

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.06.043

深基坑开挖对临近地铁车站及区间影响的数值模拟分析

蔡武林

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430072)

摘要:以苏州某临近地铁4号线宝带东路站基坑开挖为背景,运用ABAQUS有限元计算软件模拟基坑开挖各阶段,分析了各工况下的结构及区间的变形,并结合现场监测结果,表明数值计算结果与监测结果较为接近,说明参数及边界条件选取合理,可为类似工程参考借鉴。

关键词:深基坑开挖;地铁车站;数值模拟

中图分类号: TU470+.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)06-0222-05

Numerical Simulation of the Influence of Deep Foundation Pit on Adjacent Subway Station and Tunnels

CAI Wulin

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: An excavation pit near Baodai Road station of subway line 4 in Suzhou was taken as an example in this research, ABAQUS software was adopted to analyze the deformation under different excavation stages. The simulation results agrees well with the field monitoring results which indicates that the parameters and boundary conditions are reasonable and can be adopted by similar engineering.

Keywords: deep foundation pit; subway station; numerical simulation

随着城市轨道交通的迅速发展,地铁车站保护范围内不可避免受土建工程建设影响^[1-4],深基坑的开挖面卸荷,改变了原始土基的界面和应力状态影响,会造成地铁车站及区间的变形,导致轨道的变形,影响地铁行车的安全。分析土体应力,首先应计算土体初始应力场和地铁结构的内力和变位,精确求解地铁结构和周围土体的初始应力是一项艰巨而复杂的工作,因为土体本身分层,并有孔隙水影响,其物理特性在空间上变化复杂;建筑物边界的土体,几何非规则;土体固结程度不一,主动区和被动区交织,应力状态复杂;特别是建筑物与土体的弹性模量相差巨大,这给消除建筑物、桩与土体的相对沉降差带来了很大困难。数值模拟在空间上、时间上能较真实的反映这一系列工况变化过程。选择合理计算模型,结合设计方案,控制对地铁结构的变形影响,

是解决此类深基坑设计中非常有效的手段。

沈辉等^[5]通过FLAC^{3D}建立三维数值模型分析,表明地铁车站对深基坑开挖产生的土体位移传递具有一定的阻碍作用;谢洪帅^[6]通过PLAXIS2D模型对临近车站的深基坑分析表明,采取合理的措施可减少对地铁车站基坑的影响;左殿军等^[7]通过采用ABAQUS模拟基坑开挖对临近隧道的影响,表明基地表沉降及隧道衬砌随基坑开挖深度及支撑间距的增加而变化速率增大;李伟强等^[8]通过PLAXIS2D建立岩土-结构模型,研究表明地铁结构在基坑开挖过程中出现不同程度的回弹,趋势为距离基坑越近回弹量越大;任伟明等^[9]采用FLAC^{3D}对临近基坑的地铁车站进行三维数值模拟,阐述了桩锚支护与变形缝的模拟方法,并通过计算结果分析了临近车站的基坑工程开挖对车站变形的影响规律。

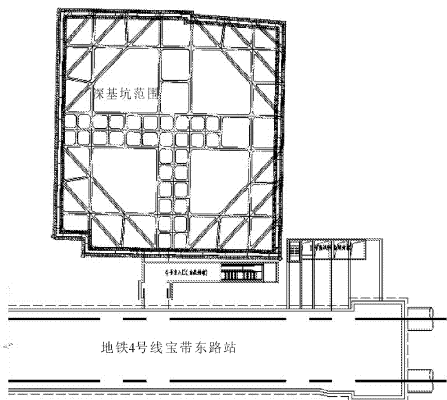
1 工程背景

1.1 基坑支护结构总体布置

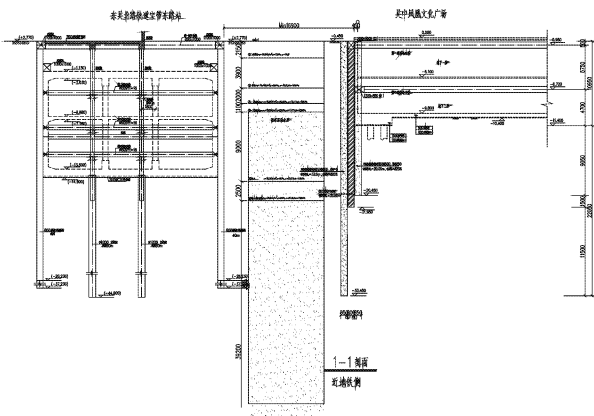
拟建工程由 1 幢 17 层办公塔楼、4 层裙房整体下设 2 层地下室组成,基坑总面积约 3 814 m²,呈长方形,东西长约 64.2 m,南北宽约 59.0 m,基坑周长 约 269 m,基坑开挖深度约 10.95 m,结构外墙线局部紧邻西侧用地红线,距离地铁 4 号线宝带东 路 站 主 体 围 护 结 构 外 墙 线 最 近 约 11.9 m,并 与 宝 带 东 路

