

地铁车站基坑开挖施工自身稳定性分析

杨春华¹ 姜硕²

1. 南昌轨道交通集团有限公司地铁项目管理分公司, 江西 南昌 330013

2. 大连海事大学交通运输系, 辽宁 大连 116026

[摘要] 针对提高基坑开挖施工自身稳定性, 文中通过控制变量的方法进行数值模拟, 分别分析支撑形式和开挖形式对基坑的影响规律。关于支撑形式对基坑的影响是从支撑水平间距和支撑层数两方面研究, 而开挖形式对基坑的影响则是从开挖顺序方面入手。结合工程实际情况, 综合分析提出较优的支撑形式和开挖形式, 对后续工程施工进行指导。

[关键词] 基坑; 稳定性; 数值分析

DOI: 10.33142/aem.v6i9.13846

中图分类号: TU45

文献标识码: A

Stability Analysis of Excavation Construction of Subway Station Foundation Pit

YANG Chunhua¹, JIANG Shuo²

1. Subway Project Management Branch of Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330013, China

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

Abstract: In order to improve the stability of excavation construction in foundation pits, this paper conducts numerical simulations by controlling variables to analyze the impact of support and excavation forms on the foundation pit. The influence of support forms on foundation pits is studied from two aspects: the horizontal spacing of supports and the number of support layers, while the influence of excavation forms on foundation pits starts from the excavation sequence. Based on the actual situation of the project, comprehensively analyze and propose optimal support and excavation forms to guide the subsequent construction of the project.

Keywords: foundation pit; stability; numerical analysis

引言

地铁车站基坑的开挖施工是一个较为复杂并且动态的过程, 其中涉及很多因素的作用, 如地质条件、开挖方式、支护结构形式及参数等。其中, 支护结构的合理设计和施工是控制基坑变形、保证基坑稳定性的重要手段。支护结构不仅能够有效抵抗基坑开挖过程中产生的侧向土压力, 还能减少基坑周围土体的位移和沉降, 保护周边建(构)筑物的安全^[1]。

本文旨在通过数值模拟的方法, 对地铁车站基坑开挖施工过程中的自身稳定性进行深入研究。通过控制变量的方法, 分别分析支撑形式和开挖形式对基坑稳定性的影响规律^[2]。在支撑形式方面, 重点研究支撑水平间距和支撑层数对基坑变形和稳定性的影响; 在开挖形式方面, 则细化分析开挖顺序对基坑稳定性的影响。结合工程情况, 综合分析提出较优的支撑形式和开挖形式, 为后续类似工程的施工提供指导和参考^[3]。

1 工程概况

该地铁车站所处地层土层为: 杂填土, 厚度为 3.7m; 粉质黏土, 厚度为 6m; 中粗砂, 厚度为 4.5m; 全风化泥岩, 厚度为 7m; 强风化泥岩, 厚度为 3.8m。底板处于中风化泥岩。

车站基坑总共布置 4 层钢支撑施工过程中采取分层

开挖的方式边开挖边支护。为了保证基坑施工的稳定性, 基坑开挖过程中做到对全程监测, 并根据设计的测项预警值对基坑围护结构布置进行及时调整。

2 屈服接近度基本理论

由于实际施工过程中, 基坑整体破坏往往是从局部开始发生的, 因此基坑开挖过程中对局部土体状态进行定量评价是十分必要的。因此用 FLAC3D 软件编制屈服接近度 (YAI: yield approach index) 程序来展示基坑局部土体的屈服程度, 屈服接近度程序规定土体单元接近 1.0 时的区域趋于危险, 接近于 0 的趋于安全。将不同钢支撑参数的基坑开挖土体运用位移和屈服接近度理论进行局部稳定性分析, 比选出最优支撑体系参数组合, 进而应用到基坑工程中, 保证基坑开挖的整体稳定性^[4]。

