

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210422002

# 装配式综合管廊光纤智能螺栓受力原型试验研究\*

韦超<sup>1</sup>, 朱鸿鹄<sup>1,2</sup>, 王家琛<sup>1</sup>, 程刚<sup>1,3</sup>, 吴涵<sup>1</sup>, 王静<sup>1</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023; 2. 南京大学大地探测与感知研究院, 江苏南京 210023;  
3. 华北科技学院(中国煤矿安全技术培训中心), 北京 101601)

**摘要:** 掌握装配式综合管廊的螺栓节点在土体回填、加载、卸载等工况中所承受的应力变化, 对于准确评价管廊施工和运营期的稳定性有着重要的作用。针对常规的监测手段难以满足综合管廊在施工及运营期间安全监测要求的瓶颈, 基于开发的光纤光栅(FBG)智能螺栓应力计, 对南京江北新区某综合管廊的建设过程进行原型试验研究。现场监测结果表明: FBG螺栓应力计监测数据与管廊的连接位置、施工工况、堆载大小及位置等有关。在管廊上部堆载从0增加至4 000 kN的过程中, FBG螺栓应力计测试数据处于安全阈值, 表明其具有足够的螺栓预紧度; 根据相关规范, 螺栓所受的最大应力满足设计使用要求, 保证了管廊结构的承载力处于安全范围。本研究充分验证了光纤传感技术在装配式综合管廊受力变形监测中的有效性, 未来值得推广应用。

**关键词:** 装配式综合管廊; 光纤光栅(FBG); 光纤传感技术; 螺栓应力; 原型试验  
**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-1085-12

## Prototype Test Study on Loading Condition of Fiber-optic Smart Bolts of an Assembled Utility Tunnel

WEI Chao<sup>1</sup>, ZHU Honghu<sup>1,2</sup>, WANG Jiachen<sup>1</sup>, CHENG Gang<sup>1,3</sup>, WU Han<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Institute of Earth Exploration and Sensing, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

3. North China Institute of Science and Technology (National Safety Training Center of Coal Mines), Beijing 101601, China)

**Abstract:** It is important to capture stress changes of the bolted joints of utility tunnels during the working conditions of soil backfilling, loading, and unloading to accurately evaluate the stability of assembled utility tunnels in construction and operation stages. In response to the bottleneck that conventional monitoring methods can hardly meet the safety monitoring requirements of utility tunnels during their construction and operation, this paper conducts a prototype experimental study on the construction process of the utility tunnel in Jiangbei New District, Nanjing, based on newly developed fiber Bragg grating (FBG) smart bolt stress sensors. The field monitoring results show that the monitoring data of FBG smart bolts are related to the connection locations, construction conditions, and the sizes

\* 收稿日期: 2021-04-22; 修回日期: 2021-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42077235)、国家重点研发计划项目(2018YFC1505104)、中国博士后科学基金(2019M651786)资助

作者简介: 韦超(1995—), 男, 硕士生。主要从事地质与岩土工程监测方面的研究。E-mail: weichao@smail.nju.edu.cn

通讯作者: 朱鸿鹄(1979—), 男, 教授, 博导。主要从事地质工程、岩土力学方面的教学和研究工作。

E-mail: zhh@nju.edu.cn

and locations of surcharge loadings. When the surcharge loading on the utility tunnel crown was increased from 0 to 4000 kN, the stress data of the FBG smart bolts were under the safety thresholds, indicating that they had sufficient bolt pre-tightening capacity; according to the relevant specifications, the maximum stress of the smart bolts meets the design use requirements, ensuring that the bearing capacity of the utility tunnel structure was in the safe range. This study fully verifies the effectiveness of fiber optic sensing technology in loading and deformation monitoring of assembled utility tunnels, which is worth promoting and applying in the future.

**Keywords:** assembled utility tunnel; Fiber Bragg Grating (FBG); fiber optic sensing technology; bolt stress; prototype test

## 引言

地下综合管廊又称综合管道,通常设置于城市道路的地下空间,是通讯、电力、燃气、热力和给排水等市政公共管线均可容纳其中的地下结构<sup>[1-2]</sup>。综合管廊是保障城市运营的生命线工程和关键基础设施,它作为一种浅层地下结构,设有专门的检修口和监测系统<sup>[3]</sup>,具有提升城市地下空间利用率、保障市政管线安全、避免路面重复开挖、美化城市环境等优点<sup>[4]</sup>,是目前城市地下空间开发的重要形式之一。

由于综合管廊埋设于城市地面以下,与一般的地面结构物相比,其使用周期更长,一旦发生破坏后,除了破坏隐蔽和修复困难外,所带来的直接和间接损失也远大于一般的地面结构物<sup>[5]</sup>。近年来,研究人员采用大型物理模型试验及数值模拟等较为行之有效的研究手段,开展了大量关于管廊结构受力特性的研究工作。在抗震性能方面,学者们通过振动台模型试验研究了管廊的动力响应规律及管廊-土接触面的地震响应特征<sup>[3,6]</sup>,并利用FLAC<sup>[7]</sup>、ABAQUS<sup>[8]</sup>对地震荷载作用下管廊周边土体、结构变形等特性进行了模拟,验证了非线性弹簧单元可模拟管廊结构接头,解决了管廊数值仿真的瓶颈问题。针对大跨度、大空间的线性管廊工程穿越地裂缝带<sup>[9-10]</sup>、走滑断层和逆断层<sup>[11]</sup>情况,学者们对管廊结构变形、破坏规律及周边围岩土压力进行了分析,为管廊穿越构造发育区的结构设计及灾害防治提供了参考依据。在管廊接头刚度及整体结构破坏机制的研究工作中,得出横向接头部位是影响结构性能的关键<sup>[12]</sup>,开展了管廊模型的静载试验<sup>[13]</sup>,并通过有限元对荷载作用下管廊的稳定性<sup>[14]</sup>及接头螺栓的状态进行了模拟分析<sup>[2]</sup>。

前人的研究主要集中于管廊的抗震性能评估、灾害预防、施工方法优化及安防信息监测<sup>[15]</sup>等方面,相关结论为保障管廊的建设与运营期安全提供了一定的参考,但目前针对管廊施工建设全生命周期的应力变化的研究较少,且在工程中采用的测量方法普遍具有精度较低、实时性差等缺点,获得的多为离散式、非连续的点式数据,从而难以实现对管廊整体结构安全的动态监测。因此,亟需采用新的手段,开展地下综合管廊原型试验研究,深入分析管廊在施工及运营期的应力变化规律。光纤光栅(FBG)传感器因其具有体积小、不易受干扰、测量精度高、耐久性好、无监测盲区等独特优势,已逐渐作为传统测量技术的重要补充,广泛应用于各种结构物的健康监测<sup>[16-21]</sup>,并被大量的实际工程证明基于FBG制作的各类传感器能够对结构物进行有效地实时监测。FBG的优点决定了其在结构应力安全监测方面具有很强的竞争力,目前在围岩三维应力测试<sup>[22]</sup>、桩身内力测试<sup>[23]</sup>、锚杆及缆索应力测试<sup>[24-25]</sup>、钢绞线预应力损失测试<sup>[26]</sup>等岩土工程领域广泛应用,并且取得了令人满意的测试效果。通过将FBG传感器与螺栓进行结合可以实现螺栓预紧力、轴力及剪力的自测,是目前对结构重要连接处螺栓受力的新监测方法<sup>[27]</sup>,已逐渐在盾构式管片<sup>[28]</sup>、电网<sup>[29]</sup>等处进行了监测应用。

