

# 基于光纤光栅监测技术的京雄高铁大断面 隧道结构健康监测

吴静红<sup>1,3\*</sup>, 叶少敏<sup>2</sup>, 张继清<sup>2</sup>, 赵青<sup>2</sup>, 张文轩<sup>3</sup>

<sup>1</sup>苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州, 215011;

<sup>2</sup>中国铁路设计集团有限公司, 天津 300000;

<sup>3</sup>苏州南智传感科技有限公司, 江苏 苏州 215123

**摘要** 京雄城际铁路机场隧道 DK46+092~DK53+300 区间位于区域性地面沉降明显地段, 为了更加迅速、直观地了解隧道在施工和后期运营过程中的安全情况, 掌握隧道结构的健康状态, 需要对其进行安全监测。基于光纤光栅感测原理, 在京雄高铁的在建隧道中进行了隧道衬砌环向应变感测、隧道衬砌变形缝相对位移感测和隧道周边分层沉降监测; 详细介绍了传感元件的布设安装工艺, 实现了大断面隧道结构健康监测的自动化、远程化控制。初期监测结果显示了隧道在混凝土浇筑养护期以及回填期内断面上应变、轴力与弯矩的变化规律。光纤光栅自动化、长期监测的实时性和精确性有利于实现对隧道结构的实时监控和早期预警。

**关键词** 光纤光学; 京雄高铁; 光纤光栅; 布设工艺; 大断面; 隧道变形

中图分类号 U459.3 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.210603

## Structural Health Monitoring of Large-Section Tunnel of Jingxiong High-Speed Railway Based on Fiber Bragg Grating Monitoring Technology

Wu Jinghong<sup>1,3\*</sup>, Ye Shaomin<sup>2</sup>, Zhang Jiqing<sup>2</sup>, Zhao Qing<sup>2</sup>, Zhang Wenxuan<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215011, China;

<sup>2</sup> China Railway Design Corporation, Tianjin 300000, China;

<sup>3</sup> Suzhou NanZee Sensing Technology Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215123, China

**Abstract** The DK46+092-DK53+300 sections of the Jingxiong intercity railway airport tunnel are located in the area with obvious land subsidence. In order to understand the safety situation of the tunnel during construction and later operation in a more rapid and intuitive way, it is necessary to monitor the health status of the tunnel structure. In this paper, based on the fiber grating sensing principle, the circumferential strain sensing of the tunnel, the relative displacement sensing of the deformation joint, and the layered settlement monitoring around the tunnel are carried out. The layout and installation processes of the sensor elements are introduced in detail, and the automatic and remote control of the health monitoring of the large-section tunnel structure is realized. The initial monitoring results show the changes of the strain, axial force, and bending moment of the tunnel during the concrete pouring and curing period and backfilling period. The automation and long-term monitoring of fiber Bragg grating are beneficial to the real-time monitoring and early warning of the tunnel structure.

**Key words** fiber optics; Jingxiong high-speed railway; fiber Bragg grating; layout process; large section; tunnel deformation

**OCIS codes** 060.2370; 060.3735; 010.0280

收稿日期: 2020-02-20; 修回日期: 2020-02-27; 录用日期: 2020-03-06

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(41907232)、江苏省自然科学基金(BK20180972)、中国铁路总公司科技研究开发计划(P2018G004)

\* E-mail: wjh@mail.usts.edu.cn

## 1 引言

受地质条件、外界环境、车辆震动等诸多因素的影响,隧道施工及运营阶段会出现结构裂缝及损坏、隧道纵向沉降及管径环向收敛变形等病害<sup>[1]</sup>,严重危害人民的生命安全并影响社会经济活动的正常进行,因此隧道结构健康状况已成为地下交通安全运营研究中的关键问题之一<sup>[2]</sup>。传统隧道工程监测大多采用基于电阻式、钢弦式或电感式等的点式传感器,普遍存在监测结果精度低、耐久性差及传导线过多导致难以布设等缺点,难以满足现代隧道施工监测的要求<sup>[3]</sup>。

光纤布拉格光栅(FBG)感测技术是近年来兴起的工程监测领域一类新的监测技术和手段,具有准分布式,精度高,自动化,抗干扰、抗腐蚀性强等特点,十分适用于隧道结构等大型线性工程的实时在线监测。我国首次将光纤传感器应用于隧道监测是在2003年云南省嵩待高速公路白泥井3号隧道的建设中。近十几年来,FBG技术的布设形式、温度补偿、数据处理等得到了较多研究,其在隧道主要病害监测方面取得了一些成果<sup>[4]</sup>。马豪豪等<sup>[5]</sup>基于西安地铁二号线4个典型断面实际工况进行隧道模型实验,通过将自行设计封装的光纤光栅传感器粘贴在锚杆模型表面,监测其不同应力状态下的应变,该方法为模型实验中的应变监测提供了新的可靠途径;杨建国等<sup>[6]</sup>利用波分复用(WDM)技术并采用串联方式构成线性FBG传感器阵列,通过对典型断面二次衬砌应变进行连续监测,得到了二次衬砌混凝土早期应变及结构内力的变化规律;苏胜昔等<sup>[7]</sup>利用FBG技术实现了隧道围岩变形的远程实时监测;刘颖等<sup>[8]</sup>通过室内实验对比了FBG与电阻应变片采集的变形数据,论证了FBG的优势,并实现了FBG传感器的实时自动化监测。现阶段,FBG隧道监测技术逐渐向多参量监测发展,如隧道震动监测<sup>[9]</sup>、隧道火灾探测<sup>[10]</sup>等。但上述研究主要集中于隧道单一病害的监测,重点关注隧道本身结构变形而忽略了由大规模地下空间开发引起的区域沉降环境下隧道的纵向沉降或不均匀沉降。

