

在隧道监测中光纤光栅传感解决方案



深圳市简测科技有限公司

二〇一四年九月

1、引言

重大工程结构(如隧道、桥梁和水坝等)的安全监测一直是国内外工程领域广泛关注的重要研究课题。其常规监测技术多以点式电测方式为主,而用于应变测量的传感元件主要为电阻应变片和钢弦计,但电阻应变片发生的零点漂移会使其长期测试结果产生严重的失真;钢弦计的灵敏度较好,但因钢弦丝长期处于张紧状态,蠕变对其影响较大。此外,常规的电类传感器普遍存在寿命短、测量易受环境影响、易受电磁干扰、不能进行实时在线监测和不能实现分布测量等缺点。但工程结构的渐变性决定监测系统不仅应具备高精度和长期稳定性,而且要求实时监测数据的准确性以及恶劣条件下测读数据的可靠性。由此可见,常规的电类传感器已逐渐不能满足对重大工程结构安全的长期监测要求。

光纤传感技术是继电测技术之后的新型传感技术。以光波为载体,光纤为媒质,具有抗电磁干扰、动态响应快、灵敏度和测试精度高、耐久性强及可实现远距离实时监测等优点,一些技术还可对结构进行分布式测量。这些优点决定其在工程结构安全监测方面具有很强的竞争力,并在航空航天、船舶、电力、桥梁、堤坝、边坡和隧道等工程结构及岩土工程的监测与诊断中获得广泛研究与应用。

2、光纤监测技术

国内外工程结构监测领域主要的光纤传感器主要包括光纤光栅传感器(FBG)、光时域反射计(BOTDR)、Fabry-Pérot 空腔传感器(FPI)

及 SOFO 点式光纤传感器等。FPI 和 SOFO 分辨率高，但受信号传输和解调技术的限制，布点数量有限，还不能从根本上突破点式测量的局限，比较适用于结构重点部位的监测。分布式的 BOTDR 可对结构进行大范围监测，但分辨率较低，测得应变是所在位置后面一定距离(空间分解率)的平均应变值。而 FBG 不仅分辨率高，所测的应变位置明确易定，且能使用波分复用技术在一根光纤中串接多个传感器，实现真正意义上的多点线式分布测量。因此，FBG 在很大程度上弥补以上几种传感器的不足，并成为光电传感领域的研究热点。美国、德国、加拿大和英国等都在致力于 FBG 及解调系统的研究。我国对其的研究相对晚一些，但是也有较大进展，但还鲜见 FBG 在隧道监测中的应用实例。本文拟采用 FBG 传感技术对昆明白泥井 3# 隧道二次衬砌进行应变监测，从而了解隧道当前的应力状态和长期使用的可靠性及安全程度及检验二次衬砌设计的合理性，并为隧道在运营期间提供监测数据

3、隧道监测实例

3.1 工程概况

XX 省白泥井 3# 隧道位于功山至二级公路 10# 合同腰店子段 K83+580~K84+555 处，隧道全长为 975.0 m，为单洞双车道对向行车隧道。隧道设计净宽为 11.5m，设计净高为 7.465 m，已于 2003 年 12 月建成通车。进口 K83+580~K83+625 段地层为二叠系栖霞组 (P1q) 灰岩夹白云层；K83+625~K84+555 为寒武系筇竹寺组 (E1q) 页岩夹泥质粉砂岩，两者的接触关系为断层接触，接触带较破碎，

易产生塌方。出口端围岩属软质岩层，岩体力学性质较差，围岩较不稳定，易产生拱部坍塌和侧壁位移变形，且K84+500~K84+555 段位于滑坡体上，隧道易产生整体变形。受区域构造影响，隧道区域内次级构造发育，围岩破碎，节理裂隙发育，风化严重，强风化层最厚处达70 m。由于隧道的稳定性和安全性是建设单位十分重视的问题，为此需对此隧道的变形稳定和安全状况进行监测。

