

黑龙江呼兰河大桥的光纤光栅智能监测技术

欧进萍 周 智 武湛君 赵雪峰 莫淑华

(哈尔滨工业大学土木工程学院)

(黑龙江工程学院)

摘要: 对光纤光栅波长变化与应变的关系进行了理论分析, 并通过材料试验和等强度梁试验加以验证; 研究了光纤光栅的布设工艺, 并在黑龙江省呼兰河大桥预应力箱形梁的施工过程中成功地布设了 12 个光纤光栅应变传感器与 3 个温度传感器; 布设的传感器监测了预应力箱形梁张拉过程的钢筋应变历程, 以及箱形梁静载试验的钢筋应变增量与分布; 大桥建成后, 利用布设的光纤光栅应变和温度传感器对呼兰河大桥进行了阶段性运营监测, 监测了车辆荷载下的应变历程和大桥温度变化过程。监测结果表明埋入的光纤光栅可以方便地监测汽车的流量及其可能的疲劳损伤, 为桥梁结构的健康诊断提供依据。一年多的考验表明, 光纤光栅的稳定性与耐久性满足钢筋混凝土桥梁结构长期健康监测的要求, 性能明显优于传统的电阻应变片。

关键词: 光纤光栅应变传感器; 桥梁监测; 应变监测; 温度监测

中图分类号: TP212 U12

文献标识码: A

文章编号: 1000-131X (2004) 01-0045-06

INTELLIGENT MONITORING OF HEILONGJIANG HULAN RIVER BRIDGE BASED ON FBGS

Ou Jinping Zhou Zhi Wu Zhanjun Zhao Xuefeng

Mo Shuhua

(Harbin Institute of Technology)

(Heilongjiang Institute of Technology)

Abstract: The relationship between FBG's Wavelength change and Strain has been studied theoretically and testified by testing of material and equal strength beam. Techniques of installation of FBGs have been explored, and 12 strain sensors and 3 temperature sensors have been successfully installed on the prestressed box girder during the construction of Heilongjiang Hulanzhan River Bridge. Strain of the reinforced steel bars has been monitored during the course of prestress tension with the FBG strain sensors in the box girder, and the strain increments and distribution have also been monitored when the box girder under dead load with these sensors. After the bridge finished, the FBG sensors monitored the strain course under traffic load and temperature changes of the bridge. The monitoring results show that traffic fluxes and possible fatigue damages can be monitored conveniently by embedded FBG sensors, and information can be provided for structural health diagnosis. That the FBG strain sensors have withstood the ordeal for more than one year proves that their durability and stability satisfies the need of health monitoring for bridges, and FBG strain sensor is more adaptive to long-term structural health monitoring than the electric strain gauge.

Keywords: fiber Bragg grating strain sensor; bridge monitoring; strain monitoring; temperature monitoring

1 引 言

大型、重要的桥梁结构服役期长达几十年, 甚至上百年, 在疲劳、腐蚀与材料老化等不利因素共同作用下, 不可避免地产生损伤累积, 甚至引发突发事件^[1, 2], 如 1994 年韩国汉城的圣水大桥断塌事件; 1999 年震惊中国的綦江虹桥事件与宁波大桥事件;

2000 年台湾高屏大桥事故等。虽然一些桥梁事故发生前出现了漏洞、塌陷、开裂等症状, 可惜缺乏监测预警系统, 无法避免事故的发生。鉴于上述情况, 已建成使用的桥梁结构急需采取有效手段监测和评定其安全状况、修复和控制损伤, 在不可抗拒因素下预警; 新建的桥梁结构应积极考虑增设长期的“健康”监测与损伤控制系统, 实时地把握工程结构的全寿命质量与安全状况, 确保桥梁结构的安全、适用与耐久性^[2, 3]。美国 20 世纪 80 年代中后期开始在多座桥梁上布设监测传感器, 用以验证设计假定、监视施工质量和服役安全状态; 英国 20 世纪 80 年代后期开始研制和安装大型桥梁的监测仪器和设备, 并调查和比较

