

敏感环境条件下深基坑开挖对邻近地铁结构影响分析

王在军

(中冶长天国际工程有限责任公司,湖南 长沙 410205)

摘要:既有地铁结构会因邻侧的基坑开挖而发生变形,对地铁车站的安全和正常使用产生不利影响。因此,分析基坑开挖对地铁车站结构的影响具有十分重要的意义。文章以某项目的基坑开挖过程为例,使用有限元分析软件 Midas GTS NX 进行分析模拟,分析评估基坑施工对地铁车站结构安全和正常使用产生的影响。计算结果表明:随着基坑工程的施工和开挖,基坑附近地铁车站结构的位移和变形也同步增大。此外,在基坑支护设计中有针对性的增强支护体系刚度,既能保证基坑的安全又能较好地控制紧邻地铁结构的变形,并总结了在基坑支护设计中的其它若干需要注意的问题,为今后同类工程设计与施工提供参考。

关键词:敏感环境; 地铁结构; 深基坑; 影响分析; 安全评估; 有限元分析

中图分类号:TU753;U231

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)11-0043-07

doi:10.13402/j.gcjs.2025.11.137

Influence analysis of deep pit excavation on adjacent subway structure in sensitive environment

WANG Zaijun

(Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: The loading effect of excavation can lead to the deformation of adjacent existing tunnel, which may affect the operation and safety of the tunnel. Therefore it is important to assess the effect of the excavation of fundamental pit on the structure safety of adjacent tunnels. Based on the procedure of engineering, the finite element method software Midas GTS NX was adopted for numerical simulation, aiming at conducting assessment on the effect of excavation of dip on the structure safety of subway. The results indicates that the displacement of tunnel around the dip increase as the excavation proceeding. Besides, it is necessary to strengthen the stiffness of the supporting system in the design of excavation can not only ensure the safety of the foundation pit but also better control the deformation of adjacent subway structure. In addition, some other conclusions of the retaining structure in the design of excavations were summarized, which can provide references for the other similar engineering design and construction.

Key words: sensitive environment; subway structure; deep foundation pit; finite element analysis; influence analysis; safety assessment

随着我国城市建设的迅速发展,在既有的城市轨道交通结构周围建设项目的数量也在不断增加^[1-2]。在这些问题中,基坑开挖发生变形对地铁车站的安全和正常使用产生的不利影响引起人们的广泛关注。施工中的基坑开挖会使现有的城市轨道交通结构发生变形,甚至对现有的城市轨

道交通结构造成重大的破坏^[3-4]。因此,在基坑工程建设之前,进行安全评价是确保现有城市轨道交通结构安全的重要措施。

目前,一些国内外的研究人员已对基坑施工影响临近轨道交通结构进行了深入的研究和分析。刘栋、卜佳等论证了不同开挖方式、开挖深度等条件

收稿日期:2025-03-11

作者简介:王在军(1985—),男,高级工程师,从事岩土工程勘察设计工作。

对现有轨道交通结构的影响^[5-6]。胡海英^[7]、张迪^[8]通过数值仿真,对不同条件下的地铁变形进行了有效的研究,从某种意义上对影响城市轨道交通结构的因素进行了分析。王霆^[9]、左殿军等^[10]采用差分有限元方法,对基坑开挖对地铁工程的影响范围和影响程度进行了研究。郑刚等^[11]、许杰等^[12]采用 MIDAS 有限元软件论证了基坑开挖对基坑正下方城市轨道交通结构的影响。因此,运用有限元方法进行基坑施工对临近轨道交通结构的安全评估,是一种非常有效的方法^[13-15]。

文章以深圳市某康复医院为例,应用大型通用有限元软件 Midas GTS NX 进行数值分析,建立三维数值模型,对基坑施工过程进行模拟,根据计算结果及相关规范,提供安全性评估建议。并就临近地铁结构的基坑支护设计和防护措施等问题,提出相应的对策和建议,以期可为日后同类工程设计施工提供借鉴。