本文将FBG监测技术应用于区域性地面沉降环境下京雄高铁隧道的结构健康监测,针对隧道周围岩土体沉降环境下隧道产生的衬砌环向应变、衬砌变形缝相对位移等,设计了相应FBG传感器用于隧道施工及后期运营过程中的自动化监测。本文详细介绍了传感元件的布设方案,分析了初期监测结

果,为大断面隧道结构的健康监测提供了技术支持。

## 2 光纤光栅传感原理

FBG具有基于光波选择反射镜的作用,当宽带入射光在光栅中传输时,入射光将在相应的波长(频率)上被反射回来,其余的透射光谱则不受影响。纤芯的有效折射率 $n_{\text{eff}}$ 和刻制的栅距(周长) $\Lambda$ 决定了背向反射光中心波长 $\lambda_b$ :

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

温度和应变是能改变有效折射率和光栅栅距的两个物理量,从而引起中心波长的漂移,可以表示为

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = (1 - P_e) \cdot \Delta\varepsilon + (\alpha + \xi) \cdot \Delta T, \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_b$ 为布拉格波长的变化; $P_e$ 、 $\alpha$ 和 $\xi$ 分别表示弹光系数、热膨胀系数和热光系数; $\Delta\varepsilon$ 表示应变的变化; $\Delta T$ 表示温度的变化。因此,通过调制解调器解调中心波长即可获得光纤光栅处应变或温度的变化。由于FBG是一种准分布式传感技术,不同的光纤光栅可具有不同的中心波长,利用波分复用技术可以实现同一根光缆上不连续的特殊点的相关信息采集<sup>[11-12]</sup>,并且通过物理量的相互转化,FBG还可用于位移、压力、震动、含水率等多种参量的监测。

## 3 FBG传感器隧道布设方案

### 3.1 隧道衬砌环向应变感测

在隧道施工及后期运营过程中,周围岩土体及邻近工程会引起隧道横截面受力变形,利用带有温度自补偿功能的光纤光栅混凝土埋入式应变计[图1(a)]可进行隧道衬砌环向应变监测。其原理是利用光纤光栅作为微测力元件,通过轴向拉伸或压缩对传感器弹性敏感元件产生的作用力变化对光纤光栅波长的影响来测量被测物的应变变化量。

采用并联的连接方式,将光纤引线和数据传输线从隧道仰拱引出至中央排水沟,并沿中央排水沟连接至疏散竖井处的解调仪[图1(b)]。将应变计预埋于监测断面中,将其与衬砌内外主筋绑扎[图1(c)],每个断面环向共布设26个应变计,用于监测14个点的衬砌内外应变变化。

### 3.2 隧道衬砌变形缝相对位移感测

隧道中的结构缝是整个隧道较为软弱的环节,是整个隧道变形状态的直观反映。采用光纤光栅双向位移计进行隧道衬砌变形缝相对位移监测,位移计的原理是利用光纤光栅作为测试载体,将其布设

在传感梁上,当传感器进行测量时,传感梁拉伸,光纤光栅位移计的波长会发生相应的变化,从而将位

移转换为光纤光栅波长的变化(图 2),通过选择不同的弹簧长度,可以研制不同量程和灵敏度的位移计。

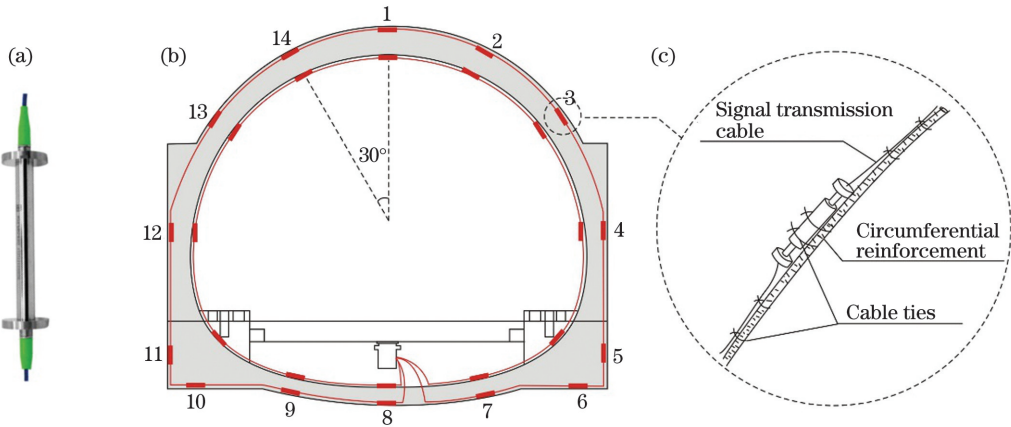


图 1 断面环向应变监测。(a)FBG 应变计; (b)隧道断面应变计布设示意图; (c)应变计安装示意图

Fig. 1 Sectional circumferential strain monitoring. (a) FBG strain gauge; (b) layout of strain gauges in tunnel section; (c) installation of strain gauge