本文以南京江北新区某预制装配式综合管廊为研究对象,以光纤布拉格光栅技术为手段,从光纤智能螺栓应力监测的角度,分析管廊在加载、卸载等多种工况下的应力变化特征。根据螺栓内部的结构性能进行应力校正,并综合考虑外置温度补偿,全面分析管廊的应力变化特征,从而对综合管廊的安全性和适用性进行科学评价。

# 1 光纤光栅传感技术

## 1.1 工作原理

光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, 简称 FBG) 是指利用掺杂诸如锗、磷等光纤的光敏性, 通过某种工艺方法使外界入射光子和纤芯内的掺杂粒子相互作用, 导致纤芯折射率沿纤轴方向发生周期性或非周期性的永久性变化, 在纤芯内形成空间相位结构的光学器件, 图 1 为 FBG 传感原理<sup>[30]</sup>。

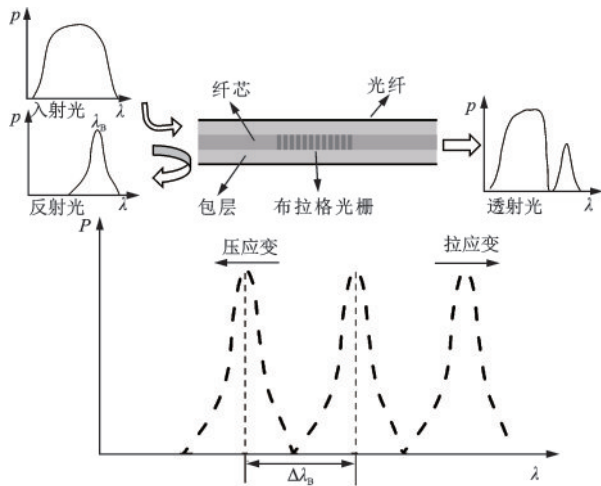


图1 FBG 传感原理

Fig. 1 Principle of the FBG sensing technique

当光沿着光纤传播过程中折射率发生变化时, 满足光纤布拉格光栅条件的波长将反射少量光, 从而使得光纤光栅起到光波选择的作用, FBG 反射波长的基本表达式<sup>[17]</sup>为:

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \quad (1)$$

式中,  $\lambda_B$  是布拉格波长, 通常介于 1 510~1 590 nm 之间;  $n_e$  是光纤芯区的有效折射率;  $\Lambda$  是光栅周期。

布拉格波长对应变和温度都有良好的敏感性。在恒定温度下, 光纤光栅波长变化率  $\Delta\lambda_B/\lambda_B$  是应变变化  $\Delta\varepsilon$  的函数, 其关系可表示为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \Delta\varepsilon \quad (2)$$

式中,  $P_e$  是光纤材料的有效光弹参数。

光纤光栅的波长变化率与光栅所在位置的轴向应变、温度变化量都有良好的线性关系, 公式为:

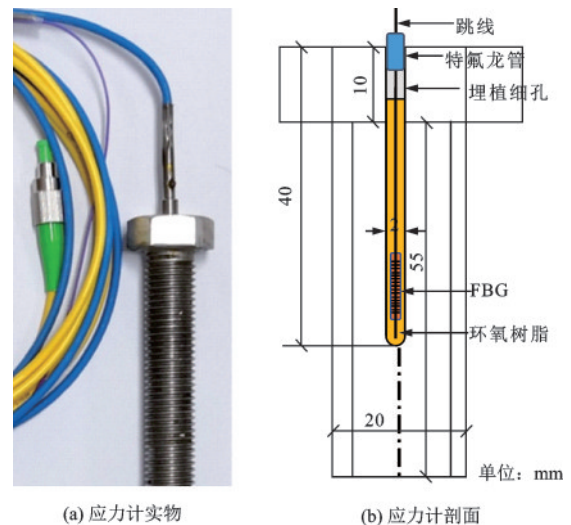
$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = c_\varepsilon \Delta\varepsilon + c_T \Delta T \quad (3)$$

式中,  $\lambda_B$  是光栅的初始布拉格波长;  $\Delta\lambda_B$  是由于施加

的应变和温度引起的波长偏移;  $c_\varepsilon$  和  $c_T$  分别是应变和温度的波长灵敏度系数。

## 1.2 FBG 螺栓应力计

本研究中采用了一种新型的 FBG 智能螺栓应力计, 其型号分别是 M20-55 和 M16-60。图 2 为 FBG 螺栓应力计的结构图, 其制作工艺如下 (以 M20-55 型为例): 首先, 在标准螺栓的端部开直径为 2 mm, 深度为 40 mm 的埋植孔, 并对埋植孔进行彻底清洁与干燥, 这一步骤是为了去除孔内的灰尘和金属屑等。其次, 在孔内植入 FBG, 并将环氧树脂缓慢注入使得 FBG 的栅区固化在螺栓杆内, 此过程是为了保证光栅在测试过程中与螺栓协调变形, 并起到良好的封装保护效果。当螺栓受到外力作用时, 会产生轴向上的拉伸或收缩, 该过程可被孔内光栅所感知, 通过光栅解调仪读取 FBG 的布拉格波长读数变化, 即可获得管廊各位置安装螺栓受力分布情况, 进而计算出该处螺栓的轴向应力值。相较于植入应变片式智能螺栓, FBG 具有长期的信号稳定性、耐久性、更高的疲劳和应变灵敏性等多方面优势性。良好的封装工艺能够有效隔绝非螺栓应力变化对智能螺栓的影响, 从而大大提高智能螺栓结构的稳定性, 达到实现精准监测的目的。



(a) 应力计实物

(b) 应力计剖面

图2 FBG 螺栓应力计结构

Fig. 2 Structure diagram of the FBG bolt stress sensor

FBG 具有质量轻、体积小、易埋设, 从而 FBG 螺栓应力计并不改变螺栓原有的结构功能, 具有结构简单、成本低、精度高等优点, 既适用于受拉螺栓, 也适用于受剪螺栓<sup>[27]</sup>。由于螺栓是拉、压变形

的主要构件,剪力螺栓连接受力后依靠栓杆的抗剪和孔壁承压来传递垂直于栓杆方向的外力,受力分析状态较为复杂,故不在本文中考虑。受拉螺栓的典型受力分析如图3所示,其中总拉力 $F$ 与预紧力 $F_0$ 和拉力 $F_v$ 间关系式为:

$$F = F_0 + F_v \quad (4)$$

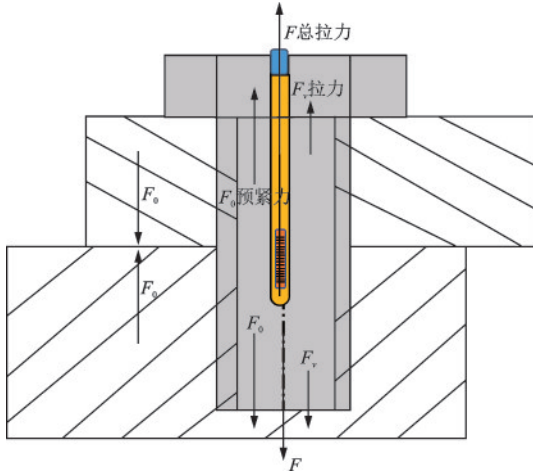


图3 典型螺栓受力分析

Fig. 3 Typical diagram of bolt stress analysis

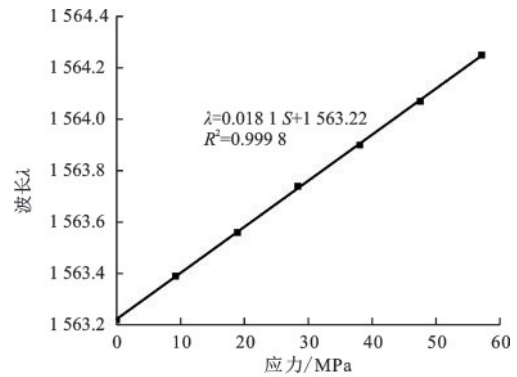
在前人现场长期监测研究中发现,当环境温度每改变 $1^\circ\text{C}$ ,会产生大约 $9\ \mu\epsilon$ 的应变误差<sup>[18]</sup>。为了准确获得螺栓的应力变化,需对监测过程中FBG螺栓应力计进行温度补偿。本次现场试验中,通过设置同一环境温度下不受结构作用的相同型号螺栓应力计来扣除温度变化引起的波长漂移,得到受力单独作用引起的波长漂移量,从而达到温度补偿的目的。试验使用的FBG螺栓应力计均通过室内 $20^\circ\text{C}$ 水浴进行标定,获得每个应力计的应力值与波长变化量的比例系数 $K_p$ ,并在温度可调的水浴内采用 $K$ 式热电偶测量实际温度,得出波长变化量与温度的比例系数 $K_T$ 。螺栓应力计算表达式如下所示:

$$S = K_p \cdot [(\lambda - \lambda_0) - K_T \cdot (T - T_0)] / M \quad (5)$$

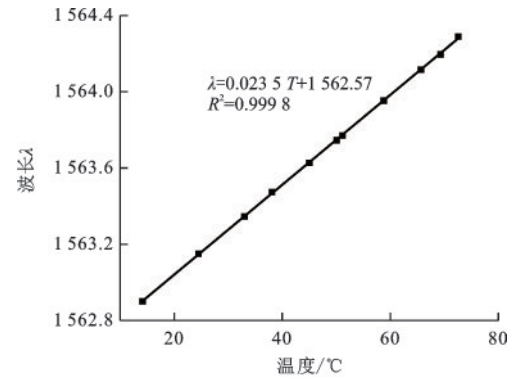
式中, $S$ 为螺栓测量应力值(kPa),以拉应力为正,压应力为负; $K_p$ 为应力计测量值与波长的比例常数(kN/nm); $\lambda$ 和 $\lambda_0$ 分别为波长测量值和测量初始值(nm); $K_T$ 为波长变化量与温度的比例常数(nm/ $^\circ\text{C}$ ); $T$ 和 $T_0$ 分别为温度测量值和测量初始值( $^\circ\text{C}$ ); $M$ 为螺栓与结构物的接触面积( $\text{m}^2$ )。

FBG螺栓应力计的应力与温度标定试验结果见图4,螺栓内埋设的微型传感器中心波长变化与施加的应力之间的关系如图4(a)所示,线性关系为 $\lambda = 0.0181S + 1563.22$ ,线性决定系数 $R^2$ 达0.9998,

应力灵敏度系数为 $18.1\ \text{pm}/\text{MPa}$ ,这说明FBG螺栓应力计具有较高的线性拟合度和应力灵敏度。在 $10\sim 80^\circ\text{C}$ 范围内,应力计中心波长与温度之间的关系如图4(b)所示,其线性关系为 $\lambda = 0.0235T + 1562.57$ ,线性决定系数 $R^2$ 达0.9998,温度灵敏度为 $23.5\ \text{pm}/^\circ\text{C}$ ,传感器具有较高的温度灵敏性,可较为精确的监测管廊原型试验中环境温度变化情况。标定试验中,传感器测量结果很好的反映了螺栓实际受力状况,因此可以证明智能螺栓测量精度及可靠性,满足高精度应力测量的要求。



(a) 典型应力标定曲线



(b) 典型温度标定曲线

图4 FBG螺栓应力计典型标定曲线

Fig. 4 Typical calibration curves of FBG bolt stress sensor

## 2 原型试验

### 2.1 试验概况

本次试验以南京江北新区某节段式综合管廊为研究对象,在试验场内修建了长度为 $12\ \text{m}$ 、基底埋深为 $4.5\ \text{m}$ 的装配式钢结构管廊。管廊单舱为曲边矩形,内截面为 $2.05\ \text{m} \times 3.10\ \text{m}$ ,如图5所示。为了保证管廊结构建设整体的安全可靠,需要对各关键装配连接位置处进行结构健康状态的实时监测。

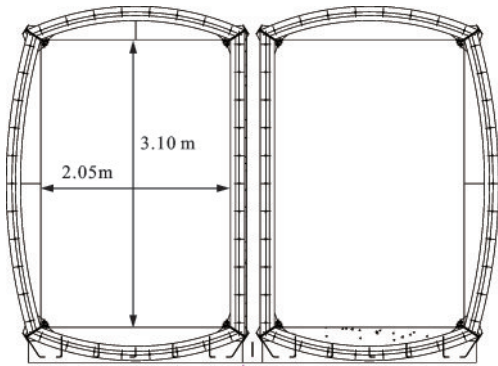


图5 管廊截面尺寸示意

Fig. 5 Schematic diagram of the cross-sectional dimensions of the utility tunnel

试验中采用的2种FBG螺栓应力计是由课题组和苏州南智传感科技有限公司(南智)根据管廊建设施工工况的特点共同研制,并由南智进行生产,其技术指标见表1。其中,M20-55型螺栓的直径为20 mm,螺纹段长度为55 mm;M16-60型螺栓的直径为16 mm,螺纹段长度为60 mm。螺栓应力计的尾纤类型均为3 mm 铠装光缆,该护套可在恶劣的现场环境中为光纤引线提供足够多的保护,保证监测工作的顺利进行。

表1 FBG螺栓应力计主要技术指标

Table 1 Main technical indicators of FBG bolt stress sensors

型号	材质	测量范围/ MPa	分辨力	补偿方式	接头 类型
M20-55	钢	0~180	0.1% F.S	外置温度 补偿	FC/ APC
M16-60		0~95			

## 2.2 现场监测仪器布置

基于大量、长期工程监测数据分析,综合管

廊所受最大内力部位主要位于管廊的角部<sup>[13]</sup>,故本次试验FBG螺栓应力计布设位置选择管廊角部、槽钢中部及管廊节间接缝处,并均位于管廊内部。FBG螺栓应力计现场布设方案如图6所示。