1 工程概况

1.1 项目概况

该项目位于广东省深圳市福田区某地铁车站及区间隧道旁。本工程拟建建筑物主要由主楼、裙房及地下室组成,其中,主楼 17 层,结构高度为 78.15 m;裙房 4~6 层,结构高度为 32.35 m;地下车库为三层地下室。本项目基坑工程总周长约为 360 m,基坑工程总面积约为 5 405.7 m²,基坑工程深度约为 14.2 m。场地周边环境条件复杂,北侧、东侧和西侧为采用天然地基的多层民用建筑物,南侧紧邻地铁站,对基坑工程施工开挖产

生的变形极其严格。

本项目基坑支护情况较为特殊,基坑最外围支护结构距离地铁车站结构最近处约为 6.5 m,处于规范要求的轨道交通控制保护区范围内。同时,根据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T 202-2013)和《城市轨道交通既有结构保护技术规范》(DBJ/T 15-120-2017),外部作业对轨道交通的影响等级为特级,地铁车站结构和盾构区间隧道位于强烈影响区内。在工程建设中,由于基坑工程的存在,导致了周边地层的应力分布发生了明显的变化,从而导致了地层的变形,从而对已建地铁结构的安全和正常使用产生不利影响。因此,在深基坑工程施工前,必须对相邻的地铁结构进行安全评价,并对其进行重点防护。

1.2 工程地质条件和水文地质条件

本项目场地内地层由上到下依次为素填土、淤泥、粉质黏土、粉细砂、砂质黏性土、全风化岩、强风化岩、中风化岩和微风化岩。其岩土体物理力学性质参数如表 1 所示。

项目地下水水位较高,地下水类型可划分为孔隙水和基岩裂隙水两类。孔隙水主要赋存于第四系人工填土层及冲洪积层中,其次分布在残积层和全风化岩层中。基岩裂隙水主要分布在强风化、中、微风化层裂隙内,具微承压性。

1.3 基坑支护方案

项目采用地下连续墙+两道内支撑的支护形式,其中地下连续墙厚度一般采用 800 mm,在邻近地铁的南侧采用 1 000 mm 厚地下连续墙,通过对地下连续墙墙体刚度的加强,进一步减少围护

表 1 岩土体物理力学参数

地层	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	E_s/MPa	μ	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa
素填土	17.0	17.0	—	0.30	15	12
淤泥	16.0	16.0	3	0.32	5	10
粉质黏土	18.5	18.5	5	0.30	16	20
粉细砂	19.5	19.5	—	0.30	25	—
砂质黏性土	19.0	19.0	11	0.30	28	25
全风化岩	19.5	19.5	14	0.25	30	28
强风化岩	20.5	20.5	16	0.25	32	30
中风化岩	25.0	25.0	—	0.22	42	200
微风化岩	26.5	26.5	—	0.22	50	400

注: γ 为天然容重; γ_{sat} 为饱和容重; E_s 为压缩模量; μ 为泊松比; φ 为内摩擦角; c 为黏聚力。

体的变形，从而减少基坑开挖对地铁车站结构的影响；内支撑梁节点位置设置格构柱，格构柱下设置立柱桩。基坑周边环境及支护工程平面布置如图 1 所示，地铁车站位置基坑支护的典型断面如图 2 所示，地铁区间隧道位置基坑支护的典型断面图如图 3 所示。