站预留接口连通。

图 1 为基坑支护结构平面布置图,如图 1 所示,围护结构采用地下地连墙 + 2 道混凝土支撑,地连墙距离车站结构最小的距离约 11.9 m;基坑采用明挖法施工,施工工序为先施工围护结构及止水帷幕,然后施工第一道支撑,待强度达到 80% 后开挖,施工第二道支撑,继续开挖到基底,然后施工底板。基坑支护结构尺寸表见表 1。



(a) 平面



(b) 支护

图 1 基坑与地铁关系平面图

表 1 基坑支护结构尺寸表

编号	高/mm		宽/mm		侧墙 /mm
	腰梁	支撑、斜撑	腰梁	支撑、斜撑	
①	800	800	1000	800	800
②	850	1000	1250	800	800

1.2 工程地质条件

基坑地层主要为:① 2.77 m ~ 0.62 m,人工填土;② 0.62 m ~ - 3.28 m,黏土;③ - 3.28 m ~ - 5.28 m,粉质黏土;④ - 5.28 m ~ - 6.38 m,粉质黏土;⑤ - 6.38 m ~ - 15.38 m,粉土;表 2 中给出各层土的物理力学性质。

表 2 各层土物理力学指标

编号	重度 / (kN·m ⁻³)	渗透系数 / (cm·s ⁻¹)	变形模量 /MPa	泊松比
①	18.5	8.9 × 10 ⁻⁷	4.76	0.35
②	19.4	6.2 × 10 ⁻⁷	6.19	0.37
③	19.0	3.3 × 10 ⁻⁵	6.36	0.30
④	18.5	3.2 × 10 ⁻⁴	14.63	0.34
⑤	19.2	3.1 × 10 ⁻⁴	14.80	0.30
⑥	18.2	1.3 × 10 ⁻⁴	12.13	0.32

2 基坑开挖的有限元数值计算分析

2.1 模型的尺寸及参数的选取

本次计算分析选取大型非线性通用有限元软件 ABAQUS 作为计算平台,根据基坑和车站几何尺寸大小,结合基坑开挖施工对临近环境影响范围的现场监测经验,基坑深度为 10.95 m,本模型计算深度取 40 m;本模型东西方向和南北方向的计算宽度均取为 400 m。对计算区域内涉土体、基坑支护结构、地铁车站结构与区间隧道结构进行了三维建模,土体采用实体单元,基坑支护、地铁车站外墙、顶底板结构采用板单元,车站结构中梁柱、支护结构中的水平支撑、围梁等采用梁单元。

根据计算模型大小,综合考虑计算时间和计算精确度,共计剖分单元 126 820 个。建立的“地铁 - 基坑 - 围护”计算模型见图 2 ~ 图 4。

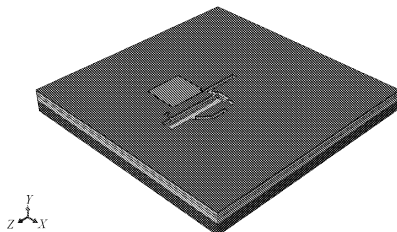


图 2 本工程有限元计算模型

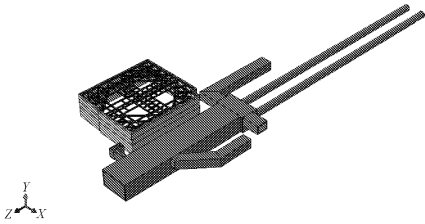


图 3 基坑支护、地铁车站与隧道结构计算模型

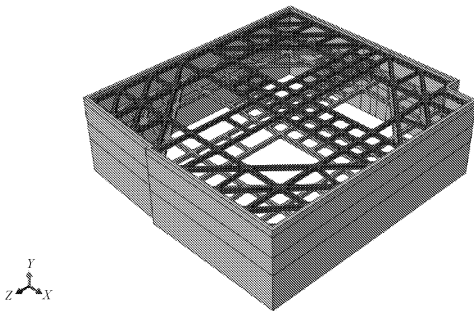


图 4 基坑支护计算模型

2.2 数值计算方法过程

地基各土层采用弹塑性 D-P 模型。D-P 准则即广义 Mises 准则,它是在考虑平均应力影响的条件下,由 Mises 准则推广而成:

$$f(I_1, \sqrt{J_2}) = \sqrt{J_2} - aI_1 - k = 0 \quad (1)$$

式中: a, k 均为与岩土材料黏聚力 c 和内摩擦角 φ 有关的常数; I_1 为应力张量第一不变量; J_2 为应力偏张量第二不变量。 I_1, J_2 的表达式:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3,$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

