

基于有限差分法的临近地铁软土深基坑变形分析

何少琼, 张兵, 郭薇

(昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093)

摘要: 在临近地铁隧道的深基坑工程施工过程中, 难免会引起隧道的变形, 如不加以控制将会威胁到隧道的安全。在受到地铁带来的动荷载条件下, 应将该类基坑与传统深基坑分析方法进行区分。本文以昆明市巫家坝片区某深基坑工程为例, 分析临近地铁隧道的深基坑进行开挖对基坑本身和地铁隧道及周边建筑物的影响。首先对研究区地层参数等进行统计, 采用FLAC^{3D}有限差分软件建立了三维数值模型, 分析基坑开挖引起的变形, 提出了设置隔离桩及施作地下连续墙作为支护结构的优化方案。

关键词: 深基坑; 地铁隧道; 三维数值分析; 变形

中图分类号: P642; TU447; TU473 **文献标识码:** A

DEFORMATION ANALYSIS OF SOFT SOIL DEEP FOUNDATION PIT NEAR SUBWAY BASED ON FINITE DIFFERENCE METHOD

HE Shao-qiong, ZHANG Bing, GUO Wei

(School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: During the construction of the deep foundation pit near the subway tunnel, it is inevitable that the tunnel will be deformed, and if not controlled, it will threaten the safety of the tunnel. Under the dynamic load conditions brought by the subway, the analysis methods between this type of foundation pit and the traditional deep foundation pit should be distinguished. Taking a deep foundation pit project in Wujiaaba area of Kunming City as an example, this paper analyzes the impact of the excavation of the near deep foundation pit next to the subway tunnel on the foundation pit itself, the subway tunnel and surrounding buildings. Firstly, the stratigraphic parameters in the study area are statistical, a three-dimensional numerical model is established by FLAC^{3D} finite difference software, the deformation caused by excavation of the foundation pit is analyzed, and an optimization scheme for setting isolation piles and applying underground continuous walls as supporting structures is proposed.

Key words: deep foundation pit; subway tunnel; 3D numerical analysis; deformation

近年来, 城市建设随着综合国力的提升不断加速, 城市用地问题日益突出, 地铁以其方便、快捷、占用空间较小等优点成为解决城市中心交通拥堵及用地紧张的方法之一^[1]。随着我国城市化进程不断加

快, 使得地下工程向着更深更大处发展, 深基坑工程规模不断扩大的同时也面临着更多的施工安全问题, 如深基坑在施工过程中发生塌陷, 或开挖引起周边构筑物产生变形破坏, 从而威胁着深基坑及周

边建筑物的安全。然而,在城市建筑群林立、隧道与管线密集区域进行的深基坑开挖可能会对地铁隧道或地下管线等的受力及变形产生不利影响。

随着基坑建设理论不断创新及计算机软件的高速发展,采用软件模拟代替传统计算的方法被更多工程师熟知并使用。陈卫军,张璞^[2]利用有限元分析软件 Ansys 分析了南浦大桥在列车动荷载作用下的近距离交叠隧道动力响应。李德武和高峰等^[3]使用二维有限元软件,建立了非线性弹塑性模型,模拟分析了不同结构、不同开关及不同联结方式等条件下,列车振动荷载带来的隧道结构及地层间的振动响应。Zhaorui S^[4]等利用 FLAC^{3D} 软件模拟了在砂质地层条件下,深基坑工程的开挖及施工过程中降水措施导致周边土体发生沉降的问题。但常规数值模拟软件不能很好地模拟出地铁动荷载对土层的影响,且软土地区土层的变形特性由于成因及土体颗粒级配等的不同而差异较大。使用三维数值分析能够反映出隧道的空间分布及围护结构的空腔效应。现有的模型尚未将土体与隧道考虑为一个整体,并且在以往的研究中,涉及三维软件应用的工程案例并不常见,多数是以简化后的二维模型作为研究对象,考虑的计算参数较少,与实际误差相对较大,而三维模拟与实际情况较吻合。FLAC^{3D} 有限差分软件可以在模拟地铁动荷载的同时对基坑整体安全性进行分析,是一种更加能准确模拟实际工况的方法。

本文以软粘土为主的深基坑为研究对象,对特殊土泥炭质土的物理力学特性分析及结构性规律研究,进一步探究在地铁带来的动荷载影响下深基坑及周边地表的位移沉降规律,从而提出安全经济的支护结构。使用 FLAC^{3D} 软件进行模拟,得到深基坑在动荷载影响下的水平位移及地表沉降情况,将模拟值与实测值进行对比,产生的变形在允许范围内,不会对围护结构及周边建筑物产生不良影响。

