

Deformation Law of Deep Foundation Pit of Subway Station in Busy Traffic Section

Lei Yang^{1*}, Wenping Zhao¹, Tengfei Yan², Baoguo Chen^{2#}, Qingda Meng²

¹Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu Sichuan

²Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan Hubei

Email: 907656401@qq.com, *baoguo_chen@126.com

Received: May 6th, 2019; accepted: May 21st, 2019; published: May 28th, 2019

Abstract

In view of the risk that the foundation pit excavation will cause changes in the surrounding conditions, the numerical simulation analysis of the foundation pit excavation of the Shangchuan Metro Station in Line 12 of Shenzhen is carried out by FLAC(3D) software. The deformation law of diaphragm wall, the variation law of supporting axial force, the deformation law of ground surface, as well as the distribution law of stress in the foundation pit are analyzed during the foundation pit excavation process. It is found that the deformation curve of the retaining structure develops toward the "bow shape" as a whole, and the displacement gradually becomes stable. The surface settlement displacement around the foundation pit increases with the increase of the excavation depth, and the maximum value of the surface subsidence remains stable and large, the supporting axial force is continuously increased, and the variation of the supporting axial force is sequentially decreased. Under the condition of high-rise buildings nearby, the horizontal displacement of the retaining structure is larger than that of other locations, and the supporting axial force has obvious upward floating. The deep foundation pit excavation under this condition has a great influence on the surrounding environment. Excavation should be strictly controlled during construction and supported in time.

Keywords

Deep Foundation Pit, Numerical Simulation, Underground Diaphragm Wall, Deformation Law, High-Rise Building

繁华路段地铁站深基坑变形规律研究

杨磊^{1*}, 赵文平¹, 闫腾飞², 陈保国^{2#}, 孟庆达²

¹中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都

²中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉

*第一作者。

#通讯作者。

Email: 907656401@qq.com, baoguo_chen@126.com

收稿日期: 2019年5月6日; 录用日期: 2019年5月21日; 发布日期: 2019年5月28日

摘要

针对基坑开挖会引起周边建筑环境发生改变的风险,运用FLAC(3D)软件对繁华路段地铁站的深基坑工程开挖全过程进行仿真模拟分析,探讨了基坑开挖过程中地下连续墙的位移变化规律,地表沉降变化规律,支撑轴力变化规律,高层建筑对深基坑开挖影响规律。研究发现,围护结构变形曲线整体上向“弓形”发展,位移逐渐趋于稳定;基坑周围地表沉降位移随开挖深度增加,地表沉降最大值位置保持稳定;伴随开挖深度增大,支撑轴力不断增大,支撑轴力变化幅度依次降低;附近既有高层建筑物条件下,围护结构水平位移大于其他位置变形,支撑轴力有明显的上浮,此条件下的深基坑开挖对周围环境的影响较大,施工中应严控超挖,及时支撑。

关键词

深基坑, 数值模拟, 地下连续墙, 变形规律, 高层建筑

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地铁车站基坑施工作为地铁施工的重要组成部分,由于其开挖深度大,范围广,周边建筑物密集,人流量及车流量大等特点导致较大的安全风险。因此,研究地铁站深基坑变形规律是近些年来的一个重要课题。

有研究者对深基坑监测数据开展分析,总结开挖过程中不同工况支撑轴力、围护结构变形、周边土体沉降等变化规律。廖少明等[1]对苏州地区某广场深基坑实测数据分析,总结围护结构侧墙、墙后地表沉降等变化规律;丁智等[2]对杭州地区深基坑监测数据分析,认为墙体的深层水平位移是引起土体深层水平位移的重要因素,总结出深基坑变形规律;刘念武等[3]结合杭州某地铁深基坑实测资料,总结软土地区深基坑变形规律;张艳书等[4]分析了狭长基坑变形规律;施有志等[5][6]总结了基坑开挖对周围环境的影响规律。也有研究者通过数值模拟进行深基坑变形规律研究,其中数值模拟最关键的就是如何对岩土体本构模型和计算参数进行合理选择的问题[7][8][9]。于洋等[10]针对太原地铁复杂环境,进行数值分析,预测支护体系变形趋势。徐凌等[11]利用FLAC(3D)模拟对比不同支护方式的变形规律。