收稿日期: 2002-03-28, 收到修改稿日期: 2002-05-23

国家 863 计划项目 (2001AA602023), 国家高技术应用发展项目和 (1999—2062) 国家自然科学基金 (50308008) 资助

了多种长期监测系统的方案;我国香港的 Lantau Fixed Crossing 大桥、青马大桥以及内陆的虎门桥和江阴长江大桥也都在施工期间装设了传感装置,用以监测建成后的服役安全状态^[2]。

然而,传统的传感器在抗电磁场干扰、抗腐蚀、抗潮湿等能力上难以适应桥梁结构恶劣的工作环境,由它们组成的长期监测系统在稳定性、耐久性和分布范围上都不能很好地满足工程实际需要。近年发展起来的高性能、大规模分布式智能传感元件,尤其是光纤光栅传感元件为桥梁结构智能监测系统的发展提供了基础。光纤光栅传感器具有抗电磁干扰;耐久性好;质量轻,体积小;可以分布式测量;绝对测量;精度高等优点。

光纤光栅已在很多领域得到应用,文献 [3、4] 综述了布拉格光栅传感器在航空航天、复合材料、混凝土、高压输电线、医学等领域的应用研究。桥梁方面,瑞典的 Nellen^[5] 等人在 Lucerne 桥预应力碳纤维索上布置了光纤光栅传感器,可以测量高达 8000 $\mu\epsilon$ 的应变值。美国的 Fuhr^[6] 在 Winooski 河上的 Waterbury 大桥的面板上埋入了 8 个布拉格光栅传感器,并探测到了 50 $\mu\epsilon$ 的应变值;美国的 Udd^[7] 等人在 Horsetail Falls 桥的复合材料加固过程中布设了 28 个布拉格传感器,以备长达两年的健康监测。国内对光纤光栅的传感研究已有部分成果,但尚未见具体的工程应用报导。

本文将对光纤光栅的应变传感特性进行分析和试验研究;研究光纤光栅的布设工艺、桥梁结构箱形梁预应力张拉过程的钢筋应变历程、静载作用下的应变增量与分布的监测技术,并进行桥梁阶段性运营监测。

2 光纤光栅的应变传感特性

2.1 光纤光栅波长变化与应变关系

光纤光栅反射中心波长条件为

$$\lambda = 2n\Lambda \quad (1)$$

式中, λ 为光栅中心波长; n 为纤芯有效折射率; Λ 为纤芯折射率的调制周期。

将式 (1) 两边微分,得

$$d\lambda = 2\Lambda dn + 2nd\Lambda \quad (2)$$

式 (1) 除式 (2), 得

$$d\lambda/\lambda = dn/n + d\Lambda/\Lambda \quad (3)$$

在线弹性范围内,有

$$d\Lambda/\Lambda = \epsilon \quad (4)$$

式中, ϵ 为应变。

不考虑波导效应,即不考虑光纤轴向变形对折射率的影响,光纤在单轴弹性变形下的折射率变化如下:

$$dn/n = -\frac{n^2}{2}[P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]\epsilon \quad (5)$$

式中, P_{11} 与 P_{12} 为光弹常数; ν 为泊松比,令 $P = [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]n^2/2$, 由式 (3)、(4) 和 (5) 可得

$$\Delta\lambda/\lambda = (1 - P)\epsilon \quad (6)$$

上式即为假定温度恒定时应变与波长变化的数学关系。对于纤芯是纯石英的光纤情况, $n = 1.456$, $P_{11} = 0.121$, $P_{12} = 0.270$, $\nu = 0.17$, 得 P 值约为 0.22。若分别取中心波长为 1545nm、1550nm、1555nm 时,由式 (6) 计算得单位微应变导致的波长变化分别为 1.205pm、1.209pm、1.212pm。由此表明在中心波长变化不大时,约为 1.2pm/ $\mu\epsilon$ 。

