

DOI: 10.11779/CJGE2014S2066

基坑开挖对既有地铁隧道变位影响及技术措施分析

黄兆纬, 黄 信, 胡雪瀛, 齐 麟

(天津市建筑设计院, 天津 300072)

摘 要: 地铁上盖基坑开挖会对既有地铁隧道结构变位产生影响。基于土-结构相互作用模型, 建立基坑开挖对既有地铁隧道影响的三维数值分析模型, 分析了地铁上盖基坑开挖对地铁隧道变位的影响, 并采用土体加固、分块开挖等技术措施对地铁隧道变位进行控制分析。分析表明: 地铁上盖基坑开挖会对既有地铁隧道的变位产生影响, 土体加固、基坑分块开挖等技术措施能够有效控制地铁隧道的变位, 其中土体加固技术的效果最为明显。

关键词: 地铁隧道; 基坑开挖; 土体加固; 分块开挖

中图分类号: TU924

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S2-0381-05

作者简介: 黄兆纬(1961-), 男, 天津市人, 教授级高级工程师, 主要从事工程结构设计与抗震研究。E-mail: hzw@tadi.net.cn。

Influence of foundation pit excavation on displacement of existing metro tunnels and technical measures

HUANG Zhao-wei, HUANG Xin, HU Xue-ying, QI Lin

(Tianjin Architecture Design Institute, Tianjin 300072, China)

Abstract: Foundation pit excavation above metro will influence the displacement of the existing metro tunnel. Based on soil-structure interaction model, a three-dimensional analysis model for metro tunnels is established, which is used to analyze the influence of foundation pit excavation on the displacement of the existing metro tunnel. The displacement of metro tunnels is controlled using technical measures, which include soil reinforcement and block excavation. The results indicate that the displacement of metro tunnels will be changed because of foundation pit excavation. The displacement of metro tunnels can be controlled using soil reinforcement and block excavation, and soil reinforcement effect is the most obvious.

Key words: metro tunnel; foundation pit excavation; soil reinforcement; block excavation

0 引 言

地铁隧道上方高层建筑的建设存在基坑开挖等工序, 使土体产生卸载, 从而导致土体发生变形, 对既有地铁隧道的结构安全产生影响, 当地铁隧道变位较大时有必要采取相应技术措施保证地铁隧道结构安全。许多学者开展了相关研究工作。周宁等^[1]采用数值方法对基坑开挖进行模拟并分析基坑卸载对隧道的影响。刘庭金等^[2]分析了基坑施工对隧道的影响, 分析表明影响隧道受力的最主要因素为隧道外壁侧向土压力释放程度。张明远^[3]进行了基坑开挖对地铁隧道影响的数值模拟, 分析表明相对顺作法施工而言逆作法施工会明显减小基坑围护结构的侧向位移。王彬彬^[4]分析了影响隧道变位的因素, 分析表明隧道盾构位移与其所处地层弹性模量的倒数近似呈线性关系。张强^[5]提出了隧道变形控制标准和控制变形的合理注浆范围。郑刚等^[6]对基坑施工过程进行数值模拟, 并对隧道两侧土体加固等技术措施进行了计算分析。上述

研究表明基坑开挖会对地铁隧道变位产生影响, 所以有必要分析地铁上盖基坑开挖对既有地铁隧道的影响, 同时应采取有效技术措施对地铁隧道变形进行控制。

本文基于土-结构相互作用分析方法, 基于ABAQUS 软件建立了基坑开挖对地铁隧道影响的三维数值分析模型, 分析了地铁上盖基坑开挖对既有地铁隧道的影响, 并分析了土体加固、分块开挖等技术措施对地铁隧道变位的控制效果。

1 数值分析模型

1.1 工程概况

某既有地铁工程的隧道和站体上方已完成结建施工, 现需要在地块上方和下方进行地铁上盖结建施工即基坑开挖, 具体站体、隧道和基坑开挖范围如图 1

基金项目: 天津市建设系统科学技术发展计划项目(2013-10)

收稿日期: 2014-07-28

所示。既有地铁隧道衬砌内径为 5.5 m，外径为 6.2 m，衬砌壁厚为 0.35 m，混凝土采用 C50，两个隧道中心间距为 15 m，隧道顶端距离地面距离为 19.8 m，地铁隧道衬砌顶端距地下室底板顶面高度为 3.8 m，站体平面尺寸为 160 m×25 m，基坑开挖深度约 15 m，地铁隧道位置及尺寸如图 2 所示。为忽略边界效应对动力反应的影响，土体模型尺寸取为 180 m×380 m×70 m。为保证该地铁隧道结构安全，有必要分析基坑开挖对地铁隧道变位的影响并采取有效的技术措施控制隧道的变位。

