

地铁站基坑开挖施工对临近地层影响的数值模拟分析*

Numerical Simulation Analysis of the Influence of Subway Station Foundation Pit Excavation on Adjacent Stratum

罗 鹏

(杨凌职业技术学院 交通与测绘工程分院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 基于某地铁站基坑的开挖工程, 在考虑支护结构与土层之间相互作用前提下, 采用 ABAQUS 软件进行二维平面有限元建模, 通过计算分析施工过程中基坑周边地表沉降、支护连续墙水平位移与弯矩的变化, 同时对比分析实际监测结果与数值计算结果。结果表明: 开挖过程对邻近地表产生的影响较小, 位移和沉降计算值均处于相关规范的要求范围内; 由数值模拟计算的基坑周边地表最大沉降的计算值明显小于监测值, 支护结构的最大水平位移大于监测值; 采用二维有限元计算结果与实际监测数据较为接近, 验证了数值模拟的有效性。

关键词: 基坑开挖; 隧道; 沉降; 数值模拟

中图分类号: TU41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 04-0015-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.04.003

LUO Peng

(Yangling Vocational and Technical College's Traffic and Mapping Engineering Branch, Yangling 712100, China)

Abstract: Based on a subway station foundation pit excavation project, considering the interaction between supporting structure and soil condition, using ABAQUS software to two-dimensional plane finite element modeling, through calculation and analysis in the construction of foundation pit supporting continuous wall surrounding the surface subsidence, horizontal displacement and bending moment of change, at the same time comparative analysis of the actual monitoring results and the numerical results. The results show that the excavation process has little influence on the adjacent surface, and the calculated values of displacement and settlement are within the requirements of relevant specifications. The calculated value of the maximum surface settlement around the foundation pit by numerical simulation is obviously smaller than the monitored value, and the maximum horizontal displacement of the supporting structure is larger than the monitored value. The two-dimensional finite element calculation results are close to the actual monitoring data, which verifies the effectiveness of the numerical simulation.

Keywords: foundation pit excavation; tunnel; settlement; numerical simulation

0 引言

随着我国城市建设的快速发展, 采用隧道进行交通连接的应用日益增加, 对隧道的设计要求也逐渐提高^[1]。近年来, 由于开挖施工引发的隧道失稳的事故屡见不鲜^[2], 隧道开挖施工导致相邻建筑的开裂造成了重大安全隐患^[3], 开展基坑

* 基金项目: 陕西省职业技术教育学会 (编号: SGKCSZ2020-549)。

作者简介: 罗鹏 (1984—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 道路与铁道工程。

岩土力学

开挖对邻近地表建筑物的影响对于提高隧道安全等级有重要的现实意义。目前,研究隧道结构位移与变形最可靠的方式是模型试验,但模型试验对试验的场地、设施等要求较高,代价昂贵,不仅需要耗费大量的人力物力,试验过程也存在一定的偶然性^[4]。随着计算机数值模拟技术的迅速发展与分析方法的不断完善,有限元软件被广泛应用于各种建筑结构变形分析当中^[5-7]。

在城市建筑与地铁站营建过程中,国内外类似地层的基坑工程发生坍塌等重大安全事故时有发生。因此,很多学者基于地铁站基坑开挖过程的特点对相关地层的变形开展数值模拟研究,重点分析基坑开挖对地层变形、沉降的影响^[8-9]。然而,不同地区地质条件的复杂性和基坑施工工况的多变性使得已有的研究成果无法形成统一的规律,对地铁站施工过程的工况开展相应的数值模拟研究,分析不同建模方法和材料参数对指导地铁站基坑安全建设有重要现实意义^[10]。福州市是我国东南沿海地区的一个经济较为发达的城市,目前该市的地铁线路规划已经进入快速建设期。在福州市地铁沿线的地层中广泛分布着深厚的砂性土层,砂性土的工程性能有较为明显的不稳定性。

目前,关于地铁站基坑开挖施工对临近地表沉降变形的研究已经取得了一系列的学术成果^[11-12],但是就福州地区砂性土地层的基坑开挖数值模拟的相关分析还比较罕见。因此,本文基于 ABAQUS 软件开展福州市某地铁站基坑开挖实际工况的二维有限元数值模拟,重点关注施工过程中对站点周边地表沉降、支护连续墙侧向水平位移与弯矩的变化。

1 分析方法

1.1 工程概况

数值模拟研究基于福州某地铁站的实际工况。该地铁站车站起点里程 DK7+978.234,有效站台中心里程 DK8+163.706,站点里程 DK8+370.406,总长 392.172 m。地铁站为地下三层岛式站台车站,采用半盖挖法施工(部分采用明挖法施工);

