

DOI: 10.11779/CJGE2014S2075

基坑开挖对既有地铁隧道影响的实测及数值分析

胡海英¹, 张玉成^{2, 3, 4}, 杨光华^{2, 3, 4}, 钟志辉⁵, 陈富强^{2, 3, 4}

(1. 华南农业大学水利与土木工程学院, 广东 广州 510642; 2. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610; 3. 广东省岩土工程技术研究中心, 广东 广州 510610; 4. 广东省突发公共事件应急技术研究中心, 广东 广州 510610; 5. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 近几年随着大城市地下空间的快速开发, 对中心城区地下空间的基坑设计不仅要关注基坑本身的安全问题, 更需要关注基坑工程对周围建(构)筑物的影响问题。因此, 需将基坑工程和环境作为一个整体来考虑设计。在总结地铁工程控制标准与保护技术的基础上, 以广州某临近既有地铁隧道的深基坑开挖为案例, 通过数值模拟和隧道实测手段综合分析了基坑开挖对地铁隧道的影响。实测结果表明, 基坑开挖期间对于隧道不一定是卸荷影响, 有时也会增加隧道围压, 这与基坑开挖深度以及隧道与基坑的位置关系有关, 也与基坑支护结构施工方法有关, 应结合具体力学传递路径来确定是卸荷还是加荷影响。数值计算结果与隧道实测结果比较接近, 说明数值建模的边界条件和参数选择是比较符合实际工况, 本文成果可为类似工程优化设计和施工提供有益的参考和借鉴。

关键词: 基坑开挖; 卸荷; 地铁隧道; 数值仿真; 现场监测

中图分类号: TU473.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)S2-0431-09

作者简介: 胡海英(1976-), 女, 辽宁省营口市人, 高级工程师, 从事岩土工程方面教学和研究工作。E-mail: 282392530@qq.com。

Measurement and numerical analysis of effect of excavation of foundation pits on metro tunnels

HU Hai-ying¹, ZHANG Yu-cheng^{2, 3, 4}, YANG Guang-hua^{2, 3, 4}, ZHONG Zhi-hui⁵, CHEN Fu-qiang^{2, 3, 4}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642; 2. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China; 3. The Geotechnical Engineering Technology Center of Guangdong Province, Guangzhou 510610, China; 4. The Emergency Technology Research Center of Guangdong Province for Public Events Guangzhou 510610, China; 5. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With the rapid development of underground space in large cities in recent years, the design of foundation pits of underground space in urban areas should focus on their safety, especially on their influence on the adjacent buildings. Therefore, it needs to consider the foundation pit and the environment as a whole during design. On the basis of the summary of control standards and protection techniques of metro engineering, taking a deep foundation pit near the metro tunnel in Guangzhou as an example, the effect of its excavation on the metro tunnel is synthetically analyzed through numerical simulation and measurement. The measured results show that excavation does not always have unloading effect on the tunnel, sometimes, it will increase the confining pressure on the tunnel. The influence relates to the depth of excavation and the site of the tunnel as well as the construction method of supporting structure for the foundation pit. Thus, the actual mechanical transmission path should be considered to determine the unloading or loading influence. The numerical results are close to the measured ones, indicating that the boundary conditions and computational parameters of the numerical model are compared with the actual working conditions. The achievements may provide beneficial reference for the optimal design, construction and similar projects.

Key words: excavation of foundation pit; unloading; metro tunnel; numerical simulation; field monitoring

0 引言

随着大城市地下空间开发利用的增多, 使得越来越多的基坑工程在既有地铁隧道附近或上方施工, 基坑工程施工对既有地铁隧道的影响已成为城市建设管

理的焦点问题。基坑施工会引起隧道周围土体的应力

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378131); 广东省水利科技创新基金项目(2009-25); 广东省公路管理局科技基金项目(2012-09)
收稿日期: 2014-07-28

场和变形场发生变化,可能到导致地铁管片结构产生附加应力和位移,如果附加应力超过管片的允许值,基坑工程就会影响地铁正常使用和安全。近几年基坑施工引起附近地铁隧道工程事故越来越多,在北京、广州、上海及深圳等城市均发生过由于基坑施工引起的临近地铁隧道事故,这些事故不仅带来了巨大财产损失和人员伤亡,而且对社会的影响也比较大。因此,基坑开挖施工对附近既有地铁隧道的影响和安全控制措施变得越来越重要,在这种大背景下,如何正确定量评价和预测基坑开挖对地铁隧道的影响成为一个急需解决的问题^[1-3]。

虽然基坑工程及基坑开挖对临近建(构)筑物影响的研究成果也不少,但基坑方面的论文主要针对单个基坑的分析成果较多,且重点在于基坑支护结构选型和强度控制方面,另外基坑开挖对隧道的影响成果更多的是数值模拟分析结果,用实测结果来验证其结果合理性的成果较少。以前基坑工程周围环境相对较简单,设计和施工基坑工程时对周围影响考虑较少,但随着在城市中心繁华地带进行地下空间开发,且人们对环境要求和认识水平的提高,现在的基坑设计不仅仅要考虑基坑自身的安全问题,更要关注分析基坑工程对周围建(构)筑物的影响,需将基坑工程和环境作为一个整体来考虑^[4-6]。

本文以广州某深基坑开挖对隧道的影响为工程实例,施工期间基坑和隧道进行了动态监测,并将监测结果与数值分析结果进行了对比分析,可为临近基坑开挖影响下的既有地铁隧道在安全控制标准与保护措施积累工程经验。