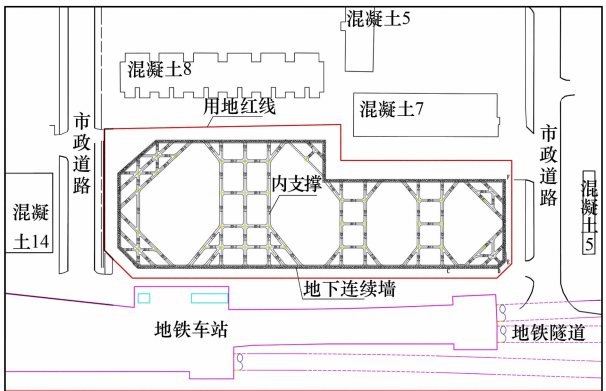


图 1 基坑周边环境及支护工程平面布置

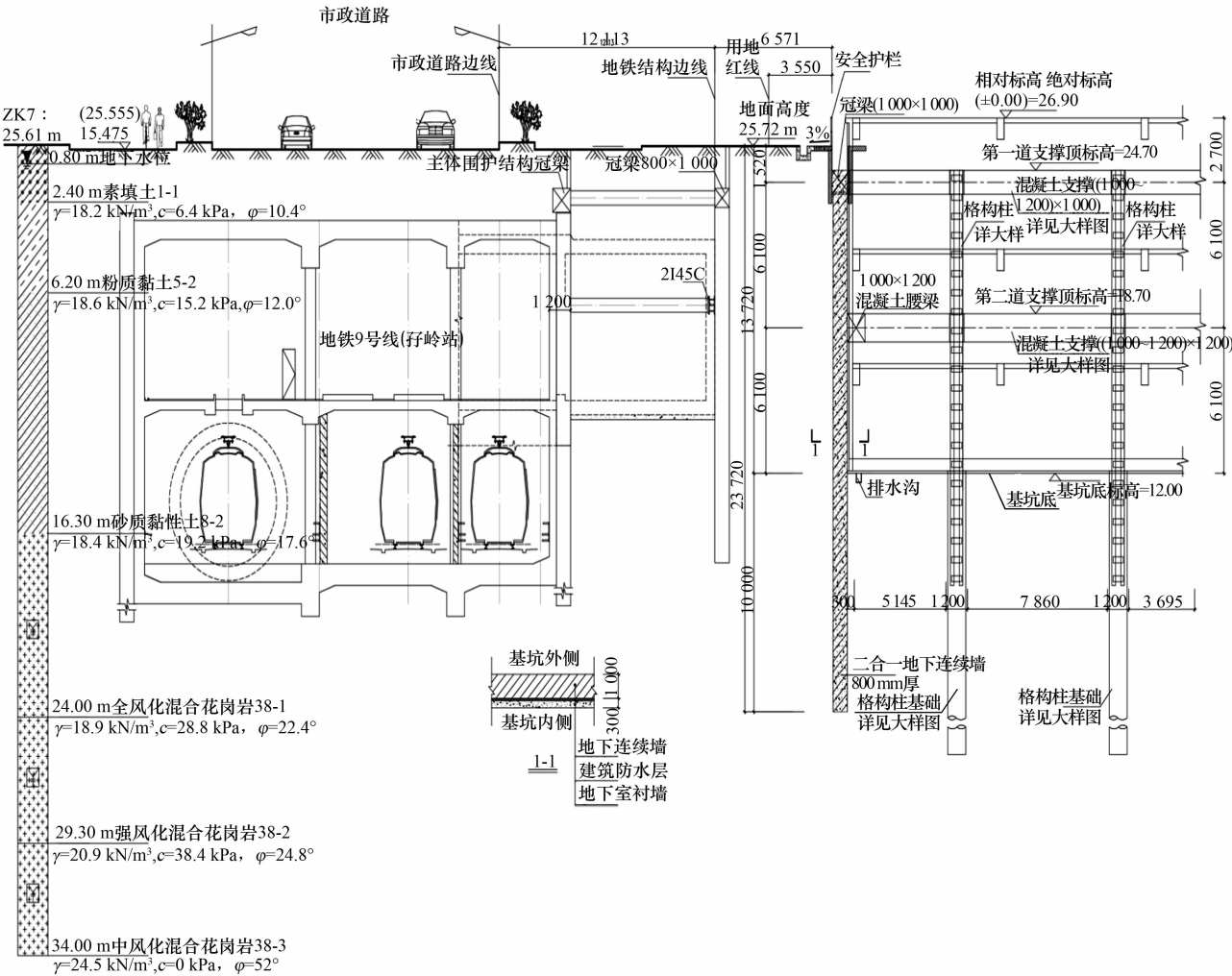


图 2 地铁车站位置基坑支护的典型断面

1.4 评估标准

根据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T 202-2013)、《城市轨道交通既有结构保护技术规范》(DBJ/T 15-120-2017)和地区地铁保护区相关标准，并结合类似工程建设经验，地铁结构控制指标按照表 2 执行。

