

文章编号: 0451-0712(2005)12-0146-03

中图分类号: TH82

文献标识码: A

# 分布式光纤传感器用于连续配筋混凝土路面健康监测的试验研究

王书斌

(河北省青银高速公路筹建管理处 石家庄市 051530)

**摘 要:** 介绍了一种先进的分布式光纤传感器技术,即布里渊光时域反射计(BOTDR),在连续配筋混凝土路面(CRCP)中布置了BOTDR 分布式光纤传感系统,对路面板中连续钢筋和混凝土应变进行实时监测。研究结果表明,BOTDR 在公路桥梁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; BOTDR; 结构健康监测

长期以来,人们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)后再进行检测评估,而评估和维修必然花费高,而且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。

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无损检测新技术<sup>[1]</sup>。它与传统的电测传感器相比具有如下的优越性能:分布式、长距离、实时性、精度高和耐久性长等特点,能做到对大型基础工程设施进行远程监测和监控。本文主要介绍BOTDR 光纤应变监测技术在路面中的试验及应用研究。

## 1 BOTDR 传感技术基本原理

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,但是其中分布式光纤传感技术不超过5种,而BOTDR 传感技术是其中最具代表性的一种,下面简要介绍这种分布式传感技术的基本原理,并针对它在道路结构测试中的适用性,开展相应的试验研究。

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1所示。图1(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1(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1(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 $\nu_B$ 。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变量<sup>[2]</sup>。

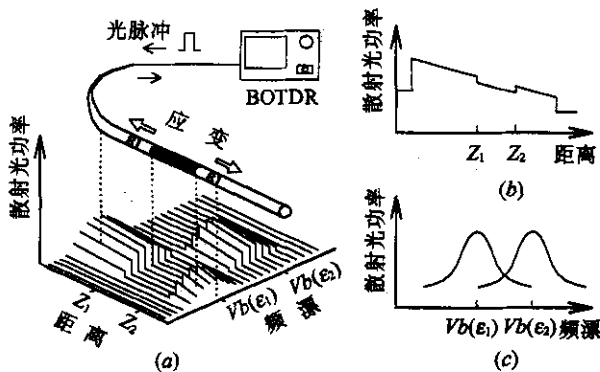


图1 BOTDR 分布式测量原理

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

$$\delta v_B(\epsilon,T)=(\partial v_B/\partial \epsilon) \cdot \delta \epsilon+(\partial v_B/\partial T) \cdot \delta T \quad (1)$$

式中: $\partial v_B/\partial \epsilon$  与  $\partial v_B/\partial T$  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  $\tau_w$  内,脉冲光所经过一定的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:

$$\Delta z=(c\tau_w)/2n \quad (2)$$

式中: $c$  为真空中光速; $n$  为所使用的传感光纤的折射率。

2 BOTDR 技术用于连续配筋混凝土路面的试验研究

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、水泥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<sup>[3]</sup>。将 BOTDR 无损检测技术应用于监测 CRCP 路面钢筋、水泥混凝土应力和路面裂缝,具有重要意义。

图 2 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,检测路面板表面和底面混凝土应变。传感光纤直径为 900  $\mu\text{m}$ ,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,实现对钢筋和水泥混凝土的分布式检测。传感光纤被接入光纤应变分析仪。浇筑水泥混凝土前路面板钢筋网及光纤布置见图 3。

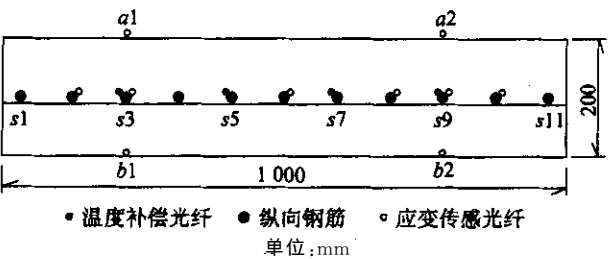


图 2 BOTDR 分布式光纤传感布置

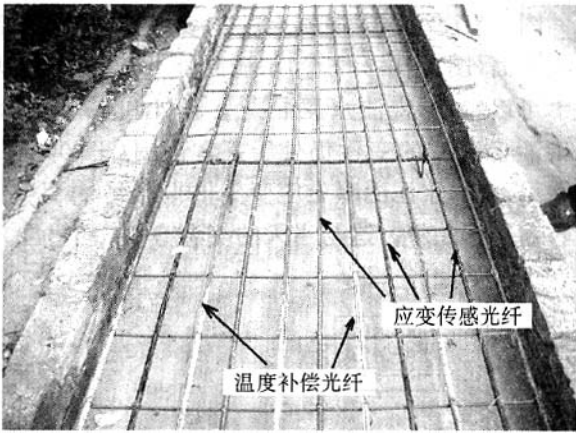


图 3 钢筋网及光纤布置

本次试验研究分为两个阶段。第 1 阶段为水泥混凝土硬化期应变监测;第 2 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 2 阶段的研究仍在进行中。

