

分布式光纤传感器用于桥梁和路面的健康监测^{*}

高俊启¹, 施 斌¹, 张 巍¹, 柯敏勇², 刘海祥², 张 丹¹

(1. 南京大学光电传感工程监测中心, 南京 210093; 2. 南京水利科学研究院, 南京 210029)

摘要: 介绍了两类先进的分布式光纤传感器技术,即光纤光栅(FBG)和布里渊光时域反射计(BOTDR);分别在 T 型 RC 简支梁和连续配筋混凝土路面(CRCP)中布置了 FBG 和 BOTDR 分布式光纤传感系统,对简支梁混凝土动、静应变以及路面板中连续钢筋和混凝土应变进行了实时监测。研究结果表明,FBG 和 BOTDR 在桥梁和路面等一些土木工程结构的健康监测中具有重要的应用前景。

关键词: 分布式光纤传感器; FBG; BOTDR; 结构健康监测

中图分类号: TP212 TU311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 2132(2005)01 0014 06

0 前言

交通运输是一个国家的经济命脉,高速公路和桥梁的建设,对国民经济的发展有着重大影响。至 2005 年,中国公路总里程将达到 160×10^4 km,其中高速公路超过 2.5×10^4 km,同时,我国现有主要公路桥 5 000 余座,铁路公路隧道接近 400 座,但仍不能满足交通运输上的需要,随着我国现代化建设中能源、交通及资源的重点开发,公路工程建设必将有一个较大的发展。在自然因素和交通荷载长期作用下,公路路面结构的使用性能不断衰减,现有桥梁中有 1 500 余座存在结构性缺陷、不同程度的损伤和功能性失效的隐患,如果对高速公路、桥梁等交通基础设施养护维修不力,必然会影响交通网络功能的发挥,给国民经济活动带来损失。因此,进行定期检测,是维护我国交通基础设施安全的一道保障。

长期以来,对于交通基础设施的安全检测一直以人工方法为主。人们或是定期进行检查以实现长期检测,或是在出现特殊情况(发现结构破坏)时再进行检测评估,人工检测需要大量的人力和物力。因此,有必要建立桥梁、道路等一些基础设施的无损健康监测系统。

光纤布喇格光栅(Fiber optic Bragg Grating, FBG)传感技术和布里渊光时域反射计(Brillouin Optical time Domain Reflectometry, BOTDR)传感技术,是国际上近几年才研发成熟的两项无损检测

新技术^[1~3]。它们与传统的电测传感器相比具有如下优越性能:分布式、长距离、实时性、精度高和耐久性长,能做到对大型基础设施进行远程监测和监控。将 FBG 和 BOTDR 这两项分布式光纤传感技术应用于桥梁和道路工程的健康监测具有重要的意义。本文着重介绍 FBG 和 BOTDR 光纤应变监测技术在桥梁和路面中的试验及应用研究。

1 分布式光纤传感技术简介

1.1 分布式光纤传感技术

分布式光纤传感技术是指分布在同一根传输光纤上的多个传感单元只通过一个通道实现对其测试信号的采集,这种技术的最大优点在于减少了测试数据采集设备所需的通道数量,从而降低了测试成本,并能够实现对待测物理量的分布(准分布式)场值的测量。虽然目前光纤传感技术的种类多达上百种,但是分布式光纤传感技术不超过 5 种,FBG 传感技术与 BOTDR 传感技术是其中最具代表性的两种,下面简要介绍这两种分布式传感技术的基本原理,并针对它们在桥梁与道路结构测试中的适用性,开展相应的实验研究。

1.2 FBG 传感技术基本原理

光纤光栅分布在光纤体内,可由紫外光对光纤侧面进行曝光,使纤芯的折射率沿轴向呈现出周期性

^{*} 收稿日期: 2004 10 10; 修回日期: 2004 11 12
基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(40225006); 国家教育部重点项目资助(01086)
作者简介: 高俊启(1973),男,博士研究生。主要从事分布式光纤传感技术的工程应用研究。

