

南昌地铁深基坑开挖数值模拟与方案优化研究

袁红¹ 纪承伟业²

1. 南昌轨道交通集团有限公司, 江西 南昌 330013

2. 大连海事大学交通运输系, 辽宁 大连 116026

[摘要] 以南昌地铁二号线城南大道站为工程依托, 采用有限差分软件 FLAC3D 进行数值模拟, 分析了不同开挖步中土地的变形规律, 包括基坑周围地表沉降与围护结构的水平位移, 除此之外进一步研究了采取不同强度的支护结构分析对土体变形的影响, 并总结了支护结构的不同物理性质改变对基坑开挖土体变形的影响程度, 得出了相应结论, 为今后相似基坑的开挖提供了支护结构物理参数选取的方案。

[关键词] FLAC3D; 深基坑; 支护结构; 土体变形

DOI: 10.33142/aem.v6i9.13831

中图分类号: U455.91

文献标识码: A

Numerical Simulation and Scheme Optimization Research on Deep Foundation Pit Excavation of Nanchang Metro

YUAN Hong¹, JI Chengweiye²

1. Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330013, China

2. Department of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning, 116026, China

Abstract: Based on the Chengnan Avenue Station of Nanchang Metro Line 2, finite difference software FLAC3D was used for numerical simulation to analyze the deformation law of soil in different excavation steps, including surface settlement around the foundation pit and horizontal displacement of the retaining structure. In addition, the influence of adopting different strength support structures on soil deformation was further studied, and the degree of influence of different physical properties of support structures on soil deformation during excavation of foundation pits was summarized. Corresponding conclusions were drawn, providing a scheme for selecting physical parameters of support structures for similar foundation pit excavations in the future.

Keywords: FLAC3D; deep foundation pit; supporting structure; soil deformation

引言

进入 21 世纪, 我国人口流动增加, 城市交通拥堵加剧。为解决这一问题, 地下轨道交通快速发展, 地铁车站深基坑工程也随之兴起。随着基坑开挖规模扩大, 施工位置往往在建筑密集的城市中心, 周边环境复杂, 施工难度和风险显著提高。因此, 掌握基坑开挖土体变形规律并设计合适的支护结构强度是确保安全施工的关键^[1]。在南昌复杂地层条件下, 采用地下连续墙和三道内支撑的支护结构。本文结合南昌城南大道北站工程, 利用 FLAC3D 软件进行数值模拟, 分析了不同开挖步骤中的土体变形规律, 并研究了不同强度支护结构对土体变形的影响, 为类似深基坑工程的支护结构设计提供了参考^[2]。

1 工程概况

拟建项目位于南昌城南大道北站(原城南大道站), 为南昌轨道交通 2 号线东延工程的第 2 个车站。基坑深度 19m, 安全等级一级。围护结构为 800mm 厚的地下连续墙加三道内支撑。场地土层自上而下依次为素填土、粉质粘土、砾砂、强风化泥岩和中风化泥岩^[3]。

2 数值建模

使用 FLAC3D 进行深基坑有限元模拟。为提高准确性,

开挖步骤与实际施工同步。总模型高 44.5m、长 446.4m、宽 152m。整体模型如图 1 所示^[4]。

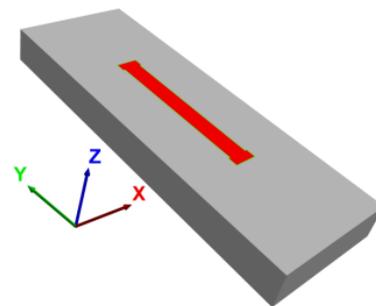


图 1 整体计算模型

基坑围护结构采用 800mm 厚地下连续墙。车站设置 3 道支撑: 分别为一层混凝土撑、两层钢支撑。模型选取摩尔-库伦修正模型进行基坑数值模拟建模。各土层参数严格按照现场检测值选取, 主要物理参数如表 1 所示^[5]。

