

基坑群开挖对邻近既有地铁隧道影响的自动化监测研究

曹 权^{1, 2}, 李清明², 项 伟¹, 贾海梁¹

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 深圳市市政设计研究院有限公司, 广东 深圳 518029)

摘 要: 城市中基坑群的开挖必然改变周围土体的应力状态, 从而造成临近既有地铁隧道的变形和位移, 最终对地铁正常运营产生严重影响。鉴于这种影响的复杂性, 采用自动化技术实时监测地铁隧道的变形就显得非常重要。利用三维数值法模拟基坑群开挖对临近既有地铁隧道的影响, 定性的分析其变形规律; 在此基础上, 对自动化监测系统在地铁隧道监测方面的系统构成、监测原则、监测范围、测点布置、监测精度和监测效果等方面进行介绍。三维数值分析和自动化监测的结合为合理制定基坑群开挖对临近既有地铁隧道的保护措施提供了可靠的依据。

关键词: 基坑群开挖; 地铁隧道; 变形; 三维数值分析; 自动化监测

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0552-05

作者简介: 曹 权(1970-), 男, 安徽安庆人, 博士, 在站博士后, 高级工程师, 国家注册土木工程师(岩土), 主要从事岩土的原位测试研究。E-mail: caoquanrang@126.com。

Automatic monitoring of effects of excavation of group foundation pits on existing adjacent metro tunnels

CAO Quan^{1, 2}, LI Qin-ming², XIANG Wei¹, JIA Hai-liang¹

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Shenzhen Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518029, China)

Abstract: The excavation of group foundation pits will change the stress state of the surrounding soil and result in deformation and displacement of the existing adjacent metro tunnels. The excessive settlements may induce the crack of tunnel segments and eventually may affect the safety operation of metro trains. Since the influence is complicated, automatic monitoring is important for safe operation of metro tunnels. The effects on the existing adjacent metro tunnels during excavation are simulated through three-dimensional numerical analysis, and the displacement of the tunnels is qualitatively analyzed. Based on these analyses, an automatic monitoring system including composition, surveying rules, surveying area, instrumentation location, surveying precision and surveying effect on monitoring deformation of the existing adjacent metro tunnels is introduced. Combining the three-dimensional numerical analysis with the automatic monitoring may provide certain basis for rational use of protective measures for metro tunnels influenced by adjacent excavation.

Key words: excavation of group foundation pits; metro tunnel; deformation; three-dimensional numerical analysis; automatic monitoring

0 引 言

城市轨道交通的发展必将带动沿线商业、住宅建筑等开发, 这些建筑或在隧道上方, 或在隧道两侧, 基坑开挖、土体卸荷将引起周围地层移动, 导致隧道位移场和应力场的变化, 严重威胁地铁安全, 而相邻多个深大基坑相继或同步开挖对周边环境产生的影响比单个基坑开挖更加复杂, 基坑之间存在明显的相互作用, 即所谓的“群坑耦合效应”。

目前国内基坑开挖对既有地铁隧道的影响研究主要集中在单个基坑, 对基坑群开挖的影响研究很少, 采用的研究方法主要有以下几种:

(1) 经验公式法: 该方法使用方便, 但普适性不大, 一般很少使用。

(2) 模型试验法^[1]: 该方法较为接近现实, 但实验费用昂贵, 前期准备和后期分析工作量大, 所得信息有限。

(3) 数值分析法: 包括二维^[2-3]和三维分析法^[4-8]。三维数值分析与二维数值分析相比, 能反映支护结构的空

基金项目: 中国博士后科学基金(2012M511706); 广东省交通运输厅科研项目(2012-02-059)

收稿日期: 2012-08-25

实际工况,为工程设计、监测和施工提供建议和参考。

(4) 现场监测法:包括常规监测法^[10-11]和自动化监测法^[12]。地铁运营时间一般为早上 6:00 至晚上 11:00,由于在运营期间测量人员无法下隧道测量,只能在夜间停运后测量。而白天是基坑施工的主要时间,也是监测的关键时间,常规的监测方法无法满足地铁隧道监测周期短、时效性强等的要求,而自动化监测具有高精度、自动化的优点,并能及时提供可靠的动态监测数据,有效的保证了地铁运营安全。

由于土性参数在空间分布、时间效应上的不确定性,以及基坑工程边界和周边环境的复杂性,现有计算方法的准确性尚不能得到较好的保证,因此现场监测就变得非常重要。目前既有的地铁隧道自动化监测控制方案主要针对的是单基坑施工对地铁隧道的影响,对于基坑群影响下既有地铁隧道区域,由于重点监测区域较长,基坑群间的“群坑耦合效应”非常复杂,目前国内尚没有普遍推广的基坑群影响下既有地铁隧道区域监测方案,急需进行深入的研究以指导相关工程的施工和监测。