Email: junqii_gao@sina.com

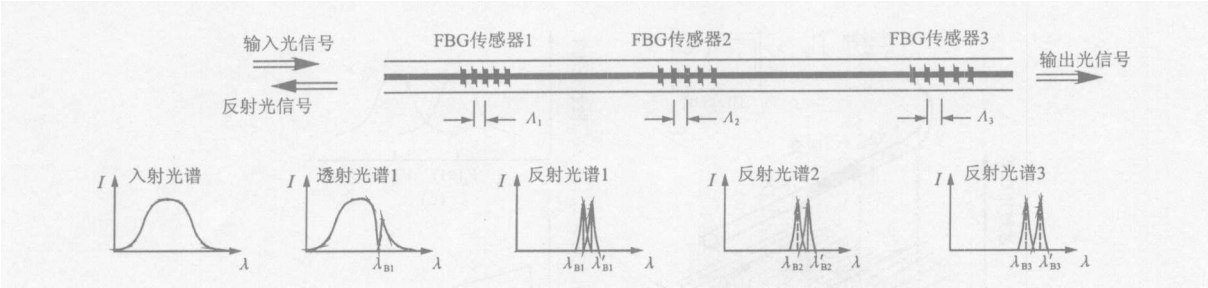


图 1 FBG 分布式测量原理图
Fig. 1 Measuring principle of FBG

分布而得到。

FBG 传感器分布在光纤纤芯的一小段范围内，它的折射率沿光纤轴线发生周期性变化，如图 1 所示，图中纤芯的明暗变化代表了折射率的周期变化^[4]。当光纤入射光波的波长 λ 满足布喇格衍射条件时

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Delta \tag{1}$$

式中 λ_B 为布喇格波长；

n_{eff} 为有效纤芯的折射率；

Δ 为布喇格传感器光栅的栅距。

则该波长的光波将沿来路发生反射，该反射光就是布喇格反射光。当使用一个宽带光源从 FBG 一端入射，则波长满足式(1)的光波就会发生布喇格反射，而其余波长的光波仍然照常传播。

当光栅所在处的光纤产生轴向应变 ϵ 时，栅距 Δ 变为 Δ'

$$\Delta' = \Delta(1 + \epsilon) \tag{2}$$

此时布喇格波长 λ_B 产生相应的变化 $\Delta\lambda$ 满足

$$\Delta\lambda/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon \tag{3}$$

式中 P_e 为有效光弹系数，其值约为 0.22。

温度变化会引起光纤折射率的变化，同时也会引起栅距的变化，当温度变化为 ΔT 时，将引起布喇格波长 λ_B 产生移动 $\Delta\lambda$ ，可以表示为

$$\Delta\lambda/\lambda_B = (\alpha + \zeta)\Delta T \tag{4}$$

式中 α 为光纤的热膨胀系数，其值为 0.55×10^{-6} ；

ζ 为光纤的热光系数，其值为 8.3×10^{-6} 。

由(3)、(4)两式得到应变 ϵ 与温度变化 ΔT 时所引起的波长移动 $\Delta\lambda$

$$\Delta\lambda/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T \tag{5}$$

用于结构监测时，FBG 传感器的最大优势是可以实现应力与温度的准分布式测量，也就是将具有不同栅距 Δ 的布喇格光栅间隔地制作在同一根光纤上，就可以用同一根光纤复用多个 FBG 传感器，实现对待测结构定点的分布式的测量。由于该复用系统中每一个 FBG 传感器的位置与 λ_B 都是确定

的，分别对它们的波长移动量 $\Delta\lambda$ 进行检测，就可以准确地对各 FBG 传感器所在处的扰动信息进行监测。综合所有 FBG 传感器采集的信息，还可以得到沿光纤轴向的应变场或温度场的分布状态。

