

文章编号: 1005-0523(2009)04-0013-05

地铁深基坑逆作施工的数值模拟与实测分析

叶丹¹, 丁春林¹, 侯剑峰², 朱恺¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 上海市政工程设计研究院, 上海 200092)

摘要: 针对上海市某地铁深基坑, 基于 FLAC^{3D} 软件, 采用摩尔-库伦弹塑性模型, 对既有建筑物旁盖挖逆作法施工的深基坑进行了分步开挖数值模拟; 并将计算得到的围护结构水平位移和基坑周围地表沉降与实际监测结果进行对比分析, 验证了计算模型和计算参数的合理性, 最后分析了基坑开挖对临近建筑物桩基的影响, 为基坑工程的设计与施工提供参考。

关键词: 深基坑; 逆作法; 数值模拟; 实测; 位移

中图分类号: TU470

文献标识码: A

随着城市的不断发展, 很多高层建筑、地铁隧道等深基坑工程的施工必须在繁华城区地段进行。基坑工程是一个复杂的工程, 特别是在软土地区, 在深基坑施工过程中, 支护结构与土相互作用, 不断调整自身受力与变形^[1], 在开挖过程中, 会对周围的建筑物产生不同程度的影响, 影响已有建筑的使用安全, 阻碍在建工程的正常进行, 因此, 对深基坑施工进行相关的数值模拟和分析, 在开挖之前确定对周围建筑物的影响, 从而做好相应的保护措施, 是非常必要的。随着计算机技术的发展, 有限元法被引入支护计算中。目前常用的有限元法是以弹性地基梁法为基础而建立的一维有限元法, 以及以 Biot 固结理论为基础的二维有限元法^[2]。上述方法将基坑支护体系的三维问题简化为一维问题或平面问题, 未能较真实地反映深基坑的三维受力情况, 且在目前的研究中, 对于盖挖逆作法施工的分步开挖进行数值模拟的研究比较少, 本文采用 FLAC^{3D} 对上海某地铁车站使用盖挖逆作法施工的基坑开挖与支护进行模拟, 将模型计算结果与现场实测进行比较, 并分析基坑开挖对周围建筑物的影响。

1 工程概况

上海地铁 M7 线某车站位于东安路、零陵路口, 北接肇家浜路站, 南接南浦路站, 为地下三层结构。已建 M4 线东安站位于东安路、零陵路路口, 沿零陵路东西向设置, 与本站呈十字交汇, 为地下二层车站。本车站标准段基坑深度 21.64 m, 采用 1 m 厚地下连续墙作为围护结构, 共设置 6 道支撑; 南端头井基坑深 23.44 m, 采用 1.2 m 和 1 m 厚的地下连续墙作为围护结构, 水平支撑共布置 5 道, 均采用壁厚为 16 mm 的 $\Phi 609$ 钢支撑。

由于车站深基坑位于闹市区, 周边环境比较复杂, 其中位于基坑东侧的东安大楼是本基坑工程施工过程中重点保护的對象, 大楼为 18 层框架-剪力墙结构, 基础均为桩

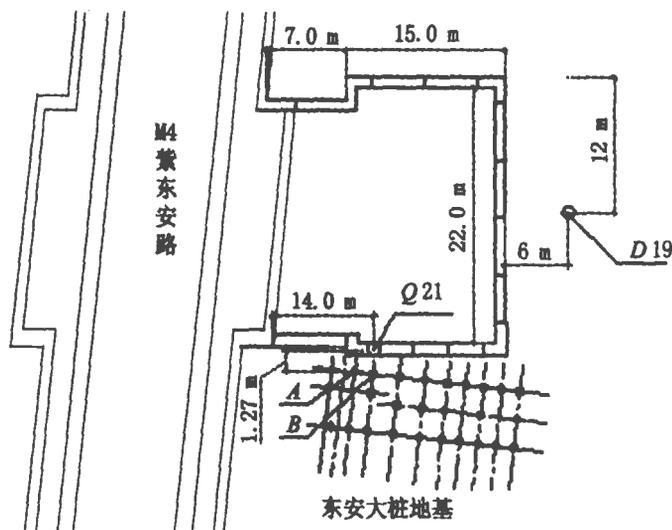


图 1 基坑与桩基平面布置图

收稿日期: 2006-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(40772178)

作者简介: 叶丹(1986-), 女, 湖北天门人, 硕士研究生, 主要研究方向为地下工程、岩土工程等。

基;桩基布置如图1所示,最近的桩基离围护结构距离仅为1.27 m。因此,采用数值模拟分析基坑开挖过程中桩基的侧向位移,确定东安大楼是否受到影响及影响的程度,以便在施工过程中做好相应的保护措施,以及确定施工和防护措施的合理性和可靠性,显得很有必要。