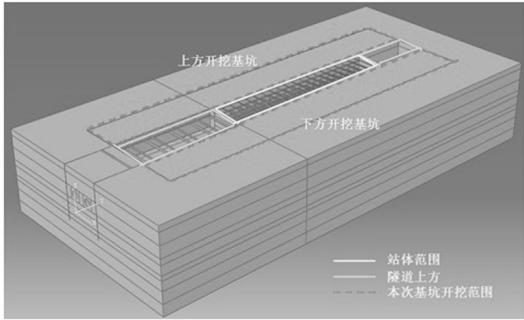


图 1 站体、隧道和基坑开挖范围示意

Fig. 1 Schematic diagram of station, metro tunnel and foundation pit excavation

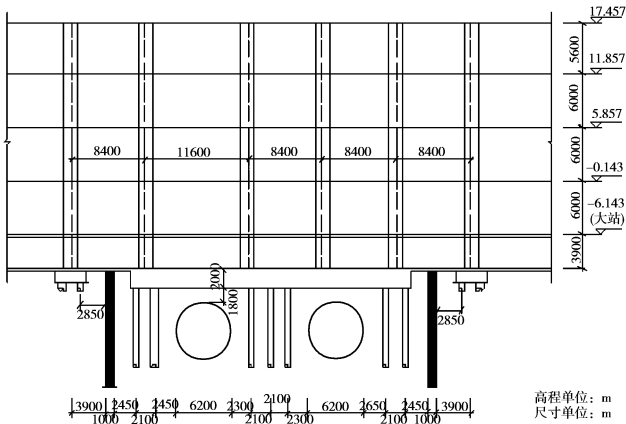


图 2 地铁隧道位置及尺寸

Fig. 2 Position and dimension of metro tunnels

1.2 土体材料参数

土体本构模型采用 D-P 弹塑性模型^[7]，土体本构模型参数如表 1 所列，土体分层模型如图 3 所示。

表 1 土体本构模型参数

Table 1 Parameters of soil constitutive model							
层号	土性	土层厚度/m	密度/(kg·m ⁻³)	摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	侧压系数K ₀	泊松比
1	粉质黏土	5	1870	19.5	20.0	0.55	0.3
2	粉质黏土	10	2450	24.7	21.0	0.55	0.3
3	粉土	15	1665	34.8	48.0	0.4	0.3
4	粉质黏土	8	2040	16.5	20.3	0.45	0.3
5	粉砂	4	1940	18.0	55.0	0.46	0.3
6	粉质黏土	8	1960	19.8	26.0	0.43	0.3
7	黏土	10	2230	21.4	40.0	0.43	0.3
8	粉质黏土	10	2280	20.0	35.0	0.43	0.3