3.2 FBG 铺设方案

本次 FBG 监测系统覆盖 K84+310~K84+531 的隧道一段。共选取 10 个断面按“Ω 型”布置，进行绕拱变形监测。监测线路采用全面接着方法，即把光纤绷紧后完全黏附在隧道二次衬砌的表面，可近似认为传感器与黏着处结构的变形保持同步，从而反映隧道断面的整体变形情况。经过对 FBG 的定位、熔接和黏贴，把光纤引入远方的监测中心，并进行光损耗测量和断点检测后，成功完成对隧道的传感布控。图 2，3 分别为 FBG 隧道监测系统的纵向和横向剖面布置图。图 4 所示为顶表面 FBG 传感器的串联及黏贴方式；图 5 所示为拱左、右两侧(拱肩和拱腰)FBG 传感器的串联及黏贴方式。除拱顶倾斜设置的温度补偿光栅外，另外两支互相垂直的测量光栅分别监测隧道的轴向方向和隧道横断面 方向上的应变。

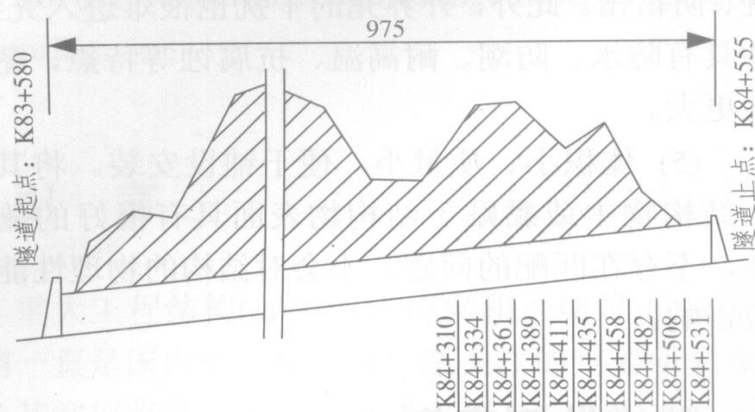


图2 FBG隧道监测系统纵向剖面布置图(单位: m)

Fig.2 Longitudinal cross-section of tunnel FBG measurement system(unit: m)

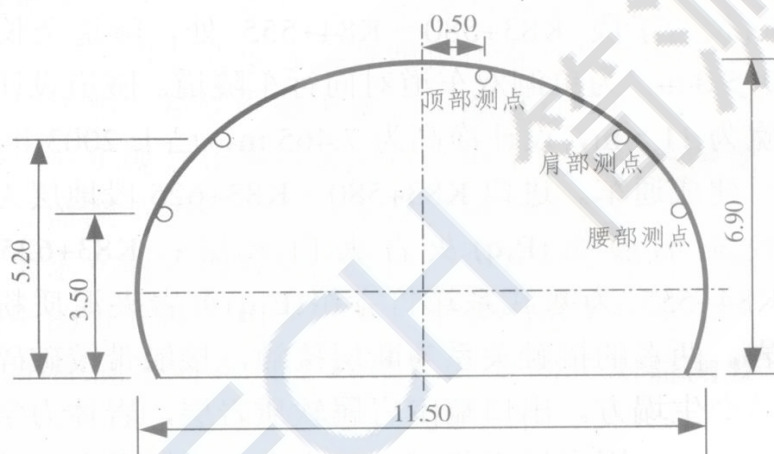


图3 FBG隧道监测系统横向剖面布置图(单位: m)

Fig.3 Transverse cross-section of tunnel FBG measurement system(unit: m)

