

基于 FBG(光纤光栅)监测技术的地铁盾构隧道 环向变形研究*

代兴云¹ 穆保岗² 陶 津²

(1. 中国联合工程有限公司, 310052, 杭州; 2. 东南大学土木工程学院, 211189, 南京)

摘 要 [目的] FBG(光纤光栅)监测技术具有动态响应快、抗干扰强、精度高、耐久性强等优点,能实现远距离实时监测,其反馈的环向变形监测数据对盾构掘进过程的参数调整有着重要意义,有必要基于光纤监测技术对管片环向变形规律进行深入研究。[方法]以某地铁隧道工程为例,采用光纤传感器对地铁隧道施工期管片进行实时监测。通过监测数据分析,研究管片施工环境中的环向应变变化规律,分析相对收敛位移与盾构掘进参数之间的相互关系。[结果及结论]监测数据表明,环向变形主要集中在管片安装之后的一周内和相邻隧道掘进的 50 m 范围内,当地层差且埋深小时,后掘进隧道对已施工管片收敛的影响程度为 50%;当地层好且埋深大时,而后掘进隧道对已施工管片收敛的影响程度约为 65%~83%。不同埋深时管片应变受土层及邻线隧道施工的影响较大,其中埋深小且土层差的管片变形变化大,埋深较大的管片约束性较好,变形变化不明显。相对收敛位移与盾构掘进参数存在明显的联系,盾构的总推力与管片的相对收敛位移存在负相关的关系,盾构的掘进速度与管片的相对收敛位移存在正相关的关系。采用 FBG 监测技术得到的实时监测数据,能作为盾构机掘进参数调整的依据。

关键词 地铁隧道; 光纤监测; 环向变形; 施工期

中图分类号 U456.3⁺1:TN25

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.028

Research on Circumferential Deformation of Metro Shield Tunnel Based on FBG Monitoring Technology

DAI Xingyun¹, MU Baogang², TAO Jin²

(1. China United Engineering Corporation Limited, 310052, Hangzhou, China; 2. Civil Engineering College of Southeast University, 211189, Nanjing, China)

Abstract [Objective] FBG (fiber bragg grating) monitoring technology features fast dynamic response, strong anti-interference, high precision and strong durability, and can realize long-distance real-time monitoring. The feedback circumferential deformation monitoring data from FBG is of great signifi-

cance to the parameter adjustment in the process of shield tunneling. Therefore, it is necessary to conduct an in-depth research on the circumferential deformation law of the segments based on FBG technology. [Method] With a metro tunnel project as the example, the fiber optic sensors are used for real-time monitoring of the segments during metro tunnel construction. Through analysis of the monitoring data, the changing law of the circumferential strain in the segment construction environment is studied, and the correlation between the relative convergence displacement and the shield tunneling parameters is analyzed. [Result & Conclusion] The monitoring data indicates that the circumferential deformation mainly occurs within one week after the installation of the tunnel segments and within a 50 m range of the adjacent tunnel excavation. In condition of unfavorable stratum and small buried depth, the effect of the subsequent tunnel excavation on the convergence of the already constructed segments is about 50%. When the stratum is favorable and the buried depth is large, the effect of subsequent tunnel excavation on the above convergence is approximately 65% to 83%. The strain of the segments is affected significantly by the stratum and the adjacent tunnel construction under different buried depths. The segments in a shallow buried depth and poor soil stratum have large deformation, while those in the larger buried depth exhibit better constraint and unnoticeable deformation. There is a clear correlation between the relative convergence displacement and the shield tunneling parameters. The total thrust of the subsequent shield tunneling is negatively correlated with the relative convergence displacement of the previously constructed segments, while the excavation speed of the subsequent shield tunneling is positively correlated with the above relative convergence displacement. The real-time monitoring data obtained through FBG monitoring technology can serve as a basis for adjusting the shield tunneling parameters.