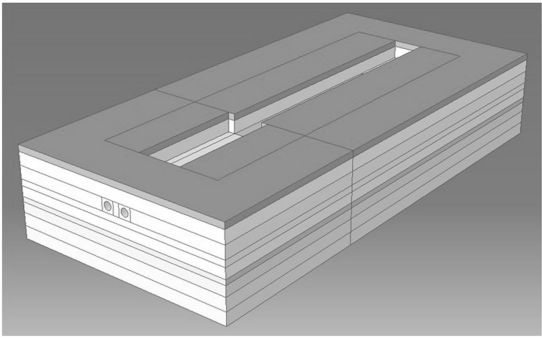


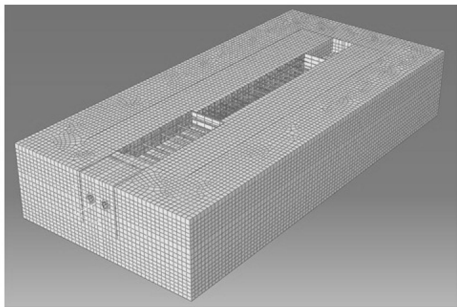
图 3 土体分层模型

Fig. 3 Model for soil layers

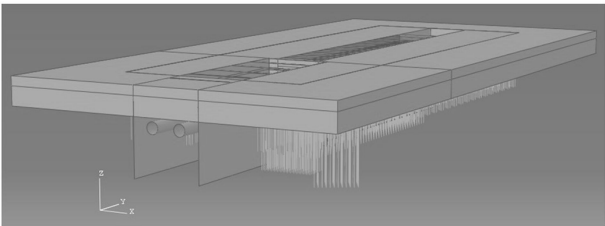
1.3 土-结构相互作用模拟

土体采用实体单元模拟，隧道衬砌和地连墙采用壳单元模拟，桩基采用梁单元模拟，基坑支护桩按刚度等效采用地连墙进行模拟。地铁隧道三维分析有限元模型如图 4 所示。

为准确模拟土体与隧道衬砌、土体与桩基以及土体与地连墙之间的相互作用问题，不同构件与土体间的接触分别采用不同的接触方法进行模拟。土体与隧道之间的相互作用采用 ABAQUS 提供的法向和切向的接触关系模拟，法向接触作用采用硬接触模拟，接触面之间只能传递压应力，当出现拉应力或零应力时两接触面自动分离，并且约束移开。切向约束采用罚函数接触面模拟，并采用小滑移理论处理。考虑分析模型中桩基较多，土体与桩基以及土体与地连墙之间的接触采用 ABAQUS 提供的嵌入技术进行自由度耦合，从而简化土体与桩基和土体与地连墙之间的相互作用，提高计算效率。



(a) 整体有限元模型



(b) 整体模型剖切示意

图 4 地铁隧道三维有限元分析模型

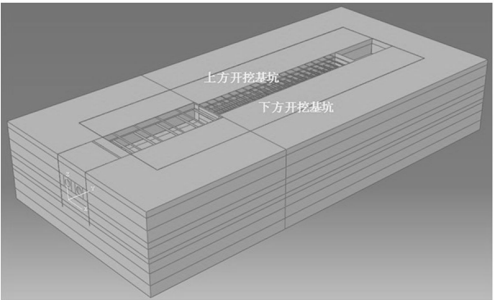
Fig. 4 3-D finite element model for metro tunnels

1.4 施工顺序

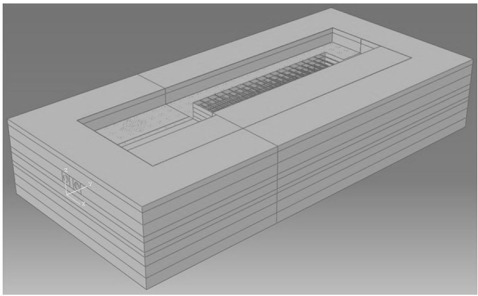
地铁上盖基坑开挖对地铁隧道影响的数值分析, 共采用 8 步进行数值模拟, 基坑开挖通过 ABAQUS 软件的生死单元功能实现, 施工顺序如表 2 所示, 开挖示意如图 5 所示。

表 2 地铁上盖结建施工顺序

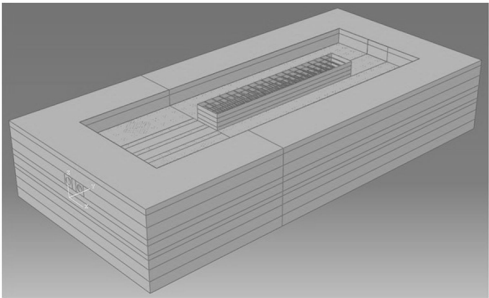
Table 2 Construction sequence of buildings on metro tunnels			
施工顺序	施工部位	施工内容	说明
1	—	—	地应力平衡
2	上方结	地连墙和桩基施工	
3	建地块	基坑开挖	开挖深度 15 m
4	施工	底板浇筑	
5	下方结	地连墙和桩基施工	
6	建地块	基坑开挖	开挖深度 15 m
7	施工	底板浇筑	
8	隧道两侧	控制隧道变位的技术措施分析	技术措施主要包括土体加固、分块开挖和增加桩长



(a) 初始模型



(b) 上方基坑开挖完成



(c) 下方基坑开挖完成

图 5 地铁上盖结建施工顺序

Fig.5 Construction sequence of buildings on metro tunnels

2 基坑开挖对地铁隧道的影响分析

利用 ABAQUS 软件对基坑开挖过程进行模拟, 分析基坑开挖对地铁隧道变位的影响。为分析地铁隧道在基坑开挖作用下的变位, 对地铁隧道上的 4 个观测点的竖向位移和水平向位移进行分析, 观测点位置如图 6 所示, 其中水平向位移为图中的 X 方向。

