

文章编号:1005-0523(2018)02-0024-08

# 基于光纤传感技术的大跨连续刚构桥施工阶段张拉预应力监测

贾永峰<sup>1</sup>, 邱婷<sup>1</sup>, 宋庆辉<sup>1</sup>, 陈波<sup>2</sup>, 吴必涛<sup>2</sup>

(萍乡市公路管理局和江西安源路桥集团 萍乡市 337000 华东交通大学土木建筑学院 南昌市 330013)

**摘要:**在为了研究山区复杂气候条件下预应力张拉对桥梁受力的影响,实时监测大跨桥梁预应力张拉过程中的混凝土受力状况,以万龙山大桥施工为例,采用预埋式高精度光纤光栅应变计,对大桥2号墩12#块的预应力张拉过程进行了全程监测。在监测过程发现,当采用非对称张拉的施工方式进行预应力张拉时,箱梁截面上存在着拉压应变交替产生的现象,张拉顶板时,底板和腹板上产生较大的拉应力,而未被张拉的另一侧腹板也存在较大的拉应力;顶板钢束产生的预应力效果相比于底板预应力钢束明显。12#块预应力张拉结束后,箱梁截面顶板处产生了 $-120\ \mu\epsilon$ 压应变,腹板和底板分别产生了 $40\ \mu\epsilon$ 和 $80\ \mu\epsilon$ 拉应变,直观的反映出了应力张拉效果。

**关键词:**实时监测;光纤光栅应变计;非对称张拉;桥梁工程;预应力箱梁

**中图分类号:**U

**文献标志码:**A

桥梁结构应力、应变测试所采用的最主要的监测仪器和设备是电阻应变片和正弦式应变计,它们虽然在桥梁的应力测试方面发挥着重要的作用,但是由于电传感器存在抗噪性能低、防潮防水性能差和抗电磁干扰性能低等因素,在使用过程中存活率低和测试误差大、不稳定,导致无法实行稳定的监测,不能及时发现施工过程中的潜在问题、消除隐患。同时土木工程结构自身由于受外界荷载的长期作用、自身服役寿命和状况存在着退化的问题,为解决土木工程结构的安全服役问题,众多学者提出建立结构健康监测系统的构想,在工程建设阶段和运行阶段安装相应的传感器监测结构的应力状况和运行状况<sup>[1]</sup>。已有研究表明<sup>[2-3]</sup>,FBG(fiber bragg grating)传感技术具有分布式、远距离、高精度和长期性的技术特点,克服了传统监测技术存在的缺陷。通过光进行信号传播,传感器不受噪声影响,同时具有较好的抗电磁干扰和防潮功能,从而可以为土木工程结构的安全监测和健康诊断提供更加先进的手段和方法。

1992年Rutger大学的Prohaska等人<sup>[4]</sup>首次将FBG埋入到混凝土内部测量应变之后,国外一些学者对FBG传感器在土木工程中的应用进行了广泛的探索,将实验研究拓展到桥梁、隧道等一些实际的工程结构<sup>[5-6]</sup>。国内学者同样对FBG传感器用于土木工程健康监测做了大量的研究<sup>[7-9]</sup>。李宏男等<sup>[10]</sup>研究了FBG传感器在混凝土结构施工监测中应用。万里冰等人<sup>[11]</sup>研究了基于光纤光栅传感技术的桥梁结构内部应变监测。

本文采用埋入式FBG传感器对万龙山大桥2号墩中跨12#块预应力张拉全过程进行了实时监测,详细介绍了传感器的安装过程和监测过程。详细记录了每一孔预应力张拉过程对桥梁应变的影响,监测结果可以对预应力张拉效果做出评估。同时发现非对称张拉的施工方式会导致桥梁中拉、压应力的交替发生,并且监测到了拉、压应力的变化大小。

收稿日期:2018-11-28

基金项目:江西省交通运输厅科技项目(2016H0019,2016H0020)

