

文章编号: 1006-4362(2023)03-0074-05

基坑开挖对其周边土体变形规律数值模拟和 现场试验研究

杨曦¹, 李万宝¹, 代柳娟¹, 朱向荣¹, 李韶清¹, 赵智辉²

(1. 云南航天工程物探检测股份有限公司, 昆明 650217; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039)

摘要: 以兰花路地铁站基坑开挖工程为研究对象, 利用 FLAC^{3D}有限差分元软件建立了围岩应力三维计算模型, 采用数值分析和现场试验相结合的手段, 对距基坑边缘不同距离、开挖深度不同深度及随时间变化土体水平位移变化规律展开研究。研究表明: 由数值模拟结果分析, 位于基坑边缘距离 10 m 之内的土体为高影响区, 位于基坑边缘距离 10m 之外的土体为缓影响区; 根据现场试验可得, 随着时间的往后推移, 相对应的开挖深度逐渐增大, 水平位移值逐渐增大, 且在前期增长速度较快, 其中为凸字形曲线的为正常曲线, 较为安全。结合数值模拟结果及现场检测结果, 获得基坑开挖过程周边土体时间和空间范围内土体变形规律, 为工程作业过程提供降低土体坍塌等安全隐患的范围。

关键词: 基坑工程; 数值模拟; 现场试验; 水平位移; 钢支撑

中图分类号: TU921 **文献标识码:** A

NUMERICAL SIMULATION AND FIELD TEST STUDY ON DEFORMATION LAW OF SURROUNDING SOIL DURING EXCAVATION

YANG Xi¹, LI Wan-bao¹, DAI Liu-juan¹, ZHU Xiang-rong¹, LI Shao-qing¹, ZHAO Zhi-hui²

(1. Yunnan aerospace engineering geophysical detection Co., Ltd, Kunming 650217, China;

2. Ccteg Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China)

Abstract: This study focuses on the foundation pit excavation project at the Orchid Road subway station. Using the FLAC^{3D} finite difference software, a three-dimensional model of the surrounding rock stress was constructed. By combining numerical analysis with field testing, we investigated the soil's horizontal displacement patterns at varying distances from the foundation pit's edge, across different excavation depths, and over time. The analysis reveals that soil within a 10m radius of the foundation pit's edge is in a high-influence zone, while soil beyond this radius falls into a slow-influence zone. Field observations indicate that as time progresses, the excavation depth and the horizontal displacement values both increase, with the rate of growth being especially rapid in the initial phases. Notably, a convex-shaped displacement curve emerges, signifying a typical and relatively safe deformation pattern. By integrating numerical simulation findings with field data, we've delineated the soil deformation patterns in terms of time and space during the foundation pit excavation process. These insights are crucial for defining boundaries to mitigate potential risks, such as soil collapse, during subsequent engineering activities.

Key words: foundation pit engineering; numerical simulation; field testing; horizontal displacement; steel shotcrete

收稿日期: 2022-10-12 改回日期: 2022-12-17

基金项目: 云南省王思敬院士工作站(202005AF150083)

1 引言

基坑开挖,必然会造成周边土体发生变形,如果对周边土体变形规律掌握不准确,造成土体变形量过大或变形速度较快,造成基坑的坍塌,不仅容易造成经济的损失,而且会使整个车站工程陷入困境,甚至造成人员伤亡。因此,开展对车站基坑开挖对其基坑周边土体水平变形研究,不仅可以对基坑开挖对其水平变形变化规律有更清晰地认识,而且能为基坑开挖变形理论和支护技术方面提供更可靠、更全面的资料。

当前,对于基坑开挖土体水平位移研究方法较多,主要包括理论研究、数值分析和实测数据分析等研究。卢治仁等学者^[1-2],依托工程实例,采用模拟手段,计算基坑地下连续墙的内力和位移,对基坑地下连续墙的变形规律进行研究;石岭等相关学者^[3-5],通过对现场监测数据分析,对基坑两侧地连墙水平变形和地面竖向变形特征展开了研究;侯健等^[6-8],综合采用数值模拟与现场实测手段,对其基坑破坏类型开展研究,揭示了剪切滑移破坏为基坑边坡破坏主要类型;徐日庆等^[9],通过理论分析得出软土地区基坑开挖卸载引起水平位移的变形机理;刘林等^[10]采用数值模拟与现场监测数据相结合的方法,对地表沉降、支护桩的桩顶侧移和竖向位移的变化规律进行了研究,研究得出采用交叉预应力锚索加固损伤支护桩,可有效增加桩体的稳定性,减少施工过程对土体的扰动;杨骁等^[11-15],采用理论分析方法,分析了深基坑支护结构变形规律和趋势。