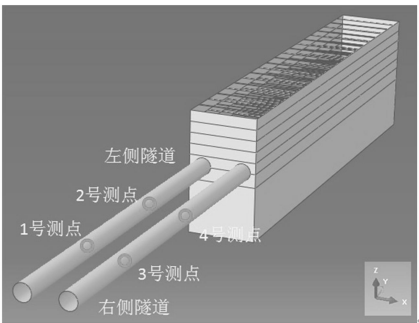


图 6 观测点示意图

Fig. 6 Schematic diagram of observation points

地铁隧道观测点处的位移值如表 3 所列。

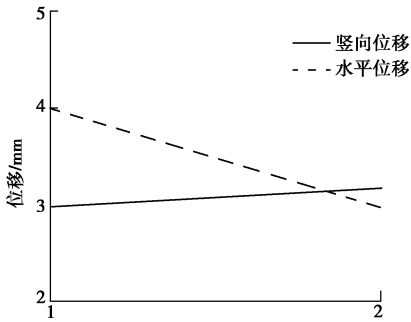
表 3 地铁隧道观测点处的水平和竖向位移

Table 3 Horizontal and vertical displacements of metro tunnels					
观测点位置		(mm)			
		1	2	3	4
上部基坑开挖	竖向位移	12.2	18.5	2.6	3.3
	水平位移	-0.3	-2.1	-0.7	-1.9
下方基坑开挖	竖向位移	3.0	3.2	13.6	18.5
	水平位移	4.0	3.0	4.0	4.0

图 7 给出下方基坑开挖引起的左侧隧道和右侧隧道的位移曲线。

通过表 3 和图 7 可知, 在上方基坑和下方基坑开挖过程中, 地铁隧道 4 个观测点的最大竖向位移为上方基坑开挖与下方基坑开挖引起的位移总和 $18.5+3.3=21.8\text{ mm}$, 最大水平位移为 5.9 mm ; 地铁隧道竖向发生抬升, 水平向发生向基坑开挖一侧的变位。

可以看出, 地铁隧道的竖向变位要比水平变位大, 如下方基坑开挖时右侧隧道的 2 号观测点的竖向位移为 21.7 mm , 而水平位移为 5.1 mm 。



(a) 左侧隧道

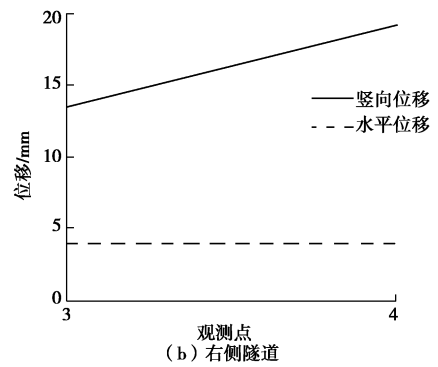


图 7 下方基坑开挖作用下隧道变形曲线

Fig. 7 Deformation curve of tunnels under foundation pit excavation

3 技术措施分析

通过 ABAQUS 建立的三维整体数值模型的计算分析可知，隧道两侧的基坑开挖引起隧道水平变位为 21.8 mm，竖向最大变位为 5.9 mm。当地铁隧道的水平和竖向变位分别按 10 mm 控制时，则上述基坑开挖后造成的地铁隧道水平变位不满足隧道变位限值要求。

为保证站体和隧道的安全，采用隧道和站体两侧增加三轴水泥土搅拌桩对土体加固，将隧道和站体两侧 30m 范围的桩基的桩长由 20 m 增加至 40 m，并对两侧开挖土体进行分块开挖等三项技术措施进行计算。其中，水泥土搅拌桩加固措施主要通过提高土体水泥搅拌桩范围内土体弹性模量进行数值模拟，弹性模量取 500 MPa；基坑分坑后尺寸为 30 m×80 m。

土体加固范围和基坑开挖分块示意分别如图 8，9 中的红色范围所示。

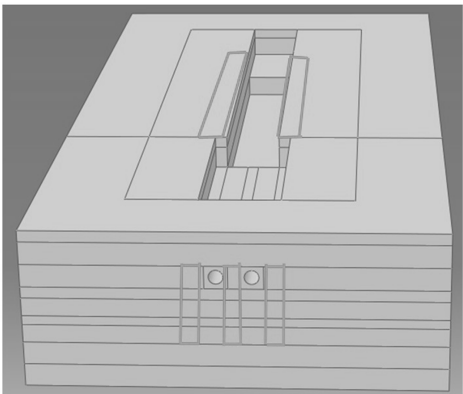


图 8 土体加固区域示意

Fig. 8 Schematic diagram of soil reinforcement range

通过表 4 可知，采用土体加固、基坑土体分块开挖和增加桩长能够有效的减小地铁隧道的变位，从而使地铁隧道变位满足要求。

同时可知，相对基坑分块开挖和增加桩长而言，土体加固技术措施对减小地铁隧道变位的效果最为明显，这主要是由于对土体采取注浆技术措施，能够有效的提高了土体的弹性模量，从而减小土体回弹变形对地铁隧道的影响；而增加桩长对控制隧道变位的效果最小，这主要是工程中通过改变桩长能够协调结构不同部位的变形，而增加桩长在一定程度上能够在土体中起到植筋作用，但其效果并不明显。