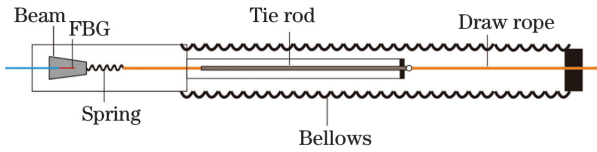


图 2 光纤光栅位移计结构图

Fig. 2 Structural diagram of FBG displacement meter

隧道衬砌浇筑完成后,在隧道中心排水沟的腰位置处一个变形缝位置[图 3(a)],将光纤光栅位移计[图 3(b)]跨越管缝安装,一个断面布设 1 个光纤光栅双向位移计。光纤光栅位移计通过两端固定,依靠中间可伸缩位移传递杆感测裂缝的位移变化量 [图 3(c)]。

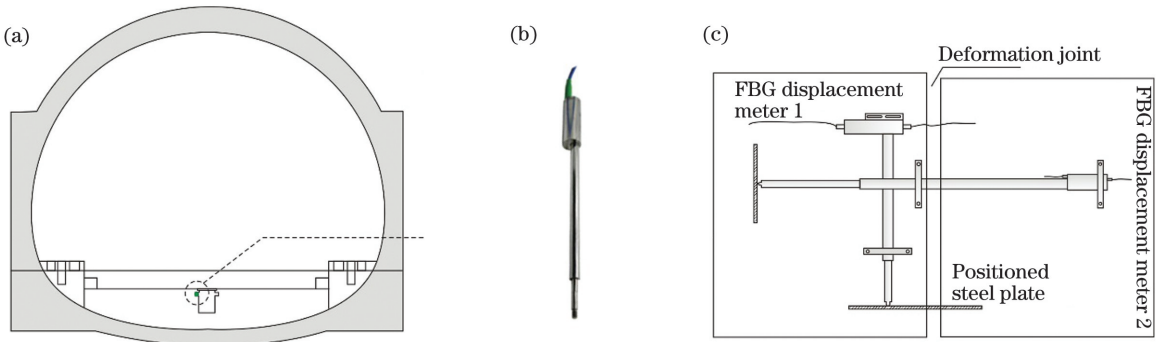


图 3 变形缝双向位移监测。(a)隧道断面位移计布设示意图; (b)FBG 位移计; (c)双向位移计安装示意图

Fig. 3 Monitoring of bidirectional displacement of deformation joints. (a) layout of displacement meter in tunnel section; (b) FBG displacement meter; (c) installation of bidirectional displacement meter

### 3.3 分层沉降监测

区域沉降条件下,由于隧道结构自身特点及地质条件等原因,越来越多的地下结构在使用过程中出现过量的纵向沉降或不均匀沉降,进而对隧道的结构、接头防水构成威胁。如图 4(a)所示,在隧道周围埋设 FBG 分层沉降计,分层沉降计由光纤光栅位移计、刚性杆、基座、锚头组成,可以及时获取不同层位的土层变形情况,从而可判断隧道的纵向不均匀沉降。分层沉降孔边埋置基岩标,用于测量其绝对

高程,分层沉降计顶部与基岩标通过 2 个光纤光栅静力水准仪[图 4(b)]连接,通过水位高度差引起的浮筒的浮力变化对光纤光栅波长的影响进行实时感测,得到分层沉降计顶部的绝对高程。

## 4 工程应用

### 4.1 工程概况

本工程位于京雄城际铁路机场隧道 DK46+092~DK53+300 区间,主要经过北京新机场规划

Ⅱ期及永定河南、北大堤,区间长度为 7208 m,其中,永定河范围的长度为 1783 m。隧道设计为单洞双线隧道,线间距为 5 m。隧址区的施工均采用明挖法(4 种明挖支护体系),洞口段采用全放坡明挖