1 工程概况

研究区位于昆明市官渡区滇池附近巫家坝片区,计划用地面积约 11 696.31 m²,规划 3 栋建筑及商业裙房,建筑物主要由 2 栋办公楼 24、33 层及 1 栋商业楼组成。研究区内建筑物设计建造 2 层地下室,根据现场勘察及施工需要绘制基坑平面图,见图 1。场地北侧为规划绿地,红线约 2 m,其下为正在运营的地铁一号线,其特别保护控制线距离本场地用地红线约 17.4 m,距基坑开挖边线约 18.6 m;西侧为宽约 16 m 的在建市政道路,距开挖边线约 20

m,无管线分布;场地南侧规划道路宽度约 30 m,距基坑开挖边线仅为 1.9 m;场地东侧为规划官渡 4 号路,与基坑开挖边线相距约 8.1 m,目前该道路管线已施工完毕,主要为污水管线和雨水管线。

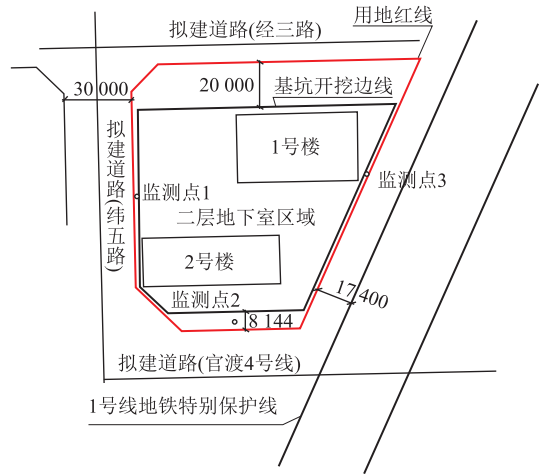


图1 基坑平面示意图

根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-2012),研究区内建筑物深基坑支护结构安全等级应确定为一级,地下水位埋深在 0.4~2.5 m 之间,水位高程 1 889.44~1 889.77 m,地下水位较高。该基坑支护深度为 6.72~9.48 m,场地内地质条件复杂,在地铁影响范围内可至上而下划分为 4 个大层,详见表 1。

表1 土层物理力学参数

土层	质量密度 $\rho/g \cdot cm^{-3}$	泊松比 e	弹性模量 E/MPa	粘聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/^\circ$
① ₁ 杂填土	1.8	0.35	15.00	8.0	15.0
① ₂ 素填土	1.94	0.32	17.76	39.7	13.2
② 粉质黏土	1.87	0.32	16.74	36	12
③ 黏土	1.75	0.31	9.6	28.7	11.1
③ ₁ 粉土	1.85	0.30	10.8	24	15.5
③ ₂ 有机质黏土	1.47	0.31	7.14	22.8	9.7
④ 粉质黏土	1.88	0.32	16.14	37.9	12.1
④ ₁ 粉土	1.97	0.30	22.23	19.7	15.5
④ ₂ 泥炭质土	1.47	0.42	6.42	25.2	9.9

2 基坑施工工序及支护结构比选

2.1 施工工序

该深基坑工程可分为 3 个施工阶段,第一步先进行支护桩和止水桩的施工,同时分层分段开挖第一层内支撑底标高;第二步施工工序为内支撑和立柱桩及工程桩施工,对基坑主体进行分层分段对称开挖土方至坑底标高,进行塔楼位置底板和地下室结构施工以及裙楼位置底板和地下室结构施工;第三步换撑、拆撑及进行回填。

2.2 支护结构比选

为应对各类工程,常规支护主要形式及优缺点如表 2 所示。

本文研究区内存在市政道路,不确定因素较多,东侧为即将通车的官渡 4 号路,路面标高比场地标高高约 2.5 m,该部分采用上部放坡的形式;基坑西侧及北侧为地铁线路,不允许采用锚索、锚杆等地下障碍物对轨道有影响的支护结构;南侧为规划道路,

条件良好,可采用双排桩方案和桩锚支护结构方案,但双排桩方案超越红线较多,而锚索支护对技术要求较高且稳定性较低,不适用于场地狭小工程及深基坑,不宜采取以上方案。内支撑法适用于基坑开挖面积大、支护深度较深的基坑工程,其结构简单、受力明确,且横撑可以有效平衡基坑侧壁受到的土压力及控制支护结构变形,符合国家规范及用地红线要求,最大限度地减小了对周边建筑物的影响。

