

自动化实时监测在地铁隧道中的应用及分析

杨帆¹, 赵剑¹, 刘子明¹, 邹兴欣²

(1. 深圳市市政设计研究院有限公司, 广东 深圳 518029; 2. 深圳地铁运营分公司, 广东 深圳 518040)

摘要: 介绍了深圳地铁二号线东延段燕大区间穿越运营地铁一号线大科区间时结构变形自动化实时监测的实施要点, 根据盾构隧道结构特点, 完善了整个自动化监测系统, 并分析了结构变形规律。当地铁左右线全部完成穿越后, 最大累计沉降变形量为-13.8 mm, 变形值均在控制指标允许范围内。同时提出将监测点的沉降过程划分为3个阶段, 对沉降量最大的第二阶段使用对数函数模型 $y = -4.096 \ln(x) - 2.7194$ 来进行拟合, 得到了较好的拟合结果。最后对盾构法施工引起结构变形的主要原因进行了有益探讨, 为今后类似项目提供了宝贵的监测经验。

关键词: 地铁隧道; 结构变形; 实时监测; 数据分析; 模型分析

中图分类号: TU456

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0162-05

作者简介: 杨帆(1980-), 男, 四川成都人, 硕士, 工程师, 主要从事地铁监测、桥梁及房屋建筑结构检测鉴定等工作。E-mail: 9045256@qq.com。

Application and analysis of automatic real-time monitoring in construction of subway tunnels

YANG Fan¹, ZHAO Jian¹, LIU Zi-ming¹, ZOU Xing-xin²

(1. Shenzhen Municipal Design & Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518029, China; 2. Operation Department of Shenzhen Metro Company, Shenzhen 518040, China)

Abstract: The key points of automatic real-time monitoring of the structural deformation are introduced when the subway Line 1 is traversed by the extension section of the subway Line 2 in Shenzhen. The automatic monitoring system is improved according to the structural characteristics of the shield tunnel, and the structural deformation rules are analyzed. After all the traversing of the left and right tunnels of subway Line 2, the accumulated settlement is -13.8 mm, which is below the critical value. The settlement process is divided into three stages. For the second stage with the largest settlement, a logarithmic function $y = -4.096 \ln(x) - 2.7194$ is employed, and the fitting results are satisfactory. The main reasons of the structural deformation induced by the shield method are discussed. It may provide reference and monitoring experience for similar projects in the future.

Key words: subway tunnel; structural deformation; real-time monitoring; data analysis; model analysis

0 引言

随着经济的发展, 大运会的盛大举行, 深圳市近年正大力兴建地铁工程。地铁隧道建造在地质复杂、道路狭窄、地下管线密集、交通繁忙的闹市中心, 其安全问题不容忽视。同时随着我国地下空间开发利用程度的不断扩展, 盾构隧道施工技术日益成熟。然而, 盾构隧道开挖过程中不可避免地会对原有的地层和应力场产生扰动, 从而引起地层的移动和地表沉降(或隆起), 进而对地表建(构)筑物带来不良影响。但在上软下硬地质条件下, 在350 m的小半径曲线条件下, 在不中断既有运营的重重困难下, 盾构隧道如何安全顺利的穿越运营中的地铁线路成为行业中的难题^[1-2], 甚至在国内也无类似的成功先例。

1 工程背景

本文以深圳地铁二号线东延段在里程ZDK30+845.896~ZDK30+902.309处下穿运营地铁一号线大科区间为背景, 通过施工阶段对现场进行自动化实时监测, 并对实测数据的整理和分析, 初步得出本工程施工引起的地铁结构沉降规律, 为将来类似工程的设计、施工及监测提供参考。

该区间线路最小平面曲线半径为350 m, 线间距10.0~15.0 m, 隧道轨面埋深约10~32 m。区间左线起点里程为ZCK29+705, 终点里程为ZCK31+312, 短链8.413 m, 区间长度1601.722 m; 右线起点里程