方式,一般段采用放坡+钻孔灌注桩+内支撑的方式,村庄(水厂)段采用砖砌挡墙+钻孔灌注桩+内支撑的方式,永定河河槽段采用放坡+双排钻孔灌注桩的方式。

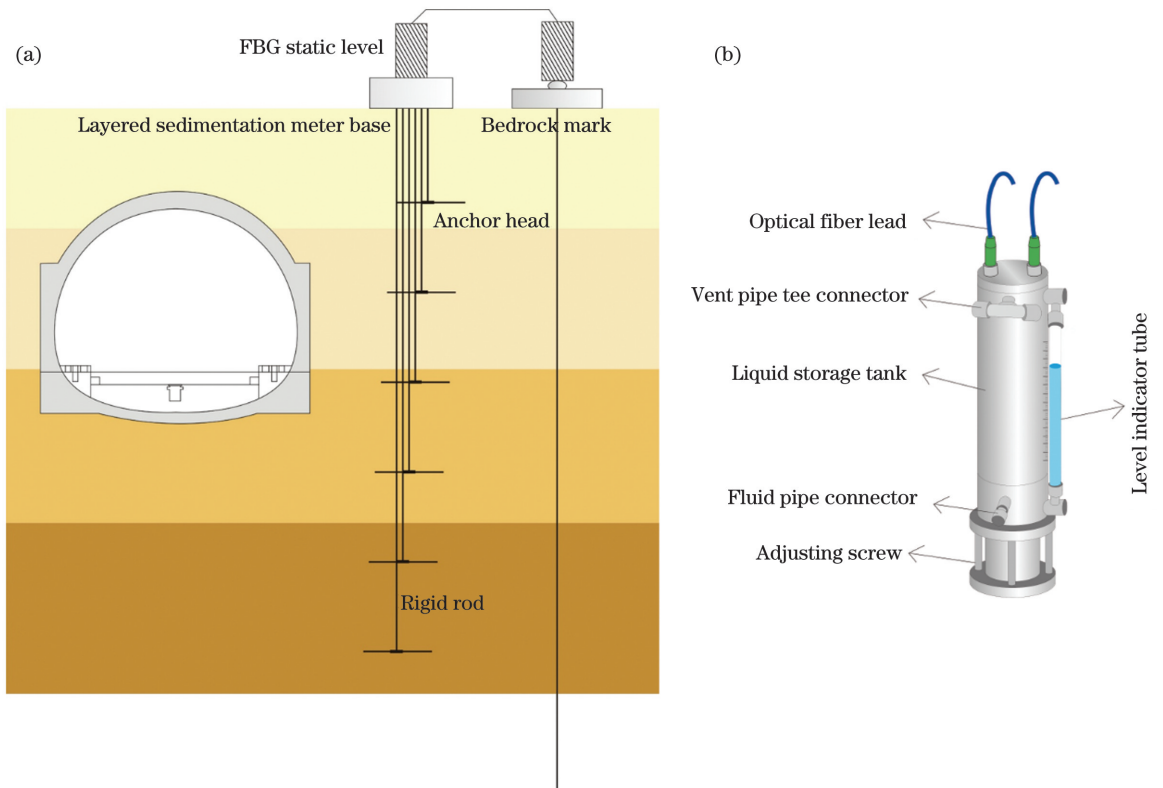


图 4 分层沉降监测。(a)分层沉降计和基岩标布设示意图;(b)FBG 静力水准仪

Fig. 4 Layered settlement monitoring. (a) Layout of layered settlement meter and bedrock mark; (b) FBG static level

机场隧道区地貌为河北冲积平原,地形平坦开阔,略有起伏,隧址区大部分为耕地,隧道上方少有建筑物。地质调绘及钻探揭示,隧道区地层主要为第四系全新统人工堆积层(Q4al)填筑土,第四系全新统冲积层(Q4al)包含淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土、黏土、粉质黏土、粉土、粉砂、细砂、下伏(Q3al)黏土、粉质黏土、粉土、粉砂、细砂。

#### 4.2 监测方案

为了掌握区域性地面沉降环境下京雄高铁隧道的结构变形特性及变化趋势,利用 FBG 技术进行区间隧道环向应变监测、隧道变形缝相对位移监测,并对在建隧道周围地层进行分层沉降监测。如图 5 所示,监测区间内共有 25 个隧道衬砌环向应变监测断面,以 5 个为一组(间距 2 m)的形式将 25 个隧道衬砌环向应变监测断面分为 5 组,分别分布在 DK49+200,DK50+410,DK51+060,DK51+900 和 DK52+700 5 个断面处,用于监测浇筑、回填及后期运营过程中隧道环向应变变化。隧道衬砌变形缝双向位移变形由每个断面隧道中心排水沟腰位置

处一个跨缝布设的光纤光栅双向位移计获取。分层沉降监测孔位于疏散竖井附近永久占地(100 m 内),孔径为 200 mm,孔深为 70 m,采用多点分层沉降计对 6 个测点(分别布置于距地表 10,15,20,30,50,70 m 深处土层)进行监测,获取隧道周围不同深度土层的变形情况。

#### 4.3 监测结果分析

目前区间隧道各断面仍处在浇筑或回填期,现阶段只对环向应变感测系统进行了初期数据的采集,暂未开始对变形缝相对位移及区域性地面沉降进行监测。以 DK51+907~DK51+916 断面为例分析混凝土浇筑及回填过程中隧道断面的受力情况。该断面仰拱传感器安装时间为 2019 年 3 月 17 日,浇筑时间为 2019 年 3 月 22 日,衬砌传感器安装时间为 2019 年 4 月 7 日至 10 日,浇筑时间为 2019 年 4 月 12 日。待浇筑结束,2019 年 4 月 15 日开始进行隧道环向应变的连续自动监测。2019 年 5 月 28 日开始回填,2019 年 9 月 5 日回填结束,回填高度为 14 m。



