

文章编号: 1001-3806(2003)03-0233-03

光纤 Bragg 光栅监测钢筋混凝土结构应变的实验研究*

赵雪峰 田石柱 欧进萍 周 智

万里冰

(哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨, 150090)

(哈尔滨工业大学复合材料研究所, 哈尔滨, 150001)

摘要: 研究了光纤 Bragg 光栅在钢筋混凝土结构应变监测中的应用。对其应变、温度灵敏系数进行标定, 将其埋设在钢筋混凝土梁内, 实现对结构内部应变的监测, 并对其工作状态做出评价。实验结果与理论值、传统监测手段监测结果一致。研制出一种钢管封装 Bragg 光栅温度传感器监测温度, 对光纤 Bragg 光栅的应变与温度的同时测量进行了研究。

关键词: 光纤 Bragg 光栅; 监测; 钢筋混凝土结构; 温度传感器

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Research on strain monitoring of reinforced concrete structure using fiber Bragg grating

Zhao Xuefeng, Tian Shizhu, Ou Jinping, Zhou Zhi

(Department of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150090)

Wan Libing

(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

Abstract: The application of fiber Bragg grating (FBG) used in strain monitoring of reinforced concrete structure is studied. Strain coefficient and temperature coefficient were obtained. Static test of reinforced concrete beam equipped with FBG was done in order to study whose distinct sensing ability and monitor strains of the beam. A kind of steel tube packaged FBG was made to monitor the temperature only in order to study simultaneous measurement of strain and temperature.

Key words: fiber Bragg grating; monitoring; reinforced concrete structure; temperature sensor

引 言

大型土木工程结构和基础设施, 如桥梁、超高层建筑、大跨空间结构、大型水坝、核电站, 它们的使用期都长达几十年, 甚至上百年。在其服役过程中, 由于环境荷载作用、疲劳效应、腐蚀效应和材料老化等不利因素的影响, 结构不可避免地产生损伤累积、抗力减小, 甚至导致突发事件^[1]。如不能对结构的损伤做出及时、正确的评价, 就不能了解结构的健康状况, 做出正确的决断。一旦事故发生, 就会带来巨大的损失。近年来, 对于重要结构的健康监测越来越受到人们的重视。但是由于土木工程的大体积、施工工艺相对粗糙等特点与传统传感器性能之间的矛

盾使得这方面的发展受到了限制。目前, 对于钢筋混凝土梁应变的监测普遍采用电阻应变片, 将之布置在梁侧面及内部受力钢筋上, 该方法的缺点是应变片成活率低、工艺复杂、耐久性差、抗干扰性差。此外, 对于埋入的电阻应变片, 由于不能实现准分布, 测点的增加会导致大量的导线存在于结构内部从而改变基体材料性能。该监测手段已不适于长期、实时、在线的结构健康监测要求。光纤 Bragg 光栅是近些年来出现的一种新型传感元件。自从 1978 年含铬光纤光敏性被发现以及 1987 年紫外写入技术发明以来^[2,3], 光纤光栅受到了世界各国研究机构的广泛重视。通讯方面的应用极大地推动了光纤光栅技术的成熟。作为传感用的光纤光栅最初是应用于航空、航天等军事领域。它能测量很多物理量, 如应变、应力、温度、振动、压力等^[4]。1992 年, Rutgers 大学的 Prohaska^[5] 等人首次将光纤光栅埋入到混凝土结构中测量应变, 将之应用于土木工程中。同传统的传感器相比较, 光纤 Bragg 光栅有

* 哈尔滨工业大学跨学科交叉性研究基金资助项目。

作者简介: 赵雪峰, 男, 1977 年 8 月出生。博士研究生。现从事结构健康监测与诊断方面研究。

收稿日期: 2002-05-20; 收到修改稿日期: 2002-07-30

许多显著的特点,如寿命长、抗电磁干扰、便于构成准分布光纤传感网络、体积小、重量轻、结构简单、埋入后对基体材料性能影响小,等等。将之应用于土木工程结构中是非常理想的^[6]。近10年来,人们在这方面做了大量的研究工作,取得了一些令人满意的成果。光纤 Bragg 光栅已经成为替代传统应变计的传感器首选。作者将之埋入到钢筋混凝土梁中,进行应变监测的实验研究。

光纤 Bragg 光栅的工作原理是通过对其 Bragg 中心反射波长的测量实现对被测量的测量。Bragg 波长 λ_B 与光栅周期 Λ 、纤芯有效折射率 n_{eff} 满足如下关系:

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

Bragg 波长取决于光栅周期和光纤有效折射率,任何使这两个参量发生改变的物理过程都将引起光栅 Bragg 波长的漂移。通过对 Bragg 波长移动的检测,就可以得到被测参数。应变和温度是能够显著改变 Bragg 波长的物理量。当光栅受到外界应变作用时,光栅的拉伸会导致其周期变化,同时光弹效应会导致光栅折射率变化;当光栅受到外界温度影响时,由于材料热膨胀,会使其周期发生变化,同时折射率也会随着温度而变化。以上的变化将最终导致 Bragg 波长漂移。通过对应变的测量还可以实现对其它物理量的测量如:位移、振动、电磁场等。波长漂移与应变和温度的关系如下:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_B} = (1 - p_e) \Delta \varepsilon + (\alpha + \xi) \Delta T \quad (2)$$

式中, $\Delta \varepsilon$ 是轴向应变, ΔT 是温差, p_e 是有效弹光系数, α 和 ξ 分别是光纤的热膨胀系数和热光系数。波长的漂移与应变、温度的关系可以近似的表示为:

$$\Delta \lambda = K_\varepsilon \Delta \varepsilon + K_T \Delta T \quad (3)$$

式中, K_ε , K_T 分别为应变、温度灵敏系数。

1 温度与应变同时测量

光纤 Bragg 光栅的缺点是它对应变、温度交叉敏感,即应变和温度同时引起 Bragg 波长的漂移。这种交叉敏感效应严重地限制了其应用。作者研制出一种钢管封装光纤 Bragg 光栅温度传感器,将之布置在光纤 Bragg 光栅附近,实现对温度与应变的同时测量,从而实现温度补偿。该方法适用于温度分布均匀的结构,否则会有误差产生。

封装工艺原理是将光纤 Bragg 光栅与应变隔绝,使之只能感受到环境温度变化。制作方法是将光栅用长 10cm, 外径 1.2mm, 内径 0.8mm 的钢管套装,用环氧树脂将钢管与传输段光纤粘结在一起,

使光栅的一端固定,一端自由,最后将套管的另一端密封,见图 1。应该注意两个问题:(1) 光栅不能同套管粘贴在一起;(2) 保证两端密封完全,否则可能进水产生干扰,如结冰。该传感器对应变无响应,其温度灵敏系数经标定与光纤 Bragg 光栅一致,经标定 $K_T = 5.71 \times 10^{-6} \mu\text{e}^{-1} (9\text{pm}/^\circ\text{C})$ 。

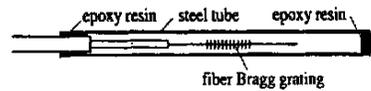


Fig. 1 FBG temperature sensor with steel tube jacket

2 实 验

2.1 实验装置

试验中 Bragg 波长测量采用美国 Micro Optics 公司生产的集成解调系统 FBG IS, 波长检测分辨率为 1pm, 精度 5pm, 扫描频率为 50Hz, FBG-IS 系统集成了波长范围为 1528nm~1568nm 的宽带光源,可以同时检测 32 路光信号,通过数据采集卡和计算机通讯,由计算机软件系统自动记录波长的变化。钢筋混凝土试验梁为适筋梁(1600mm × 200mm × 120mm),其中混凝土材料设计强度为 C20,利用标准搅拌方法,经 60d 标准养护制成,其水灰比为 0.3。粗骨料为石子,其最大粒径为 2cm。坍落度在 7cm~9cm 之间。纵向受拉钢筋为 II 级热轧变形钢筋,其横截面为月牙型。

作者对同一批生产的 Bragg 波长分别为 1548nm 和 1554nm 的光纤 Bragg 光栅进行了标定。采用钢板法、等强度梁法两种方案对光纤 Bragg 光栅应变灵敏系数进行标定。利用水浴方法对光纤 Bragg 光栅温度灵敏系数进行标定。从图 2 中可以看到应变、温度与 Bragg 波长之间具有非常好的线性关系。试验中利用的光栅灵敏系数取各光栅平均值,应变灵敏系数 K_ε 为 $8.13 \times 10^{-7} \mu\text{e}^{-1}$, 温度灵敏系数 K_T 为 $5.71 \times 10^{-6} \mu\text{e}^{-1}$ 。

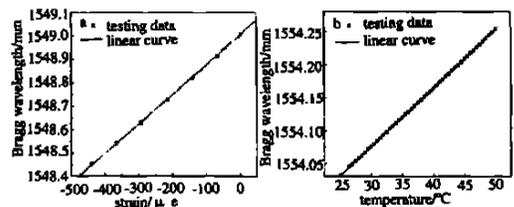


Fig. 2 Relationship between Bragg wavelength and strain or temperature

a—relationship of λ_B and strain

b—relationship of λ_B and temperature

2.2 传感器布置

将光栅温度传感器埋在光纤 Bragg 光栅附近试验梁受压区混凝土内。将光纤 Bragg 光栅粘贴在试验梁纯弯段受拉钢筋筋根处,距梁中线 10cm。由于裸光栅非常纤细,直径约为 $125\mu\text{m}$,质地脆,为保证光栅成活,应同时充分感受基体应变。在多次试验的基础上,采用如下布置工艺:打磨 \rightarrow 丙酮清洗 \rightarrow 502 胶粘贴 \rightarrow 环氧树脂保护。