另外,根据地质勘测结果,本车站地基土在60.40 m深度范围内均为第四纪松散沉积物,属第四系滨海平原地基土沉积层,主要由饱和粘性土、粉土以及砂土组成,地基土分布有以下特点。

浅部以饱和粘性土为主,第①层为填土;第②层为褐黄~灰黄色粉质粘土;第③1层为淤泥质粉质粘土,其中夹较多薄层粉性土;第④1层为淤泥质粘土;第⑤层土分布较为稳定,上部粘性较重,向下夹较多薄层粉土,第⑤1-1为灰色粘土,第⑤1-2为灰色粉质粘土;第⑥层土缺失,分布次生土层⑤3、⑤4层土,⑤4层顶埋深约41.5~43.5 m,层厚一般约1.3~3.1 m;第⑦层分布稳定,第⑦层可划分为⑦1-1、⑦1-2两个亚层,其中⑦1-1层顶埋深一般在43.5~45.7 m左右;第⑦1-2层层顶埋深约为48.0~50.45 m左右。根据勘察设计资料,②~⑤4土层的物理力学参数如下表1所示。

表1 物理力学参数

层号	土层名称	厚度/m	重度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	凝聚力/kPa	内摩擦角/ $^{\circ}$	压缩模量/MPa	静止侧压力系数
②	褐黄色粉质粘土	3.2	18.7	11	17.5	4.08	0.45
③1	灰色淤泥质粉质粘土	5.1	17.7	10	19	2.49	0.51
④1	灰色淤泥质粘土	9.8	17.0	13	16	2.07	0.60
⑤1-1	灰色粘土	11.8	18.1	17	15.3	3.62	0.46
⑤1-2	灰色粉质粘土	18	18.1	15	13	4.69	0.41
⑤3	灰色粉质粘土	5.4	18.4	—	—	5.43	—
⑤4	灰绿色粉质粘土	4.5	19.8	—	—	7.11	0.42

2 本构模型建立与基坑开挖模拟

2.1 本构模型的选择

土体是一种很复杂的复合体,在外力的作用下,土体不仅产生弹性变形,而且还会产生不可恢复的塑性变形^[3]。土的弹塑性本构模型能较好地反映土体应力路径、土的硬化和软化特性。本文在采用FLAC^{3D}模拟计算中,土体采用了摩尔-库伦模型,该模型是最通用的岩土本构模型,适用于那些在剪应力下屈服,但剪应力只取决于最大、最小主应力,而第二主应力对屈服不产生影响松散而胶结的粒状的材料,如:土体,岩石,混凝土等^[4]。其屈服准则为^[5]:

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c \sqrt{N_\varphi} = 0$$

式中: $N_\varphi = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$; c 为凝聚力; φ 为摩擦角。

2.2 计算模型与计算参数

该车站南端头井基坑是一个不规则的矩形,基坑长约22 m,宽约24 m,深23.44 m,地下连续墙厚为1.2 m和1 m,采用盖挖逆作法施工,考虑基坑开挖对周围土体及建筑物影响范围,建立的模型长114 m,宽220 m,高90 m。计算模型的上边界为自由边界,底部全约束,临近既有车站一侧全约束,其余侧边约束了向基坑方向的水平位移。

计算过程中,坑周土体采用实体单元模拟,支撑用beam结构单元来模拟,围护结构用实体单元模拟,临近建筑物桩基采用pile结构单元模拟,盖挖施工的车站顶板、中楼板和底板采用实体单元模拟。在模型网格划分中,为了提高计算精度,对地铁车站部分的网格分布进行了加密,模型共划分为57 340个单元,如图2所示。

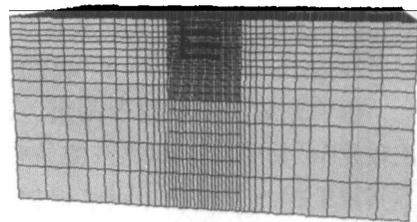


图2 计算模型单元网格图

根据设计资料,土体计算参数见表1,其中,土体弹性模量取值根据上海地区对软土特性的试验经验,取为压缩模量的3~5倍^[6]。计算中桩、梁单元主要计算参数见表2。

表2 桩、梁结构单元主要参数

	弹性模量 E/Pa	泊松比 μ	横截面积 A/m^2	极惯性矩 I/m^4	惯性矩 I_y/m^4	惯性矩 I_z/m^4	桩的外圈 长度/m
桩单元	3.0×10^{10}	0.2	0.331 662 5	8.76×10^{-3}	4.38×10^{-3}	4.38×10^{-3}	1.020 5
梁单元	2.1×10^{10}	0.3	0.029 807	2.622×10^{-3}	1.311×10^{-3}	1.311×10^{-3}	-

