

光纤光栅传感器监测混凝土简支梁裂缝的实验研究

田石柱^{1,2} 曹长城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 以结构健康监测系统为研究背景,研究了光纤布拉格光栅(FBG)传感器。对FBG的研究起步并成熟于通信领域,而对其在土木工程领域的研究尚处于发展阶段。为了进一步促进FBG传感器的发展,推广其在工程中的应用,通过在混凝土简支梁的底部布置经纤维增强复合塑料(FRP)封装的准分布式FBG传感器和未经封装的准分布式FBG传感器,研究了准分布式FBG传感器对钢筋混凝土构件裂缝出现时的有效感知及定位问题。实验结果表明可实现裂缝的大致定位,经FRP封装的FBG传感器相对于裸光纤光栅,其应变灵敏度有所下降。

关键词 传感器;裂缝定位;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/CJL201340.0114001

Experimental Study on Fiber Grating Sensor Monitoring the Crack of Concrete

Tian Shizhu^{1,2} Cao Changcheng¹ Wang Dapeng¹

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

Abstract Based on the study background for structural health monitoring (SHM), fiber Bragg grating (FBG) sensor is researched. The study on FBG starts and matures in the field of telecommunication, and the corresponding study in the field of civil engineering is in a development stage even. To improve its further developments and promote its application in engineering, two kinds of quasi-distributed FBG sensors placements are considered, one for the fiber reinforced plastics (FRP) package and the other for without package. The sensors are pasted on the bottom of the beam. Study on the detecting effectiveness and damage locating of the quasi-distributed FBG sensor when the reinforced concrete beam specimen cracks appear are carried out. The experimental results show that the crack can be roughly located, and the strain sensitivity of the FBG sensor with FRP package declines relative to the rare FBG sensor.

Key words sensors; crack location; strain; structural health monitoring

OCIS codes 050.2770; 060.3735; 130.6010

1 引言

在土木工程领域,一些混凝土工程对裂缝具有严格的要求,如堤坝、蓄水池、核反应堆的保护壳等,然而由于混凝土属于非线性材料,裂缝的出现具有随机性,因此对混凝土裂缝的监测与定位一直是困扰众多专家学者的难题。近来,一些研究者提出长

标距光纤布拉格光栅(FBG)传感器及准分布式长标距FBG传感器在土木工程中的应用。Inaudi等^[1]利用长标距FBG传感器测量结构在荷载作用下的挠度,试验结果表明传感器可测得非常有效的数据,尤其对混凝土和木结构;Inaudi等^[2]利用准分布式长标距FBG传感器对索和隧道进行长期监测;

收稿日期: 2012-08-07; 收到修改稿日期: 2012-09-06

基金项目: 第八批江苏省“六大人才高峰”项目(2011-JZ-013)和哈尔滨市科技局科技创新人才研究专项基金(2009RFKXG007)资助课题。

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

Glisic 等^[3]对聚酰亚胺材料封装的 FBG 传感器进行了试验研究,封装后的传感器具有良好的性能;Li 等^[4]对长标距 FBG 传感器的敏感性做了分析研究,得出随着传感器标距的增大,敏感性越强;Kirikera 等^[5]用 FBG 传感器网络监测结构的高频动应变,利用小波分析方法识别损伤;Kamath 等^[6]提出采用应变传感器测结构的应变,通过适当的识别算法比较完整结构与损伤结构的应变的不同来识别损伤。本文以钢筋混凝土简支梁为研究对象,运用准分布式 FBG 应变传感器,对其在加载过程中裂缝出现时的有效感知及定位问题进行探索研究。

2 FBG 传感器

2.1 FBG 传感器的工作原理

FBG 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^[7],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布拉格光栅中心波长 λ_B 的测量,通过对由外界扰动引起 λ_B 漂移量的检测,得到压力、应力与温度等。根据耦合模式理论, λ_B 与光纤纤芯有效折射率以及光纤光栅周期 Λ 相关,表达式为