为 YCK29+702, 终点里程为 YCK31+312, 线间距 3.786 m, 地铁一、二号线相对位置关系如图 1 所示。

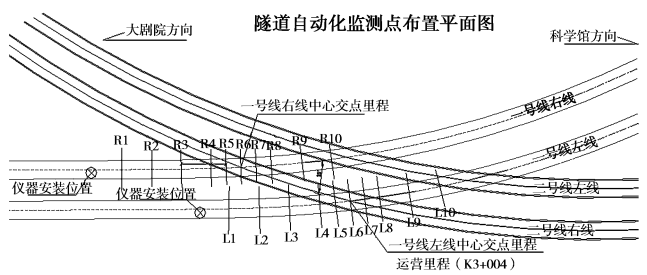


图 1 地铁一、二号线相对位置关系图
Fig. 1 Relative position of Line 1 and Line 2

2 监测系统介绍

2.1 仪器设备

传统的监测技术在高密度行车区间难以实施, 也无法实现实时的数据采集和反馈, 因此选用以瑞士进口的 TCA2003 徕卡全站仪为主的高精度 (0.5") 远程自动化实时监测系统对既有地铁一号线隧道结构和轨道变形进行不间断的监测。考虑到既有线路隧道结构和轨道结构的特点, 在地铁一号线结构上布设了隧道结构沉降、水平位移等监测点, 并采用自动化实时监测, 监测断面及点位布置如图 2 所示。

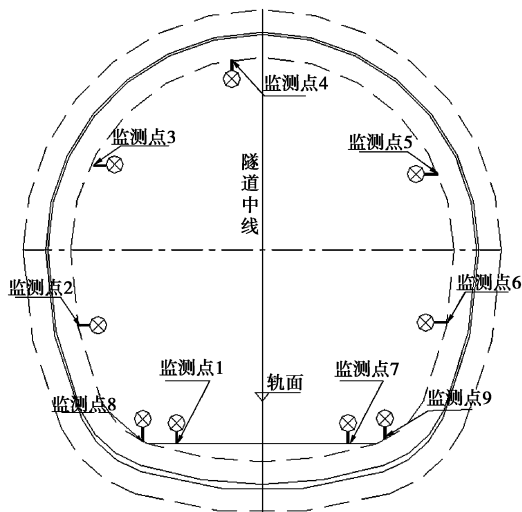


图 2 监测断面布点图
Fig. 2 Layout of monitoring points

2.2 监测系统

CR10 是一种智能工控模块, 将传感器连接在 CR10 上, 然后接入通讯网络, 可以实现高度自动化的远程变形监测, 达到不间断测量、远程采集数据、远程控制的目的, 解决了在地铁运营期间人不能进入轨行区无法开展监测工作不能满足施工需要的矛盾。此外, 多组 CR10 及传感器组成的分项监测还可以通过 MD9 进行连接, 组建一个监测网络, 用网络

实现实时但互不干扰的数据采集和处理, 以节约资源和提高工作效率。一个完整的自动化动态监测系统是指在无需操作人员干预的条件下, 实现自动观测、记录、处理、存储、报表编制等功能, 整个系统配置包括: TCA 自动化全站仪、棱镜、通讯电缆、供电电缆、计算机、专用软件。

首先在地铁一号线隧道内安装了 4 台全站仪, 每台全站仪监测一个隧洞 80 m 范围内的沉降变形情况。除基准点外的其余监测点均位于变形影响区域范围内。现场组建了通讯网络, 通过网络实现在地面控制中心对地铁隧道内进行远程实时监控。监测系统组成如图 3 所示。

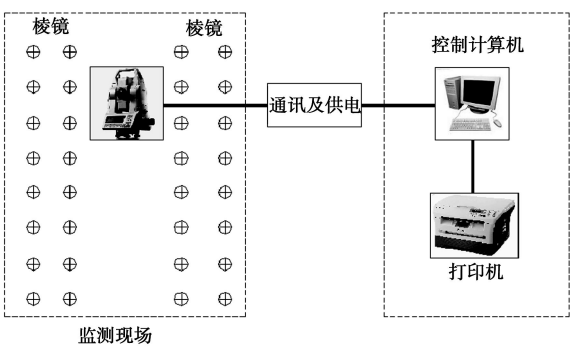


图 3 监测系统组成图
Fig. 3 Diagram of monitoring system

3 监测效果及分析

3.1 道床沉降监测数据及曲线图

通过最终的监测数据可知: 当地铁二号线右线穿越后, 最大累计沉降稳定在点 R3-2, 变形量为-4.2 mm; 当地铁二号线左线穿越完成后, 左右线重叠影响最大累计沉降为点 L10-3, 变形量为-13.8 mm; 均在变形控制指标范围内^[3] (地铁结构设施绝对沉降量 ≤20 mm); 其中主要监测断面的沉降历时曲线见图 4~7。

