

文章编号 1004-924X(2014)02-0325-06

# 基于背向 Brillouin 散射监测混凝土应变

李 川\*, 刘 江, 庄君刚, 闫思安, 赵振刚

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650051)

**摘要:**采用贴附法将一根玻璃纤维增强塑料(GFRP)单芯应变传感光缆埋设于钢筋混凝土试件的中间部位,对混凝土内部应变进行分布式测量。考虑在温度和外加应变的作用下,光纤中的背向布里渊(Brillouin)散射光将发生频移,使用光时域反射仪(OTDR)对反射光信号进行了分析。研究了混凝土凝固过程中应变的变化,结果表明:混凝土试件浇筑完成当天应变变化明显,应变变化趋势与试件内部温度相似,试件内部应变主要受水泥水化热的影响。试件凝固后,通过外力作用使得混凝土试件在纵向中心轴上产生平均宽度为 6 mm 的裂缝。检测裂缝出现前后试件的应变变化,发现裂缝出现后试件内部应变明显变大,共发现 3 个应变峰值。通过应变峰值位置的分析,可判断裂缝的出现位置与方向。实验显示,利用背向 Brillouin 散射的分布式应变检测技术可较好地实现混凝土应变的分布式测量。

**关键词:**背向 Brillouin 散射;混凝土;应力检测;玻璃纤维增强塑料;应变传感光缆

**中图分类号:**O348.1;TU317.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142202.0325

## Strain detection of concrete structures based on Brillouin backscattering

LI Chuan\*, LIU Jiang, ZHUANG Jun-gang, YAN Si-an, ZHAO Zhen-gang

(School of Information Engineering and Automation, Kunming  
University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

\* Corresponding author, E-mail: boatriver@eyou.com

**Abstract:** One Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) single core strain sensing cable is buried in a concrete specimen to measure the strain distribution. As the Brillouin backscattering center frequency will shift on the basis of effects of temperature and strain, the reflection signals are analyzed by an Optical Time Domain Reflectometer (OTDR). The strain variation in the solidification process of concrete is investigated. The strain monitoring results indicate that the strain variation is very obvious at the day when concrete pouring is completed. The trend of strain variation is similar as the temperature variation, which indicates that the strain variation of the concrete specimen during the concrete solidification process is mainly caused by the heat of concrete hydration. After the concrete solidification, a crack with an average width of 6 mm is appeared on the longitudinal center line of the concrete specimen by the external force. The strain variation is measured before and after the cracks appear, the results demonstrate that the strain variation is visibly improved after the crack, and there are three

收稿日期:2013-06-17;修订日期:2013-07-19.

基金项目:云南省应用基础研究计划资助项目(No. 2013FZ021);昆明理工大学人才培养基金资助项目(No. KKS201303044)

strain peaks in the specimen. By analysis of the strain peak position, the position and direction of the crack can be obtained. Thus, based on the Brillouin backscattering strain detecting technology, the distributed measurement of the concrete strain has been realized.

**Key words:** Brillouin backscattering; concrete structure; strain detection; Glass Fiber Reinforced Plastic(GFRP); strain sensing cable

## 1 引言

混凝土是当今世界建筑中使用最广泛的建筑材料之一。在使用过程中,一旦应变超过混凝土所能承受的最大应变,混凝土的结构特性就会发生改变,从而影响建筑物的稳定性<sup>[1-2]</sup>。混凝土凝固过程是一个伴随着形变和热量释放的过程,极易因为水泥水化热、基底沉陷不均、环境温度变化等因素而产生结构应变,甚至出现裂缝。裂缝是影响混凝土建筑安全的主要原因,因此,如何迅速、准确地检测出裂缝及其发展状态,对建筑物的安全起着至关重要的作用。从凝固开始就需要对混凝土的应变进行监测<sup>[3]</sup>。目前,常应用于混凝土应变检测的方法有人工现场测定法和点式传感检测法<sup>[4]</sup>。但此类方法存在检测误差大、易受周围电磁场干扰、寿命短、容易漏检等缺陷。分布式光纤检测技术更适合于混凝土裂缝的实时监测<sup>[5]</sup>。光时域反射技术(Optical Time Domain Reflect, OTDR)虽然是分布式检测技术的一种,但是该技术只能检测距离和光纤沿线损耗,无法获得混凝土结构的应变和温度参量。这是由于混凝土内部应变分布具有随机性,出现裂缝的具体位置也是随机的,常规的单点式应力传感器难以满足该测量要求。本文将一根加固的玻璃钢(Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP)单芯应变传感光缆埋设在钢筋混凝土试件中,利用 Brillouin OTDR 分布式检测技术对混凝土凝固养护过程中的温度、裂缝进行检测,并分析了试件凝固后在外力作用下产生裂缝时的应变变化。