深圳地铁12号线上川站位于市中心多个交叉路口之间,周边建筑物密集;基坑施工对周边建筑影响大,对周边道路的通行也产生严重影响。本文利用FLAC(3D)软件模拟基坑开挖全过程,对繁华路段地铁站深基坑变形规律进行研究,控制施工风险,为地铁站顺利施工提供技术支持。

2. 数值计算模型

2.1. 工程概况

上川站位于宝安区上川路、前进一路交叉路口与新安四路、前进一路交叉路口之间,途经建筑较多(如

图 1 所示)。上川站基坑标准段宽 20.1 m, 盾构井宽 26.1 m, 车站总长度为 537 m, 基坑深度 19 m~20.5 m。围护结构采用“地下连续墙 + 四道内支撑”形式, 地下连续墙厚 0.8 m。

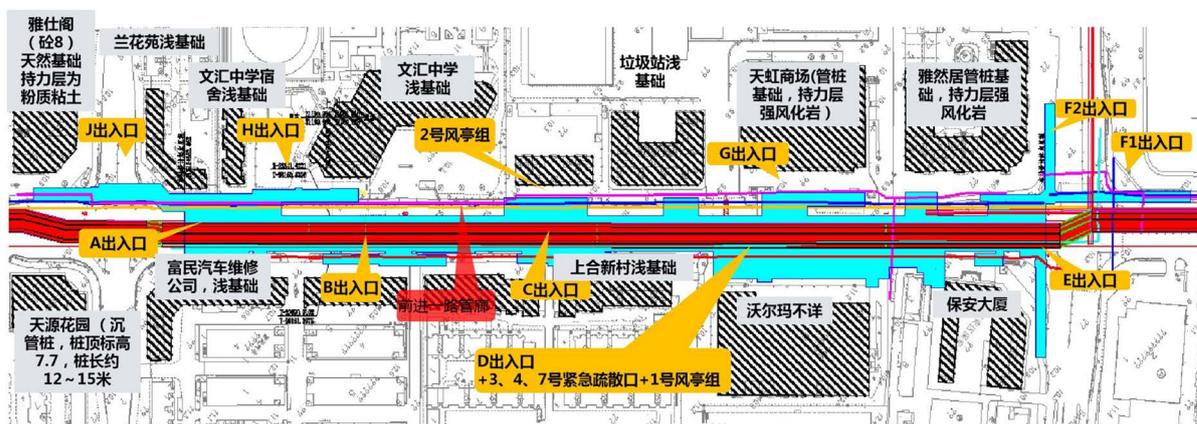


Figure 1. Site diagram of Shangchuan station site

图 1. 上川站站址环境图

工程开挖影响范围内土层依次为: 素填土①、砾质粘性土②、全风化粗粒花岗岩③、强风化粗粒花岗岩④、中风化粗粒花岗岩⑤。本车站基坑支护安全等级按一级考虑。

2.2. 数值模型建立

采用 FLAC(3D)建立三维数值分析模型, 土层参数见表 1。结合基坑所处繁华路段周围建筑物和交通环境复杂特点, 根据工程实际尺寸采用 1:1 模型建立数值分析模型, 模型水平面边界取基坑开挖深度的 4.5 倍, 模型高度取基坑开挖深度的 2.5 倍。模型长、宽、高分别是 719.2 m, 207.2 m, 49 m。