车站两端区间隧道均采用盾构法施工。车站主体结构为地下二层双柱三跨钢筋混凝土框架结构,标准段宽度为 22.9 m,小里程宽度为 28.75 m。地下结构的围护结构(围护桩、冠梁)按永久构件设计,其他围护结构构件按照临时构件设计。按荷载效应基本组合进行承载能力计算时重要性系数取 $\gamma=1.1$,其他构件取 $\gamma=1.0$ 。车站主体基坑围护桩段安全等级为一级。地面最大沉降 $<0.15\%H$,且不大于 30 mm;围护结构最大水平位移 $<0.15\%H$,且不大于 30 mm。车站结构需考虑地下水浮力的影响,进行抗浮验算。抗浮安全系数在不计入侧壁摩阻力时取 1.05,计入侧壁摩阻力时取 1.15。

进行数值模拟的地铁站围护结构剖面设计方案如图 1 所示。

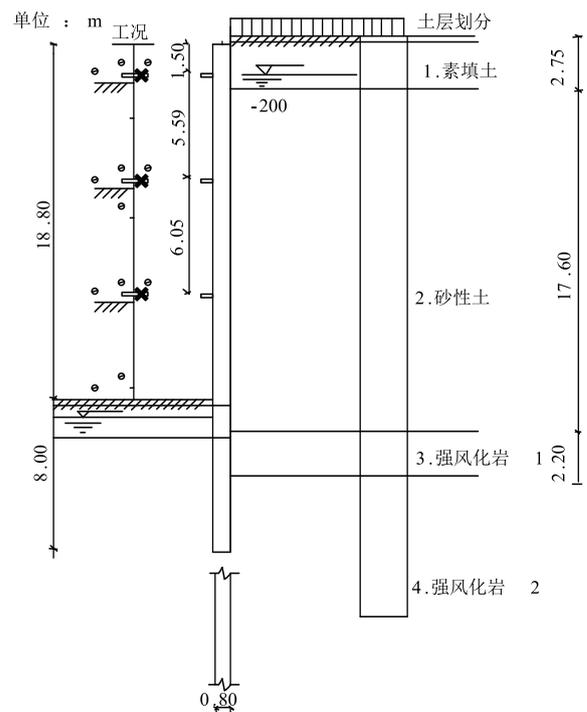


图 1 地铁站标准段的地层剖面

Fig.1 Stratigraphic section of standard section of metro station

根据该场地的钻探结果显示,地铁站的地层剖面可以被简化为素填土、砂性土以及强风化岩,共 3 层,三个不同土层的深度分别为: 2.75 m、17.6 m 和 46.5 m。地铁站基坑的主体处于砂性土中,依据不同土层的力学指标推荐值进行数值模拟计算。土体本构模型选取为 ABAQUS 自带的

Mohr-Coulomb 模型，素填土、残积土和强风化岩分别对应的编号为 1#、2#和 3#，不同土层的模型参数如表 1 所示。

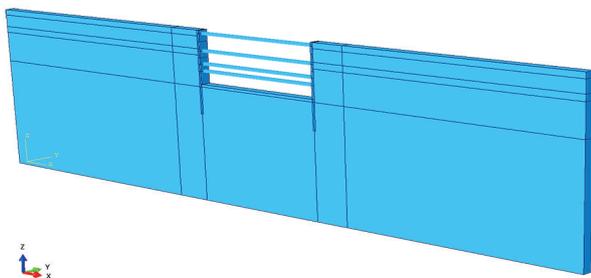
表 1 数值模型的材料参数汇总

Table 1 Summary of material parameters of numerical model

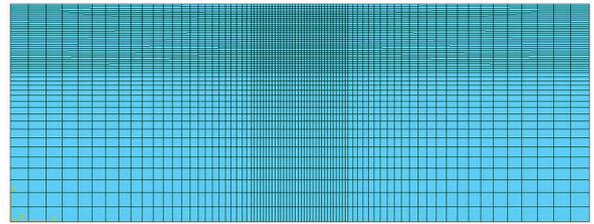
地层	重度 / (kN/m ³)	回弹模量 /MPa	泊松 比	内摩擦 角/°	黏聚力 /kPa	剪胀角 /°
1#	18.0	160	0.30	7.0	15.0	2
2#	18.2	110	0.30	20.8	42.5	4
3#	19.0	168	0.30	20.0	34.0	3
排桩	25.0	2050	0.20	—	—	—
横撑	20.0	2350	0.20	—	—	—

