

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202010014



地铁车站深基坑拉槽分层 开挖稳定性分析

张念^{1,2}, 朱雪健³, 万飞⁴

- (1. 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024;
2. 安徽建筑大学 安徽省 BIM 工程中心, 安徽 合肥 230601;
3. 合肥轨道交通集团有限公司, 安徽 合肥 230000;
4. 交通运输部公路科学研究所, 北京 100088)

摘要: 针对地铁车站基坑开挖体量大、施工空间狭小、施工工序繁多,传统基坑开挖方法效率低的问题,提出拉槽分层开挖方法. 结合乌鲁木齐地铁 1 号线某车站施工,采用数值模拟计算方法对比分析拉槽分层开挖方法与传统基坑开挖方法在施工过程中的基坑的稳定性,说明拉槽分层开挖方法的可行性. 同时,结合该车站施工现场监测结果对拉槽分层开挖方法进行验证. 结果表明:拉槽分层开挖方法可以保证车站基坑开挖的稳定性,且在施工组织管理和施工效率方面优势明显,可为类似工程提供参考.

关键词: 地铁车站; 深基坑; 数值模拟; 稳定性; 拉槽分层开挖法

中图分类号: U 231.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)03-0305-07

Analysis on Stability of Deep Foundation Pit by Groove Layered Excavation in Metro Station

ZHANG Nian^{1,2}, ZHU Xuejian³, WAN Fei⁴

- (1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. BIM Engineering Center of Anhui Province, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
3. Hefei Rail Transit Group Limited Company, Hefei 230000, China;
4. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to solve the problems of foundation pit large excavation volume, narrow construction space and various construction procedures in metro station and the low efficiency of traditional excavation, the groove layered excavation method is put forward. Combined with the construction of a station in Urumqi Metro Line 1, the stability of the foundation pit in the construction process of the groove layered excavation method and the traditional foundation pit excavation method is compared and analyzed by the numerical simulation calculation method, and the feasibility of the groove layered excavation method is illustrated. Combined with the monitoring results of the construction site of the station, the groove layered excavation method is verified. The results show that the groove layered excavation method can ensure the stability of station foundation pit excavation.

收稿日期: 2020-10-12

通讯作者: 张念(1984-),男,副教授,博士,主要从事隧道及地下工程安全、防灾的研究. E-mail: zhangnian@tyut.edu.cn.

基金项目: 山西省回国留学人员科研资助项目(2020038); 中央级公益性科研院所基本科研业务费资助项目(20190103); 安徽省 BIM 工程中心开放项目(AHBIM20202KF)

vation with obvious advantages in construction organization management and construction efficiency, which can provide reference for similar projects.

Keywords: metro station; deep foundation pit; numerical simulation; stability; groove layered excavation method

地铁车站多位于城市繁华地段,周边建筑物及地下管线众多,结构复杂,多采用明挖法进行施工^[1-3].地铁车站基坑多呈长条形、开挖体量大、施工空间狭小、施工工序繁多、组织管理难度大、施工效率低,传统明挖法施工常常无法保证基坑工程的施工进度^[4-6].基坑的开挖会引起地表的沉降,对围护结构要求比较高,保持基坑开挖的稳定性非常重要^[7].因此,工程技术人员需要一种既能保证基坑开挖的稳定性又能提高施工效率的开挖方法.

新疆乌鲁木齐地铁 1 号线某车站为长条形,车站基坑处于无水砂卵石地层,底板最大埋深为 18.65 m,开挖空间狭小,使用传统施工开挖方法土方挖运效率较低,施工组织管理难度大,工期难以得到保证.目前,该地区没有成功的工程经验可以参考,照搬其他地区的施工经验^[8-13]又不能保证其工法的可靠性和经济性.因此,基于车站基坑土方开挖工程的特点,本文提出拉槽分层开挖方法,采用数值计算方法对拉槽分层开挖方法与传统基坑开挖方法的稳定性进行对比分析,并在施工过程中采用现场监测手段对基坑的稳定性进行测试,验证拉槽分层开挖方法的可行性.