* 中国联合工程有限公司重点技术开发项目(2023ZD-01)

Key words metro tunnel; fiber bragg grating; circumferential deformation; construction period

随着我国城市化进程的稳步推进,地铁成为城市交通建设发展的重点方向^[1]。地铁隧道具有地质条件复杂、地上及地下建构筑物密集等特点,相应的地铁隧道施工期变形限值要求极高。目前,传统的隧道收敛监测方式仅能满足个别断面的监测要求,且无法实时反馈监测数据。

FBG(光纤光栅)监测技术具有动态响应快、抗干扰强、精度高、耐久性强等优点,能实现远距离实时监测^[2],目前我国运营期地铁盾构隧道环向变形监测中应用较多^[3-4]。而施工期隧道内部泥水混杂、机械振动等,施工环境恶劣,故FBG监测技术在隧道施工期变形监测的工程应用较少。文献[5]对FBG传感器的封装和保护方式进行了探讨,提高了施工期隧道中FBG传感器的成活率,实现了内力和应变的精确监测;文献[6]对上海某越江隧道施工中的应变与钢筋应力的相关性进行了分析。目前基于FBG监测技术对隧道环向变形与施工参数的相关性分析较少,本文采用FBG监测技术对施工期隧道环向变形进行实时监测,分析环向变形的规律,并根据监测数据反馈,及时调整盾构掘进参数,以保证结构安全。

1 FBG 监测技术原理

FBG是将普通通信光纤的一部分利用掺锗光纤非线性吸收效应的紫外全息曝光法而制成的一种称为布拉格的纤芯折射率周期性变化光栅。一般的光都可以通过布拉格光栅而不受影响,只有特殊波长的光经过布拉格光栅后会反射到原处。当布拉格光栅的外界因素发生变化时(如对其施加外力或温度改变等),光栅的间隔会发生变化,其反射波长 λ_B 也会产生相应的变化,从而反映外界温度和应变的变化。由此,可以根据光栅反射的波长变化,来测量结构应变和温度的变化值。根据耦合理论,当满足Bragg条件的光被反射时,光纤光栅的中心反射波长 λ_B 为:

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

式中:

n_{eff} ——纤芯的有效折射率;

Λ ——光纤光栅周期。

2 地铁隧道施工现场监测

2.1 工程概况

本文以佛山地铁2号线登洲站—花卉世界站盾构区间(以下简称“登花区间”)作为研究对象,采用分布式FBG传感器对盾构隧道结构进行变形监测。

登花区间全长1 317.38 m,区间原始地貌为河流阶地地貌,现已填成佛陈公路和玉兰路。根据工程勘察资料,登花区间隧道主要穿行于<4N-2>可塑状粉质黏土层、<3-1>粉细砂层、<3-2>中粗砂层和<6>全风化泥岩层,局部通过<2-1B>淤泥质土层和<2-2>淤泥质粉细砂层。

2.2 现场监测方案

2.2.1 传感器选择

本工程采用的FBG传感器是北京特希达科技有限公司生产的LGSS(Long Gage Strain Sensor,长标距光纤光栅应变传感器)。LGSS标距较大,最大量程可达5~6 mm,非常适合于变化程度较大的盾构管片直径收敛监测;同时LGSS直径较小,便于在管片结构表面粘贴和保护。LGSS的主要性能指标如表1所示。

表1 LGSS的主要性能指标

Tab. 1 Main performance indexes of LGSS

应变测量范围/ 10 ⁻⁶	应变灵敏系数	使用温度范围/℃	应变测量精度/10 ⁻⁶	应变分辨率/ 10 ⁻⁶	外径/mm	耐久性/年
-3 000 ~ 3 000	1.14 ~ 1.20	-20 ~ 120	±(1~2)	0.5	2~3	≥5

2.2.2 LGSS的封装与安装

裸光纤非常纤细,其直径只有125 μm,若直接将其布设在结构上,极易受到外界剪力而发生折断,从而造成传感器数据的丢失。对此,也为了增强光纤的抗腐蚀、耐久性等能力,需要对光纤光栅进行加工封装。