屈服接近度可表述为一点的现时状态与相对最安全状态的参量的比。相对于某一强度理论则可以定义为空间应力状态下的最不利应力路径到屈服面的距离与相应的最稳定参考点在相同罗德角方向上沿最不利应力路径到屈服面的距离之比。本文在计算中采用的是 Mohr-Coulomb 本构模型, 为模拟分析岩土体的稳定性建立了基于 Mohr-Coulomb 准则的屈服接近度函数。对于岩土材料的一般受力情况, 综合 Mohr-Coulomb 剪切屈服准则和拉伸屈服准则的屈服接近度函数可表示为下式:

$$YAI = \begin{cases} \frac{I_1 \sin \varphi / 3 + (\cos \theta_\sigma - \sin \theta_\sigma \sin \varphi / \sqrt{3}) \sqrt{I_2 - c \cos \varphi}}{I_1 \sin \varphi / 3 - c \cos \varphi} & \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \leq \sigma_R \\ \frac{(\sigma_t - \sigma_1)(1 - \sin \varphi)}{c \cos \varphi - \sigma_t \sin \varphi} & \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} > \sigma_R \end{cases}$$

上式中 I_1 为应力张量的第一不变量， I_2 为偏应力张量的第二不变量， φ 为内摩擦角， θ_σ 为应力洛德角， c 为黏聚力， σ_t 为材料的抗拉强度， $\sigma_R = (\sigma_t - c \cos \varphi) / (1 - \sin \varphi)$ 。屈服接近度 YAI 的值域范围为，在 YAI = 1 时，应力点在屈服面上，此时会发生屈服，处于相对危险的状态；而当 YAI = 0 时，应力点在等倾线上，处于相对安全的状态^[5]。

3 支撑形式对基坑的影响分析

支护结构作为基坑开挖工程中的重要组成部分，既能够保护基坑自身稳定性又能够对增加邻近建筑物的安全性。支护结构有很多种，本文采用地连墙和钢支撑混合的组合式支护结构。其中在地铁车站基坑的开挖过程中，选取恰当的支撑参数对于有效控制基坑的水平位移及地表沉降具有至关重要的影响。在查阅了相关文献和考虑了工程实际情况后，本文决定进行钢支撑的水平间距和支撑层数对基坑影响的研究分析，为后续的相关工程提供指导。

3.1 支撑水平间距对基坑开挖的影响

本文利用有限差分软件 FLAC3D 构建模型，深入探讨不同钢支撑配置参数如何影响基坑的稳定性。通过量化分析位移指标及采用局部安全评估标准（如屈服接近度），对基坑土体在不同钢支撑参数条件下的性能进行了综合评判。基于这些分析，本文提炼出了最优的支撑设计方案，旨在为区域内后续类似工程项目的实施提供科学的参考与指导。

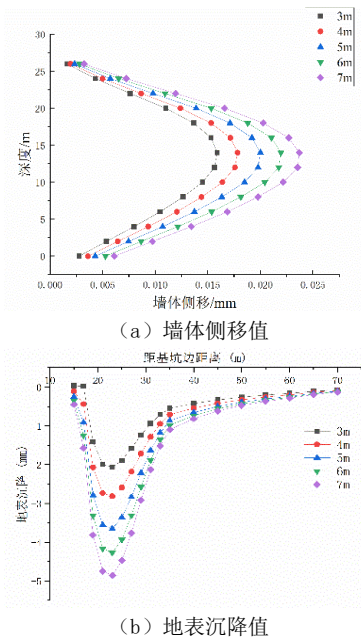


图 1 不同钢支撑水平间距对应的基坑变形曲线

在支撑结构的设计阶段，设计师需细致考量支撑水平

间隔对基坑形变的影响机制。支撑的水平间隔不仅关乎支撑系统的整体刚度，还直接作用于基坑变形的控制效果。图 1 展示了这种影响的变形曲线，清晰显示：随着钢支撑水平间隔的增加，墙体变形显著加剧，特别是在 3~7m 的范围内，墙体的最大水平位移从 15.90mm 跃升至 23.71mm，增幅达 7.81mm；同时，墙后地表沉降也从 2.07mm 增加至 4.86mm，增幅为 2.79mm。这一现象可归因于水平间隔的扩大导致支撑整体刚度下降，进而削弱了钢支撑对墙体位移的控制能力。进一步观察图 1，可发现钢支撑水平间隔对地表沉降的影响相对有限，而对支护墙体的水平位移则有更显著的作用。这种变化实质上反映了支撑刚度调整的效果，即支撑刚度的降低与地表沉降变化趋势一致，从而印证了钢支撑水平间隔与支撑刚度对地表沉降影响的相似性。