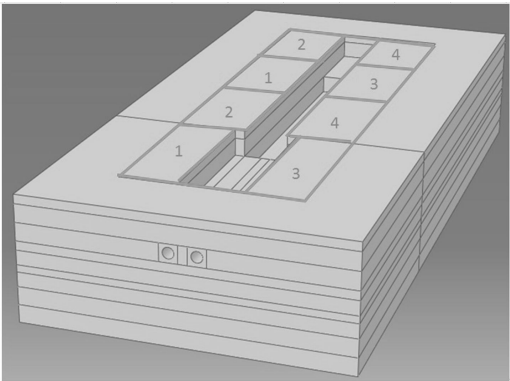


图 9 基坑开挖分块示意

Fig. 9 Schematic diagram of block excavation of foundation pit

采取措施后的整体模型关键部位的最大变位值如表 4 所示。

表 4 隧道和站体采取措施后的最大变位值

Table 4 Displacements of metro tunnels considering technical measures (mm)

工况	隧道		描述
	竖向变形/mm	水平变形/mm	
1	21.8	5.9	未采取措施
2	9.9	4.6	隧道两侧土体 6 m 范围的土体采用三轴水泥土搅拌桩加固，加固深度 40 m，站体两侧 10 m 范围内土体加固
3	6.6	4.1	同时基坑土体采用分块开挖
4	5.6	3.8	同时站体两侧 30 m 范围以及隧道地连墙外侧 30 m 范围桩长由 20 m 增加至 40 m

4 结 论

建立了地铁上盖基坑开挖对既有地铁隧道变位影响的三维数值分析模型，分析了基坑开挖对地铁隧道的影响，并采取技术措施对地铁隧道变位的控制。分析得出如下结论：

(1) 基坑开挖会使地铁隧道产生变位，基坑开挖引起地铁隧道抬升，基坑开挖引起地铁隧道竖向变位要比水平变位大。

(2) 采用土体加固、基坑分块开挖和桩基加长等

技术措施能够有效的控制地铁隧道的变位, 其中土体加固技术效果最为明显。

参考文献:

- [1] 周 宁, 袁 勇, 王 莉, 等. 基坑开挖对下方越江隧道变形影响的评价[J]. 防灾减灾学报, 2012, **32**(5): 565 - 575. (ZHOU Ning, YUAN Yong, WANG Li, et al. Evaluation of influence of foundation pit excavation on underlying cross-river tunnel[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, **32**(5): 565 - 575. (in Chinese))
- [2] 刘庭金. 基坑施工对盾构隧道的影响分析[J]. 铁道建设, 2008(2): 41 - 44. (LIU Ting-jin. Influence analysis of foundation pit construction on shield tunnel[J]. Railway Engineering, 2008(2): 41 - 44. (in Chinese))
- [3] 张明远, 杨小平, 刘庭金. 临近地铁隧道的基坑施工方案对比分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, **7**(6): 1203 - 1208. (ZHANG Ming-yuan, YANG Xiao-ping, LIU Tin-jin. Comparative analysis of construction schemes for foundation pit excavation adjacent to subway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, **7**(6): 1203 - 1208. (in Chinese))
- [4] 汪彬彬. 基坑开挖对下方盾构隧道变形的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2010. (WANG Bin-bin. Underlying shield tunnel deformation effected by pit excavation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [5] 张 强. 开挖卸荷下既有地铁隧道的竖向变形及其控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012. (ZHANG Qiang. Influence and control on vertical deformation of an underlying tunnel due to excavation-induced unloading[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [6] 郑 刚, 刘庆晨, 邓 旭. 基坑开挖对下卧运营地铁隧道影响的数值分析与变形控制研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(5): 1459 - 1468. (ZHENG Gang, LIU Qingchen, 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, 2013, **34**(5): 1459 - 1468. (in Chinese))
- [7] 费 康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (FEI Kang, ZHANG Jian-wei. ABAQUS application on geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)