1 基坑群开挖数值模拟的作用

有限元计算以不受几何形状、边界条件的复杂多样性和材料的不均匀的限制,可以分析应力、应变变化过程,为岩土工程分析提供了有效的计算手段。基于专业软件,建立模拟基坑开挖过程的三维模型,通过三维空间有限元数值模拟计算,可以分析基坑群的不同施工工序、工艺、开挖步骤等对既有隧道结构影响,为隧道自动化监测研究提供建议和参考。

以深圳地铁为例,中国人寿大厦和国信证券大厦两个深基坑分别位于深圳地铁一号线购物公园—香蜜湖区间北侧和三号线购物公园—福田区间西侧,基坑深度 21.3~25.0 m,基坑边与地铁隧道结构净距为 7.4~19.7 m,地铁隧道采用盾构施工,如图 1 所示。

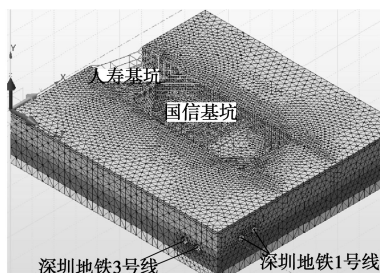


图 1 三维有限元网格划分模型

Fig. 1 3D finite element mesh model

采用三维数值模拟可以计算出不同工况下邻近基坑开挖引起的隧道结构水平和竖直位移云图,如图 2、

图 3 所示。由数值计算可知,基坑开挖过程中对地铁影响较大的主要是水平位移,开挖过程中,基坑东侧地铁三号线隧道结构的最大水平位移为 4.6 mm;基坑南侧地铁一号线隧道结构的最大水平位移约为 4.4 mm;基坑的竖向位移成东小、西大的变化趋势,基坑的最大竖向位移位于基坑西北角,临近人寿基坑,约为 4.0 mm。受到人寿基坑开挖施工的影响,在国信基坑开挖到底之前地铁一号线隧道结构最大水平位移位置位于人寿基坑区间;当国信基坑开挖到底时,地铁一号线隧道最大水平位移位于国信基坑区间。通过上述三维分析可以得出不同施工步下的影响范围和变形量,从而为监测范围、监测时段以及监测频率的制定提供参考。

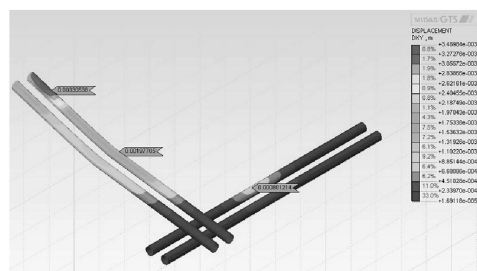


图 2 邻近基坑开挖引起的隧道结构水平位移云图

Fig. 2 Contour of horizontal displacement of tunnels induced by adjacent deep excavation

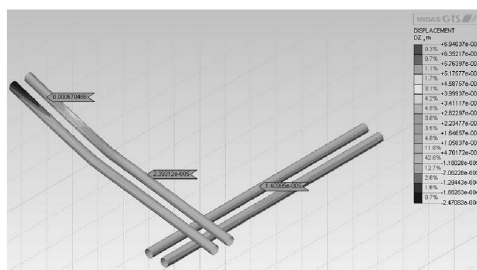


图 3 邻近基坑开挖引起的隧道结构竖向位移云图

Fig. 3 Contour of vertical displacement of tunnels induced by adjacent deep excavation

2 自动化监测方案

虽然三维有限元模型能比较全面地分析整个基坑的应力、应变状态,但受目前计算机计算能力和数值计算模型的限制,三维有限元模型往往只能采用较粗的网格,不可能考虑到设计、施工方方面面,难以对基坑开挖过程进行更精细的模拟,因此加强现场监测就变得非常重要。传统的人工观测方法由于其观测时间长,观测时段和频率受限制,测量结束后出监测报告周期长等局限,而无法满足日益增长快速施工和不断提高运营维护效率的要求,随着现代光电测量技

术、网络通讯技术、自动化控制技术、现代数据库技术的发展,全自动监测系统无论从软、硬件上,还是从系统集成、维护和管理等服务上,都已成为解决现代化地铁建设和运营期间变形监测需求的成熟方案。