图 4 为浇筑水泥混凝土后 100 h 内 BOTDR 检测的板表面(图 2 中  $a_2$  位置)水泥混凝土应变分布。从图中可以清楚地看出沿路面纵向表面水泥混凝土应变变化情况。图中正应变表示水泥混凝土发生膨胀变形,负应变表示水泥混凝土发生收缩变形。在水泥混凝土发生收缩变形时,由于受到钢筋和基层的约束,水泥混凝土中将产生拉应力,当该拉应力超过水泥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,水泥混凝土应变呈波动性分布,这是由于水泥混凝土属性的差异性造成的。通过对水泥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 4 中利用在第 31 h、104 h 检测的水泥混凝土应变分布,可以预测出路面板最有可能在 2.0 m、4.0 m、6.5 m 处出现裂缝。

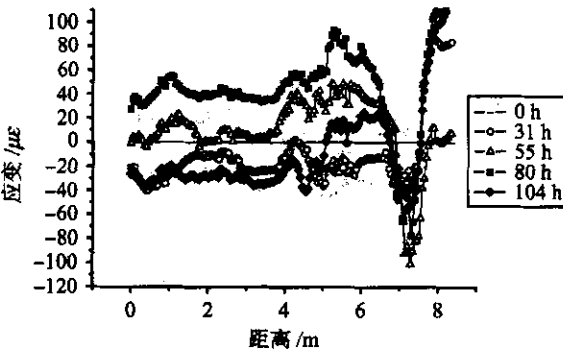


图 4 板表面混凝土应变分布(1)

图5为浇注水泥混凝土后73 d内BOTDR检测的板表面(图2中a2位置)水泥混凝土应变分布。从图中可以看出,浇注水泥混凝土31 d和73 d后,水泥混凝土应变的变化仍处于正常范围( $\pm 200 \mu\epsilon$ )。但在第45 d,水泥混凝土应变变化非常大,并且主要呈收缩变形趋势。这与当天的气温有关。

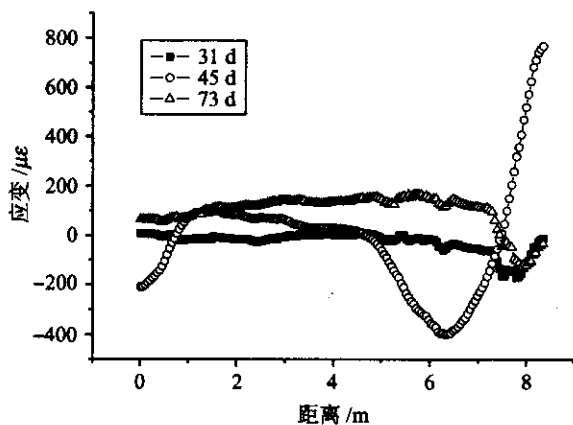


图5 板表面水泥混凝土应变分布(2)

图6为浇注水泥混凝土后100 h内BOTDR检测的钢筋s9(见图2)的应变分布。从图中可以清楚地看出沿路面方向钢筋s9(见图2)在不同时刻的应变变化。图中正应变表示钢筋受拉,负应变表示钢筋受压。由于钢筋和水泥混凝土之间存在粘结应力,当水泥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5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。粘结应力指钢筋与水泥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<sup>[4]</sup>,通过图6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。在水泥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。

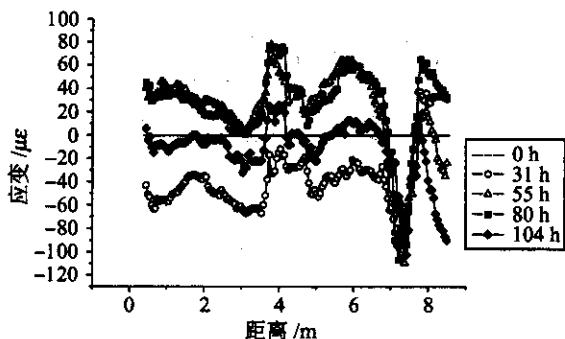


图6 钢筋应变分布(1)