1 地铁工程控制标准与保护技术现状

当前我国城市地铁建设正处于快速发展的高潮期,我国已成为世界上最大的城市地铁建设市场^[7]。由于地铁建设风险高、难度大、安全影响因素多等,近几年地铁安全事故频发^[8],随着地铁工程建设的发展,我国在地铁和轨道交通领域已编制一些相关的安全控制和评价技术标准,如《地铁运营安全评价标准》(GB/T 50438—2007)、《地铁工程施工安全评价标准》(GB 50715—2011)、《城市轨道交通运营安全验收评价细则》(AQ 8005—2007)及《城市轨道交通运营安全评价细则》(AQ 8004—2007)等,这些标准的颁布一定程度上保障了地铁及轨道交通的安全,但目前还没有专门针对地下空间开发对临近地铁影响的评价标准,尤其没有地下空间开发引起在运营地铁隧道变形和附加应力的控制标准,仅上海市1994年颁布《上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定》,其中规定了临近地铁的施工对不同曲率半径地铁隧道的

沉降量及水平位移等指标的限值^[9];隧道变形的曲率半径 R 不小于15000 m、相对弯曲不大于 $1/2500$,地铁结构的绝对水平位移量和沉降量不大于20 mm。

国内外典型工程控制标准,美国波士顿C11A1公路隧道下穿Redline地铁时给出的控制标准见表1^[10];伦敦地铁Jubilee地铁工程下穿已有隧道的变形控制为:Bakeloo地铁结构的沉降要求不大于10 mm,Northern地铁结构的沉降要求不大于15 mm;意大利Bologna公路隧道在既有高铁隧道下穿,工程施工期间制定了严格的控制标准,具体控制指标见表2^[11];北京崇文门站5号线下穿既有2号线地铁结构和轨道变形控制标准见表3^[12];首都机场线东直门站下穿既有13号线东直门站工程中对13号线地铁结构和轨道变形控制标准见表4^[13]。

表1 既有结构变形预警值和最大值

Table 1 Warning and maximum values of deformation for existing structures

项目	预警值/mm	极限值/mm
既有结构弯曲变形	6.0	10.0

表2 既有地铁轨道沉降控制标准

Table 2 Settlement controls standards for existing metro tunnel

项目	下穿附件400 m轨道沉降/mm	轨道差异沉降/ 10^{-3}		
		3 m范围内的	7 m范围内的	10 m范围内的
警戒值	20	2.5	2.0	1.0
报警值	30	5.0	4.0	3.0

表3 既有结构变形预警值和最大值

Table 3 Warning and maximum values of deformation for existing structures

项目	沉降/mm	上拱/mm	平移/mm	每日沉降差/mm	道床开裂/mm
预警值	30	30	4	2	1
最大值	40	40	6	3	1

表4 北京13号线地铁结构及轨道变形控制标准

Table 4 Deformation control standards for existing metro tunnel (No.13 Line) in Beijing

项目	控制值/mm	
	每日	累积
13号线地铁结构沉降		13.5
13号线地铁结构变形缝差异沉降		4.0
13号线地铁结构变形缝开合度监测		2.0
13号线地铁结构水平位移监测		2.0
13号线地铁轨结构纵向变形监测	下沉1.5	下沉13.5
	上浮1.5	上浮1.5
13号线地铁轨左右轨高差变化监测		4.0
13号线地铁轨轨距变化监测		向外+6.0
		向内-2.0

关于地下空间开发对既有地铁的影响,主要关心的问题有:既有地铁结构允许的最大变形值(沉降、差异沉降、倾斜等)和最大变形速率。评估既有地铁

隧道的安全性要先计算隧道结构的内力变化, 通过结构承载力来确定变形允许值, 由于岩土工程和地铁结构本身的复杂性, 不同施工方法和顺序引起地铁结构的内力分布和大小也不同, 因此建议统一的控制标准和规范难度很大, 应该针对不同施工方法和地质条件, 采用分类、分步和分级的原则制定相应的控制标准。

2 工程概况

本工程为广州市中心城区某商住楼及地下走廊人防工程, 工程部拟建 25 层商住楼, 设地下室 5 层, 基坑总面积约 14487 m², 周长 572 m。基坑工程开挖深度为 23.9 m, 基坑支护方案采用地下连续墙+楼板作为支撑支护体系的逆作法, 基坑北侧有营运的地铁 1 号线及地铁风亭结构, 长度范围约 64 m, 基坑支护结构紧贴地铁 A2 风亭的围护结构, 基坑支护外边线与地铁公园前站东侧盾构区间隧道间的最小水平净距为 12.50 m。

基坑与地铁相互关系平面位置见图 1, 基坑支护连续墙与风亭位置关系剖面图见图 2, 基坑支护连续墙与隧道位置关系剖面图见图 3。

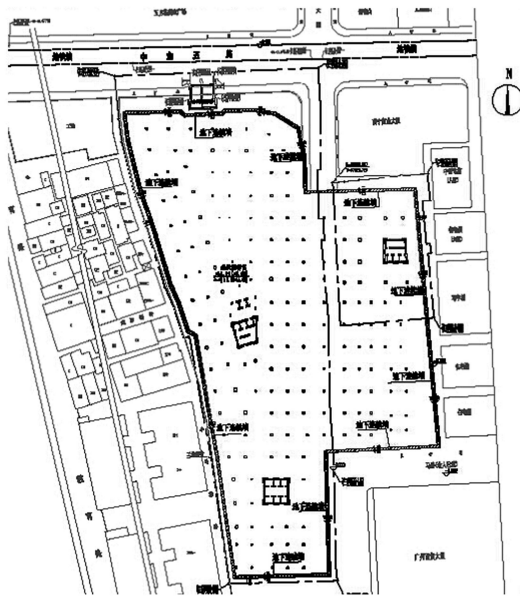


图 1 基坑与地铁隧道平面关系图

Fig. 1 Plane relation between excavation of foundation pit and metro tunnel

2.1 场区地层条件

本场区地层自上而下土层分别为: 第①层杂填土, 现场做标准贯入试验 9 次, $N=2\sim 6$ 击, 层厚为 2.85~6.50 m; 第②层淤泥(淤泥质土), 层厚 1.50~3.45 m; 第③层粉质黏土, 局部为黏土; 第④层细砂, 黄灰色, 中密, 饱和, 颗粒均匀, 层厚 0.40~2.75 m; 第⑤层粉土, 灰黄、浅灰白色, 层厚 0.95~2.50 m; 第⑥层粉土, 褐红色; 第⑦层粉

