

Application of Distributed Optical Fiber Sensing Technology in Static Load Test of Precast Large Box Girder Bridge

Jiwei Fang¹, Yafei Feng², Huan Zheng², Xiangyun Li¹, Jianchao Zhu¹, Shengchun Liu³

¹Ningbo Communication Construction Engineering Testing Center Co. Ltd., Ningbo Zhejiang

²Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou Zhejiang

³Beijing Jiaotong University, Beijing

Email: 379884582@qq.com, fengyafeicool@163.com, 34706382@qq.com, 289020260@qq.com, 412334440@qq.com, 897348068@qq.com

Received: Oct. 26th, 2018; accepted: Nov. 16th, 2018; published: Nov. 23rd, 2018

Abstract

Taking the Hangzhou Bay Cross-Sea Bridge Hangzhou-Ningbo Expressway connecting line highway project as the background, the measuring point arrangement of strain cable and digital strain sensor in the load test of the main line 28-span prefabricated large box girder bridge is introduced, which is measured under static load conditions. The strain distribution of the whole bridge and the strain value of the mid-span section are measured under the static load condition, and the theoretical modeling analysis of the bridge is tested, comparing the theoretical results with the measured values. The research shows that the distributed optical fiber sensing technology test data is not only consistent with the actual measurement of the strain gauge, but also the continuous strain distribution of the beam bottom. The surface distributed optical fiber sensing technology has high application value in bridge detection.

Keywords

Optical Fiber Sensing, Precast Concrete Box Girder, Distributed, Calibration Coefficient, Residual Coefficient

预制大箱梁桥静载试验中分布式光纤传感技术的应用

方继伟¹, 冯亚非², 郑欢², 李湘云¹, 朱建朝¹, 刘胜春³

¹宁波市交通建设工程试验检测中心有限公司, 浙江 宁波

²杭州应用声学研究所, 浙江 杭州

³北京交通大学, 北京

Email: 379884582@qq.com, fengyafeicool@163.com, 34706382@qq.com, 289020260@qq.com, 412334440@qq.com, 897348068@qq.com

摘要

以杭州湾跨海大桥杭甬高速连接线公路工程为背景，介绍了主线28联跨径预制大箱梁桥荷载试验中应变光缆和数码应变传感器的测点布置，在静载工况下测量得到桥梁的整体应变分布情况和跨中截面的应变值，并对待测桥梁进行理论建模分析，对比理论结果和实测值。研究表明分布式光纤传感技术测试数据不仅与应变计实际测量相吻合，还能得到梁底连续应变分布，表面分布式光纤传感技术在桥梁检测中具有较高的应用价值。

关键词

光纤传感，预制混凝土箱梁，分布式，校验系数，残余系数

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国民经济和社会的发展，桥隧道路正在向着长大型结构发展，目前针对桥梁静载试验中的应力/应变检测，国内外学者和工程界主要采用传统的点式应变传感器进行检测，所以对大型结构的健康监测要求和人为维护成本都大大增加，很难满足测试的要求。上世纪70年代 Ippen 首次观测到布里渊散射现象[1]，后来包晓毅等人[2] [3]证明了光纤中布里渊频移与应变、温度的线性关系。分布式光纤传感技术以光纤本身为传感器，测量距离远(达到100 km)，空间分辨率高(达到厘米级别)，测量精度高(达到 $5 \mu\epsilon$)，成本低等优点而逐渐应用于隧道、桥梁等结构的健康监测等领域[4] [5] [6]。

2. 技术原理

2.1. 基本原理

若光纤中存在两束反向的脉冲泵浦光和连续探测光，并且两列光的频率差在布里渊光谱内，由于电致伸缩效应产生受激布里渊散射作用，两者之间发生能量转移，频率高的光信号对频率低的光信号产生放大作用，通过检测连续光的频移来确定温度或应变信息，如图1所示。