1.2 有限元模型的建立

采用 ABAQUS 计算软件对该工程开挖工况进行模拟。模拟前选取地铁站 1 个典型基坑截面，进一步开展地铁开挖施工模拟，对地铁风化土地层的力学参数进行比选分析。选取地铁站小里程端围护结构剖面为计算区域，建立三维几何模型。基坑宽 38 m，深 18.5 m，基坑采用连续墙支护形式，墙厚 1.0 m，第一排横撑水平间距 6.0 m，第二、三、四排横撑间距 3.0 m，墙高 26.8 m。为消除边界条件对计算结果的影响，基坑外围模型长度大于开挖深度的 5 倍，模型长 160 m，高 50 m，厚度方向取为 3 m，第一排横撑的弹性模量按照 3 m 间距进行等效折减。基坑边缘两侧各有宽 12 m 的 35 kPa 均布超载。几何模型的边界条件为底部固定位移边界，前后左右侧面均为水平位移约束、垂直位移自由的边界。网格划分采用的土体单元为三维应力单元 C3D8，连续墙采用 S4R 单元模拟，横撑采用梁单元 B31。通过 embedded 命令将连续墙嵌入到土体中，横撑与连续墙之间采用 MPC 的 tie 约束命令。基于 ABAQUS 的有限元计算几何模型及网格划分见图 2 所示。



(a) 几何模型



(b) 网格划分

图 2 基坑开挖的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of foundation pit excavation

2 试验结果与讨论

2.1 基坑开挖的数值模拟结果

本数值模拟计算重点关注基坑开挖对周边地表沉降、支护连续墙侧向水平位移与弯矩。图 3 为基坑开挖完成，横撑拆除后的基坑土体的竖向位移云图，图中的云图数值与位移大小相对应。从图 3 可以看出，基坑开挖面处的回弹模量在基坑中部最大，随着开挖的进行，基坑回弹量越来越大，第 4 级开挖后续拆横撑对坑底的隆起影响不大。

图 4 为施工过程中基坑外围地表沉降分布图，可以看出基坑开挖对与基坑外围 25.0 m 范围内的地表位移有较大影响，基坑外围 18 m 左右范围的地表沉降尤为显著。在图 4 中，当最后的第一、二层横撑拆除后，距基坑 6.0 m 左右的位置沉降最大，第四层横撑拆除后，最大沉降为 12.8 mm 左右。图 5 为施工过程中围护墙体水平位移的变化情况，随着开挖的深度增加与横撑的设置，墙体的变形峰值逐渐下移，在第一层横撑拆除前，连续墙在顶面处的水平位移基本为 0，拆除第一层横撑后，迅速增大为 8 mm 左右，开挖面以上连续墙发挥主要承载作用，只在开挖面以上存在一个水平位移极值，最后墙体水平位移峰值稳定在基坑 8.35 m 深度处，为 23.3 mm。图 6 为施工过程中连续墙弯矩分布图，可以发现，施工过程中连续墙的在基坑底部以下的分布型式变化不大，而基坑上部由于基坑开挖的深度、横撑以及刚性铰的设置，峰值位置不断变化，从总的包络线来看，峰值正弯矩为 54.7 kN·m，深度 15.15 m，峰值

岩土力学

负弯矩为 97.4 kN · m，深度 19.20 m。

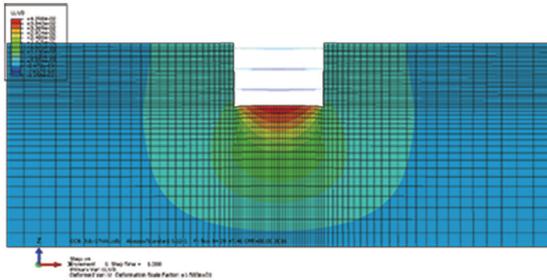


图 3 基坑土体的总体竖向位移云图
Fig. 3 Cloud diagram of overall vertical displacement of foundation pit soil

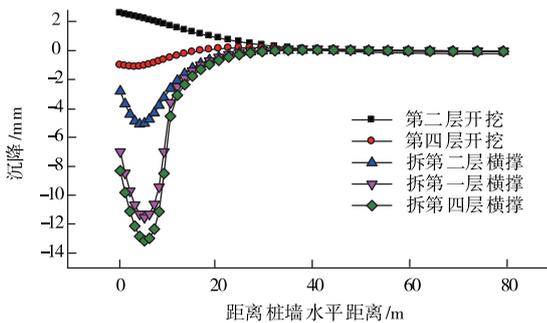


图 4 施工过程中基坑外围地表沉降分布
Fig. 4 Surface settlement distribution around foundation pit during construction