2 基坑工程支护数值模拟

利用 MIDAS GTS NX 大型有限元软件，对整个基坑工程施工过程进行了三维模拟计算，分析了基坑工程变形特点以及对临近城市轨道交通结构的影响。通过有限元数值模拟对整个基坑工程施工过程进行评估分析，全面评价基坑工程施工对地铁车站的安全和正常使用产生不利影响，为同类型的项目设计提供参考和依据。

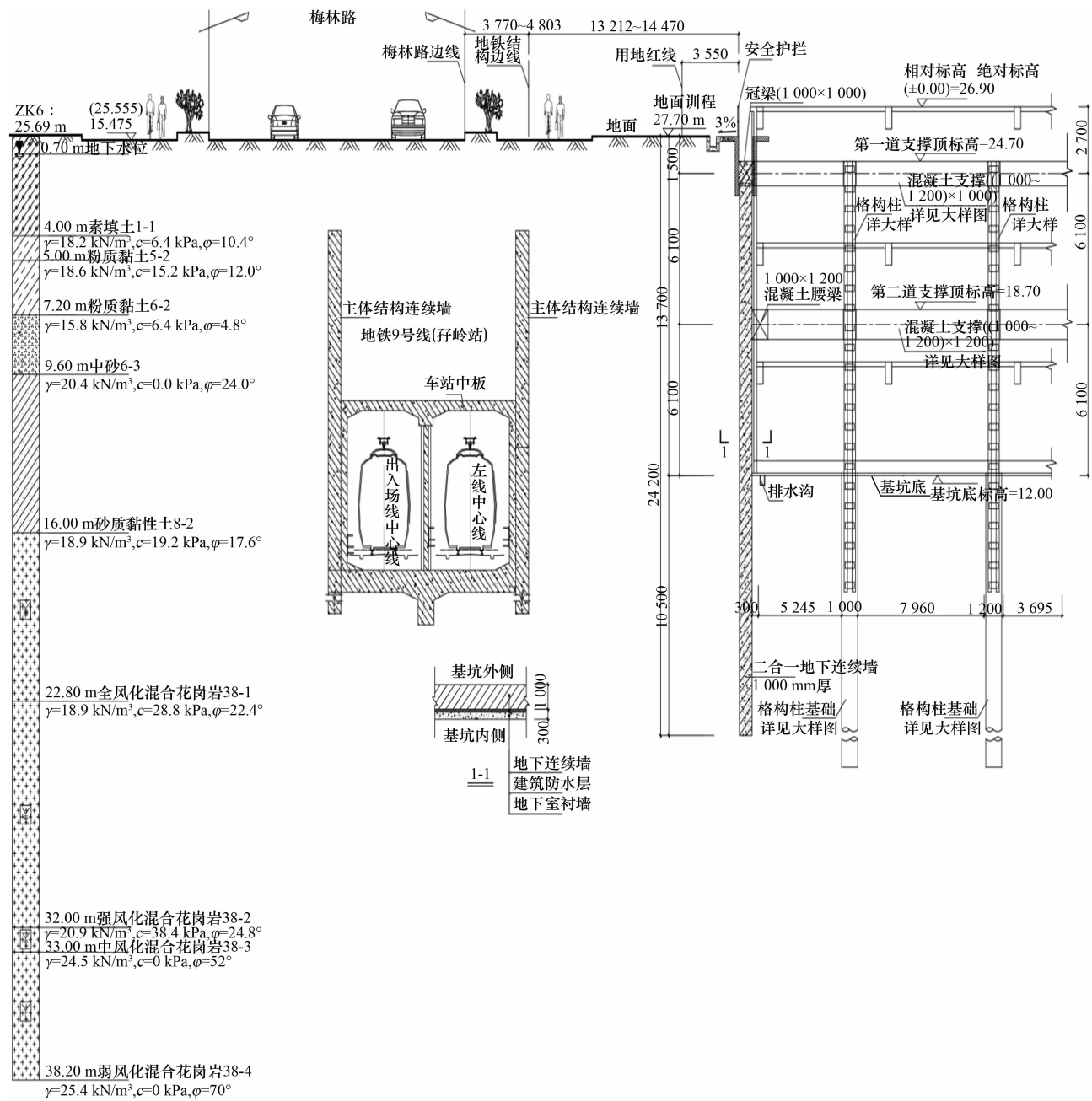


图 3 地铁区间隧道位置基坑支护的典型断面

mm

表 2 地铁结构变形控制指标

安全控制指标	隧道水平位移/mm	隧道竖向位移/mm	隧道径向收敛/mm	变形曲率半径/m	变性相对曲率/mm	轨道横向高差/mm	轨向高差/mm	轨间距/mm
预警值	<10	<10	<10	—	—	<2	<2	>-2、<+3
控制值	<15	<15	<15	>15 000	<1/2 500	<2	<2	>-4、<+6

2.1 仿真模型尺寸

项目基坑工程的尺寸约为 138.4 m×46.5 m (长×宽)，一般基坑开挖深度为 14.2 m。由于基坑开挖对周边环境的影响范围一般是 3 倍的基坑深度，因此在三维计算模型中，模型的尺寸采用

420 m×200 m×60 m。本次计算分析采 10 个节点四面体单元进行了分析，共得到 86 863 个土体单元，153 697 个节点。整体有限元分析模型如图 4 所示。整个模型分为三大块：1) 与地铁结构相邻的基坑；2) 地铁车站；3) 盾构区间隧道。该模型的

上部为自由，底部固定，每个侧边固定法向运动。

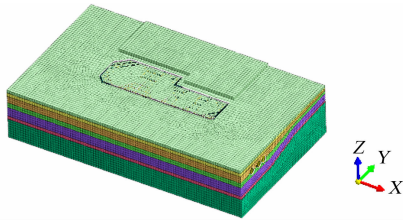


