

FBG 宏应变传感器的混凝土梁斜裂缝监测

庞香润¹, 王大鹏^{1,2}

¹苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215011;

²江苏省结构工程重点实验室, 江苏 苏州 215011

摘要 以桥梁健康监测为目的,利用自制标距的光纤布拉格光栅(FBG)宏应变传感器测量平均切应变,识别斜裂缝的出现。以长标距光纤布拉格光栅(FBG)传感器为测量元件,设计5组交叉拓扑,利用交叉拓扑理论对混凝土T型梁的不同部位进行了测量,分析了交叉拓扑覆盖范围内结构的平均切应变与荷载比例关系。结果表明,长标距FBG交叉拓扑的测量方法能够有效识别斜裂缝的出现与发展,在工程实际中具有较好的应用价值。

关键词 光纤光学; 健康监测; 平均切应变; 交叉拓扑; 斜裂缝; 长标距

中图分类号 TP212.9 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.120603

Oblique Crack Monitoring of Concrete Beam with Macro FBG Strain Sensor

Pang Xiangrun¹, Wang Dapeng^{1,2}

¹ College of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215011, China;

² Key Laboratory of Jiangsu Province on Structural Engineering, Suzhou, Jiangsu 215011, China

Abstract In order to meet the needs of bridge structure health monitoring, the home-made long-gauge fiber Bragg grating (FBG) macro strain sensor is used to measure average shear strain and identify occurrence of oblique cracks. The FBG is used as a measuring element and five couples of crossed topologies are designed. We use the cross topological theory to measure different parts of concrete T-beam, and analyze relationship between the average shear strain of the structure and load in crossed topological coverage. The experimental results show that the measuring method of the long-gauge FBG crossed topology is effective to identify occurrence and development of oblique cracks, and this method has good application value in engineering practice.

Key words fiber optics; health monitoring; average shear strain; crossed topology; oblique crack; long gauge

OCIS codes 060.3735; 130.6010; 050.2770

1 引言

在混凝土结构的桥梁服役中,许多跨中挠度大的薄腹板梁,其腹板区往往出现较大的斜裂缝。Leonhardt等^[1]对钢筋混凝土等截面梁的研究表明,斜裂缝影响下的剪切变形可达到弯曲变形的0.2~3.0倍;意大利学者Debernardi等^[2]对等截面混凝土薄腹板梁的测量结果也显示,斜裂缝出现后的剪切变形可达到总变形的1/4;东南大学吕志涛等^[3]经研究发现,斜裂缝对挠度的影响随着时间的延长不断增加。考虑到斜裂缝出现后会对混凝土桥梁结构线形造成较大影响,为保证结构在使用中的安全性与耐久性,需对结构的切应变与斜裂缝重点监测。以应变片为代表的老式传感器多为点式测量元件,对局部离散性能大的混凝土

收稿日期: 2017-07-07; **收到修改稿日期:** 2017-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(51308369)、建设部科研开发项目(2012-K8-18)、江苏省高校优秀中青年骨干教师境外研修计划

作者简介: 庞香润(1992—),男,硕士研究生,主要从事桥梁结构健康监测方面的研究。E-mail: 1805006742@qq.com

导师简介: 王大鹏(1979—),男,博士,副教授,主要从事桥梁结构健康监测方面的研究。

E-mail: wangdapeng@usts.edu.cn(通信联系人)

土材料构件不能准确地测量,也无法识别结构中裂缝的出现。因此需要测量范围大的新式传感器来完成这一工作。

光纤布拉格光栅(FBG)传感器作为一种新式传感器,除具有体积小、质量轻、抗电磁干扰、耐腐蚀等诸多优点外,更能实现对结构的准分布式测量,为大标距测量提供了可能。目前,国内外学者对光纤光栅传感器在土木工程中的应用做了大量的研究。1989年,Mendez等^[4]首先提出把光纤传感器用于混凝土结构的检测;Ferraro等^[5]探讨了FBG的原理、检测方法、应变和解决温度信号分离的办法;梁磊等^[6]讨论了光纤传感器与混凝土结构的相容性问题;查开德^[7]成功研制了用于大型结构应变测量的光纤传感器;田石柱等^[8]通过准分布FBG传感器完成了弯曲裂缝出现的识别与定位。在课题组先期研究的基础上^[9-13],本文利用自制标距的宏应变传感器,以交叉拓扑的布置方式测量静力加载下T型梁的平均切应变,并通过分析平均切应变识别斜裂缝的出现。