1 工程概述

车站为地下二层双柱三跨岛式车站,车站外包总长为 229.5 m,标准段外包宽度为 20.9 m,底板埋深 16.26~18.65 m,有效站台中心处的顶板覆土厚度约为 3.1 m.该站有效站台中心里程为 YJDK1+587.275 m,车站设计起点里程为 YJDK1+495.575 m,设计终点里程为 YJDK1+725.075 m.

车站平面布置图,如图 1 所示.车站站址周围为规划用地,无重要建筑,水文地质单元为第 4 系孔隙潜水(贫富水)单元,勘察期间,勘探深度 40 m 内未见地下水.

车站土建工程由主体结构和附属结构两部分组成,采用明挖顺做法施工,全外包防水做法,车站的围护结构形式为混凝土灌注桩排桩+内支撑支护体系,桩间采用 100 mm 厚挂网喷射混凝土.基坑围护冠梁为钢筋混凝土结构,截面尺寸为 1 000 mm×1 000 mm;中心标

高为 662.2 m;围檩为双拼 45a 工字钢围檩.一级保护的基坑围护开挖深度约为 16.3 m;围护桩规格为 $\Phi 800@1\ 400$,桩长为 19.9 m;首道支撑为 $\Phi 600\times 16$ 钢管,标准段间距为 6.0 m,中心标高为 +662.2 m;第 2,3 道支撑为 $\Phi 600\times 16$ 钢管,标准段间距为 3.0 m.特级保护的基坑围护端头井最深约为 19.8 m,中心标高为 +656.1 m/+651.0 m;围护桩规格为 $\Phi 800@1\ 100$,始发点、接收点桩长分别为 23.6、25.1 m;首道支撑为钢筋混凝土支撑(与冠梁同步浇筑),截面尺寸为 800 mm×900 mm,中心标高为 +662.2 m;第 2,3 道支撑为 $\Phi 600\times 16$ 钢管,标准段间距为 3.0 m,中心标高为 +655.7 m/+650.1 m.

灌注桩采用 C30 混凝土(水下浇筑时强度提高一级);桩间喷射混凝土采用 C25 早强混凝土.钢筋混凝土支撑、板撑和冠梁均采用 C30 混凝土;钢围檩与混凝土围护桩之间的空隙用强度不低于 C30 的细石混凝土密实填嵌.

2 基坑土方施工问题

地铁深基坑施工常受到交通组织需要及场地本身周围环境的限制,使得基坑施工场地较小,场地内的施工道路不能形成环路,从而对场地内施工机械进出造成影响,较大影响施工的流畅性.该车站为钢筋混凝土双层框架结构,结构平面型式为长条形,该站基坑具有以下 3 个特点.

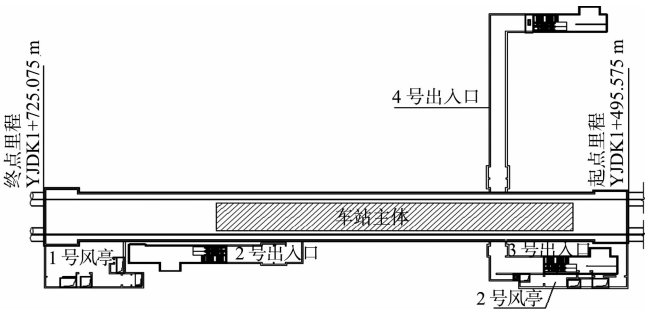


图 1 车站平面布置图
Fig. 1 Layout diagram of station

表 1 围岩计算参数
Tab.1 Calculation parameters of surrounding

土类名称	H/m	E/GPa	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	ν	C/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
杂填土	2	0.06	18.0	0.400	10	10.0
卵石	—	0.10	20.0	0.325	30	23.5

表 2 结构计算参数
Tab.2 Structure calculation parameters

结构名称	材料/规格	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	E/GPa	ν
支护桩	C30	23.0	13	0.2
钢围檩	45a 工字钢	79.0	210	0.2
钢支撑	Q235	78.5	210	0.2

4.1.3 施工过程模拟 计算模型中,拉槽开挖分段长度为 9.0 m,开挖放坡为 17.5°,开挖上层土的纵向拉槽至下层支撑下 0.5 m,两侧预留反压土,反压土顶部预留 2 m 左右的宽平台,为安装围檩及支撑人员提供作业面,反压土边坡按 1.00 : 0.75 留设,上层钢支撑安装时间滞后下层 1 个拉槽开挖长度的时间,即每一开挖段施工时,同时施做上一段钢围檩和钢支撑,每层拉槽开挖完毕后,两侧台阶按一次性开挖计算.第一层土方的开挖,如图 4 所示.