图 4 整体有限元模型

计算模型中的地层、本项目的基础底板、附近既有建(构)筑物均采用实体单元模拟，本项目基坑围护结构地下连续墙、地铁车站、盾构区间隧道均采用板单元模拟，基坑支护的混凝土支撑、围檩、立柱及立柱桩均采用梁单元模拟。基坑周围建筑物的荷载取为 18 kPa/层。图 5 为基坑围护结构与地铁车站及盾构区间隧道的有限元模型。

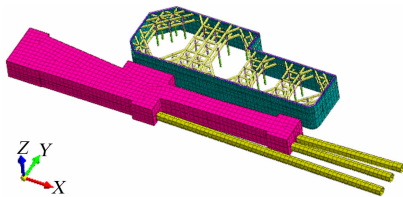


图 5 基坑围护结构与地铁车站及盾构区间隧道分析

2.2 相关结构构件计算参数

计算模型中假定各结构均为弹性变形体。盾构区间隧道衬砌，车站结构，地下连续墙及其他相关结构构件的截面尺寸和计算参数如表 3 所示。所有的结构构件都按弹性模型计算。在对其进行数值模拟时，都假设其为弹性阶段；钢筋混凝土结构构件的容重取 25 kN/m³。

表 3 相关结构构件计算参数

构件类型	厚度/ mm	容重 / (kN·m ⁻³)	弹性模 量/MPa	泊松比
地下连续墙	1 000	25.0	31 500	0.20
内支撑	—	25.0	32 500	0.20
车站边墙	600	25.0	32 500	0.20
隧道结构	350	25.0	32 500	0.20
立柱桩	—	25.0	30 000	0.20
立柱	—	78.5	210 000	0.3

2.3 基坑工程施工过程计算分析

在项目基坑支护设计方案和仿真模型中，在基坑北侧施加 144 kPa 的建筑物荷载和 20 kPa 的施工荷载，在基坑东侧施加 20 kPa 的施工荷载，基坑南侧紧邻地铁车站和盾构区间，施加 10 kPa 的施工荷载，