1.3 BOTDR 传感技术基本原理

BOTDR 采用标准单模光纤同时作为传感器与光信号传输通路，其传感基本原理如图 2 所示。图 2(a)中脉冲光以一定的频率自光纤的一端入射，由于声光效应，入射的脉冲光在光纤中产生布里渊散射，其中的背向布里渊散射光沿光纤原路返回到脉冲光的入射端，经过数字信号处理器的平均化处理，得到光纤沿线各个采样点的散射光谱，如图 2(b)所示；再通过变化入射光的频率，以实现不同频率下布里渊散射光功率的测量，图 2(c)表示光纤上某个采样点的布里渊散射光谱。理论上，布里渊背向散射光谱线呈洛仑兹型，其峰值功率所对应的频率即是布里渊频移 ν_B 。如果光纤受到轴向拉伸，通过测量拉伸段光纤的布里渊频移，然后通过频移值与光纤的应变间的线性关系就可以得到光纤的应变量^[9]。

同时考虑轴向应变 ϵ 和温度 T 对传感光纤布里渊频移的影响，有如下关系式：

$$\delta\nu_B(\epsilon, T) = (\partial\nu_B/\partial\epsilon)\delta\epsilon + (\partial\nu_B/\partial T)\delta T \tag{6}$$

式中 $\partial\nu_B/\partial\epsilon$ 与 $\partial\nu_B/\partial T$ 分别为布里渊频移的应变系数和温度系数。

由于 BOTDR 技术采用单端检测方式，即脉冲光入射端与布里渊散射光频移的检测端都在光纤的同一端，因此，在一个脉冲宽度 w 内，脉冲光所经过的一定光纤长度上的布里渊频漂信息无法区分，这段长度被称为 BOTDR 测量空间分解度，可以表示为

$$\Delta z = (cw)/2n \tag{7}$$

式中 c 为真空中光速；

n 为所使用的传感光纤的折射率。

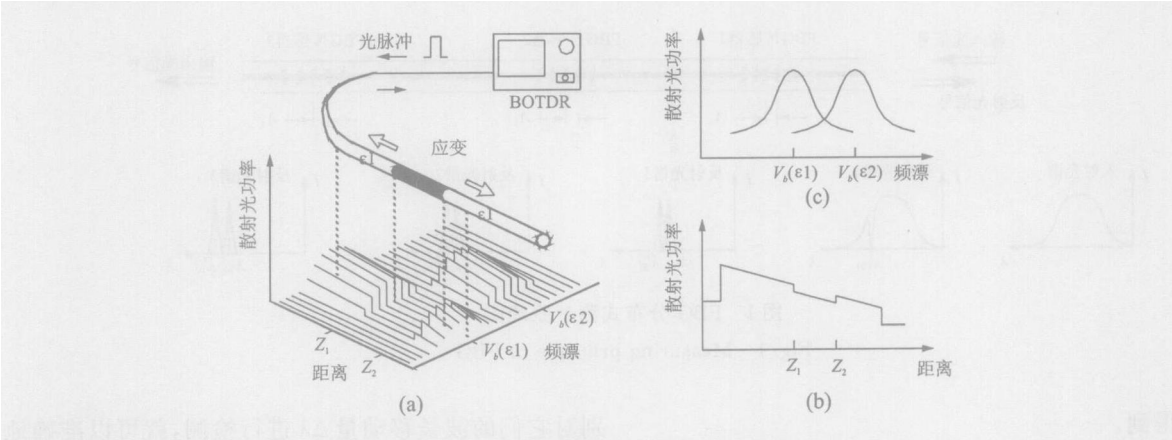


图 2 BOTDR 分布式测量原理图

Fig. 2 Measuring principle of BOTDR

2 FBG 和 BOTDR 技术用于桥梁和路面板中的试验研究

2.1 FBG 在桥梁中的应用

为了研究 FBG 技术应用于桥梁健康监测的可行性,在 AFRP 筋加固的 T 型 RC 简支梁表面布置了分布式光纤传感系统,对受压区混凝土静、动应变进行了实时监测。