3 计算结果分析

3.1 基坑开挖水平位移分析

根据开挖步骤通过有差分软件 FLAC3D 模拟出的围护结构水平位移如图 2 所示。

表 1 土层参数选取

土层	厚度 (m)	弹性模量 (MPa)	泊松比	粘聚力 (kPa)	重度 (kN/m ³)	内摩擦角 (°)
素填土	2	5	0.3	5	17.5	8
粉质粘土	4	21.5	0.35	26	21.5	17
砾砂	10	15	0.35	15	23	17
强风化泥质粉砂岩	3	155	0.35	16	23	24
中风化泥质粉砂岩	22.5	185	0.35	21	23	28

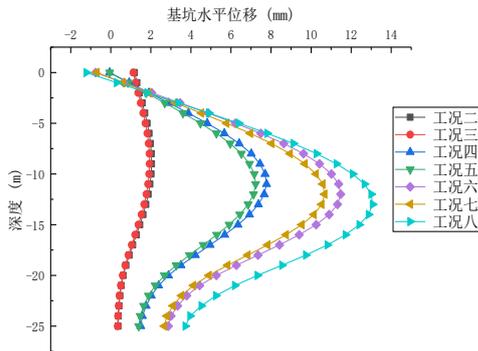


图 2 开挖水平位移变化图

从图中可见，基坑开挖过程中围护结构的水平位移随着开挖深度增加逐渐增大。开挖每层都会引起土体荷载卸载，从而导致水平位移。在开挖初期，水平位移较小，仅为 2.04mm，因开挖深度较浅且围护结构嵌入较深。工况三增加混凝土支撑后，水平位移减至 1.94mm。第二层开挖（工况四）时，最大水平位移增至 7.78mm，主要由于开挖深度大（8m）且土体内应力释放快。因此，实际施工中应在第二层开挖及时增设钢支撑，以防围护结构变形过大。增加钢支撑后，最大水平位移减至 7.23mm，减小率为 7%。后续开挖中位移变化较小，减小率分别为 58%和 14%，因内支撑提供了较大的横向应力，抑制了水平位移。整体位移趋势呈“内凹型”，两端较小，中间较大，最大水平位移位置逐渐下降。工况二至工况五，最大水平位移位置由地表以下-10m 移至-13m。基坑上部水平位移因土层内摩擦力呈交替内收趋势，下部则因围护结构嵌入地下水平位移最终趋近于 0.5mm。

3.2 地表竖向位移分析

根据开挖步骤通过有差分软件 FLAC3D 模拟出的周围地表竖向沉降如图 3 所示。

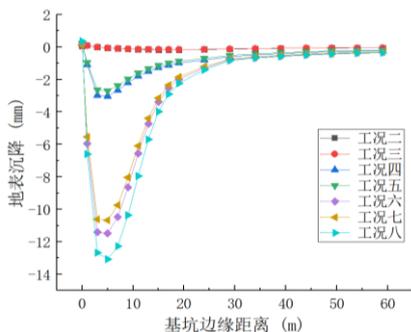


图 3 开挖地表沉降位移图

从图中可见，标准段两端的地表沉降量随着基坑开挖深度的增加而逐渐增大。在开挖初期，由于开挖深度较浅，地表几乎没有沉降。第二次开挖时，沉降量较小，最大沉降为-3mm，出现在距基坑边缘 3m 处。第三次开挖时，沉降显著增加，最大沉降为-11.47mm，出现在距基坑边缘 5m 处，比前一工况增加了 9.14mm。这是由于较大的开挖深度和有限的钢支撑抵抗作用所致。开挖至基坑底部时，最大沉降仍出现在距基坑边缘 5m 处，沉降值增加了 1.6mm，达到-13.07mm。由于此时开挖深度较小且距离地表较远，对地表的影响减弱。尽管地表沉降值达到了模拟的最大值，但未超过允许变形范围，表明基坑周边地表在开挖过程中保持了相对稳定。在工况三、五、七中，随着内支撑的增加，基坑外部地表沉降量分别减少了 10%、11%和 8%。这表明增加内支撑能有效减少地表沉降，保持基坑稳定性。此外，基坑开挖对周围地表的影响在距基坑边缘 24m 以外较小，因此实际施工中应根据距离基坑的远近调整监测频率，在影响较大的范围内重点监测^[6]。

