

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.06.024

深基坑开挖过程中土钉支护结构的 变形与受力特性分析

杨继红, 丁 鹏, 杨兴隆

(华北水利水电大学 地球科学与工程学院, 河南 郑州 450046)

摘 要: 基坑开挖过程中的变形在工程中有很重要的意义。以郑州市某深基坑工程为例, 利用岩土数值分析软件 FLAC^{3D} 对开挖支护过程进行了模拟, 深入分析了基坑位移场分布规律以及土钉支护结构的受力特性, 结合现场监测资料对比分析, 结果表明: 随着基坑开挖的越深, 坡顶土体向基坑内侧移动, 开始偏移的速率快, 逐渐变得平稳, 最后趋于稳定; 随着基坑开挖的越深, 坡顶的隆起逐渐变为沉降, 坡顶竖向位移速率也是由快趋于稳定; 开挖完成后, 第四排土钉轴力值最大, 位置在基坑中下部, 此处也是基坑侧壁位移最大的部分。

关键词: 深基坑; 土钉; 受力特性; 数值模拟; 现场监测

中图分类号: TU470+.3

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)06—0133—04

Deformation and Stress Characteristics Analysis of Soil Nailing Support Structure During Deep Excavation

YANG Jihong, DING Peng, YANG Xinglong

(School of Earth Science and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450046, China)

Abstract: The deformation of foundation pit during excavation is one of the most important issue in engineering. In this paper, a deep foundation pit engineering in Zhengzhou is taken as an example, the geotechnical numerical analysis software FLAC^{3D} is used to simulate the process of excavating and supporting. And it is also used to analyze the foundation pit displacement field distribution and the mechanical characteristics of soil nailing structure, combined with field monitoring data analysis. The results show that: as the depth of foundation pit excavation increases, the soil at the top of the slope moves towards the inside of the foundation pit. The displacement rate is faster at the beginning, then gradually becomes slower and finally tends to be stable. With the increasing depth of foundation pit excavation, the uplift of slope top gradually begins to subside, and the vertical displacement rate of slope top also tends to be stable. After the excavation stops, the axial force value of the fourth row of soil nailing is the largest, which is located in the lower part of the foundation pit and is also the part with the largest displacement of the side wall of the foundation pit.

Keywords: deep excavation; soil nailing; mechanical characteristics; numerical simulation; field monitoring

随着我国城市化进程的加快,深基坑的稳定性问题逐渐成为影响施工安全性问题的热点。土钉墙作为一种比较传统的支护形式在我国有着很广泛的运用,有可靠度高、经济效益高和施工快速简便的优

点^[1-3]。经过近些年的发展,为确保深基坑工程施工的安全,运用数值模拟方法模拟基坑的开挖过程是一种有效、可靠的方法^[4-7]。庞晓明等^[8]通过模拟计算得出,土钉中的内力与其位置有较大的相关

收稿日期:2019-08-21

修稿日期:2019-09-16

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41102203);河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目(2014GGJS-067)

作者简介:杨继红(1976—),女,河南巩义人,博士,教授,主要从事地质工程方面的教学和科研工作。E-mail:yjh04616@126.com

性;张尚根等^[9]通过运用 FLAC^{3D}分析得到土体地表位移随着开挖深度的变化而变化;黄智国^[10]运用有限差分软件 FLAC^{3D}分析得出,由于支护结构对土体的约束作用,最大水平位移不一定发生在基坑顶部,而有可能发生在距基坑底部一定距离处;马平等^[11]收集了详细的组合支护结构的监测数据,对土钉轴力随着开挖阶段的变化规律进行了总结。朱彦鹏等^[12]通过假定基坑开挖产生的土压力由土体、土钉、预应力锚杆三者共同承担,来计算土体在承受所分担的土压力和外荷载的条件下产生的侧移。

总的来说,前人在基坑支护结构研究上有了很大收获,但是目前少有对开挖过程中支护结构的分析。本文运用有限差分软件 FLAC^{3D}模拟计算郑州市某深基坑工程的分步开挖支护过程,对其位移场和土钉轴力进行分析,对比分析现场监测资料,得出整个开挖过程位移场和土钉轴力的变化规律,并指出位移与轴力变化之间的关联,为类似工程提供理论依据。