Table 1. Soil physical and mechanical parameters table

表 1. 土体物理力学参数表

土层	弹性模量	内摩擦角	泊松比	粘聚力	密度
	E/MPa	$\varphi/^\circ$	μ	c/kPa	kg/m ³
素填土	3.74	/	0.34	20.0	1800
砾质粘性土	30	23.5	0.32	27.5	1840
全风化粗粒花岗岩	90	27.5	0.30	30.0	1900
强风化粗粒花岗岩	150	30.0	0.30	35.0	1950
中风化粗粒花岗岩	2000	40.5	0.26	500	2500

计算模型中土体和地下连续墙采用三维实体单元, 内支撑采用梁单元模拟(支撑参数如表 2 所示), 土层采用摩尔-库伦本构模型, 地下连续墙采用各项同向线弹性模型。模型四周约束水平位移, 底部约束水平和竖向位移。围护结构与土地之间建立接触面。繁华路段基坑周边建筑按照等效荷载模拟, 以每层 15 kPa 荷载作用于地基上。施工荷载以宽度 6 m 至 10 m 不等的堆积荷载考虑, 施加在基坑边缘 2 m 范围外, 标准段大小按 20 kPa 考虑, 盾构井周围按 30 kPa 考虑。数值模型如图 2 所示。

Table 2. Table of internal support mechanics parameters
表 2. 内支撑力学参数表

支撑	截面	横截面积 m ²	y 轴惯性矩 m ⁴	z 轴惯性矩 m ⁴	弹性模量 E/MPa
砼支撑	800 mm × 1000 mm	0.800	0.043	0.067	30,000
	800 mm × 800 mm	0.640	0.034	0.034	30,000
钢支撑	Φ = 609 mm t = 16 mm	3.05E-3	1.31E-3	1.31E-3	200,000

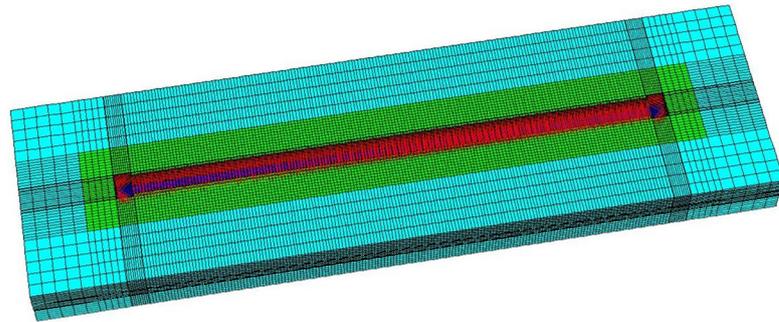


Figure 2. Numerical model of deep foundation pit
图 2. 深基坑数值模型

根据施工步骤,定义计算工况(如表 3 所示)共计 6 步。通过初始地应力平衡计算,模拟周边建筑荷载引起的地固结沉降已经完成。在基坑开挖之前,还需要将初始位移清零、初始速度清零、塑性区清零,模拟历史上土层自重应力与基坑工程施工产生的位移已经稳定。开挖共分为 5 次,开挖深度分别为:2 m; 6 m; 4 m; 4 m; 3 m (标准段)/4.5 m (盾构井)。

Table 3. Foundation pit excavation calculation steps
表 3. 基坑开挖计算步骤

计算工况	模拟情况
0	初始地应力平衡
1	开挖 0 m~2 m, 架设第一道支撑
2	开挖土体至第二道支撑底部, 架设第二道支撑
3	开挖土体至第三道支撑底部, 架设第三道支撑
4	开挖土体至第四道支撑底部, 架设第四道支撑
5	开挖土体至基坑底部

2.3. 数值模拟监测点布置

在深圳地铁 12 号线上川站基坑开挖过程中,对施工过程中的围护结构位移(标准段水平位移、盾构井水平位移、阳角水平位移)及地表位移(标准段周围地表位移、盾构井周围地表位移)进行了监测(测点布置如图 3 所示),同时也对支撑结构轴力进行轴力值监测。