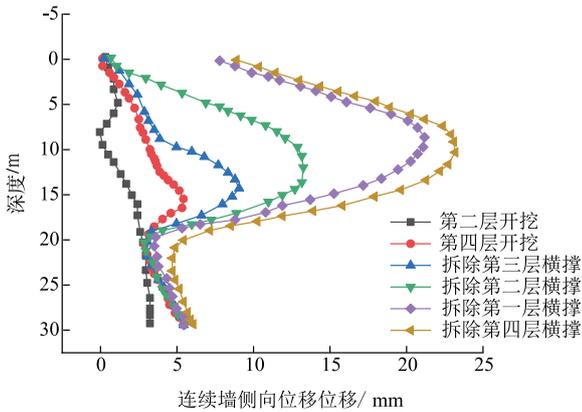


图 5 施工过程中连续墙侧向位移分布
Fig. 5 Lateral displacement distribution of diaphragm wall during construction

总体上，开挖过程对邻近地表产生的影响较小，位移和沉降计算值均处于厘米级范围内，符合相关规范的要求范围内。随着基坑深度的增加，连续墙的受力与变形逐渐增大，在内支撑设置处桩身剪力分布出现突变。分析其主要原因在于，基坑中下段第二道支撑与第三道支撑间距较大，地基的土层主要为砂性土，当基坑开挖至这一土

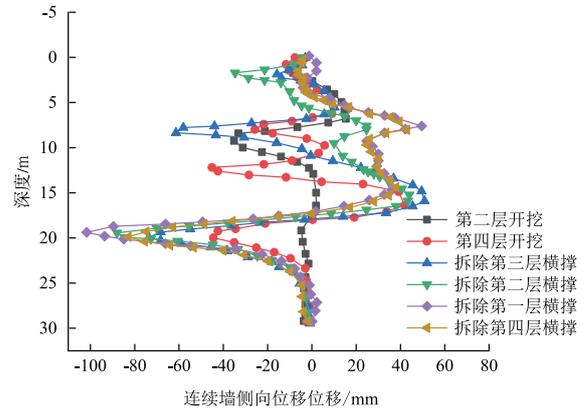


图 6 施工过程中连续墙弯矩分布
Fig. 6 Bending moment distribution of diaphragm wall during construction

层时，连续墙结构后的土体产生了较大的主动土压力。

2.2 模拟结果与监测数据的对比

在基坑开挖时，选取该站点附近的 6 个地表沉降监测点进行监测。图 7 为各测点的桩体水平位移监测曲线。基于 ABAQUS 有限元数值计算的结果为基坑附近最大沉降 24.8 mm，支护桩墙水平最大位移为 24.0 mm，与监测数据最大值的对比结果见表 2 所示。根据模拟结果与监测数据的结果对比，发现基坑开挖过程中的地表变形量级都在厘米级别，基坑附近最大沉降监测值大于有限元数值模拟的结果。