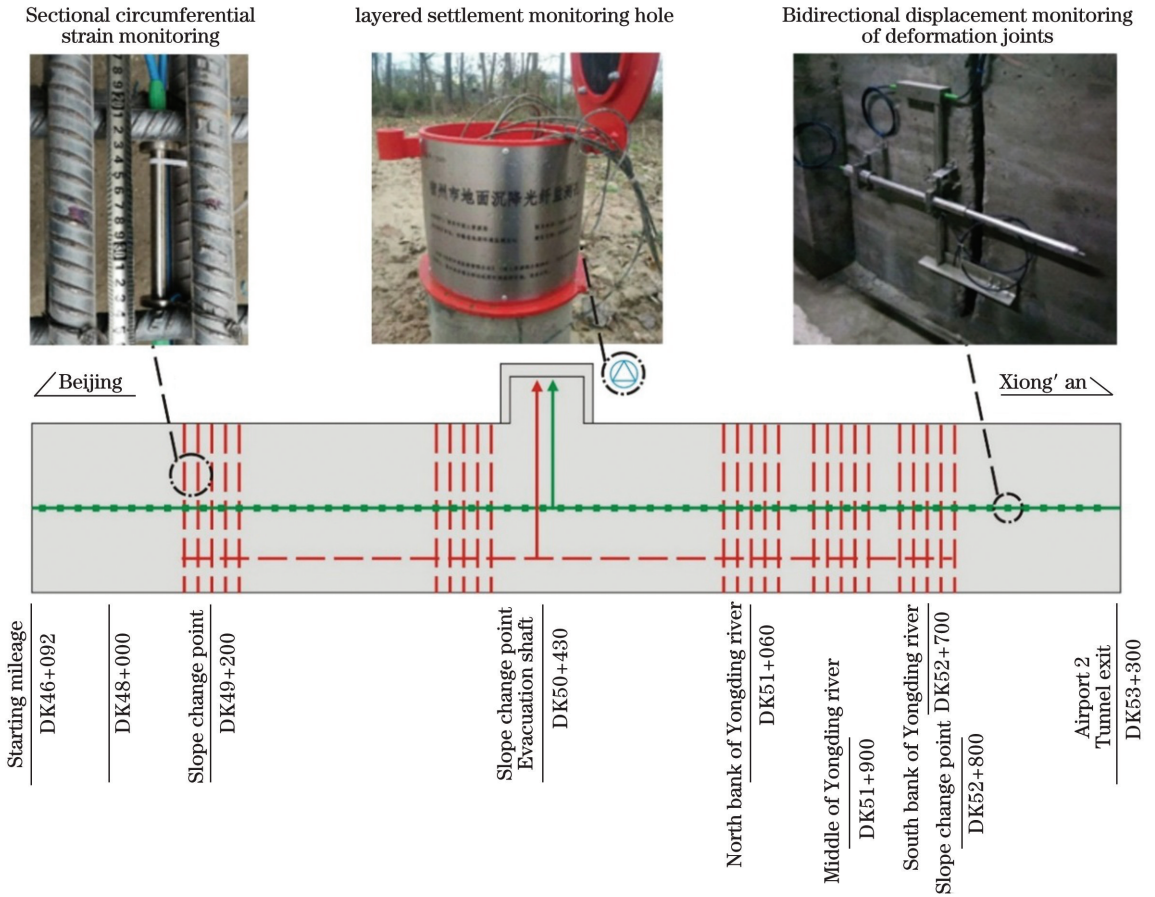


图 5 京雄高铁大断面隧道结构健康监测传感元件的平面布设示意图

Fig. 5 Layout of sensors for structural health monitoring of Jingxiong high-speed railway tunnel with large section

图 6 给出了混凝土浇筑完成后 DK51+907 断面 14 个测点的平均应变随时间的变化,其中测点 8

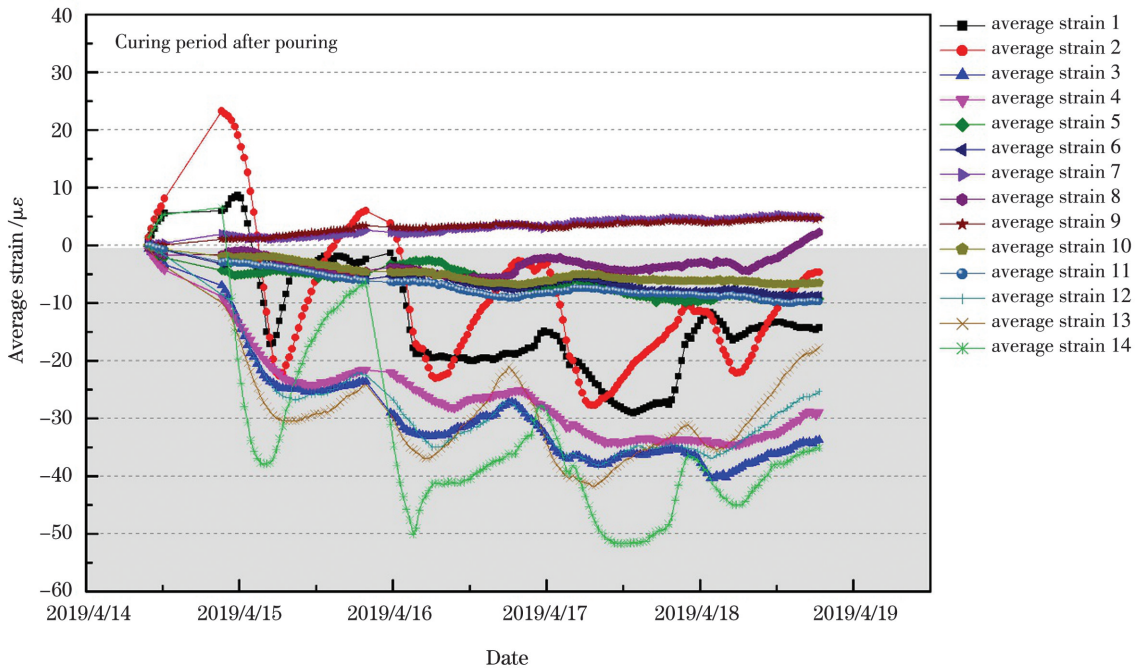


图 6 浇筑完成后 DK51+907 断面 14 个测点的平均应变随时间的变化

Fig. 6 Average strain of 14 measurement points at DK51 + 907 cross section varying with time after pouring

的应变在 0 应变附近波动,存在压、拉转换情况;测点 7 和 9 处出现拉应变,且拉应变值随时间的推移缓慢增加,但拉应变值较小;测点 5、6、10、11 处出现压应变,且压应变值随时间缓慢增加,最大不超过  $-10 \mu\epsilon$ ;测点 3、4、12、13 呈现明显的压应变,且压应变随时间呈波动增长的趋势,最大压应变达到

$-40 \mu\epsilon$  左右;测点 1、2、14,即隧道顶部在初期呈现出拉应变,随后转化成压应变并随时间呈波动变化。表 1 给出了浇筑期各测点平均应变的统计,可以发现对称测点的应变变化基本一致,浇筑期间隧道衬砌在测点 2 位置受到的最大拉应变为  $23.3 \mu\epsilon$ ,在测点 13 位置受到的最大压应变为  $-41.7 \mu\epsilon$ 。