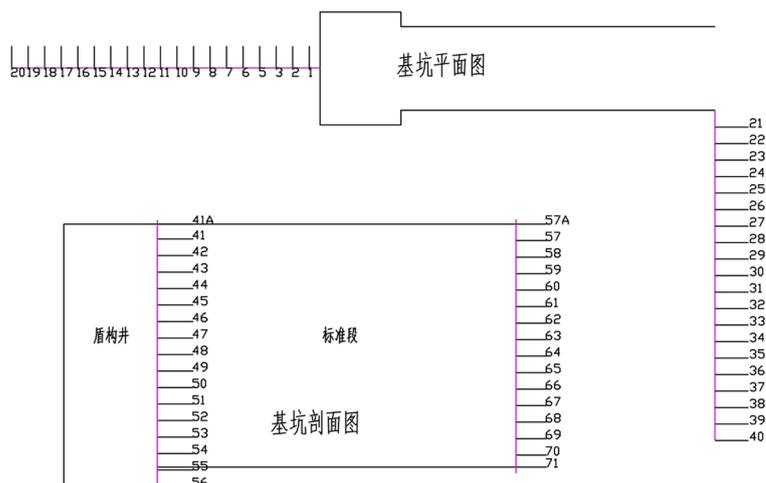


Figure 3. Survey point layout
图 3. 测点布置图

3. 结果分析

3.1. 围护结构位移分析

从基坑开挖过程中围护结构标准段各工况水平位移变化规律图(如图 4 所示)可知,基坑围护结构标准段水平位移随开挖深度增加逐渐增加。工况 2 最大水平位移在距离基坑底面 11 m 处,为 4.7 mm,之后最大水平位移位置逐渐向下发展,在工况 5 结束时,最大水平位移在距离基坑底面 7 m 处,为 11.5 mm。围护结构标准段变形曲线整体上呈“弓形”发展,最大水平位移位置由上逐渐向下移动,随深度增加,围护结构变形趋近于零。

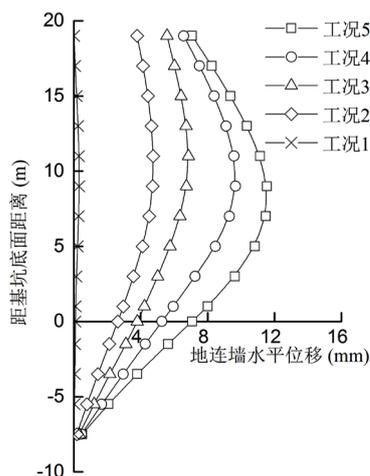


Figure 4. Horizontal displacement of the standard section of the envelope structure
图 4. 围护结构标准段水平位移

以距基坑底面 7 m 处为例,对围护结构标准段水平位移增长速率进行分析,工况 1 到工况 2 增长速率最大,之后由于不断架设的支撑遏制了基坑水平方向变形,变形速率变小,并趋于稳定。

从基坑开挖过程中围护结构盾构井各工况水平位移变化规律图(如图 5 所示)可知,基坑围护结构盾构井水平位移随开挖深度增加逐渐增加。工况 1 和 2 最大位移在距离基坑底面 11 m 处,分别为 0.4 mm 和

2.5 mm，之后最大位移位置向下发展，在工况 5 结束时，最大水平位移距离基坑底面 6 m 处附近，最大位移为 5.7 mm。围护结构盾构井变形曲线整体上呈“弓形”发展，最后变化趋于稳定，最大水平位移位置由上逐渐向下移动，随深度增加，围护结构变形趋近于零。