质黏土, 褐红色, 含少量粉细砂、中粗砂, 为原岩风化残积土, 按其稠度分为两个亚层; 第⑧层细砂岩、粗砂岩, 褐红色, 根据其风化程度可分为 4 个风化带: 第⑧-C 全风化细砂岩层、第⑧-I 强风化细砂岩层、第⑧-M 中等风化层和第⑧-S 微风化层。典型地质剖面图见图 4。

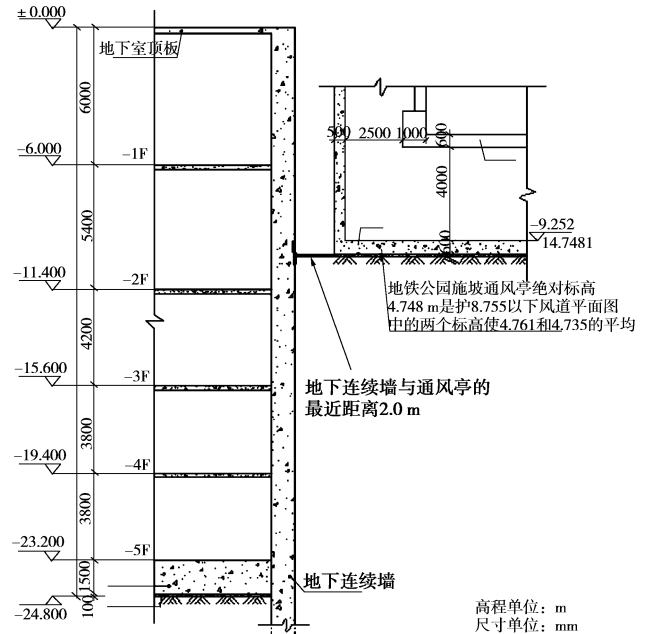


图 2 基坑与地铁风亭结构位置关系

Fig. 2 Position relation between excavation of foundation pit and ventilation

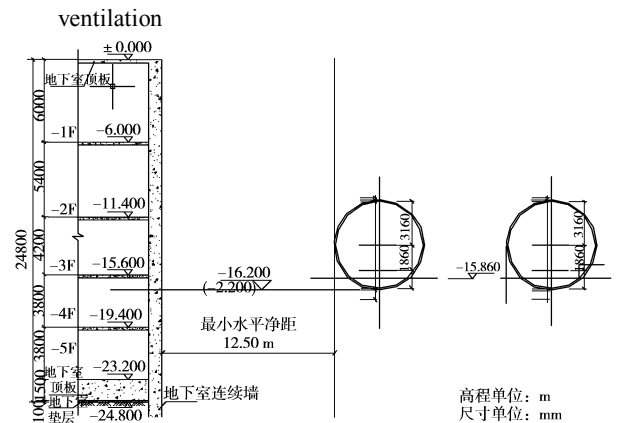


图 3 基坑与地铁隧道结构位置关系

Fig. 3 Position relation between excavation of foundation pit and metro tunnel structures

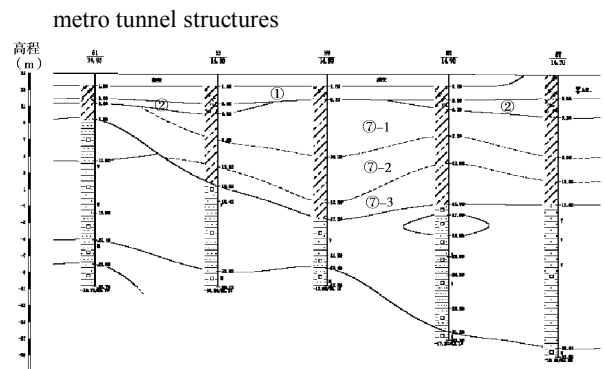


图 4 北侧区域隧道典型地质剖面图

Fig. 4 Typical geological profile of north side of metro tunnel

2.2 建模时岩土体和构件材料强度参数取值

岩土体参数取值见表5, 岩层的力学参数取值见表6。

表5 土体参数取值

Table 5 Values of rock and soil parameters

土层编号	土层名	天然密度 ρ / (g·cm ⁻³)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)	变形模量 E_0 /MPa	泊松比 ν
①	填土	1.86	10.0	15.0	4.0	0.30
⑥-1	粉土	1.88	17	18	15	0.29
⑥-2	粉土	1.93	20	25	18	0.28
⑦-1	粉质黏土	1.87	17	18	14	0.29
⑦-2	粉质黏土	1.94	20	22	30	0.26
⑦-3	粉质黏土	1.96	23	23	35	0.25
⑧-C	全风化	2.06	40	26	60	0.24
⑧-I	强风化	2.16	80	28	500	0.20
⑧-M	中风化	2.36	400	32	1500	0.18
管片	C50					
连续墙	C30					

表6 岩层的力学参数

Table 6 Values of rock parameters

岩层	天然密度 ρ_0 / (g·cm ⁻³)	抗压强度 f_c /MPa	静弹性模量 E /MPa	动弹性模量 E_d /MPa
强风化	2.10	1.8	0.4×10 ³	1.4×10 ³
中风化	2.35	5.7	1.9×10 ³	4.1×10 ³
微风化	2.40	8.6	7.2×10 ³	12.0×10 ³