1 工程概况

郑州某拟建大楼建设总用地面积约 16 404.24 m²,总建筑面积约 20 500 m²,其中地下约 15 000 m²,地上约 5 500 m²。建筑层数为地下 2 层,地上 2 层。基坑平面图如图 1 所示。

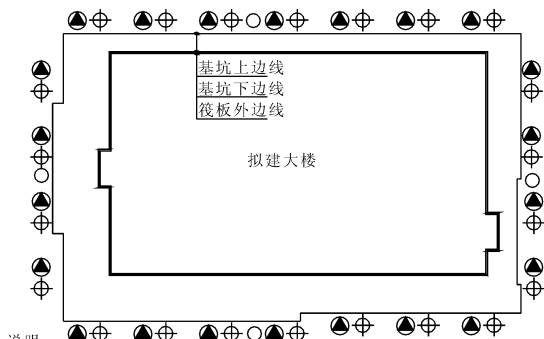


图 1 基坑平面图

拟建场地南、北、西侧均为空地,东侧临近街道,整体环境评价为良好。该工程拟建场地地貌单元为黄河冲积平原,无不良地质作用,场地部分表层土已清理。根据钻探、标准贯入试验,结合室内土工试验分析结果,场地 50.0 m 深度内地层按其成因类型、岩性及工程地质特性将其划分为 7 个工程地质单元层,具体分层详见表 1。

表 1 土层基本物理参数表

①土层	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	C/kPa	$\varphi/(\text{°})$
②细砂	18.5	0.0	23.0
③粉质黏土	19.6	18.9	14.8
④细砂	18.5	0.0	26.0
⑤细砂	19.0	0.0	28.0
⑥粉土	20.4	15.7	22.7
细砂	19.2	0.0	30.0
⑦粉质黏土	21.0	20.3	16.7

2 基坑支护设计和监测方案

2.1 基坑支护设计

基坑支护设计方案从安全、经济、工期等角度考虑,结合郑州地区场地工程特点,根据《建筑基坑支护技术规程》^[13](JGJ 120—2012)规定,考虑基坑周边环境,本工程采用土钉墙支护,基坑安全等级为二级,侧壁重要性系数为 1.0。北侧基坑支护图详见图 2。

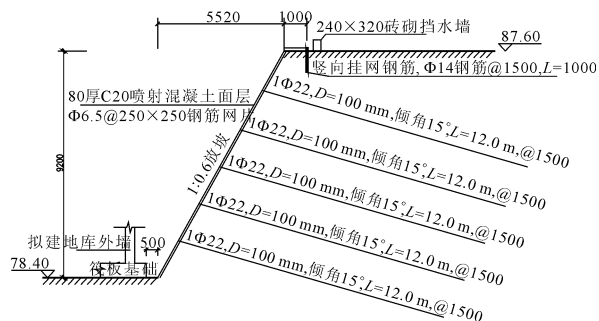


图 2 基坑支护结构剖面图(尺寸标注的单位:mm)

2.2 监测方案

本基坑工程根据《建筑基坑工程监测技术规范》^[14](GB 50497—2009)对边坡顶部水平位移、竖向位移、深层水平位移、地下水位四项进行监测。

变形控制监测报警值:(1)围护结构坡顶水平位移、沉降变化速率 2 mm/d 或连续 3 d 变化速率超过 1.4 mm/d,水平位移变化累计值 40 mm,沉降变化累计值 30 mm;(2)土体深层水平位移变化速率 2 mm/d,累计值 45 mm。

3 土钉支护结构的变形分析

3.1 建立模型

采用摩尔-库仑模型建立土体模型,采用空间直角坐标系, x 轴为南北方向, y 轴为东西方向, z 轴为竖直方向,向上为正。本模型选择基坑工程北侧一个剖面进行模拟分析,模型尺寸分别选取为长度

60 m,宽度 15 m,深度 30 m。模型土体采用实体单元模拟,土钉采用 cable 单元模拟,喷射混凝土面层采用 liner 单元模拟^[15-17]。

开挖支护模拟分为六个步骤,基坑开挖深度为 9.2 m,按 1:0.6 进行放坡开挖,整个施工过程见表 2。

表 2 模拟开挖支护工况

工况	开挖深度 /m	土钉位置深度/m	土钉长度 /m
工况一	0.0~2.0	1.5	12
工况二	2.0~3.5	3.0	12
工况三	3.5~5.0	4.5	12
工况四	5.0~6.5	6.0	12
工况五	6.5~8.0	7.5	12
工况六	8.0~9.2	—	—