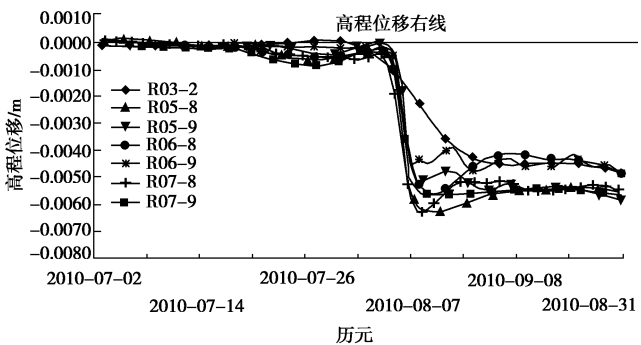


图 4 地铁二号线右线穿越一号线右线道床沉降变化趋势图
Fig. 4 Height displacement curves when right line of Line 2 traverses right line of Line 1

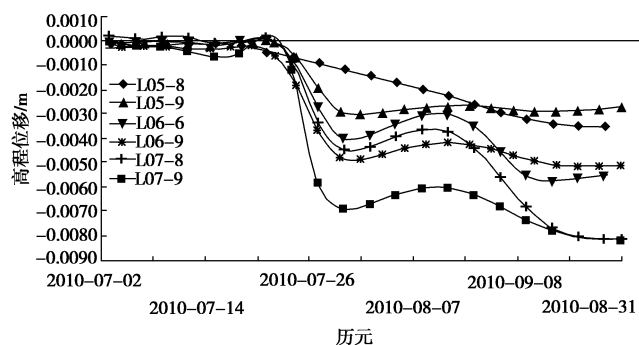


图5 地铁二号线右线穿越一号线左线道床沉降变化趋势图

Fig. 5 Height displacement curves when right line of Line 2 traverses left line of Line 1

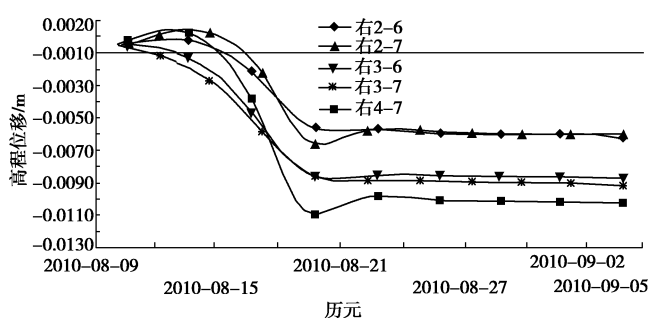


图6 地铁二号线左线穿越一号线右线道床沉降变化趋势图

Fig. 6 Height displacement curves when left line of Line 2 traverses right line of Line 1

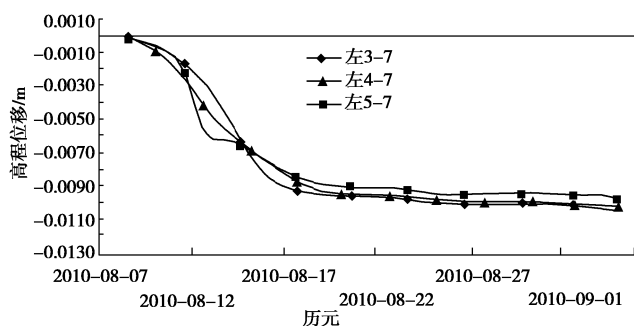


图7 地铁二号线左线穿越一号线左线时高程位移变化趋势图

Fig. 7 Height displacement curves when left line of Line 2 traverses left line of Line 1