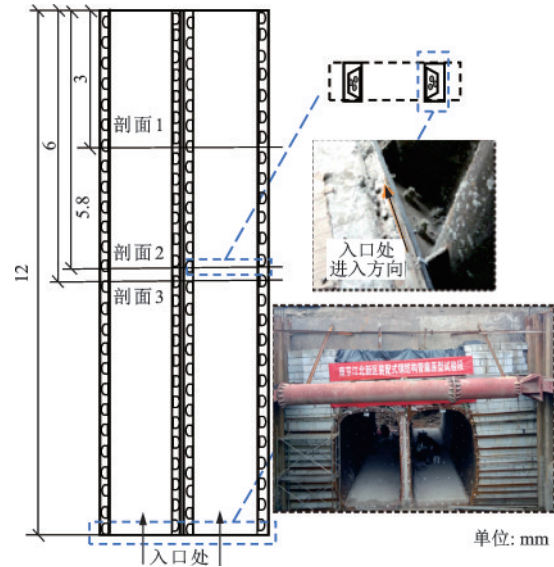


图6 FBG螺栓应力计现场布设示意

Fig. 6 Field layout diagram of the FBG bolt stress sensors

如图7(a)、(b)所示,在管廊长度方向3、5.8 m处的槽钢间连接处布设M20-55型螺栓应力计,每一剖面左、右舱各分别安装12个。如图7(c)所示,在管廊6 m处的节间连接处布设M16-60型螺栓应力计,16个M16型螺栓应力计分别安装于管廊的侧板、顶板、底板处。具体位置为:在顶板、底板处,从左向右的第3和第6个螺栓上依次布设,共计8个;在侧板、竖板处,从上往下的第4和第8个螺栓上依次布设,共计8个。图8为FBG螺栓应力计现场安装图。

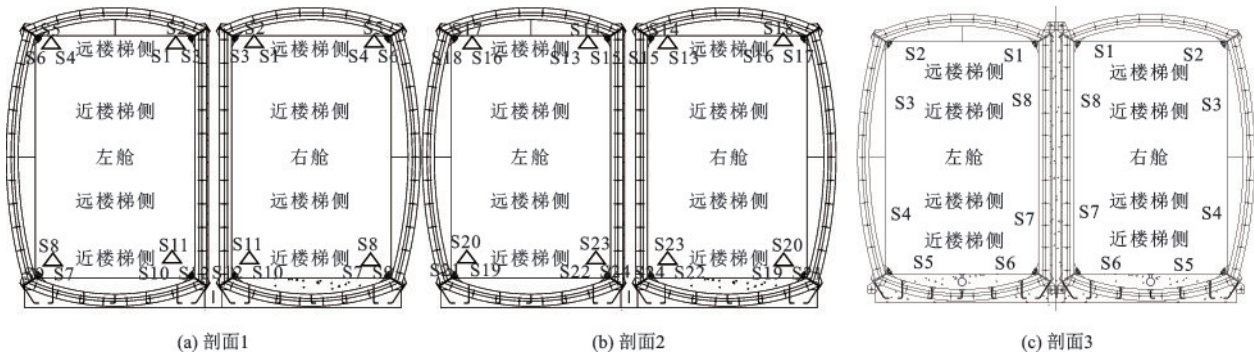


图7 FBG螺栓应力计空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of FBG bolt stress sensors

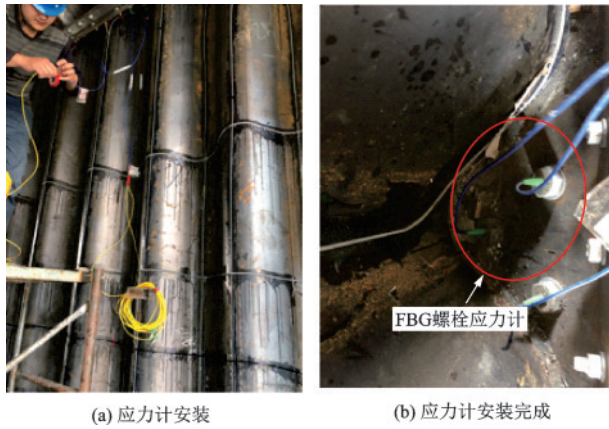


图8 FBG螺栓应力计现场安装  
Fig. 8 Field installation of the FBG bolt stress sensors

### 2.3 数据采集与处理装置

本次试验中FBG螺栓应力计的数据采集采用南智研制的NZS-FBG-A01(C)型解调仪,该设备解调速率 $\leq 1$  Hz,波长分辨率可达1 pm,在 $-20\sim 50$  °C内可保持3 pm的测量精度,适用于长期的现场监测工程。图9为现场监测试验示意。

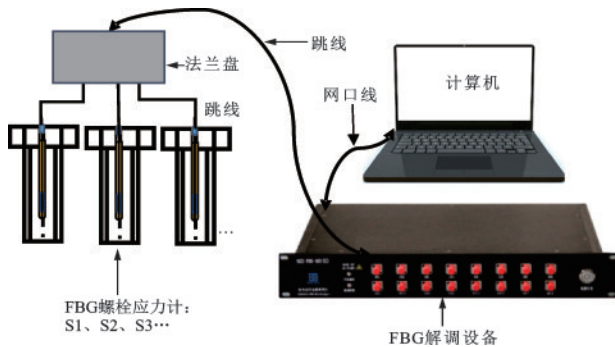


图9 现场监测试验示意  
Fig. 9 Schematic diagram of field monitoring

### 2.4 试验过程

在综合管廊侧壁及顶部施工填土后,随着土体的固结沉降,管廊变形逐步达到稳定,此过程主要通过自然静置法、施工机械压实法和重物静载法实现。本次原型试验从管廊侧壁开始回填,依次经历了侧部回填、顶部回填、顶部加载和卸载4个过程,管廊结构体共经历了5个施工阶段,现场施工流程如图10所示,其中第3阶段静载施工如图11所示。对应于上述的5个工况,FBG螺栓应力计的测值也有5次明显的变化。

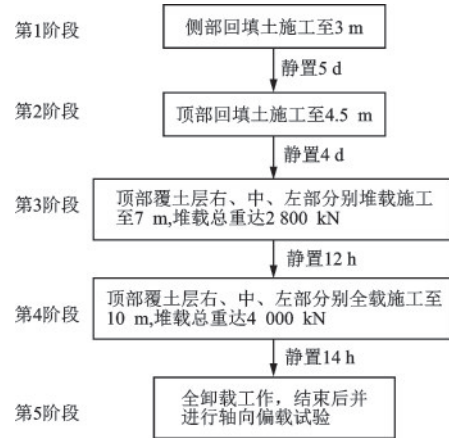


图10 现场施工流程  
Fig. 10 Flow chart of the construction process

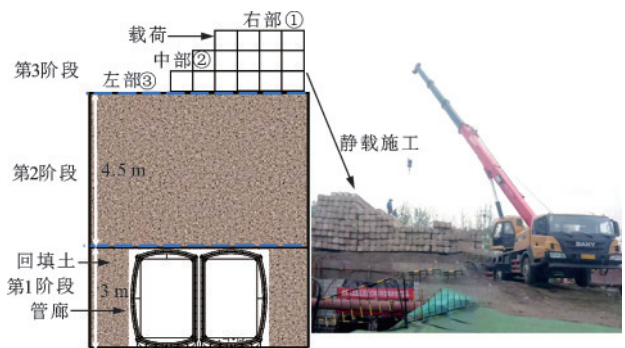


图11 现场静载施工  
Fig. 11 Diagram of the static loading process

## 3 试验结果与分析

由于现场恶劣的施工条件,加之施工人员安装螺栓方法操作不当,导致综合管廊右舱长度方向5.8 m处S20号和6 m处S8号智能螺栓出现信号衰减过大的现象,使得此2处传感器获得的数据失真,因此在后续分析中舍去该处2个应力计的测试数据。总体而言,大部分螺栓应力计均安装成功,并承受了管廊施工过程中各类施工机械间接作用其上的压力,在此过程中保证了较高的存活率。鉴于现场施工监测过程中,环境温度日内变化较大,导致传感器波长产生的漂移量不能完全表达管廊结构连接位置处的实际受力情况,故此在每个监测剖面位置均布设一个不受结构力的相同型号螺栓应力计,用来监测温度变化引起传感器的波长漂移量。在数据处理过程中,剔除掉每一传感器中温度变化引起的波长漂移量,从而得到受力单独作用引起的波长漂移量。由于FBG获得的监测数据量大,限于篇幅,以下选取第2阶段和第3阶段的FBG螺栓应力计监测数据进行分析。

