

结构裂缝的分布式光纤监测方法及试验研究

何勇¹, 姜帅¹, 毛江鸿^{1,2}, 夏晋¹, 金伟良^{1,2}

(1. 浙江大学结构工程研究所, 杭州 310058; 2. 浙江大学宁波理工学院, 浙江宁波 315100)

摘要:结构裂缝监测是评估结构安全性的重要依据之一, 分布式光纤裂缝监测技术可有效避免点式检测空间不连续造成的漏检现象, 且易于实现自动化监测。该文提出了布里渊光频域分析计(BOTDA)结合斜交光纤组的裂缝监测方法, 通过几何分析得到了光纤应变和裂缝宽度及开展方向的理论模型, 并采用标定试验建立了由光纤测试应变反算裂缝宽度及开展方向的数值方程。同时开展了光纤裂缝传感器标距和预拉力大小对测量精度影响的试验研究, 并标定了300 mm标距的光纤裂缝传感器实测应变和裂缝宽度及夹角的定量关系。最后通过裂缝模拟试验对裂缝开展进行了跟踪监测, 结果表明斜交光纤组能有效得到光纤与裂缝之间夹角值并实时监测裂缝宽度变化。

关键词:结构工程; 混凝土结构; 裂缝监测; 裂缝扩展; 光纤传感; BOTDA

中图分类号: TU317.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2012)01-0001-06

Cracking Monitoring Method and Experiment with Distributed Fiber Sensor

HE Yong¹, JIANG Shuai¹, MAO Jiang-hong^{1,2}, XIA Jin¹, JIN Wei-liang^{1,2}

(1. Institute of Structural Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China;
2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: Cracking monitoring provides an important way to evaluate structural safety. Cracking monitoring method based on distributed optical fiber sensor can effectively avoid undetected phenomenon existed in point-wise test method, and it can run automatically. A theoretical model of cracking monitoring based on obliquely intersected fibers and Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA) is introduced, and the numerical equation among fiber strain, crack width and crack angle is established by the calibration experiment. The experiments are also carried out to study the performance of different kinds of cracking sensors with different gauge length and pretension. The quantitative relationship between optical fiber measured strain and crack (including width and angle) is established for the 300 millimeter crack sensor. The cracking simulation test proved that this new method can effectively record the width and the angle of cracks during the whole cracking process.

Key words: structure engineering; concrete structure; crack detection; crack propagation; optical fiber sensor; BOTDA

混凝土、砌体等建筑结构在建设使用过程中均会出现不同程度、不同形式的裂缝, 结构物裂缝扩展会引起渗漏、保护层剥落、钢筋锈蚀、混凝土碳化

等现象, 从而影响结构正常使用和安全。国内外学者已从设计、施工、养护等方面开展了大量裂缝控制研究, 而严格防止裂缝开展需付出巨大的经济代价,

收稿日期: 2011-04-30

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(y1110323); 国家自然科学基金重大国际合作项目(5092015806); 国家科技支撑计划(2006BAJ03A02-02)

作者简介: 何勇(1979-), 男, 博士, 主要从事结构分析、结构安全可靠、结构监测研究, (Email) heyong_ise@zju.edu.cn.

因此控制其允许危害程度是解决结构裂缝问题的有效技术措施^[1]。结构开裂监测是评估裂缝危害程度的重要手段,而裂缝具有时空随机性的特点,使得裂缝监测大多依赖于技术人员的定期检测,难以实现结构裂缝的全面、长期、实时自动监测。