2.1 自动监测系统的构成

自动监测系统的组成主要包括两个部分:一是反映变形位移特征的监测点、线和面,由监测点、监测断面、基准点和隧道监测段等组成;二是监测软、硬件,由自动全站仪、软件和信息解调传输装置等构成。具体构成如图 4 所示。

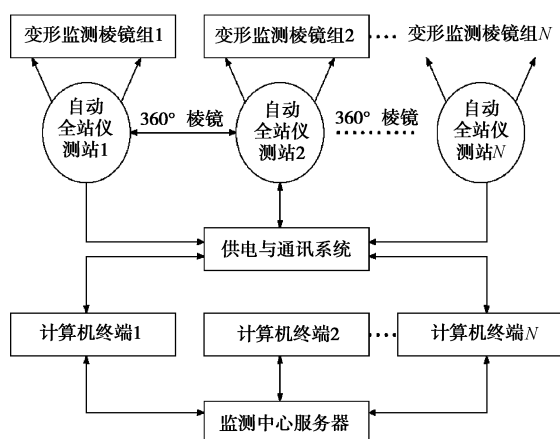


图 4 地铁自动监测系统配置和工作图

Fig. 4 Sketch of automatic monitoring system for metro tunnels

自动全站仪又称测量机器人,是一种代替人进行自动搜索、跟踪、识别和精确照准目标并获取角度、距离、三维坐标以及影像等信息的智能型仪器。自动全站仪通过发射红外光束,并利用自照准原理和 LCD 图像处理功能,无论在白天还是黑夜,都能实现目标的自动识别、照准与跟踪,保证了监测工程能够 24 h 连续运行。

全自动化三维监测系统具有高精度、高效率的优点,并成功的应用在北京、上海、广州和深圳等城市的地铁监测中,并积累了丰富的监测经验。

2.2 自动监测遵循的原则

(1) 注重地铁隧道结构安全监测。根据三维数值分析结果,对受施工影响范围内的隧道段,科学地选取能反映结构局部或整体变形以及结构形式变化的部位设置监测点,有针对性的解决诸如车挡目标、大气湍流、地基振动、多目标干扰等问题。

(2) 确保监测系统的协调一致。除监测设备外,必须配备系统维护、数据分析人员,保证系统正常运作和监测信息的及时反馈。

(3) 监测精度必须控制到位。为保证监测精度,除注意监测图形强度外,基准点尽可能有 3 个点以上的冗余。每一个监测点每次测量不少于 2 个测回。原

则上按每天至少 3 次设置监测频率,可根据隧道受影响的程度增加或减少测量频度,根据需要随时增加监测点,并及时分析整理监测资料。

(4) 及时提出可行性措施保障地铁安全运行。当地铁隧道结构突然发生较大量变形和不均匀(差异)变形时,增加监测频度,采取针对性措施,信息化指导非地铁施工,防止隧道变形损坏。

2.3 监测范围

隧道被监测范围的选取是与基坑开挖对隧道的影响紧密相关。由于基坑群开挖对既有隧道的影响非常复杂,目前的相关研究尚不深入,在确定监测范围时,除参考传统经验外,尚应结合三维数值计算结果,综合确定既有隧道的被监测范围。

2.4 监测断面、监测点和基准点的选取和布置

地铁隧道结构变形监测中,监测断面、监测点和基准点的选取非常重要。通过选取反映隧道结构局部或整体变形以及处于重要结构部位的位置设置监测点,由点构成监测断面,再由这些点与面的变化情况来反映隧道结构变形的实际状况。

(1) 监测断面布置

监测断面尽可能在测量范围内的隧道段中均匀分布,这样,就能较充分地沿隧道方向找出变形变化规律,能使断面之间在水平方向的变化反映出隧道局部和整体的变形情况,特别是差异沉降对地铁运行影响尤为重要,图 5 为隧道监测断面布置现场,图中闪光点为棱镜。



图 5 隧道监测断面现场布置图

Fig. 5 Plan view of monitoring cross-section of tunnels

(2) 测点布置

测点分为观测点、测站点、基准点。观测点布设应根据隧道的跨度、结构受力、基坑施工影响和隧道内部设备情况来布置。如果隧道监测区域小于 200 m,则设置一个仪器站和一套自动监测系统;如果监测区域大于 200 m,则需要分几个监测段来设置仪器站,每一个监测段在 200 m 区间设置一台仪器。多台仪器联机构成一个自动监测网络系统,可以串行联机监测,