3 开挖卸荷对地铁隧道的影响原理及卸荷模量的确定

基坑开挖施工对开挖面以下土体有垂直方向卸荷作用, 对侧面土体有水平方向卸荷作用, 卸荷会引起土体的回弹, 且基坑支护结构受土压力作用会向基坑内产生变形, 同时支护结构后土体竖向压力会使得坑底土体向上隆起, 当基坑场地附近或坑底有下穿地铁隧道通过时, 基坑开挖卸荷必然会引起隧道围岩应力场和变形场的改变, 会使得临近隧道产生附加应力和变形。基坑开挖卸荷时, 地层损失会向地铁隧道周围的土体和结构传递, 从而引起地铁隧道顶部土压力的变化, 使得隧道结构的应力和位移发生改变^[14]。

在计算分析中不仅基坑开挖范围对临近地铁隧道的应力场和位移场有影响, 且卸荷模量参数取值大小也有一定影响^[15]。本文计算中采用如下方法确定卸荷模量的大小, 根据邓肯-张 (Duncan and Chang)^[16]非线性弹性模型, 加载时的弹性模量 E_t 由式(1)确定, 即

$$E_t = \left[1 - R_f \frac{1 - \sin \varphi}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} (\sigma_1 - \sigma_3) \right]^2 \cdot k p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n, \quad (1)$$

式中, k 为加荷模量数, p_a 为大气压力, R_f 为破坏比, n 、 k 为试验常数, n 值一般在 0.2~1.0 之间, 不同土

类, k 值可能小于 100, 也可能大于 3500。

对卸荷时的情况, 卸荷模量 E_{ur} 可由式(2)计算, 即

$$E_{ur} = k_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n, \quad (2)$$

式中, k_{ur} 表示卸荷模量数。

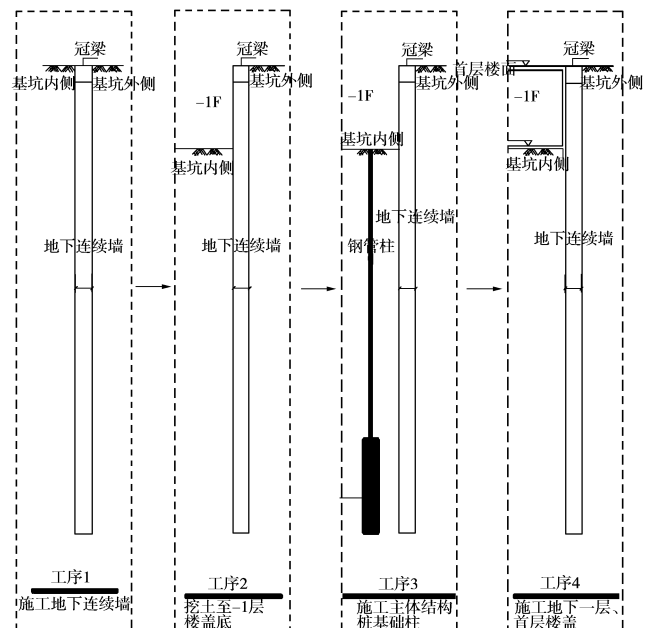
卸荷模量数 k_{ur} 与加荷模量数 k 的比值 N 用式(3)来确定^[15]:

$$N = 0.899 + 535 k^{-1}. \quad (3)$$

文献[7]研究表明, 应力路径对软土的模量影响明显, 对于岩石, 弹性模量和卸荷模量的大小差异很小, 软土卸荷模量与其弹性模量相差较大。本文分析计算时软土的卸荷模量按照土层埋深来定, 卸荷模量取其弹性模量的 1.2~1.6 倍。

4 基坑开挖对隧道影响数值分析的实现

本文利用三维有限元程序 Midas/GTS 进行分析, 模型采用地层-结构法建模, 岩土体及结构材料参数取值见表5和表6, 建模时考虑了以下几个问题: ①基坑的实际尺寸很大, 为了计算收敛, 根据圣维南原理, 远离隧道侧的基坑开挖对隧道没有影响, 因此只对靠近隧道 102 m 以内的基坑区域进行施工模拟, 其他基坑区域作为约束边界考虑; ②采用线-面-体的自底而上的思路来建模; ③模拟基坑开挖前, 先分别进行原始地应力和隧道开挖的模拟, 这两个工况都要位移清零, 然后才进行基坑开挖的施工模拟。每一次土体开挖和楼板施工作为两个工况进行模拟, 一共开挖 3 次、加楼板 5 次, 总共 8 个施工工况, 具体开挖施工顺序见图5。



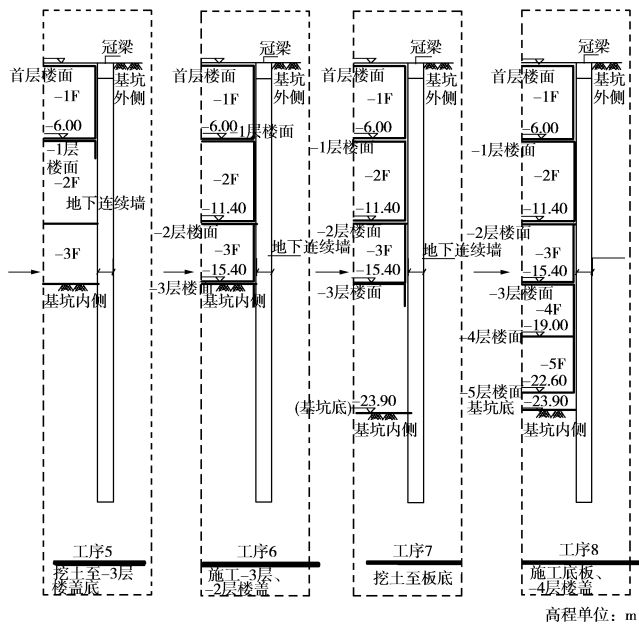


图 5 地下室结构逆作法施工顺序及计算工况图

Fig. 5 Inverse construction sequence of retaining structures for foundation pit

模型下边界往外和往下分别延伸 50 m, 向上取至地表。本次计算采用了实体结构 (solid structure)、厚板壳 (thick shell) 结构单元、梁单位和板单元, 计算模型见图 6~10。