作者简介:贾永峰(1979—),男,工程师。

## 1 工程概况

万龙山大桥位于 S314 樟排线 K185+070 处,为跨越‘V’型山谷而建立。万龙山大桥处于山区地区,地势陡峭,多高山深谷,地质也十分复杂,多为强风岩层,施工条件十分困难,天气变化不稳定,雨水明显偏多,施工比较困难。万龙山大桥主桥上部结构型式为(85+150+85) m 三跨预应力混凝土连续刚构箱梁,箱梁采用单箱单室直腹板断面,顶板宽度为 12 m,箱梁根部梁高 9.0 m,中跨跨中及边跨合拢段梁高为 3.5 m,箱梁底板下缘按 1.8 次抛物线变化。桥墩采用钢筋混凝土双肢变截面矩形实心墩,高度分为 42 m 和 48 m,与主梁固结,单肢桥墩顺桥向尺寸为 2.0 m,横桥向墩顶尺寸为 6.5 m,承台采用矩形,横桥向长 11.2 m,顺桥向宽 10.2 m,厚 4.0 m。桥台采用桩基接台帽形式,每个桥台设置两根钻孔灌注桩。万龙山大桥主桥桥型布置图如图 1 所示,全桥施工阶段分为 19 块段,采用悬臂施工方法,监测所在的阶段为 2 号墩中跨 12# 块。万龙山大桥处于山谷中,环境温度变化大,为了监测施工过程中桥梁的应力应变变化情况,在施工过程中采用预埋式光纤光栅(fiber bragg grating)应变传感器对混张拉过程中的应变变化进行实时监测。

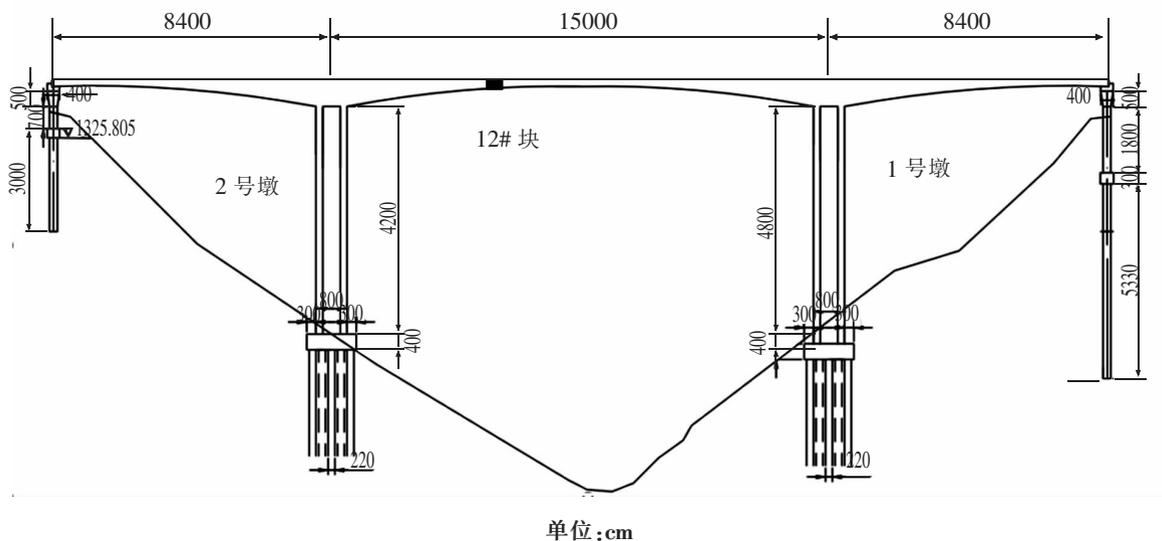


图 1 万龙山大桥全桥布置图及监测梁块

Fig. 1 Layout and beam block of wanlongshan bridge

## 2 基于 FBG 传感的桥梁应变监测

### 2.1 基于 FBG 传感的应变监测原理

FBG 传感技术是近年来光纤传感领域的研究热点。Bragg 光纤光栅是由单模掺锗光纤经紫外光照射成栅技术形成,是一种相位光栅,其具有纤芯折射率呈周期分布的特点,其作用实质上是在纤芯内形成一个窄带的滤波器或反射镜。当一束宽带光源经过光栅时,只有特定波长的光在栅区处被反射后会再返回到原来的方向而被光纤光栅解调仪识别,FBG 纤芯应力的作用下,光栅的间隔将发生改变,从而引起反射回来的光的波长发生变化,因而可以通过监测光栅波长变化来测出应变和温度扰动。根据模耦合理论,一束宽带光经过光纤光栅时,特定波长的光(波长为  $\lambda_B$ )会反射回来,其波长  $\lambda_B$  满足 Bragg 定理:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

公式(1)中: $\lambda_B$  为 FBG 的中心波长; $n_{\text{eff}}$  为纤芯的有效折射率; $\Lambda$  为光栅周期。由式(1)可知,FBG 反射中心波长  $\lambda_B$  随着纤芯的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  和光栅周期  $\Lambda$  的变化而变化。由于 FBG 应变的变化将引起光栅周期  $\Lambda$  和纤芯有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的变化,FBG 有应变与温度效应(不考虑光纤光栅的应变和温度的耦合租用):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} \varepsilon + (\alpha + \xi) \Delta T \quad (2)$$