2.2 光纤光栅应变传感标定试验

2.2.1 试验设备及材料

采用的光纤是单模光纤,光栅由紫外侧写入制成。接头采用通用的光纤 FC/APC 跳线头。布拉格中心波长识别系统采用美国 Micron Optics 公司生产的 FBG-SLI。该仪器基于 F-P (Fabry-Perrot) 干涉原理对布拉格反射谱中心波长进行解调,波长分辨率为 1pm,扫描范围为 1530 ~ 1570 nm,扫描频率为 108Hz。

2.2.2 应变传感试验结果与分析

为了研究光纤光栅的应变传感特性,采用两种方法在室温 (20℃ 左右) 下试验。由于试验的时间很短,温度没有明显变化,不考虑温度影响。

(1) 材料试验法

将裸光纤光栅用 502 胶粘剂粘贴于经过抛光处理的钢板上,在相应位置布设高精度应变片,然后在万能材料试验机上进行张拉试验,结果如图 1 所示。

(2) 等强度梁法

将裸光纤光栅用 502 胶粘剂粘贴于 TJ-1 型等强度梁上,并在相应位置布设高精度电阻应变片,通过砝码加载,得到的试验结果如图 2 所示。

从试验结果可以看出,光纤布拉格光栅的中心波长与应变的相关系数达 0.999 以上,没有迟滞现象,存在很好的线性关系,说明了光纤布拉格光栅是一种十分理想的应变传感元件;在不同试验方法下得到的波长—应变灵敏度系数均为 1.2pm/ $\mu\epsilon$,这与理论分析结果吻合很好。