2.3 计算工况模拟

根据施工工序,计算模型的开挖、支护模拟共分成9个步骤进行,如表3所示。在模拟计算中,首先考虑土体在自重应力下初始应力平衡,然后分步进行开挖和支护,开挖采用NULL命令进行。

表3 逆作法施工数值模拟计算工况

计算步骤	计算工况
1	基坑开挖至-1.0 m,在-2.0 m处设置第1道钢支撑
2	基坑开挖至-3.53 m,在-2.43 m处浇筑顶板结构,回填覆土
3	基坑开挖到-6.77 m,设置第2道钢支撑
4	基坑开挖至-8.13 m,在-7.48 m处浇筑上中板
5	基坑开挖至-12.37 m,设置第3道钢支撑
6	基坑开挖至-14.5 m,在-13.8 m处浇筑下中板
7	基坑开挖至-17.24 m,拆除第2道支撑,架设第4道钢支撑
8	基坑开挖至-20.04 m,拆除第3道支撑,架设第5道钢支撑
9	基坑开挖至-23.44 m施作垫层及底板

3 计算结果与监测结果分析

3.1 围护结构与地表位移的计算结果分析

根据基坑逆作施工全过程,本文分析了图1中监测点Q21点的水平位移以及D19点的地表沉降,如表4所示。

表4 各工况下围护结构最大位移和最大地表沉降

开挖步	Q21点最大水平位移/mm	D19点最大地表沉降/mm
1	0.521 0	2.627 3
2	2.389 3	9.179 3
3	5.843 3	8.195 8
4	7.137 1	8.390 6
5	12.390	11.809
6	14.669	19.983
7	16.053	25.300
8	17.532	31.429
9	18.759	36.978

从表4可以看出:

(1) 在逆作施工过程中,随着基坑开挖深度的增加,围护结构的水平位移逐渐增大,最后开挖步的最大位移量为18.759 mm,在基坑设计允许的变形范围之内^[7](≤ 8 cm)。

(2) 在逆作施工过程中,随着基坑开挖深度的增加,地表沉降逐渐增大,开挖完毕时,监测桩的地表沉降最大值达到36.978 mm,符合上海基坑规范中对地面沉降控制要求^[7](≤ 5 cm)。

3.2 围护结构水平位移计算结果和实测结果对比分析

本文选择了开挖深度为8.13,14.5,23.44 m的三种情况下围护结构Q21点的最大水平位移计算值和

实测值作为对比,如表5所示。

表5 围护结构最大水平位移实测值与计算值比较

开挖深度 /m	水平位移值		误差分析	
	计算值/mm	实测值/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
8.13	7.1371	8.92	-1.7829	19.99
14.50	14.669	12.46	2.209	17.73
23.44	18.759	20.36	-1.601	7.86

从表5可以看出:对于围护结构的水平位移,通过FLAC^{3D}模拟得到结果与监测结果比较接近,最大绝对误差仅为2.209 mm,最大相对误差为19.99%,最小绝对误差为1.601 mm,最小相对误差为7.86%。

图3为开挖至基坑底部23.44 m时,围护结构的水平位移计算值和实测值的比较,其他开挖步的规律基本相似,限于篇幅,在此不一一列出。

从图3可以看出:对于围护结构的水平位移,数值模拟的结果与现场实测的结果比较吻合。当开挖至坑底23.44 m时,用FLAC^{3D}数值模拟的围护结构的最大水平位移为19.11 mm,出现在基坑18.64 m深处,实测的围护结构最大水平位移为20.36 mm,出现在基坑17 m深处。最大水平位移相差0.47 mm,计算结果与监测结果基本一致。

3.3 基坑周围地表沉降计算结果和监测结果对比分析

对于基坑周围的地表沉降,本文也选取了三种工况对坑周的D19监测点进行了分析,三种工况的开挖深度分别为8.13,14.5,23.44 m,表6为三种工况下D19点最大沉降的计算值与实测值比较。

从表6可以看出:对于基坑周围地表沉降,通过FLAC^{3D}模拟得到的结果与监测结果比较一致,最大绝对误差为2.089 4 mm,最大相对误差为19.94%,最小绝对误差为0.572 mm,最小相对误差为1.52%。

