

Research on the Mechanical Characteristics of Subway Engineering Projects Based on Multi-source Monitoring Information

Sihua Dai¹ Ping Guo²

1. Shenzhen Metro Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China
2. Power China Southern Construction and Investment Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518055, China

Abstract

The prefabricated structures of underground subway stations are characterized by large weights and dimensions. During construction, multiple operational conditions can easily cause structural deformations and stress concentration, leading to potential damage. This study utilizes a high-precision, high-spatial-resolution system comprising fiber Bragg grating sensors, optical frequency domain reflectometers, and displacement transfer cameras to conduct high-frequency monitoring of joint strains, component strains, and settlement convergence in the internal space of assembled sections of open-cut prefabricated subway stations. By comparing the monitoring data with analytical and numerical simulation results, it was found that the deviation between the monitoring results and the simulation results was less than 10%. This confirms the reliability of the data and the accuracy of the monitoring method, and reflects the deformation characteristics of joints, components, and single-ring structures.

Keywords

subway assembly station; multi-source monitoring data; force characteristic study; optical fiber grating sensor

基于多源监测信息的地铁工程结构受力特征分析

戴四化¹ 郭平²

1. 深圳市地铁集团有限公司, 中国·广东 深圳 518000
2. 中电建南方建设投资有限公司, 中国·广东 深圳 518055

摘要

地铁地下车站装配式结构重量与尺寸非常大, 施工过程中多个工况极易导致结构的变形和受力复应力集中而损伤。本研究基于高精度高空间分辨率的光纤光栅传感器、光频域反射计和位移传递像机串联系统, 对明挖装配式地铁车站拼装段结构内部空间的应变及单环结构沉降收敛进行监测。将监测数据与解析模拟-数值模拟结果进行对比, 结果表明: 监测结果与模拟结果偏差率均低于10%, 验证了数据的可靠性及监测方法的准确性, 反映了接头—构件—单环的变形特征变化情况。

关键词

地铁装配式车站; 多源监测数据; 受力特征研究; 光纤光栅传感器

1 引言

近年来, 装配式建造技术发展迅速, 逐渐成为地下车站建设的重要方式。与传统现浇结构相比, 装配式结构具有施工效率高、劳动力需求少、环境污染小等优势。但结构在施工过程中受力与变形较为复杂, 存在多个高风险点。

2 基于光纤光栅传感器的拼装段单环接头应力数据分析

图 1 展示了顶部回填工况第 57 环 B2-C 和 B2-A 接

【作者简介】戴四化 (1979-), 男, 中国江苏徐州人, 本科, 高级工程师, 从事轨道交通工程方面的技术管理、项目管理研究。

头钢筋应力监测情况。可以发现, 随着顶部回填工况不断开展, 两接头钢筋应力呈现波动性变化后趋于稳定。2022 年 9 月 28 日接头 B2-C 和 B2-A 监测得到的钢筋应力分别为 -0.77MPa 和 -1.21MPa。

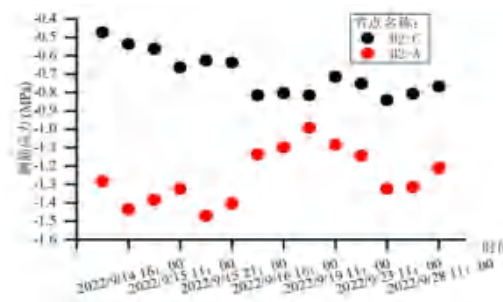


图 1 顶部回填工况下第 57 环 B2-C 与 B2-A 接头钢筋应力

根据光纤光栅传感器提供的有效的应变监测数据反算 B2-C 接头和 B2-A 接头的弯矩，其可以反映两接头的弯矩变化。顶部回填工况在 2022 年 9 月 28 日之后应变变化趋势趋于稳定，在本研究中取 2022 年 9 月 28 日第 57 环接头应变数据反算接头弯矩，计算公式为 $M = \sigma I / y$ ，其中 y 表示弯矩计算位置至横截面中性轴的距离，这里取 $y = D/2 =$

$-1.904/2 = -0.952\text{m}$ 。计算得到该时间接头 B2-C 和 B2-A 的弯矩分别为 $-411.90 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 和 $-647.28\text{kN}\cdot\text{m}$ 。表 33 展示了顶部回填工况下第 57 环 B2-C 和 B2-A 接头解析模拟 - 数值模拟 - 原位监测数据误差分析情况，三类型数据误差均小于 4.0%，这表明解析模拟 - 模拟结果是可靠的。

表 1 顶部回填工况第 57 环 B2-C 和 B2-A 接头弯矩 M 解析模拟 - 数值模拟 - 原位监测数据误差分析

第 57 环原位监测项目	解析模拟结果	数值模拟结果	原位监测结果	解析模拟 - 数值模拟结果误差	解析模拟 - 原位监测结果误差	数值模拟 - 原位监测结果误差
B2-C 接头弯矩 (kN·m)	-395.73	-399.43	-411.90	0.9%	3.9%	3.0%
B2-A 接头弯矩 (kN·m)	-650.46	-658.29	-647.28	1.2%	0.5%	1.7%