表 2 基坑支护主要形式及优缺点

基坑支护主要形式	优点	缺点
土钉墙支护	施工方便,快捷,造价低	稳定性较低,不适用于场地狭小工程及深基坑
钻孔灌注桩	支护结构强度、刚度大,有较强的适用性	造价高,止水效果中等,遇不良地质施工速度慢
地下连续墙	刚度和强度极大,止水效果好,可应用于超深基坑	造价较高,施工工艺复杂
钢板桩	造价低,可回收重复使用	刚度及强度相对较小,容易发生较大的变形

将原有的内支撑加钻孔灌注桩的支护设计进行改进,结合该深基坑周边环境限制条件,考虑设置隔离桩及施作地下连续墙作为支护结构的优化方案。在距离基坑壁 5 m 处设置直径为 1 000 mm 的隔离桩,选用施作 0.8 m 地连墙。在基坑与地铁隧道之间加设隔离桩,在减小基坑位移的同时,还能保护盾构隧道不受影响。

2.3 支护方案验证

工况 1 为现场实际支护方案,即原有内支撑和钻孔灌注桩的支护方案;工况 2 为加入动力分析的基坑开挖过程分析;工况 3 为在地铁隧道与基坑相邻侧的土层中加设一排隔离桩;工况 4 将原有钻孔灌注桩支护方式改为施作地连墙。

(1) 坑底抗倾覆稳定性验算

考虑场地内土层分布情况,墙后土体按无粘性土进行简化后计算坑底抗倾覆稳定性验算。根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2011)及《建筑基坑支护技术规程》^[5],按照库伦土压力计算:

$$K_t = \frac{\sum M_{Ep}}{\sum M_{Et}} \quad (1)$$

式中, $\sum M_{Ep}$ 为被动区抗倾覆作用力矩总和(kN·m/m); $\sum M_{Et}$ 为主动区倾覆作用力矩总和(kN·m/m); K_t 为带支撑桩、墙式支护抗倾覆稳定安全系数,取 $K_t \geq 1.250$ 。

经计算,最不利条件下的工况 3 即开挖至坑底时 K_t 为 1.332,满足工程的安全要求。

(2) 坑底抗隆起验算

根据基坑开挖过程,首先计算支护结构底部,由下至上验算每层的坑底抗隆起稳定性,公式如下:

$$K_s = \frac{\gamma_{m2} l_d N_q + c N_c}{\gamma_{m1} (h + l_d) + q_0} \geq K_b \quad (2)$$

$$N_q = (\tan(45^\circ + \frac{\pi}{2}))^2 e^{\pi \tan \varphi} \quad (3)$$

$$N_c = (N_q - 1) \frac{1}{\tan \varphi} \quad (4)$$

结合式(2)、(3)、(4)计算坑底抗隆起稳定性,4 个工况下均满足 $K_s \geq 1.8$,满足规范及安全要求。

3 基坑支护过程中采取的安全措施

施工期间为雨季,为减少地下水对工程的影响,采取止水帷幕+排水沟的组合止水降水方案。具体设计情况如下:300 mm×300 mm 的截水沟设置在在坡顶翻边 1.0 m 处的位置,使地面雨水及生活用水被截断,基坑在接近底部边线部位设置排水设施,即排水盲沟,尺寸为 300 mm×300 mm。沿坑内周边位置设置 9 口砖砌集水井,直径为 1 000 mm,深度为 1 000 mm。使用抽水泵把集水井中积水抽入坑外截水沟,污水经沉淀池处理后,排入市政管网。在基坑土方开挖前,沿基坑周边设置降水井;防止地下水渗漏过快引起地面沉降,设计 4 口回灌井。

在采取止水降水措施后,为了保证基坑的安全性,必须严格控制基坑周边的地面荷载(包括静载和动载),周边禁止堆放材料或行车,一般周边超载取 20 kPa,市政道路荷载取 30 kPa,施工道路荷载取 35 kPa,活动板房荷载取 15 kPa/层。针对列车动载使用激振力函数进行计算^[7-8],公式为:

$$F(t) = k_1 k_2 f(t) = k_1 k_2 (P_0 + P_1 \sin \omega_1 t + P_2 \sin \omega_2 t + P_3 \sin \omega_3 t) \quad (5)$$

式中, P_0 为车轮静载; P_1 为对应行车平顺性控制条件的振动荷载典型值; P_2 为作用到线路上的动力附加荷载典型值; P_3 为轨面磨耗控制条件的振动荷载

典型值; k_1 为大于 1 的相邻轮轨间的叠加系数,一般为 1.2~1.7; k_2 为小于 1 的轨枕间的分散系数,一般为 0.6~0.9; ω_i 为对应车速下不平顺振动波长的圆频率。