也可并行联机监测。并行联机监测能缩短监测时间，更利于提高测量精度。图 6 是现场测站布设图，图 7 为隧道常规测点布置图。随着开挖基坑与隧道空间位置的变化，基坑施工对既有隧道的影响也就不同，因此要参考隧道结构受力的三维数值分析，确定测点布置，对受力复杂的部位可针对性的加密测点。

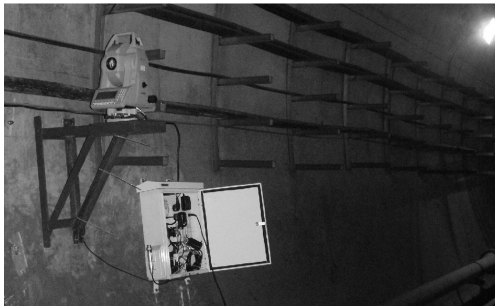


图 6 现场测站布设图
Fig. 6 Plan view of robotic total station in tunnels

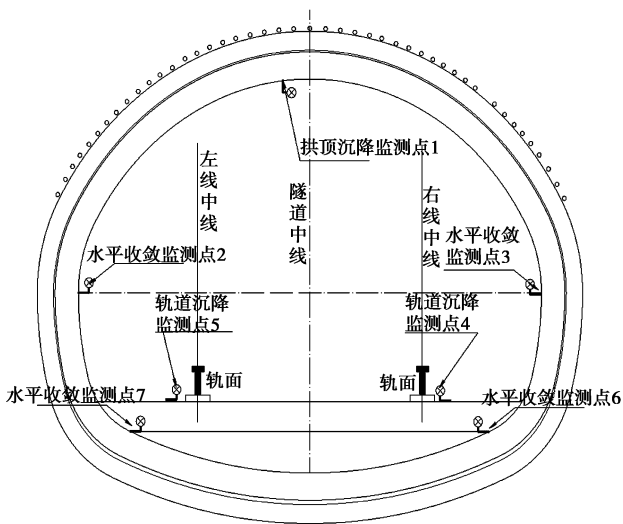


图 7 隧道测点布置图
Fig. 7 Plan view of instrumentation in tunnels

2.5 监测控制标准

已运营地铁对变形的要求相当严格。关于基坑开挖引起运营地铁隧道变形的控制标准及相应保护措施，国内尚无系统编制的相关规程，仅上海市对地铁的变形提出暂行规定：地铁结构设施绝对沉降量及水平位移量 $\leq 20\text{ mm}$ 隧道变形曲线的曲率半径 $R\geq 15000\text{ m}$ ，相对弯曲 $\leq 1/2500$ 。由于各地区地层差异，如上海地铁隧道主要穿越地层为软土，深圳则为花岗岩残积土和风化土，所以类似的工程经验只能仅供参考，而不能照搬照用，各地区应在积累监测数据基础上，制定适合本地区特点的监测控制标准。表 1 是根据深圳地铁集团有限公司“城市轨道交通运营安全保护第三方监测控制指标”，制定的监测控制标准。

表 1 地铁安保监测控制标准
Table 1 Monitoring control standards in protected areas of metro line

监测项目	预警值	报警值	控制值
道床平滑度	2.0 mm/10m	3.2 mm/10m	4.0 mm/10m
左右轨沉降差	2.0 mm	3.2 mm	4.0 mm
结构绝对变形	10 mm	16 mm	5 mm
隧道相对变形	1/5000	1/3125	1/5000

2.6 监测频率的控制

基坑开挖对既有隧道的影响与两者的空间相对位置密切相关，施工部位距离隧道越近，对隧道的影响也就越大。监测的频率应以能系统地反映变形变位的渐变过程且不遗漏其变化时刻为确定原则。为保障地铁安全运行，自动监测系统应按每天至少监测 1 次的频率进行监测，并可根据需要增加监测频率。另外，监测数据应具有连续性，才能及时地测量出隧道结构局部或整体变形的准确位置、大小量值、变形方向和变化速率，并能针对产生变形的成因，在隧道结构内部或外部采取相应的保护措施。

3 结 论

鉴于地铁在国民生产和生活中的重要性，以及地铁事故所可能导致的重大后果，开展基坑群开挖对既有地铁隧道影响的自动化监测研究具有重要的现实意义。本文主要结论如下：

(1)对地铁隧道的沉降变形监测是确保地铁建设和运营安全的重要手段之一，传统的人工观测方法不能适应地铁运营的要求，自动化监测系统已成为地铁隧道运营期间变形监测的成熟解决方案。