公式(2)中: $\Delta\lambda_B$ 为波长变化; $P_{11}$ 和 $P_{12}$ 为光弹常数; $\varepsilon$ 为FBG的轴向应变; $\nu$ 为泊松比; $\alpha$ 为热膨胀系数; $\xi$ 为光纤材料的热光系数; $\Delta T$ 为温度变化。

$$\text{令 } K_\varepsilon = [1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]] \lambda_B, K_T = (\alpha + \xi) \lambda_B, \text{得}$$

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon \varepsilon + K_T \Delta T \tag{3}$$

式中: $K_\varepsilon$ 为FBG应变敏感度系数, $K_T$ 为FBG温度敏感度系数。其中 $K_\varepsilon$ 和 $K_T$ 都可以通过实验获得。

$$(\mu\varepsilon) = a_1(\lambda_1 - \lambda_0) + a_2(\lambda_1 - \lambda_0) + a_3 \tag{4}$$

传感器 $a_1=1.1, a_2=a_3=0$ 。本项目中采用的是对应变敏感的FBG传感器,测应变精度及分辨率不受光源波动及传输线路弯曲损耗的影响,可直接通过光纤进行信号远程传输,传感器外形图见图2,应变传感器的相关参数见表1。



图2 预埋式光纤光栅应变传感器  
Fig.2 Embedded FBG strain sensor

表1 FBG应变计参数  
Tab.1 Parameters of FBG strain gauge

项目	单位	参数值
量程	$\mu\varepsilon$	$\pm 1500$
分辨率	$\mu\varepsilon$	0.1
测量标距	mm	150
工作温度范围	$^{\circ}\text{C}$	-50~80
光栅反射率	-	$\geq 90\%$

### 3 施工过程监测

#### 3.1 FBG应变传感器的安装

现场安装了3只FBG应变传感器,传感器的编号分别为S1,S2和S3。S1位移腹板和顶板的交接处,也是顶板预应力最密集的区域;S2位于腹板的中间,S3位于底板的纵向钢筋上。为了监测预应力张拉过程中混凝土的受压状况,传感器的布置方向和桥梁的纵向钢筋相同。为了保证传感器的方向的稳定性,采用扎丝和自锁式尼龙绑扎带进行固定。传感器的的位置见图3,图4为底板传感器S3,腹板传感器由于安装空间狭小无法拍照。

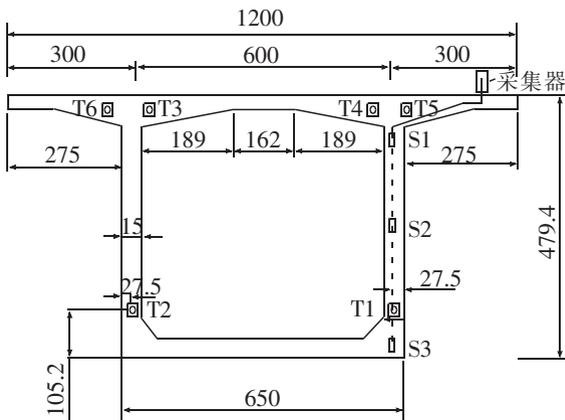


图3 传感器布置图  
Fig.3 Sensor layout



图4 底板传感器S3的固定安装  
Fig.4 Fixed mounting of floor sensor S3

### 3.2 预应力钢束张拉顺序

万龙山大桥2号墩12#块需要张拉的预应力钢束总共有6孔,顶板4孔,底板2孔,预应力束孔位置和张拉顺序编号见图5。分六次张拉,逐次张拉1~6号孔,其中上午完成了1、2、3和4号孔的张拉,下午完成了5和6号孔的张拉。张拉开始时间为当天上午8点整。采用液压千斤顶进行张拉,如图6所示;现场数据采集系统如图7所示。