根据式(5)及昆明地铁 1 号线 B1 型车厢数据,并采用列车最不利动荷载进行计算可得下式:

$$F(t) = 130.05 + 0.767\sin 13.948t + 2.188\sin 69.741t + 7.001\sin 278.965t \quad (6)$$

4 基坑施工期间周边地表沉降分析

本文采取数值模拟分析对基坑进行建模及三维观测,使用 FLAC^{3D} 有限差分软件,将地铁动荷载以动力分析的方式植入模型中,从而分析在基坑开挖期间受到动荷载影响后基坑周边发生的沉降,基坑围护结构的侧向变形情况。建模时对荷载进行处理:(1)基坑周边已有的建筑物,用均布荷载代替自重;(2)用半波正弦动载处理地铁运营所产生的动荷载。

根据图 1 所示场地环境建模,并按照实际基坑开挖工序及参数选择设置工况。除土体外,根据实际工程中材料使用情况进行设置,不考虑材料的变异性,各参数取值见表 3。根据现场勘测及室内试验所得数据,整理了数值计算所需土体参数(表 1),土体材料中容重与泊松比变化相对较小,可取经验值。

土体本构方程采用摩尔-库伦模型,开挖过程中采用实体单元模拟地层、排桩、地连墙、冠梁和支护桩等,并采用 beam 单元模拟隔离桩等。计算边界取 4 倍开挖深度以外,模型尺寸为 240 m(长)×200 m(宽)×55 m(高),共包含 614 461 个单元,243 763 个节点。为便于建模及简便计算,模型边界条件为四周水平约束,底部刚性约束,上部自由边界。

表 3 各结构计算参数

结构类型	$\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	E/GPa	μ
钻孔灌注桩	23.5	30	0.3
立柱桩	78.5	210	0.25
内支撑	25.0	30	0.3
隧道衬砌	25.0	34.5	0.2

建模后模拟地表总体沉降如图 2 所示。为分析周边地表沉降情况,在基坑与地铁隧道之间布置了 3 个监测点(见图 1 中标号 1,2,3),可以更直观地反映出在地铁动荷载影响下,基坑周边的沉降量的变化趋势。

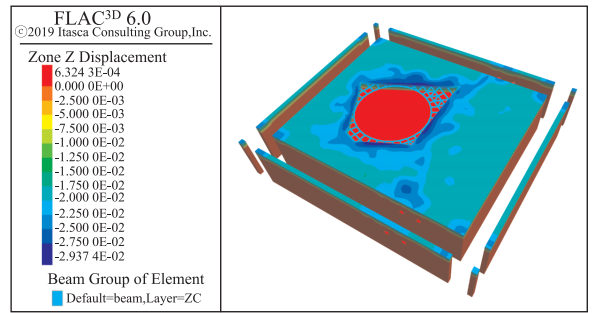


图 2 基坑周边地表沉降

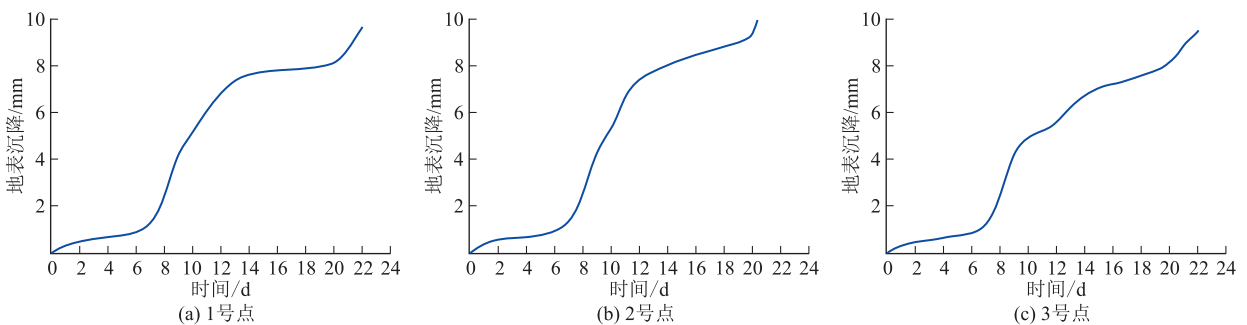


图 3 累积沉降曲线

1 号监测点~3 号监测点在整个施工周期内的沉降曲线如图 3 所示。该基坑工程在整体施工过程中分 3 个阶段进行,从图 3 中可看出,远离地铁隧道侧的 1 号监测点相对近地铁侧的 3 号监测点沉降量偏大,判断主要是由于基坑开挖对土层的影响较大,与实际情况相符。从 3 个监测点的累计沉降曲线来看,当基坑主体开挖至第一道支撑时,即地面以下 2 m 处时基坑周边沉降量较小,在开挖至坑底时沉降