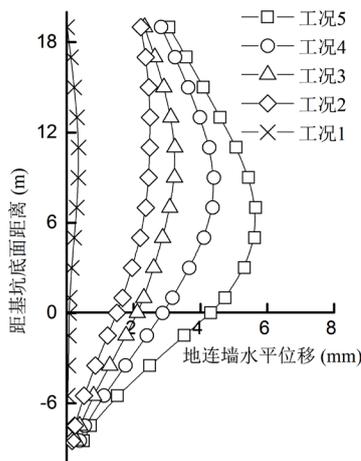


Figure 5. Horizontal displacement of shield end section envelope structure
图 5. 围护结构盾构井水平位移

从基坑开挖过程中围护结构盾构井阳角处各工况水平位移变化规律图(如图 6 所示)可知，基坑围护结构盾构井阳角处水平位移随开挖深度增加逐渐增加。工况 2 最大水平位移在距离基坑底面 19 m 处，为 3.7 mm，之后最大水平位移位置逐渐向下发展，在工况 5 结束时，最大水平位移在距离基坑底面 10.5 m 处，为 9.3 mm。围护结构盾构井阳角处变形曲线整体上由“前倾型”逐渐向“弓形”发展，最后变化趋于稳定。

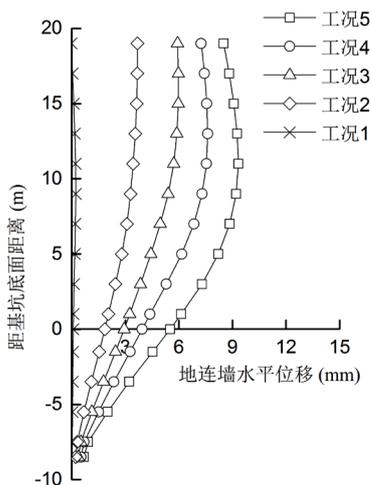


Figure 6. Horizontal displacement of sunny angle of enclosure structure
图 6. 围护结构盾构井阳角水平位移

3.2. 周围地表沉降分析

从基坑开挖过程中各工况标准段周围地表位移变化规律图(如图 7 所示)可知，在一定范围内，伴随开挖深度的增大，土体位移对周围环境的影响越来越大。基坑开挖对周围土体沉降的影响范围主要集中在距基坑边缘 0 到 40 m 范围内，尤其是 0 到 20 m 范围，土体位移对周围环境的影响极大，最大沉降位值

置距基坑边缘 8.8 m 处。随着开挖深度不断增加,地表沉降值逐渐增大,但变化速率趋于稳定,地表沉降最大值位置保持稳定,变形趋势保持稳定。

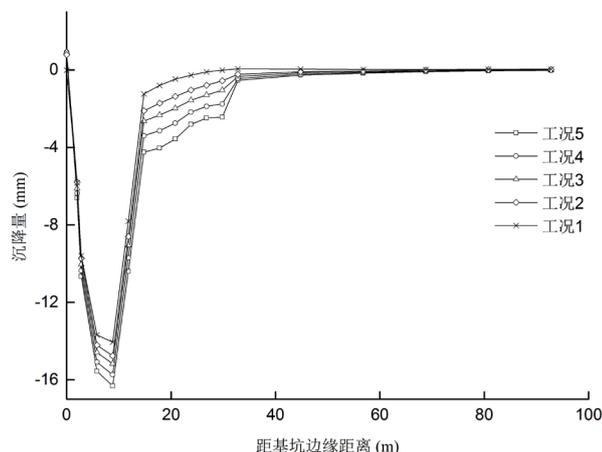


Figure 7. Surface displacement around standard section of foundation pit

图 7. 基坑标准段周围地表位移

从基坑开挖过程中各工况盾构井周围地表位移变化规律图(如图 8 所示)可知,变化规律大致与标准段周围地表位移变化规律相同。随着开挖深度不断增加,地表沉降值逐渐增大,变化速率趋于稳定,地表沉降最大值位置保持稳定。另外,基坑盾构井周围地表沉降最大值比标准段地表沉降最大值略大。