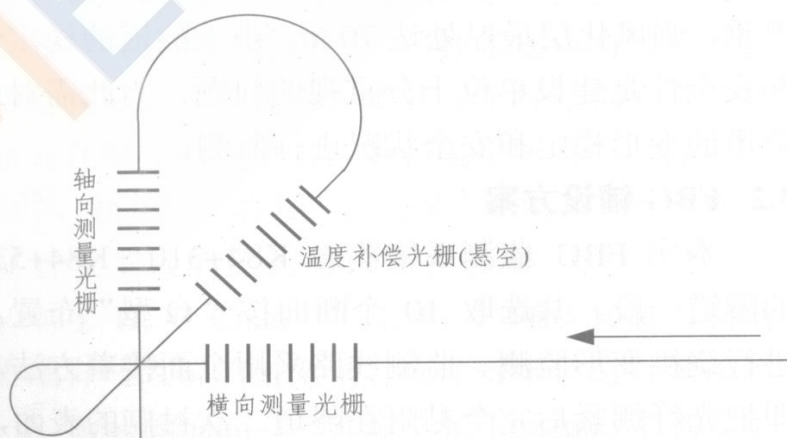


图4 FBG传感器在隧道拱顶的串联和黏贴示意图

Fig.4 Schematic diagram of FBG sensor adhesive method at crown of tunnel

本次工作所采用的 FBG 表面应变传感器的主要技术指标为：分辨率 $\leq 0.1\%$ FS；测试精度 $< 2\%$ FS；温度范围为 $-20^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ ；应变测量范围为 $-1\,000 \sim +1\,000\ \mu\varepsilon$ 。JEME-iFBG-S04 型光纤光栅解调仪的主要技术指标为：通道数为 4 个；波长范围 80nm；分辨率为 1pm；扫描频率为 5Hz；工作温度为 $0^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 。

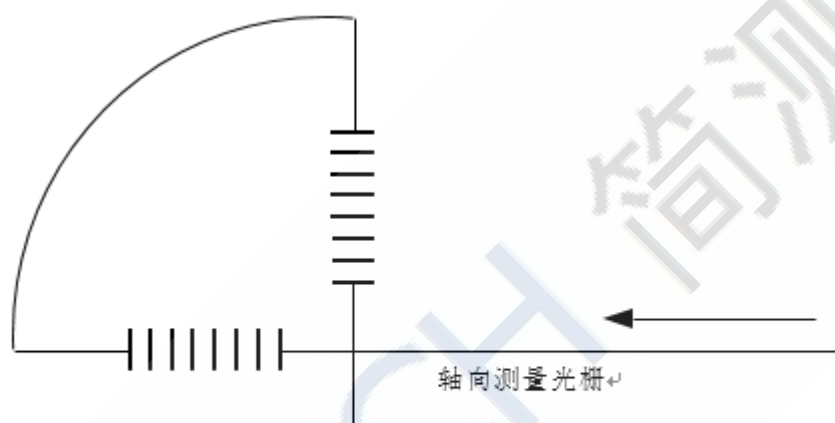


图5 FBG 传感器在隧道拱肩和拱腰
的串联和黏贴示意图 Fig.5

3.3 温度补偿技术

根据 FBG 的传感原理及式(2)可知，由于光纤光栅对应变与温度同时敏感，使得通过测量光纤光栅耦合波长移动无法对应变与温度加以区分，所以用其作为应变传感元件时，应消除温度所带来的影响，在应用中必须对 FBG 传感器采取消除温度敏感的措施以补偿。具体做法是：在一根光纤上同时串联应变测量光栅和温度补偿光栅(如

图 4 所示)。测量光栅受应变和温度同时作用,温度补偿光栅由于悬空仅受温度影响,而不受结构的作用。二者处于同一温度场中,它们对环境温度的变化具有相同的响应,即温度变化引起二者波长变化量相同,在测量光栅的波长漂移中扣除温度变化引起的波长漂移,便得到应变单独作用引起的波长漂移,从而达到温度补偿的目的,即

$$\varepsilon = \frac{\Delta \lambda_{\text{total}} - \Delta \lambda_T}{K_\varepsilon} \quad (3)$$

$$K_\varepsilon = 1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - \nu (P_{11} + P_{12})] \quad (4)$$