分布式光纤传感器的布置见图 3。3 只片式封装的 FBG 传感器分别被粘附在 T 型梁上翼缘的上表面的一侧,这些传感器被串联并最终接入 FBG 解调仪(Si425 500,美国 Micron Optics 公司)的一个通道内。3 只 FBG 传感器的精度均为 $1\text{ }\mu\epsilon$,应变测量范围为 $\pm 2\text{ }000\text{ }\mu\epsilon$,标距均为 80 mm ,应变系数为 $1.2\text{ pm}/1\text{ }\mu\epsilon$,其名义中心波长分别为 $1\text{ }535$ 、 $1\text{ }545$ 和 $1\text{ }553\text{ nm}$ 。3 枚电阻应变计被分别布置在上翼缘上表面的另一侧。另在梁侧的跨中安装了 3 只位移计,各自到梁底的距离分别为 60 、 125 与 200 mm 。根据它们的测试数据,通过平截面假定可以推算出梁顶混凝土受压区应变,作为 FBG 传感器与电阻应变计测试数据的参考。

实验步骤分为 3 步,首先是预加载阶段,T 型梁从 0 kN 加至 40 kN 以模拟构件在荷载下的损伤过程;其次是加固过程,采用 AFRP 预应力筋施加体外预应力;最后是静、动载实验阶段,对加固后的 T 型梁逐级施加 $0\sim 100\text{ kN}$ 的静载与 $40\sim 100\text{ kN}$ 的动载,以考察 AFRP 预应力筋加固后结构的力学性能。

图 4 给出预加载阶段、加固阶段与静载阶段梁顶受压区混凝土应变变化规律,其中 ERS 表示电阻应变计测试结果,FBG 表示 FBG 传感器测试结果,EXT 表示位移计测试结果根据平截面假定推导所得应变值,由图可见,3 种测试手段所得到的测试结果具有很好的一致性,测试值非常接近。另外,图中横轴的 P 表示体外预应力加固后施加的竖向荷载大小。

在预加载阶段,竖向荷载加至 20 kN 后,荷载-应变曲线的斜率减小,表明结构在 20 kN 后产生损伤,引起构件刚度的减小;在体外预应力加固前后,受压区混凝土由大约 $200\text{ }\mu\epsilon$ 的压应变变为大约 $100\text{ }\mu\epsilon$ 的拉应变,这表明采用 AFRP 筋施加体外预应力后,构件产生反拱,原混凝土受压区变为受拉区;在静力加载阶段,混凝土应变由 $100\text{ }\mu\epsilon$ 的拉应变逐级减小。在竖向荷载超过 40 kN 后,构件刚度略有增大。

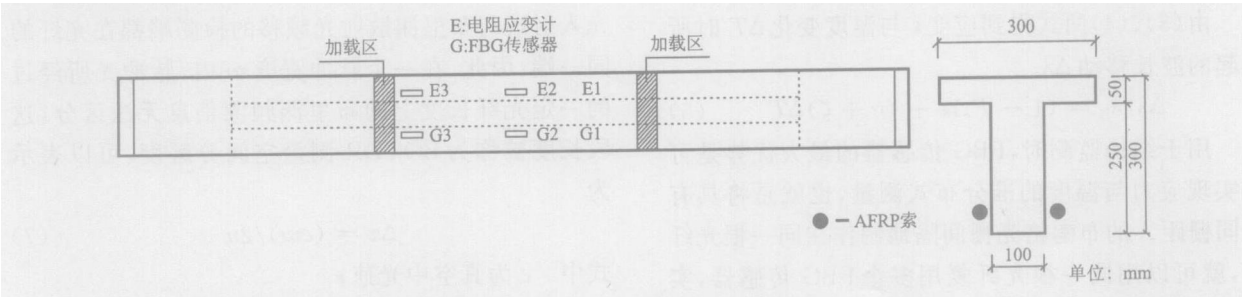


图 3 FBG 传感器与电阻应变计的布置

这可能是由 AFRP 筋内应力的陡增所导致。80 kN 至 100 kN 时, 3 种测试手段所得测试结果存在一定差异, 其原因在于此时构件产生了一定的挠度, 而液压伺服装置所施加的竖向荷载存在波动, 且 3 种测试手段采集数据并不同步。