2 基本原理

2.1 FBG 传感原理

FBG传感器是一种波长调制型非线性作用的光纤传感器,通过对光的选择性传输,反映环境中物理量的变化。普通波长的光穿过FBG传感器栅区时,FBG和普通光纤一样,仅对光起传输作用;而波长为中心波长的光穿过栅区时,会被反射回来。中心波长由纤芯折射率和光栅周期决定。根据模耦合理论,中心波长与纤芯折射率以及光栅周期满足

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

式中 λ_B 为中心波长; n_{eff} 为纤芯折射率; Λ 为光栅周期。

当FBG传感器的外界环境发生变化时,纤芯折射率与光栅周期将发生改变,即光栅区反射光的波长将发生改变。利用这一特性,观察和记录反射光波长的变化,即可获得环境中一些物理量的变化。其中,FBG对温度和应变的感应最为灵敏,中心波长变量与温度、应变的变化关系满足^[14]

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

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

2.2 交叉拓扑结构

传统检测方法多以最可能出现损伤的理论位置作为传感器的布置位置,测得数据评估结构状态。但因损伤出现的随机性,不能获得实际结果。为了有效测量损伤部位,把结构划分为多个单元,并以FBG长标距传感器覆盖整个单元,获得单元的整体信息。传感器与结构单元组成的整体称为拓扑结构。

交叉拓扑可测结构的平均切应变。用FBG长标距传感器组成的交叉拓扑由2个交叉布置的传感器组成传感部分。2个传感器长度相同,所覆盖的宽度与高度也要求相同,布置方式同矩形的对角线。图1为交叉拓扑示意图,图中 θ_i 为单元*i*上传感器与水平线的夹角, V_i 为单元*i*上的剪力, γ_i 表示单元*i*在外力作用下产生的平均切应变。

根据2个传感器测得的数据以及传感器布置的夹角,可得平均切应变为^[15]

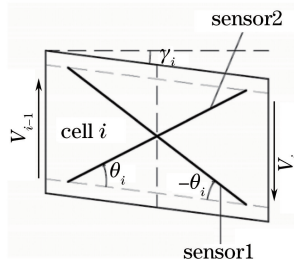


图1 交叉拓扑

Fig. 1 Crossed topology

$$\gamma_i = \frac{\epsilon_{i1} - \epsilon_{i2}}{2 \sin \theta_i \cos \theta_i}, \quad (3)$$

式中 ϵ_{i1} 和 ϵ_{i2} 分别表示单元 i 上 sensor1 和 sensor2 测得的平均应变。

3 实验方案

以千斤顶加载的方式进行静力实验,采用 5 组交叉拓扑测得弯剪区的平均切应变,识别斜裂缝的出现。

3.1 实验系统

实验系统由光纤光栅解调仪、反力架、油压千斤顶和计算机系统组成,实验现场见图 2,T 梁截面图见图 3。

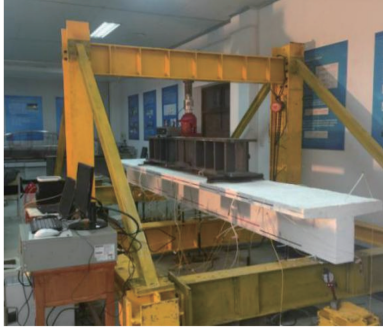


图 2 实验现场

Fig. 2 Scene of the experiment

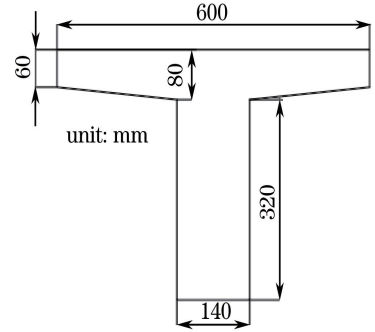


图 3 T 型梁截面

Fig. 3 Cross section of T-beam

3.2 传感器

采用表面黏贴的方式安装传感器对传感器的破坏较小,故在未进行封装的情况下直接使用型号为 SMF-28e 的裸光纤。同时,为方便黏贴光纤,对黏贴处用热缩管进行加工处理,增大接触面。实验共对 T 型梁腹板弯剪区的 5 个区域进行测量,组成 5 个交叉拓扑结构,拓扑均由 2 个传感器组成。其中,拓扑 1 的传感器标距为 40.8 cm;拓扑 2 的传感器标距为 46.6 cm;拓扑 3、4、5 的传感器标距均为 26.0 cm。拓扑 1 的两个传感器分别用 T11 和 T12 来表示,其他 4 个拓扑的传感器表示方式与此相同。经拉伸黏贴后的光纤光栅中心波长见表 1。