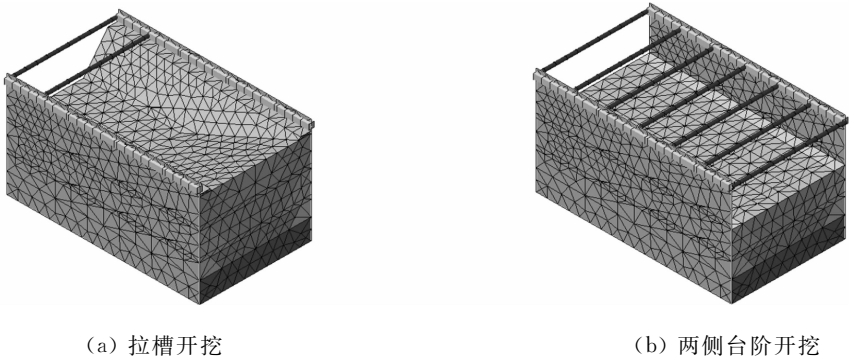
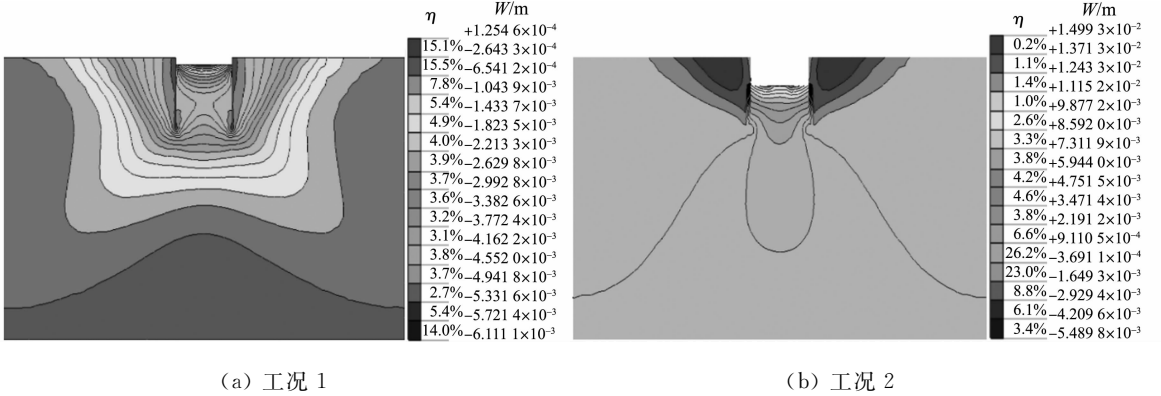


图 4 第一层土方的开挖
Fig.4 First layer earth excavation

4.1.4 计算结果及分析 为了消除模型计算中边界效应的影响,数值模拟分析的目标面设在模型的中间部位 $x=18\text{ m}$ 处.计算的主要目的是研究拉槽分层开挖法的地表沉降和桩体水平位移最大值的变化规律,主要有如下施工过程:工况 1 为地表开挖完毕;工况 2 为第 1 层土方开挖完毕;工况 3 为第 2 层土方开挖完毕;工况 4 为第 3 层土方开挖完毕.