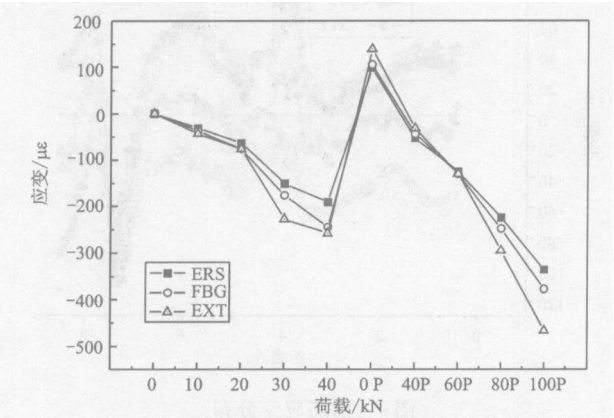


图 4 预加载与加固阶段受压区混凝土应变变化规律
Fig. 4 Shift regularity of strains obtained from the three means

图 5 给出了在各既定振动周期附近, 用 FBG 应变测试系统采集得到梁顶受压区混凝土在 2 s 内的动应变变化规律。比较 4 条正弦曲线可见, 从 2 万次~20 万次振动周期, 梁顶受压区混凝土的应变幅值逐步增大, 表现出结构在疲劳荷载下产生了损伤, 结构刚度存在衰减。

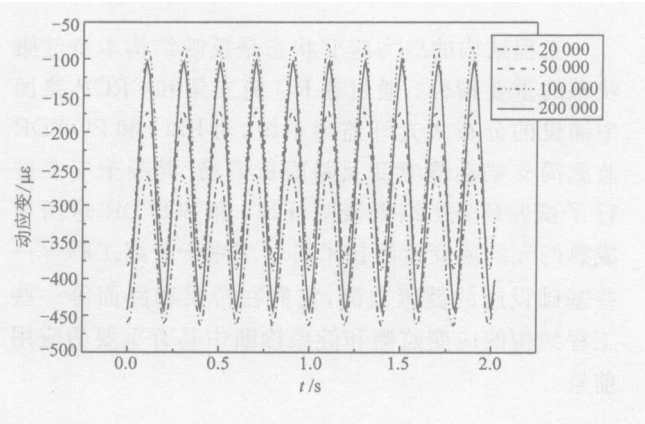


图 5 动载下加固构件梁顶受压区混凝土动应变变化规律
Fig. 5 Shift regularity of dynamic strains obtained from FBG sensor G1

本实验测试结果表明, 采用 FBG 分布式光纤传感系统, 能够有效地对 AFRP 筋体外加固的 T 型 RC 梁在预加载阶段、体外预应力加固阶段、静载阶段以及动载阶段构件受压区混凝土应变进行测量。在实际工程中具有良好的适用性及广阔的应用前景。

2. 2 BOTDR 技术在连续配筋混凝土路面的应用

连续配筋混凝土路面(CRCP)是全部省略接缝的连续混凝土板, 是为了减轻因接缝而引起的振动与噪音, 或为改善平整度、提高行车舒适性而使用的路面。对于这种高性能的路面结构形式, 其钢筋应力状态、混凝土应力状态和路面的裂缝分布是反映该路面使用性能的主要因素^[9]。将 BOTDR 这项优秀的无损检测技术应用于监测 CRCP 路面钢筋、混凝土应力和路面裂缝, 具有重要意义。

图 6 为 BOTDR 分布式光纤传感系统在连续配筋混凝土路面中的布置图。路面纵向钢筋共有 11 根, 其中 8 根钢筋上布设了传感光纤, 温度补偿光纤 4 条, 应变传感光纤 6 条。另外, 在板表面和底面各布设了 2 条传感光纤, 分别检测路面板表面和底面混凝土应变。传感光纤(美国康尼公司)直径为 900 μm , 标定的应变系数为 501 MHz/100 $\mu\epsilon$ 。不同部位的传感光纤用 FSM-16R 熔接机连接起来, 这样在一根传感光纤上有多个部位可以感应路面板的应变变化, 实现对钢筋和混凝土的分布式检测。传感光纤被接入光纤应变分析仪(AQ8603, 日本安藤公司)。浇注混凝土前路面板钢筋网及光纤布置见图 7。