## 2 基于应力光缆的分布式 Brillouin OTDR 测量原理

GFRP 型单芯分布式传感光缆属于特种光缆,具有抗拉抗压、强度高的特点,特别适用于复

杂的施工环境,其结构如图 1 所示。

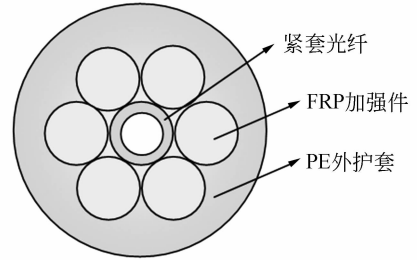


图 1 GFRP 型单芯分布式传感光缆截面示意图

Fig. 1 Sectional view of GFRP type single-core distributed sensing cable

在光纤内,入射光通过电致伸缩产生声波,然后引起介质折射率的周期性调制。这种折射率光栅通过布拉格衍射散射泵浦光,由于多普勒位移与以声速  $v_a$  移动的光栅有关,散射光将产生频率下移。在单模光纤中, Brillouin 频移  $\nu_B$  可表示为<sup>[6]</sup>:

$$\nu_B = \frac{2nv_a}{\lambda}, \quad (1)$$

式中:  $n$  为光纤的有效折射率,  $\lambda$  为入射光在自由空间中的波长,声速  $v_a$  表示<sup>[7]</sup>为:

$$v_a = \sqrt{\frac{(1-\kappa)E}{(1+\kappa)(1-2\kappa)\rho}}, \quad (2)$$

其中:  $E$ ,  $\kappa$  和  $\rho$  分别为光纤的杨氏模量、泊松比和密度。在光纤中, Brillouin 频移会随应变和温度而发生变化<sup>[8]</sup>:

$$\Delta\nu_B = C_1 \frac{\partial\nu_B}{\partial\varepsilon} \varepsilon + C_2 \frac{\partial\nu_B}{\partial t} \Delta t, \quad (3)$$

式中:  $\Delta\nu_B$  为布里渊频移变化量,  $C_1$  为 GFRP 型单芯分布式传感光缆的应变影响参数,  $\frac{\partial\nu_B}{\partial\varepsilon} \approx 49.3$  kHz/ $\mu\varepsilon$  为光纤应变敏感系数,  $\varepsilon$  为光纤所受应变,  $C_2$  为 GFRP 型单芯分布式传感光缆的温度影响参数,  $\frac{\partial\nu_B}{\partial t} \approx 1.2$  MHz/ $^{\circ}\text{C}$  为光纤温度敏感系数,  $\Delta t$  为温度变化量。

再根据 Brillouin 散射光回到光源起始点的时间  $t$ , 由:

$$z = \frac{ct}{2n}, \quad (4)$$

可以得到沿光纤各点发生形变量的位置<sup>[9-12]</sup>。式(4)中,  $c$  为真空中的光速,  $t$  为发出脉冲光到接收散射光的时间间隔。