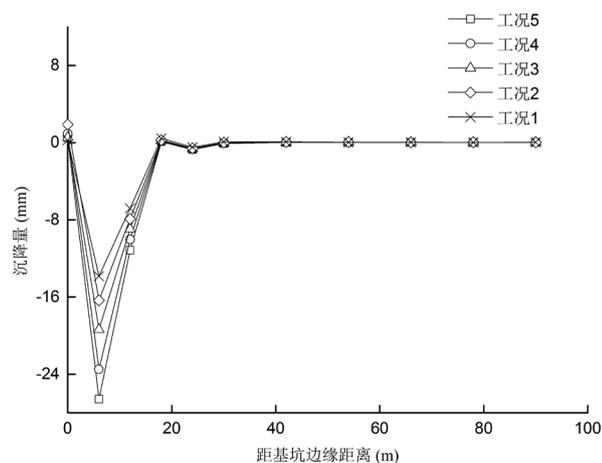


Figure 8. Surface displacement around the shield hole of the foundation pit

图 8. 基坑盾构井周围地表位移

3.3. 支撑结构内力分析

基坑开挖过程中各工况标准段支撑轴力模拟值(如图 9 所示)可知,伴随开挖深度增大,支撑轴力不断增大;随着开挖深度增加,支撑轴力变化幅度依次降低,逐渐趋于稳定,在浅层土体开挖时支撑变化幅度最大。

由于下部所加钢支撑有卸力作用,基于此协同工作和刚度差异,上部支撑轴力增速会减小。随着 4 道支撑依次架设完毕,轴力变化趋于稳定,且稳定情况下的第二道支撑轴力略大于第一道支撑。稳定情况下,第一道砼支撑轴力值为 699 kN,第二道钢支撑轴力值为 727.3 kN,第三道钢支撑轴力值为 474.9 kN,第四道钢支撑轴力值为 314.2 kN。

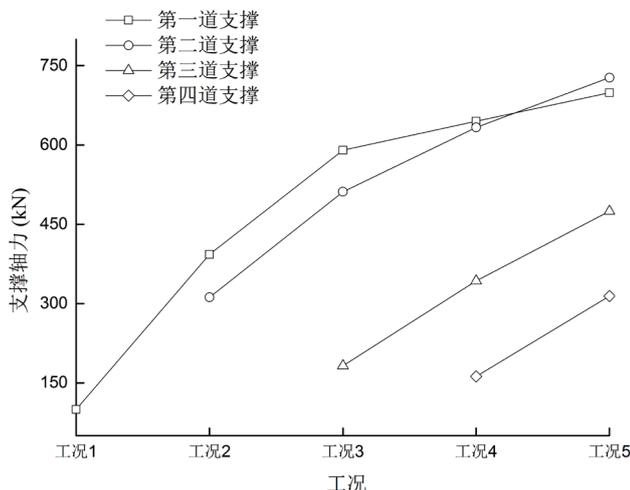


Figure 9. Standard section support axial force simulation value
图 9. 标准段支撑轴力模拟值

3.4. 高层建筑对深基坑开挖影响分析

雅然居位于基坑标准段附近一侧位置，距离基坑边缘 18.5 m，建筑物高 17 层，采用管桩基础，持力层为强风化岩层。数值模型中，该建筑物以每层 15 kPa 均布荷载等效施加在基础上。

从基坑开挖过程中高层建筑附近围护结构各工况水平位移变化规律图(如图 10 所示)可知，变形规律与上述围护结构其他位置变形规律一致，变形曲线整体上呈“弓形”发展，最大水平位移位置由上逐渐向下移动。但是高层建筑物由于基底压力大，对深基坑开挖所引起的围护结构变形也产生较大影响，因此在计算结束时，最大水平位移在距离基坑底面 9 m 处，为 15.8 mm，大于其他位置围护结构水平位移的最大值。