工程中一般采用粘贴封装,即将裸光纤直接粘贴于盾构管片表面,再使用环氧树脂进行涂抹保护。该封装方法简单易操作,但在施工过程中,尤其在施工隧道内部机械较多,且湿度相对较大的情况下,很容易被碰撞破坏。登花区间在隧道管片的上部采用点式粘贴,并采用环氧树脂进行涂抹保护;在湿度较大区域的管片下部采用全长粘贴,并在涂抹环氧树脂后,采用三角铁片进行保护。经检验,这种安装方式取得了较好的保护效果。登花区

间盾构管片 LGSS 环向布置现场实物图如图 1 所示。



图 1 登花区间盾构管片 LGSS 环向布置现场实物照片
Fig. 1 On-site photo of shield tunnel segment LGSS circumferential layout in Denghua section

2.2.3 监测点布设原则

登花区间盾构管片监测点布设于岩土层土质较差的位置及埋深变化明显的部位,并在埋深大、土质好的地层布设参照监测点,用于对比分析。

本研究以登花区间盾构隧道右线作为研究对象。右线隧道为先行开挖隧道,选取里程 YDK40 + 465(第 520 环)和 YDK41 + 087(第 103 环)处进行环向收敛监测。第 103 环所处淤泥质土软弱地层埋深约为 13 ~ 15 m;第 520 环位于土质相对较好的泥岩与中粗砂地层中,埋深约为 20 m。登花区间监测点布置如图 2 所示。

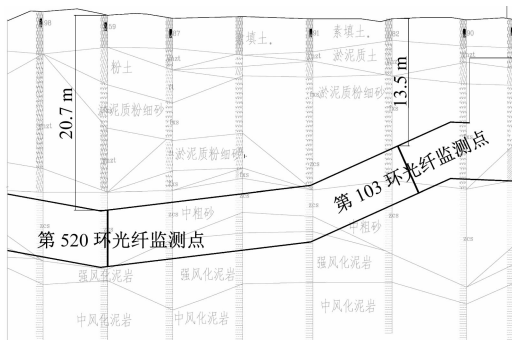


图 2 登花区间监测点布置示意图
Fig. 2 Schematic layout of monitoring points in Denghua section

2.2.4 LGSS 布设方案

按监测断面布设 LGSS。LGSS 布设在第 103 环及第 520 环的管片相邻块交接处,每个断面环向布设 6 个 LGSS(监测点编号 G1—G6),并设置 1 个温度补偿传感器。环向监测点布置图如图 3 所示。

根据 LGSS 监测到的波长变化,得到管片的应变值。管片环向应变均以拉为正,以压为负。参照文献[7],将盾构管片环等分为 m 个弧长均为 l 的

单元,分别计算每个单元由弯矩和轴力引起的径向位移,将二者叠加后即可得到管片监测点的相对位移。

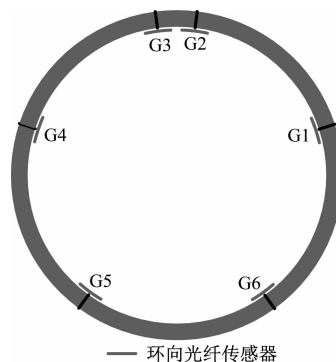
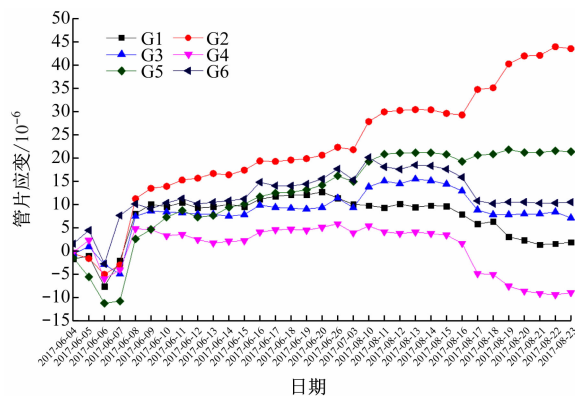