光纤传感技术具有分布式、高精度、耐久性、实时性等特点,可有效避免点式检测空间不连续造成的漏检现象,监测过程稳定且易于实现自动化,已有众多学者利用不同原理对结构裂缝监测进行研究。Lee 等人^[2]采用裂缝引起光纤探头位置光强变化监测了钢结构桥梁模型疲劳裂缝,Perrone^[3]利用该原理对某建筑物裂缝进行了为期 1 a 的跟踪监测,但该技术难以实现裂缝的分布式监测;Leung^[4-5]提出基于 OTDR 的光纤微弯引起光强损耗监测裂缝开展,并对拉伸和剪切裂缝进行了理论研究,刘浩吾等人^[6-7]进行了该方面试验研究并为工程应用开展基础研究;孙宝臣^[8]利用光纤宏弯原理制作了新型光纤裂缝传感器,并研究了其传感特性;欧进萍等人^[9]利用光纤断裂产生的菲涅尔反射进行随机裂缝的分布式监测,但需配置光纤耦合器才能实现多裂缝同步监测。布里渊光时域分析计(BOTDA)作为分布式光纤传感技术已在大型基础工程的应变监测中应用^[10-12],将其应用于结构裂缝监测相对较少。Zou^[13]通过试验提出了利用布里渊散射的光纤应变判断裂缝开展过程;Lu^[14]等人将 BOTDA 裂缝监测技术应用于某沥青铺装层的裂缝监测中;钱振东^[15]等人开展了基于 BOTDA 的桥面板疲劳裂缝监测研究,利用光纤应变建立疲劳裂缝扩展模型。但目前基于 BOTDA 的裂缝监测方法尚未实现光纤应变和裂缝宽度及走向的定量分析,同时为解决 OTDR 裂缝监测中光纤光损造成复用性差的问题,本文开展了 BOTDA 技术结合斜交光纤组的裂缝监测方法研究。

通过理论分析建立了光纤应变和裂缝宽度及走向的数值关系,并提出斜交光纤组监测结构裂缝开展的理论模型。试验对光纤裂缝传感器的标距和预拉力进行了比选,并标定了 300 mm 标距的光纤裂缝传感器实测应变和裂缝宽度及夹角的定量关系。最后通过裂缝模拟试验对裂缝开展进行了跟踪监测,结果表明斜交光纤组能有效得到光纤与裂缝之间夹角值并实时监测裂缝宽度变化。

1 BOTDA 裂缝监测理论基础

1.1 BOTDA 原理

布里渊光时域分析计(BOTDA)利用光纤的布里渊散射光的频移量与光纤应变和温度变化之间的线

性关系,通过测量布里渊散射频移量 ν_B 获取光纤沿线温度和应变的分布信息。光纤应变、温度变化量与布里渊频率漂移量之间的关系如式(1)所示^[16]:

$$\nu_B(\epsilon, T) - \frac{d\nu_B(T)}{dT}(T - T_0) = \nu_B(0) + \frac{d\nu_B(\epsilon)}{d\epsilon}\epsilon \quad (1)$$

式中: $\nu_B(0)$ 为初始应变、初始温度时布里渊频率频移量; $\nu_B(\epsilon, T)$ 为在应变 ϵ 、温度 T 时布里渊频率漂移量; $d\nu_B/dT$ 为温度比例系数; $d\nu_B/d\epsilon$ 为应变比例系数; $T - T_0$ 为光纤温度差; ϵ 为光纤应变变化量。

由某测试点返回的布里渊散射光到光纤起点的距离可用下式计算:

$$Z = \frac{c \cdot T}{2n} \quad (2)$$

式中: c 为真空中的光速; n 为光纤的折射率; T 为发出脉冲光至接收到散射光的时间间隔。由式(1)和(2)可求得光纤轴向各点的应变、温度。

分布式光纤应变传感技术可对结构应变进行分布式检测,但由于入射光存在脉冲宽度限制使得该技术需考虑空间分辨率影响。采样点的应变数据实际上是一段光纤内应变的综合反映^[17]:

$$dz = \frac{W \cdot V_g}{2} \quad (3)$$

式中: dz 即为空间分辨率大小; W 为入射脉冲光宽度; V_g 为光波在光纤中沿轴向传播的速度。

1.2 裂缝监测模型

将传感光纤横穿结构裂缝时,则粘结牢固的传感光纤将同结构协同变形并产生拉应变,可由 BOTDA 进行实时记录。一般情况下光纤和裂缝存在某一夹角,其值介于 $0 \sim 90^\circ$ 之间,为便于在图中标注,文中将光纤与裂缝夹角的补角定义为 θ ,如图 1 所示。当结构出现宽度为 w 的裂缝时,粘结长度为 L 的传感光纤应变为:

$$\epsilon = (L' - L)/L = \sqrt{1 + 2\cos\theta(w/L) + (w/L)^2} - 1 \quad (4)$$

由上式可知,当粘结长度(传感器标距)固定时,光纤应变由裂缝宽度 w 及开展方向 θ 决定。

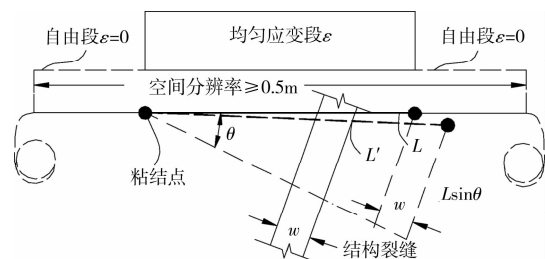


图 1 BOTDA 裂缝监测原理图

光纤应变同时与裂缝宽度 w 及开展角度 θ 有关,假定光纤标距 L 为 300 mm,依据式(4)可绘制各种开展角度下的光纤应变和裂缝宽度的关系,如下图所示。由图 2 可知,在各裂缝夹角下光纤应变和裂缝宽度存在明显的线性关系,可拟合得到相应的比例系数 k ,光纤和裂缝夹角越大(即补角 θ 越小) k 越大,光纤应变也越大,即光纤对裂缝宽度敏感性更高。

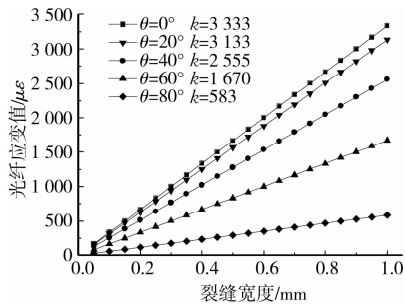


图 2 各 θ 角下光纤应变与裂缝宽度关系

比例系数 k 和开展角度 θ 的关系曲线如下图所示:

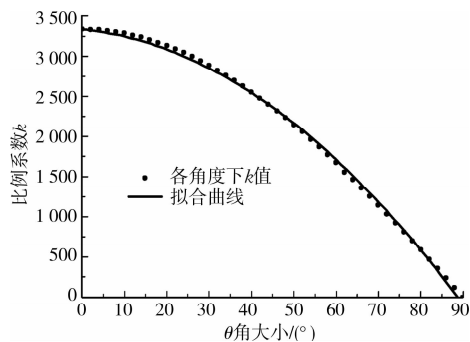


图 3 比例系数 k 与 θ 角关系

由上图可拟合得到比例系数 k 和裂缝开展角度 θ 之间的关系式,再将其乘以裂缝宽度 w 便得到光纤应变值,由上图可得标距为 300 mm 光纤应变值的理论公式:

$$\epsilon = (3\ 333.3 - 5.0\theta - 0.37\theta^2)w \quad (5)$$

该式表明光纤应变中同时存在裂缝宽度及开展方向的双重影响,仅采用一根光纤无法从光纤应变中分别提取裂缝宽度和角度信息,可通过将传感光纤布设成具有特定夹角的光纤组,再通过几何分析获取裂缝信息,如图 4 所示。

当裂缝穿过布设成一定角度的 2 条传感光纤后,假设光纤分布范围内裂缝宽度一致,裂缝宽度的变化将使每根光纤均产生长度变化,其几何关系如下式所示:

$$\begin{cases} (L_1 \sin\theta_1)^2 + (L_1 \cos\theta_1 + w)^2 = L_1'^2 \\ (L_2 \sin\theta_2)^2 + (L_2 \cos\theta_2 + w)^2 = L_2'^2 \\ \theta_1 + \theta_2 = \gamma \end{cases} \quad (6)$$

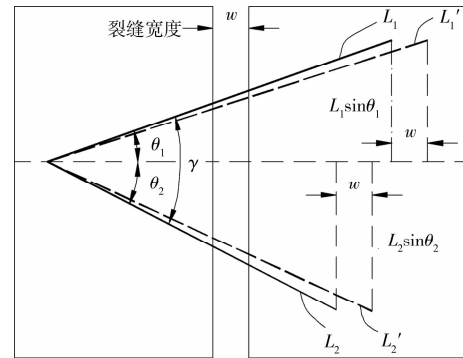


图 4 斜交光纤组裂缝监测原理

上式存在裂缝走向 θ_1 、 θ_2 以及裂缝宽度 w 共 3 个未知量,只需知道 2 条传感光纤在裂缝作用后的长度 L_1' 和 L_2' 即可获取裂缝宽度和走向,其中 L_1' 和 L_2' 可由式(4)计算得到。依据上述理论分析过程,得到当光纤标距为 300 mm 时,光纤组应变与裂缝关系的理论模型:

$$\begin{cases} \epsilon_1 = (3\ 333.3 - 5.0\theta_1 - 0.37\theta_1^2)w \\ \epsilon_2 = (3\ 333.3 - 5.0\theta_2 - 0.37\theta_2^2)w \\ \theta_1 + \theta_2 = \gamma \end{cases} \quad (7)$$