### 3 传感光缆的测试

常温下, 采用直拉式方法, 通过逐级加载砝码对传感光缆进行应变分析, 如图 2 所示。

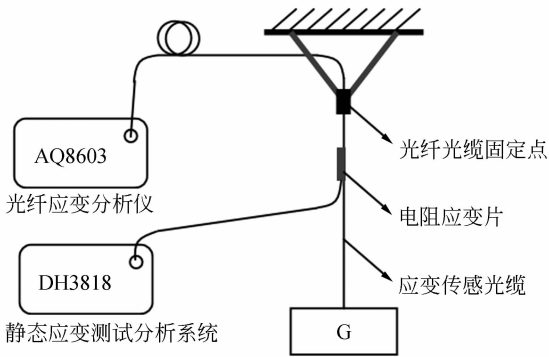


图 2 GFRP 型单芯分布式传感光缆测试示意图

Fig. 2 Testing of GFRP type single-core distributed sensing cable

使用 AQ8603 光纤应变分析仪测量传感光缆频移。利用电阻应变片分析传感光缆的应变量, 得到布里渊频移量随应变变化的曲线, 如图 3 所示。

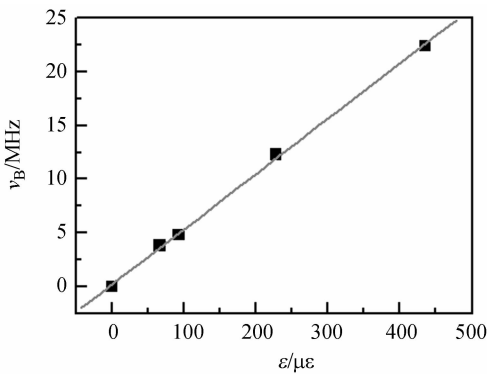


图 3 布里渊频移量随应变变化的曲线

Fig. 3 Variation of Brillouin frequency shift amount with strain

对测得的频移量随应变变化曲线进行线性拟合, 得到应变系数  $C_1 \frac{\partial \nu_B}{\partial \epsilon}$  约为 51.27 kHz/ $\mu\epsilon$ , 影响参数  $C_1$  为 1.04, 非线性误差为 2.7%。

采用恒温油槽测量传感光缆的温度特性, 温度为 25~55 °C, 频移量随温度变化的曲线如图 4 所示。

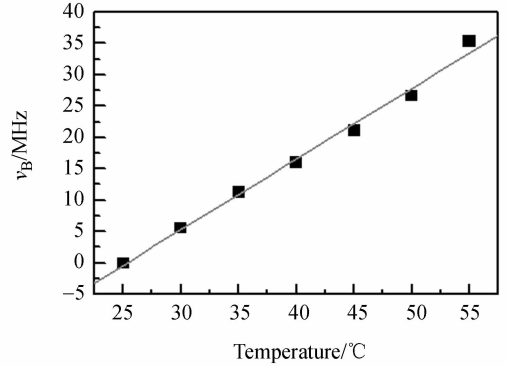


图 4 布里渊频移量随温度变化曲线

Fig. 4 Variation of Brillouin frequency shift amount with temperature

对图 4 中数据进行拟合, 得到 GFRP 单芯分布式传感光缆的温度系数  $C_2 \frac{\partial \nu_B}{\partial t}$  约为 1.116 MHz/°C, 温度影响参数  $C_2$  为 0.93, 非线性误差为 6.3%。

### 4 传感光缆的布设

钢筋混凝土试件长 3.3 m, 宽 1.5 m, 高 0.15 m。其中, 钢筋纵横交错分布。在混凝土试件的纵向中心轴附近将横向钢筋断开 10 cm 左右, 使

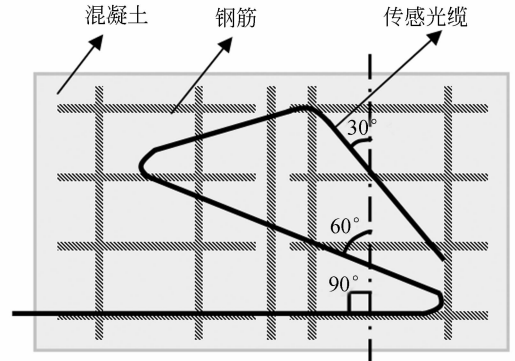


图 5 GFRP 单芯应变传感光缆布设线路示意图

Fig. 5 Layout of GFRP single fiber strain sensing circuit

钢筋混凝土试件能够在外力作用下产生纵向中心轴方向上的裂缝。GFRP 单芯传感光缆与纵向钢筋分别成  $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ , 埋设于混凝土试件的内部, 埋设长度为 10 m, 布线线路如图 5 所示。

## 5 混凝土凝固过程应变监测

混凝土凝固过程的应变监测是混凝土工程安全监测的重要内容, 混凝土水化热过程及自身重力等因素都可能使混凝土内部产生应变。一般在混凝土凝固保养期间对钢筋混凝土试件进行应变监测<sup>[13-14]</sup>。混凝土试件浇筑当天, 应变传感光缆的监测曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 混凝土试件浇筑当天的应变变化较大, 应变变化量为  $520 \sim 2\,200 \mu\epsilon$ 。当天 12:00~16:00 试件内部应变较大, 14:00 时应变达到最大, 为  $7\,400 \mu\epsilon$ 。