3.2 实测数据分析与安全性判断

在考虑施工进度和监测点沉降量统计分析的基础上,分阶段采用线性回归或非线性回归的方式来推算时域外的变形值^[4]。

沉降观测数据是地铁安全施工的重要依据。根据设计及业单位要求,当地铁隧道结构沉降量接近预警值 10 mm 或沉降速率大于 2 mm/d 时,及时向业主及相关部门汇报情况,并会同施工单位共同分析原因,以便采取处理措施。

第一阶段(7.2 到 7.22),累计沉降量在±1 mm 左右波动,说明测点未曾受到施工影响,土体处于天

然的稳定状态,此时的沉降曲线虽有微小起伏,但变化不大,从测量平差报告中可知,单次测量误差服从高斯分布,在零附近区域出现的机率最大。

第二阶段(7.23 到 8.20),此过程累计沉降速率较快,主要由于地铁二号线盾构施工进入到地铁一号线的危险区域,不断调整盾构机掘进参数如转速、扭矩、土仓压力、注浆量与注浆压力等对地铁一号线的沉降变化均有直接影响。当盾构机身完全脱离地铁一号线下方且二次注浆施工完成后,监测数据逐渐趋于稳定。从工程力学的经验中我们知道,土体在施工引起的沉降量基本上可用对数函数曲线来拟合。

第三阶段(8.21 到 9.5)。累计沉降量重新表现为在某个值附近平缓波动,这说明土体重新处在稳定状态,此时的工程结构是趋于安全的。

从监测的角度来说,确定沉降量曲线图的拐点较为关键,第一阶段和第三阶段为平稳随机过程,故本文用时间序列中^[5]的自回归模型 $AR(t)$ 来进行预测。

3.3 拟合函数模型的建立与分析

确定结构变形和变形原因之间的关系有两种基本方法:统计分析法(回归分析)和确定函数(模型)法。目前用得比较广泛的方法是回归分析法。回归分析有线性与非线性之分^[6]:①线性趋势;②多项式趋势;③指数趋势;④对数趋势。趋势项的预测较简单,可用最小二乘法曲线拟合。

对于地铁监测点的沉降过程基本上可划分为3个阶段:在开挖面通过测点前,测点处于相对稳定的一个过程,此时可用一元线性回归或平稳时间序列的方法来进行预测;开挖面通过测点后的半个月,下沉过程可用一个对数函数曲线来描述;开挖面通过测点半个月后,会处于一种新的稳定状态,仍用一元线性回归或平稳时间序列的方法来进行预测。可见,沉降观测值曲线上的拐点一般至少有两个,如果用一个多项式进行拟合,势必多项式的阶次要很高,而高阶多项式一般不适宜用来做长期预测预报,故本文采用分段曲线拟合的方法来进行沉降预测。

一般而言,一个观测序列可以分解为3部分:观测序列=趋势项+周期项+观测误差。一个连续观测序列就代表一个动态过程。趋势项反映了下沉变化趋势,周期项一般理解为测点受温度或其它因素影响产生的变形量, V 是观测过程中系统误差和偶然误差之和。在实际工程应用中,沉降量一般可看成是趋势项和随机误差两部分之和。周期项一般很小,可认为等于零。随机误差即测量误差,理论上应是均值为零的平稳随机序列,即白噪声^[4]。

如图8,使用对数拟合函数来进行第二阶段典型监测点 L10-3、L8-7 的沉降量分析预测,拐点选在 7

月 22 日, 选择的对数函数为 $y=-4.096\ln(x)-2.7194$, $R^2=0.9959$, 同时使用线性回归的方法进行对比。从图 9 的对比中发现, 线性函数、多项式函数与指数函数的曲线明显不如对数函数拟合效果好, R^2 分别为 0.95409, 0.9767, 0.98523, 说明在本次项目中的沉降趋势预测使用对数函数拟合更为贴切。