3.2 开挖支护过程中土体水平位移分析

工况 1、工况 2 完成后,由于土体先前的平衡状态被破坏,在支护完成后达到新的平衡状态,基坑坡顶位移会出现向基坑开挖面外侧移动,最大位移出现在基坑土体的中下部;工况 3、工况 4 完成后,由于开挖的深度越来越深,土压力也随之增大,基坑坡顶位移向基坑内侧移动,但位移量依然偏向基坑外侧,土体最大位移出现在基坑土体的中下部;工况 5、工况 6 完成后,基坑坡顶位移向内侧移动,位移量偏向基坑内侧,最大位移出现在基坑侧壁中偏下部分。根据水平位移云图可以看出,整个模拟过程中,水平位移在基坑变形监测安全范围内,最大的位移为 15.3 mm。

3.3 开挖支护过程中竖向位移分析

基坑外侧的沉降变化不明显,最大沉降量为 2.9 mm;而基坑底部隆起变化则比较明显,工况 1、工况 2 开挖支护后,基坑底部土体隆起为 16.3 mm 左右;工况 3、工况 4 开挖支护后,基坑底部土体隆起为 23.4 mm 左右;工况 5、工况 6 开挖支护后基坑底部土体隆起为 27.6 mm。随着基坑的开挖,沉降量和隆起量都随着远离支护结构逐渐增大,说明支护结构能有效的控制土体的竖向位移。

3.4 开挖支护过程中轴力的动态变化分析

在开挖过程中土钉轴力呈现出“中间大两头小”的分布。工况 2 可以看出,第一排土钉受力大于第二排,此时基坑侧壁顶部水平位移最大,土钉为被动受力,变形越大,土钉的轴力也就越大,最大轴力达到了 3.5 kN;工况 3 可以看出,第三排土钉轴力最大,前两排土钉轴力也有较为明显的增加最大

轴力达到了 4.6 kN;工况 4、工况 5、工况 6 与前三步开挖变化基本一致,土钉轴力由中间向两边逐渐减小,且随着基坑开挖的越深变得越大。开挖完成后,土钉轴力最大值到了 44.8 kN。详见图 3。