式中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为土体第一、第二和第三主应力。钢和混凝土本构关系采用整体式的理想弹性模型,表达式: $\sigma = E\varepsilon$, 各参数见表 3。

表 3 数值模拟计算参数表

名称	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	剪切模量 /GPa	泊松比
地连墙	2500	31.5	12.6	0.2
支撑	2500	30.0	12.0	0.2
立柱桩	2500	30.0	12.0	0.2
车站	2500	31.5	12.6	0.2
区间	2500	34.5	13.8	0.2

为分析基坑自身的应力应变计及相邻的车站及隧道的变化关系,本文按照施工过程,建立模型分析基坑隧道的变形规律:(1) 模型生成初始地应力;(2) 生成地铁结构,并位移清零;(3) 生成基坑围护

结构,并位移清零;(4) 开挖第 1 层土,施加第一道支撑阶段;(5) 开挖第 2 层土,施加第二道支撑;(6) 开挖至基坑底,施工底板;(7) 拆除第二道支撑,施工负 1 层楼板;(8) 拆除第一道支撑,施工地下室顶板。

3 计算结果分析

3.1 模型整体位移及围护结构变形

由于围护结构向坑内发生侧向位移,地应力释放而重新分布,引起地铁结构发生侧移,由于基坑开挖导致基坑周边及坑底土体卸载,基坑侧向位移和底部隆起,导致地铁车站及区间隧道管片内力也发生变化。

以下根据每个工况的计算结果,取其中分阶段对部分依次显示模型 Z 向(即平行于地铁纵向轴线方向)位移、X 向(即垂直于地铁纵向轴线方向)位移(见图 5)、Y 向(深度方向)位移(见图 6)。由计算可知,在工况 8 下,模型的整体变形达到最大(见图 7)。

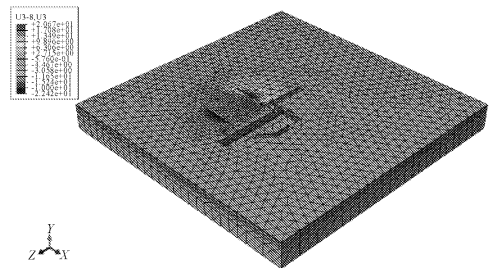


图 5 模型侧向位移(X方向)

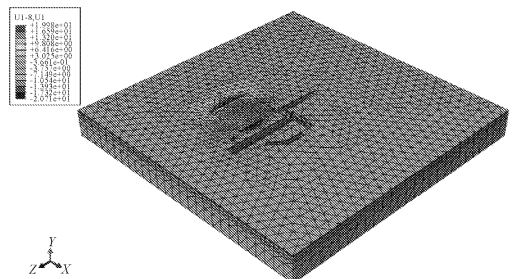


图 6 模型侧向位移(Y方向)

在步骤(6)情况下,即开挖至坑底时,基坑隆起达到最大值为 18.6 mm,此时地表沉降也达到最大值,为 4.7 mm。

3.2 地铁车站及区间位移

图 8 ~ 图 10 表示地铁车站及区间结构随基坑开挖深度变化而产生的结构变形情况,可以看出,在开挖到架设第一道支撑后,车站主体结构侧墙水平位移为 0.5 mm,区间隧道为 0.4 mm,随着开挖深度的增加,位移逐渐增加,当开挖到基底时,车站侧墙水平位移为 1.7 mm,区间为 1.6 mm,在回筑阶段,车