在基坑西侧施加 20 kPa 的施工荷载。本次分析主要分为 6 个工况，基坑工程施工工况如表 4 所示。

表 4 基坑工程施工工况

序号	工况	实施过程
1	初始应力平衡	激活所有土体、自重、结构均布荷载和边界位移约束。
2	修建既有地铁结构	激活地面建筑物、地铁车站和基坑围护结构、盾构区间隧道等结构构件，并将对应的土体单元钝化，以模拟现有结构的施工。
3	地下连续墙、立柱、立柱桩施工	设定结构构件的初始状态，将上述结构构件的位移清零，激活围护结构地下连续墙、立柱、立柱桩等结构构件和地面荷载。
4	基坑开挖至第一层支撑底	模拟基坑开挖至第一层支撑底，并激活第一层内支撑。
5	基坑第二次土方开挖	基坑开挖至第二道支撑底，并“激活”地连墙顶的第二道内支撑。
6	基坑第三次土方开挖	基坑开挖至坑底。

3 数值模拟结果分析

根据基坑开挖方案，模拟基坑工程施工各工况下地铁车站结构的影响。

3.1 基坑开挖地铁结构 X 方向水平位移

基坑开挖对邻近地铁结构 X 方向造成水平位移，不同工况下地铁结构的水平位移如图 6~8 所示。

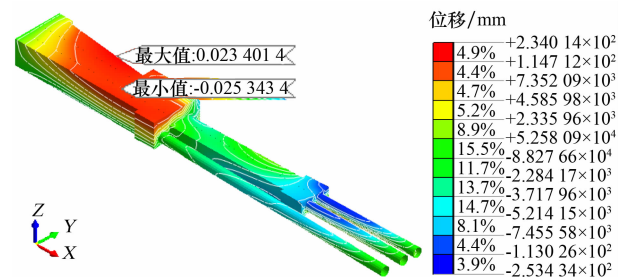


图 6 第一次土方开挖地铁结构 X 方向水平位移

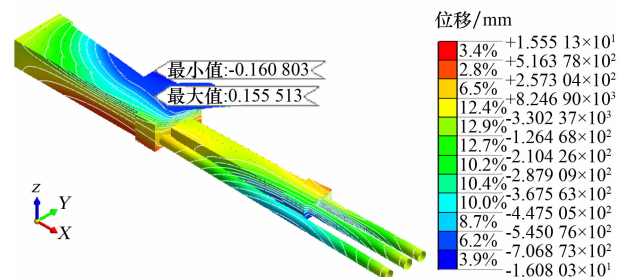


图 7 第二次土方开挖地铁结构 X 方向水平位移

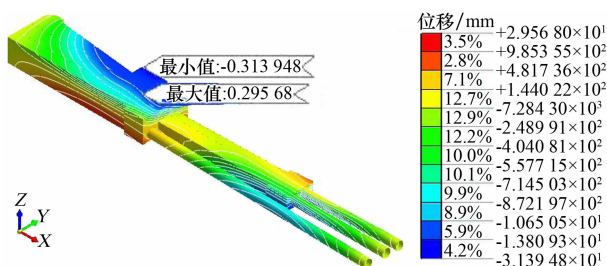


图 8 第三次土方开挖地铁结构 X 方向水平位移

统计上述模拟过程中得到的各个位移量如表 5 所示。参照表 2 的规定,表 5 的计算结果表明,基坑工程开挖施工引起的地铁结构 X 方向水平变形都满足规定要求,基坑开挖过程中地铁结构是安全稳定的。

表 5 计算结果统计

开挖工况	最大位移/mm	最小位移/mm
第一次开挖	0.023 4	-0.025 3
第二次开挖	0.155 5	-0.160 8
第三次开挖	0.295 7	-0.313 9

3.2 基坑开挖地铁结构 Y 方向水平位移

基坑开挖对邻近地铁结构 Y 方向造成水平位移,不同工况下邻近地铁结构的水平位移如图 9 ~ 11 所示。

统计上述模拟过程中得到的各个位移量如表 6 所示,表中位移值正号表示向基坑移动。参照表 2 的规定,表 6 的计算结果表明,基坑工程开挖施工引起的地铁结构 Y 方向水平变形满足规定要求,基坑开挖过程中地铁结构是安全稳定的。