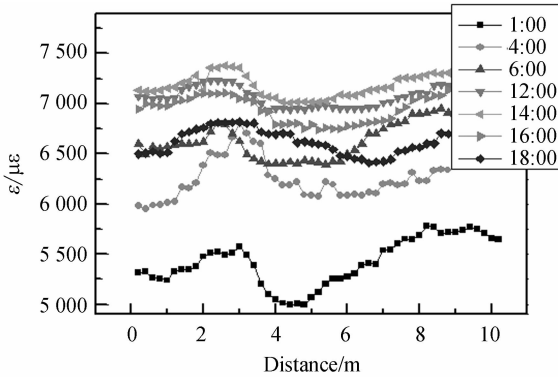


图 6 混凝土试件浇筑当天的应变监测结果

Fig. 6 Results for concrete specimen strain monitoring on pouring day

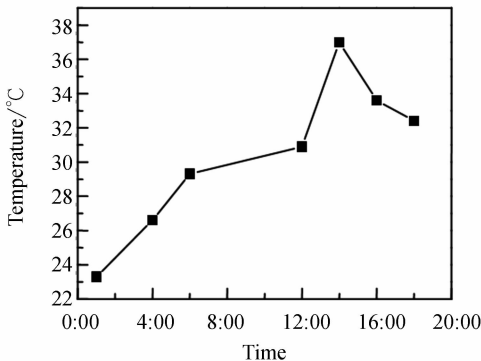


图 7 浇筑当天混凝土试件内部温度曲线

Fig. 7 Internal temperature curve of concrete specimens on pouring day

混凝土试件浇筑后, 在水泥水化热的影响下试件将产生温度变化。混凝土试件浇筑当天的内部温度曲线如图 7 所示。混凝土试件浇筑当天的内部温度在  $23.3 \sim 36.7^\circ\text{C}$ , 14:00 时温度最高为  $36.7^\circ\text{C}$ 。由图 6、图 7 可知, 试件内部应变与温度具有相似的变化趋势, 试件内部应变主要受水泥水化热的影响。

## 6 混凝土裂缝过程应变监测

为分析试件产生裂缝时内部应力的变化情况, 采用重锤敲击方式使混凝土试件在纵向中心轴向部位产生裂缝, 裂缝的平均宽度为 6 mm, 如图 8 所示。



图 8 混凝土产生裂缝的照片

Fig. 8 Photo of concrete cracks

在混凝土试件受外力作用形成裂缝前后, 混凝土试件内部应变的监测结果如图 9 所示。裂缝发生后, 试件内部应变明显变大, 且在 A:4.0 m、B:7.2 m 和 C:9.6 m 位置处分别出现 3 个应变峰值。

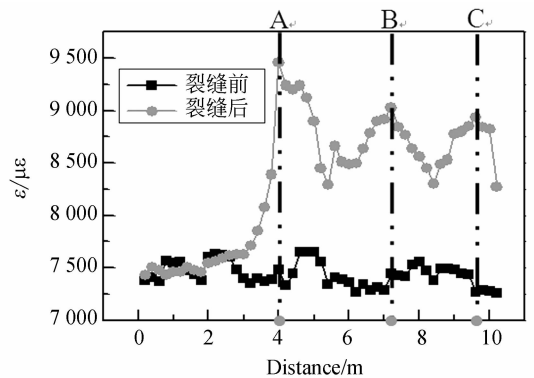


图 9 裂缝前后应变监测结果

Fig. 9 Monitoring results of fracture strain before and after crackings

根据应变峰值在 GFRP 单芯应变传感光缆上的位置以及传感光缆在试件中的布设方式可以近似确定试件裂缝的位置与方向。通过分析混凝土出现裂缝的位移与传感光缆所测得的数据,该实验所产生的裂缝与传感光缆所测得的实验数据趋势一致。通过分析实验数据得出,基于 Brillouin 散射的 OTDR 测量方法对混凝土裂缝位置的分辨率为 5 cm,裂缝与传感光缆成  $90^\circ$  时产生的应变要大于角度小于  $90^\circ$  时产生的应变值,以此来推测裂缝出现的位置。图 10 所示为应变峰值所对应的试件位置。

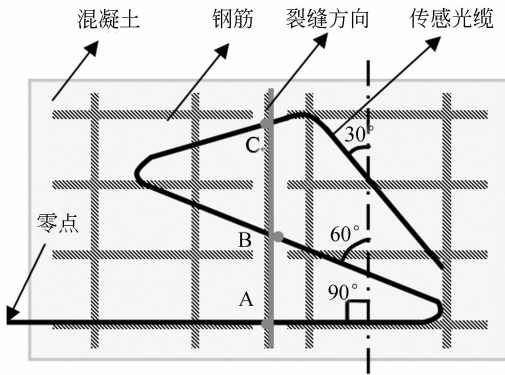


图 10 应变峰值处所对应的试件位置

Fig. 10 Locations of peak strains on candidate concrete

图 10 中,点 A,B,C 分别代表应变峰值所对应的位置。本文以光缆的最右端为零点,由图可见,确定裂缝方向与试件受外力作用形成的裂缝较为吻合。根据各峰值点的位置连线可近似得到裂缝的位置与方向。