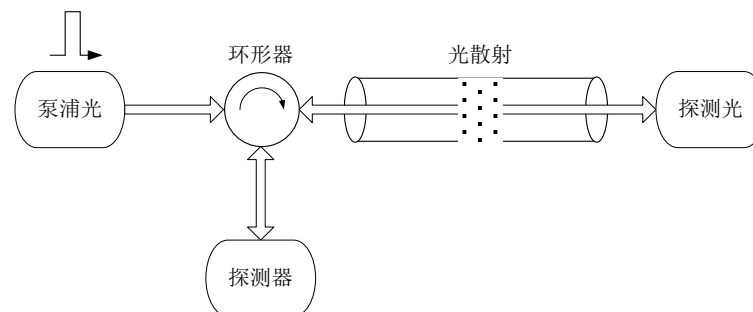


Figure 1. Schematic diagram of distributed optical sensing technology

图1. 分布式光纤传感技术原理图

增益谱峰处的频移(布里渊频移)与光纤所受应变成正比关系,所以测得光纤各点的布里渊频移值,可由下式得到光纤各点所受应变:

$$\Delta f = C_{11} \times \Delta \varepsilon + C_{12} \times \Delta T \quad (1)$$

其中是布里渊频移变化量,是应变变化量,是温度变化量, C_{11} 及 C_{12} 分别是布里渊频移/应变系数和频移/温度系数。

2.2. 系数标定

通过标定试验可以得到频移/温度系数和频移/应变系数大小,如图2所示,两个系数分别为0.046 MHz/ $\mu\varepsilon$ 和0.925 MHz/ $^{\circ}\text{C}$,因此通过探测布里渊信号的频移变化值就可获得沿光纤分布的温度及应变信息,实现分布式光纤传感。

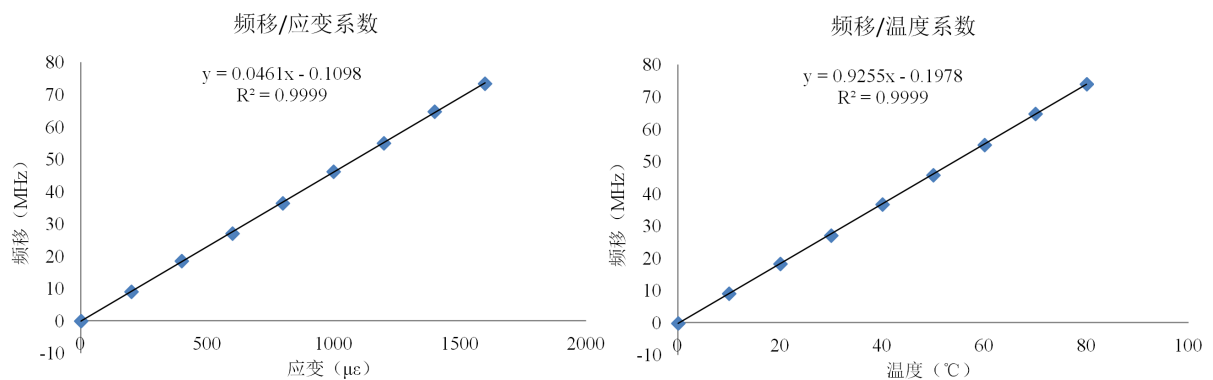


Figure 2. Brillouin frequency/strain coefficient frequency/temperature coefficient

图2. 布里渊频移/应变系数和频移/温度系数标定图

2.3. 数据处理方法

假如施工现场已知温度变化情况,或者引入温度光缆,温度光缆只测量温度变化量,没有应变变化量,而应变光缆可以同时感受应变和温度变化情况,那么应变光缆和温度光缆得到的频移结果如下:

$$\begin{aligned} \Delta f_1 &= C_{11} \times \Delta \varepsilon_1 + C_{12} \times \Delta T \\ \Delta f_2 &= C_{22} \times \Delta T \end{aligned} \quad (2)$$