表 1 浇筑期各测点平均应变的统计

Table 1 Statistics of average strain at each measurement point during pouring

Measurement point	Strain during pouring / $\mu\epsilon$			Measurement point	Strain during pouring / $\mu\epsilon$		
	Maximum	Average	Minimum		Maximum	Average	Minimum
1	8.7	-13.8	-29.1	14	6.5	-34.2	51.8
2	23.3	-10.1	-27.8	13	-0.5	-29.2	-41.7
3	-0.6	-30.2	-40.4	12	0.0	-29.0	-38.2
4	-0.9	-26.9	-34.6	11	-0.1	-7.1	-10.1
5	-0.2	-6.5	-9.9	10	-0.1	-5.0	-6.9
6	-0.2	-6.0	-9.0	9	4.8	3.2	-0.2
7	5.2	3.2	0.1				
8	2.2	-3.3	-6.2				

根据平截面假定和材料力学相关理论,可认为截面上下端的应变由弯矩和轴力共同影响。因此,中性轴取形心轴,按照以下计算方法进行轴力和弯矩计算:

$$N = \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{2} \times E \times l, \quad (3)$$

$$M = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{12} \times l^2 \times E, \quad (4)$$

式中: $\epsilon_1$  为外侧应变计测值; $\epsilon_2$  为内侧应变计测值; $l$  为应变计中心距; $E$  为钢筋混凝土弹性模量。根据实际安装现场测得的感测元件中心距确定  $l$  值。钢筋混凝土弹性模量  $E$  取 C40 混凝土的 32.5 GPa。规定

轴力方向:混凝土受拉为正,受压为负;弯矩方向:衬砌内弧受压为正,受拉为负。

图 7 给出了浇筑完成后隧道衬砌的轴力和弯矩分布图。从图 7(a)可以看出,管片轴力在隧道底部  $150^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $210^\circ$  处随时间的推移变化很小,2019 年 4 月 14 日开始监测,发现在隧道顶部  $0^\circ$ 、 $30^\circ$  和  $330^\circ$  位置处出现拉力,随后随着时间的推移各点轴力呈压力,并逐渐增大,其中两腰的  $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $270^\circ$ 、 $300^\circ$  位置处压力最大。图 7(b)为养护期隧道断面受压弯矩,弯矩极值出现的部位与轴力极值出现的部位相同,在两腰位置处,隧道顶部和底部弯矩值较小。

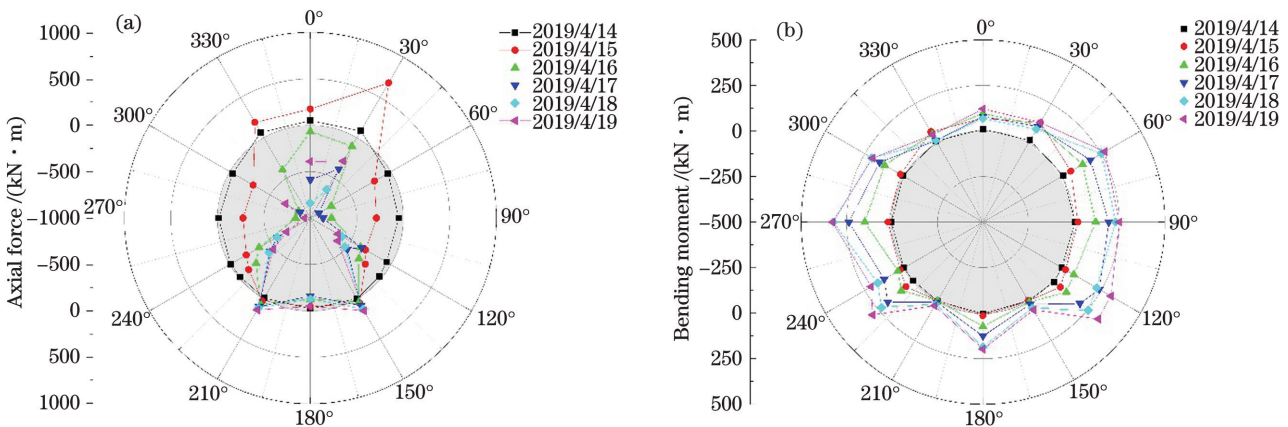


图 7 浇筑完成后 DK51+907 断面 14 个测点的内力变化。(a)轴力;(b)弯矩

Fig. 7 Internal force changes of 14 measurement points at DK51 + 907 cross section after pouring.

(a) Axial force; (b) bending moment

图 8 给出了回填期间 DK51+907 断面 14 个测点的平均应变随时间的变化情况,回填期间隧道环向整体应变变化要大于浇筑养护期间,各测点呈现出压应变逐渐增大的趋势,结合表 2 各测点应变统计数据可

知,其中测点 10 和 11 的平均应变最小,测点 13 的应变变化最大,最大压应变可达约  $90 \mu\epsilon$ 。回填时对称的测点应变变化略有差别,测点 13 的压应变要明显大于测点 3,测点 5 和 6 的压应变要明显大于测点 10 和 11。

表 2 回填期各测点平均应变的统计

Table 2 Statistics of average strain at each measurement point during filling

Measurement point	Strain during filling / $\mu\epsilon$			Measurement point	Strain during filling / $\mu\epsilon$		
	Maximum	Average	Minimum		Maximum	Average	Minimum
1	-7.3	-40.8	-68.8	14	-13.6	-39.2	-51.2
2	-13.7	-42.4	-68.8	13	-7.7	-59.9	-90.8
3	-1.5	-27.8	-49.8	12	-3.5	-28.9	-48.9
4	0.7	-29.9	-48.6	11	3.1	-5.6	-24.3
5	-0.5	-23.1	-43.5	10	5.5	-1.2	-12.6
6	-4.2	-21.7	-42.5	9	4.7	-7.4	-21.7
7	5.4	-12.4	-37.7				
8	-4.8	-12.9	-27.1				