光栅与传输段光纤焊点处利用热缩管进行保护。在混凝土浇注过程中,对于传输段光纤的保护与光栅同样重要。将传输段光纤预先绑定在钢筋架外侧避免与振捣棒接触,自模具上方引出,可以有效保证光纤在振捣棒强烈振动下的成活。用塑料袋保护光纤接头,避免与施工现场粉尘、水泥浆的接触。

将电阻应变片沿截面高度粘贴在试验梁表面监测梁的开裂,以比较光纤 Bragg 光栅监测结果。试验梁构造、传感器布置及保护如图 3 所示。

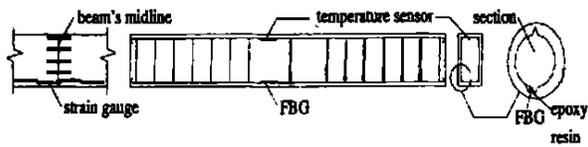


Fig. 3 Sensor mounting scheme of experimental beam

2.3 实验

利用三分点加载方法对试验梁进行以 3kN 为步长的分级加载直至试验梁破坏,试验系统如图 4。由梁弯矩图可知在两个加载点之间弯矩相等,该区域内受拉钢筋应变近似相等。

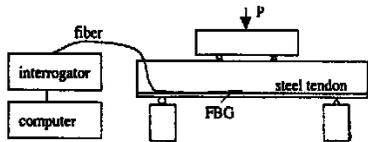


Fig. 4 Experiment setup

2.4 数据处理

试验数据显示,试验过程中温度传感器最大 Bragg 波长波动为 2pm ,相当于 0.2°C 。可见环境温度变化非常小,其干扰可以忽略不计。这是由于实验时间较短,温度波动小。实际监测中时间跨度大,自然环境中结构的日、年温度波动很大,最高可达到 60°C 左右。对应变监测产生的干扰非常大,必需考虑温度影响。

混凝土极限拉应变约为 $1500\mu\epsilon$,极限压应变为 $3300\mu\epsilon$ 。2 级热轧钢筋屈服应变为 $1700\mu\epsilon$ 。经理论

计算,钢筋混凝土试验梁开裂荷载为 $P_{cr}=15.7\text{kN}$,极限荷载为 $P_m=63.1\text{kN}$ 。根据试验梁的开裂点和纵向受拉钢筋的屈服点可以划分试验梁的工作阶段。即试验梁开裂之前为弹性工作阶段,开裂后到钢筋屈服之前为开裂工作阶段,随着钢筋的屈服,梁也随之破坏。通过光纤 Bragg 光栅测量的纵向受拉钢筋应变可以大致对梁的工作阶段作出评价。

图 5 为试验中光纤 Bragg 光栅监测结果。图中竖向平行的两根实线,分别表示试验梁 90% 开裂应变值与钢筋屈服应变值 90%。位于两条实线右侧的第 1 个点(A 点、B 点),分别为试验梁的开裂点与破坏点。与其对应的纵坐标值即为开裂荷载及钢筋屈服荷载。这样可以将整个试验梁的应变-荷载曲线划分为 3 个部分:第 1 部分为弹性阶段、第 2 部分为弹塑性阶段、第 3 部分为下降阶段。作者监测到试验梁的开裂荷载为 15kN ,同应变片监测值一致,与理论值相符。一般实际工程监测中,弹性阶段为结构正常使用阶段,通过监测值即可评价结构的工作状态,对可能发生的事进行预测。

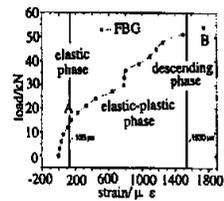


Fig. 5 Monitoring result of strain during experiment

3 结论

将光纤 Bragg 光栅埋入到钢筋混凝土梁中,进行静载试验,测量拉区钢筋应变,在此基础上对试验梁工作状态作出正确评价,并实现温度与应变的同时测量。监测结果与应变片监测结果、理论值吻合。将对光纤 Bragg 光栅应用于土木工程结构进行了有意义的探索。

参考文献

- [1] 欧进萍. 走上 21 世纪的中国力学——中国科协第 9 次“青年科学家论坛”. 北京: 清华大学出版社, 1996: 179~ 189.
- [2] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C. A P L, 1978, 32(6): 647~ 649.
- [3] Meltz G, Morey W M, Glenn W H. Opt Lett, 1989, 14(15): 823~ 825.
- [4] Kersey A D, J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1441~ 1462.
- [5] Prohaska J D. SPIE, 1992, 1798: 286~ 294.
- [6] Fuhr P L. SPIE, 1995, 2574: 6~ 13.