图 3 登花区间盾构管片环向监测点布置图
Fig. 3 Layout of circumferential monitoring points for shield tunnel segment in Denghua section

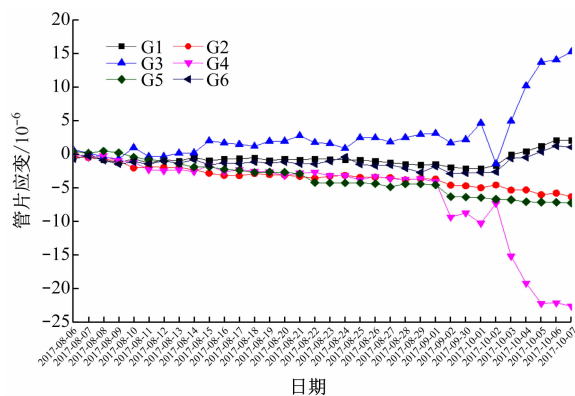
2.3 现场监测结果分析

2.3.1 环向应变监测结果

根据现场监测结果,按盾构隧道的掘进时间绘制隧道管片环向应变时程曲线图,如图 4 所示。由



a) 第 103 环



b) 第 520 环

图 4 隧道管片环向应变时程曲线图

Fig. 4 Time history curves of tunnel segment circumferential strain

图4可见:在盾构向前掘进过程中,两个断面的应变变化特点类似——顶部和底部拉应变增大,腰部压应变增大。经分析,这是因为在下卧层土体固结的作用下,环向管片拉压应变逐渐增大并稳定。在一段时间后两个断面的应变均产生了较大的突变。这是因为左线掘进时对土体再次产生扰动,致使右线管片顶部应变增加,而侧向土体的挤压也使管片的轴向压力增加,即管片腰部的压应变增大。此外,第520环管片埋深较大,其周围土体对管片的约束作用更大,故管片的应变变化较小;第103环埋深较小,管片容易出现上拱和下沉的状态,此时该管片顶底部均处于受拉状态,而两腰部位处于受压状态。