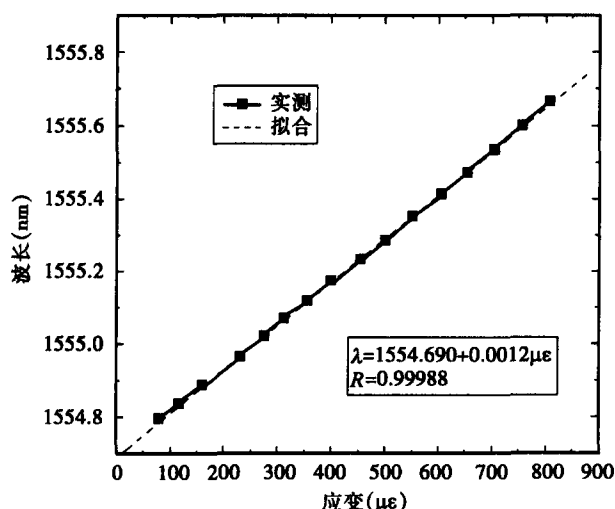


图 1 1554nm 光纤光栅波长与应变关系曲线

Fig.1 Relationship between wavelength and strain for 1554nm FBG

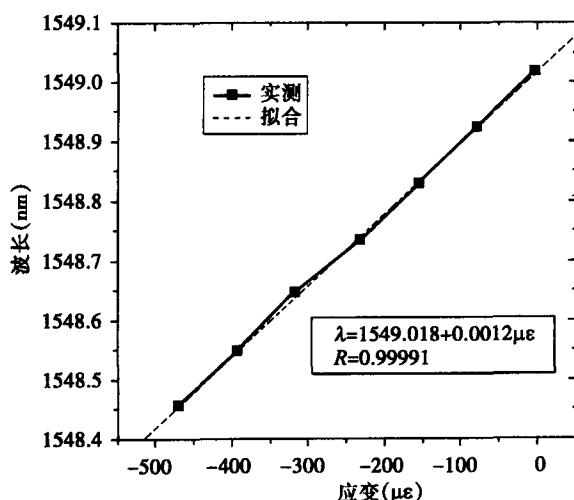


图 2 1549nm 光纤光栅波长与应变关系曲线

Fig.2 Relationship between wavelength and strain for 1549nm FBG

3 黑龙江呼兰河大桥光纤光栅埋设工艺与监测效果

呼兰河大桥位于黑龙江省呼兰县的呼兰河上,它是连接哈尔滨与肇兴的交通枢纽,于 2002 年建成并投入使用。它全长 420m,最大的跨度为 42m,是目前国内较大的预应力钢筋混凝土箱形梁桥。箱形梁采用后张预应力结构形式,预应力材料采用 $\Phi 15.24\text{mm}$ 钢绞线,箱梁的每侧腹板各布置 5 束。由于呼兰河长期泥沙淤积、软土覆盖层很厚以及施工条件恶劣等原因,呼兰河大桥的下部均采用钻孔灌注桩基础、柱式桥墩与肋式桥台。鉴于该桥施工复杂、工期短、跨度

较大、交通流量较大和冬夏温差很大等原因,对其进行健康监测具有重要的实际意义。

在黑龙江省交通厅的支持下,我们于 2001 年 5 月至 10 月将 15 个光纤光栅传感器在大桥施工过程中布设到预应力箱形梁上,目的是在施工阶段监测箱形梁的受力与安全状况,在大桥服役阶段监测通车流量和桥梁的疲劳损伤状态。为使监测结果具有代表性,我们选定呼兰河大桥的 42m 大跨,即第二跨的第 2 根与第 5 根箱形梁的跨中和 1/4 跨底部正中的钢筋肋槽里布设了 5 根光纤光栅应变传感器。在铺设桥面板时,在同跨梁上的面板钢筋上布设了 7 个光纤光栅应变传感器和 3 个无增敏封装的光纤光栅温度传感器。其中,光纤光栅应变传感器的布设工艺是一样的,而温度传感器直接置于应变传感器的相同位置。布设的光纤光栅传感器监测了预应力箱形梁张拉过程中钢筋的应变历程,以及箱形梁静载试验的钢筋应变增量与分布。大桥建成后,利用埋入的光纤光栅传感器监测了大桥在车辆荷载下的动态变形和温度变化,得到了一些有益的经验与令人鼓舞的测试结果。

3.1 光纤光栅的布设工艺

光纤光栅的外径约为 $125\mu\text{m}$,主要成分是 SiO_2 ,因此特别脆弱,尤其是抗剪能力较差。为了避免光纤光栅在箱形梁的浇筑、振捣与压模等施工过程中受到冲击,防止光纤光栅信号传输线在吊装、铺设桥面板和人行护栏等施工过程中的破坏,研究了光纤光栅的布设工艺措施,具体过程如下:

(1) 打磨 为了保证光纤光栅与钢筋的充分接触,避免应变传递导致的测试误差,首先用打磨机对待测钢筋进行抛光,然后用砂纸打磨,使钢筋肋槽的表面平整光滑。

(2) 清洗 为了防止打磨的屑末、油污等污染物质的影响,用脱脂棉球沾丙酮将打磨处擦洗干净。

(3) 粘贴 利用变形钢筋本身的肋槽,将光纤光栅用单组分的 502 胶粘剂沿着钢筋纵向布置。为了对比,在每个光纤光栅的相应位置布设 2 片高精度电阻应变片。

(4) 光栅保护 钢筋混凝土箱形梁的施工过程属于典型的粗放式作业,如何保护光纤光栅避免在浇注、振捣和压模等过程中被冲击损坏,是光纤光栅成功应用于钢筋混凝土结构的关键。考虑传感器的缓冲与防潮问题,采用了硅胶保护、纱布缠绕和 J39 二次保护的工艺,图 3 为光纤光栅保护后的照片。