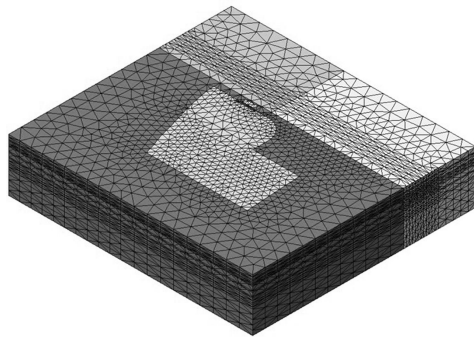


图 6 基坑开挖前的模型
Fig. 6 Model before excavation

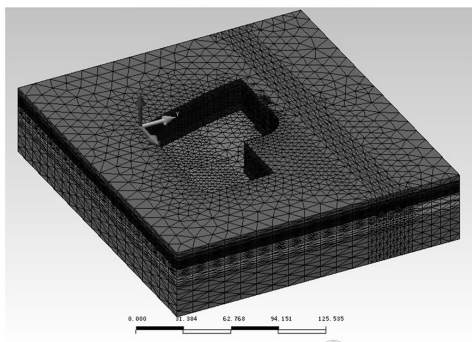


图 7 基坑开挖后的模型
Fig. 7 Model after excavation

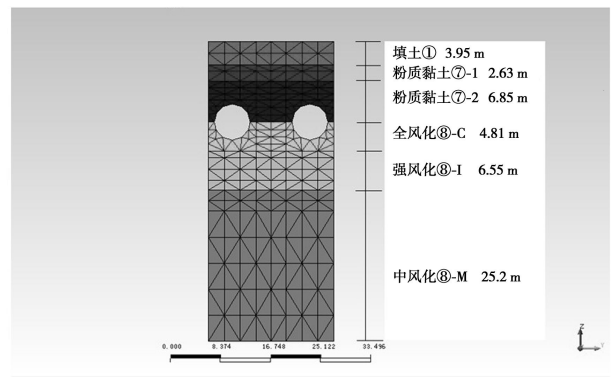


图 8 隧道区域各土层信息
Fig. 8 Soil layers of tunnel region

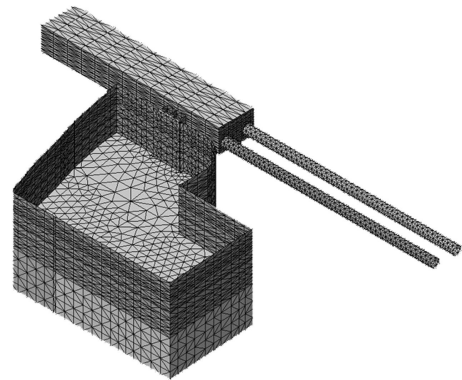


图 9 基坑、隧道及站房三维数值模型
Fig. 9 Three-dimensional numerical model for foundation pit, metro tunnels and station

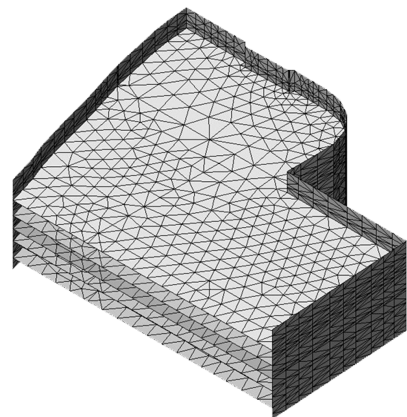


图 10 地下连续墙、地下室楼板和底板
Fig. 10 Diaphragm wall and floors of basement

5 数值模拟结果

5.1 基坑开挖对隧道变形的影响

计算结果表明, 基坑开挖到底部时, 隧道侧 (KA 段) 基坑顶部最大变形为 16.36 mm, 见图 11, 靠近基坑一侧的右隧道向基坑的最大偏移为 1.70 mm, 见图 12, 不同开挖深度对应的隧道位移结果见表 7。

表 7 基坑开挖不同深度对应隧道位移

Table 7 Displacements of tunnels under different excavation depths

开挖到不同深度	基坑隧道侧 KA 段最大位移/mm	隧道右线最大位移/mm	隧道左线最大位移/mm
6.3 m	15.93	1.59	1.10
15.7 m	16.17	1.60	1.21
23.9 m	16.36	1.70	1.28



图 11 开挖到基坑底的基坑支护结构变形场云图(单位: m)

Fig. 11 Displacement contours of retaining structures for foundation pit after excavation (unit: m)

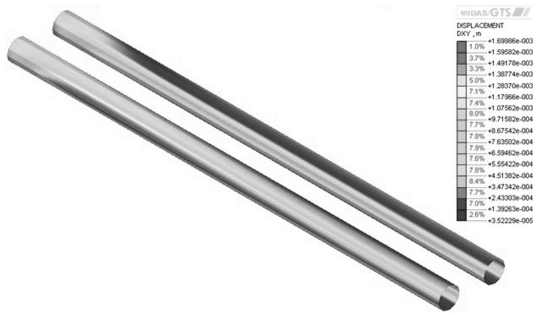


图 12 开挖基坑底后隧道变形场云图(单位: m)

Fig. 12 Displacement contours of tunnels after excavation (unit: m)

