

分布式光纤传感技术及其在工程监测中的应用*

施斌 丁勇 索文斌 高俊启
(南京大学光电传感工程监测中心, 210093 南京)

[摘 要] 分布式光纤传感技术, 如布里渊散射光时域反射测量技术 (简称 BOTDR), 是国际上近几年才发展成熟的一项尖端技术, 应用非常广泛。本文着重介绍 BOTDR 分布式光纤传感技术在隧道、基坑和路面等三个方面的应用。在工程监测过程中积累起来的大量监测数据表明, BOTDR 分布式光纤传感技术, 是一种全新而可靠的监测方法, 它在工程实践中的应用, 为工程监测提供了一种新的思路, 因而必将拥有一个广阔的发展前景。

[关键字] BOTDR 光纤传感 工程监测 应变

1. 引言

随着人们对工程安全要求的日益提高, 近年来, 一批新式的传感监测得到发展, 它们不是对传统传感监测技术简单的加以改良, 而是从根本上改变了传感原理, 从而提供了全新的监测方法和思路。其中, 尤以 BOTDR 分布式光纤传感技术为世人所瞩目, 它利用普通的通讯光纤, 以类似于神经系统的方式, 植入建筑物体内, 获得全面的应变和温度信息。该技术已成为日本、加拿大、瑞士、法国及美国等发达国家竞相研发的课题。这一技术在我国尚处于发展阶段, 目前已在一些隧道工程监测中得到成功应用, 并逐步向其他工程领域扩展。

南京大学光电传感工程监测中心在南京大学 985 工程项目和国家教育部重点项目的支持下, 建成了我国第一个针对大型基础工程的 BOTDR 分布式光纤应变监测实验室, 开展了一系列的实验研究, 并成功地将这一技术应用到了地下隧道等工程的实际监测中, 取得了一批重要成果, 为将这一技术全面应用于我国各类大型基础工程和地质工程的质量监测和健康诊断提供了坚实基础。

2. BOTDR 分布式光纤传感技术的原理

布里渊散射同时受应变和温度的影响, 当光纤沿线的温度发生变化或者存在轴向应变时, 光纤中的背向布里渊散射光的频率将发生漂移, 频率的漂移量与光纤应变和温度的变化呈良好的线性关系, 因此通过测量光纤中的背向自然布里渊散射光的频率漂移量(ν_B)就可

*本项目研究受国家杰出青年科学基金项目 (40225006) 和国家教育部重点项目资助项目 (01086)

以得到光纤沿线温度和应变的分布信息。BOTDR 的应变测量原理如图 1 所示。

为了得到光纤沿线的应变分布，BOTDR 需要得到光纤沿线的布里渊散射光谱，也就是要得到光纤沿线的 ν_B 分布。BOTDR 的测量原理与 OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer) 技术很相似, 脉冲光以一定的频率自光纤的一端入射, 入射的脉冲光与光纤中的声学声子发生相互作用后产生布里渊散射, 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, 进入 BOTDR 的受光部和信号处理单元, 经过一系列复杂的信号处理可以得到光纤沿线的布里渊背散光的功率分布, 如图 1 中 (B) 所示。发生散射的位置至脉冲光的入射端, 即至 BOTDR 的距离 Z 可以通过式(1)计算得到。之后按照上述的方法按一定间隔改变入射光的频率反复测量, 就可以获得光纤上每个采样点的布里渊散射光的频谱图。