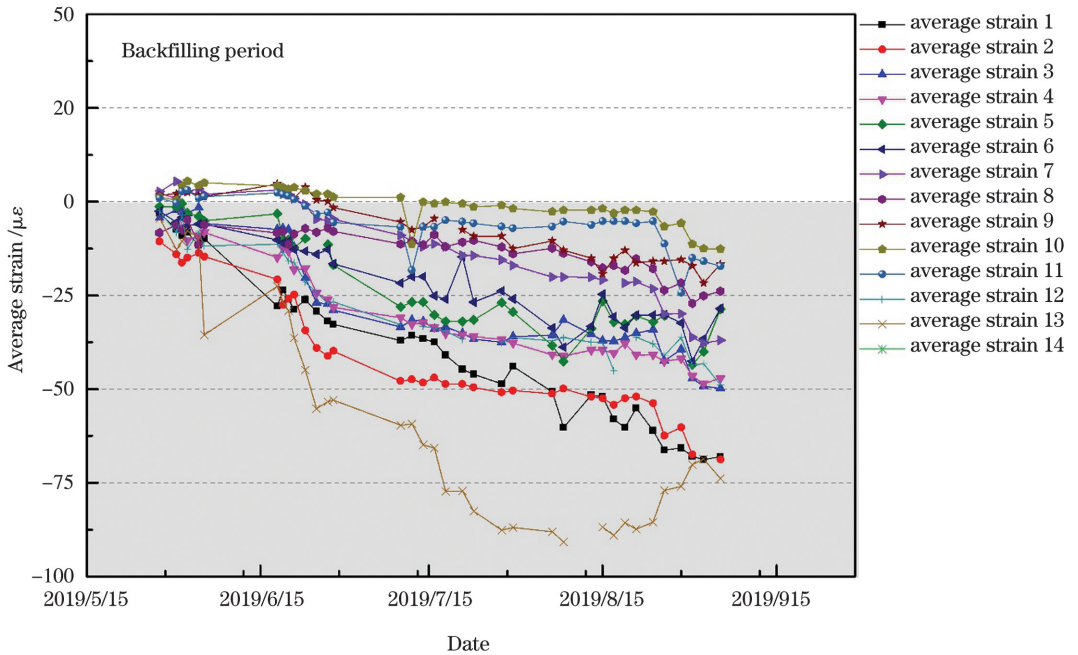


图 8 回填期间 DK51+907 断面 14 个测点的平均应变随时间的变化

Fig. 8 Average strain of 14 measurement points at DK51 + 907 cross section varying with time during filling

图 9 给出了回填期间隧道衬砌的轴力和弯矩分布图。从图 9(a)可以看出,管片轴力在隧道 300°和 120°方向变化明显,随着时间的推移呈压力并逐渐增大,其他位置处轴力变化不明显。从图 9(b)可以看出,隧道腰部 60°、130°、230°和 300°位置处受压弯矩最大,管片顶部及底部受拉弯矩最大,衬砌弯矩大致呈对称分布。

### 5 结 论

光纤光栅监测技术可用于隧道变形、结构裂缝发展、不均匀沉降等监测,其自动化长期监测有利于隧道结构的实时监控和早期预警。基于光纤光栅感测原理设计了隧道自动化感测系统,在 京 雄 高 铁 在 建 隧 道 中 实 现 了 隧 道 受 力 变 形、位 移、不



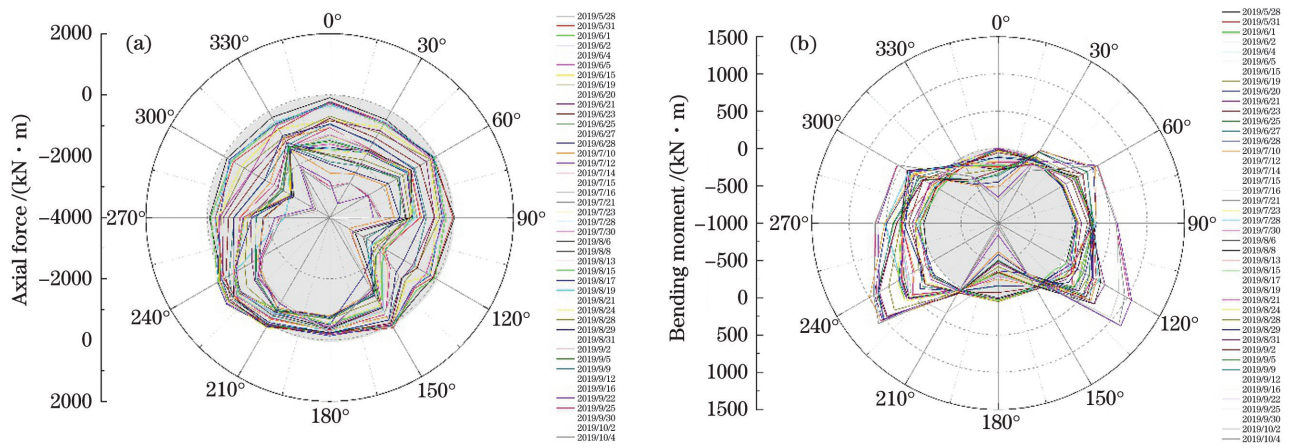


图9 回填期间DK51+907断面14个测点的内力变化。(a)轴力；(b)弯矩

Fig. 9 Internal force changes of 14 measurement points at DK51 + 907 cross section during filling.