因此,本文基于数值模拟和现场实测数据研究基坑开挖深度对基坑周边土体水平变形的影响规律,根据影响程度来划分影响区域。该研究成果可以较好的应用指导基坑现场施工,对于建设工程的地质灾害防治及工程设计、施工有很大的实际意义^[16]。

2 工程概况

兰花路站坐落于汇龙路与南岸区兰花路十字路口地下,为明挖地下两层(局部三层)三跨框架结构,标准段净宽 20.16 m,基坑深约 15~22.6 m。该站施工贴近周边居民楼、商铺及厂区,涉及管线

多,交通繁忙、车流量大,且自身为明挖深基坑施工,安全风险系数高,因此在地下空间开发过程中需考虑该区域周围的影响。

3 围岩应力数值模拟结果分析

基坑开挖过程中,由于周围土体存在变形和位移的空间,导致围岩的变形甚至破坏,从而引起围岩应力的重分布,围岩应力分布结果是分析基坑开挖周边土体稳定性的关键^[17]。

3.1 数值模型建立

本次利用 FLAC^{3D}有限差分元软件,建立了三维计算模型,如下图 1 所示。考虑计算效率问题,在建立模型时采用对称原理,建立基坑一半模型,模型长 150 m、宽 90 m、厚 37 m。

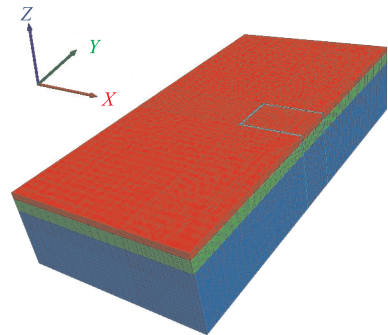


图 1 有限差分元计算模型

为精确计算围岩土体变形,提高计算的精度,网格采用“1 网格/1 m”划分。分别采用实体单元和梁单元模拟地基土体、初衬和钢支撑支护。模型四周设置为 X 方向或 Y 方向双向约束,Z 方向单向约束。

3.2 计算参数选取

岩体本构采用莫尔-库仑本构模型,从上到下岩土分别为杂填土、粉质黏土和中砂。具体技术参数取值见表 1。

3.3 施工模拟步骤及监测点布设

工程施工步骤分为 3 个部分,首先基坑向下开挖 3 m,然后在基坑顶部架设钢支撑施工;再向下开挖 5 m,然后在基坑深度 6 m 处位置架设钢支撑;继续再向下开挖 5 m,然后在基坑深度 12 m 处位置架设钢支撑;最后继续开挖至基坑底部 17 m。

表 1 物理力学参数

层序	名称	厚度/m	重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	体积模量/MPa	剪切模量/MPa
1	填土	3	18.6	0.3	27	5.9	2.9
2	粉质黏土	6	19.4	11.4	15.8	11	4.1
3	中砂	28	24	1.9	27.6	4.0	1.6