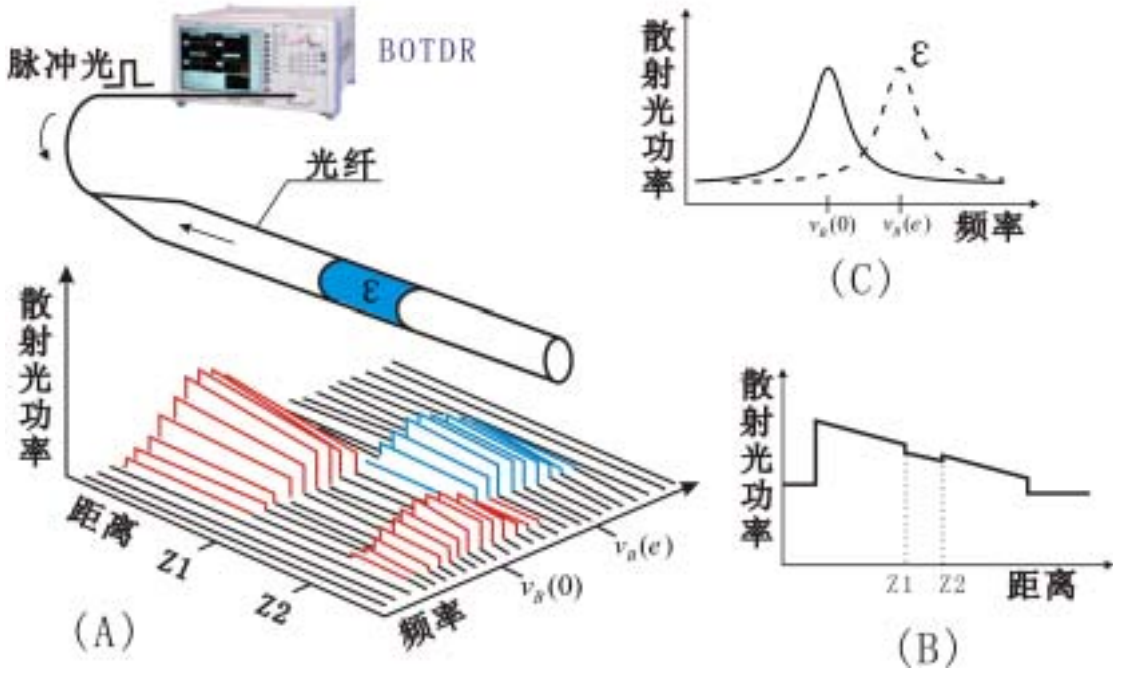


图 1 BOTDR 的应变测量原理图

如图 1 中 (C) 所示, 理论上布里渊背散光谱为洛伦兹形, 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, 拉伸段光纤的布里渊频移就要发生改变, 通过频移的变化量与光纤的应变之间的线性关系就可以得到应变变量。

$$Z = \frac{cT}{2n} \quad (1)$$

其中, c 为真空中的光速;

n 为光纤的折射率;

T 为发出的脉冲光与接收到的散射光的时间间隔。

目前国际上最先进的 BOTDR 监测设备 ,以日本 NTT 公司最新研制开发的最新一代 AQ8603 型 BOTDR 光纤应变分析仪为代表。表 1 为 AQ8603 的主要技术性能指标。

表 1 AQ8603 光纤应变分析仪的主要技术性能指标

测量范围(km)	1, 2, 5, 10, 20, 40, 80				
空间采样间隔(m)	1.00, 0.50, 0.20, 0.10, 0.05				
空间定位精度(m)	$\pm (2.0 \times 10^{-5} \times \text{测量范围(m)} + 0.2\text{m} + 2 \times \text{距离采样间隔(m)})$				
应变测量范围	- 1.5% ~ 1.5% (15,000 $\mu\epsilon$)				
脉冲宽度(ns)	10	20	50	100	200
空间分解度(m)	1	2	5	11	22
应变测量精度	$\pm 0.004\%$ (40 $\mu\epsilon$)		$\pm 0.003\%$ (30 $\mu\epsilon$)		
重复性	<0.04%		<0.02%		

3. 隧道安全监测

BOTDR 分布式光纤传感技术在隧道方面的应用，目前已经在国内日渐成熟。我们在几条隧道变形监测系统的建设过程中，已形成了一整套的成功经验，为该技术在岩土和地质工程安全监测中的推广提供了坚实的技术基础。

3.1 光纤铺设

为了使光纤精确地反映被测构筑物的应变状态，必须将之与构筑物紧密相连，铺设在构筑物上。铺设的好坏，直接关系到监测的实际效果，因而在工程应用中，有着十分重要的意义。

根据光纤监测系统的设计原则，结合工程实际情况以及 AQ8603 应力分布式光纤传感器的特点，基本有以下两种铺设方法：全面接着式铺设和定点接着式铺设，如图 2 所示。