(a) Axial force; (b) bending moment

均匀沉降的自动化、远程化监测。初期监测和分析结果表明：

1)所提出的隧道衬砌环向应变感测、隧道衬砌变形缝相对位移感测、隧道周边分层沉降监测传感器铺设方案是成功的,铺设技术也是可行的。

2)在混凝土浇筑养护期与回填期,隧道环向断面上各点应变不同,回填期间应变大于养护期间应变。

3)隧道断面所受轴力为压力,浇筑养护期呈现出两腰的 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 和 $270^\circ$ 、 $300^\circ$ 位置处压力逐渐增大的趋势;回填期,呈 $180^\circ$ 对称的 $120^\circ$ 和 $300^\circ$ 方向上的压力逐渐增大。

4)对于养护期隧道断面受压弯矩,两腰受压弯矩大于顶底部,回填期间两腰受压弯矩最大,管片顶部及底部受拉弯矩最大。

当然,要精确判断隧道的健康状况还应结合后期隧道变形缝相对位移以及隧道周边分层沉降监测结果,并且,仅依靠FBG这一种监测技术是不够的,需要多种监测技术的相互配合,如布里渊光时域反射等全分布式监测技术,通过全局监控和局部精细化监测可更加全面地掌握隧道安全状态,从而确保隧道安全运营。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang C. Research on the DFOS-based monitoring for the structural deformation of metro shield tunnel in Suzhou[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015. 张驰. 苏州地铁盾构隧道结构变形分布式光纤监测技术研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.
- [2] Wang M S. The 21st century is the era of great development of tunnels and underground space [J].

Tunnel construction, 2000(1): 7-10.

王梦恕. 21世纪是隧道及地下空间大发展的年代 [J]. 隧道建设, 2000(1): 7-10.

- [3] Wei G Q, Shi B, Hu S, et al. Several key problems in tunnel construction monitoring with FBG [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 571-576.

魏广庆, 施斌, 胡盛, 等. FBG在隧道施工监测中的应用及关键问题探讨 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 571-576.

- [4] Liu S T, Li J X, Zhou Y Y. Study of applying optical fiber deformation monitoring method in tunnel construction [J]. Highway, 2014, 59(10): 297-303. 刘绍堂, 李建新, 周跃寅. 光纤变形监测方法在隧道工程中的应用研究进展 [J]. 公路, 2014, 59(10): 297-303.

- [5] Ma H H, Liu B J, Weng X L, et al. Application of optical fiber Bragg grating sensing technology to tunnel model test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S2): 185-190.

马豪豪, 刘保健, 翁效林, 等. 光纤Bragg光栅传感技术在隧道模型试验中应用 [J]. 岩土力学, 2012, 33(S2): 185-190.

- [6] Yang J G, Ma W, Chu J F, et al. Monitoring and analysis of the internal force of the lining structure by FBG sensors [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(4): 122-127.

杨建国, 马巍, 褚建峰, 等. 基于光纤布拉格光栅传感器的衬砌结构内力监测与分析 [J]. 现代隧道技术, 2013, 50(4): 122-127.

- [7] Su S X, Yang C M, Fan X A. Application of fiber Bragg grating sensor technology in highway tunnel surrounding rock deformation and real-time



- monitoring [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(S1): 134-138, 144.
- 苏胜昔, 杨昌民, 范喜安. 光纤光栅传感技术在高速公路隧道围岩变形实时监测中的应用[J]. *工程力学*, 2014, 31(S1): 134-138, 144.
- [8] Liu Y, Gong X Y, Zhu S H. Application of fiber Bragg grating in tunnel construction monitoring [J]. *Urban Mass Transit*, 2015, 18(10): 124-128.
- 刘颖, 龚新亚, 朱仕虎. 光纤 Bragg 光栅传感技术在隧道工程施工监测中的应用 [J]. *城市轨道交通研究*, 2015, 18(10): 124-128.
- [9] Liu M L. Distributed optic-fiber sensing technology applied to metro tunnel vibration monitoring [J]. *Transportation Science & Technology*, 2016 (3): 106-108, 109.
- 刘梦龙. 分布式光纤传感技术在地铁隧道振动监测中的应用 [J]. *交通科技*, 2016(3): 106-108, 109.
- [10] Jiang X P, Chen S, Zhou J. Study of response and alarm characteristics of fiber Bragg grating fire detector in tunnel with wind load [J]. *Tunnel Construction*, 2016, 36(10): 1202-1206.
- 姜学鹏, 陈姝, 周健. 风载环境下隧道光纤光栅火灾探测器响应和报警特性 [J]. *隧道建设*, 2016, 36(10): 1202-1206.
- [11] Huang X, Li D Y, Geng J. Application of temperature measuring system of linear-arrayed fiber Bragg grating sensors based on wavelength division multiplexing [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, 29(9): 98-102.
- 黄祥, 李端有, 耿峻. 基于波分复用技术的 FBG 传感器线性阵列测温系统应用研究 [J]. *长江科学院院报*, 2012, 29(9): 98-102.
- [12] Wu Y H, Wang Z, Zhang H M, et al. Integration guidelines and application of FBG sensing system with multiple functions [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(1): 151-156.
- 吴永红, 王忠, 张海明, 等. FBG 多功能传感系统集成与应用 [J]. *应用光学*, 2018, 39(1): 151-156.