对传统单测点式 FBG 传感器进行了测量范围的拓展。以裂缝监测和损伤定位两个试验对其实际工程应用价值进行了论证。

(1) 在裂缝监测试验中,在其监测的关键部位划分单元并以准分布式 FBG 覆盖,随荷载的增加,可以通过各光栅的应变增量变化情况可以用来感知裂缝的出现进而对其进行定位。与实际情况相比较可知,此方案可以有效实现裂缝监测。

(2) 在损伤定位试验中,同样在可能发生损伤的部位划分单元以准分布式 FBG 覆盖,通过光栅当前应变与其未损伤时的应变差值可以用作损伤定位。试验结果证明,此方案可以有效地对损伤进行探测进而定位。

(3) 基于波分复用所开发的准分布式 FBG 传感器,在一定范围内对待测区进行单元划分后通过对多个单元上的测点应变值数据分析,便可实现有效的、目标性监测。其监测的精度与单元的划分相关。此外,若对此准分布进行更为复杂的空间网络拓扑,即可获得更为详细的结构信息。

#### 参 考 文 献

[1] KIRIKERA G R, BALOGUN O, KRISHNASWAMY S. Adaptive fiber Bragg grating sensor network for structural health monitoring: applications to impact monitoring[J]. Structural Health Monitoring, 2011, 10

(3);5-16.  
 [2] LI S Zh, WU Zh Sh. Development of distributed long-gage fiber optic sensing system for structural health monitoring[J]. Structural Health Monitoring, 2007, 6(2):133-143.  
 [3] CONTE J P, LIU M, INAUDI D. Earthquake response monitoring and damage identification of structures using long-gage fiber optic sensors[C]//Proceedings of the 14th ASCE Engineering Mechanics Division Conference. Texas, Austin, USA: SPIE, 2000;1-6.  
 [4] INAUDI D, CASANOVA N. Geo-structural monitoring with long-gage interferometric sensors[J]. Proceedings of the SPIE, 2000, 3995: 164-174.  
 [5] OU J P, LI H. Structural health monitoring in mainland China: review and future trends[J]. Structural Health Monitoring, 2010, 9(3):219-231.  
 [6] WAN L B, ZHANG B M, WANG D F, et al. Research on fiber Bragg grating strain sensor for structural health monitoring[J]. Laser Journal, 2002, 23(4):47-48 (in Chinese).  
 [7] TIAN Sh Zh, ZHAO X F, YANG W D. Applications of fiber Bragg grating sensor in civil engineering[J]. World Earthquake Engineering, 2006, 22(4):27-34 (in Chinese).  
 [8] LIU Y M, YU Zh Y, YANG H B, et al. The investigation of the non-linear characteristics of fiber Bragg gratings[J]. Laser Technology, 2006, 30(1):101-103(in Chinese).  
 [9] LI H N, REN L. The structural health monitoring of fiber grating sensing technology [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008;16-17(in Chinese).  
 [10] WANG Y B, LAN H J. Study of fiber Bragg grating sensor system based on wavelength-division multiplexing/time-division multiplexing [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8):2196-2201 (in Chinese).  
 [11] DONG B, HE Sh Y, HU Sh Y, et al. Study on the multiplexed sensor system based on tunable fiber laser with fiber Bragg grating[J]. Laser Technology, 2005, 29(6):608-610 (in Chinese).  
 [12] ZHANG X L, LIANG D K, LU J Y, et al. A high reliable optic fiber Bragg grating sensor network design[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(1):0105004 (in Chinese).  
 [13] ZHANG H Y, WANG D N, SHI Q P, et al. Optical intensity compensating method for time division multiplexing of fiber-optic hydrophone using a 3×3 coupler[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(11):1105006 (in Chinese).  
 [14] RAO Y J, RIBEIRO A B L, JACKSON D A, et al. Simultaneously spatial-, time-, and wavelength-division multiplexed in-fiber Bragg grating sensor network [J]. Proceedings of the SPIE, 1996, 2838: 23-30.  
 [15] JACKSON D A, RIBEIRO A B L, REEKIE L, et al. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network [J]. Optics Letters, 1993, 18(14):1192-1194.