表6 基坑周围地表最大沉降实测值与计算值比较

开挖深度 /m	地表最大沉降		误差分析	
	计算值/mm	实测值/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
8.13	8.3906	10.48	-2.0894	19.94
14.5	19.880	18.11	1.77	9.77
23.44	36.978	37.55	-0.572	1.52

3.4 临近大楼桩基位移分析

根据数值模拟计算结果,整理得到各开挖步邻近建筑物东安大楼的桩基的最大侧向位移如表7所示。

表7 桩基侧向位移

开挖深度/m	-1	-3.53	-6.77	-8.13	-12.37	-14.5	-17.24	-20.04	-23.44
桩基最大位移/mm	0.518	2.201	4.112	5.634	9.203	11.276	12.623	13.812	15.133
桩基位置点	B	A	A	A	B	B	B	B	B

注:A、B点桩基位置如图1所示。

由表7可以看出:随着开挖深度的不断增加,桩基的位移表现出逐渐增大的趋势,在开挖至基坑底时,桩基的最大侧向位移为15.133 mm,出现在如图1所示的B桩基;每个开挖步最大侧向位移都出现在离基

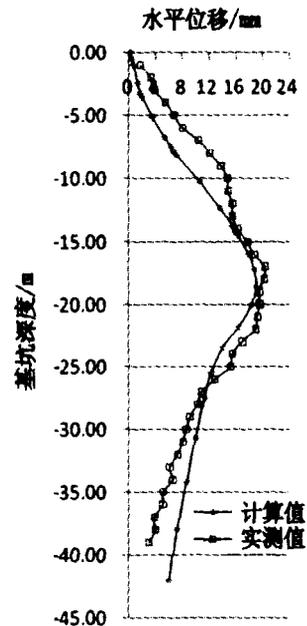


图3 围护结构水平位移比较

坑围护结构最近的A、B桩基上,最大侧向位移值符合工程的要求^[7],说明所采取的施工方法和加固措施是合理可靠的,能够确保周围建筑物的安全。

4 结论

通过对盖挖逆作车站深基坑的计算分析,可得到以下结论:

(1) 采用FLAC^{3D}程序,通过对盖挖逆作车站的分步模拟,根据对围护结构水平位移和地表沉降的模拟计算和现场实测数据对比分析,可以看出,模型计算结果与实测结果基本一致,误差均在20%以内,说明模拟分析中所选取的计算模型和计算参数是合理可靠的。

(2) 对于临近高层建筑桩基和既有车站的深基坑,采用盖挖逆作法施工,随着基坑开挖深度的增加,建筑桩基和围护结构的水平位移以及坑周地表沉降均呈现逐渐增大的趋势,但最大水平位移和地表沉降均在工程变形允许的范围之内。可见,采用盖挖逆作法施工,并辅助适当的加固措施和现场跟踪监测,可确保临近建筑物在基坑施工过程中的安全。

参考文献:

- [1] 刘继国,曾亚武.FLAC^{3D}在深基坑开挖与支护数值模拟中的应用[J].岩土力学,2006,27(3):505-508.
- [2] 张卢明,郑明新,何敏,等.深基坑开挖与锚杆支护FLAC^{3D}数值模拟分析[J].华东交通大学学报,2007,24(5):9-12.
- [3] Itasca Software Comp.Theory and back ground, constitutive model: theory and implementation[P]. User Manual of FLAC^{3D} 3.0,2005.
- [4] 陈育民,徐鼎平.FLAC/FLAC^{3D}基础与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [5] 刘学力,马连丛.FLAC^{3D}在软土基坑开挖计算中的应用[J].路基工程,2008,141(6):166-168.
- [6] 衡山路12号精品酒店基坑开挖对已有结构的影响分析[R].上海:上海交通大学,2008.13.
- [7] 上海市标准.基坑工程设计规程[S].上海:上海市建设委员会,1997.

Numerical Simulation and Measuring Analysis for Deep Foundation Pit of Metro Using Top-down Method

YE Dan¹, DING Chun-lin¹, HOU Jian-feng², ZHU Kai¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute, Shanghai 200092)

Abstract: Aiming at a deep foundation pit of metro in Shanghai, using Mohr-Coulomb model, a numerical simulation on excavation by steps of the deep foundation pit besides existing buildings using top-down method is carried out by FLAC^{3D}. The calculated horizontal displacement of enclosure structure and ground settlement are analyzed. A comparative analysis is made between the calculated results and the measured results, so that rationality of model and parameters can be verified. Finally, the effect of excavation on surrounding buildings is analyzed, which provide reference to design and construction of projects.

Key words: deep foundation pit; top-down method; numerical simulation; measurement; displacement

(责任编辑:王全金)