通过两者联立可得到结构的应变变化情况:

$$\Delta \varepsilon_1 = \frac{\Delta f_1 - \frac{\Delta f_2}{C_{22}} \times C_{12}}{C_{11}} \quad (3)$$

3. 工程介绍

3.1. 工程概况

杭州湾跨海大桥杭甬高速连接线公路工程(余夫公路至小曹娥互通段)是浙江省“两纵两横十八连三绕三通道”高速公路网中杭州湾宁波通道的重要组成部分,承担杭州湾通道路网辐射的功能。本项目采用高速公路建设标准,设计速度100 km/h,双向四车道,全线高架,桥梁宽度25.5 m,设计汽车荷载为公路-I级,主线第28联,为35 m长预制大箱梁结构,具体实物照片如图3所示。



Figure 3. Bridge site inspection map
图 3. 桥梁现场检测图

3.2. 施工加装

将分布式传感光纤粘贴在 1 号桥第一跨的第 A2、A4 两片 T 梁的下部、再将光纤光栅传感器粘贴在 A2、A4 号 T 梁下部的中间位置。粘贴的立面图如图 4 所示。

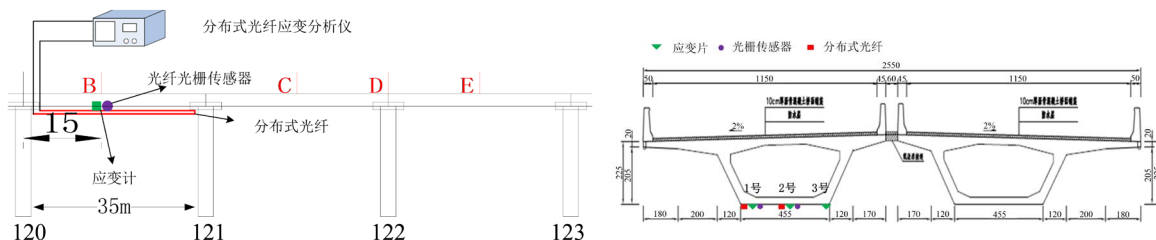


Figure 4. Main line 28th sensor installation diagram (upper elevation, bottom section)
图 4. 主线第 28 联传感器加装图(上为立面图, 下为截面图)

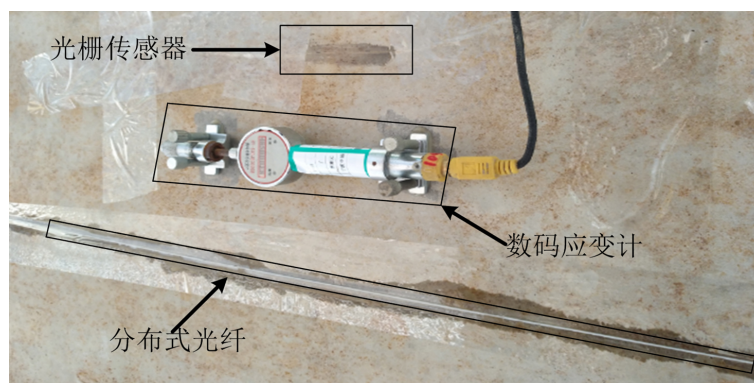
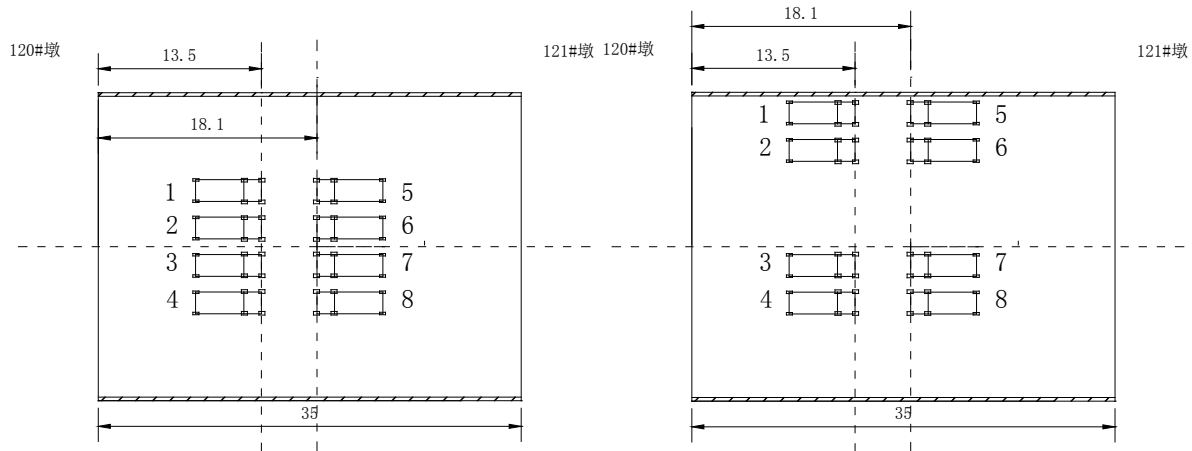