### 3.1 第2阶段

考虑第2阶段为间歇性施工作业,本文重点分析管廊顶部从0.5 m至3 m连续回填土体的过程,历时10 h。

管廊顶部回填土从0.5~1 m、2~3 m阶段的监测时间分别为0~1.1 h、7.5~10 h;施工1~2 m阶段的监测时间为2~2.3 h和4.2~6.4 h,期间回填作业因故暂停了1.9 h。为保证管廊建设的施工质量,在回填至1、2、3、3.7、4.5 m位置后,均使用施工机械对回填面进行连续性压实,并在回填土施工至管廊顶部4.5 m后进行了为期4 d的静置。

图12是管廊3 m处M20-55型螺栓应力计监测应力结果。在图12(a)表示的左舱中,位于右下角的螺栓S11在监测过程中受压应力,位于右上角的螺栓S1~3及左下角S9承受的拉应力均较大,其中S1最大应力值达32.65 MPa。在图12(b)表示的右舱中,位于右下角的螺栓S7受压应力,其余大部分螺栓均受拉

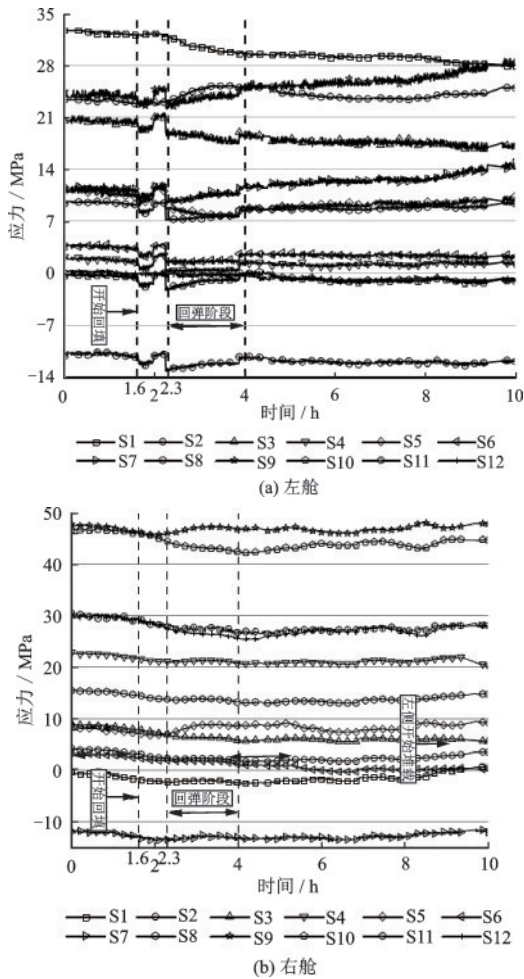


图12 M20-55型螺栓S1~12号应力—时间变化曲线  
Fig. 12 Stress-time variation curves of No. S1~12 M20-55 bolts

应力,位于右下角的螺栓S9和左下角S10承受了较大的拉应力,S9的最大应力值达45.6 MPa。通过监测数据发现,位于较接近位置的3个智能螺栓可能会出现不同的受力状态,经过将位于内侧对称位置的2个螺栓监测数据进行累和及数值均分后与外侧的螺栓监测数值进行对比,发现具有较强的一致性。出现这种情况的原因可能是在管廊顶部回填施工土体的作用下,管廊结构受压发生了不同程度的收缩变形或偏置现象,导致管廊槽钢接缝连接处安装的各智能螺栓受不同的应力状态或应力值。

图13是管廊5.8 m处M20-55型螺栓应力计监测应力结果。在图13(a)表示的左舱中,随顶部回填土的持续施工,位于右上角的螺栓S13、S15由受拉应力逐渐转为受压应力,位于右下角的螺栓S23,在管廊结构中承受的拉应力最大。在图13(b)表示的右舱中,位于左下角的螺栓S23在施工过程中受的拉应力最大,达50 MPa,其余智能螺栓除S17外

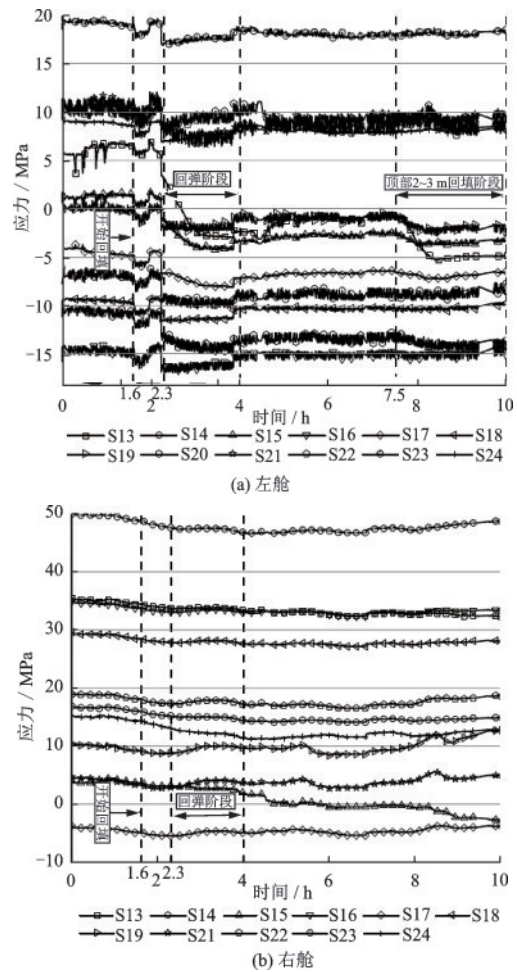


图13 M20-55型螺栓S13~24号应力—时间变化曲线  
Fig. 13 Stress-time variation curves of No. S13~24 M20-55 bolts

均受拉应力,大部分螺栓数值在0~30 MPa。通过上述分析,两舱中智能螺栓S23的应力监测值均较大,表明该对称位置对保证管廊结构的稳定性具有重要的意义。

图14是管廊6 m处M16-60型螺栓应力计监测应力结果。在图14(a)表示的左舱中,安装的智能螺栓在施工监测过程中,位于管廊顶板连接处的螺栓S1受压应力最大,螺栓S2则受拉应力最大。在图14(b)表示的右舱中,位于底板连接位置处的螺栓S5在管廊结构中受压应力最大,达28 MPa,位于侧板连接处的螺栓S3在管廊结构中承担的拉应力则较大。