站结构水平位移增加到 1.9 mm,而区间隧道的竖向位移的没有变化,稳定为 1.7 mm。

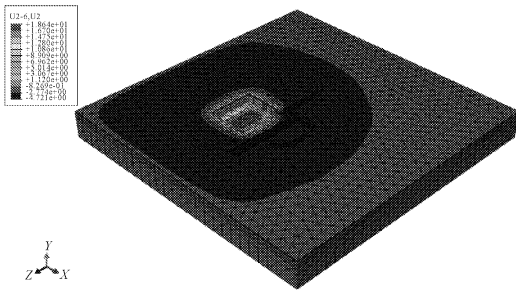


图 7 模型整体竖向位移

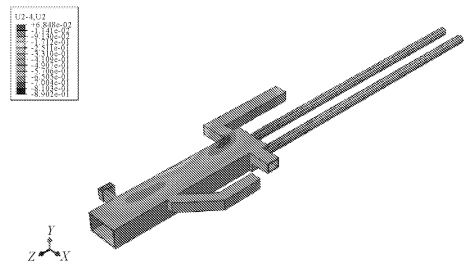


图 11 工况 4 结构竖向位移

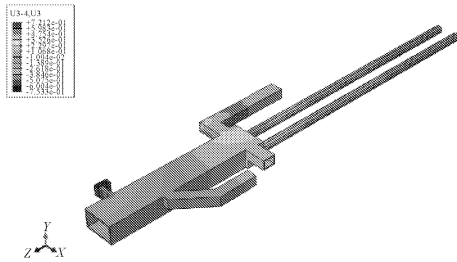


图 8 工况 4 结构水平位移

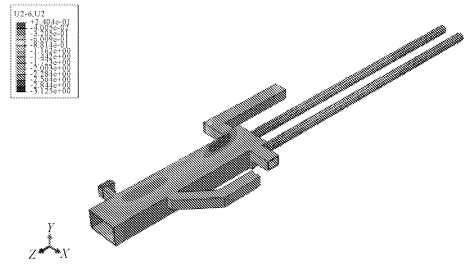


图 12 工况 6 结构竖向位移

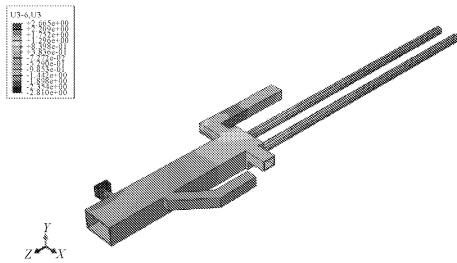


图 9 工况 6 结构水平位移

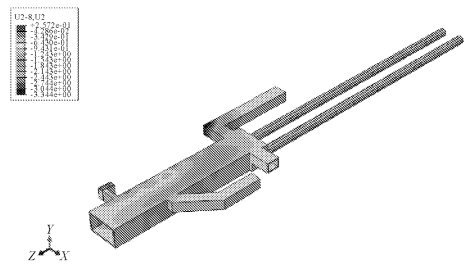


图 13 工况 8 结构竖向位移

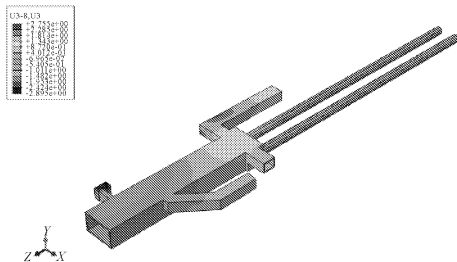


图 10 工况 8 结构水平位移

图 11~图 13 表示地铁车站及区间结构随基坑开挖深度变化而产生的竖向位移,可以看出,在开挖到架设第一道支撑后,车站主体结构侧墙竖向位移为 0.9 mm,区间隧道为 0.5 mm,随着开挖深度的增加,位移逐渐增加,当架设第二道混凝土支撑,开挖到基底时,车站侧墙竖向位移为 3.7 mm,区间为 1.9 mm,在回筑阶段,车站与隧道的竖向位移均没有变化。

3.3 监测与计算对比

地铁车站端头井距离基坑约 11.9 m,监测结果表明,车站最大变形发生在车站端头井部位,侧墙最大水平位移为 2.9 mm,端头井侧墙最大竖向位移为 4.5 mm,地面最大沉降为 3.2 mm。基坑离盾构区间隧道的最近距离约为 29.1 m,基坑开挖施工对其产生影响,从监测结果看,水平方向区间隧道最大侧向位移为 1.7 mm(见图 14),竖向最大侧向位移为 1.9 mm(见图 15),区间隧道的最大沉降为 1.9 mm,地铁车站与区间隧道结构连接处最大相对总位移为 0.8 mm,发生在端头井处。