4 方案优化

4.1 地连墙厚度

选取五种不同围护结构的厚度进行对比分析，分别进行数值模拟计算，将围护结构水平位移与地表沉降的数据提取出进行对比，不同参数下的基坑变形量见表 2

表 2 围护结构不同厚度的基坑变形量统计表

围护结构厚度 (m)	0.4	0.6	0.8	1	1.2
地表最大沉降 (mm)	-17.25	-14.77	-13.07	-11.89	-10.98
变化率	31.98%	13.01%	/	9%	16%
围护结构最大水平位移 (mm)	19.83	15.64	12.92	11.63	9.05
变化率	53.36%	21%	/	10.05%	30%

从表中可见，围护结构厚度从 0.8m 增加到 1m 和 1.2m 时，水平位移和地表沉降量均有所减小。具体而言，围护结构水平位移的最大值从 12.93mm 减小至 11.63mm 和 9.05mm，减小率分别为 10.05%和 30.00%；地表沉降最大值从-13.07mm 减小至-11.89mm 和-10.98mm，减小率分别为 9.03%和 15.99%。当围护结构厚度不足 0.8m 时，水平位移和地表沉降量显著增大。水平位移最大值从 12.93mm 增至 15.64mm 和 19.83mm，增幅为 21.00%和 53.36%；地表沉降值从-13.07mm 增至-14.77mm 和-17.25mm，增幅为 13.01%和 31.98%。这表明，当围护结构厚度不足 0.8m 时，基坑变形风险较大。围护结构厚度从 0.8m 增加到 1m 时，

对位移的控制效果不明显,分别减小了 10.05%和 9.03%。只有当厚度增加到 1.2m 时,控制效果才较为显著。因此,当围护结构厚度满足设计要求时,不需进一步增加厚度以确保基坑稳定性,这不仅效果有限,还会增加施工成本。

4.2 地连墙嵌入深度

选取不同的地连墙嵌入深度进行对比分析,选取对象分别为:4.5m、5m、5.5m(原始嵌入深度)、6m、6.5m,并分别对以上的不同模型进行模拟计算,对地表沉降与围护结构水平位移进行分析,各参数下的基坑变形改变量如表 3 所示。

表 3 围护结构不同嵌入深度基坑变形量统计表

围护结构嵌入深度	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65
地表最大沉降 (mm)	-14.01	-13.78	-13.07	-12.4	-11.9
变化率	6.70%	5.40%	/	5%	8%
围护结构最大水平位移 (mm)	15.01	14.3	12.92	12.23	11.5
变化率	16.20%	11%	/	5.30%	11%

从表 3 可见,当围护结构嵌入深度从 5.5m 增加至 6.5m 时,地表沉降量和水平位移均逐渐减小。地表沉降最大值从-13.07mm 减至-12.40mm 和-11.90mm,变化率分别为 5%和 8%;水平位移最大值从 12.92mm 减至 12.23mm 和 11.50mm,变化率为 5.3%和 11%。当嵌入深度从 5.5m 减小至 4.5m 时,地表沉降增至-13.78mm 和-14.01mm,变化率为 5.4%和 6.7%;水平位移最大值增至 14.3mm 和 15.01mm,变化率为 11%和 16.2%。这表明,嵌入深度超过设计值(5.5m)对地表沉降和水平位移的影响较小,变化率均在 10%以下,增加深度效果不明显且成本增加。然而,当嵌入深度减少时,水平位移增幅超过 10%,增加了基坑变形风险。因此,实际施工中采用 5.5m 的嵌入深度,既节约成本又能最大限度地保证基坑开挖的安全性。