(5) 光纤与接头保护 为了避免传输光纤直接受到混凝土浇注、振捣与内模的冲击,将其置于一根直径为 16mm 的铝塑套管内,再将套管固定在箱形梁腹

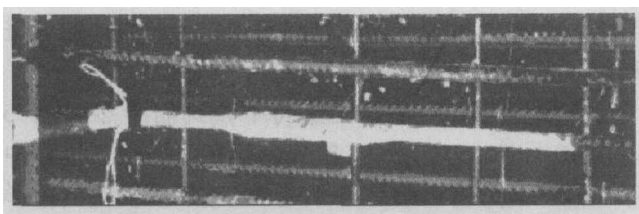


图3 传感器保护照片

Fig.3 Picture of FBG under protection

板的构造钢筋上, 传输光纤直接伸到箱形梁的顶部, 待上部混凝土浇注后, 用一木箱保护。这样成功地解决了传输光纤的保护问题。

桥面板上光纤光栅传感器的布设工艺基本与上述方法一致, 但是一个重要的问题是如何防止施工车辆对传输光纤的碾压, 我们采用预先铺设混凝土对光纤进行保护的方法, 方便地解决了这个难题。

采用上述的布设工艺, 箱形梁施工过程结束后, 及时检查光纤光栅与应变片的存活情况, 布设在两根箱形梁上和桥面板上的光纤光栅传感器全部成活, 说明该工艺很适于光纤光栅的保护; 而布设箱形梁上的应变片只有 3 个存活, 其余应变片的初始电阻漂移很大, 表明它们已经受潮或损坏。

3.2 箱形梁预应力张拉过程监测

预应力箱形梁张拉过程可能出现预应力松弛、张拉力过大、反拱等现象, 是影响箱形梁质量的重要因素。鉴于此, 我们对箱形梁的张拉过程进行了监测。布置光纤光栅与电阻应变片的钢筋混凝土箱形梁经过 10 天养护后, 开始张拉。我们对布设的传感器进行检查, 发现现场工程师指挥不当, 误毁了一箱形梁上的已经存活的两根光纤光栅, 而电阻应变片没有人工损坏, 但只剩下一个读数稳定, 说明电阻应变片的耐久性与稳定性难以满足工程实际的需要。

我们用保留下来的光纤光栅与电阻应变片对箱形梁的预应力张拉过程进行了监测。在应力-应变双控下用油泵千斤顶在大梁两端同时进行张拉。张拉过程为从下到上, 左右交叉进行。记录了每次加载后的电阻应变计和光纤光栅的应变值, 得到图 4 和 5 所示的监测数据。由于张拉过程时间短, 温度变化小, 没有考虑温度变化的影响。当然, 以后的实时监测必须考虑温度的补偿问题。

从测试结果可以看出, 光纤光栅的监测数据稳定可靠, 都很好地反映了箱形梁预应力的张拉过程, 没有发现异常, 符合实际情况。从同一测点的光纤光栅与电阻应变片的测试数据比较来看, 电阻应变片具有明显的漂移不稳现象, 从而说明光纤光栅在实际工程的长期监测中有着电阻应变片无法比拟的优势。