表 1 FBG 传感器中心波长

Table 1 Central wavelength of FBG sensors

Sensor	T11	T12	T21	T22	T31	T32	T41	T42	T51	T52
Central wavelength / nm	1542.8655	1558.0815	1565.2484	1540.7011	1558.6529	1561.8561	1531.9894	1522.1501	1540.9610	1525.8500

3.3 实验构件与传感器布置

实验构件按小构件模型设计,设计长度为 4.6 m、计算长度为 4 m 的 T 型简支梁。混凝土为 C40 混凝土,钢筋型号为 HRB335。T 型梁的横截面见图 3。距两端支座 40 cm 范围内的梁段布置 5 组传感器。拓扑 1 的 2 个传感器靠近左支座的梁段,关于中性轴对称,覆盖高度为 8 cm、宽度为 40 cm;拓扑 2 的 2 个传感器布置在拓扑 2 所在梁段另一面的腹板处,覆盖高度为 24 cm、宽度为 40 cm;靠近右支座梁段的腹板上布置高度 24 cm、宽度 10 cm 的拓扑 3、4、5,这 3 个拓扑之间的相互间距为 2.5 cm。传感器的布置见图 4。

3.4 加载方案

实验加载时,以 3 点加载的方式进行逐级加载,从空载状态开始,每 5 kN 加载一级,加至 100 kN。加载装置为油压千斤顶,通过压力传感器控制加载力的大小。每级加载完成后等待 5 min 记录数据。