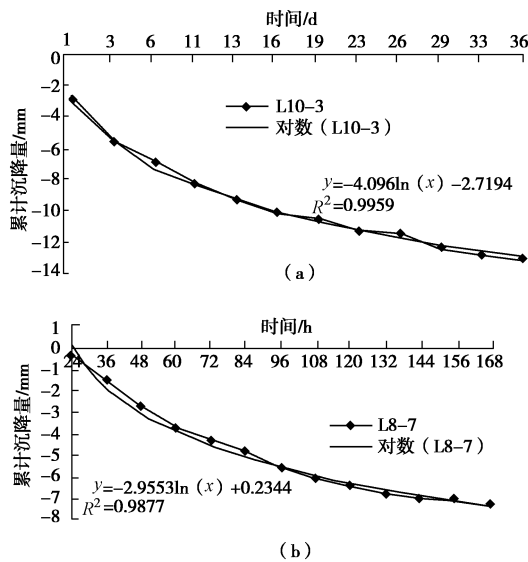


图 8 对数函数预测累计沉降量曲线图

Fig. 8 Accumulated settlement curves predicted by logarithmic function

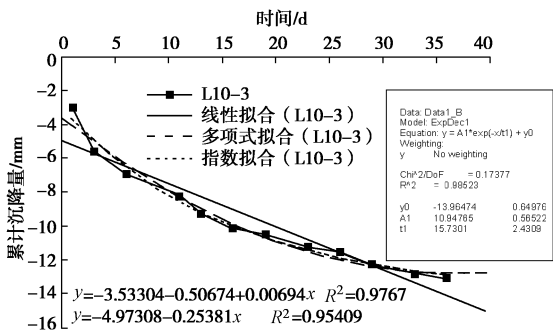


图 9 其他函数预测累计沉降量曲线图

Fig. 9 Accumulated settlement curves predicted by other functions

从以上分析中我们可以看出, 用对数曲线函数来拟合地铁的结构沉降变化过程, 效果很明显。但是函数模型的方法不可能取代监测方法, 因为函数模型来自较理想的物理状态, 实际工作中造成土体下沉还有很多其它因素, 如地质情况、施工方法、结构受力情况等; 因此实际的监测工作仍然是保障工程结构安全的主要手段。

3.4 地铁隧道结构变形影响分析

地铁二号线东延线下穿既有线路, 对一号线地铁隧道结构产生一定影响, 主要有以下几种情况^[7]: ①可能引起隧道结构横截面产生水平或竖向位移; ②可

能引起隧道不均匀纵向变形; ③可能导致隧道结构局部发生横向或竖向变形。

如果隧道变形达到一定的量值以后, 对于不同工法的隧道结构产生不同的影响: 对于暗挖法施工的隧道结构会产生沿隧道结构纵向或横向的裂缝; 对于盾构法隧道, 其纵缝接头和环缝接头将增大张开量, 隧道结构的防水性能和耐久性随之降低。通过自动化实时监测发现, 盾构法施工引起周围地层变形的主要原因是施工引起的地层损失和盾构隧道周围受扰动或受剪切破坏的重塑土的再固结。加强对影响盾构隧道施工的主要因素进行定量分析, 总结出地表变形或结构沉降与盾构开挖过程中各种因素之间的关系^[8], 在施工过程中减少对土工环境的损伤和破坏、确保施工安全等方面具有重要的现实意义。

4 结 论

本文从地铁监测工作的重要性出发, 自动化实时监测了地铁二号线燕大区间盾构下穿地铁一号线大科区间时隧道结构沉降变化的过程, 并对监测数据进行了一些研究工作, 得到了一些有价值的结论:

(1) 由于地铁工程的复杂性, 无法在地铁设计时完全将地铁施工时所遇到的所有问题都考虑在内。因此, 进行地铁的动态监测, 实施信息化施工, 不断优化设计, 改进施工工艺, 有效防止或减少各类事故的发生, 是整个工程顺利推进强有力的保障。

(2) 整个下穿区域基本为典型的上软下硬花岗岩地层, 当地铁二号线右线穿越完成后, 最大累计沉降稳定在点 R3-2, 变形量为-4.2 mm; 当地铁二号线左线穿越完成后, 左右线重叠影响最大累计沉降为点 L10-3, 变形量为-13.8 mm, 变形值均小于控制指标 20 mm。

(3) 本文总结了沉降监测数据的变化规律, 提出了将监测点的沉降过程划分为 3 个阶段, 对沉降量最大的第二阶段提出使用对数函数模型 $y=-4.096\ln(x)-2.7194$ 来进行拟合, 得到了非常好的效果, 从而得到更接近真实值的数据, 更好地反映地铁的动态变化规律, 及时为下一阶段地铁施工提供指导信息。