Figure 5. Sensor and sensor cable installation physical map
图 5. 传感器和传感光缆安装实物图

传感光缆采用紧包光缆, 紧包光缆采用热挤塑方式将护套紧紧包裹住光纤, 具有内部应力分布均匀、应变传递性好、长期稳定性好等特点; 光纤光栅传感器采用的裸光栅, 同样裸光栅具有很好的应变传递性; 应变计采用的是动静态应变传感器(HY-65DJB3000B), 具体安装实物图如图 5 所示。

3.3. 加载工况

桥梁设计荷载为公路 I 级, 采用单车重 300 kN 的车辆进行加载, 静载荷分为跨中正弯矩二级中载和偏载, 加载如图 6 所示。



(注: 分级加载, 一级: 1、2、3、4 二级: 5、6、7、8)

Figure 6. Cross-positive bending moment (medium load, partial load)

图 6. 跨中正弯矩(中载、偏载)

4. 试验与结果

4.1. 模型分析

采用 MIDAS CIVIL 2015 对本联桥梁进行理论计算. 主梁采用梁单元进行模拟, 全模型结构如图 7 所示。

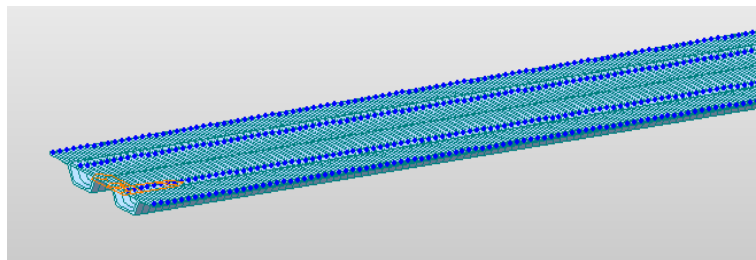


Figure 7. Main line 28th bridge model interface diagram

图 7. 主线第 28 联桥模型界面图

4.2. 数据分析

4.2.1. 1 号中载应变

如图 8 所示, 为混凝土箱梁 1 号传感器位置粘贴的应变传感器、光纤光栅传感器和分布式光纤测得的中载应变值对比结果图。从图中可得, 分布式光纤总长度约为 30.5 m (跨径为 35 m, 两端墩顶无法布设), 基本覆盖了混凝土箱梁的跨径全部。从图中可得, 分布式光纤应变最大 30.7 m 的位置, B 截面在跨径的 0.4 位置, 即 $18.3 + 30.5 \times 0.4 = 30.5$ m, 与实际情况相符。三种测量方法得到的 B 截面各级荷载情况应变值都很接近, 说明分布式光纤能较好的反应混凝土预制箱梁的整体应变, 而光纤光栅传感器和应