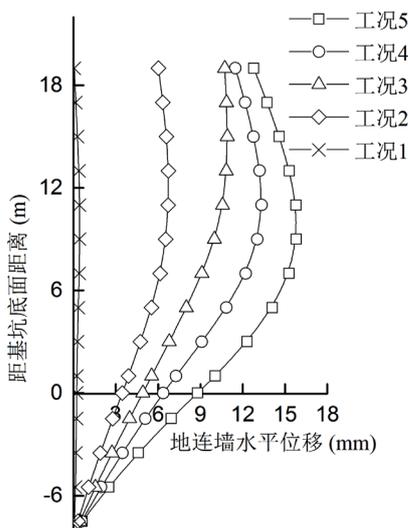


Figure 10. Horizontal displacement of the envelope structure near the high-rise building
图 10. 高层建筑附近围护结构水平位移

基坑开挖结束后，从标准段支撑轴力模拟值(如图 11 所示)可知，在距离基坑标准段端部 420 m 至 500 m 范围内，有一个明显的支撑轴力上浮区间，此轴力上浮区间产生的原因是受基坑边缘高层建筑自重荷

载影响, 基坑开挖后产生较大的土体向基坑内部位移和位移的趋势, 造成支撑轴力增加。轴力上浮区间略大于建筑物长度 76.5 m。围护结构水平位移和支撑轴力是一对相互协调受力变形的参数, 此区间的轴力较大也从侧面验证了区间围护结构水平位移较大。

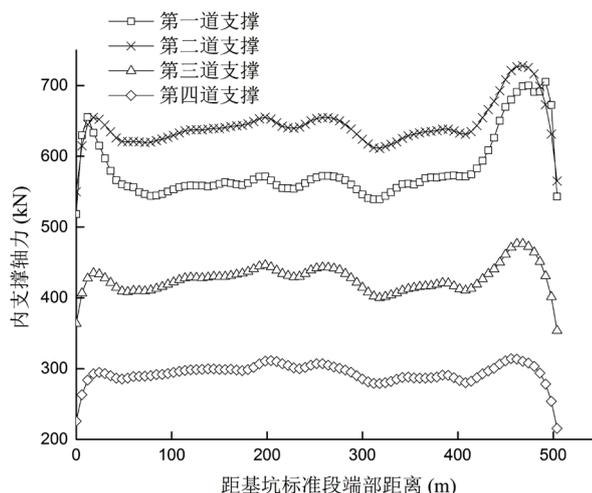


Figure 11. Variation law of axial force support in standard section of excavation
图 11. 开挖结束标准段支撑轴力变化规律

基坑开挖结束后, 高层建筑附近一侧, 基坑周围地表沉降变化规律如图 12 所示, 附近既有高层建筑条件下的深基坑开挖对周围环境的影响较大。对比标准段周围地表沉降变化曲线, 附近既有高层建筑条件下的周围地表会在高层建筑区域有一个较大的沉降, 造成该沉降的主要原因是深基坑开挖扰动周围土体往基坑方向位移, 高层建筑依靠其高自重的特点挤压土体, 进一步加强土体扰动, 使高层建筑位置出现一个明显的沉降, 沉降最大值为 10 mm, 该沉降不会引起建筑物出现破坏等情况, 施工中应严控超挖, 及时支撑; 做好预防措施及预警方案。

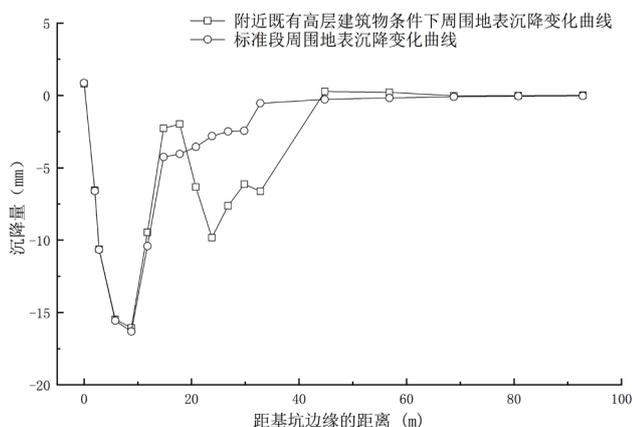


Figure 12. Variations of surface settlement around the foundation pit of existing high-rise buildings
图 12. 既有高层建筑基坑周围地表沉降变化规律