## 7 结 论

本文使用 GFRP 单芯应变传感光缆检测混凝土内部应变的分布情况,并使用 OTDR 分析反射光信号,研究了混凝土凝固时的应变变化情况。结果表明,混凝土试件在浇筑当天的应变变化较大,变化量为  $520 \sim 2\,200 \mu\epsilon$ ,同时检测了试件内部温度随时间的变化规律,发现试件内部应变与温度具有相似的变化趋势,由此判断凝固过程中试件内部应变主要受水泥水化热的作用。分析了试件受应力出现裂缝前后的应变分布情况,发现出现裂缝后试件的内部应变明显变大,并在 4.0, 7.2, 9.6 m 的位置出现 3 个应变峰值,根据该峰值位置与传感光缆在试件中的布设情况可近似得到裂缝的位置与方向。该方法不仅可以用来分析混凝土凝固过程的应力变化情况,还可用来判断混凝土结构使用过程中裂缝的产生,并确定裂缝的位置与方向。

## 参考文献:

- [1] 混凝土研究协会. 混凝土裂缝检测、控制与修补新技术应用手册 [M]. 北京:中国科技文化出版社, 2005.  
Concrete Research Association. *Concrete Crack Detection, Control and Repair Manual Application of New Technologies* [M]. Beijing: China Science and Technology Culture Press, 2005. (in Chinese)
- [2] NEVILLE A M. *Properties of Concrete* [M]. Pearson Education; Longman Scientific and Technical, 1995.
- [3] WU Z S, XU B, TAKAHASHI T, *et al.*. Performance of a BOTDR optical fibre sensing technique for crack detection in concrete structures [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2008, 4(4): 311.
- [4] VIDAL T, CASTEL A, FRANCOIS R. Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34: 165-174.
- [5] 丁睿,刘浩吾. 分布式光纤传感技术在裂缝检测中的应用[J]. 西南交通大学学报, 2003, 22(1): 70-72.  
DING R, LIU H W. Application of distributed optical fiber sensing technique to detection of cracks in concrete [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2003, 22(1): 70-72. (in Chinese)
- [6] AGRAWAL G P. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. Boston: Academic Press, 2001: 196.
- [7] LI CH, SUN Y, ZHAO Y G, *et al.*. Monitoring pressure and thermal strain in the second lining of a tunnel with a Brillouin OTDR [J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15: 107-110.
- [8] HORIGUCHI T, KURASHIMA T, KOYAMADA Y K. Measurement of temperature and strain distribution by Brillouin frequency shift in silica optical fibers [J]. *SPIE*, 1993, 1797: 2-13.
- [9] HORIGUCHI T, SHIMIZU K, KURASHIMA T, *et al.*. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering [J]. *Journal of*

- Lightwave Technology*, 1995, 13(7): 1296-1302.
- [10] HORIGUCHI T, ROGERS A, MICHIE W C, *et al.*. Distributes sensors; recent developments optical fiber sensors: applications, analysis, and future trends [J]. *Norwood: Artech House*, 4:309.
- [11] 朱灵, 陈明星, 方杰, 等. 光纤傅里叶变化光谱术在光纤光栅传感解调中的应用[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(12):2537-2542.
- ZHU L, CHEN M X, FANG J, *et al.*. Optical fiber fourier spectroscopy with changes in the application of FBG demodulation optical precision engineering[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2537-2542. (in Chinese)
- [12] 王志斌, 史国华, 何益, 等. 光学想干层析技术在光学表面间距测量中的应用[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7):1469-1474.
- WANG ZH B, SHI G H, HE Y, *et al.*. Optical want chromatography technology application in the optical surface distance meas urement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7):1469-1474. (in Chinese)
- [13] MIHAIL P. Experimental detection of damage evolution in concrete under multiaxial compression [J]. *Journal of Engineering Mechanics-Asce*, 2013, 139(5):618-628.
- [14] 金伟良, 毛江鸿, 何勇. 混凝土内部应变分布式光纤实时检测方法及其试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(1):1-6.
- JIN W L, MAO J H, HE Y. Experimental analysis on real-time distributed strain measurement in concrete [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2011, 33(1):1-6. (in Chinese)

#### 作者简介:



李 川(1971—),男,博士,教授,2002年于天津大学获得博士学位,主要从事光纤传感器的研究和应用。E-mail: boatrivier@eyou.com



刘 江(1988—),男,陕西安塞人,硕士研究生,2011年于西北工业大学明德学院获得学士学位,主要从事光纤传感技术及土木结构力学检测的研究。E-mail:lj15091536625@126.com

(本栏目编辑:曹 金)  
(版权所有 未经许可 不得转载)