变计只能测量单点的应变变量。

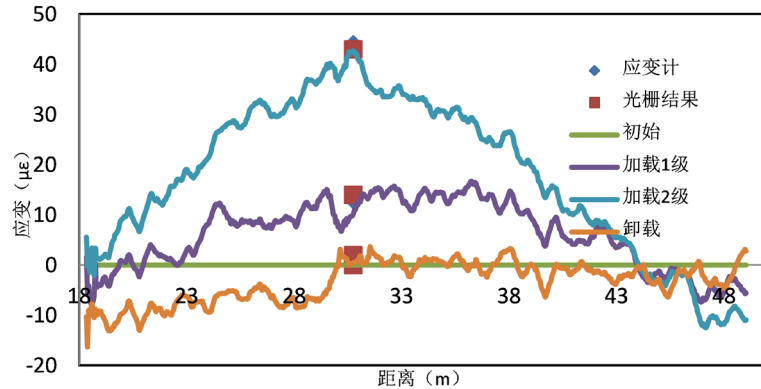


Figure 8. Distributed fiber, grating, strain gauge strain comparison results in sensor No. 1
图 8. 1号传感器中载分布式光纤、光栅、应变计应变对比结果

Table 1. Load Strain Comparison of No. 1 Sensor B Section

表 1. 1号传感器 B 截面中载应变对比

工况	应变计	光栅	分布式光纤应变	理论
一级(με)	13.00	14.00	10.21	
二级(με)	44.00	43.00	42.69	52.00
卸载(με)	1.00	2.00	0.49	
校验系数	0.85	0.83	0.82	
残余系数	0.02	0.05	0.01	

对测量结果作表 1 所示，最大荷载时分布式光纤与应变计应变最大差值仅为 1.3 με，校验系数为 0.82 (<1)，残余系数为 0.01 (<0.2)，满足规范测试要求[7]。

4.2.2.2 号中载应变

如图 9 所示，为混凝土箱梁 2 号传感器位置粘贴的应变传感器、光纤光栅传感器和分布式光纤测得的中载应变值对比结果图。由于是回路测量，所以分布式光纤测量得到的应变结果与图 8 趋势相反，应变最大值出现在总长度的 0.6 位置，从图中可得，分布式光纤总长度约为 30.5 m (跨径为 35 m，两端墩顶无法布设)，基本覆盖了混凝土箱梁的跨径全部，光缆数据起点为 52.3 m，最大位置为 52.3 + 30.5 × 0.6 = 70.6 m，实际最大位置在 70 m 左右，与理论相符合。

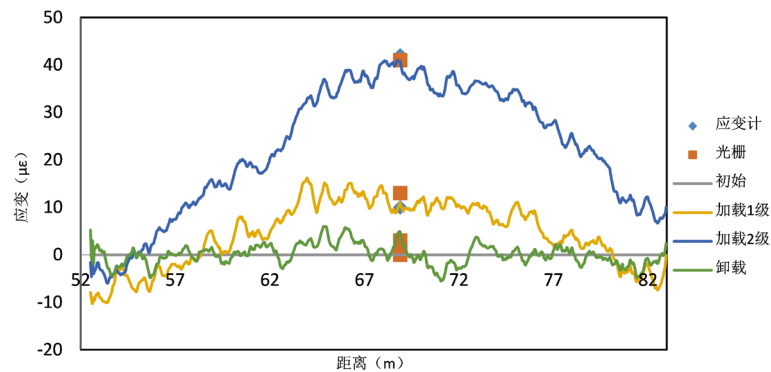


Figure 9. Distributed fiber, grating, strain gauge strain comparison results in sensor No. 2
图 9. 2号传感器中载分布式光纤、光栅、应变计应变对比结果

Table 2. Load Strain Comparison of No. 2 Sensor B Section
表 2. 2 号传感器 B 截面中载应变对比

工况	应变计	光栅	分布式光纤应变	理论
一级($\mu\epsilon$)	10.00	13.00	10.96	
二级($\mu\epsilon$)	42.00	41.00	40.80	52.00
卸载($\mu\epsilon$)	2.00	3.00	4.84	
校验系数	0.81	0.79	0.78	
残余系数	0.05	0.07	0.12	