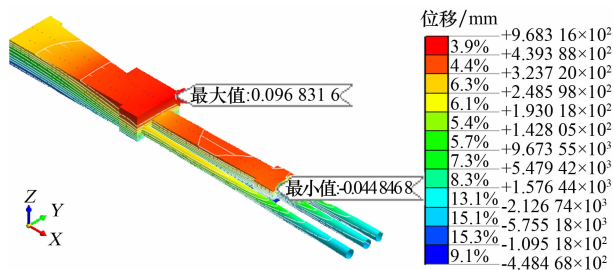


图 9 第一次土方开挖地铁结构 Y 方向水平位移

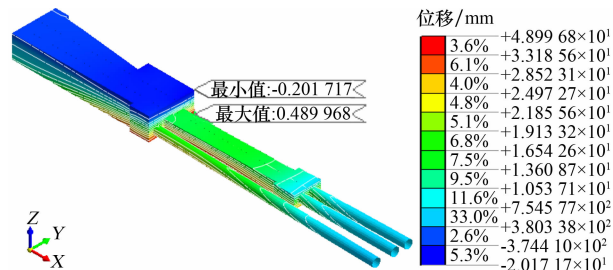


图 10 第二次土方开挖地铁结构 Y 方向水平位移

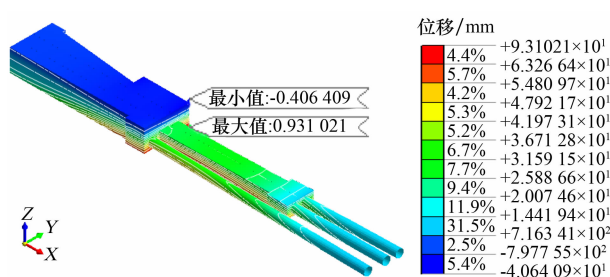


图 11 第三次土方开挖地铁结构 Y 方向水平位移

表 6 计算结果统计表

开挖工况	第一次开挖	第二次开挖	第三次开挖
最大位移	0.096 8	0.490 0	0.931 0
最小位移	-0.044 8	-0.201 7	-0.406 4

3.3 基坑开挖地铁结构竖向位移

基坑开挖过程中对地铁结构造成竖向的不利变形,竖向位移如图 12 ~ 14 所示。

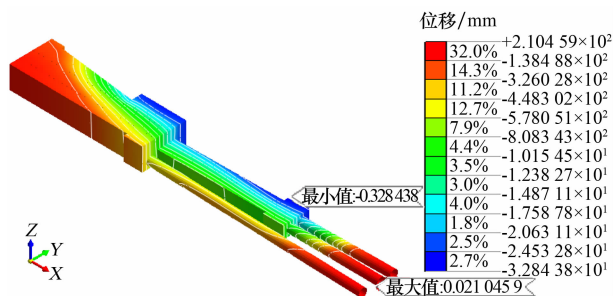


图 12 第一次土方开挖地铁结构竖向位移

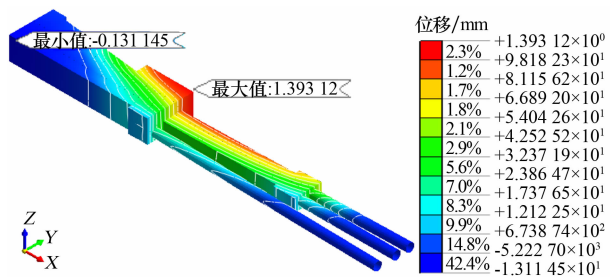


图 13 第二次土方开挖地铁结构竖向位移

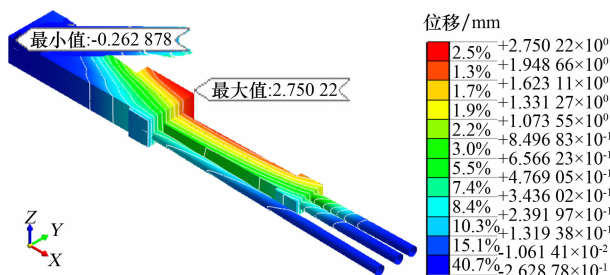


图 14 第三次土方开挖地铁结构竖向位移

统计上述模拟过程中得到的各个位移量如表 7 所示。参照表 2 的规定,表 7 的计算结果表明,基坑工程开挖施工引起的地铁结构 Y 方向水平变形满足

规定要求，基坑开挖过程中地铁结构是安全稳定的。

表 7 计算结果统计

开挖工况	最大位移/mm	最小位移/mm
第一次开挖	0.021 0	-0.328 4
第二次开挖	1.393 1	-0.131 1
第三次开挖	2.750 2	-0.262 9