4. 结论

运用 FLAC(3D)软件对繁华路段地铁站的深基坑工程开挖全过程进行仿真模拟分析, 探讨了基坑开挖过程中围护结构水平位移变化规律, 地表的沉降变化规律, 支撑轴力变化规律, 高层建筑对深基坑开挖

影响规律。得出如下主要结论:

1) 基坑标准段围护结构水平位移比盾构井附近略大, 围护结构变形曲线整体上向“弓形”发展, 最后变化趋于稳定。基坑围护结构水平位移最大值为 15.8 mm, 未超过规范限值。

2) 基坑开挖全过程各工况下, 盾构井周围地表位移变化规律与标准段变化规律相同, 随着开挖深度不断增加, 地表沉降值逐渐增大, 但变化速率趋于稳定, 地表沉降最大值位置保持稳定, 变形趋势保持稳定; 基坑盾构井周围地表沉降最大值比标准段地表沉降最大值略大。

3) 伴随开挖深度增大, 支撑轴力不断增大; 支撑轴力变化幅度依次降低。由于下部所加钢支撑的协同工作, 上部支撑轴力增速会减小。

4) 附近既有高层建筑物条件下, 深基坑开挖围护结构水平位移大于其他位置围护结构水平位移; 支撑轴力有明显的上浮区间, 区间长度略大于建筑物长度; 此条件下的深基坑开挖对周围环境的影响较大。施工中应严控超挖, 及时支撑; 做好预防措施及预警方案。

基金项目

国家自然科学基金项目“离子土固化剂-水泥联合固化淤泥的微观机理研究”资助(No. 41602319)。

参考文献

- [1] 廖少明, 魏仕锋, 谭勇, 柳骏茜. 苏州地区大尺度深基坑变形性状实测分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 458-469.
- [2] 丁智, 王达, 虞兴福, 王金艳, 蒋吉清. 杭州地铁新塘路、景芳路交叉口工程深基坑监测分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 445-451.
- [3] 刘念武, 龚晓南, 楼春晖. 软土地基中地下连续墙用作基坑围护的变形特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 2707-2712.
- [4] 张艳书, 薛栩超, 庄海洋, 刘雪珠. 软土层对地铁狭长深基坑地表沉降的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(6): 1639-1651.
- [5] 施有志, 柴建峰, 赵花丽, 林树枝. 地铁深基坑开挖对邻近建筑物影响分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(6): 927-935.
- [6] 施有志, 李秀芳, 林树枝. 城市中心地带地铁深基坑开挖对周边环境影响实测分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(6): 900-909.
- [7] 杨校辉, 朱彦鹏, 郭楠, 等. 西北地区某大型深基坑群优化设计与施工分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(Sup2): 165-173.
- [8] 叶建忠, 李永明, 邱凡. 组合支护结构在深圳地铁基坑工程中的应用[J]. 工业建筑, 2014(Sup1): 752-758.
- [9] 翁其平, 王卫东. 多级梯次联合支护体系在上海虹桥综合交通枢纽基坑工程中的设计与实践[J]. 建筑结构, 2012(5): 172-176.
- [10] 于洋, 牛少卿, 杨双锁, 王永鹏. 基于FLAC~(3D)的太原车站基坑变形影响因素研究[J]. 施工技术, 2016, 45(13): 93-96.
- [11] 徐凌, 陈格际, 刘帅. FLAC~(3D)的深基坑支护方式的模拟对比分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(11): 1279-1283.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org