3 基于光频域反射计的拼装段单环侧板构件应变数据分析

图 2 展示了顶部回填工况下第 57 环 B2 构件应变分布情况。该图所示的各时间下的应变曲线是在现场分布式光纤应变监测数据的基础上经过处理后得到的平滑曲线。在现场研究中，提前确定好应变监测的有效初始位置，即距光纤接入监测设备的初始位置的光纤长度距离约 8m 处，此位置为 B2 构件的顶部位置。由 3.2.3 可知，分布式光纤绕钢筋笼布置，由于传感光纤和节段锚固钢筋之间的耦合受到节段铸造、组装和拆除的影响，取 8~26m 的约 18m 长的光纤提供有效的监测数据进行后续分析。可以发现，随着顶部回填工况不断进行，B2 构件内部应变分布的趋势更加符合解析模拟 - 数值模拟结果，2022 年 9 月 28 日 B2 构件微应变分布范围为 $-70\sim-90\mu\epsilon$ 。可以发现，所选区间监测应变在光纤长度距离约 7m 处两侧呈中心对称分布。通过分布式光纤监测数据反映了构件内侧和构件外侧光纤分别受到相反的拉压作用，同时表明在构件内侧和构件外侧沿构件底部至构件顶部构件应变具有相同的变化趋势，这反映了监测数据的准确性。因此，可以利用分布式光纤监测得到的有效的应变数据反算构件弯矩，由于本研究中光纤采用的是 U 型布置方案，因此可以提取光纤有效监测段一半长度的监测应变数据进行分析研究。通过分布式光纤得到的应变监测数据波动性较大，在通过应变反算弯矩时，常常需要提前对数据进行去噪处理，本研究采用的是去噪后的应变监测数据。

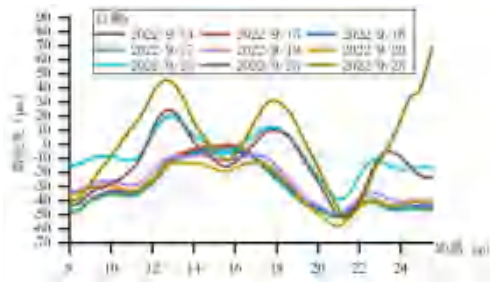


图 2 顶部回填工况下第 57 环 B2 构件应变分布

提取 18~26m 的约 8m 长的光纤提供的有效的应变监测

数据反算 B2 构件的弯矩，图 317 展示了顶部回填工况下第 57 环 B2 构件弯矩的分布情况。

提取的应变监测反算的弯矩数据可以反映 B2 构件从底部至顶部的弯矩变化。在本研究中，顶部回填工况在 2022 年 9 月 28 日之后应变变化趋势趋于稳定，取 2022 年 9 月 28 日第 57 环构件应变分布数据反算构件弯矩，计算公式为 $M = EI\epsilon / y$ ，其中 y 表示弯矩计算位置至横截面中性轴距离，这里取 $y = D/2 = -1.904/2 = -0.952\text{m}$ 。选取该环 B2 构件底部、中部和顶部特征点比较解析模拟 - 数值模拟 - 原位监测数据之间的偏差值，可以发现构件底部和顶部的解析模拟 - 监测和数值 - 监测偏差值接近，在构件中部发生有较大差别，其中解析模拟 - 监测偏差和数值 - 监测偏差分别为 0.1% 和 6.4%。该种情况表明构件中部解析模拟模型的模拟值更接近于现场实际情况，进一步证明了解析模拟模型的合理性。同时，B2 构件解析模拟 - 监测和数值 - 监测偏差均在 6.4% 以内，且解析模拟 - 模拟 - 监测结果变化趋势一致，这表明解析模拟模型和数值模拟模型的模拟结果均可靠。

4 基于位移传递像机串联系统的拼装段单环监测数据分析

为了保证正在施工的装配式地下车站的结构安全，重点关注施工期车站顶部回填工况，图 3 展示了车站各监测环 B2 构件的沉降增量历时曲线。为了准确考虑回填期间沉降变化，设置回填开始日期 2022 年 9 月 13 日 0 时的沉降值为初始值。

从时序角度出发，顶部回填位置随时间增加不断由入口环 1 环向出口环 80 环延伸。2022 年 9 月 15 日回填至第 44 环，回填面积达 450m^2 ，车站整体区域沉降变化在此之前不明显。2022 年 9 月 15 日，车站降雨，回填堆载出清工作暂停，此时各环 B2 构件的沉降量迅速增加，增加量最大的位置在 22 环，约 -2.5mm 。可以判断降雨和覆土堆载使各构件沉降量快速增加。2022 年 9 月 22 日，覆土至第 60 环，回填面积达 550m^2 。可以发现，在 2022 年 9 月 22 日至 2022 年 9 月 23 日期间，B2 构件沉降量先减小后快速增加，且沉降量增加最大的位置为第 42 环，约 -3.0mm 左右。随