(4) 盾构法施工引起结构变形的主要原因是施工引起的地层损失和盾构隧道周围受扰动或受剪切破坏的重塑土的再固结。加强对盾构隧道施工的主要影响因素进行定量分析, 总结出结构沉降变形与盾构开挖过程中各种因素之间的关系, 在施工过程中减少对土工环境的损伤和破坏、确保施工安全等方面具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 张成平, 张订立, 吴介普, 等. 暗挖地铁车站下穿既有地铁隧道施工控制[J]. 中国铁道科学, 2009, **30**(1): 69 - 72. (ZHANG CP, ZHANG DL, WU J P, et al. Construction Control of a Newly-built subway station undercrossing the existing subway tunnel[J]. China Railway Science, 2009, **30**(1): 69 - 72. (in Chinese))
- [2] 王 勇. 浅谈富水软弱地层地铁隧道施工沉降控制技术[J]. 科技资讯, 2010(5): 77 - 82. (WANG Y. On the settlement control of subway tunnel construction in water-rich soft ground[J]. Science & Technology Information, 2010(5): 77 - 82. (in Chinese))
- [3] 上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定[S]. 上海市市政工程管理局, 1994. (The interim provisions of metro technology management of the subway protection during construction along the subway in Shanghai[S]. Shanghai Municipal Engineering Administration Bureau, 1994. (in Chinese))
- [4] 邹积亭. 地铁沉降监测数据处理与小波去噪分析[D]. 北京建筑工程学院, 2006. (ZOU J T. The processing of settlement observation data and the wavelet de-noising analysis[D]. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2006. (in Chinese))
- [5] PERCIVAL B. Donald, WALDEN T. Andrew. 时间序列分析的小波方法[M]. 程正兴, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005. (PERCIVAL B. Donald, WALDEN T. Andrew. Wavelet method for temporal sequence analysis[M]. CHENG Zheng-xing, translator. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese))
- [6] 崔晓东. 建筑物沉降规律的综合时序分析[J]. 现代测绘, 2004, **27**(1). (CUI XD. Comprehensive time series analyzing for building settlement rule[J]. Modern Surveying and Mapping, 2004, **27**(1). (in Chinese))
- [7] 韦 凯. 软土地层中盾构施工对既有地铁沉降的影响分析[J]. 华东交通大学学报, 2007, **24**(2): 58 - 61. (WEI K. Analysis of the underground pipeline deformation control factors with shield tunnel excavation beneath it in soft soil[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2007, **24**(2): 58 - 61. (in Chinese))
- [8] 刘 波, 陶龙光, 丁城刚, 等. 地铁双隧道施工诱发地表沉降预测研究与应用[J]. 中国矿业大学学报, 2006, **35**(3): 356 - 361. (LIU B, TAO L G, DING C G, et al. Prediction for ground subsidence induced by subway double tube tunneling[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, **35**(3): 356 - 361. (in Chinese))
- [9] 陈学军, 邹宝平, 邝光霖, 等. 盾构隧道下穿深圳滨海大道沉降控制技术[J]. 铁道标准设计, 2010(3): 92 - 95. (CHEN X J, ZOU B P, KUANG G L, et al. Control technology for settlement of shielding tunnel undergoing through binhai road in Shenzhen[J]. Railway Standard Design, 2010(3): 92 - 95. (in Chinese))
- [10] 梁 禹. 广州地铁一号线越江隧道运营期结构变形监测[J]. 现代隧道技术, 2008, **45**(3): 84 - 87. (LIANG Y. Structural Deformation Monitoring of the Submerged Tunnel on Guangzhou Metro Line 1 during Operation[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, **45**(3): 84 - 87. (in Chinese))
- [11] 谢伟文, 方门福. 深圳地铁第三方变形监测的技术方法[J]. 城市勘测, 2007(3): 98 - 102. (XIE W W, FANG M F. Technical methods of deformation monitoring in Shengzhen metro[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2007(3): 98 - 102. (in Chinese))

(本文责编 李运辉)