此次总共布设 9 条测线,每条测线间隔 2 m,每条测线共布设 15 个监测测点,每个监测测点间距为 5 m,监测点布设情况如下图 2 所示。

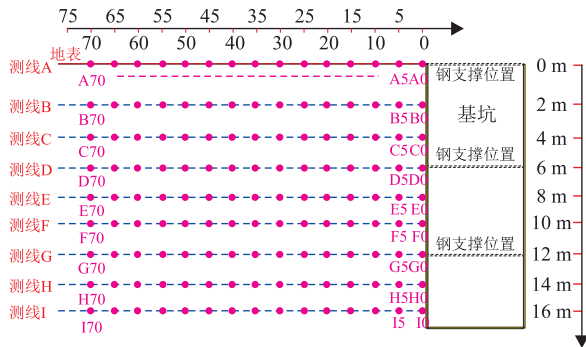


图 2 纵监测断面示意图

3.4 模拟结果分析

3.4.1 开挖深度对水平位移影响规律分析

图 3 为整个施工阶段基坑不同开挖深度条件下相对应的基坑外围土体朝基坑方向水平位移分布曲线,总共布设 15 个监测点。可见,水平位移变形曲线主要可分为两种类型:(1)“基坑周边较近土体变形曲线”,对应监测点为 A0 和 A5。此变形曲线主要有 3 个阶段,阶段一(开挖深度 0 到 7 m),随开挖深度的加大,水平位移值逐渐增大且速率也逐渐增加;阶段二(开挖深度 7 m 到 11 m),随开挖深度的加大,水平位移值逐渐增大,但速率逐渐下降;阶段三(开挖深度 11 m 到 17 m),随开挖深度的加大,水平位移值逐渐增大最终趋于稳定,但速率逐渐下降最终为 0。造成这种现象的主要原因是,在基坑开挖过程中,分别在基坑深度 0 m、6 m 和 12 m 深度位置架设钢支撑,钢支撑对基坑周边土体位移起到的很好的抑制作用,从而使其土体水平位移速率下降。(2)“离基坑较远土体变形曲线”,对应监测点为 A10、A15、A20、A25、A30、A35、A40、A45、A50、A55、A60、A65、A70 和 A75,此变形主要分布于距基坑边缘 10 m 以外土体。随开挖深度的加大,水平位移值逐渐增大,且速率也逐渐增大。但最终水

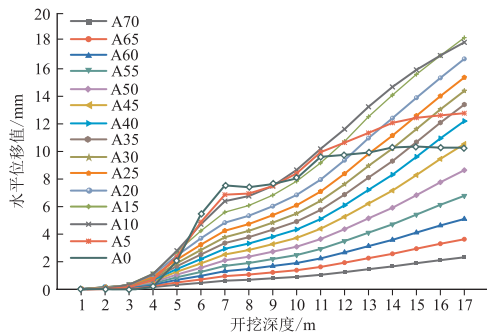


图 3 开挖深度对其水平位移影响规律分布曲线

平位移值,总体变形为离基坑边缘越远,水平位移值越小。

3.4.2 不同深度土体水平位移分析

图 4 为基坑开挖施工完成,不同基坑边缘距离相对应的不同深度测线基坑外围土体朝基坑方向水平位移分布曲线,总共布设 9 条测线。可见,9 条测线所监测曲线主要可分为两大类:(1)“先升高后下降型”,对应测线 A 和测线 B,随距离基坑边缘距离增加,逐渐增加再逐渐下降,此转折点为距基坑边缘距离 10 m;从中还可得出,位于基坑边缘距离 10 m 之内的地表岩层,测线 A 所对应的水平位移值最小,测线 B 次之;位于基坑边缘距离 10 m 以外的地表土体,测线 A 所对应的水平位移值最大,测线 I 最小,深度越深土体,水平位移值越小。(2)“逐渐下降型”,对应测线 C~I。随距离基坑边缘距离增加,逐渐下降,且在距基坑边缘距离 10 m 之内土体,下降速率较快,在距基坑边缘距离 10 m 之外土体,下降速率较慢;从而可把基坑周边土体划分为高影响区和缓影响区,位于基坑边缘距离 10 m 之内的土体为高影响区和位于基坑边缘距离 10 m 之外的土体为缓影响区。该研究结果表明,在工程作业过程中,应注意位于基坑边缘 10 m 范围内的土体位移情况,该区域易出现土体坍塌等安全隐患,应及时降低安全隐患。

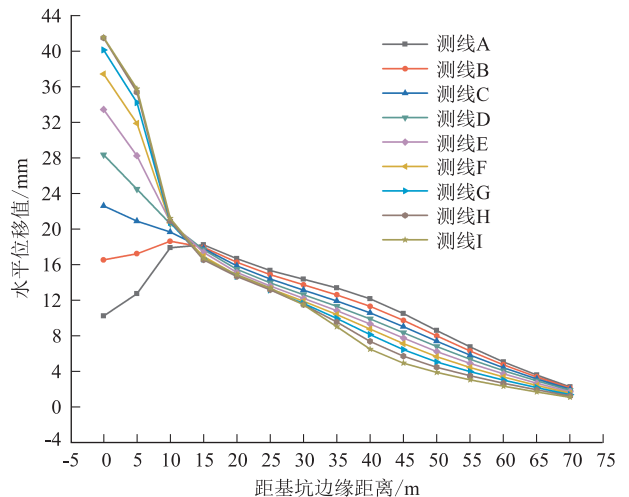


图 4 距基坑边缘距离对其水平位移影响规律分布曲线

4 现场试验结果分析

4.1 激光测距仪布设方案

试验采用的设备是激光测距仪进行现场采集基坑水平位移数据,见图 5 和图 6 所示。本系列激光测距传感器采用相位比较原理进行测量,先通过发射不同频率的可见激光束;然后接收信号,接收信号