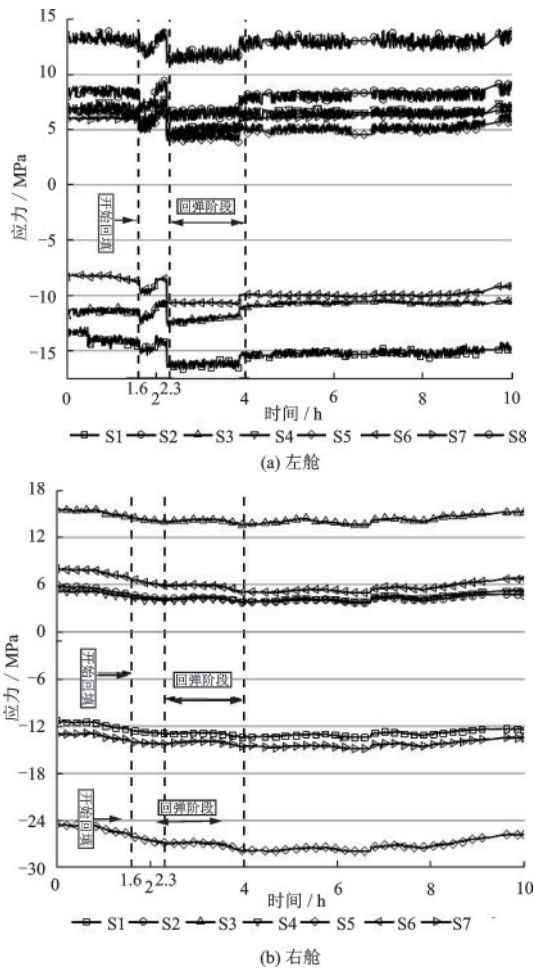


图14 M16-60型螺栓S1~8号应力—时间变化曲线  
Fig. 14 Stress-time variation curves of No. S1~8 M16-60 bolts

对比图12、13和14可知,在监测时间约1.6 h时,左舱中大部分智能螺栓监测应力值发生先显著减小,后逐渐增大现象,至监测时间约2 h时基本稳定。随后在2.3~4 h阶段,螺栓应力测值与开始回填施工阶段变化规律在整体上表现有一致性。进一步研究发现,产生这些突变的原因是:监测时间

约1.6 h,大型施工机械开始在管廊左侧做继续回填施工的准备,对管廊结构产生了一定的扰动,且施工过程中管廊结构在外部回填土体的作用下受力不均匀。由于现场施工的复杂性,在监测时间约2.3 h时,间歇了1.9 h回填土体作业,此阶段后管廊与土体间发生了缓慢的耦合作用,从而使得多数智能螺栓监测数值发生逐渐增大的现象。

### 3.2 第3阶段

为了保证管廊侧部和顶部回填土的压实度,并测试管廊结构的稳定性,在顶部回填结束后进行了静载试验。在管廊顶部覆土层的右侧和中部堆载至7 m阶段的监测时间分别为0.3~1.3 h、3.5~4.9 h,左侧堆载至7 m阶段的监测时间为8.5~9 h和9.8~10.3 h,期间堆载作业因故暂停了0.8 h。

图15为管廊3 m处M20-55型螺栓应力计监测

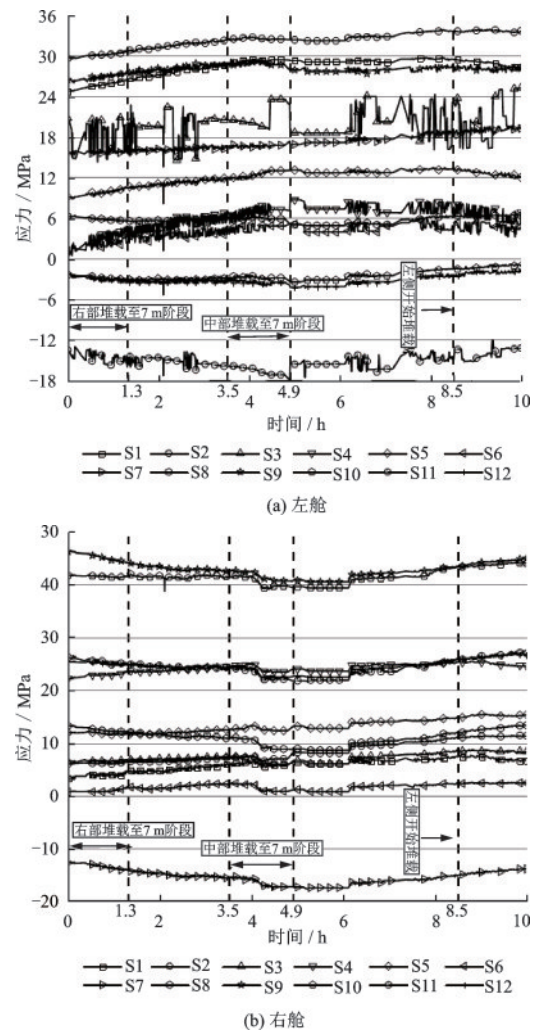


图15 M20-55型螺栓S1~12号应力—时间变化曲线  
Fig. 15 Stress-time variation curves of No. S1~12 M20-55 bolts

应力结果。在图 15(a) 表示的左舱中, 位于右下角的螺栓 S11 受压应力最大, 右上角的螺栓 S1~3 及左下角 S9 承受的拉应力较大, 其中 S2 在管廊结构中受拉应力最大。在图 15(b) 表示的右舱中, 管廊各位置安装的智能螺栓, 受静载施工的影响均先受压状态, 在中部静载施工逐渐结束后逐渐转为受拉状态; 在管廊结构中, 除智能螺栓 S7 受压应力外, 其余螺栓均受拉应力, 其中位于管廊底部的螺栓 S9、S10 所受拉应力最大, 在 39~46 MPa 内波动。

图 16 为管廊 5.8 m 处 M20-55 型螺栓应力计监测应力结果。在图 16(a) 表示的左舱中, 左下角的螺栓 S20 承受了较大压应力, 右下角的螺栓 S23 承受了较大的拉应力。在图 16(b) 表示的右舱中, 除螺栓 S15、S17 在前期施工监测阶段受压应力外, 其余螺栓均受拉应力, 位于左下角的螺栓 S23 承受的拉应力最大, 达 48.5 MPa。通过进一步分析, 发现

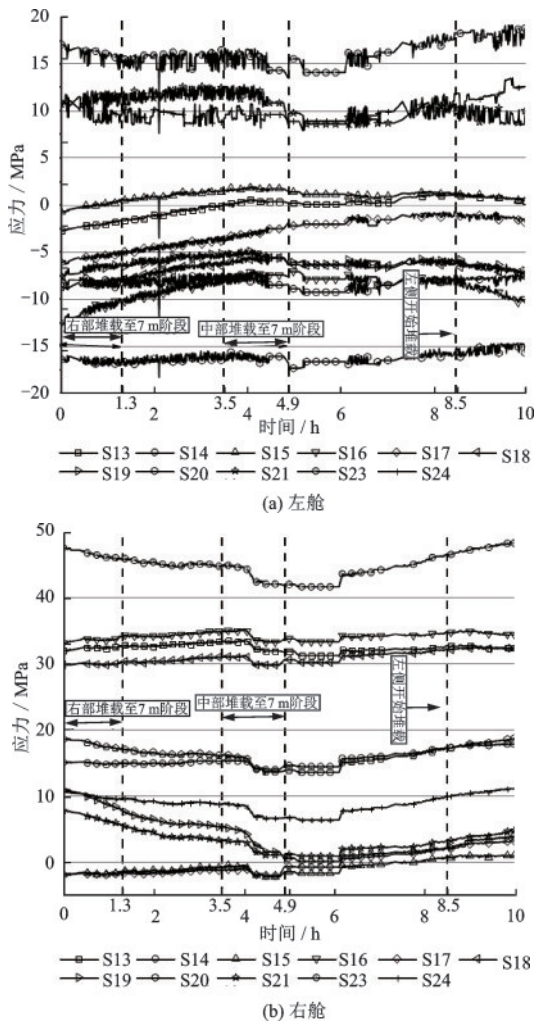


图 16 M20-55 型螺栓 S13~24 号应力—时间变化曲线  
Fig. 16 Stress-time variation curves of No. S13~24 M20-55 bolts