图5 预应力钢束张拉顺序编号

Fig.5 Prestressed steel strand tensioning sequence number



图6 液压千斤顶

Fig.6 Hydraulic jack diagram

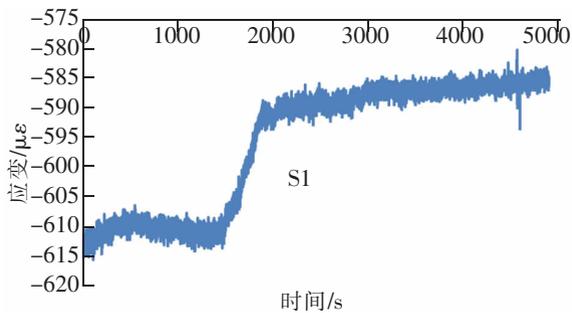


图7 现场数据采集系统

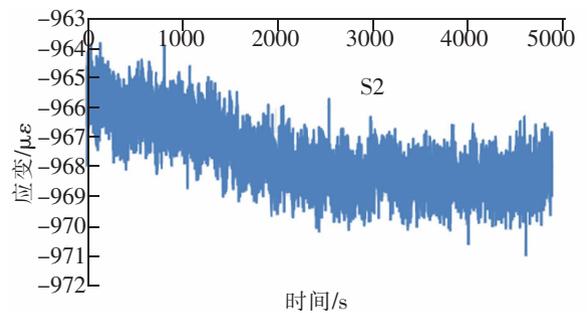
Fig.7 Field data acquisition system

### 3.3 预应力钢束张拉时桥梁截面应变结果分析

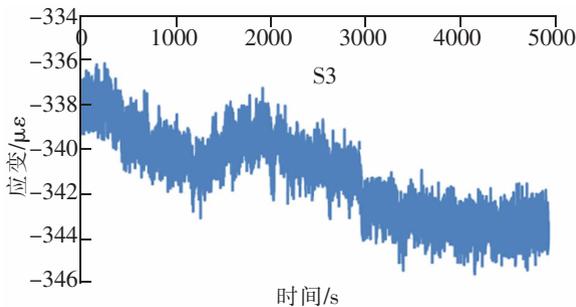
2号墩中跨12块张拉的第一根预应力束为底板1号钢束,S1,S2和S3的应变值可以根据公式(1.4)计算而得,由于浇筑混凝土过程中传感器就开始受压,传感器初始值不是0,S1,S2和S3的初始值分别为 $-610\ \mu\epsilon$ 、 $-965\ \mu\epsilon$ 和 $-338\ \mu\epsilon$ 。当张拉底板1#钢束时,底板开始受压,此时顶板开始出现拉应变,拉应变的值为 $30\ \mu\epsilon$ ;此时,腹板中间和底部位置为受压状态,由于张拉预应力产生的压应变分别为 $-3\ \mu\epsilon$ 和 $-6\ \mu\epsilon$ 。图8(a)、8(b)和8(c)为传感器监测到的绝对应变值,8(d)为以传感器绝对值减去传感器初始值后的在张拉1#钢束时混凝土的应变增量。



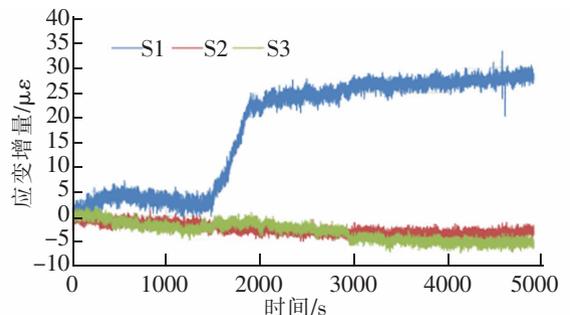
(a) S1的绝对应变值



(b) S2的绝对应变值



(c) S3的绝对应变值



(d) 12号块的应变的增量

图8 1#孔预应力钢束张拉监测结果

Fig.8 Tension monitoring results of 1#prestressed steel

第二次张拉过程为 2# 和 3# 孔预应力,先拉的 2# 孔,拉完 2# 孔后进行 3# 孔的张拉,由于中途间隔的时间较短,将两个张拉过程放入同一个监测工况内,监测结果见图 9。图 9(a)、9(b)和 9(c)为传感器的监测到的绝对应变值,9(d)为以传感器绝对值减去传感器初始值后的在张拉 2# 和 3# 钢束时混凝土的应变增量。从图 9 可知,当张拉箱梁的另一侧腹板时,被监测的一侧腹板为受拉状态,S1 的拉应变为  $35 \mu\epsilon$ ,S2 和 S3 相同,约为  $20 \mu\epsilon$ 。结果说明,如果箱梁两侧的钢束不是同时张拉时,另一侧腹板处于受拉状态。