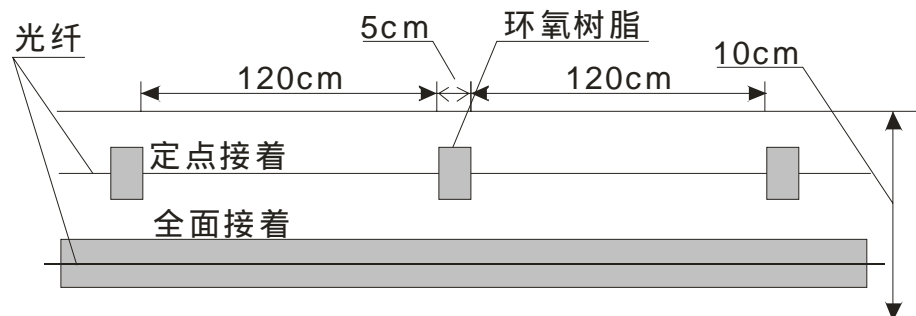


图 2 全面接着和定点接着

3.1.1 全面接着式铺设

分别沿隧道纵深方向和横断面按全面接着方式布设传感光纤。沿纵深方向布设的传感光

纤用于监测隧道纵向的整体变形情况,而沿横断面布设的光纤则是用于监测隧道横向的变形情况。

全面接着式铺设的特点是可以全程监测隧道的健康状况,监测对象为隧道整体,监测结果为隧道整体的变形情况。此种接着方式应用特定的铺设工艺,使用实验测定的效果优良的混合胶粘剂(以环氧树脂为主),将传感光纤按照设计线路粘着在混凝土的表面,并在传感光纤的末段接驳光缆,将监测信号传送至隧道监控中心。

3.1.2 定点接着式铺设

此种接着方式的特点是重点监测变形缝、应力集中区等潜在(或假定)变形处的变形情况。监测对象为变形缝等潜在(或假定)变形处,监测结果为变形缝等潜在(或假定)变形处的应力应变特征。此种接着方式的铺设方法大体等同于全面接着式铺设方式,所不同的是在设计施工面上选择一些特殊点进行粘着,即将光纤每隔 1m 至 1.5m 确定一个固定点,粘贴在混凝土墙面上,以此来检测隧道局部接缝处的变形(见图 3)。在某些特点地点,根据实际情况,选择在特定的线路上在特定的位置安装接缝传感器,以监测变形缝的变形情况(见图 4)。