式中: ε 为轴向应变, $\Delta \lambda_{\text{total}}$ 为应变和温度引起测量光栅的波长漂移量, $\Delta \lambda_T$ 为温度补偿光栅的波长漂移量, K_ε 为 FBG 的应变灵敏度系数。

3.4 隧道内温差对 Bragg 波长变化的影响

对于较长隧道,其内部温度分布相对复杂,隧道内同一位置在不同时期的温度也不相同。由于环境温度的变化对 Bragg 波长漂移有一定的影响,从而直接影响应变监测结果的精确性。为检测隧道内温差对 Bragg 波长变化的影响程度并验证 FBG 监测系统的稳定性和可靠性,于 2004 年 4 月 16 日 17:00~4 月 17 日 17:00 进行 24 h 连续监测(时间间隔为 1~2 h)。监测数据按此原则进行处理:以第 1 次测量的波长值作为监测系统的基准值,此后所有监测数据均要扣除该基准值,从而显示隧道各断面中温度传感系统的 Bragg 波长随测量次数的变化规律。同时监测隧道外界环境温度和隧道内温度的变

化情况，测量结果表明，隧道外界环境实际温度的变化 ($0^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$) 所导致的隧道监测段内温度变化的相应温度为 $0^{\circ}\text{C} \sim 2^{\circ}\text{C}$ 。图 6, 7 给出 8 个断面的温度传感系统的 Bragg 波长随测量次数变化曲线。