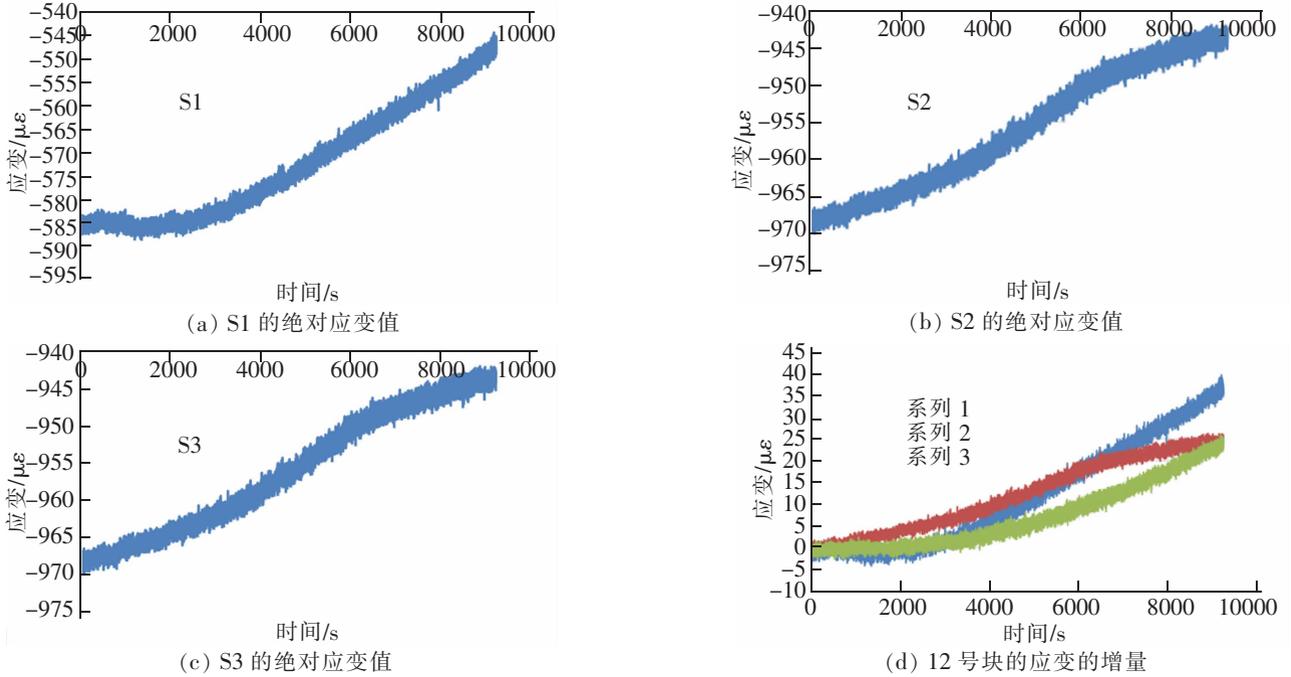


图 9 2# 和 3# 孔预应力钢束张拉监测结果

Fig.9 Tension monitoring results of 2# and 3# prestressed steel

4# 孔预应力张拉监测结果见图 10,4# 号孔为顶板钢束预应力孔,张拉时顶板受压,地板和腹板出现一定的拉应变。此时顶板受压应变增量为  $-140 \mu\epsilon$ ,腹板和底板的拉应变增量分别为  $+10 \mu\epsilon$  和  $+20 \mu\epsilon$ 。