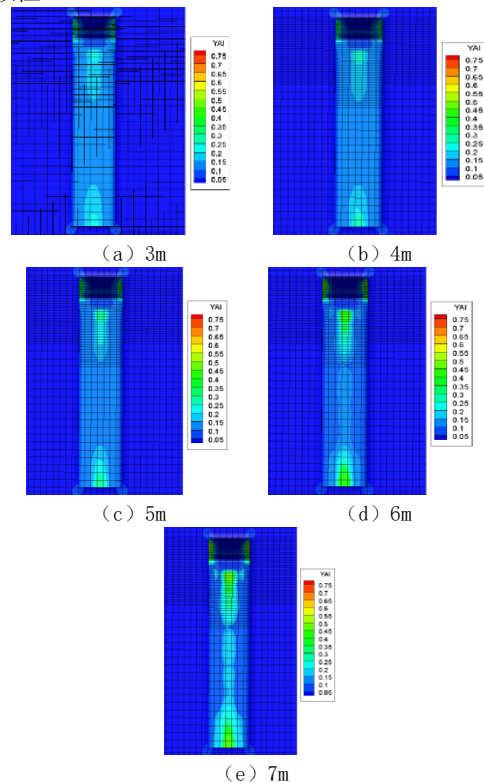


图 2 不同支撑水平间距对应的基坑屈服接近度分布图

图 2 展示了不同钢支撑水平间距条件下，基坑内部在俯视角下的屈服接近度分布情况。观察发现，当水平间距设定在 3~5m 范围内时，随着间距的适度增加，基坑内屈服接近度接近零的区域面积虽有扩大，但增幅较为平缓；而当间距扩展至 6~7m 时，基坑周边土体的屈服区域则迅速扩展。这一趋势表明，缩小钢支撑的水平间距有助于显著降低基坑的屈服接近度。然而，在实际施工中，还需权衡施工便捷性与成本控制，因此，针对该特定深基坑工程，将支撑水平间距合理控制在 3~5m 区间内，被视为最为适宜的选择。

3.2 支撑层数对基坑开挖的影响

在基坑施工过程中,适度增加钢支撑层数可有效帮助控制基坑的变形情况。如图3所示,不同支撑层数对基坑墙后地表沉降及墙体侧移的影响有着直观反映。然而,需注意的,过度密集的支撑层数设置不仅会增加施工难度,还可能导致不必要的经济支出,违背了合理施工的原则。因此,在实际施工过程中,应综合考虑具体条件,科学合理地设定支撑层数,以确保施工效率与经济性的双重优化。