由上式可知将传感光纤布置成角度 γ 的斜交监测网时,得到光纤应变值后解上述方程组便可获取裂缝的走向 θ_1 、 θ_2 以及裂缝宽度 w 。BOTDA 技术存在空间分辨率影响,由图 1 可知,光纤通过粘结点固定在结构表面时,在标距 L 内的光纤将产生均匀应变,而标距以外为自由光纤,光纤无应变值。由(3)式可知,分布式光纤应变传感技术存在最小空间分辨率限制,因此,若光纤均匀应变段长度小于空间分辨率值,即在空间分辨率范围内存在自由段光纤,则光纤应变测试值将小于理论值,其关系可通过标定试验进行研究。

2 试验研究

2.1 光纤裂缝传感器设计

传感光纤作为裂缝开展的感应元件存在极限抗拉强度(一般小于 3.0 N),其测试范围及精度受自身物理状态影响,其中光纤传感器标距及粘贴过程预拉力是改变光纤物理状态的主要因素,因此需通过试验进行传感器优化设计。采用自制裂缝控制仪进行裂缝宽度 w 调节,该装置由 2 块 200 mm × 200 mm × 20 mm 钢板组成,通过内角螺丝调整裂缝宽度,其值由百分表测量,裂缝控制精度为 0.01 mm,其构造如图 5 所示。

传感光纤为直径 250 μ m 裸光纤,通过 AB 胶粘结,由测力计控制光纤预拉应力,调节粘结点距离可构成不同标距的光纤裂缝传感器。由 DITEST

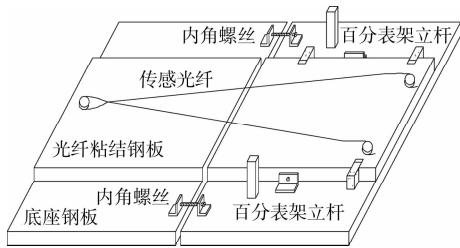


图 5 裂缝控制仪构造图

STA-R 型 BOTDA 记录光纤应变值,设置采样点间隔为 0.1 m,空间分辨率为 0.5 m,试验布置如图 6 所示。



图 6 试验布置图

为研究传感器标距及预拉力对光纤应变测试的影响,共选用 3 种不同标距的光纤传感器,分别为 100 mm、200 mm 及 300 mm,各传感光纤垂直裂缝布置(θ 为 0°),同时控制粘结过程的光纤预拉力,各标距分别设置 1.5 N、3.0 N 及 4.0 N。

裂缝控制分 2 个过程,首先从 0 mm 增大至 1 mm,裂缝步为 0.05 mm,再逐步减小至 0 mm,裂缝步为 0.1 mm,传感光纤应变测试结果如图 7 所示。

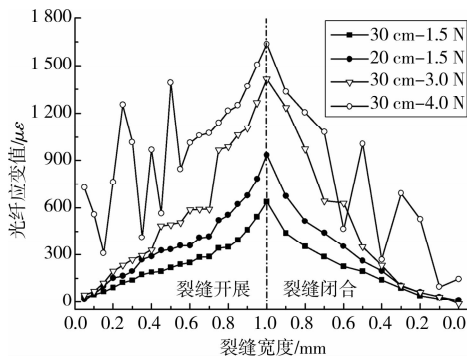


图 7 $\theta=0^\circ$ 时光纤应变与裂缝宽度标定曲线

由测试结果可知,光纤预拉力为 4 N 时,3 种标距的传感光纤所测应变均出现明显抖动,其应变曲线类似图中标距 300 mm、预拉力 4.0 N 的传感光纤,该曲线无法用于结构裂缝监测的定量分析;同样,当标距小于 300 mm 时,部分曲线也出现上述波动特性。预拉力过大使得光纤初始应力过大,同时标距过小将引起光纤在裂宽微小变化时产生过大应力,使光纤应力接近其抗拉强度而使测试结果失真。