作表 2 所示, 三种测量方法得到的 B 截面各级荷载情况应变值都很接近, 说明分布式光纤能较好的反应混凝土预制箱梁的整体应变, 而光纤光栅传感器和应变计只能测量单点的应变值。最大荷载时分布式光纤与应变计应变最大差值仅为 $1.2 \mu\epsilon$, 校验系数为 $0.78 (<1)$, 残余系数为 $0.12 (<0.2)$, 满足规范测试要求。

4.2.3.1 号偏载应变

如图 10 所示, 为混凝土箱梁 1 号传感器位置粘贴的应变传感器、光纤光栅传感器和分布式光纤测得的偏载应变值对比结果图。从图中可得, 分布式光纤应变最大 30.7 m 的位置, 与实际情况相符。三种测量方法得到的 B 截面各级荷载情况应变值都很接近, 说明分布式光纤能较好的反应混凝土预制箱梁的整体应变, 而光纤光栅传感器和应变计只能测量单点的应变值。

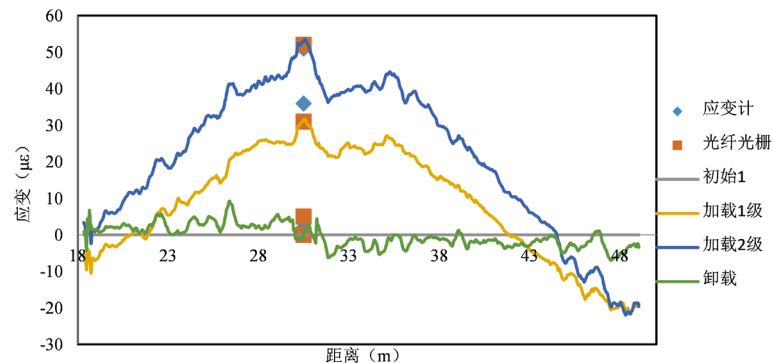


Figure 10. Distributed fiber, grating, strain gauge strain comparison results in sensor No. 1
图 10. 1 号传感器中载分布式光纤、光栅、应变计应变对比结果

Table 3. Offset load Strain Comparison of No. 1 Sensor B Section
表 3. 1 号传感器 B 截面偏载应变对比

工况	应变计	光栅	分布式光纤应变	理论
一级($\mu\epsilon$)	36.00	31.00	31.68	
二级($\mu\epsilon$)	51.00	52.00	52.90	64.00
卸载($\mu\epsilon$)	2.00	5.00	1.26	
校验系数	0.80	0.81	0.83	
残余系数	0.04	0.10	0.02	

对测量结果作表 3 所示, 最大荷载时分布式光纤与应变计应变最大差值仅为 $1.9 \mu\epsilon$, 校验系数为 0.83

(<1), 残余系数为 0.02 (<0.2), 满足规范测试要求。

4.2.4.2 号偏载应变

如图 11 所示, 为混凝土箱梁 2 号传感器位置粘贴的应变传感器、光纤光栅传感器和分布式光纤测得的偏载应变值对比结果图。由于是回路测量, 所以分布式光纤测量得到的应变结果与图 10 趋势相反, 而且是偏载工况, 左右 1 号传感器位置的分布式光纤应变测量结果均大于二号传感器位置的分布式光纤应变测量值, 与实际情况相符合。