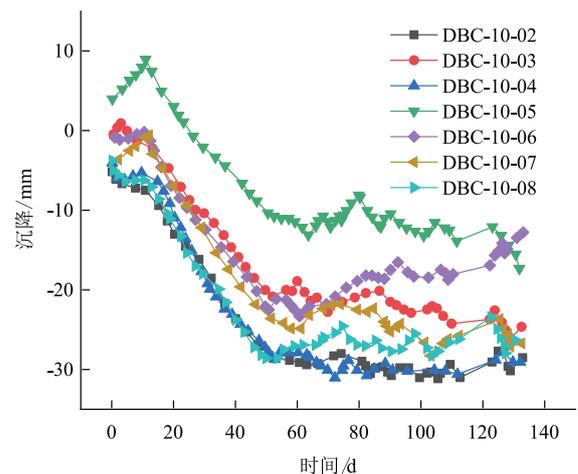


图 7 沉降监测曲线
Fig. 7 Settlement monitoring curve

究其原因，一是有限元软件中土体采用摩尔-库伦弹塑性本构模型，弹性部分由弹性模型定义，

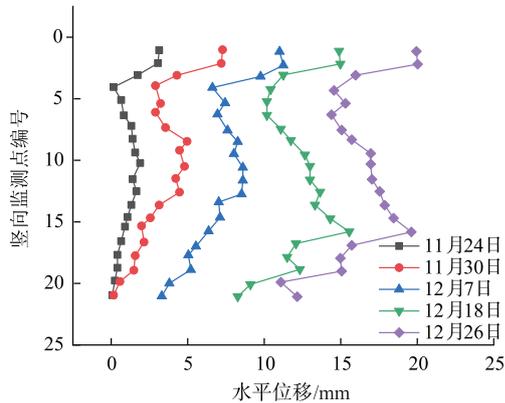


图 8 桩体水平位移监测曲线

Fig. 8 Horizontal displacement monitoring curve of pile body

地应力平衡后在模拟土体开挖卸荷时，会存在变形回弹的现象，抵消了一部分的沉降变形，虽然弹性模量取为回弹模量能有效降低一部分回弹变形，但用摩尔-库仑弹塑性本构模型模拟土体的卸荷变形仍然与土体的实际卸荷变形有差别^[13]；二是通过 embedded 命令将排桩嵌入到土体中，这与实际的桩土之间的相互作用有差别^[14]。另外，可能由于施工期间基坑开挖机械的振动、周围扰动荷载的施加使得监测变形增大，数值模拟的变形没有考虑这一部分影响。因此，总体上表现出有限元数值模拟计算得到的基坑附近沉降变形小于监测值。

相对而言，桩体水平最大变形及其位置，模拟结果与监测数据的吻合效果要稍好于基坑附近的沉降，基于有限元数值模拟结果能够基本反映基坑开挖过程中围护结构的变形发展趋势。

表 2 模拟结果与监测数据对比

Table 2 Comparison between simulation results and monitoring data

数据来源	基坑沉降		桩体位移	
	最大值 /mm	距基坑边缘 位置/m	最大值 /mm	距顶端距离 /m
模拟	25.8	2.9	24.0	5.0
监测	29.3	4.1	19.9	-

3 结论

本研究采用 ABAQUS 有限元数值模拟软件进行地铁站基坑开挖过程对周边地表变形的分析，通过建立有限元模型，得出以下结论：

(1) 总体上，基坑在开挖过程对邻近地表产生的影响较小，地表的位移和沉降计算值均处于

相关规范的要求范围内。

(2) 当基坑开挖至砂性土这一土层时，连续墙结构后的土体产生了较大的主动土压力，从而使得桩身剪力分布出现突变。

(3) 在根据模拟结果与监测数据的结果对比，发现基坑开挖过程中的地表变形量级都在厘米级别，基坑附近最大沉降监测值大于有限元数值模拟的结果。

(4) 数值模拟结果与监测数据结果存在一定差异，这是因为计算采用的弹塑性本构模型不能很好地反映土体真实特性。

参 考 文 献

- [1] 戴轩, 郑刚, 程雪松, 等. 基于 DEM-CFD 方法的基坑工程漏水漏砂引发地层运移规律的数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38 (2): 396-408.
- [2] 郑刚, 朱合华, 刘新荣, 等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制 [J]. 土木工程学报, 2016, 49 (6): 1-24.
- [3] 陈昆, 闫澍旺, 孙立强, 等. 开挖卸荷状态下深基坑变形特性研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (4): 1075-1082.
- [4] 林杭, 陈靖宇, 郭春, 等. 基坑开挖对邻近既有隧道变形影响范围的数值分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2015, 46 (11): 4240-4247.
- [5] 刘方梅. 深基坑开挖对邻近地铁隧道的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [6] 王金艳. 舟山近海软土深基坑三维数值分析及本构模型选择研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [7] 张治国, 徐晨, 刘明, 等. 考虑基坑降水开挖影响的运营隧道变形分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44 (2): 241-248.
- [8] 程雪松, 郑刚, 邓楚涵, 等. 基坑悬臂排桩支护局部失效引发连续破坏机理研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37 (7): 1249-1263.
- [9] 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): 391-395.
- [10] 黄兆纬, 黄信, 胡雪瀛, 等. 基坑开挖对既有地铁隧道变形影响及技术措施分析 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (S2): 381-385.
- [11] 帅红岩, 陈少平, 曾执. 深基坑支护结构变形特征的数值模拟分析 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (S2): 374-380.
- [12] 吴朝阳. 地铁车站基坑施工对邻近建筑物影响的研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [13] 宋广, 宋二祥. 基坑开挖数值模拟中土体本构模型的选取 [J]. 工程力学, 2014, 31 (5): 86-94.
- [14] 郑刚, 程雪松, 刁钰. 基坑垮塌的离散元模拟及冗余度分析 [J]. 岩土力学, 2014, 35 (2): 573-583.