当预拉力为 1.5 N 时,200 mm 及 300 mm 标距的光纤传感器均能稳定工作,其中 300 mm 标距曲线较为平滑表现出更好的工作性能。300 mm 光纤应变传感器能明显分辨 0.05 mm 的裂缝宽度变化,同时当裂缝宽度小于 0.7 mm 时,光纤应变和裂缝宽度具有很好线性关系,可用于推算裂缝宽度值。一般规范规定结构最大裂缝宽度要求小于 0.3 mm,因此重点分析裂缝宽度小于 0.7 mm 的测试结果。

2.2 光纤裂缝传感器标定

在选定合适传感器标距及预拉力大小的情况下,需进一步开展试验研究标定光纤应变和裂缝宽度及夹角之间的定量关系。该标定试验中传感光纤和裂缝之间共构成 4 个不同角度, θ 角分别为 0° 、 10° 、 20° 及 30° ,对应的光纤与裂缝夹角 90° 、 80° 、 70° 及 60° ,如图 8 所示。

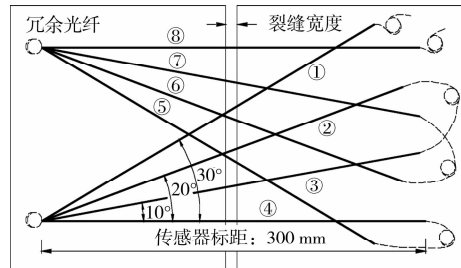


图 8 传感光纤布置图

图 8 裂缝控制仪布置的①—④号传感光纤标距均设置为 300 mm,光纤预拉力为 1.0 N,裂缝宽度从 0 mm 增大至 0.6 mm,裂缝步为 0.05 mm,图 9 绘制了①—④号传感光纤在各裂缝宽度下的应变曲线。

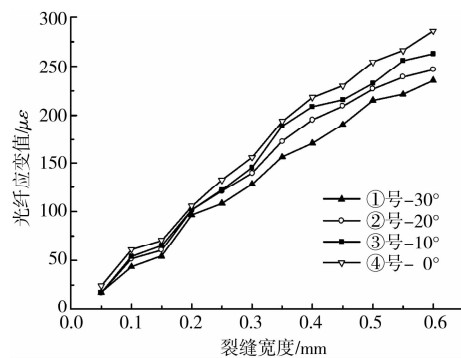


图 9 ①—④号光纤应变与裂缝宽度曲线

由上图可知,①—④号传感光纤应变和裂缝宽度具有明显的线性关系,通过最小二乘法拟合各曲线可知:

$$\begin{cases} \epsilon_0 = 503.3\tau = 0.151\epsilon'_0 \\ \epsilon_{10} = 472.8\tau = 0.143\epsilon'_{10} \\ \epsilon_{20} = 451.1\tau = 0.144\epsilon'_{20} \\ \epsilon_{30} = 407.1\tau = 0.141\epsilon'_{30} \end{cases} \quad (8)$$

式中: w 为裂缝宽度; $\epsilon_0 \sim \epsilon_{30}$ 为光纤测试应变; $\epsilon'_0 \sim \epsilon'_{30}$ 为由式(5)得到的光纤理论应变。

由拟合公式可知,光纤应变测试值和理论值之间具有很好一致性,其比例系数 β 约为 0.14,该系数是由于光纤均匀应变段长度(300 mm 标距)小于 BOTDA 空间分辨率引起的,而不同空间分辨率下的 β 可通过试验标定。

2.3 裂缝开展监测试验

为验证分布式裂缝光纤监测方法的有效性,设计了如图 8 所示的光纤监测网,通过①—⑧传感光纤各种组合,可得到 $10^\circ \sim 60^\circ$ 共 6 种角度的光纤监测网。本文以①号光纤为基准光纤,分别组合②—⑧号传感光纤,共构成 7 种组合。理论分析及试验研究得到了光纤裂缝传感器的测试应变和裂缝宽度及开展角度的定量关系式,如下所示:

$$\begin{cases} \epsilon_1 = (466.7 - 0.7\theta_1 - 0.05\theta_1^2)w \\ \epsilon_2 = (466.7 - 0.7\theta_2 - 0.05\theta_2^2)w \\ \theta_1 + \theta_2 = \gamma \end{cases} \quad (9)$$