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

当传感器光栅周围的温度、应力或其他待测量发生变化时,将会引起光纤光栅 n_{eff} 或者 Λ 发生改变,从而导致反射光的中心波长值发生漂移^[8],可表示为

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\Delta\epsilon\lambda_B + (\alpha_f + \zeta)\Delta T\lambda_B, \quad (2)$$

式中 $\Delta\lambda_B$ 为反射光中心波长变化量, $\Delta\epsilon$ 为应变变化量, ΔT 为温度变化量, P_e 为光纤有效弹光系数, α_f 和 ζ 分别为光纤的热膨胀系数和热光系数。故光纤光栅反射光中心波长变化量与外界温度或应变变化呈线性关系。

2.2 FBG 的准分布方式

利用布拉格光栅的波长编码特性,可实现波分复用^[9]。如将不同的光谱范围对应于特定的传感器空间位置,可以构成准静态分布传感系统。在一根或几根传输光纤上布置若干个布拉格光栅,构建准分布式传感网络,如图 1 所示,可以在大范围内对多点同时进行监测,而且还可以大幅度地减少监测系统的设备数目以及传输段光纤长度,降低系统造价。其中的关键是如何实现对多个光栅反射信号的检测。

人们提出了多种传感器复用的方案,其中包括:波分复用(WDM)、时分复用^[10,11](TDM)、空分复用(SDM)以及它们之间的相互组合方案^[12,13]。由于 FBG 传感器的波长编码特性,使得 WDM 技术在中占有重要的地位。在基于 WDM 技术的方案中,FBG 沿着光纤分布,每个光纤光栅占用一段宽带光源的光谱,且它们的反射光谱不相互重合。传感器合成的最大数目取决于光源的光谱宽度和每个传感器所需要的工作谱宽。

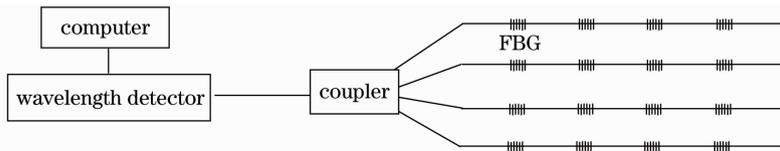


图 1 准分布式传感网络

Fig. 1 Quasi-distributed sensor network

3 实验系统

实验对象为一简支钢筋混凝土梁,混凝土强度等级为 C25,纵向受力钢筋采用 HRB335 级,图 2 和表 1 给出了该梁的配筋详图及截面参数。为了达到试验目的,设计了如图 3 所示的结构及荷载形式。

钢筋混凝土梁所处分配梁区段的部分为纯弯段,将这区段划分为 6 个单元,并分别记为 cell1, ..., cell6,在含有 6 个单元的混凝土梁的下表面粘贴两个准分布式 FBG 应变传感器 F1 和 F2,其中 F1 用纤维增强复合塑料(FRP)材料封装,内部含有 6 个光栅,

依次标记为 $G_{1,1}, \dots, G_{1,6}$,光栅的平均间距为 130 mm,中心波长分别为 1526. 260、1550. 582、1559. 553、1571. 532、1577. 473、1580. 380 nm,外观如图 4 所示。F2 是未经封装的裸 FBG 应变传感器,内部同样含有 6 个的光栅,依次标记为 $G_{2,1}, \dots, G_{2,6}$,光栅的平均间距也为 130 mm,中心波长分别为 1527. 209、1533. 219、1542. 019、1557. 178、1568. 971、1577. 716 nm,外观如图 5 所示。传感器粘贴好后的混凝土梁底面如图 6 所示。