5.2 基坑开挖对地铁隧道管片附加应力的影响

该段区域地铁管片内径 5.4 m、外径 6 m、厚度 0.3 m、管片宽度 1.5 m；管片拼接组装如图 13。利用计算结果提取了隧道外围增加的附件应力，将这个土压力作为围压增量，再利用曙光软件计算管片的内力，确定出隧道管片应力图，最后计算出管片弯矩和轴力，管片原设计工况所受土压力见图 14，基坑开挖到底后管片所受土压力情况见表 8 所示，对应弯矩和轴力见图 15，利用计算得到的弯矩图和轴力图，配筋复核结果表明隧道管片能够满足其强度的要求。

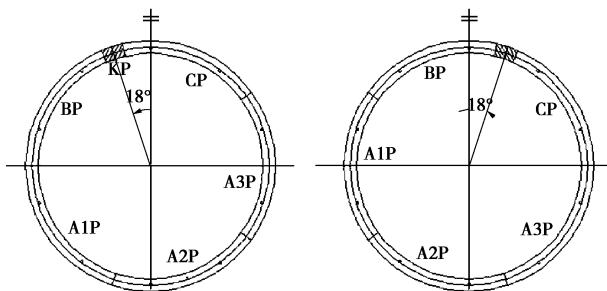


图 13 管片构造剖面图

Fig. 13 Section of tunnel segment

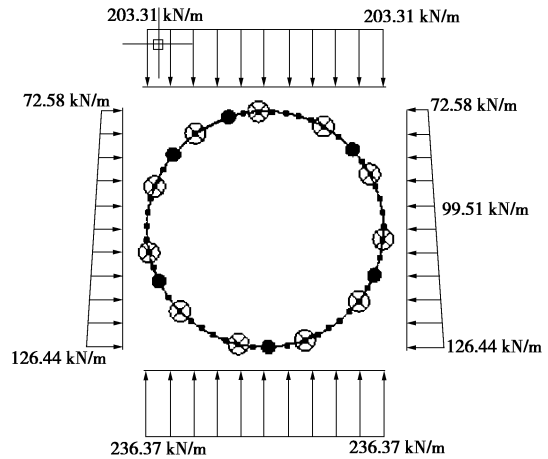


图 14 管片所受的土压力(原设计工况)

Fig. 14 Soil pressures on tunnel segment (original design)

表 8 基坑开挖引起的隧道顶部附加荷载

Table 8 Additional pressures on top of tunnel caused by excavation

工况	塌落拱 /m	顶部上覆	顶部侧向	底部侧向	底部抗力
		水土压力	水土压力	水土压力	p_2
		$p_1/(kN \cdot m^{-2})$	$p_3/(kN \cdot m^{-2})$	$p_4/(kN \cdot m^{-2})$	$/(kN \cdot m^{-2})$
原设计工况	7.53	203.30	72.58	126.40	236.37
基坑开挖到底		210.26	75.09	128.91	243.33

数值分析结果表明：基坑开挖虽然导致隧道发生一定的位移，且管片内力有所变化，但管片强度能够满足要求。

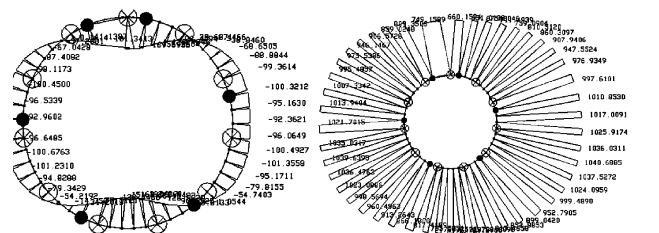


图 15 管片内力图——弯矩和轴力(基坑开挖到底)

Fig. 15 Moments and axial forces of tunnel segment after excavation

6 施工期间基坑和隧道监测结果分析

为确保基坑施工期间基坑支护结构和施工影响范围内的地铁结构的安全，对基坑支护和影响范围内的地铁隧道左、右线进行监测，下面主要分析靠近北侧段(见图 1)的基坑监测结果和隧道自动化监测结果。

6.1 基坑支护结构监测结果

图 16 是靠近隧道侧基坑测斜结果，对比数值分析结果和实测结果，现场实测值比数值计算值小，开挖到 6 m 时实测值为 11.5 mm，数值结算结果为 15.9 mm，也为说明该计算模型简化和参数取值是可行的，是偏于安全的。