4 实验数据分析及结果

实验中采集到的数据为反射光的波长,根据(2)式和(3)式即可获得交叉拓扑覆盖范围内结构的平均切

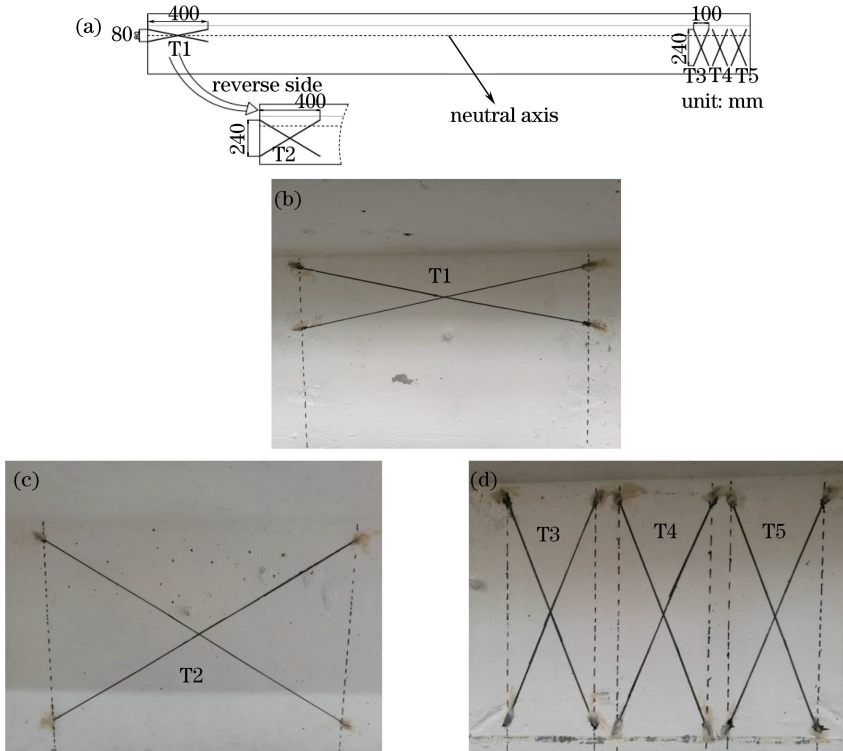


图4 传感器布置。(a)梁上位置;(b) T1;(c) T2;(d) T3、T4、T5

Fig. 4 Sensor placement. (a) Position on beam; (b) T1; (c) T2; (d) T3, T4, T5

应变。与传感器的表示方法类似,用字母加数字来表示拓扑号,例如 T1 表示拓扑 1。以平均切应变为纵坐标,加载荷载为横坐标,作荷载-应变曲线图,如图 5 所示。图 5 为 T1 和 T2 的荷载-应变曲线图。由图 5 可以看出,加载初期,T1 和 T2 的荷载与应变均呈线性关系,表明此时结构处于弹性状态。当加载到第 6 级荷载,即 60 kN 时,T2 曲线的斜率明显增大,此时在 T2 区域内发现斜裂缝,见图 6。T1 曲线斜率的突变出现在 80 kN 时,与实验中观察到的现象吻合(加载至 60 kN 时,距左支座 40 cm 的梁段,在中性轴下约 9 cm 处出现斜裂缝;加载至 80 kN 时,裂缝延伸至 T1 所覆盖区域)。表明长标距 FBG 传感器组成的交叉拓扑能够识别混凝土梁斜裂缝的出现,荷载-应变曲线的斜率突增即表明斜裂缝的出现。弹性阶段 T1 的应变大于 T2 的应变,符合理论力学中“切应变在中性轴达到最大,并随距离的增加而变小”的理论,表明交叉拓扑测量平均切应变的可行性。

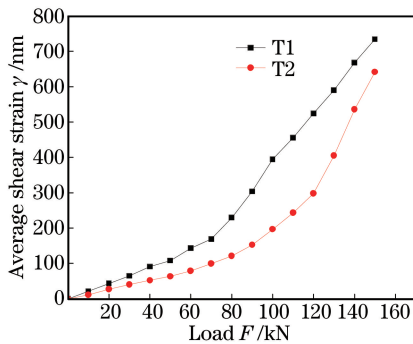


图5 T1 和 T2 荷载-应变曲线图

Fig. 5 Load-strain curves of T1 and T2



图6 斜裂缝

Fig. 6 Oblique crack

图 7 的 T3、T4 和 T5 荷载-应变曲线显示,处于弹性阶段时,3 个拓扑结构测得的平均切应变的值基本相同,与 3 点加载实验的实际情况相吻合。表明此方法测量平均切应变具有较高的可信性。3 条曲线斜率增大处的荷载与实验中裂缝出现时荷载相同,进一步证明交叉拓扑监测斜裂缝出现的可行性。

由图 5 和图 7 均可以看出,当裂缝出现以后,随着裂缝宽度不断变大,剪切变形的增长速度也增大,验证

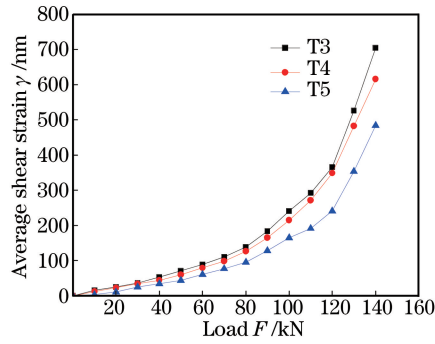


图7 T3、T4 和 T5 荷载-应变曲线

Fig. 7 Load-strain curves of T3, T4 and T5

了斜裂缝影响下的剪切变形在结构变形中占有较大比重。

5 分析与讨论

在实际工程中,由于桥梁结构所处环境较为恶劣,需对光纤传感器进行封装处理。根据前期车速识别的研究,置于跨中沿轴向布置的宏应变传感器在质量为 140 kg(即重力为 1.4 kN)的小车经过前后,传感器中心波长有接近 0.006 nm 的波动,应变变化接近 5 个微应变^[9]。经比较发现,经过封装的传感器并未因灵敏度的降低而丧失对应变的感知功能,能够满足实际工程中封装后光纤传感器对本研究方法的使用。封装后传感器见图 8,车速识别实验的中心波长时程曲线见图 9。