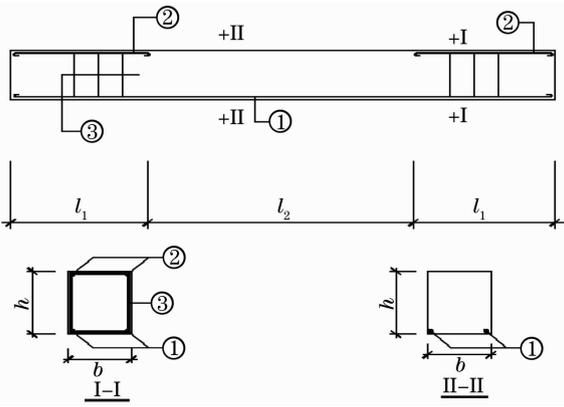


图 2 混凝土梁的配筋详图

Fig. 2 Diagram of concrete beam arrangement

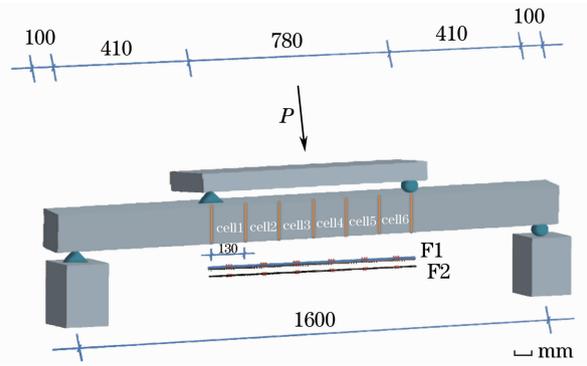


图 3 结构及荷载示意图

Fig. 3 View of structure and load

表 1 混凝土梁的界面参数

Table 1 Interface parameters of concrete beam

Rebar①	Rebar②	Rebar③	l_1 /mm	l_2 /mm	Beam width b /mm	Beam depth h /mm	Protective layer thickness c /mm
2Φ12	2Φ8	Φ8@80	510	780	120	160	25

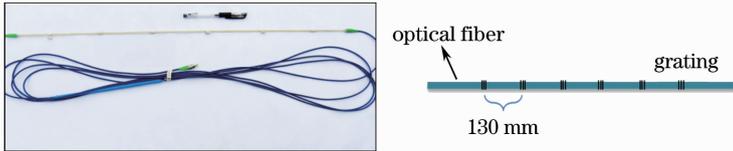


图 4 准分布式 FRP 封装的 FBG 应变传感器

Fig. 4 Quasi-distributed FRP packaged FBG strain sensor

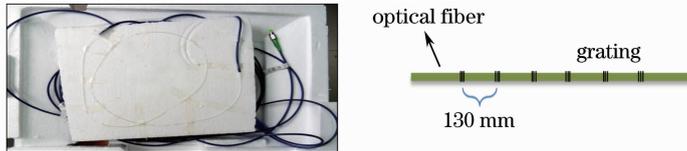


图 5 准分布式裸 FBG 应变传感器

Fig. 5 Quasi-distributed bare FBG strain sensor

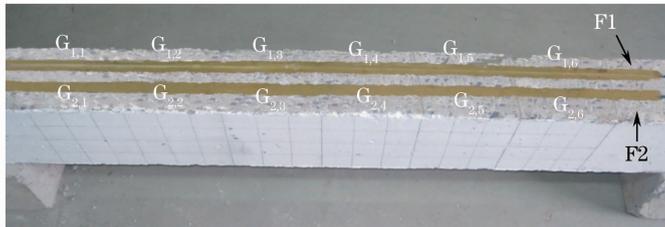


图 6 传感器布置实物图

Fig. 6 Photo of sensors placement

4 实验数据分析

实验过程中,随着荷载的不断加,当加到第 3 级荷载 7.5 kN 时,在混凝土梁 cell4 区域处出现了第一条裂缝,如图 7 所示。据实验数据可绘制传感器 F1 中每个光栅测点的荷载-应变曲线,如图 8 所示。