(2)临近地铁隧道的基坑群开挖对已运营地铁隧道影响远比单基坑复杂，三维数值分析可为监测方案的设计提供依据。

(3)由于“群坑耦合效应”的复杂性，目前尚不能用理论方法很好的预估这种影响，开展基坑群影响下地铁隧道自动化监测方案的研究，对于复杂条件下基坑群信息化施工、确保隧道的安全运营具有重要的指导意义。

参考文献：

[1] 梁发云, 褚 峰, 宋 著, 等. 紧邻地铁枢纽深基坑变形特性离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(3): 0657 - 0664. (LIANG Fa-yun, CHU Feng, SONG Zhu, et al. Centrifugal model test research on deformation behaviors of deep foundation pit adjacent to metro stations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(3): 0657 - 0664. (in Chinese))

- [2] 王 路. 基坑开挖对邻近既有隧道的影响分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2009. (WANG Lu. Analysis of effects of excavation on existing adjacent tunnels[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [3] 戚科骏, 王旭东, 蒋 刚, 等. 邻近地铁隧道的深基坑开挖分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(增刊 2): 5485 - 5489. (QI Ke-jun, WANG Xu-dong, JIANG Gang, et al. Analysis of deep pit excavation adjacent to tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(S2): 5485 - 5492. (in Chinese))
- [4] 张治国, 张孟喜, 王卫东. 基坑开挖对邻近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学, 2011, **32**(7): 2085 - 2092. (ZHANG Zhi-guo, ZHANG Meng-xi, WANG Wei-dong. Two-stage method for analyzing effects on adjacent metro tunnels due to foundation pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(7): 2085 - 2092. (in Chinese))
- [5] 李 平, 杨 超, 刘汉龙, 等. 基坑开挖中既有下穿隧道隆起变形分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011, **12**(5): 480 - 485. (LI Ping, YANG Chao, LIU Han-long, et al. Heave deformation of existing tunnels under new tunnel excavation[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science), 2011, **12**(5): 480 - 485. (in Chinese))
- [6] 艾鸿涛. 邻近地铁隧道的深基坑开挖分析[D]. 上海: 同济大学, 2008. (AI Hong-tao. Analysis of deep excavation adjacent to subway tunnels[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese))
- [7] 张治国, 张谢东, 王卫东. 邻近基坑施工对地铁隧道影响的数值模拟分析[J]. 武汉理工大学学报, 2007, **29**(11): 93 - 97. (ZHANG Zhi-guo, ZHANG Xie-dong, WANG Wei-dong. Numerical modeling analysis on deformation effects of metro tunnels due to adjacent excavation of foundation pit[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, **29**(11): 93 - 97. (in Chinese))
- [8] 王卫东, 朱合华, 李耀良. 城市岩土工程与新技术[J]. 地下空间与工程学报, 2011, **7**(增刊 1): 1274 - 1291. (WANG Wei-dong, ZHU He-hua, LI Yao-liang. Geotechnical engineering and new technology[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, **7**(S1): 1274 - 1291. (in Chinese))
- [9] 高 盟, 高广运, 冯世进, 等. 基坑开挖引起紧贴运营地铁车站的变形控制研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(6): 818 - 823. (GAO Meng, GAO Guang-yuan, FENG Shi-jin, et al. Control of deformation of operating subway station induced by adjacent deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(6): 818 - 823. (in Chinese))
- [10] 丁勇春, 戴 斌, 王建华, 等. 某邻近地铁隧道深基坑施工监测分析[J]. 北京工业大学学报, 2008, **34**(5): 492 - 497. (DING Yong-chun, DAI Bin, WANG Jian-hua, et al. Field observation of a deep excavation adjacent to subway tunnels [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, **34**(5): 492 - 497. (in Chinese))
- [11] 郑 刚, 刘庆晨, 邓 旭, 等. 基坑开挖对下卧运营地铁既有箱体影响的实测及分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(4): 1109 - 1118. (ZHENG Gang, LIU Qing-chen, DENG Xu, et al. Field measurement and analysis of effect of excavation on existing tunnel boxes of underlying metro tunnel in operating[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(4): 1109 - 1118. (in Chinese))
- [12] 郑立常, 卫建东, 郑俊锋, 等. 基坑施工对邻近运营地铁隧道影响监测的实践[J]. 测绘工程, 2007, **16**(2): 47 - 50. (ZHENG Li-chang, WEI Jian-dong, ZHENG Jun-feng, et al. The practice of deformation monitoring of metro tunnel influenced by the construction of adjacent foundation pit[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2007, **16**(2): 47 - 50. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)