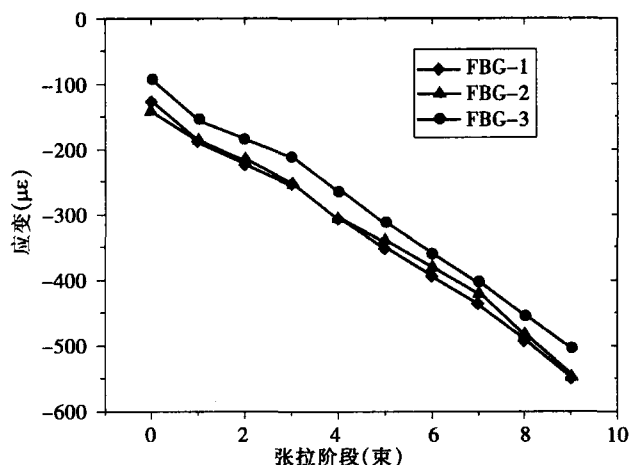


图4 三个光纤光栅的监测结果

Fig.4 Measurement results of 3 FBGs

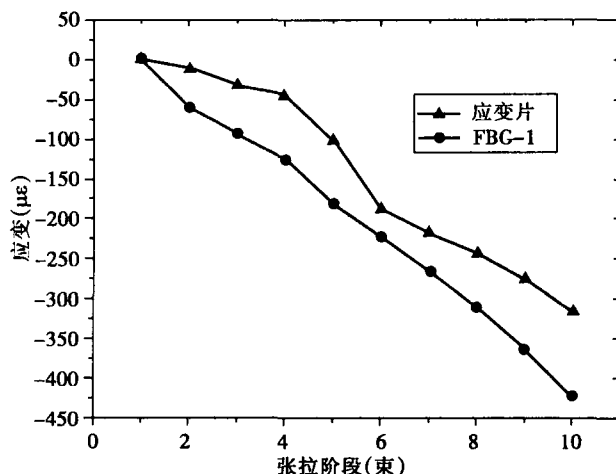


图5 同位置光纤光栅与电阻应变片监测结果比较

Fig.5 Comparison of electric strain gauge and FBG at the same position

3.3 预应力箱形梁静载监测试验

箱形梁经过一个月养护后, 三个光纤光栅仍然完好, 而唯一一个电阻应变片已经不稳定。为了探讨光纤光栅在桥梁竣工后的监测能力, 我们充分利用施工现场的条件, 用龙门吊车将已经预制完成的长为 19.96m、重达 62t 的短跨箱形梁吊至已布设光纤光栅的大跨箱形梁上, 进行静载试验。加载从 FBG1 的一端开始, 实测结果如表 1 所示。

表1 箱形梁静载试验光纤光栅测试结果

Table 1 Results of FBGs when box girder under dead load

加载 (t)	应变 (με)		
	FBG1	FBG2	FBG3
62	69	108	45
2 × 62	112	213	100

由于光纤光栅的分辨率可达 1pm, 也就是说可以

识别 $1\mu\epsilon$ 以上的应变值, 因此从静载试验的结果可以看出, 1t 的重量可以使箱形梁产生 $1\mu\epsilon$ 以上的应变值。因此, 桥梁竣工后利用光纤光栅的监测结果可以统计汽车 (1t 以上) 的流量以及评价由此可能产生的疲劳损伤情况。因此, 利用光纤光栅获得的长期监测数据可以判断桥梁的健康状况, 从而可以对它进行全寿命监测, 这就是在桥梁上布设光纤光栅的根本目的。

3.4 呼兰河大桥的光纤光栅阶段性运营监测

一年后, 大桥建成通车。光纤光栅传感器经受住了考验, 存活良好, 只有个别传感器信号不稳, 可能由于施工过程中工人不小心造成传输光纤微弯曲率过大, 导致传输光信号过弱。而电阻应变计只有桥面板上的个别存活且不稳定。由此说明光纤光栅传感器更适于结构的长期健康监测。

利用光纤光栅传感器监测了大桥在服役状态下的变形与温度变化过程, 如图 6 所示。从光纤光栅智能监测系统直接显示的结果可以看出: 箱形梁中离中心轴同一高度位置的光栅监测结果基本相等, 而上下沿中心轴对称分布的光栅监测结果基本上是大小相等, 符号相反。这是由于箱形梁可以视为简支梁, 从平截面假定可知, 箱形梁上下离中心轴同一高度位置的应变相等, 而符号相反。