量有明显突变过程,该施工阶段对周边土层的影响较大,也与实际情况相一致。随着开挖深度不断增大,基坑开始排水固结,地表沉降速率增大,同时累计沉降量也在不断增大,但是当内部支撑结构施工完成后,土体变形也逐渐趋于稳定。

从图 3 可知,1 号监测点~3 号监测点的最大累积沉降分别为 9.62 mm、11.75 mm、9.5 mm,根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2001)监测点

的累积值为 30 mm,控制值为 40 mm,3 个监测点数值计算的最大累积沉降均未超过控制范围,故基坑开挖没有安全隐患。

表 4 给出的数据中可以看出,现场实测值与软件模拟值之间最大误差出现在 3 号监测点的第三阶段,误差大小为 6%,在误差允许的合理区间内,所以数值模型建立是有效且精确的。经软件模拟及现场实测数据显示,该深基坑工程施工过程安全,整体稳定性良好,在受到临近地铁动荷载影响后未产生较大变形及沉降,周边建筑物及围护结构不会受到基坑开挖带来的不良影响。

表 4 实测值与数值模拟结果对比

测点编号		1	2	3
阶段 1	实测值	1.1	1.2	1.08
	模拟值	1.3	1.1	1.1
阶段 2	实测值	7.62	8.03	6.68
	模拟值	7.8	8.0	6.8
阶段 3	实测值	9.15	11.07	8.97
	模拟值	9.62	11.75	9.5

5 结论

本文对临近地铁深基坑工程施工技术进行了分析及改进,对基坑沉降变形的模拟分析,取得了如下结论:

(1) 系统地总结了当前深基坑工程支护结构及施工工法的优缺点;对该深基坑工程设计及施工中可能存在的问题,施工工艺及深基坑工程土体参数设计等进行总结,对可使用的支护结构进行优选,得到更为安全及经济的施工方案,即设置隔离桩及施作地下连续墙作为支护结构的优化方案。

(2) 对临近地铁线路进行分析,计算地铁列车动荷载并应用于数值模拟模型中,采用理论和数值

分析相结合的模式对基坑进行监测,使支护结构在动荷载影响下最大位移值能保持在最大变形范围内,更好地指导基坑开挖工序及施工设计,在保证施工过程安全可靠且不会对相邻构筑物产生不良影响的基础上,并达到经济合理的目的。

(3) 基于临近地铁深基坑工程进行模型构建,采用 FLAC^{3D}对深基坑支护结构进行建模,以施工工序为时间轴,动态模拟施工过程,达到施工过程三维化及可视化。

(4) 基坑开挖过程中设置监测点,对土体及围护结构变形进行监控,通过数据的收集及整理及时了解基坑支护结构的受力及位移情况,并根据实际工程数据及数值模拟结果对基坑周边底边沉降值进行对比分析,结果表明该支护方案满足安全及稳定性的要求。

参考文献

- [1] 城市轨道交通 2022 年上半年数据统计和分析[J]. 现代城市轨道交通,2022,(7):116.
- [2] 陈卫军,张璞. 列车动载作用下交叠隧道动力响应数值模拟[J]. 岩土力学,2002,23(6):770-774.
- [3] 李德武. 列车振动荷载的数定分析[J]. 甘肃科学学报,1998,10(2):25-29.
- [4] Zhaorui S, Qiang w, Yan X, et al. . Analysis on influence on metro tunnel of excavation of adjacent foundation pit [J]. Tunnel Construction,2011,31(S1):214-219.
- [5] 中华人民共和国国家标准. 建筑地基基础设计规范(GB50007-2011)[S]. 北京建材工业出版社,2011.
- [6] 李磊,张孟喜,吴惠明. 地铁列车荷载计算方法对盾构隧道动力响应的影响[J]. 上海交通大学学报,2015,49(7):1030-1034.
- [7] 梁波,罗红,孙常新. 高速铁路振动荷载的模拟研究[J]. 铁道学报,2006,(4):89-94.
- [8] 韩学伟,王君,王高彦. 基坑开挖对临近既有铁路的影响分析[J]. 中外公路,2014,34(6):38-41.

作者简介: 何少琼(1999—),女,硕士研究生,研究方向为工程地质及水文地质。E-mail:2929734755@qq.com

通讯作者: 张兵(1965—),男,博士,教授,研究方向为地质环境影响评估。E-mail:zhangbing@kmust.edu.cn