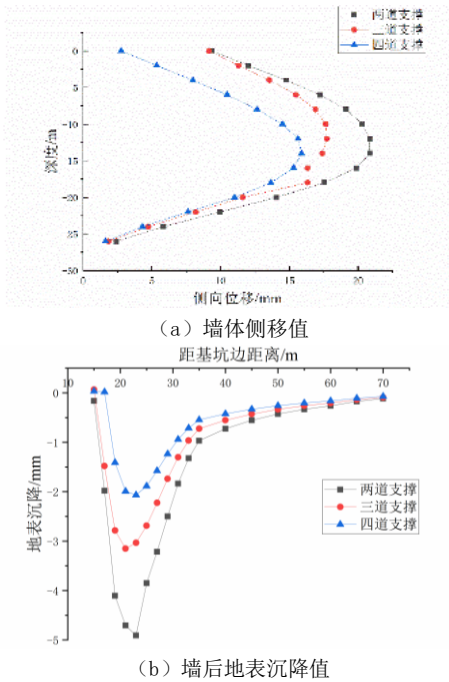


图3 不同支撑层数对应的基坑变形曲线

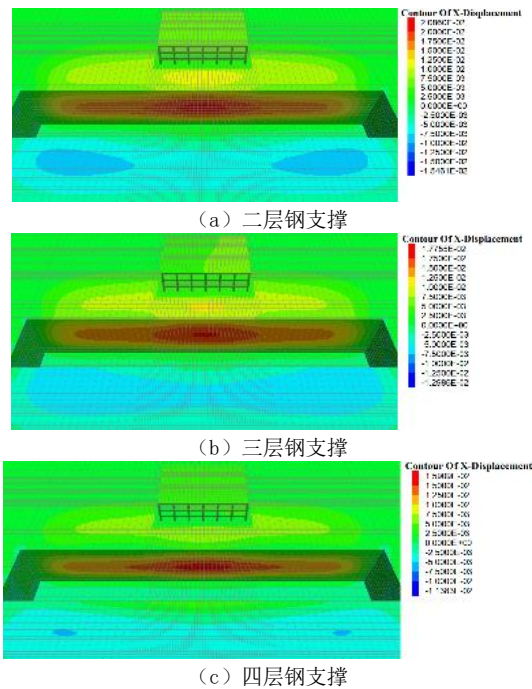


图4 不同钢支撑层数对应的侧向位移云图

图示数据表明,从增设第一道支撑至第二道支撑,基坑墙体侧移及周边地表沉降显著变化,墙体侧移值从20.84mm缩减至17.73mm,减少了3.11mm;同时,基坑周边土体沉降也由4.91mm降至3.15mm,减少了1.76mm。然而,当继续增加至三道支撑时,墙体侧移和土体沉降的改善幅度有所减缓,墙体侧移减少2.09mm,土体沉降减少1.16mm,显示出改善效果的边际递减趋势。

图5直观展示了不同钢支撑层数下基坑内部的屈服接近度分布。分析表明,增加支撑层数能有效抑制基坑支护结构及周边土体的变形。但超过合理层数后,变形控制效果将显著减弱,增加施工难度及经济成本。因此,支撑层数需合理设定。对于浅于20m的基坑,3-4层钢支撑为最佳配置。鉴于本车站基坑深达27m,推荐设计4层钢支撑以达到最佳效果。

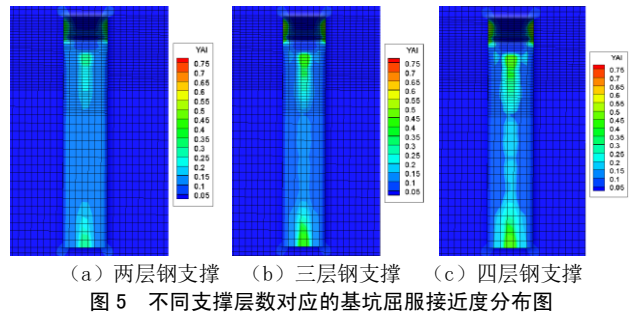


图5 不同支撑层数对应的基坑屈服接近度分布图

4 开挖顺序对基坑开挖的影响

依据基坑长边的分段开挖对于开挖矩形的基坑中,是较为合适的开挖方式。本小节建立三种分段开挖顺序模型,根据不同分段开挖顺序对工程桩水平位移影响的数值模拟结果,结合开挖的经济性,确定分段开挖顺序,为之后的相关研究减小模拟计算时间,同时为后续的基坑开挖提供指导^[6]。

在进行分段开挖方案的设计过程中,先以分段开挖顺序为变量,对土方的分段开挖设计以下开挖顺序进行对比分析:(1)拉槽法开挖(2)顺序开挖(3)由外至内开挖。

顺序开挖即为一般基坑土方开挖技术,通常是由一端开挖到另一端,分层分台阶开挖,开挖完一层后架设钢支撑。本文采用从基坑远离建筑物的一端开挖到临近建筑物的一端的顺序。

基坑遵循自上而下、逐层后退的原则进行挖掘,每层挖掘高度控制在3~5m之间,并维持1:0.5的坡度。每完成两层挖掘后,随即进行桩间挂网喷锚作业。当挖掘至距离预定钢支撑位置下方80cm处时,暂停挖掘,迅速安装钢支撑并按标准施加预应力。随后,在主体结构顶部上方约0.8~1.5m处安装首道钢支撑,并覆盖网喷混凝土以加固。当基坑接近底部,剩余约30cm时,转为人工清理,细致移除基坑底部及机械难以触及区域的土壤,确保坑底原状土层的完整性不受破坏。