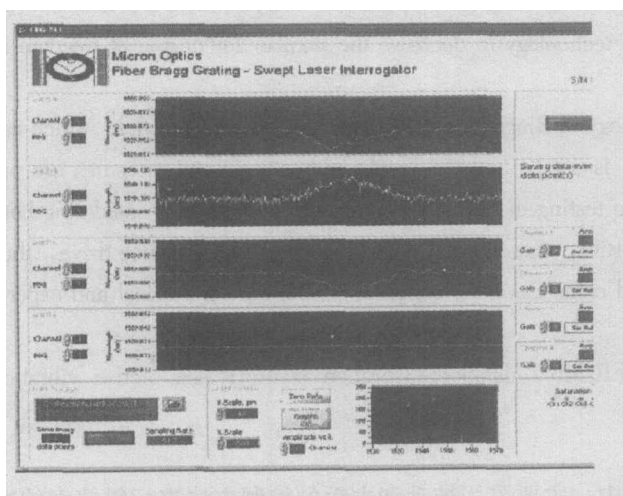


图 6 呼兰河大桥服役过程光纤光栅应变与温度监测

Fig.6 Strain and temperature monitored by FBGs when Hulan River Bridge in service

当大桥在随机车辆荷载下, 可以方便地获得桥梁变形的应变时程, 如图 7 所示。图 7 的应变时程峰值与间隔清楚显示了车辆的流量, 即载重与速度。基于这些监测数据, 可以分析结构的累积损伤, 判断结构的整体安全性。

图 8 显示监测时间为中午 1 点到 2 点的一段桥面板内部的温度变化历程数据。

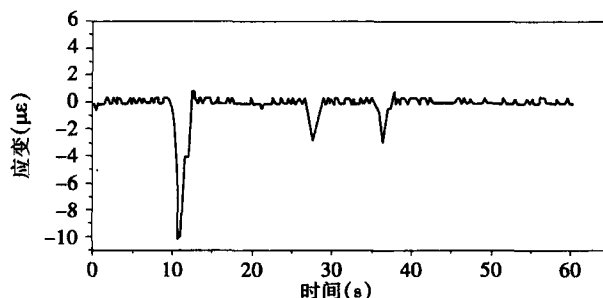


图 7 光纤光栅传感器监测车辆荷载下的应变时程

Fig.7 Strain course induced by traffic load monitored by embedded FBG strain sensor

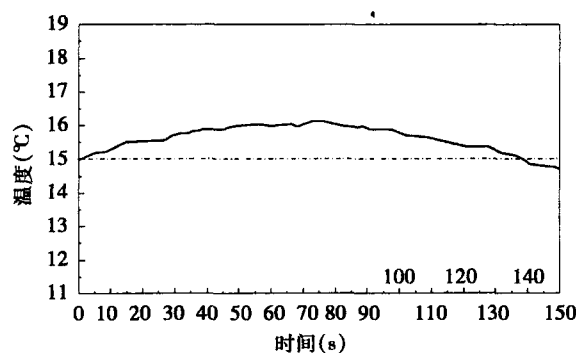


图 8 埋入光纤光栅传感器监测桥梁温度时程

Fig.8 Bridge's temperature-time relationship monitored by the embedded FBG

4 结 语

本文研究了光纤光栅的应变传感特性, 成功地将光纤光栅传感器应用到正在施工的黑龙江省呼兰河大桥的预应力箱形梁和桥面板中, 探讨了光纤光栅的布设工艺与保护措施, 进行了箱形梁预应力张拉的施工监测与静载试验, 并在桥梁竣工后进行了阶段性运营监测, 监测了车辆荷载下的应变时间历程和大桥温度变化过程。结果表明: 光纤光栅在稳定性与耐久性上远优于传统的电阻应变片; 光纤光栅可以有效地监测结构的施工变形, 是一种有效的施工监控手段; 光纤光栅传感器可以方便有效地长期监测结构的变形与温度变化过程, 是一种有效的结构健康监测技术。

参 考 文 献

- [1] 欧进萍. 重大工程结构的累积损伤与安全度评定 [A]. 走向 21 世纪的中国力学—中国科协第 9 次“青年科学家论坛”报告文集 [C]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 179 ~ 189
- [2] 欧进萍, 关新春. 土木工程中的智能结构体系研究与发展 [J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19 (2): 21 ~ 28.