2.3.2 相对收敛位移监测结果

相对收敛位移 d_c 以向着圆心移动为正,以远离圆心移动为负。第103环和第520环的 d_c 监测结果分别如图5及图6所示。

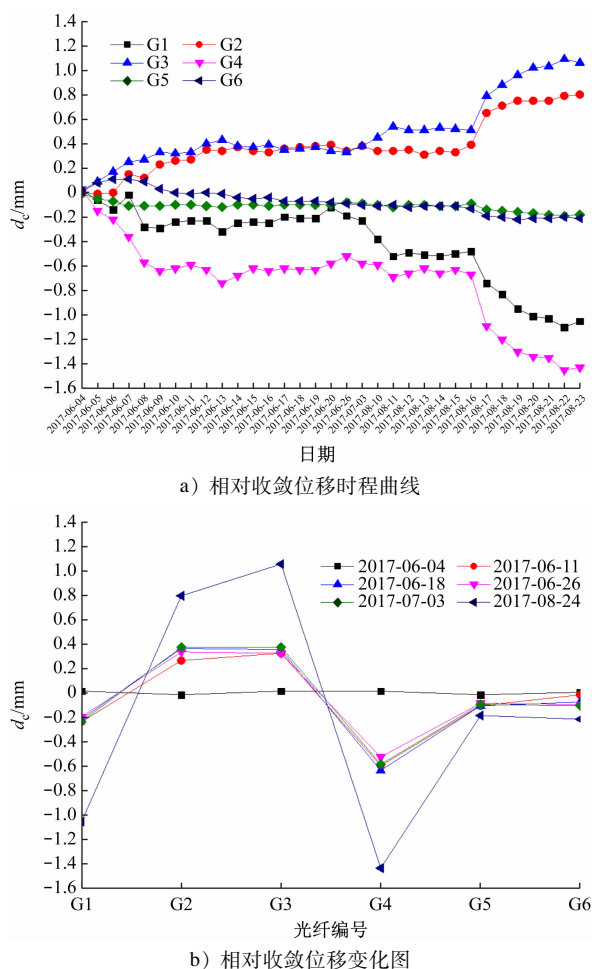


图5 第103环相对收敛位移监测结果

Fig. 5 Monitored results of relative convergence displacement of Ring 103

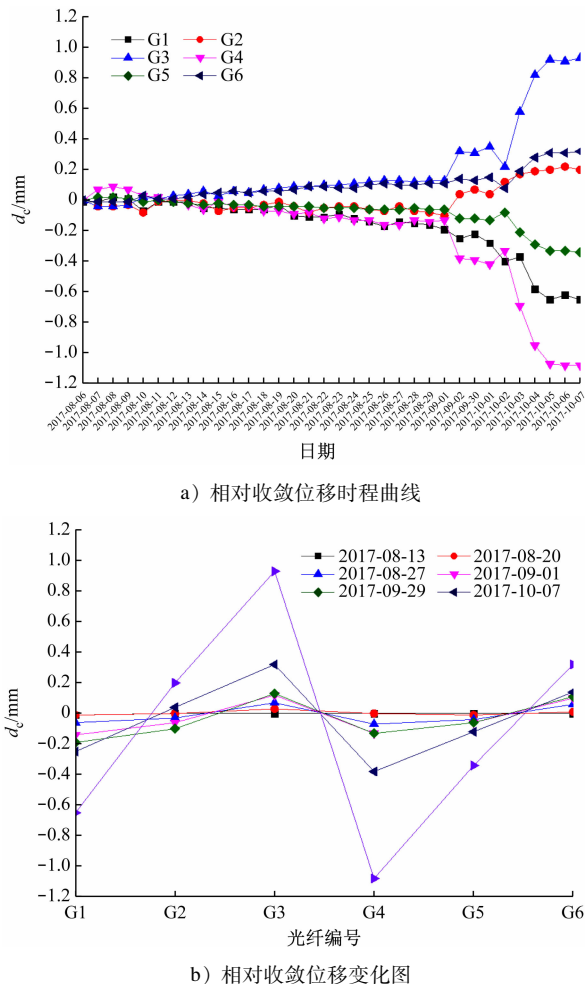


图6 第520环相对收敛位移监测结果

Fig. 6 Monitored results of relative convergence displacement of Ring 520

由图5 a)可以看出,位于管片顶部的G2和G3处 d_c 为正(位移方向均向着圆心),而位于管片两腰的G1和G4处 d_c 为负(位移方向均远离圆心)。这与管片水平直径增大、竖向直径减小的实际状况是相符的。

从图5 a)可以看出: d_c 变化主要集中在管片安装之后的1周内(6月4日—6月11日);顶部和两腰(G1、G2、G3、G4)的 d_c 变化速率较大,约为0.2~0.7 mm/d,而管片底部的 d_c 变化速率较小,约为0.03 mm/d;管片顶部的 d_c 值也相对较大,G2处 $d_c = 0.80$ mm,G3处 $d_c = 1.06$ mm,其中右线掘进时 d_c 占 d_c 终值的50%左右;在管片两侧,G1处 $d_c = -1.05$ mm,G4处 $d_c = -1.45$ mm,其中右线掘进时 d_c 占 d_c 终值的40%左右。从图5来看,G1和G4处 d_c 为负,G2、G3、G5和G6处 d_c 为正。这与管片变形的实际状况也是符合的。

由图6可见:第520环的 d_c 变化不大,并且在

管片安装之后的 d_c 变化速率也相对较均匀;其中 G3 和 G4 处的 d_c 变化速率为 0.02 mm/d, 最终两处 d_c 分别稳定为 0.91 mm 和 -1.08 mm; 而右线掘进时, G3 和 G4 处的 d_c 约占 d_c 终值的 17%; G1、G2、G5、G6 处的 d_c 较小, 最终维持在 -0.65 ~ 0.32 mm, 约占 d_c 总值的 17% ~ 35%; 第 502 环受左线掘进影响明显, 受左线影响的 d_c 值约占 d_c 终值的 65% ~ 83%。