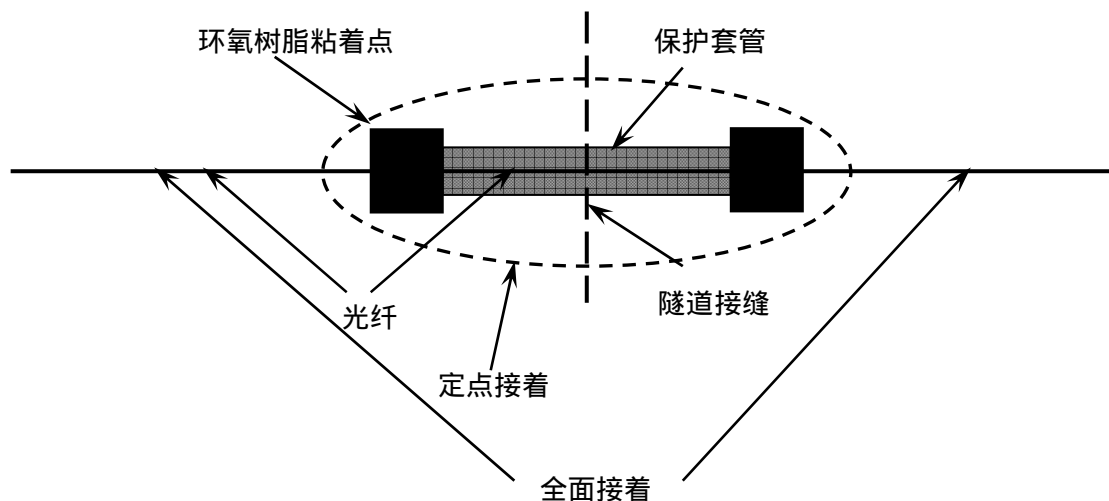


图 3 隧道接缝布线示意图

此外，结合数值模拟技术也可以实现变形的计算。可以将光纤的应变作为数值计算的边界条件或者已知条件，通过有限元或有限差分等计算方法，得到构筑物不同部位的各种变形。

总之，从隧道的应变转换到变形的计算常常比较复杂，但是只要通过合理地布置光纤监测网，采用正确的计算方法，隧道变形的计算是可以得到令人满意的结果。

4. 基坑变形监测

基坑变形监测是岩土工程领域的基本问题之一，基坑稳定性的重要性不言而喻。近半年来，课题组通过大量的室内外试验研究，将 BOTDR 技术成功的应用到了南京市几个深大基坑工程中，取得了一些十分有价值的成果。

众所周知，基坑变形原因复杂、类型繁多，但总体来说，主要是由基坑开挖引起的坑体水平位移问题和基底隆起问题。传统的监测方式，如土压力盒、测斜管等，由于自身传感方式的限制，往往有精度不高、抗腐蚀性差、损耗较大、浪费人力等缺点。课题组通过研究，成功的研制了一种具有专利技术的基于 BOTDR 技术的基坑位移监测分布式光纤传感系统。（分布式光纤传感智能测斜管）

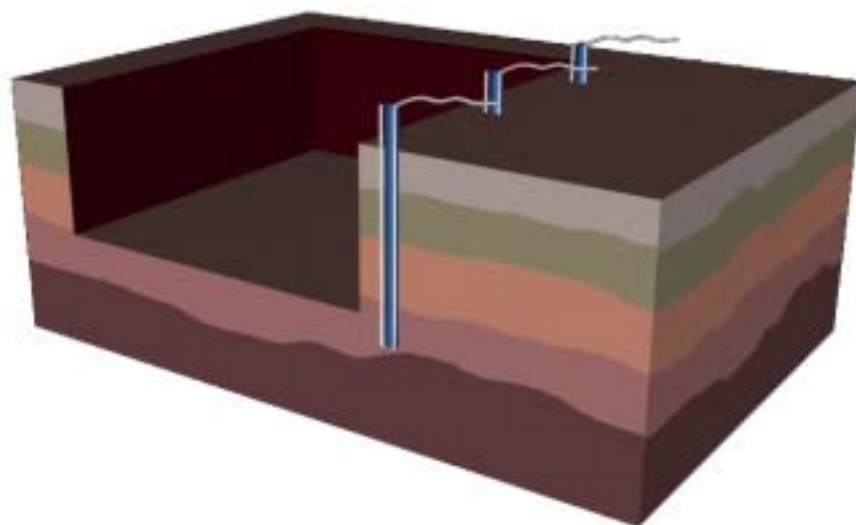


图 5 基坑位移监测分布式光纤传感系统

如图 5 所示，利用传统的测斜管器件与先进的 BOTDR 技术相结合，开发出上述传感器。应用传统的测斜管器件的目的在于：1.经传统方法验证，测斜管能够较理想的反映土体变形，是一种良好的材料；2.测斜管自身带有卡槽，免去了人工开槽的工作；3.该材料是常用的基坑监测材料，方便易得，比较经济；4.应用与传统监测方式一致的材料，方便对新、旧技术进行类比。该系统的构成，简言之是将光纤按照一定的施工工艺，用经室内外试验和工程实践验证过的特殊的胶黏着在测斜管上，构成传感系统，我们称之为分布式光纤传感智能测斜

管。该传感器具有分布式光纤传感器的一切优点，并可进行准实时监测。

应用 BOTDR 技术的分布式光纤传感器所得到的监测结果，是沿光纤传感器的轴向物理信息（应变、温度等），因此，如何获得沿光纤传感器分布的基坑水平变形量，也就成了问题的核心。经过研究，应用计算挠度的方法来近似计算基坑的水平变形量。

由材料力学相关知识可知，沿线各点的挠度可利用下式计算。

$$v(x) = \iint \left(-\frac{\varepsilon_x}{d}\right) dx dx \quad (4)$$

其中， ε_x 为所求点的光纤实测应变，其值为沿测斜管两侧的两条光纤的应变差；d 是粘贴在测斜管两侧的光纤之间的距离；积分起点为深部某无应变点， $v(x)$ 是各点的挠度，可以近似的认为是基坑的水平变形量。