为从被测物返回的散射激光;最后,用微处理器计算出相应相位偏移所对应的物体间距离,可达到 mm 级测量精度。



图 5 激光测距仪传感器



图 6 现场布设场景图

4.2 现场监测结果分析

拱腰和拱顶围岩应力分析:

图 7 为整个施工阶段下相对应的基坑冠梁水平应力分布曲线,总共 4 个监测点,分别为 3 号传感器、4 号传感器、6 号传感器和 8 号传感器。

图 7 中可以看出测点水平位移量与计算位移曲线吻合度较好,随着时间的往后推移,相对应的开挖深度逐渐增大,水平位移值逐渐增大,且在前期增长速度较快;到中后期时,周边土体形变程度又会逐渐回落。根据曲线变化所对应的土体水平位移特征,将曲线段分为正常曲线和反常曲线,其中为“凸”字形曲线的为正常曲线,较为安全。由于“凹”字形曲线变化速率逐渐增大,反应区域内形变速度变大,“凸”字形曲线变化速率逐渐下降,故“凹”字形曲线的为反常曲线,为预警时间段,此阶段为重点监测时间段,要加大监测频率。

此次根据监测曲线,将其分为较快速阶段、快速阶段、较稳定阶段和稳定阶段。其中正常曲线的快速增长阶段和反常曲线阶段,为预警阶段,此阶段为重点监测时间段。

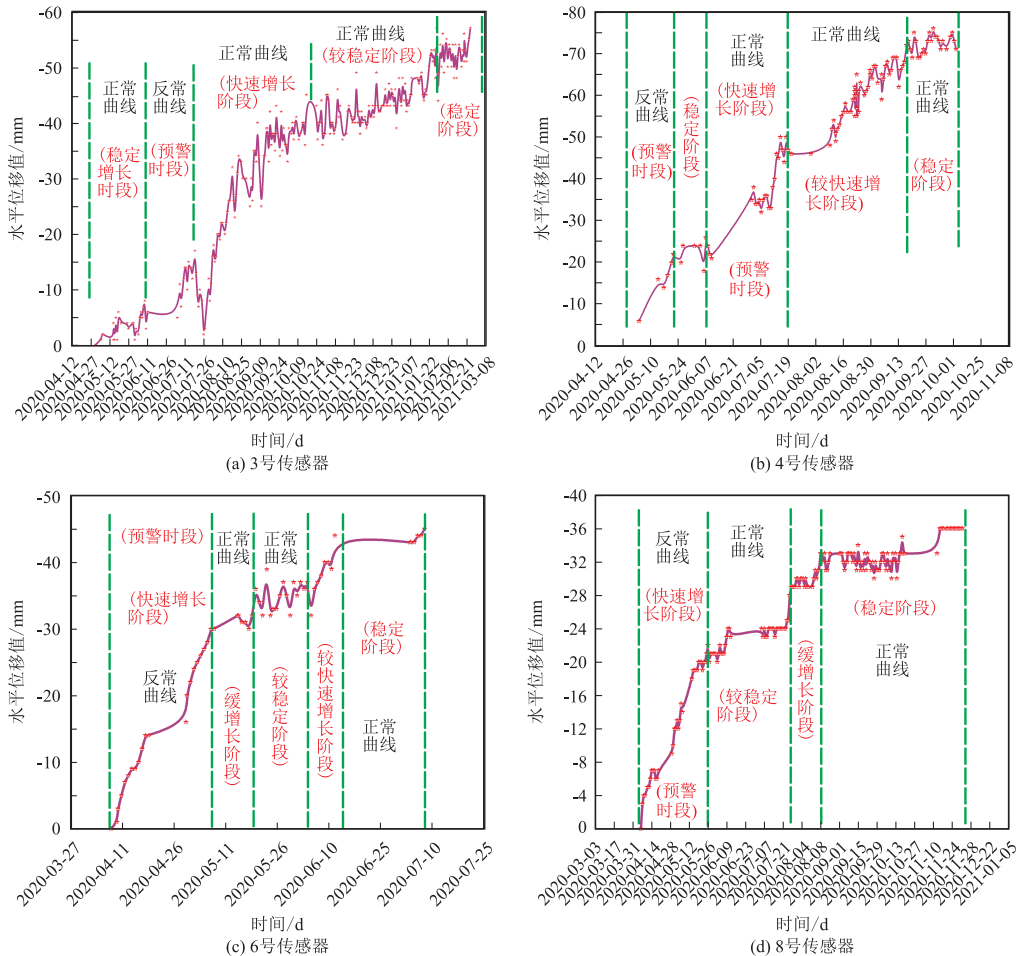


图 7 水平位移监测曲线

5 结论

(1) 在基坑开挖过程中,分别在基坑深度 0 m、6 m 和 12 m 深度位置架设钢支撑,钢支撑对基坑周边土体位移起到的很好的抑制作用,从而使其土体水平位移速率下降。