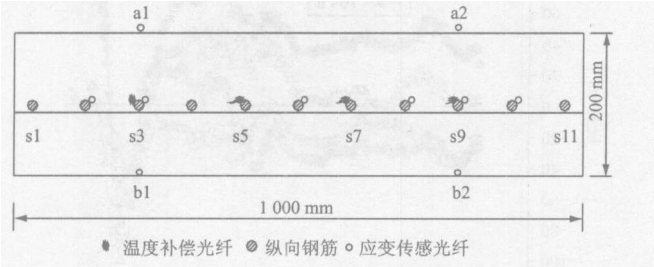


图 6 BOTDR 分布式光纤传感布置
Fig. 6 Setup of sensing fiber based on BOTDR

本次试验研究分为两个阶段: 第一阶段为混凝土硬化期应变监测; 第二阶段为在荷载作用下的应变监测。本文主要介绍硬化阶段的初步结果, 第二阶段的研究仍在进行中。

图 8 为浇注混凝土后 100 h 内 BOTDR 检测的板表面(a2 位置)混凝土应变分布。从图中可以清楚地看出沿路面纵向表面混凝土应变变化情况。图中正应变表示混凝土发生膨胀变形, 负应变表示混凝土发生收缩变形。在混凝土发生收缩变形时, 由于受到钢筋和基层的约束, 混凝土中将产生拉应力, 当该拉应力超过混凝土的抗拉强度时就会产生收缩裂缝。另外还可以看出, 在某一时刻沿路面板走向, 混凝土应变呈波动性分布, 这是由于混凝土属性的差



图 7 钢筋网及光纤布置

Fig. 7 Photograph of mesh reinforcement attached sensing fiber

异性造成的。通过对混凝土分布式应变的分析,可以推测出最大拉应力的位置,预测出路面板可能产生裂缝的位置。如在图 8 中利用在第 31、104 h 检测的混凝土应变分布,可以预测出路面板最有可能在 2.0、4.0、6.5 m 处出现裂缝。

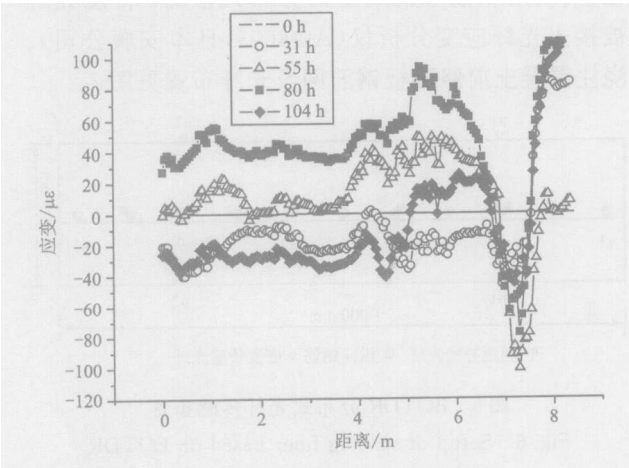


图 8 板表面混凝土应变分布

Fig. 8 Strain distribution of the CRC Pavement

图 9 为浇注混凝土后 100 h 内 BOTDR 检测的钢筋 s9 的应变分布。从图中可以清楚地看出沿路面方向钢筋 s9 在不同时刻的应变变化,其中正应变表示钢筋受拉,负应变表示钢筋受压。由于钢筋和混凝土之间存在粘结应力,当混凝土发生膨胀变形时,纵向连续钢筋将产生拉应力,结合图 8 可以清楚地看出这种变化规律。在连续配筋混凝土路面中,粘结应力是一个影响裂缝间距和裂缝宽度发展的关键因素。粘结应力指钢筋与混凝土接触面上的剪应力,它可以由钢筋所受拉力的变化率确定^[7],通过图 9 可以计算出粘结应力的分布,这是分布式光纤传感器的优点。在混凝土硬化这段时间里,钢筋应变