管廊两侧对称位置处的螺栓 S23 在监测螺栓中承受的拉应力均较大, 表明角部连接位置在保证管廊结构稳定性中发挥着重要作用。

图 17 为管廊 6 m 处 M16-60 型螺栓应力计监测应力结果。在图 17(a) 表示的左舱中, 位于底板连接处的智能螺栓 S5、S6 的监测数据在整体趋势上表现有一致性, 受管廊上部静载施工影响, 螺栓由受压逐渐转为受拉状态, 其余位置处安装的智能螺栓受力状态恰好相反。在图 17(b) 表示的右舱中, 顶板和侧板安装的智能螺栓 S1~4 监测数据在整体趋势上具有一致性, 由受拉逐渐转为受压状态, 底板上的螺栓 S5 受静载影响, 一直受拉状态。出现上述情况的原因可能是在管廊上部堆载重物的作用下, 管廊结构各接缝安装的智能螺栓承受了不同程度的拉、压应力。

在该试验阶段, 左、右舱中 3 个截面各位置处安装的智能螺栓所受应力值前期和后期的波动性均较大。分析原因为: 试验过程中, 首先对管廊覆土

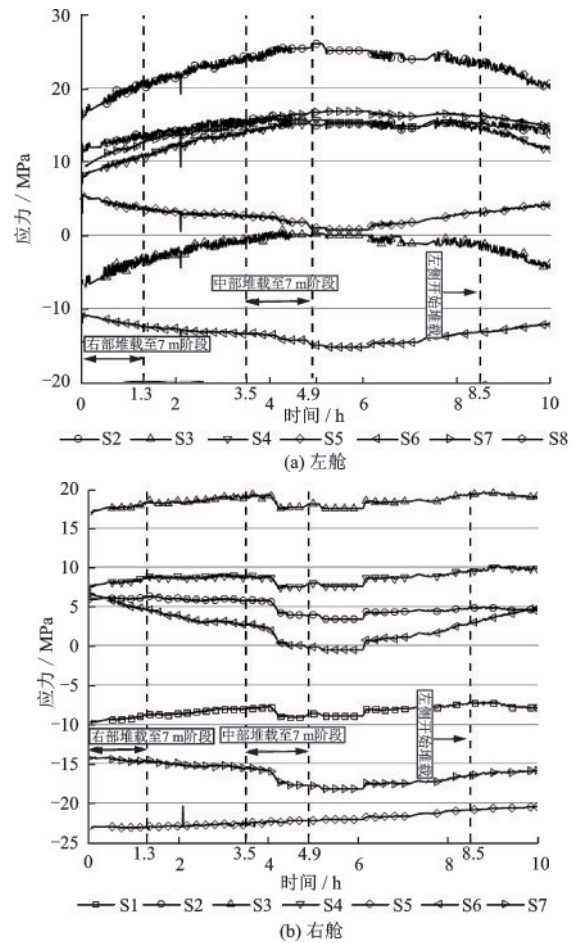


图 17 M16-60 型螺栓 S1~8 号应力—时间变化曲线  
Fig. 17 Stress-time variation curves of No. S1~8 M16-60 bolts

层的右部进行了堆载施工,所使用的水泥条试块为逐个放置,堆载过程中可能使试验段管廊发生了偏心荷载现象,从而导致安装的FBG螺栓应力计的监测数据波动性较大。随静载施工的持续进行,在监测时间3.5 h时,开始对中部进行了堆载试验,试验段管廊的偏载现象逐渐减缓。在监测时间4.9~8.5 h阶段,左舱接缝连接处螺栓的应力监测数据逐渐趋于稳定,且右舱中各螺栓应力数据的波动性也明显减小,这主要是管廊在中部静载施工结束后未继续施工,上部回填的土体在静载物偏载作用减缓情况下,发生的不均匀沉降等作用减缓,使得管廊结构接缝处受力状态也逐渐变稳定。

通过上述监测数据的综合分析可知,基于光纤光栅技术所获得的测试结果稳定可靠,可全面反映综合管廊接缝螺栓连接节点处在施工及上部静载过程中的受力状态,在实际工程测量中能发挥有效作用。同时螺栓应力计监测数据满足《城市综合管廊工程技术规范》<sup>[31]</sup>中螺栓的安全设计使用要求。结合应变计、全站仪等技术更可实现管廊从宏观至微观变形状态的精准认知。

## 4 结 论

(1)FBG螺栓应力计监测数据与管廊的连接位置、施工工况和堆载大小及位置等有关。在管廊顶部回填施工阶段,施工机械前期在管廊左侧做施工准备工作和当施工中期因故间歇时,管廊各处安装螺栓均有一定程度的响应,表明将螺栓应力计应用于管廊受力变形监测的有效性。

(2)FBG螺栓应力计保证了螺栓的机械强度,使得螺栓在接头施工中具有足够高的螺栓预紧度,施工过程中螺栓所受的最大应力满足《城市综合管廊工程技术规范》<sup>[31]</sup>中螺栓的安全设计使用要求,从而表明FBG螺栓应力计具有足够的安全性能,在确保管廊结构安全的同时,又实现了管廊健康监测的目的。

(3)通过对管廊三个剖面中FBG螺栓应力计监测数据进行分析研究,发现在两舱中对称位置处安装的螺栓应力计所受应力状态相似,且位于两舱连接下部位位置处的螺栓所受应力值均较大,如螺栓S23处,表明这些位置对保证管廊结构的稳定性具有重要作用。智能螺栓的应用可以有效实现管廊关键位置和重要结构处连接状态的监测,确保了连

接的可靠性,有利于管廊服役期保障工作的开展。

总之,上述研究充分表明将准分布式FBG螺栓应力计应用于综合管廊建设期和运营期的稳定性评价具有可行性和突出的优势,下一步拟结合分布式光纤传感技术进行全分布、多方位的联合监测,逐步实现全面掌握综合管廊受力变形过程的演化规律。