4.3 钢支撑刚度

为了探究支撑刚度对基坑开挖的变形影响,保持其他计算参数不变,分别选取此基坑工程内支撑刚度原设计值的 0.5 倍、0.8 倍、1.2 倍、1.5 倍与原设计值对比分析,并对不同内支撑刚度的结果进行提取分析,各参数下的基坑变形改变量如表 4 所示。

表 4 钢支撑不同刚度下基坑变形量统计表

钢支撑不同刚度倍数	0.5	0.8	1	1.2	1.5
地表最大沉降 (mm)	-17.68	-15.62	-13.07	-12.50	-11.66
变化率	35.27%	19.51%	/	4%	11%
围护结构最大水平位移 (mm)	17.51	15.27	12.92	11.70	9.78
变化率	35.53%	18%	/	9.44%	24%

如表 4 所示,钢支撑刚度对围护结构水平位移和地表沉降有明显影响。随着钢支撑刚度的增加,围护结构水平位移和地表沉降的最大值逐渐减小;反之,刚度减小,这两项位移量则逐渐增大。总体趋势表明,围护结构在中部

的水平位移较大,地表沉降在距离基坑较近的位置达到最大值。具体数据表明,当钢支撑刚度分别为原设计值的 0.5 倍、0.8 倍、1.2 倍和 1.5 倍时,围护结构水平位移分别为 17.51mm、15.27mm、11.70mm 和 9.78mm,变化率依次为 35.53%、18%、9.44%和 24%。地表沉降分别为 -17.68mm、-15.62mm、-12.50mm 和-11.66mm,变化率分别为 35.27%、19.51%、4%和 11%。由此可见,增大钢支撑刚度能有效控制基坑变形,但当刚度增至原设计值的 1.2 倍时,控制效果不明显,两种位移的变化率均低于 10%;只有当刚度增至 1.5 倍时,控制效果才明显。而当刚度减小至 0.8 倍和 0.5 倍时,位移量显著增大。因此,在基坑开挖对周边控制要求较高时,可适当提高钢支撑刚度,但需综合考虑实际情况和现场环境。

5 结论

本文采用 FLAC3D 对南昌城南大道站进行了数值模拟分析,得出以下结论:在基坑开挖过程中,其围护结构的水平位移与坑外土体的竖向位移的位移模式始终呈现出“内凹型”且其位移值随着开挖深度的增大而不断增加,在基坑内部架设支撑可以有效减小以上二者的位移数值大小。改变地下连续墙的物理性质对基坑开挖的土体变形也会产生影响,当地下连续墙的厚度减小或嵌入深度减小后,位移会呈现增大的趋势,而增大厚度或增加嵌入深度后其位移不会出现很明显的减小,因此当围护结构的厚度与嵌入深度满足设计要求时,不需要通过增加厚度与嵌入深度来确保基坑的安全与稳定性。内支撑的刚度增大率小于 20%时,对整个基坑的安全性影响很小。而当其刚度见效率达到 20%其位移变化率接近 20%,这是实际工程中不可忽略的安全性问题,因此在实际工程施工中,合理选用钢支撑的刚度可以做到节省经济的同时保证工程的安全性。

[参考文献]

- [1]王美艳.成都砂卵石地层基坑变形空间效应及预测方法研究[D].吉林:吉林大学,2023.
 - [2]邱加祥.基于 FLAC3D 复杂地质条件下工作井开挖支护稳定性研究[J].福建建筑,2024(7):56-59.
 - [3]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(2):374-380.
 - [4]徐娟.基于 FLAC3D 数值模拟的巷道优化支护分析与应用[J].煤矿机电,2024,45(3):16-22.
 - [5]程长清,吴雪琴,赵文广.基于 FLAC~(3D)的双孔隧道围岩稳定性数值模拟分析[J].山西建筑,2023,49(20):126-128.
 - [6]张程.基于 FLAC3D 的深基坑开挖过程地表沉降及围护结构受力数值模拟研究[J].四川水泥,2024(3):63-65.
- 作者简介:袁红,学历:大专、在职本科,中级工程师,市政工程。