着顶部回填继续进行,各构件沉降量趋于稳定,沉降量最大位置在第 42 环,2022 年 9 月 28 日顶部回填完成后沉降量达到约 -3.0mm。其他环的沉降在 -3.0mm ~ -1.0mm 的范围内波动,沉降量最小的环为第 17 环,沉降量约增加 -1.0mm。

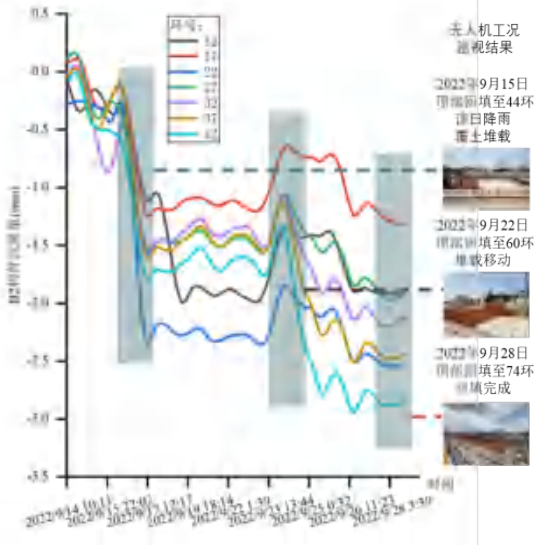


图 3 顶部回填工况下拼装段监测环 B2 构件沉降增量历时曲线

5 顶部回填工况拼装段监测环解析模拟 - 数值模拟 - 原位监测数据对比分析

分别从监测环 B2-B1 构件沉降收敛、监测环 B2 构件弯矩、监测环 B2-C 和 B2-A 接头弯矩三个层面对比分析顶部回填工况下解析模拟 - 数值模拟 - 原位监测数据的误差情况。其中,接头尺度的接头弯矩方面的最大误差为监测环 B2-C 接头的解析模拟 - 监测误差,达到 3.9%;构件尺度的构件弯矩方面的最大误差为监测环 B2 构件中部数值 - 监测误差,达到 6.4%;结构尺度的结构沉降收敛方面的最大误差为监测环 B2 构件沉降增量数值 - 监测误差,达到 10.1%。可以发现,随着接头 - 构件 - 单环从宏观尺度上不断从结构整体,深入单环各构件,再到构件之间的接头,其解析模拟 - 数值模拟 - 原位监测三类型数据之间的误差不断减小,体现了该

接头 - 构件 - 单环多尺度结构响应可靠性。

6 结语

论文介绍了应用于明挖装配式地铁车站的接头 - 构件 - 单环多尺度结构响应,分别在某车站应用光纤光栅传感技术、光频域反射技术和位移传递像机串联系统,监测得到车站拼装段接头应变、构件应变、单环结构沉降收敛监测数据。该监测方法可以有效高频率的反映车站结构不同位置变形特征参数的变化,同时反映施工期各工况下的结构响应情况。同时,将监测数据和第 2 章所得到的解析模拟 - 数值数据进行分析比较,发现三类数据的偏差率均低于 10%,这既验证了解析模拟 - 数值模拟 - 原位监测数据的可靠性,同时也体现了该接头 - 构件 - 单环监测方法的准确性,也表明解析模拟 - 数值模拟得到的某类工况下各类结构变形特征参数的变化情况是相对可靠的,反映了接头 - 构件 - 单环的变形特征变化情况。

参考文献

- [1] 钱七虎.迎接中国城市地下空间开发高潮[J].岩土工程学报,1998(6):112-113.
- [2] 张杨杨,隋天雨,裴俊,等.人工神经网络技术及其在岩土工程领域的应用[J].科技创新与生产力,2021(9):62-64+69.
- [3] 岳岭,刘方,刘辉,等.基于神经网络的大直径盾构隧道施工地层变形预测分析[J].铁道标准设计,2020,64(1):122-126.
- [4] Shi J., Ortigao J. A. R., Bai J. Modular Neural Networks for Predicting Settlements during Tunneling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998(124): 389-395.
- [5] 孙钧,袁金荣.盾构施工扰动与地层移动及其智能神经网络预测[J].岩土工程学报,2001(1):261-267.
- [6] 陈仁朋,戴田,张品,等.基于机器学习算法的盾构掘进地表沉降预测方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(7).
- [7] 黄靓钰,阳军生,张聪,等.基于BP神经网络的水下岩溶地层盾构掘进参数预测与分析[J].土木工程学报,2020,53(S1):75-80+98.
- [8] 阳俊,曾维伟.基于GA-BP神经网络的采空区地表沉降预测模型[J].矿冶工程,2022,42(2):42-45.