图8 封装后传感器

Fig. 8 Sensor after packaging

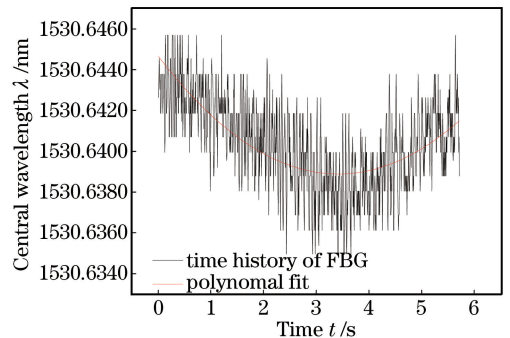


图9 中心波长时程曲线

Fig. 9 Time history curve of central wavelength

6 结论

针对斜裂缝对桥梁结构整体变形影响较大的实际情况,利用交叉拓扑理论通过长标距 FBG 传感器监测混凝土梁斜裂缝的出现,并进行了实验研究。结果表明,长标距 FBG 传感器测得的平均切应变值具有较高的可信度,能够反映弹性状态下应变与荷载比例关系;观察荷载-应变曲线的斜率变化,能够监测斜裂缝的出现与发展;斜裂缝出现以后,随着荷载等级的增大,剪切变形的增长速度也增大,说明斜裂缝对梁整体的变形影响较大。

参 考 文 献

- [1] Leonhardt F. The check of reinforced concrete structure crack and deformation[M]. Hu Xianzhang, Cheng Jigao, Transl. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1983.
F·莱昂哈特. 钢筋混凝土结构裂缝与变形的验算[M]. 胡贤章, 程积高, 译. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [2] Debernardi P G, Taliano M. Shear deformation in reinforced concrete beams with thin web[J]. Magazine of Concrete Research, 2006, 58(3): 157-172.
- [3] Lü Zhitao, Pan Zuanfeng. Instantaneous and long-term shear deformations of inclined crack concrete beams[J]. Journal

- of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(2): 1-9.
- 吕志涛, 潘钻峰. 斜向开裂混凝土梁的瞬时及长期剪切变形[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(2): 1-9.
- [4] Mendez A, Morse T F, Mendez F. Applications of embedded optical fiber sensors in reinforced concrete buildings and structures[C]. SPIE, 1989, 1170: 60-69.
- [5] Ferraro P, de Natale G. On the possible use of optical fiber Bragg gratings as strain sensors for geodynamical monitoring[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2002, 37(2/3): 115-130.
- [6] Liang Lei, Jiang Desheng, Sun Dongya. Study on compatibility of fiber optical sensor in construct of concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2000, 22(2): 11-14.
梁磊, 姜德生, 孙东亚. 光纤传感器在混凝土结构中的相容性研究[J]. 武汉工业大学学报, 2000, 22(2): 11-14.
- [7] Zha Kaide. Optical fiber sensor for use in strain measurement of large structures[J]. Chinese J Lasers, 1995, 22(10): 761-765.
查开德. 用于大型结构应变测量的光纤传感器[J]. 中国激光, 1995, 22(10): 761-765.
- [8] Tian Shizhu, Cao Changcheng, Wang Dapeng. Experimental study on fiber grating sensor monitoring the crack of concrete[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0114001.
田石柱, 曹长城, 王大鹏. 光纤光栅传感器监测混凝土简支梁裂缝的实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0114001.
- [9] Wang Dapeng, Pang Xiangrun, Tian Shizhu. Parametric identification of dynamic response based on long-gauge fiber Bragg grating arrays[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070602.
王大鹏, 庞香润, 田石柱. 基于长标距光纤布拉格光栅阵列动态响应的参数识别[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070602.
- [10] Qiu Weichen. Study on application of beam bridge monitoring based on the FBG macro strain sensing technology[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2016.
邱伟宸. 基于FBG宏应变传感技术的梁式桥监测应用研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2016.
- [11] Tian Shizhu, Wen Ke, Wang Dapeng. Study on damage detection based on long-gage fiber Bragg grating sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 010604.
田石柱, 温科, 王大鹏. 基于长标距FBG传感器宏应变技术的损伤识别研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 010604.
- [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] Tian Shizhu, Zhang Guoqing, Wang Dapeng. Study on strain transfer mechanism of surface fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805005.
田石柱, 张国庆, 王大鹏. 表面式光纤布拉格光栅传感器应变传递机理的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805005.
- [14] Moery W W, Meltz G, Glenn W H. Fiber optic Bragg grating sensors[C]. SPIE, 1989, 1169(98): 106.
- [15] Glišić B, Inaudi D. Fiber optic methods for structural health monitoring[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2008.