1) 地表沉降.各工况下地表沉降情况,如图 5 所示.图 5 中: W 为地表沉降量; η 为云图数值占比.由图 5 可知:随着基坑开挖深度的增加,基坑坑底隆起逐渐增大,基坑周边地表沉降逐渐增大;工况 1 的地表沉降最大值约为 -6.1 mm ,出现在基坑侧壁,地表沉降主要由钻孔灌注桩的施工引起;工况 2 的地表沉降最大值约为 -5.5 mm ,距离基坑边缘约为 10.7 m ;工况 3 的地表沉降最大值约为 -7.1 mm ,距离基坑边缘约为 10.6 m ;工况 4 的地表沉降最大值约为 -8.0 mm ,距离基坑边缘约为 10.2 m ,地表沉



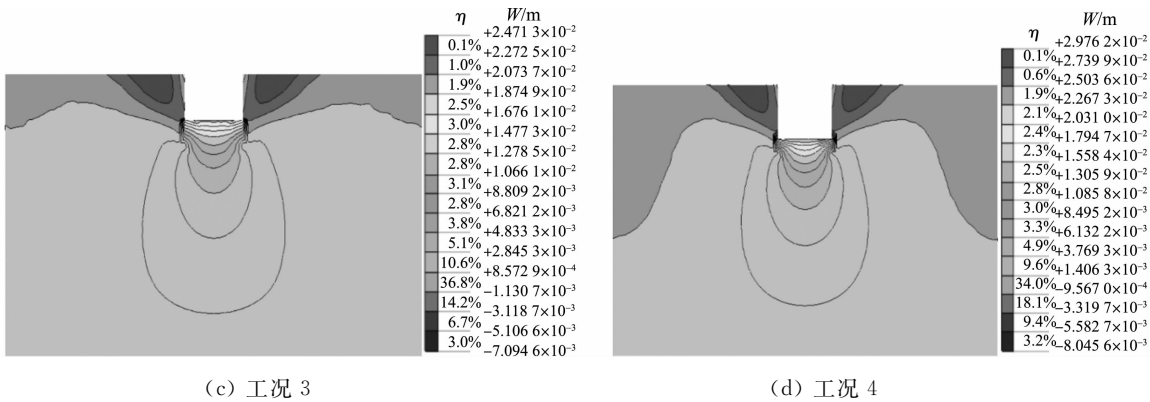


图 5 各工况地层竖向位移

Fig. 5 Vertical displacement of stratum under each working condition

降的主要影响距基坑范围约为 23.2 m.

2) 桩体水平位移. 各工况桩体水平位移, 如图 6 所示. 图 6 中: U 为水平位移;