5. 连续配筋混凝土路面检测

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^[8,9]。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。在其中 9 根钢筋上布设了传感光纤，温度补偿光纤 4 根，应变传感光纤 5 根，沿中心对称铺设。



图 6 光纤传感系统布置

图 7 为浇注混凝土开始 5 天内 BOTDR 检测的板表面混凝土应变变化。从图上可以清楚的看出沿路面纵向表面混凝土应变分布情况,而且可以根据最大拉应变的位置预测出路面可能产生裂缝的位置。如图中 79 m 处最有可能出现裂缝。

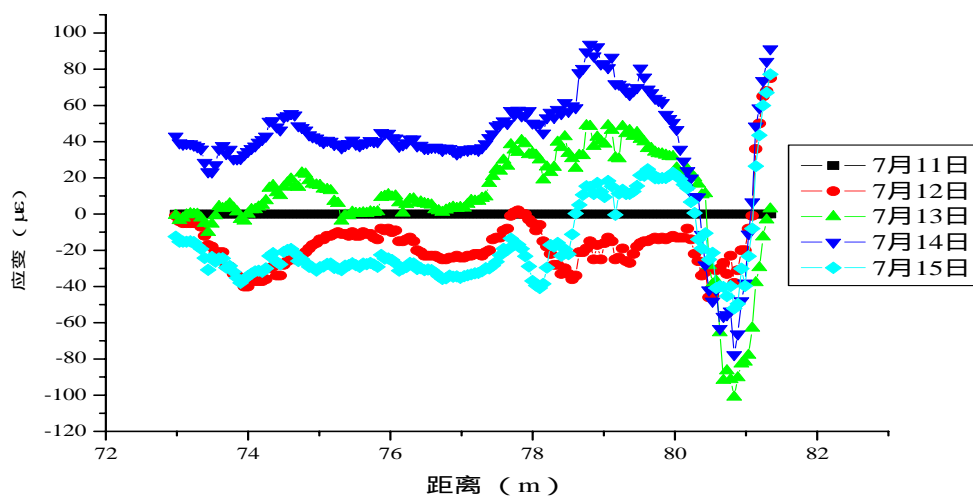


图 7 板表面混凝土应变分布

图 8 为浇注混凝土开始 5 天内 BOTDR 检测的钢筋应变变化。从图上可以清楚的看出沿路面纵向钢筋应变分布情况。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。

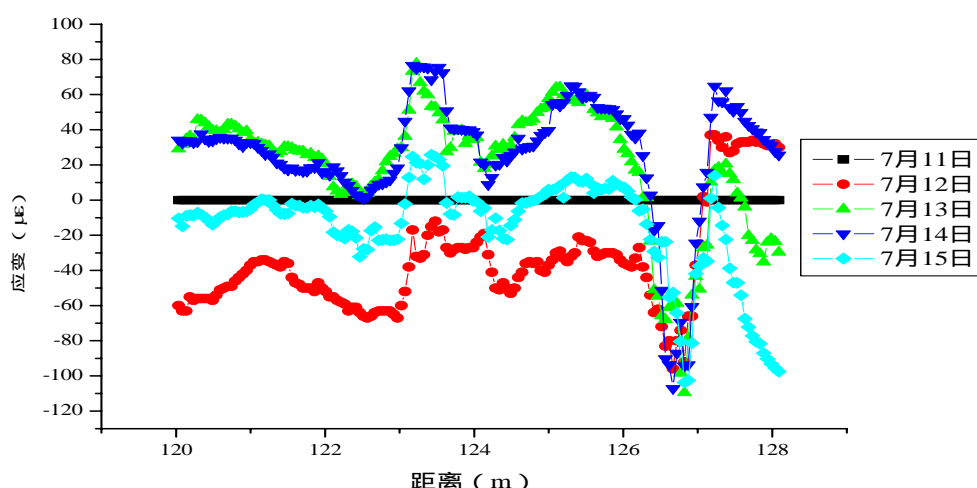


图 8 钢筋应变分布

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中的钢筋和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。