4 结 论

(1) 由于基坑开挖卸载，基坑侧壁土体产生向基坑侧的移动，从而引起了地铁结构向基坑方向的水平变形，根据计算结果，最大水平变形一般出现在地铁车站靠近基坑中部的区域。

(2) 随着基坑工程各工况的施工，导致地铁结构的变形进一步的增大。根据三维数值分析，基坑开挖卸荷施工扰动引起隧道结构水平向变形为 0.93 mm，引起隧道结构沉降为 2.75 mm；整个基坑支护施工、基坑开挖过程中，基坑工程对轨道交通结构的影响均在规范的允许范围内，不影响地铁的正常运行。

(3) 本项目基坑工程开挖深度为 14.20 m，属于深基坑工程，并且基坑工程采用了地下连续墙+钢筋混凝土内支撑的支护结构，从数值模拟结果可以看出该支护方案在控制基坑的变形和减少对地铁隧道结构的扰动影响作用是比较明显的。

(4) 考虑到基坑工程时间效应的影响，在基坑工程开挖完成后，必须迅速施工地下室基础底板，缩短基坑暴露时间，以减小基坑开挖对地铁车站和盾构区间隧道的安全和正常使用产生不利影响。

(5) 在基坑工程施工期间，需要对地铁车站结构和盾构区间隧道结构进行实时监测，监测项目主要有结构裂缝、结构变形、轨道几何尺寸变化等，特别是要密切注意加强监测地铁车站结构和盾构区间隧道变形较大的区域。地铁车站结构和盾构区间隧道自动化监测断面间距不应超过 10 m，并且在变形较大的区域须加密监测断面。基坑工程监测应从基坑支护及土石方工程施工前开始，直至地下室回填完成并且监测数据趋于稳定后才能结束。

参考文献：

[1] 郑刚,王琦,邓旭,等. 不同围护结构变形模式对抗外

既有隧道变形影响的对比分析[J]. 岩土工程学报, 2015,37(7):1181-1194.

[2] 张祁,张敏. 基坑施工对紧邻地铁结构安全性的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(5):72-77.

[3] 林杭,陈靖宇,郭春,等. 基坑开挖对邻近既有隧道变形影响范围的数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(11):4240-4247.

[4] 童伟. 深基坑开挖对邻近既有隧道力学效应影响规律研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.

[5] 刘栋. 超深大基坑开挖对紧邻既有地铁隧道的影响分析[D]. 北京:北京交通大学,2014.

[6] 卜佳. 基坑开挖对既有地铁隧道的变形影响研究[D]. 北京:中国地质大学,2015.

[7] 胡海英,张玉成,杨光华,等. 基坑开挖对既有地铁隧道影响的实测及数值分析[J]. 岩土工程学报,2014(增刊2):431-439.

[8] 张迪. 杭州铁路东站西广场大基坑开挖对其下地铁盾构隧道的影响与控制[J]. 隧道建设,2013,33(11):897-902.

[9] 王霆. 南京长江漫滩区基坑开挖与降水对既有地铁隧道影响的数值分析[J]. 都市快轨交通,2016,29(3):81-86.

[10] 左殿军,史林,李铭铭,等. 深基坑开挖对邻近地铁隧道影响数值计算分析[J]. 岩土工程学报,2014(增刊2):391-395.

[11] 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.

[12] 许杰,顾国荣,杨石飞. 邻近地铁基坑开挖影响有限元参数化分析[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(2):284-90.

[13] 戚长军,刘争宏,余武术,等. 基坑开挖对既有盾构隧道与地层的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(5):142-146.

[14] 刘方梅. 深基坑开挖对临近地铁隧道的影响[D]. 杭州:浙江大学,2015.

[15] 裴行凯,倪小东. 深基坑开挖对临近既有地铁隧道的影响分析与对策[J]. 水利与建筑工程学报,2013,11(3):45-48.