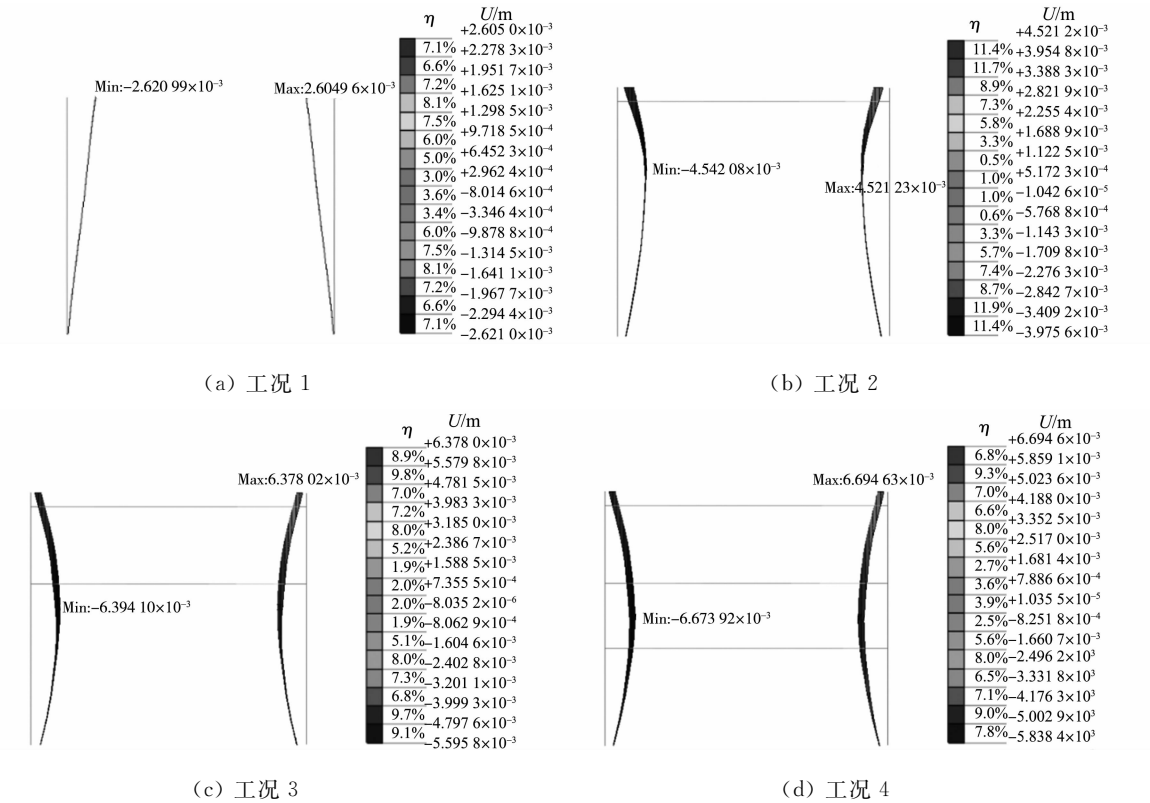


图 6 各工况桩体水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of pile under each working condition

由图 6 可知: 支护桩水平位移的最大值随基坑开挖深度的增加而增大, 支护桩水平位移最大值出现的位置由桩顶向桩体中部转移; 工况 1 的水平位移最大值约为 2.6 mm, 出现在桩顶处; 工况 2 的水平位移最大值约为 4.5 mm, 出现在埋深 6.5 m 处; 工况 3 的水平位移最大值约为 6.4 mm, 出现在埋深 9.0 m 处; 工况 4 的水平位移最大值约为 6.7 mm, 出现在埋深 10.3 m 处, 介于第 2 层钢支撑和第 3 层钢支撑之间.

4.2 稳定性对比分析

传统基坑开挖方法与拉槽分层开挖法的计算模型相同, 仅在施工步骤上有所区别, 因此只需要在计算模型中改变相关的计算参数即可. 传统基坑开挖方法分段长度为 9.0 m, 开挖放坡为 17.5°, 下层土体在上一层钢支撑全部安装后进行分段开挖, 钢支撑的安装紧随每个开挖段进行.

通过模型计算, 得出拉槽分层开挖法地表沉降和桩体水平位移最大值分别为 -8.0、-6.9 mm; 传

统基坑开挖法地表沉降和桩体水平位移最大值分别为 $-6.9, 5.9$ mm. 因此,在地表沉降方面,拉槽分层开挖法较传统基坑开挖法的地表沉降值增大 1.1 mm,增幅约 15.9% ;在桩体水平位移方面,拉槽分层开挖法较传统基坑开挖法的桩体水平位移增大 0.8 mm,增幅约 13.6% . 拉槽分层开挖法虽比传统基坑开挖法引起地表沉降和支护结构的变形大,但增幅并不大,引起地表沉降值仅为控制值的 26.7% ,桩体水平位移值仅为控制值的 22.3% ,满足相关规范^[16]规定的 30 mm 的要求. 考虑到拉槽分层开挖法在施工组织管理和施工效率方面的优势,确定采用拉槽分层开挖法作为该车站深基坑的施工方法.

5 施工效果

为验证基坑开挖方案的合理性,在采用拉槽开挖基坑施工全过程中,对围护结构及周边环境布置监控测点进行监控量测,监测的项目主要包括地面沉降、桩体水平位移、桩顶水平位移、临近管线变形、支撑轴力监测、围护桩内钢筋应力等. 选取地面沉降和桩体水平位移的监测结果进行对比分析.