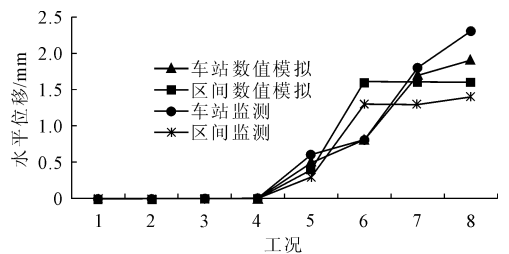


图 14 车站结构及隧道水平位移监测

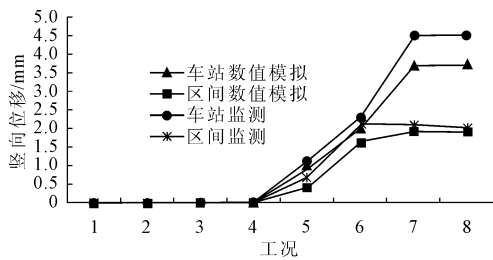


图 15 车站结构及隧道竖向位移监测

4 结 论

(1) 临近基坑的车站及区间变形明显受基坑开挖影响,表现为基坑开挖越深,地铁及区间结构变形越明显,结构产生的竖向位移较水平方向位移大,且在基坑开挖到底以后,竖向位移基本不再增加。

(2) 随着基坑开挖深度的增加,车站结构与区间产生的竖向位移和侧向位移也随着增加,竖向位移在基坑回筑阶段,基本上没有增加,但是水平方向的位移,仍有少量增加,整体上区间的沉降及竖向位移均满足相关规范的要求。

(3) 本文进行数值模拟时,仅考虑地铁保护区范围内单个基坑开挖的影响,并未考虑其它不利因素的影响。因此,在类似工程设计施工情况时,应考虑多个因素的叠加,保证运营车站及区间的行车安全,显得尤为重要。

参考文献:

- [1] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [2] 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(S1): 109-115.
- [3] 李家平. 基坑开挖卸载对下卧地铁隧道影响的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(S1): 1345-1349.
- [4] 武朝军,陈锦剑,叶冠林,等. 苏州地铁车站基坑变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 458-462.
- [5] 谢宏帅. 深基坑开挖对临近地铁车站基坑影响的有限元计算分析[J]. 上海地质, 2009, 30(2): 54-58.
- [6] 沈辉,罗先启,李野,等. 深基坑施工对地铁车站影响的数值仿真分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(5): 1021-1025.
- [7] 左殿军,史林,李铭铭,等. 深基坑开挖对邻近地铁隧道影响数值计算分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 392-396.
- [8] 李伟强,孙宏伟. 邻近深基坑开挖对既有地铁的影响计算分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(S1): 420-422.
- [9] 任伟民,彭丽云,刘军. 邻近地铁车站的基坑开挖基于 FLAC3D 数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S1): 277-280.
- [10] 李冰. 基坑开挖卸载对下卧地铁隧道影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2013, 5(S1): 1459-1468.

(上接第 221 页)

- [2] Xu Nuwen, Tian Li, Dai Feng. Research on energy-saving technology of housing colony of Yangling[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 361/363: 323-326.
- [3] 刘小根,包亦望,邱岩,等. 幕墙中空玻璃失效在线检测技术[J]. 土木工程学报, 2011, 44(11): 52-58.
- [4] 吴晓,杨立军,黄羽. 风荷载作用下中空幕墙玻璃的非线性弯曲[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(1): 304-309.
- [5] 胡小勇. 高速列车站玻璃幕墙结构模型动力试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(5): 612-618.
- [6] Shi Gang, Zuo Yong, Shi Y, et al. Influence of damages on static behavior of single-layer cable net supported glass curtain wall: full-scale model test[J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2010, 4(3): 383-395.
- [7] 陶照堂,吴涛. 四边支撑拱形夹胶玻璃的计算[J]. 门窗, 2015(12): 37-39.
- [8] 毛仕方. 预应力索桁架点支式弧形玻璃幕墙施工技术[J]. 中国建筑金属结构, 2013, 18(8): 83-84.
- [9] 刘小根,包亦望,宋一乐,等. 青藏铁路客车中空玻璃低压研究及可靠性设计[J]. 铁道车辆, 2010, 48(2): 4-9.
- [10] 王敬丽,李宁. 玻璃幕墙风荷载设计研究[J]. 四川建筑, 2012, 34(2): 146-147.
- [11] 中华人民共和国建设部. 玻璃幕墙工程技术规范: JGJ 102-2003[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [12] Ventsel E, Krauthammer T. Thin plates and shells: theory, analysis and applications[M]. New York: Marcel Dekker, 2001: 136-139.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 采光顶及金属屋面技术规程: JGJ255-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [14] 张莉,鲍子虞. 基于 SAP2000 的钢梁-钢筋混凝土柱混合框架的性能分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(4): 67-71, 90.
- [15] 张宏战,谭杰骥,马震岳. 基于 SAP2000 的进水塔结构静力弹塑性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(6): 64-68.