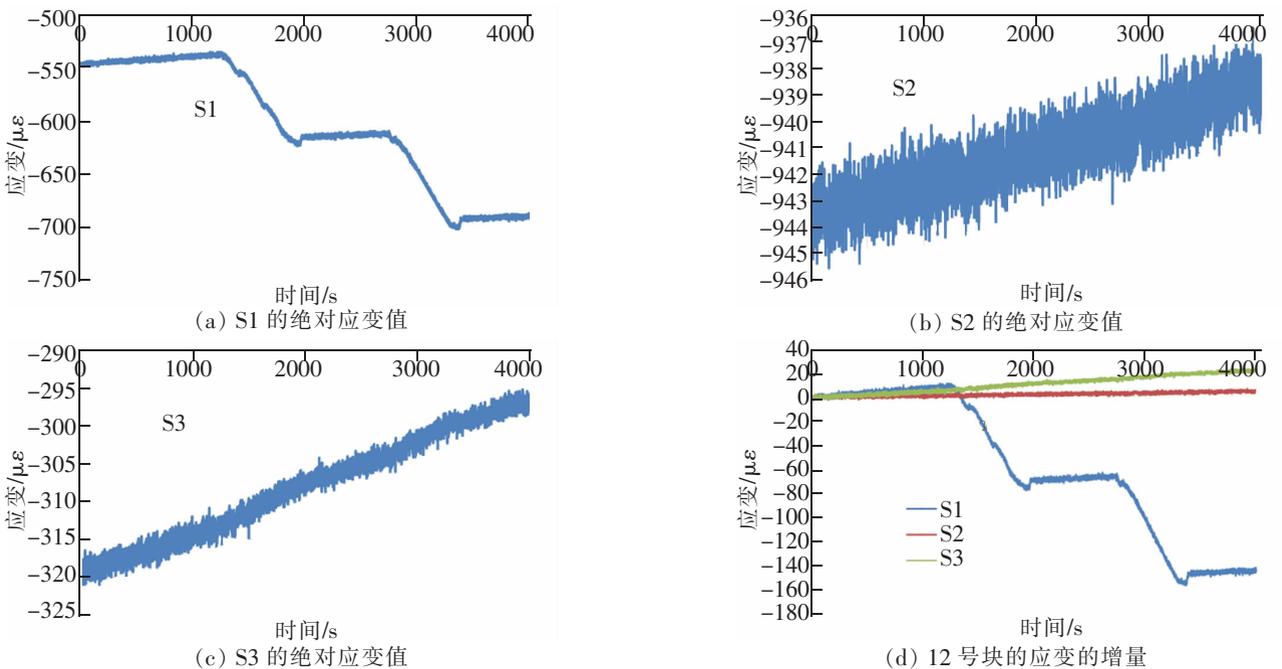


图 10 4# 孔预应力钢束张拉监测结果

Fig.10 Tension monitoring results of 4# prestressed steel

5# 孔张拉监测结果见图 11,5# 号孔为顶板钢束预应力孔,张拉时顶板受压,地板和腹板出现一定的拉应变。此时顶板受压应变增量为 $-140 \mu\epsilon$ ,腹板和底板的拉应变增量分别为 $+10 \mu\epsilon$ 和 $+20 \mu\epsilon$ 。

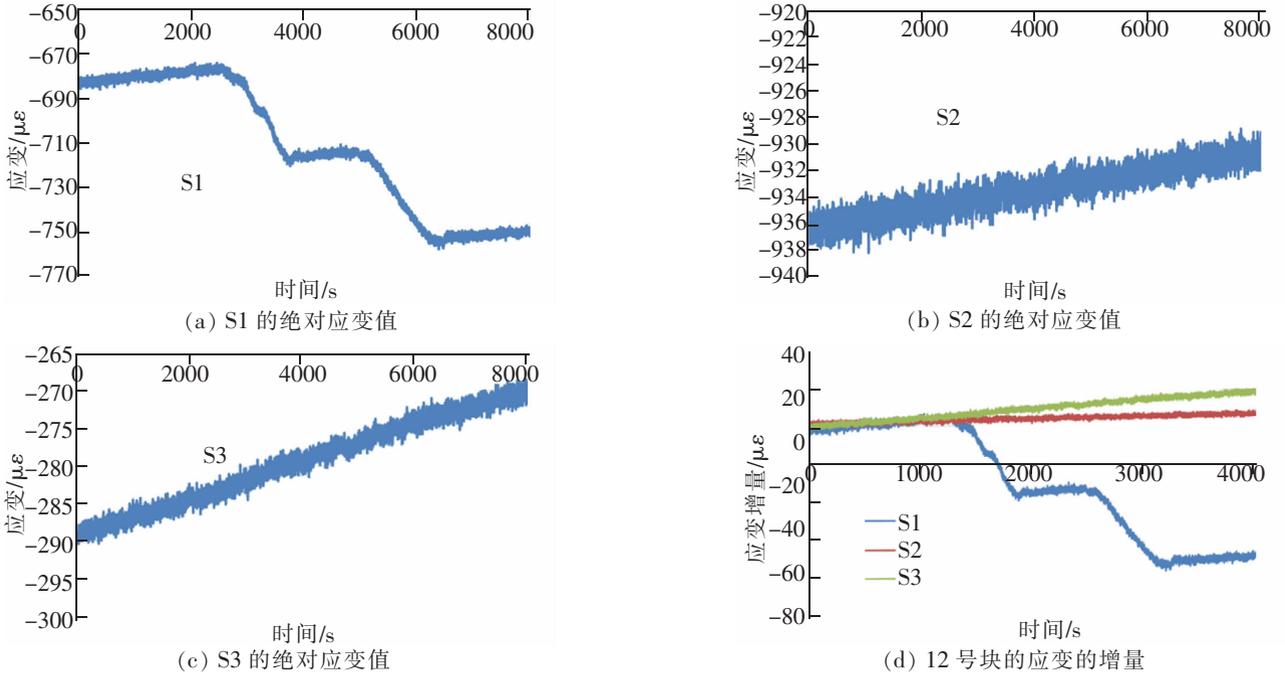


图 11 5# 孔预应力钢束张拉监测结果

Fig.11 Tension monitoring results of 5# prestressed steel

6# 孔张拉后传感器监测应变值如图 12 所示,采样频率为 2Hz。可以发现,张拉结束后桥梁的受力基本稳定,预应力短期没有发生损失。应变分别为  $S1=-734 \mu\epsilon$ ,  $S2=-925 \mu\epsilon$ ,  $S3=-256 \mu\epsilon$ 。通过和上一个监测工况的传感器测试的应变值进行比较即可得到 6# 钢束在张拉过程中的应变增量,应变增量见图 13。