综上所述: 管片顶部和底部是向着圆心移动的, 而管片两侧是远离圆心移动的; 左线的掘进施工会明显影响到右线管片的环向变形, 造成环向收敛进一步增大; 当地层差且埋深小时, 后掘进隧道对已施工管片收敛的影响程度为 50%; 当地层好且埋深大时, 先掘进隧道造成管片收敛位移较小, 而后掘进隧道对已施工管片收敛的影响程度约为 65% ~ 83%。

2.3.3 d_c 与盾构掘进参数的关系

选取埋深变化大且土质较差的第 103 环, 分析拱顶 G2 和拱腰 G4 处 d_c 与右线盾构掘进参数的关系, 结果如图 7 所示。在第 103 环安装后的 24 h

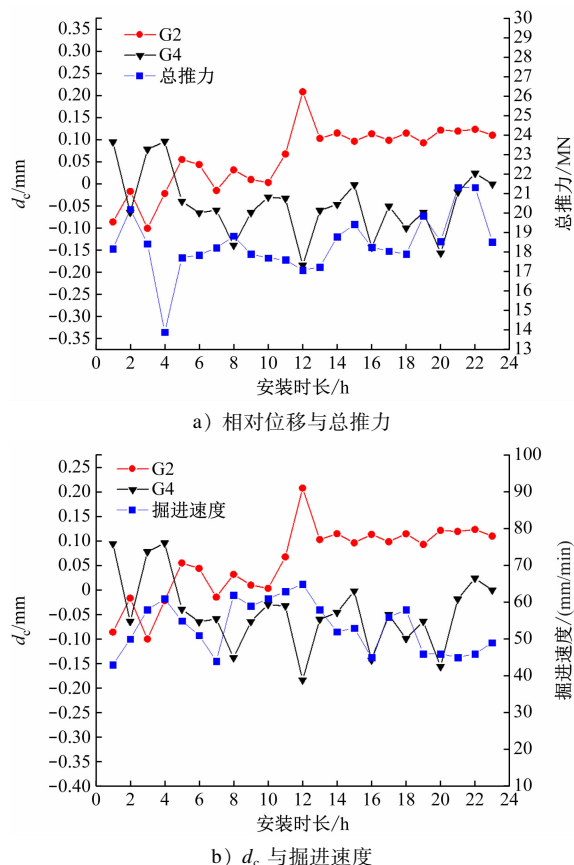


图 7 第 103 环 d_c 与施工参数的关系

Fig. 7 Relationship between d_c (relative convergence displacement) and construction parameters of Ring 103

内, 拱顶 G2 处的正向 d_c 逐渐增大, 拱腰 G4 处的负向 d_c 也逐渐增大。

根据图 7 a), 总推力与 d_c 呈负相关: 当总推力减小时, 管片的 d_c 变化幅度就增大, 而当总推力增大时, d_c 变化便趋于平稳。经分析, 盾构的总推力是由作用在管片上的千斤顶来提供的, 故总推力较大时, 千斤顶对管片的约束作用也比较大, 从而使管片的 d_c 变化逐渐减小。

根据图 7 b) 所示, 掘进速度与 d_c 呈正相关, 即掘进速度越快, 管片的 d_c 变化越大。这是因为施工盾构的掘进速度越快, 对周边土体的扰动就越大, 已完工的盾构管片就越易发生环向变形。

由此可见, 管片 d_c 与盾构掘进参数存在明显的关系, 说明对光纤传感器的实时监测数据可作为指导地铁隧道施工的依据。

3 结论

1) 盾构管片的应变受土层、埋深及邻线隧道施工的影响较大; 若埋深小、土层差, 则管片的应变变化大; 埋深较大时管片的约束性较好, 应变变化不明显; 后期邻线隧道开挖对管片应变的变化影响明显。