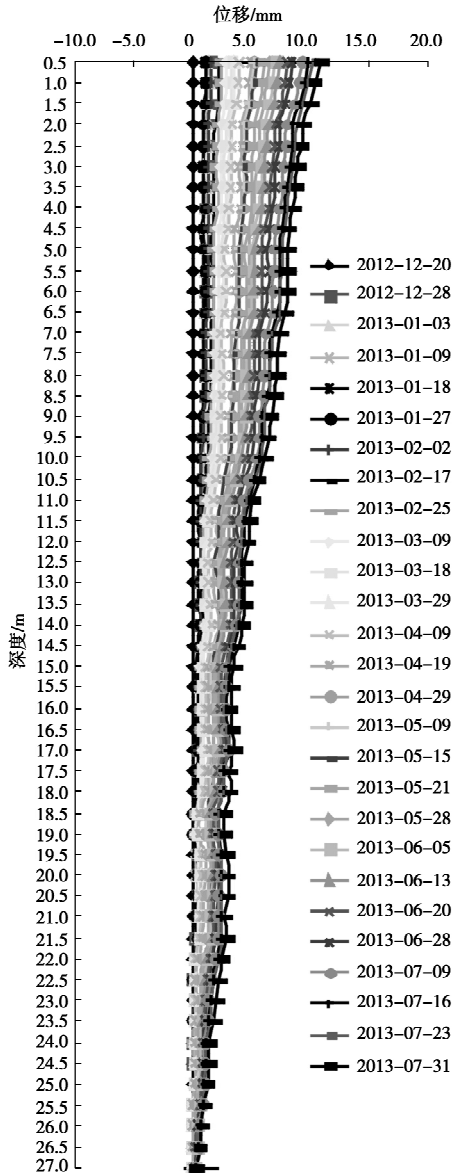


图 16 CX3 测点(靠近隧道侧)测斜监测数据
Fig. 16 Monitoring data at point CX3 at tunnel side

6.2 隧道变形监测结果

施工期间重点对基坑施工影响范围内隧道左、右线水平和垂直变形进行了自动化监测, 地铁右线(靠近基坑)有 12 个监测断面, 左线有 8 个监测断面, 断面间距 10 m, 每断面各有 5 个监测点。监测断面埋点位置: 在轨道附近的道床上布设两个沉降监测点, 中腰位置布设两个水平位移监测点, 隧道拱顶布设一个沉降监测点。测点布置见图 17, 3 号(右线测点)和 5 号(左线测点)测点是测隧道管片水平位移, 具体监测结果如图 18 所示, 从图中可知, 在基坑支护结构地下连续墙施工期间隧道水平位移监测结果表明, 地下连续墙施工对地铁隧道有加载效果, 导致隧道朝着远离支护结构方向发生位移, 最大位移为+0.49 mm (远离支护结构发生的位移); 连续墙处于悬臂状态,

基坑开挖到第一层楼板, 隧道发生的水平位移最大, 由于基坑开挖施工对开挖面以下土体有垂直方向卸荷作用, 对侧面土体有水平方向卸荷作用, 卸荷会引起土体的回弹, 导致隧道发生位移, 最大位移为-2.5 mm (向支护结构发生的位移); 当第一层楼板施工后, 采用逆作法继续往下施工时, 隧道发生的水平位移很小, 因为地下连续墙+楼板作为支撑支护体系, 支撑刚度较大, 对地铁和站房的变形控制非常有利。

将表 7 中的数值分析结果也列入图 18, 其中负值表示隧道靠近基坑结构。可以看出数值分析结果和实测结果差异不大, 且变化规律较一致, 均是在开挖第一层是位移增长最快, 等楼板施工后隧道位移变化较小。

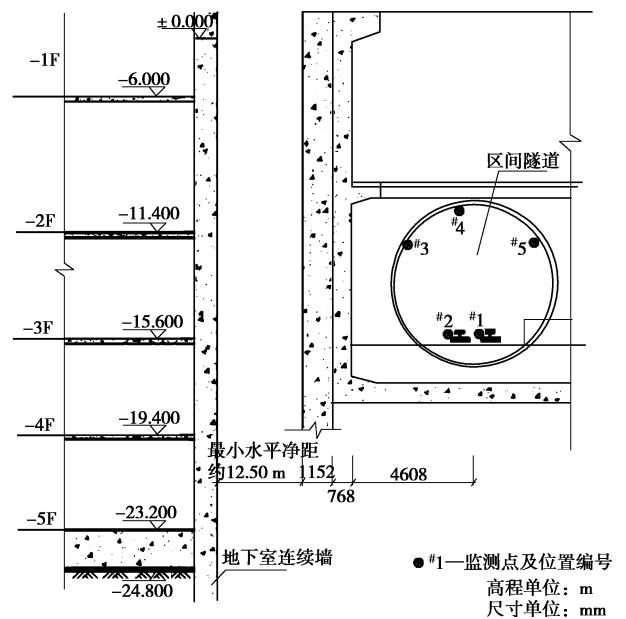


图 17 隧道位移测点布置图

Fig. 17 Monitoring points of metro tunnel

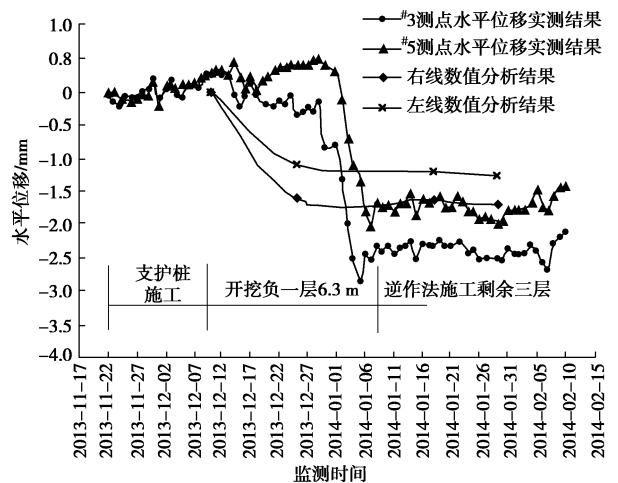


图 18 隧道水平位移实测结果

Fig. 18 Monitoring data of horizontal displacement of metro tunnel

7 结 论

由于城市地下空间的快速开发,这几年基坑开挖施工引起附近建(构)筑物的工程事故也越来越多。因此,地下空间开发对附近既有地铁隧道的影响和安全控制措施变得越来越重要,本文在总结地铁工程控制标准与保护技术基础上,以广州某深基坑开挖对隧道的影响为案例,通过数值分析和实测手段,对比分析了基坑开挖对地铁隧道的影响,可得如下结论。

(1) 由于地铁结构与岩土体相互作用的复杂性,不同施工方法和顺序引起地铁结构的内力分布和大小也不同,因此建议统一地下空间施工对地铁影响的安全控制标准和规范难度很大,应该针对不同施工方法和地质条件,采用分类、分步和分级的原则制定相应的控制标准。

(2) 隧道位移实测结果表明,基坑开挖期间对于隧道不一定是卸荷影响,有时也会增加隧道的围压,这与基坑开挖深度和隧道与基坑之间的位置关系有关,也和基坑支护结构施工方法有关,应结合具体体力学传递路径来确定是卸荷还增荷影响。