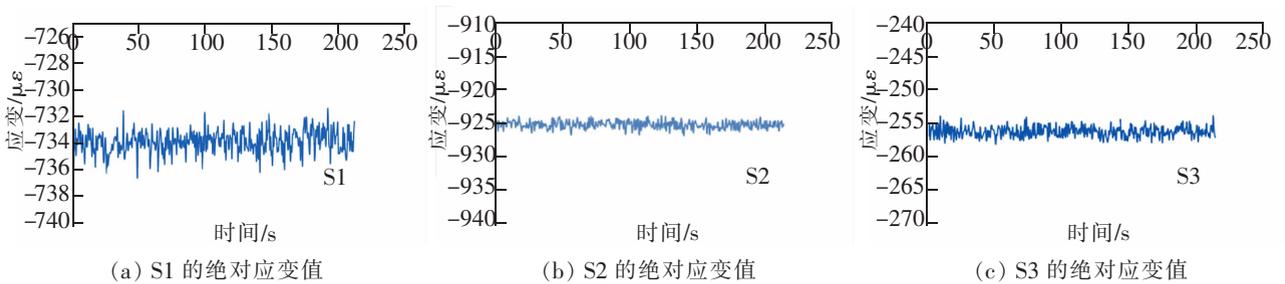


图 12 6# 孔预应力钢束张拉后桥梁的应变监测结果

Fig. 12 Strain monitoring results of 6# prestressed steel

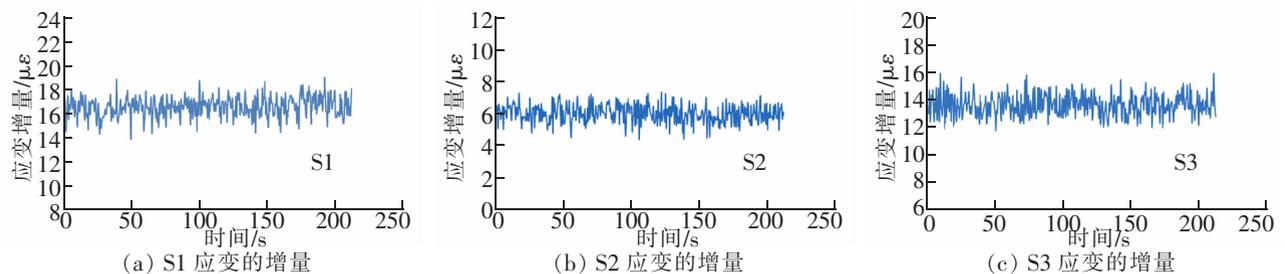


图 13 6# 孔预应力钢束张拉产生的应变增量

Fig. 13 Strain increment produced by tension of 6# prestressed steel

将 2 号墩中跨 12# 块所有预应力张拉结束后,将监测的应变值和 1# 钢束张拉前的应变值比较,就能得到 12# 块在张拉过程中的应变变化情况,结果见图 14。S1 位置的产生的压应变为 $-123 \mu\epsilon$ ,S2 和 S3 由于非

对称张拉产生了一定的拉应变,分别为  $40 \mu\epsilon$  和  $80 \mu\epsilon$ ,说明非对称张拉情况下,桥梁会产生局部的拉应变。

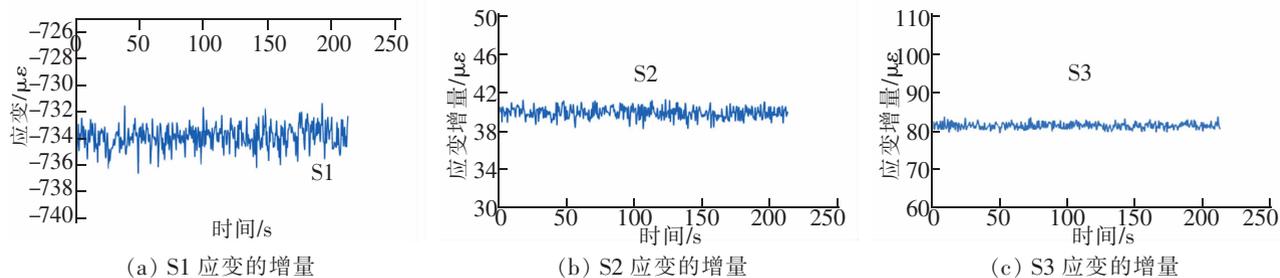


图 14 12# 块预应力张拉产生的应变增量

Fig. 14 Strain increment produced by prestress tensioning of 12# block

## 4 结论

本文通过对万龙山大桥 2 号墩中跨 12# 块施工阶段预应力张拉过程进行实时监测,详细介绍了大跨混凝土基于光纤光栅传感监测技术的传感器安装和测试过程。分析了在非对称张拉每一孔预应力钢束时,桥梁的应变变化情况,得到了以下结论:

1) 如果采用非对称张拉方式大跨桥梁预应力时,在桥梁箱梁截面非张拉截面处容易产生较大的拉应力,如张拉顶板钢束时,底板处会产生较大的拉应变,同时,未被张拉的另一侧腹板上会产生拉应变,这种现象类似于跷跷板,一侧受压另一侧则受拉。

2) 在万龙山大桥 12# 块预应力张拉过程中,张拉顶板束在顶板处产生了  $-123 \mu\epsilon$  压应变,同一腹板上的中部产生了  $40 \mu\epsilon$  拉应变,在底板处产生了  $80 \mu\epsilon$  拉应变,截面不是整体受压,而是上部受压下部受拉的应力状况。

3) 对于大跨预应力桥梁,顶板预应力钢束张拉产生的预应力效果比较明显,在张拉 4# 孔预应力钢束时,在箱梁的顶板产生了  $-160 \mu\epsilon$  压应变;在张拉底板预应力钢束时,在底板产生的压应变增量最大值为  $-6 \mu\epsilon$  压应变。

4) 进行预应力张拉时采用对称张拉消除混凝土中的拉应变,本次张拉过程中仅仅在底板产生了个  $80 \mu\epsilon$  拉应变,不足以使混凝土开裂,但是每个施工块都残余较大的拉应变,最后在全桥累计的拉应变也不能忽视。

## 参考文献:

- [1] CASANOVA N, INAUDI D. Bridge spatial displacement monitoring with 100 fiber optic deformation sensors: sensors network and preliminary results[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1997:51-57.
- [2] LENG J, ASUNDI A. Structural health monitoring of smart composite materials by using EFPI and FBG sensors[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2003, 103(3):330-340.
- [3] 陈伟民, 黄尚廉. 光纤法珀应变传感器系统实验研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4):36-39.
- [4] PROHASKA J D, MOREY W W. Fiber optic Bragg grating strain sensor in large-scale concrete structures[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1993, 1798(1798):286-294.
- [5] INANDI D, CASANOVA N. Railway bridge monitoring during construction and sliding[J]. Proc Spie, 1997, 16(5):74-85.
- [6] MEASURES R M, ALAVIE A T, MAASKANT R, et al. A structurally integrated Bragg grating laser sensing system for a carbon fiber prestressed concrete highway bridge[J]. Smart Materials & Structures, 1995, 4(1):20-30.
- [7] 周智, 欧进萍. FBG 智能传感器及其在土木工程中的应用研究[C]// 中国功能材料及其应用学术会议, 2004:152-156.

- [8] 张矿伟,张少杰,赵晓霞,等. 光纤 Bragg 光栅应变传感器在桥梁结构监测中的应用[J]. 光学仪器,2014,36(1):15-19.
- [9] 李宏男,孙丽,梁德志. 光纤布拉格光栅传感器用于混凝土结构施工监测[J]. 建筑材料学报,2007,10(3):342-347.
- [10] 万里冰,武湛君,张博明,等. 基于光纤光栅传感技术的桥梁结构内部应变监测[J]. 光电子·激光,2004,15(12):1472-1476.

## Tension Prestress Monitoring of Large Span Continuous Rigid Frame Bridge During Construction Stage Based On Optical Fiber Sensing Technology

Jia Yongfeng<sup>1</sup>, Qiu Ting<sup>1</sup>, Song Qinghui<sup>1</sup>, Chen Bo<sup>2</sup>, Wu Bitao<sup>2</sup>

(1. Pingxiang Highway Administration, Pingxiang 337000, China; 2. Jiangxi Anyuan Road & Bridge Corporation, Pingxiang 337000, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In order to study the influence of the pre-stressing tension on the bridge force under complex climatic conditions in mountain areas and monitor in real time the concrete stress of long-span bridge in the process of pre-stressing tension, by taking the construction of Wanlongshan Bridge as an example, plastered fiber grating sensor with high-accuracy was adopted to monitor the whole process of pre-stressing tension in Block 12 of Pier 2. The research results show that when the prestressing tension is carried out by using the asymmetrical tension method, the phenomenon of alternating tension-compression strains occurs in the box girder section. When the tension occurs in the roof, the bottom board and web produced obvious tension stress, and the web of the other side without tension also produced obvious tension stress; the prestressed steel beam of the roof produced more obvious prestressing force than that of the bottom board. After the prestressing of 12 # block was completed, a compressive strain of  $-120\mu\epsilon$  was produced at the top of box girder section, and tensile strain of  $40\mu\epsilon$  and  $80\mu\epsilon$  were produced respectively at web and bottom board, which directly reflected the effect of stress tension.

**Key words:** real-time monitoring; fiber grating sensor; asymmetric stretching; bridge engineering; prestressed box girder