不是均匀的,通过连续监测钢筋应变,有助于预测路面的使用性能。

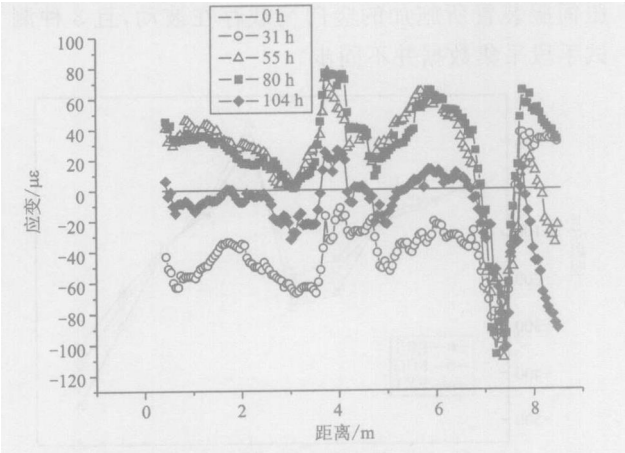


图 9 钢筋应变分布

Fig. 9 Strain distribution of steel s9

本实验测试结果表明, BOTDR 分布式光纤传感系统能够在线对连续配筋混凝土路面板中的钢筋和混凝土应变进行有效的检测,这说明 BOTDR 在路面板、桥面板及其他一些类似工程中具有良好的适用性及广阔的应用前景。

3 结语

工程结构的应力应变状态是反映结构本身健康状态的重要指标。通过在 RC 简支梁和 CRCP 路面中铺设的分布式光纤监测系统,对 FBG 和 BOTDR 监测简支梁动静应变及路面板钢筋、混凝土应变进行了试验研究。结果表明,FBG 和 BOTDR 这两项成熟的光纤应变监测技术可以应用于公路工程等一些基础设施的健康监测,它们在桥梁和路面等一些工程结构的应变监测和健康诊断中具有重要的应用前景。

参考文献:

[1] H. Ohno, H. Naruse, T. Kurashima, et al. Application of brillouin scattering based distributed optical fiber strain sensor to actual concrete piles[J] . IEICE Trans. Electron 2002, E85 C (4): 945 951

[2] B. Shi, H.Z. Xu, B. Chen, et al. A feasibility study on the application of fiber optic distributed sensors for strain measurement in the Taiwan Strait Tunnel project [J] . Marine Georesources & Geotechnology, 2003, 21(3 4): 333 343

[3] R. Maaskant, T. Alavie, R. M. Measures et al. Fiber optic bragg grating sensors for bridge monitoring

[J] . Cement Concrete Com, 1997, (19) : 21-33

[4] 张 巍, 吕志涛. 光纤传感技术用于桥梁监测[J] . 公路交通科技, 2003, 20(3): 94-95

[5] T. Horiguchi, T. Kurashima, M. Taleda. Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers [J] . IEEE photon Tech. Lett, 1989, 1 (5) : 107-108

[6] 查旭东, 张起森, 李宇峙, 等. 高速公路连续配筋混凝土路面施工技术研究[J] . 中外公路, 2003, 23(1): 4-4

[7] 宋启根, 单炳梓, 金芷生, 等. 钢筋混凝土力学[M] . 南京: 南京工学院出版社, 1986

Application of Distributed Fiber Optic Sensor to Bridge and Pavement Health Monitoring

GAO Jun qi¹, SHI Bin¹, ZHANG Wei¹, KE Min yong², LIU Hai xiang², ZHANG Dan¹
(1. Center for Engineering Monitoring of Photoelectric Sensing, Nanjing University, Nanjing 210093, China;
2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Two kinds of novel distributed fiber optic sensing technique, i. e., Fiber Bragg Grating (FBG) and Brillouin Optical Time Domain Reflectometer (BOTDR), are introduced in this paper. The two distributed fiber optic sensing systems based on FBG and BOTDR were implemented on a simply supported reinforced concrete beam and a continuously reinforced concrete pavement (CRCP), respectively. The dynamic and static strains at the upper side of the beam were real time monitored. In another experiment, the strain of the steel and concrete in the CRCP was also detected on line. The experimental results show that the FBG and BOTDR technologies are able to find wide applications to structural health monitoring.

Key words: distributed fiber optic sensor; FBG; BOTDR; structural health monitoring