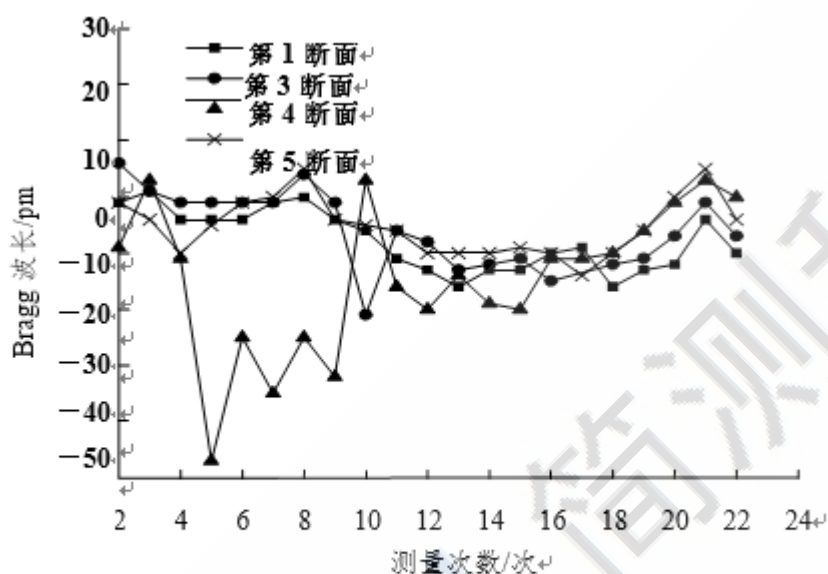


图 6 第 1, 3, 4, 5 断面中温度传感系统的 Bragg 波长随测量次数变化曲线

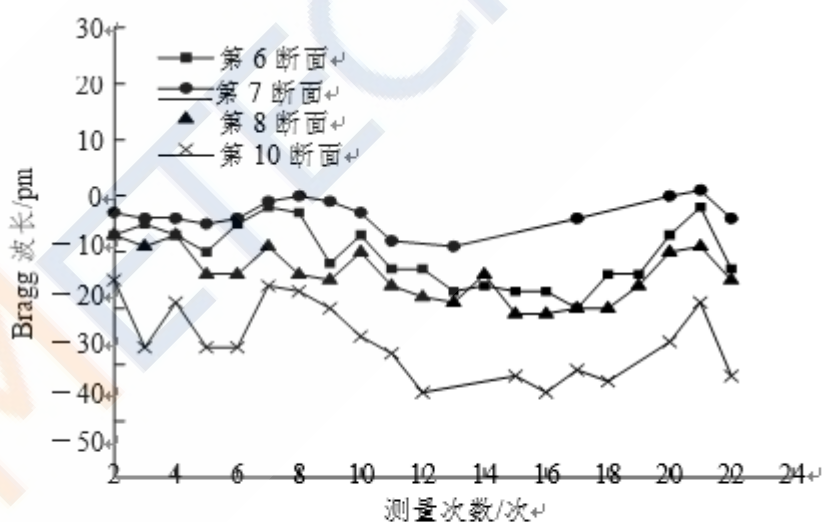


图 7 第 6, 7, 8, 10 断面中温度传感系统的 Bragg 波长随测量次数变化曲线

由图 6, 7 可知，隧道虽然经历外界 24h 内的温度极低和极高环境，但其内部一天当中的温度变化对温度传感系统的 Bragg 波长变

化影响不大，波长变化范围主要集中在 $-40\sim 10\text{pm}$ 。除第4断面以外，其余断面的变化曲线的波型及变化趋势基本一致，可能是由于第4断面附近温度波动较大，而其余断面附近温度分布相对稳定所致。从整体上看，温度越低，波长变化值下降；温度越高，波长变化值随之回升。此外，对8个断面上温度传感系统所取得的 Bragg 波长值进行可靠性的估计。标准误差越小，可靠性则越大，计算结果见表1。由表1可知，标准误差可控制在 14 pm 以内。在全天监测过程中，隧道附近的施工爆破及隧道内通车引起的振动对光纤及传感器的正常工作均无影响，传感线路良好，系统工作稳定。由此可见，光纤 Bragg 光栅应变传感器的可靠性和稳定性是有保证的。

表1 Bragg 波长值的计算结果

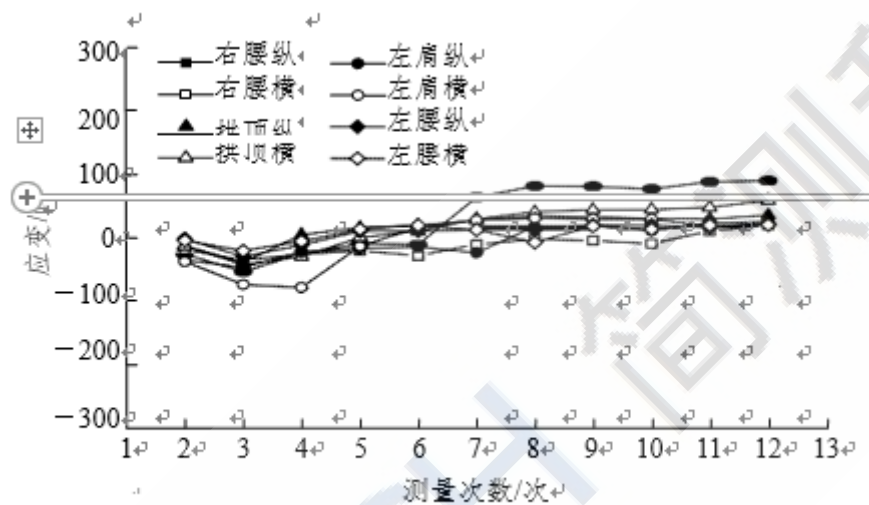
Table 1 Calculation results of Bragg wavelengths

隧道断面(桩号)	标准误差/pm
第1断面(K84+310)	6.6
第3断面(K84+361)	6.9
第4断面(K84+389)	13.4
第5断面(K84+411)	5.1
第6断面(K84+435)	5.8
第7断面(K84+458)	2.8
第8断面(K84+482)	5.4
第10断面(K84+531)	8.8