1) 地面沉降监测. 在基坑 2 倍宽度范围内沿基坑长度方向每 20 m 设置观测断面(共 14 个断面,编号 $DB-01\sim DB-14$),每个断面设置 10 个测点,使用水准仪对内地表进行地面沉降量监测. 施工过程中,车站地表沉降测点中有效测点的沉降值最大为 -7.8 mm(出现在 $DB-06$ 断面的 $DB-06-10$ 测点处),其他断面测点地表沉降量集中在 $-4\sim-3$ mm 之间,均符合规范要求. $DB-06$ 断面是具有代表性的最大沉降值监测测点, $DB-06$ 断面地表沉降测点变形时态曲线,如图 7 所示.

由图 7 可知:所选取断面的地表各测点沉降量随时间增加而增大,即随开挖深度的增大而增大,并且曲线呈现出阶段性增大趋势.

2) 桩体水平位移监测. 沿基坑周围每 20 m 设置桩体位移监测桩(共 26 根监测桩体,编号 $ZQT-01\sim ZQT-26$),每个桩身自上而下设置 43 个测点,使用测斜管和测斜仪对桩身进行桩体水平位移量的监测. 在基坑开挖施工过程中,所监测的各桩桩体位移量均较小,符合规范允许变形要求. 基坑开挖过程中 $ZQT-14$ 桩桩体水平位移,如图 8 所示. 图 8 中: h 为深度.

由图 8 可知:选取的监测桩体各测点位移随开挖深度的增大而增大,其中,桩顶的位移最大,为 7.7 mm;随着土方开挖深度的增大,位移逐渐向桩体中部移动,集中在桩体 $7\sim 9$ m 处,桩体中部位移最大值为 6.8 mm.

3) 监测结果与数值计算结果的对比. 根据施工过程中监测的结果显示,车站地表沉降测点最大沉降值在施工过程中达到控制值的 26% ,大部分测点沉降值为控制值的 $10\%\sim 13.3\%$;桩体水平位移最大值为控制值的 25.7% ,监测结果均满足规范的要求. 将拉槽开挖施工数值模拟计算的结果与现场实测的数据进行对比分析,地表沉降最大值和桩体水平位移分别为 $-8.0, 6.7$ mm(计算数据), $-7.8, 6.8$ mm(监测数据). 因此,计算数据和监测数据接近,监测结果验证了拉槽开挖数值模型计算的准确性,进一步说明采用拉槽分层开挖法施工车站基坑的稳定性是可以得到保证的.

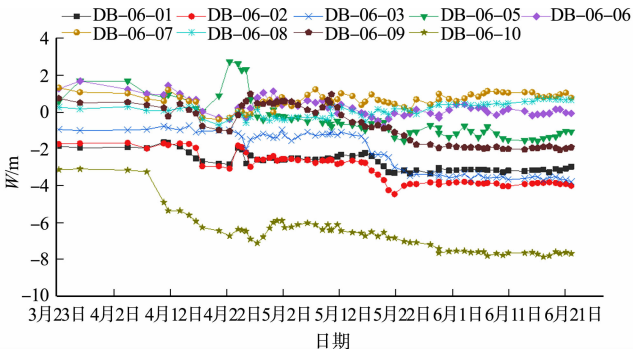


图 7 DB-06 断面地表沉降测点变形时态曲线
Fig. 7 Deformation time curves of DB-06 section surface settlement measuring point

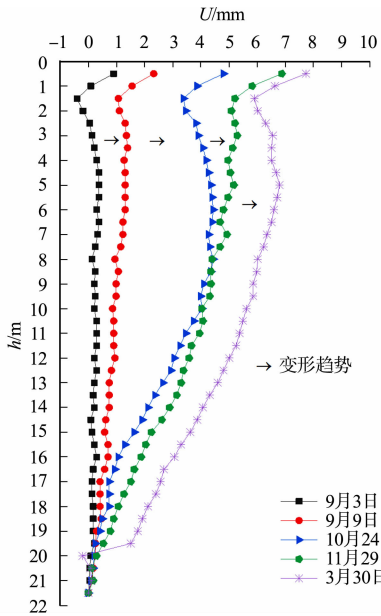


图 8 基坑开挖过程中 $ZQT-14$ 桩桩体水平位移
Fig. 8 Horizontal displacement of $ZQT-14$ pile during foundation pit excavation