据实验数据可绘制传感器 F2 中每个光栅测点

的荷载-应变曲线,如图 9 所示。从图 8,9 可以看出,当荷载由 5 kN 加至 7.5 kN 过程中,F1 和 F2 各光栅所在测点的应变均有不同程度的突变,可以推断此时混凝土梁已出现裂缝。对于 F1,各光栅所在测点的应变变化分别为 $G_{1,1}: 105.1457 \mu\epsilon$, $G_{1,2}: 149.1263 \mu\epsilon$, $G_{1,3}: 135.9223 \mu\epsilon$, $G_{1,4}: 183.78638 \mu\epsilon$, $G_{1,5}: 83.0097 \mu\epsilon$, $G_{1,6}: 51.4563 \mu\epsilon$ 。对于 F2,各光栅

所在测点的应变变化分别为 $G_{2,1} : 165.8096 \mu\epsilon$, $G_{2,2} : 119.7619 \mu\epsilon$, $G_{2,3} : 115.3333 \mu\epsilon$, $G_{2,4} : 204.8571 \mu\epsilon$, $G_{2,5} : 150.9524 \mu\epsilon$, $G_{2,6} : 91.6191 \mu\epsilon$ 。其中 $G_{1,4}$ 和 $G_{2,4}$ 是各自所属的传感器当中应变变化