由外至内开挖,即先同时开挖基坑两侧的土体,后开

挖中间部分土体,期间两侧留有土坡以运输土方。在每一层开挖后再假设钢支撑。

三种开挖方法对应的墙体水平侧移值云图如图6所示。

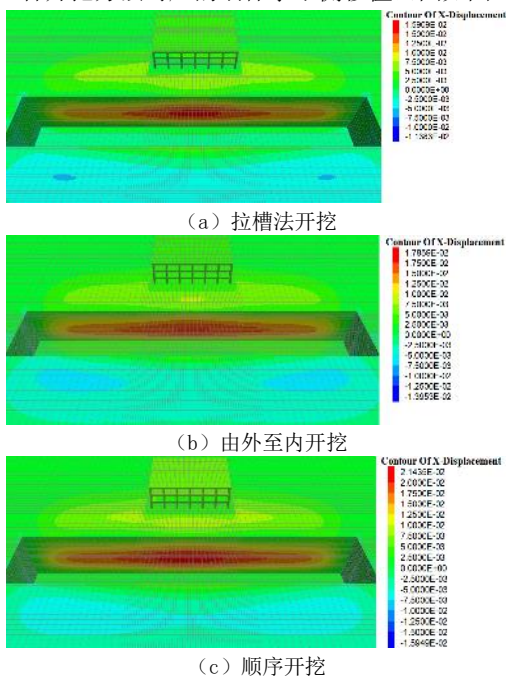


图6 各开挖顺序方案下水水平位移云图

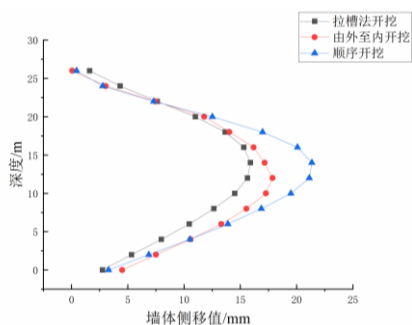


图7 各开挖顺序方案下墙体侧移值

根据上述不同开挖顺序对桩顶位移影响的模拟结果可知,在不同的开挖顺序下,同一监测点的水平位移略有不同,但都在工程允许值范围内。其原因是在不同的开挖顺序下,土体暴露时间不同,故工程桩产生位移略有不同,偏移的方向为土体最大主应力方向^[7]。由图7可知,在拉槽法开挖下地连墙水平位移的计算结果要好与顺序开挖和由外至内开挖。且在拉槽法开挖过程中,开挖完中间区域的土方后,进行两侧土方的开挖时,中间区域即可进行

进场施工,开挖完两侧的土方后,进行下一层中间区域土方的开挖时,两侧区域即可进场施工。拉槽法方式有利于现场施工的经济性,故本基坑推荐选择拉槽法施工。

5 结论

本文根据工程实际施工工序分析了支撑形式对基坑的影响,随后本文从开挖顺序方面分析了开挖形式对基坑开挖的影响得到以下结论:

(1) 钢支撑水平间距的扩大会导致墙体变形加剧,但对基坑周边土体沉降影响相对较小,而显著影响支护墙体的水平位移。结合模拟数据及施工便利性和成本控制,建议地铁车站的钢支撑水平间距设定在3至5米范围内最为适宜。

(2) 增加支撑道数能有效限制基坑支护结构及周围土体的变形,但超过合理数量后,其对变形控制的增益将逐渐减弱。针对该地铁车站,设置4道及以上钢支撑可充分保障工程安全。

(3) 在本文设计的三种开挖方案中,拉槽法开挖对基坑造成的不利影响最小,且可以减少施工周期。

基金项目:江西省高层次高技能领军人才培养工程入选项目。

[参考文献]

- [1]李淑,张顶立,房倩,等.北京地铁车站深基坑地表变形特性研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(1):189-198.
 - [2]俞强.邻近地铁深大基坑开挖变形与控制措施研究[J].建筑结构,2022,52(12):127-133.
 - [3]张波,邓运生,骆国新,等.大截面预应力柱帽施工技术[J].建筑技术开发,2017,44(10):115-116.
 - [4]王孝宾.土岩二元地层深基坑施工稳定性分析研究[D].大连:大连海事大学,2019.
 - [5]孔汇川.基于屈服接近度的基坑稳定性分析[J].建筑与装饰,2019(1):2.
 - [6]高洪赞,徐天涵,王志华,等.深基坑开挖对自身围护结构及邻近隧道的影响研究[J].中外公路,2024(8):21.
 - [7]徐松,童立红,丁海滨,等.不同开挖顺序对基坑围护结构变形影响分析[J].华东交通大学学报,2023,40(4):48-55.
- 作者简介:杨春华(1971.1—),女,城市轨道交通工程,本科,工程师。