从施工的效果来看,该施工方法确保了土方开挖进度,保证了两侧围护桩均匀受力,并提供了支撑架设及喷混作业平台。渣土车可直接开至基坑开挖面,减少土方倒运次数,提高土方开挖功效,减少开挖过程中挖掘机数量,机械成本得到有效控制。该施工方法能尽快为主体结构施工提供工作面,形成流水作业,提高功效,保证钢支撑架设时间。监测结果和数值计算结果均显示该施工方法可以保证车站基坑在施工过程中的稳定性,说明了拉槽分层开挖施工方法在施工组织管理和施工效率方面优势明显。

6 结束语

针对乌鲁木齐地铁1号线某车站基坑施工中遇到的挖运效率低的问题,提出了车站基坑拉槽分层开挖法。采用数值模拟计算方法对比分析了拉槽分层开挖方法与传统基坑开挖方法施工过程中基坑的稳定性,说明了拉槽分层开挖方法的可行性。同时,结合该车站施工现场监测结果,验证了拉槽分层开挖方法可以保证车站基坑开挖的稳定性,同时,施工速度较快,保证了该车站基坑的施工安全与速度,达到了安全、高效施工的目的,在施工组织管理和施工效率方面优势明显,可为类似工程提供参考。

参考文献:

- [1] 王立峰,庞晋,徐云福,等. 基坑开挖对近邻运营地铁隧道影响规律研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2004-2010. DOI:10.16285/j. rsm. 2016. 07. 022.
- [2] 于富才,张顶立,穆伟刚,等. 地铁车站明挖-暗挖交接处开挖方案优化研究[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(6): 69-74. DOI:10.11860/j. issn. 1673-0291. 2015. 06. 010.
- [3] 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. DOI:10.3969/j. issn. 1000-6915. 2012. 01. 022.
- [4] 郑刚,杜一鸣,刁钰,等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 599-612. DOI:10.11779/CJGE201604003.
- [5] 白海峰,徐成成. 地铁车站深基坑开挖及围护结构变形模拟分析[J]. 大连交通大学学报, 2019, 40(5): 92-97. DOI: 10.13291/j. cnki. djdxac. 2019. 05. 018.
- [6] 郭典塔,周翠英. 基坑开挖对近接地铁车站的影响规律研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(1): 156-162. DOI: 10.13807/j. cnki. mtt. 2015. 01. 022.
- [7] 郑强华. 地铁车站明挖深基坑稳定性及变形控制研究[D]. 重庆:重庆大学, 2016.
- [8] 王峰,高月新,周勋,等. 砂卵石地层深基坑围护结构变形监测与模拟[J]. 科技通报, 2020, 36(2): 74-79. DOI: 10.13774/j. cnki. kjtb. 2020. 02. 014.
- [9] 刘天正. 砂卵石地层基坑开挖对下卧运营盾构隧道结构变形研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 2: 1-7. DOI: 10.13238/j. issn. 1004-2954. 201809100003.
- [10] 徐江,龚维明,穆保岗,等. 软土区某地铁深基坑施工过程数值模拟及现场监测[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(3): 590-598. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-0505. 2017. 03. 029.
- [11] 郭力群,陈亚军,徐芳超. 延深基坑桩锚加固支护结构力学特性分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 86-90. DOI: 10.11830/ISSN. 1000-5013. 2015. 01. 0086.
- [12] 王杰光,廖武新,孔令鹏. 地铁站基坑开挖变形特征与数值模拟分析[J]. 兰州工业学院学报, 2017, 24(1): 13-18, 33. DOI: 10.3969/j. issn. 1009-2269. 2017. 01. 003.
- [13] 蒙国往,农忠建,吴波,等. 地铁车站深基坑开挖变形及数值模拟分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(7): 145-151. DOI: 10.11731/j. issn. 1673-193x. 2020. 07. 023.
- [14] 雷裕霜. 上跨地铁基坑开挖对区间隧道变形的影响与控制研究[D]. 厦门:华侨大学, 2017.
- [15] 夏丹丹. 明挖法地铁车站施工安全风险研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2016.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通工程监测技术规范: GB 50911-2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)