6. 结语

分布式光纤传感技术在我国尚处于起步阶段，虽然在隧道、基坑等部分领域取得了一定成功，但仍然有许多研究工作有待进一步开展，这包括两个方面，一是分布式光纤传感监测技术本身的进一步改良；二是要不断地解决在工程监测中的技术问题。可以相信，随着这一技术的不断研发和成熟，越来越多的大型基础工程将采用这一技术进行分布式监控和健康诊断，应用前景十分广阔，无法估量。

参考文献

1. Horiguchi T, Kurashima T, Tateda M. Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers. IEEE Photonics Technology Letters, 1989, 1(5): 107~108
2. Ohno H, Naruse H, Kihara M, Shimada A, Industrial applications of the BOTDR optical fiber strain sensor. Optical Fiber Technology, 2001, 7 (1): 45~64
3. Wu Z S, Takahashi T, Kino H and Hiramatsu K, Crack Measurement of Concrete Structures with Optic Fiber Sensing. Proceedings of the Japan Concrete Institute, 2000, 22(1): 409~414
4. Wu Z S, Takahashi T and Sudo K, An experimental investigation on continuous strain and crack monitoring with fiber optic sensors. Concrete Research and Technology, 2002 13 (2): 139~148
5. Li C et al, Distributed optical fiber bi-directional strain sensor for gas trunk pipelines. Optics and Lasers in Engineering, 2001,36: 41~47.
6. Uchiyama H, Sakairi Y, Nozaki T, An Optical Fiber Strain Distribution Measurement

- Instrument Using the New Detection Method. ANDO Technical Bulletin, 2002,10: 52~60
7. 黄民双, 陈伟民, 黄尚廉, 基于 Brillouin 散射的分布式光纤拉伸应变传感器的理论分析. 光电工程, 1995, 22(4): 11~36
 8. 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. 中外公路, 2003, 23(1): 1-4.
 9. 谢军, 查旭东 编译. 连续配筋混凝土路面设计指南. 国外公路, 2000, 20(5): 4-6.
 10. 施斌等, BOTDR 应变监测技术应用在大型基础工程健康诊断中的可行性研究, 岩石力学与工程学报 Vol. 22, No. 12, 2003
 11. Shi Bin et al, A Study on the application of BOTDR in the deformation monitoring for tunnel engineering, Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, A.A.Balkema Publishers, 2003: 1025-1030
 12. 徐洪钟, 施斌, 张丹, 丁勇, 崔何亮, 吴智深. 基于小波分析的 BOTDR 光纤传感器信号处理方法, 光电子激光, 2003(7)
 13. H.Z. Xu, B. Shi, Dan Zhang, Yong Ding, Heliang Cui, Data processing in botdr distributed strain measurement based on wavelet analysis, *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*, A.A.Balkema Publishers, 2003: 345-349
 14. 张巍, 吕志涛. 光纤传感器用于桥梁监测. 公路交通科技, 2003, 20(3): 91-95
 15. 张丹, 施斌, 吴智深, 徐洪钟, 丁勇, 崔何亮, BOTDR 分布式光纤传感器及其在结构健康监测中的应用, 土木工程学报, 2003, 36(11): 83-87
 16. Dan Zhang, Bin Shi, Hongzhong Xu, Yong Ding, Heliang Cui & Junqi Gao, Application of BOTDR into structural bending monitoring, *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*, A.A.Balkema Publishers, 2003: 271-276
 17. Dan ZHANG, Bin SHI, Junqi GAO, Hongzhong XU, The recognition and location of cracks in RC T-beam structures using BOTDR-based distributed optical fiber sensor, SPIE, 2004
 18. 张丹, 施斌, 徐洪钟, 高俊启, 朱虹, BOTDR 用于钢筋混凝土 T 型梁变形监测的试验研究, 东南大学学报 (待刊)
 19. 丁勇 施斌 吴智深 岩土工程监测中的光纤传感器 第四届全国岩土工程大会会议论文集 2003: 283-291
 20. Ding, Y., Shi, B., Cui, H.L., Gao, J.Q., & Chen, B. 2003. The stability of optical fiber as strain sensor under invariable stress. *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*, A.A.Balkema Publishers, 2003: 267-270