2) d_c 的变化主要集中在右线管片安装之后的 1 周内和左线盾构掘进 50 m 的范围内。当地层差且埋深小时, 后掘进隧道对已施工管片收敛的影响程度为 50%; 当地层好且埋深大时, 而后掘进隧道对已施工管片收敛的影响程度约为 65% ~ 83%。

3) d_c 与盾构掘进参数有明显的关系。光纤监测的实时数据可作为调整盾构掘进参数的依据。

参考文献

- [1] 朱建峰. 我国智慧地铁发展现状与展望[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2019, 37(4): 6.
ZHU Jianfeng. Development status and prospect of smart metro in China[J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2019, 37(4): 6.
- [2] 赵星光, 邱海涛. 光纤 Bragg 光栅传感技术在隧道监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 587.
ZHAO Xingguang, QIU Haitao. Application of fiber Bragg grating sensing technology to tunnel monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 587.
- [3] 谢冰冰. 分布式光纤监测隧道变形的应变传递机制及布设技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.

(下转第 160 页)

- 39(4): 1440.
- [7] 石钰锋, 方焘, 王海龙, 等. 基坑开挖引起紧邻地铁隧道力学响应与处理方案研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(6): 1100.
- SHI Yufeng, FANG Tao, WANG Hailong, et al. Research on mechanical response and countermeasures of subway tunnel induced by adjacent excavation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(6): 1100.
- [8] 张治国, 白乔木, 姜蕴娟, 等. 邻近隧道及周围地层受深基坑开挖影响的现场监测研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(2): 177.
- ZHANG Zhiguo, BAI Qiaomu, JIANG Yunjuan, et al. In-situ monitoring analyses of the influences of deep foundation pit excavation on adjacent metro tunnels and surrounding strata[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(2): 177.
- [9] 马永峰, 周丁恒, 曹力桥, 等. 临近地铁隧道的软土基坑施工分析及方案优化[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(5): 33.
- MA Yongfeng, ZHOU Dingheng, CAO Liqiao, et al. Analysis and scheme optimization of pit excavation adjacent to metro tunnels in soft ground[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2015, 34(5): 33.
- [10] BEYABANAKI A R, GALL V. 3D numerical parametric study of the influence of open-pit mining sequence on existing tunnels[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(3): 459.
- 收稿日期:2022-01-01 修回日期:2022-02-24 出版日期:2024-06-10
Received:2022-01-01 Revised:2022-02-24 Published:2024-06-10
• 第一作者:杨革,高级工程师,287821359@qq.com
通信作者:徐前卫,副教授,xuqianewi@tongji.edu.cn
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 152 页)

- XIE Bingbing. Strain transfer mechanism and layout technology of distributed optical fiber for monitoring tunnel deformation[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2019.
- [4] 梁斯铭, 谢长岭, 蒋儿, 等. 分布式光纤技术在隧道变形监测中的应用[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(增刊1): 436.
- LIANG Siming, XIE Changling, JIANG Er, et al. Application of distributed optical fiber technology in tunnel deformation monitoring[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(S1): 436.
- [5] 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.
- WEI Guangqing, SHI Bin, HU Sheng, et al. Several key problems in tunnel construction monitoring with FBG[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 571.
- [6] 杨玉坤, 王新. FBG 应变传感器在盾构隧道监测中应用[J]. 低温建筑技术, 2011, 33(2): 95.
- YANG Yukun, WANG Xin. The application of FBG strain sensors in the monitoring of shield tunnels[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2011, 33(2): 95.
- [7] 沈圣, 吴智深, 杨才千, 等. 基于分布式光纤应变传感技术的盾构隧道横截面收敛变形监测方法[J]. 土木工程学报, 2013, 46(9): 104.
- SHEN Sheng, WU Zhishen, YANG Caiqian, et al. Convergence deformation monitoring of shield tunnels based on distributed optical fiber strain sensing technique[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(9): 104.
- 收稿日期:2021-12-21 修回日期:2022-03-15 出版日期:2024-06-10
Received:2021-12-21 Revised:2022-03-15 Published:2024-06-10
• 通信作者:代兴云,工程师,daixy@chinacuc.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