(3) 通过实测结果的验证,对于复杂岩土工程问题,如果数值建模的边界条件和参数取值接近实际情况,数值方法是解决岩土工程问题有效方法之一,且能够给出比较好的定性及定量结果。

(4) 在周边环境比较复杂的区域进行地下空间开发,对周边的建(构)筑物、地铁等的位移和变形进行动态监测是非常必要的,监测结果不仅可以验证数值结果的合理性,且可以动态确保建筑物的安全。

参考文献:

[1] 张玉成, 杨光华, 姚捷, 等. 基坑开挖卸荷对下方既有地铁隧道影响的数值仿真分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 1): 109 - 115. (ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, YAO Jie, et al. Numerical simulation and analysis of effect of excavation of foundation pits on metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 109 - 115. (in Chinese))

[2] 刘斯琴, 余晓琳, 颜全胜. 基坑开挖对下方既有地铁影响数值分析[J]. 广东土木与建筑, 2009(6): 19 - 20. (LIU Si-qin, YU Xiao-lin, YAN Quan-sheng. Numerical simulation analysis for influence of overhead excavation on existing MTR[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2009(6): 19 - 20. (in Chinese))

[3] 吉茂杰, 刘国彬. 开挖卸荷引起地铁隧道位移预测方法[J]. 同济大学学报, 2001, **29**(5): 531 - 534. (JI Mao-jie, LIU

Guo-bin. Prediction method of displacement of subway tunnel due to excavation[J]. Journal of Tongji University, 2001, **29**(5): 531 - 534. (in Chinese))

[4] 张玉成, 杨光华, 钟志辉, 等. 软土基坑设计若干关键问题探讨及基坑设计实例应用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(11): 2234 - 2243. (ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, ZHONG Zhi-hui, et al. Some critical problems in soft soil pit design and design examples application analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(11): 2234 - 2243. (in Chinese))

[5] 张玉成, 杨光华, 胡海英, 等. 软土深基坑围堰及基础施工对既有下穿管线的影响及保护措施研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(增刊 2): 364 - 370. (HANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, HU Hai-ying, et al. Effect of construction of deep excavation cofferdams and foundation in soft soils on underneath pipelines and protective measures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(S1): 364 - 370. (in Chinese))

[6] 张玉成, 杨光华, 胡海英, 等. 格栅式连续墙在沉管隧道护岸工程支护中的应用[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(增刊 2): 440 - 446. (HANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, HU Hai-ying, et al. Application of grillage shaped diaphragm wall supporting the revetment project of the immersed tube tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(S1): 440 - 446. (in Chinese))

[7] 黄宏伟. 隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J]. 地下空间及工程学报, 2006, **2**(2): 13 - 20. (HUANG Hong-wei. State of the art of the research on risk management in construction of tunnel and underground works[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, **2**(2): 13 - 20. (in Chinese))

[8] 邓小鹏, 李启明, 周志鹏. 地铁施工安全事故规律性的统计分析[J]. 统计与决策, 2010(9): 87 - 89. (DENG Xiao-peng, LI Qi-ming, ZHOU Zhi-peng. Statistical analysis of safety events patterns in metro construction[J]. Statistics and Decision, 2010(9): 87 - 89. (in Chinese))

[9] 上海市市政管理局. 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: 上海市市政管理局, 1994. (Shanghai Road Administration Bureau. The provisional rules of subway technical management about protecting the building-construction along the subway lines in Shanghai[S]. Shanghai: Shanghai Municipal Management Bureau, 1994. (in Chinese))

[10] 姜景山, 陈浩, 张洪威. 崇文门车站下穿地铁既有线路

- 工变形控制措施[J]. 铁道标准设计, 2005(10): 85 - 88. (JIANG Jing-shan, CHEN Hao, ZHANG Hong-hui, The construction deformation controlling measures of a new-built subway station passing through the bottom of the existing subway in Chongwenmen Station[J]. Railway Standard Design, 2005(10): 85 - 88. (in Chinese))
- [11] 刘国彬, 李志高, 吴小将. 明珠线二期施工对环境影响的三维有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(3): 460 - 463. (LIU Guo-bin, LI Zhi-gao, WU Xiao-jiang. 3D FEM analysis on surroundings influence due to the construction of transverse section for Shanghai Stadium Station of Pearl Line Phase II [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(3): 460 - 463. (in Chinese))
- [12] 毛朝辉, 刘国彬. 基坑开挖引起下方隧道变形的数值模拟[J]. 地下工程与隧道, 2005, 15(4): 24 - 27. (MAO Qiao-hui, LIU Guo-bin. Numerical simulation on the deformation of tunnel under a excavating foundation pit[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2005, 15(4): 24 - 27. (in Chinese))
- [13] 李兴高. 既有地铁线路变形控制标准研究[J]. 铁道建筑, 2010(4): 84 - 88. (LI Xing-gao. Jacking technology and monitoring during tunneling under existing metro structures[J]. Railway Engineering, 2010(4): 84 - 88. (in Chinese))
- [14] 李志高, 刘国彬, 曾远, 等. 基坑开挖引起下方隧道的变形控制[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(3): 430 - 432. (LI Zhi-gao, LIU Guo-bin, ZENG Yuan, et al. Control measures of tunnel displacement by over-excavation unloading[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(3): 430 - 432. (in Chinese))
- [15] 张小平, 张青林, 包承纲, 等. 卸荷模量数取值的研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 27 - 30. (ZHANG Xiao-ping, ZHANG Qing-line, BAO Cheng-gang, et al. Study on parameter of unloading modulus[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(1): 27 - 30. (in Chinese))
- [16] DUNCAN J M, CHANG Chin-yung. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. ASCE, 1970, 96(5): 1629 - 1653.

(本文责编 明经平)