(下转第 64 页)

提高施工的安全程度。

(2) 系统锚杆

系统锚杆一般在每次台架就位后先施作。根据国内外的经验,岩爆地段系统锚杆不宜过长,一般控制在 2~3.5m,多呈梅花型布置,密度比普通锚杆大(即密锚),具体锚杆长度和间距可视岩爆烈度状况而定。采取密锚的目的在于:一是便于挂网;二是可以防止大块岩爆岩石爆裂松脱、剥离掉块、弹射等现象的发生;三是便于与喷射混凝土的钢筋网形成系统组合,达到充分加固围岩的作用。

(3) 钢筋网

钢筋网在打完系统锚杆后就应立即安设。根据现场试验结果,施工中不单纯采用原设计中的分片挂网,而改用挂“整体网”的方法:即用若干长钢筋在同一循环相互之间与锚杆纵横焊接构成基本骨格,同时再焊接好预先准备的片状挂网而构成整体结构,紧贴周壁岩石布置。采用整体网的目的在于:①本循环作业的钢筋网是连成一体,因而不会因为局部围岩发生岩爆而跌落失效;②整体网与系统锚杆连接更牢靠;③有助于喷、锚、网形成浑然一体的整体组合作用。

上述这些岩爆防治初期支护措施经业主办单位同意和施工单位采用,已在该隧道岩爆重点洞段施工攻关实践中取得了良好的实际使用效果。

4 结 语

综上所述,二郎山公路隧道岩爆的发生是有规律可循的,这说明岩爆虽然是一种较为复杂的施工动力失稳地质灾害,但只要认真观察和分析研究,是能够认识其特征和发生规律,从而找到有效的防治工程措施。

本研究得到了四川省交通厅高管局、二郎山公路隧道工程总监办与监理组、协调办、设计单位和施工单位铁道部十六局五处、隧道局、武警交通一总队、隧道指挥所的指导和大力协助,在此一并致谢!

参 考 文 献

- [1] 徐林生,王兰生,李天斌.国内外岩爆研究现状综述[J].长江科学院院报,1999,16(4):24~27
- [2] 徐林生,王兰生.岩爆形成机理研究[J].重庆大学学报,2001,24(2):115~117

徐林生 教授,博士后,主要从事岩土力学与隧道工程的教学与科研工作,主持及参与完成了10余项国家及省部级科研项目,发表论文40余篇。通讯地址:400074 重庆市重庆交通学院桥梁隧道及结构工程系

~~~~~

(上接第49页)

- [3] Y. J. Rao. Recent progress in applications of in fiber Bragg grating sensors [J]. Optics and lasers in Engineering 31 (1999) 297~324
- [4] R. C. Tennyson, T. Coroy, G. Duck, et al. Fiber optic sensors in civil engineering structures [J]. J. Civ. Eng. 2000: 880~889
- [5] P. M. Nellen, R. Bronnimann, et al. Structurally Embedded fiber Bragg gratings: Civil engineering applications [A]. SPIE, Vol. 3860, 1999: 44~54
- [6] P. L. Fuhr, S. Spammer. Fiber optic sensors in the Waterbury Bridge [A]. SPIE, 1998, 3489: 124~129
- [7] J. Sein, E. Udd, W. Schulz. Health monitoring of an Oregon historical bridge with fiber grating strain sensors [A]. SPIE Vol. 3671, 1999: 128~134

欧进萍 博士,教授,博士生导师,副校长,主要从事结构控制和健康监测研究。通讯地址:150090,哈尔滨南岗区海河路202号哈尔滨工业大学土木工程学院

周 智 博士后,讲师,主要从事智能传感元件和结构健康监测研究。

武湛君 博士后,主要从事智能传感元件和结构健康监测研究。

赵雪峰 博士生,从事智能传感元件和结构健康监测研究。

莫淑华 教授,主要从事疲劳损伤和健康监测研究。