(2) 分布于距基坑边缘 10 m 以外土体,随开挖深度的加大,水平位移值逐渐增大,且速率也逐渐增大。

(3) 位于基坑边缘距离 10 m 之内的地表岩层,测线 A 所对应的水平位移值最小,测线 B 次之;位于基坑边缘距离 10 m 以外的地表土体,测线 A 所对应的水平位移值最大,测线 I 最小,深度越深土体,水平位移值越小。

(4) 由数值模拟结果分析,从空间角度可把基坑周边岩层划分为高影响区和缓影响区,位于基坑边缘距离 10 m 之内的土体为高影响区和位于基坑边缘距离 10 m 之外的土体为缓影响区,为工程作业过程提供降低土体坍塌等安全隐患的范围。

(5) 由现场检测结果,根据水平位移变形曲线,从时间角度获得基坑周边土体形变情况,将其曲线段划分为正常曲线和反常曲线,其中为“凸”字形曲线的为正常曲线,较为安全。

参考文献

- [1] 卢治仁,杨小龙,王进,等.富水圆砾地层超深地下连续墙参数优化及施工控制技术研究[J].路基工程,2021,(2):158-165.
- [2] 戴仕鹏,吴永红,徐世端.基坑开挖与邻近高层建筑施工耦合模拟研究[J].工业安全与环保,2021,47(4):40-44.

- [3] 石岭,周宾,李永辉,等.地铁车站基坑半幅盖挖法施工监测及分析[J].现代城市轨道交通,2021,(4):70-75.
- [4] 梁天福.武汉地铁 11 号线涉铁深基坑支护设计及监测分析[J].交通科技,2021,(2):134-137.
- [5] 吴仲瑞,宋智勇,陆何,等.基于 FLAC^{3D}的钢支撑架设滞后数值模拟研究[J].安徽建筑,2020,27(12):89-90+98.
- [6] 侯健,赵丽,田国锋,等.既有渣土堆载深大基坑边坡稳定性与支护技术研究[J].隧道建设(中英文):1-6.
- [7] 胡建林,孙利成,崔宏环,等.修正摩尔-库伦模型下的深基坑变形数值分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2021,40(2):134-140.
- [8] 任帅.温度变化对地铁深基坑稳定性分析研究[J].建筑科技,2020,4(6):53-56.
- [9] 徐日庆,申硕,董梅,等.软土地区基坑开挖诱发邻近盾构隧道水平位移的简化算法[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(3):153-163.
- [10] 刘林,李雅丽,薛茜,等.交叉预应力锚索加固损伤支护桩现场试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(1):24-32.
- [11] 杨晓,任凯凯,盛棋楸.刚性环梁支撑圆形基坑支护结构变形解析解[J].力学季刊,2020,41(4):684-694.
- [12] 陈伟.地铁车站深基坑变形监测与有限元模拟对比分析[J].建设监理,2020,(12):75-77+82.
- [13] 程康,徐日庆,应宏伟,等.杭州软黏土地区某 30.2 m 深大基坑开挖性状实测分析[J].岩石力学与工程学报,2021,40(4):851-863.
- [14] 林之航.上软下硬深基坑变形规律与空间效应分析[J].地下空间与工程学报,2020,16(6):1792-1800.
- [15] 唐琪,王华敏.石家庄地铁 1 号线西王站深基坑倒撑优化研究[J].隧道建设,2015,(S1):85-91.
- [16] 张文.皖南丘陵地区道路工程地质灾害危险性探讨[J].地质灾害与环境保护,2017,28(3):52-61.
- [17] 张莹,朱俊秋,张红.三维数值模拟在地下工程围岩二次应力-形变场研究中的应用[J].地质灾害与环境保护,2014,25(4):56-60.

作者简介: 杨曦(1982—),男,2008年毕业于中国地质大学(武汉),高级工程师,主要从事地下工程方面的研究工作。

E-mail:yxkml69@163.com