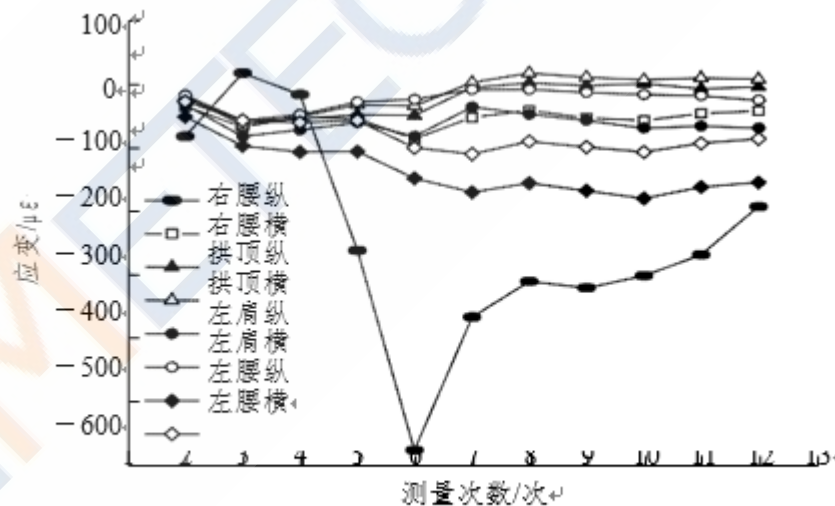
3.5 隧道应变监测结果分析

为了考察隧道衬砌在不同时期变形情况，于2004年2月19日~10月20日对其进行应变监测，以便了解隧道的健康状态并及时

采取补救措施。其中 2~3 月为干季，测量频度为 4 周 1 次；4~8 月为雨季，测量频度为 3 周 1 次；此后又改为 4 周 1 次，共进行 12 次测量。同样以第 1 次的应变监测数据为基准，后 11 次的监测数据均扣除该基准值，从而反映隧道 2 月 19 日以后的应变变化。本文给出第 1，4，5，10 断面中的光纤 Bragg 光栅应变随时间的变化曲线。