最大的测点,因此可以推断第一条裂缝出现在 cell4 区域内,由图 7 知,这与第一条裂缝出现的实际位置相吻合,故可实现对混凝土梁第一条裂缝的大致定位。

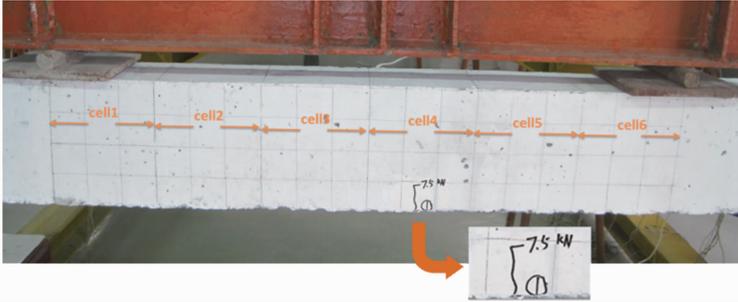


图 7 第一条裂缝出现位置

Fig. 7 Position of first crack

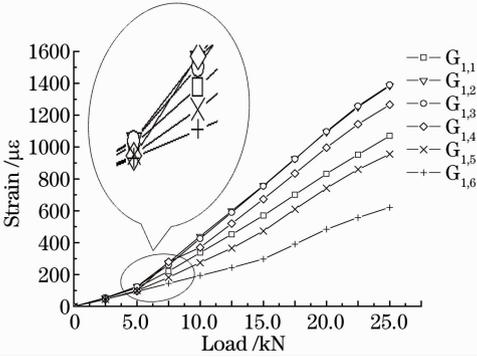


图 8 $G_{1,1}, \dots, G_{1,6}$ 的荷载-应变曲线

Fig. 8 Load-strain curves of $G_{1,1}, \dots, G_{1,6}$

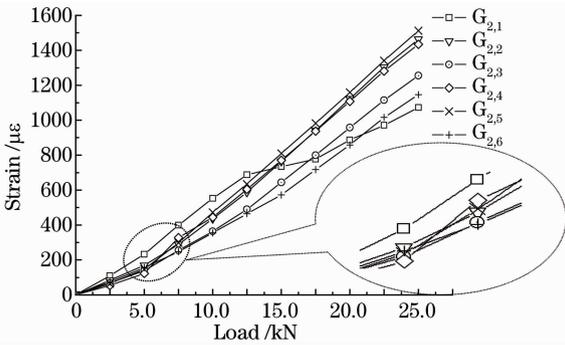


图 9 $G_{2,1}, \dots, G_{2,6}$ 的荷载-应变曲线

Fig. 9 Load-strain curves of $G_{2,1}, \dots, G_{2,6}$

取 $G_{1,4}$ 和 $G_{2,4}$ 两组试验数据,绘制两者的荷载-应变曲线,如图 10 所示。可以看出,在相同荷载分级的条件下,裸光纤光栅应变传感器比经 FRP 材料封装的光纤光栅应变传感器的应变变化大,即前者的应变灵敏度更高,然而由于裸光纤材料质地脆弱、易折断等特性,不适宜在工作环境较粗糙的工程中运用。而 FRP 封装的光纤光栅应变传感器尽管灵敏度略低于裸光纤光栅应变传感器,但由于其材料的性能稳定、强度高特性,因此更适合于工程应

用,尤其是长期的健康监测项目。

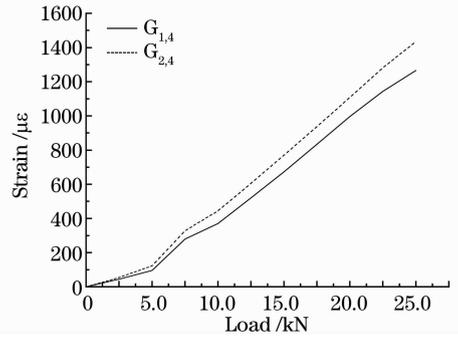


图 10 $G_{1,4}$ 和 $G_{2,4}$ 荷载-应变曲线

Fig. 10 Load-strain curves of $G_{1,4}$ and $G_{2,4}$

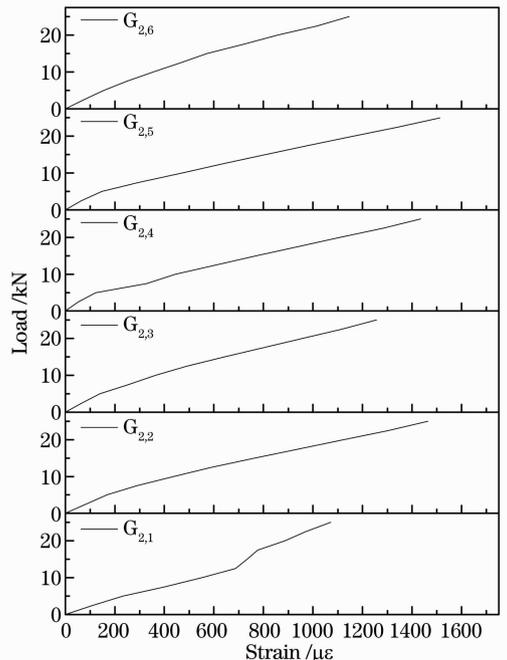


图 11 $G_{2,1}, \dots, G_{2,6}$ 的荷载-应变曲线

Fig. 11 Load-strain curves of $G_{2,1}, \dots, G_{2,6}$

取 F2 各光栅的实验数据, 绘制荷载-应变曲线并分析如图 11 可知, 荷载由 5 kN 加至 7.5 kN 过程中, $G_{2,4}$ 的应变变化最大并向两侧逐渐减小, 此时, $G_{2,1}$ 和 $G_{2,6}$ 的应变几乎随荷载呈线性增加, 由此可知通过 FBG 应变传感器的应变变化来监测混凝土构件的裂缝出现情况, 其传感器与所要监测部位的距离具有一定限制, 具体数值与混凝土强度及 FBG 传感器的封装材料等因素有关。

5 结 论

针对土木工程结构健康监测系统对高性能传感元件的客观需求, 围绕光纤布拉格光栅传感器在实际工程中的应用展开研究, 通过实验探讨了准分布式 FBG 应变传感器在监测钢筋混凝土结构裂缝的应用, 得到的主要结论如下:

1) 准分布式 FBG 应变传感器可通过其内部各光栅的荷载-应变曲线来感知和定位混凝土构件在荷载作用下的裂缝出现情况: 若各光栅的荷载-应变曲线在某一级荷载处应变都有不同程度的突变, 可以判断此时混凝土构件已出现裂缝, 分析各曲线应变突变程度的大小, 可实现裂缝的大致定位, 如果实验中进一步细化准分布式 FBG 应变传感器各光栅所在单元的大小, 可以使裂缝定位的精确性有所提高, 但达到一定的标距后, 定位精确度将无法提高。

2) 通过 FBG 应变传感器的应变变化来监测混凝土结构的裂缝出现情况, 其传感器与所要监测部位的距离是有一定限制的, 具体数值与混凝土强度及 FBG 传感器的封装材料等因素有关。

3) 考虑到土木工程施工工艺较粗糙的特点, 直接埋入或粘贴质地脆弱的裸光纤, 是很难在土木工程中应用的, 采用强度较高、性能稳定的 FRP 材料封装的裸光纤光栅形成性能稳定的 FBG 传感器是应用的前提, 但由于封装技术、裸光纤光栅与 FRP 形成的复合体等因素, 在应变传递过程中有一定的损失, 造成了相对于裸光纤光栅, 其应变灵敏度有所下降。

参 考 文 献

- 1 D. Inaudi, N. Casanova, P. Kronenberg *et al.*. Embedded and surface mounted fiber optic sensors for civil structural monitoring [C]. *SPIE*, 1997, **3044**: 236~243
- 2 D. Inaudi, N. Casanova. Geo-structural monitoring with long-gage interferometric sensors[C]. *SPIE*, 2000, **3995**: 164~174
- 3 B. Glisic, D. Inaudi. Integration of long-gage fiber-optic sensor into a fiber-reinforced composite sensing tape[C]. *SPIE*, 2003, **5050**: 179~186
- 4 Li Suzhen, Wu Zhishen. Development of distributed long-gage fiber optic sensing system for structural health monitoring[J]. *Structural Health Monitoring*, 2007, **6**(2): 133~143
- 5 G. R. Kirikera, O. Balogun, S. Krishnaswamy. Adaptive fiber Bragg grating sensor network for structural health monitoring: applications to impact monitoring [J]. *Structural Health Monitoring*, 2011, **10**(1): 5~16
- 6 G. M. Kamath, R. Sundaram, N. Gupta *et al.*. Damage studies in composite structures for structural health monitoring using strain sensors[J]. *Structural Health Monitoring*, 2010, **9**(6): 497~512
- 7 B. Culshaw. *Smart Structures and Materials* [M]. London: Artech House Publishers, 1996. 2~3
- 8 Li Hongnan, Ren Liang. *Optical Fiber Grating Sensing Technology of Structural Health Monitoring* [M]. Beijing: China 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
- 9 Wang Yubao, Lan Haijun. Study of fiber Bragg grating sensor system based on wavelength-division multiplexing/time-division multiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2196~2201
王玉宝, 兰海军. 基于光纤布拉格光栅波/时分复用传感网络研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2196~2201
- 10 Dai Yongbo, Liu Yanju, Leng Jinsong *et al.*. A novel time-division multiplexing fiber Bragg grating sensor interrogator for structural health monitoring [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2009, **47**(10): 1028~1033
- 11 Zhang Huayong, Wang Dongning, Shi Qingping *et al.*. Optical intensity compensating method for time division multiplexing of fiber-optic hydrophone using a 3×3 coupler [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1105006
张华勇, 王东宁, 施清平等. 基于 3×3 耦合器的光纤水听器时分复用系统的光强补偿方法 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1105006
- 12 Y. J. Rao, A. B. Lobo Ribeiro, D. A. Jackson. Simultaneously spatial-time-and wavelength-division-multiplexed in-fiber Bragg grating sensor network[C]. *SPIE*, 1996, **2838**: 23~30
- 13 D. A. Jackson, A. B. Lobo Ribeiro, L. Reekie *et al.*. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(14): 1192~1194

栏目编辑: 何卓铭