## 参考文献:

- [1] 黄剑,王恒栋,王建.软土地基综合管廊沉降控制、监测与分析[J].地下空间与工程学报,2018,14(增2):845-859.  
Huang J, Wang H D, Wang J. Settlement control, monitoring and analysis of utility tunnel on soft soil foundation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(Sup2): 845-859.(in Chinese)
- [2] 刁钰,郭勇志,宋欣欣,等.管廊接头变形对接头防渗性能的影响[J].土木工程学报,2019,52(增1):113-119.  
Diao Y, Guo Y Z, Song X X, et al. Effect of joint deformation on the waterproof performance of utility tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(Sup1): 113-119.(in Chinese)
- [3] 冯立,丁选明,王成龙,等.考虑接缝影响的地下综合管廊振动台模型试验[J].岩土力学,2020,41(4):1295-1304.  
Feng L, Ding X M, Wang C L, et al. Shaking table model test on seismic responses of utility tunnel with joint[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4): 1295-1304.(in Chinese)
- [4] 田子玄.装配叠合式混凝土地下综合管廊受力性能试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.  
Tian Z X. Experimental research on force performance of precast concrete underground comprehensive municipal tunnel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.(in Chinese)
- [5] 杨琳,王嘉君.基于复杂网络模型的城市综合管廊PPP项目风险传递过程研究[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(9):1666-1676.  
Yang L, Wang J J. Risk transfer process in urban comprehensive corridor PPP project based on complex network model[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(9): 1666-1676.(in Chinese)
- [6] Li J. Dynamic response of utility tunnel during the passage of Rayleigh waves[J]. Earthquake Science, 2010

- (23): 13-24.
- [7] 杨剑,王恒栋.液化土中地下综合管廊的地震响应分析初探[J].地下空间与工程学报,2013,9(增1):1762-1769.  
Yang J, Wang H D. Preliminary study on seismic response of utility tunnel in liquefiable soils [J], Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(Sup1): 1762-1769.(in Chinese)
- [8] 蒋录珍,李杰,陈隽.非一致地震激励下综合管廊接头响应数值模拟[J].世界地震工程,2015,31(2):101-107.  
Jiang L Z, Li J, Chen J. Numerical simulation of utility tunnel joint effects under non-uniform earthquake excitation[J]. World Earthquake Engineering, 2015, 31(2): 101-107.(in Chinese)
- [9] 胡志平,张丹,张亚国,等.地下综合管廊结构斜穿活动地裂缝的变形破坏机制室内模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(12):2550-2560.  
Hu Z P, Zhang D, Zhang Y G, et al. Test study on deformation and failure mechanism of utility tunnel structure obliquely crossing ground fissure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(12): 2550-2560.(in Chinese)
- [10] 闫钰丰,黄强兵,杨学军,等.地下综合管廊穿越地裂缝变形与受力特征研究[J].工程地质学报,2018,26(5):1203-1210.  
Yan Y F, Huang Q B, Yang X J, et al. Research on the deformation and force characteristics of underground utility tunnel crossing ground fissure[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5): 1203-1210.(in Chinese)
- [11] 武华侨.综合管廊在断层位移作用下的反应分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.  
Wu H Q. Response analysis of utility tunnel under fault [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.(in Chinese)
- [12] 薛伟辰.预制混凝土框架结构体系研究与应用进展[J].工业建筑,2002,32(11):47-50.  
Xue W C. Progress of studies and applications of precast concrete frame structure systems [J]. Industrial Construction, 2002, 32(11): 47-50.(in Chinese)
- [13] 胡翔,薛伟辰.预制预应力综合管廊受力性能试验研究[J].土木工程学报,2010,43(5):29-37.  
Hu X, Xue W C. Experimental study of mechanical properties of PPMT [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(5): 29-37.(in Chinese)
- [14] Tang L Y, Quan Y, Zhu Y, et al. Application of improved calculation method considering the vehicle loads in branch utility tunnel[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(1): 251-266.
- [15] 白杨,于森,何禹潼,等.管廊光纤安防监测信息管理系统研发与应用[J].地下空间与工程学报,2019,15(增1):391-399.  
Bai Y, Yu M, He Y T, et al. Development and application of pipeline optical fiber security monitoring information management system[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(Sup1): 391-399.(in Chinese)
- [16] 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.  
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.(in Chinese)
- [17] 李宏男,任亮.结构健康监测光纤光栅传感技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.  
Li H N, Ren L. Structural health monitoring fiber Bragg grating sensing technology [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.(in Chinese)
- [18] 朱鸿鹄,殷建华,靳伟,等.基于光纤光栅传感技术的地基基础健康监测研究[J].土木工程学报,2010,43(6):109-115.  
Zhu H H, Yin J H, Jin W, et al. Health monitoring of foundations using fiber Bragg grating sensing technology [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(6): 109-115.(in Chinese)
- [19] Pei H F, Teng J, Yin J H, et al. A review of previous studies on the applications of optical fiber sensors in geotechnical health monitoring [J]. Measurement, 2014, 58: 207-214.
- [20] Chen W B, Feng W Q, Yin J H, et al. New FBG-based device for measuring small and large radial strains in triaxial apparatus[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, 58: 1059-1063.
- [21] Roveri N, Carcaterra A, Sestieri A. Real-time monitoring of railway infrastructures using fibre Bragg grating sensors [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 60/61: 14-28.
- [22] 魏世明,马智勇,李宝富,等.围岩三维应力光栅监测方法及相似模拟实验研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(1):138-143.  
Wei S M, Ma Z Y, Li B F, et al. Study on the monitoring method of three-dimensional stress with FBG in surrounding rock and the simulation experiment [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32

- (1): 138-143. (in Chinese)
- [23] 马加骁,王永洪,张明义,等. 基于光纤布拉格光栅传感器的PHC管桩现场静压贯入试验研究[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 90-98.  
Ma J X, Wang Y H, Zhang M Y, et al. Static-pressure penetration field test of PHC pipe pile based on fiber Bragg grating sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 90-98. (in Chinese)
- [24] 白晓宇,张明义,匡政,等. 光纤光栅传感技术在GFRP抗浮锚杆现场拉拔试验中的应用[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3891-3899.  
Bai X Y, Zhang M Y, Kuang Z, et al. Application of fiber grating sensing technology in pull-out test on glass fiber reinforced polymer anti-floating anchor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(10): 3891-3899. (in Chinese)
- [25] 吴俊,陈伟民,舒岳阶,等. 锚头植入式应变均化光纤布喇格光栅测力传感器[J]. 光子学报, 2015, 44(7): 95-100.  
Wu J, Chen W M, Shu Y J, et al. Embedded strain homogenized FBG sensor for smart cables[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(7): 95-100. (in Chinese)
- [26] 兰春光,刘航,周智. 基于BOTDA-FBG智能钢绞线的预应力损失监测[J]. 土木工程学报, 2013, 46(9): 55-61.  
Lan C G, Liu H, Zhou Z. Experimental investigation of prestress loss in PC beams based on BOTDA/FBG smart steel strands[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(9): 55-61. (in Chinese)
- [27] Ren L, Feng T, Ho M, et al. A smart "shear sensing" bolt based on FBG sensors[J]. Measurement, 2018, 122: 240-246.
- [28] 师琪,任亮,尤润州,等. 基于光纤光栅传感器的智能螺栓开发及应用[J]. 仪表技术与传感器, 2020(12): 10-15.  
Shi Q, Ren L, You R Z, et al. Development and application of smart bolt based on fbg sensors[J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(12): 10-15. (in Chinese)
- [29] 张洪英. 光纤智能螺栓及其在电网中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.  
Zhang H Y. Smart bolt based on optical fiber and its application in power grid[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [30] Zhang C C, Zhu H H, Cheng D D, et al. Feasibility study of anchored fiber-optic strain-sensing arrays for monitoring soil deformation beneath model foundation[J]. Geotechnical Testing Journal, 2019, 42(4): 966-984.
- [31] 城市综合管廊工程技术规范: GB 50838—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.

(本文责编:周小潭)