(a) 第 1 断面



(b) 第 4 断面

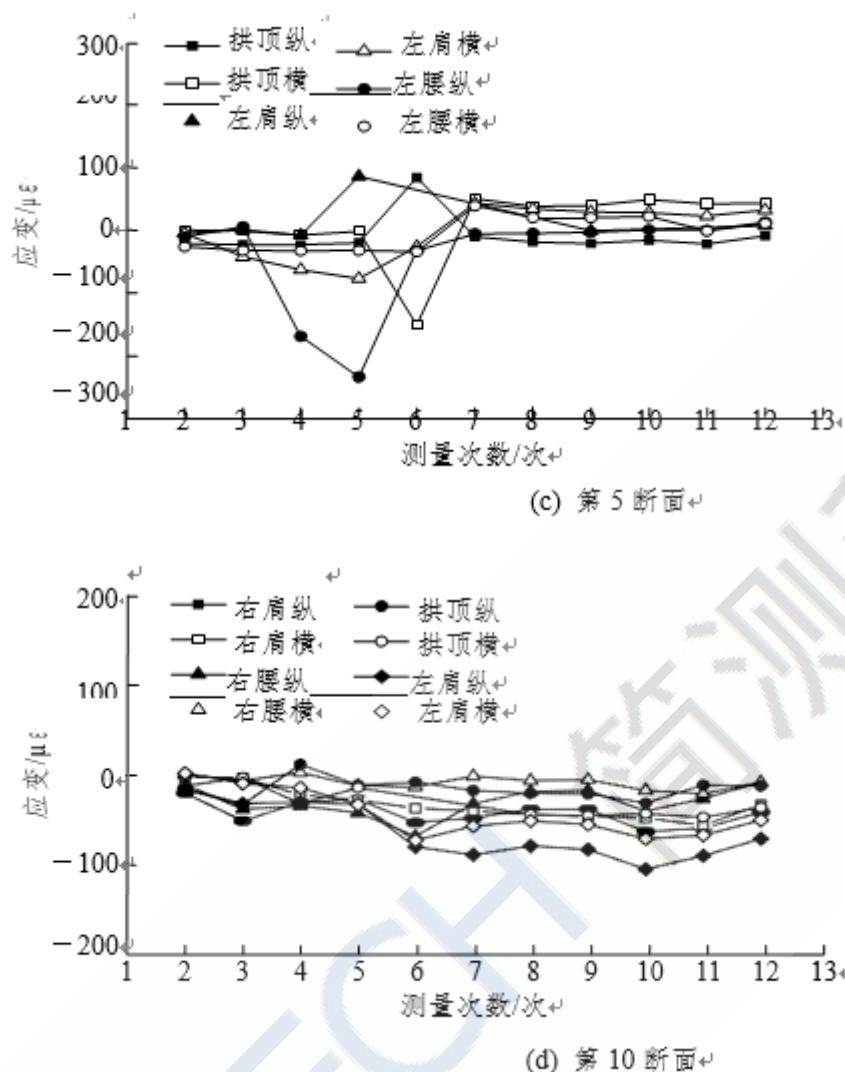


图8 第1, 4, 5, 10 断面中的FBG 应变随时间的变化曲线

从图8中可看出,在前7次测量中,4个断面的应变变化量均表现出不同程度的波动,说明进入雨季后,隧道应变明显加大,进而表明下雨对隧道结构的受力产生一定影响。这种现象在第5断面表现的最为突出,其拱部、肩部及腰部的应变变化为 $-250 \sim 100 \mu\epsilon$;在第6次测量中,第4断面右侧腰部纵向的应变变化最大,降至 $-600 \mu\epsilon$,需引起关注;而第1, 10断面各部位的应变波动幅度不大,分别分布在 $-80 \sim 20 \mu\epsilon$ 和 $-70 \sim 10 \mu\epsilon$ 。在后5次测量中,4个断面各个监测部位的应变变化较小,曲线总体较平缓,说明隧道二次衬砌结构已

开始向稳定的趋势发展。从整体上看，第 1 和 5 断面的应变变化相对较稳定，变化量分别在 $-25 \sim 90 \mu \varepsilon$ 和 $25 \sim 50 \mu \varepsilon$ ；第 4 断面的关注部位的应变在前期的大幅波动后，也逐步回升，但仍需要在后期的监测中观察其走势，而该断面的其余监测部位处于良性发展阶段；第 10 断面在第 10 次监测中仍有小范围的波动，但此后也近于稳定。

4、结 论

(1) 为解决 FBG 的波长漂移对应变与温度的交叉敏感问题，提出相应的温度补偿技术，24h 连续监测表明，1 d 内的温度变化对温度传感系统的 Bragg 波长变化影响不大。

(2) 通过对隧道进行 8 个月的定期监测表明，雨季时隧道断面的应变变化波动相对较大，而干季时应变趋于平稳。其中第 4 断面右侧腰部纵向的应变变化不稳定，监测期间最大值近 $-600 \mu \varepsilon$ ，这一现象值得注意，并成为以后的监测重点，其余断面被监测部位的应变前期有小的波动，后期基本保持稳定，说明隧道二次衬砌结构逐渐稳定。

(3) 本文提出的隧道 FBG 传感器铺设方案是成功的，监测期间传感光纤线路良好，无断裂事故发生；传感器的存活率很高，工作正常；整个监测系统长期稳定性好。监测结果表明，FBG 传感技术可比较真实地得到隧道的应变分布，将其应用于隧道应变监测中是可行的。随着这项技术的不断成熟和发展，其在岩土工程监测领域将会有更为广阔的应用前景。