式中: ϵ_1 和 ϵ_2 分别为①号和②—⑧传感光纤的测试应变; γ 值为 7 种组合得到的光纤组夹角。由式(9)可得到各种光纤组合下①号传感光纤的裂缝夹角 θ_1 以及裂缝宽度 w 。图 10 绘制了①号传感光纤在各种光纤组合下,各级裂缝宽度下夹角 θ_1 值的分布图。

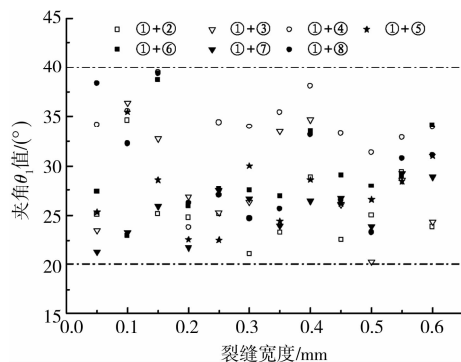


图 10 裂缝夹角 θ_1 值分布图

试验设计中 θ_1 的真实值为 30° ,根据光纤裂缝传感器测试的①号传感光纤裂缝夹角大致分布在 20° 至 40° 区间范围内,其中 25° 至 30° 之间分布较为密集,测试最大误差约为 $\pm 30\%$ 。图 11 绘制了各种传感光纤组合下,裂缝测试宽度的分布图。

图中实际裂缝宽度由百分表记录,由图可知各种传感光纤组合确定的监测网获取的裂缝宽度具有较好一致性,所有点的测试误差均分布在 $\pm 20\%$ 范围内,其中大部分点仅存在 $\pm 10\%$ 的测试误差。裂缝模拟试验表明分布式裂缝光纤应变监测方法能有效监测结构裂缝的开展过程,其中 BOTDA 测试误

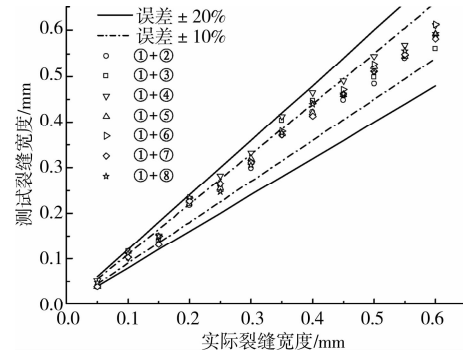


图 11 裂缝测试宽度分布图

差及试验误差会引起测试误差,但其误差在合理限值范围内。

3 结论

对采用 BOTDA 技术结合斜交光纤组监测结构裂缝开展过程的分布式裂缝光纤应变监测方法进行了理论分析和试验研究,得出如下结论:

1)通过理论分析建立了光纤应变和裂缝宽度及走向的数值关系,并提出斜交光纤组监测结构裂缝开展的理论公式。

2)通过标定试验对分布式光纤裂缝传感器的标距和预拉力进行了优化和比选,并标定了 300 mm 标距的光纤裂缝传感器实测应变和裂缝宽度及夹角的定量关系。

3)通过裂缝模拟试验对裂缝开展进行了跟踪监测,结果表明斜交光纤组能有效得到光纤与裂缝之间夹角值并实时监测裂缝宽度变化。

采用 BOTDA 技术进行裂缝开展监测可有效解决 OTDR 裂缝监测中光纤复用性差的难题,同时 BOTDA 裂缝监测可作为大型结构光纤健康监测的重要补充,在进行结构整体监测过程中完成局部裂缝的重点监测。为完善该技术还需进一步研究如何消除 BOTDA 技术的空间分辨率对光纤所测应变的影响;为实现在实际工程中应用,需研究光纤传感器的布设方式,从传感光纤应变中剔除结构自身均匀应变,从而进行裂缝监测。

参考文献:

- [1] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京:中国工业出版社, 1997.
- [2] LEE D C, LEE J J, KWON I B. Monitoring of fatigue crack growth in steel structures using intensity-based optical fiber sensors[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2000, 11:100-107.
- [3] GUIDO PERRONE, MASSIMO OLIVERO, ALBERTO VALLAN, et al. Long term in-situ test of a low-cost fiber-

- based crack monitoring system[C]//Conference of IEEE Sensors, 2008: 325-328.
- [4] LEUNG CHRISTOPHER K Y, ELVIN NIELL, OLSON NOAH, et al. A novel distributed optical crack sensor for concrete structures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000,65: 133-148.
- [5] WAN KAI-TAI, LEUNG CHRISTOPHER K Y. Fiber optic sensor for the monitoring of mixed mode cracks in structures[J]. Sensors and Actuators, 2007, 135: 370-380.
- [6] 陈江, 刘浩吾. 分布式光纤裂缝检测的有限元分析及试验[J]. 力学学报, 2009,41(4): 542-548.
CHEN JIANG, LIU HAO-WU. Nonlinear finite element analysis and experiments of distributed fiber optical sensor system for crack detection[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009, 41(4): 542-548.
- [7] 吴永红, 蔡海文, 刘浩吾, 等. 裂缝光纤传感的工程应用[J]. 光电子·激光, 2007,18(12): 1438-1441.
WU YONG-HONG, CAI HAI-WEN, LIU HAO-WU, et al. Study on engineering applicability of optic fiber crack sensing[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2007, 18(12):1438-1441.
- [8] 孙宝臣, 徐华, 李剑芝, 等. 基于光纤网络的全分布裂缝检测技术研究[J]. 传感技术学报, 2007,20(7): 1672-1675.
SUN BAO-CHEN, XU HUA, LI JIAN-ZHI, et al. New technology study about crack monitoring based on optical net [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(7): 1672-1675.
- [9] 欧进萍, 侯爽, 周智, 等. 多段分布式光纤裂缝监测系统及其应用[J]. 压电与声光, 2007,29(2): 144-147.
OU JIN-PING, HOU SHUANG, ZHOU ZHI, et al. The multiline distributed fiber optic crack detection system and its application [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2007, 29(2): 144-147.
- [10] FABIO MATTA, FILIPPO BASTIANINI, NESTORE GALATI. Distributed strain measurement in steel bridge with fiber optic sensors: validation through diagnostic load test [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2008,22(4): 264-273.
- [11] 张桂生, 毛江鸿, 何勇, 等. 基于 BOTDA 的隧道变形监测技术研究[J]. 公路交通科技:应用技术版, 2009(8): 190-192.
ZHANG GUI-SHENG, MAO JIANG-HONG, HE YONG, et al. Study on tunnel deformation monitoring based on BOTDA [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009(8): 190-192.
- [12] 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]. 土木工程学报, 2011, 33(1):1-6.
JIN WEI-LIANG, MAO JIANG-HONG, HE YONG. Experiment analysis on real-time distributed strain measurement in concrete[J]. Journal of Civil, Architectural and Environment Engineering, 2011,33(1):1-6.
- [13] ZOU LU-FANG, FENG MARIA Q. Detection of micrometer crack by Brillouin-scattering-based distributed strain and temperature sensor[C]//Proc. of SPIE, 2008, 7004.
- [14] LU FEI, FENG MARIA Q, GUA XIN-YU, et al. Field experiment on monitoring of cracks in highway asphalt overlay[C]//Proc. of SPIE, 2009.
- [15] 钱振东, 韩光义, 黄卫, 等. 基于 BOTDA 的钢桥面铺装裂缝疲劳扩展研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(10): 132-136.
QIAN ZHEN-DONG, HAN GUANG-YI, HUANG WEI, et al. A study on crack fatigue propagation of steel deck pavement based on BOTDA[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(10): 132-136.
- [16] KWON I B, KIM C Y, CHOI M Y. Distributed strain and temperature measurement of a beam using fiber optical BOTDA sensor[C]//Proc. of SPIE, 2003: 486-496.
- [17] BAO XIAO-YI, DEMERCHANT M, BROWN A, et al. Tensile and compressive strain measurement in the lab and field with the distributed brillouin scattering sensor[J]. J. Lightwave Technol. 2001, 19(11): 698-704.

(编辑 胡英奎)