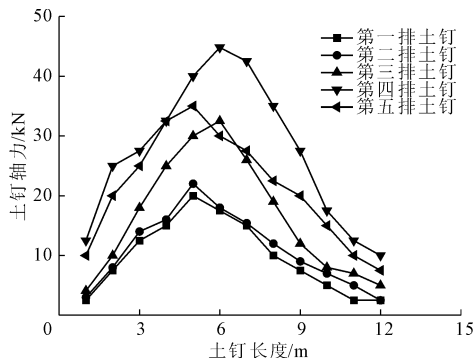


图 3 开挖完成后土钉轴力分布图

开挖完成后,第四排土钉的轴力最大,而基坑侧壁的最大位移也位于基坑侧壁的中下部,与土钉被动受力的特性相吻合。详见图 4。

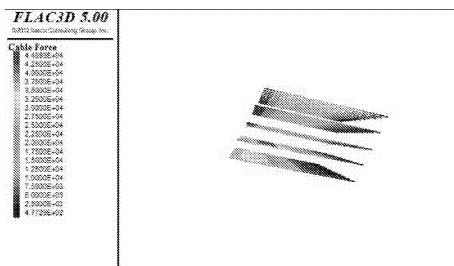


图 4 工况 6 土钉轴力云图

4 数值模拟结果与监测数据对比分析

4.1 坡顶水平位移的分析

选取基坑模拟剖面的实际监测点数据与模拟数据对比,两者的数值差距不大,变化趋势也很接近,且在警报值以下,说明坡顶的侧向变形是安全的。详见图 5。

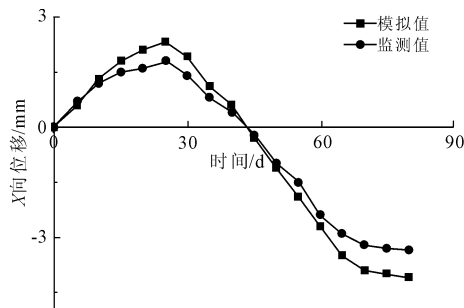


图 5 坡顶水平位移变化曲线

基坑侧壁监测值最大位移为 14.2 mm,基坑侧

壁模拟值最大位移为 15.3 mm,二者差距为 1.1 mm,现场未出现施工事故,均符合基坑变形监测规范,说明模拟该工程选取的参数是合理的。

4.2 竖向位移的分析

选取基坑模拟剖面的实际监测点数据与模拟数据对比,发现模拟值略大于监测值,且变化均在警报值范围之内,坡顶竖向位移变化曲线见图 6。

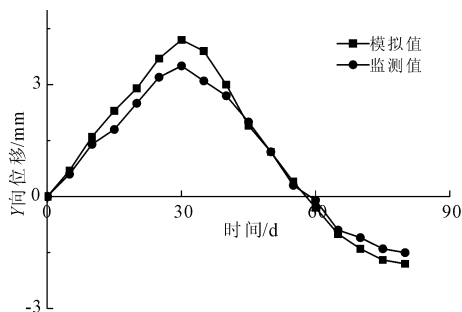


图 6 竖向位移变化曲线

综合水平竖向位移分析,模拟值与实际监测值差距不大,且都在该工程变形警报值范围之内。

5 结 论

(1) 由于土体卸荷,基坑底部土体向基坑内侧移动,顶部则向基坑外侧有微小移动。随着基坑开挖的越深,土压力的增大,和砂土特性的影响,坡顶开始向基坑内侧移动,开始偏移的速率快,到最后变得平稳,趋于稳定。

(2) 由于砂土的抗隆起性较弱,基坑开挖初始阶段,会导致坡顶竖向位移会有微小隆起,随着基坑开挖的越深,坡顶的隆起逐渐变为沉降,最后变化趋于稳定。

(3) 随着基坑开挖的越深,理论滑裂面以内的土体越多,土压力也逐渐增大,土钉轴力也随之增大,轴力分布大致为“中间大,两头小”,土钉轴力最大值在基坑中下部,此处也是基坑侧壁位移最大的部分。

参考文献:

[1] 陈肇元,崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用[M].

2 版. 北京:中国建筑业出版社,2000.

- [2] 张宏刚. 含水率变化对西安地区深基坑土钉支护稳定性的可靠度影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(4): 32-37.
- [3] 范海涛,张涛,赵洲源,等. 砂石桩-土钉墙组合支护结构的变形及稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(4): 118-121.
- [4] 俞海波,王红雨,王卫东,等. 排桩与土钉墙联合支护基坑变形数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(3): 96-99, 105.
- [5] 张凯,张钦喜,张启兵. 土钉桩锚组合支护结构变形的数值分析研究[J]. 岩土工程技术, 2016, 30(4): 180-185.
- [6] 贾毅,马冲,张营营,等. 基于数值模拟的深基坑不同组合支护形式对比分析[J]. 建筑结构, 2016, 46(S2): 550-554.
- [7] 宋享桦,谭勇,刘俊岩,等. 拉拔作用下锚杆复合土钉支护协同作用细观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 38(3): 591-605.
- [8] 庞晓明,沈水龙,许焯霜. 复合土钉支护基坑的工程实例分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S1): 1838-1841.
- [9] 张尚根. 复合土钉墙支护 FLAC3D 数值模拟与实测结果对比[J]. 岩土力学, 2008, 29(S1): 129-134.
- [10] 黄智国. 土钉桩锚联合支护分步开挖基坑应力一应变的数值分析[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2017.
- [11] 马平,孙强,秦四清. 桩锚与土钉墙联合支护土钉轴力监测[J]. 工程勘察, 2008(1): 20-22.
- [12] 朱彦鹏,郭亚峰,张康康. 预应力锚杆复合土钉墙的侧向变形[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(3): 110-114.
- [13] 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京:中国建筑业出版社, 2012.
- [14] 建筑基坑工程监测技术规范: GB 50497—2009[S]. 北京:中国计划出版社, 2009.
- [15] 彭文斌. FLAC3D 实用教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
- [16] 陈育民. FLAC3D 基础与工程实例[M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社, 2013.
- [17] 王涛. FLAC3D 数值模拟方法及工程应用[M]. 北京:中国建筑业出版社, 2015.