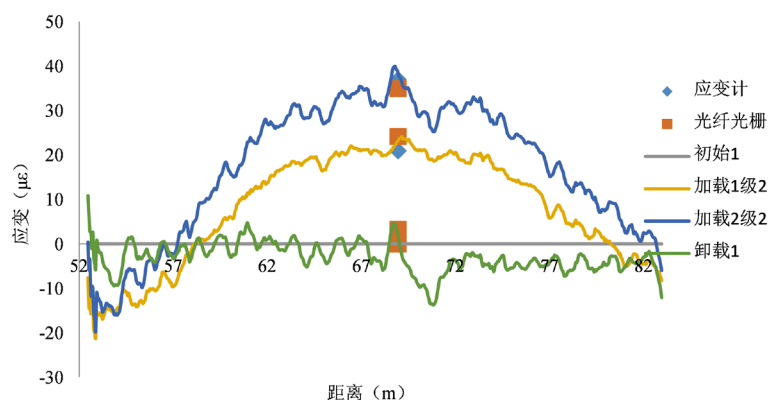


Figure 11. Distributed fiber, grating, strain gauge strain comparison results in sensor No. 2

图 11. 2 号传感器偏载分布式光纤、光栅、应变计应变对比结果

Table 4. Offset load Strain Comparison of No. 2 Sensor B Section

表 4. 2 号传感器 B 截面偏载应变对比

工况	应变计	光栅	分布式光纤应变	理论
一级(με)	21.00	24.17	23.14	
二级(με)	37.00	35.00	38.47	64.00
卸载(με)	3.00	3.33	2.02	
校验系数	0.58	0.55	0.60	
残余系数	0.08	0.10	0.05	

对测量结果作表 4 所示, 三种测量方法得到的 B 截面各级荷载情况应变值都很接近, 说明分布式光纤能较好的反应混凝土预制箱梁的整体应变, 而光纤光栅传感器和应变计只能测量单点的应变值。最大荷载时分布式光纤与应变计应变最大差值仅为 1.4 με, 校验系数为 0.6 (<1), 残余系数为 0.05 (<0.2), 满足规范测试要求。

5. 结论

1) 成功的将分布式光纤传感技术应用于混凝土预制大箱梁桥的静载试验中, 结果表明该技术能够测量桥梁的整体应变分布情况, 实测曲线和传统应变传感器基本吻合。

2) 通过对比分布式光纤、光纤光栅、应变计的实测值可知, 分布式光纤传感技术具有较高的应变测量精度, 满足实际测试要求。

3) 分布式光纤传感技术采用的光缆结构简单, 应变传递性好, 测量精度高, 价格便宜, 不仅适用于传统的静载检测试验, 更适合长距离、大范围的结构健康监测。

基金项目

北京市交通行业科技项目(KJ-2017-7); 宁波市交通运输科技项目(201712); 河南省交通厅科技项目(2016Y1)。

参考文献

- [1] Ippen, E.P. and Stolen, R.H. (1972) Stimulated Brillouin Scattering in Optical Fibers. *Applied Physics Letters*, **21**, 539-541. <https://doi.org/10.1063/1.1654249>
- [2] Horiguchi, T., Kurashima, T. and Tateda, M. (1989) Tensile Strain Dependence of Brillouin Frequency Shift in Silica Optical Fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, **1**, 107-108. <https://doi.org/10.1109/68.34756>
- [3] Bao, X., Webb, D.J., *et al.* (1996) Distributed Temperature Sensor Based on Brillouin Loss in an Optical Fibre for Transient Threshold Monitoring. *Canadian Journal of Physics*, **74**, 1-3. <https://doi.org/10.1139/p96-001>
- [4] 国兵, 隋青美, 韦斌. 基于布里渊散射的分布式光纤传感器的发展[J]. 信息技术与信息化, 2009(3): 56-57.
- [5] 张桂生, 毛江鸿, 何勇, 金伟良. 基于 BOTDA 的隧道变形监测技术研究[J]. 公路, 2010(2): 204-209.
- [6] 杨樟成, 罗剑波, 等. 布里渊光时域分析技术在桥梁静载试验中的应用[J]. 声学与电子程, 2015, 119(3): 11-14.
- [7] 交通部公路科学研究所, 交通部公路局技术处, 交通部公路规划设计院. 大跨径混凝土桥梁的试验方法[R]. 柏林: 国际铁路合作组织, 1982.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org