图7为浇注水泥混凝土后73 d内BOTDR检测的钢筋s9的应变分布。从图中可以看出,随着时间的延续,大部分钢筋受力较为均匀,而在右端6~8 m区间内,其应力应变变化较为复杂,其应变变化幅度较大( $\pm 2000 \mu\epsilon$ ),并主要承受拉应力,这预示在该区间产生了裂缝。

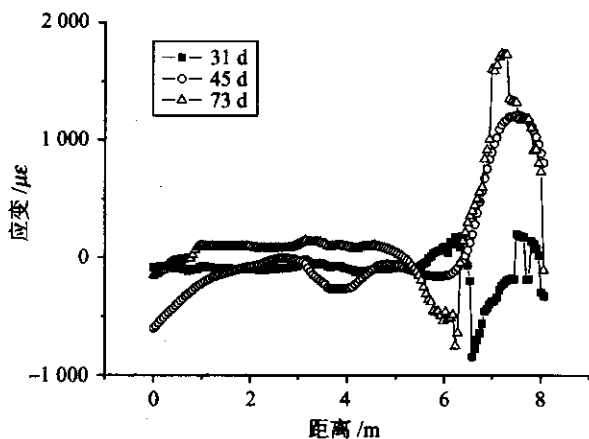


图7 钢筋应变分布(2)

本试验测试结果表明,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水泥混凝土应变进行有效地检测,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况的重要指标。通过在CRCP路面中铺设的分布式光纤监测系统,对BOTDR监测简支梁动静应变及路面板钢筋、水泥混凝土应变展开了试验研究。结果表明,BOTDR 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,它们在公路桥梁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, A Nobiki, Y Uchiyama, Y Kusakabe. Application of Brillouin Scattering-Based Distributed Optical Fiber Strain Sensor to Actual Concrete Piles[J]. IEICE Trans. Electron E85-C, 2002 (4).
- [2] 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).

文章编号: 0451-0712(2005)12-0149-07

中图分类号: U414.750.1

文献标识码: A

# ZIGLER 岩沥青改性沥青混合料的性能研究

何凤玲, 王捷, 丁建明

(东南大学交通学院 南京市 210096)

**摘要:** 岩沥青常被用作作为沥青路面的添加剂,已在国内外一些工程中得到应用。本研究用韩国SK 基质沥青和台湾CPC 基质沥青分别对不同掺量岩沥青胶结料性能进行了比较分析。采用AC-25 沥青混合料,基质沥青为韩国SK-70 号沥青,分别对不同掺量岩沥青改性沥青混合料性能进行了比较分析,推荐了岩沥青的适宜掺量。

**关键词:** 岩沥青; 沥青胶结料; 沥青混合料; 性能; 掺量

ZIGLER 岩沥青或者叫北美岩沥青是一种纯的、自然的碳氢脂类化合物,仅产于美国犹他州东部的硬沥青盆地,常被用作作为沥青路面的添加剂。岩沥青一般被用在重交通区域,以减少沥青路面车辙现象。岩沥青具有使用方便的特点:不需要特别的设备,添加方便,可直接与沥青混合,是一种具有一定经济效益的可供利用的沥青路面改性剂。它是一种天然沥青,性质与硬质沥青较接近,岩沥青溶于芳香烃和脂类及石油,是一种有光泽的,黑

色的物质,外观象黑曜石,易脆,容易被碾成黑棕色粉末。

从地质角度看,岩沥青是石油基的固体,因此与沥青极易共存,混合以后形成天然岩沥青与沥青的紧密分子,这种分子既有天然沥青的硬度和耐磨性,同时也保留了沥青的韧性。天然岩沥青具有高含氮量,高的沥青烯含量和大分子量,使溶液更加粘稠,使改良后的沥青粘度更好,更易于与聚合物结合,也有更好的抗氧化性。

收稿日期: 2005-05-25

[3] 查旭东,张起森,李宇峙,苏清贵,黄庆. 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] 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.

## A Study on Health of Continuously Concrete Pavements Monitored by Distributed Fiber Optic Sensor

WANG Shu-bin

(Preparing Construction Section of Qingyin Expressway of Hebei Province,Shijiazhuang 051530,China)

**Abstract:** As a kind of novel distributed fiber optic sensing technique, Brillouin Optical Time Domain Reflectometer (BOTDR) is introduced in this paper. The distributed fiber optic sensing system based on BOTDR is arranged on a continuously reinforced concrete pavement (CRCP), the strain of the steel and concrete in the CRCP is detected on-line. The experimental results show that the BOTDR technologies demonstrate a wide spectrum of applications in structural health monitoring.

**Key words:** distributed fiber optic sensor, BOTDR, structural health monitoring