

深基坑开挖对邻近既有地铁天桥及出入口的影响分析

赖小勇, 吴荣本, 李慧慧

(杭州市勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 紧邻既有地铁设施的深基坑工程在基坑开挖过程中, 可能由于土体的卸荷作用而引起周边土体位移, 进而带动地铁设施产生变形。本文以杭州地铁16号线八百里站C号、D号出入口旁侧某房地产开发项目地下室基坑工程为例, 通过有限元数值分析软件建立二维、三维模型, 针对基坑开挖对邻近既有地铁天桥及出入口的影响进行数值模拟分析, 预测基坑变形, 分析基坑开挖过程中邻近既有地铁天桥与出入口的位移响应, 重点分析基坑开挖至坑底及拆换撑工况下地铁设施的位移场, 并总结主要测项的变化规律, 进行变形趋势分析。数值模拟计算结果与地铁变形监测数据表明, 基坑施工对地铁设施的影响较小, 满足轨道交通结构变形控制值要求。

关键词: 深基坑开挖; 地铁; 天桥; 出入口; 有限元; 影响分析

中图分类号: TU473.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S1-0006-08

Analysis of the impact of deep foundation pit excavation on adjacent existing subway overpasses and entrances/exits

LAI Xiao-yong, WU Rong-ben, LI Hui-hui

(Hangzhou Geotechnical Engineering and Surveying Research Institute with Limited Liability, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: During the excavation process of deep foundation pits adjacent to existing subway facilities, the unloading effect of soil may cause displacement of surrounding soil, potentially resulting in deformations of the adjacent subway facilities. This work presents a case study of a basement foundation pit project located near the C and D entrances and exits of Babaili station on Hangzhou Metro Line 16. Both two-dimensional and three-dimensional finite element models were established using numerical analysis software. Numerical simulations were performed to analyze the impact of foundation pit excavation on nearby subway overpasses and entrances/exits. The study predicts the deformation of the foundation pit and analyzes the displacement response of nearby subway overpasses and entrances/exits during the excavation process. Specifically, it examines the displacement field of subway facilities during excavation to the bottom of pit and the subsequent dismantling and replacement of supports. Additionally, variations in key measurement parameters were summarized to analyze deformation trends. The numerical simulations and the results from subway deformation monitoring all indicate that the foundation pit construction has a negligible impact on the subway facilities, and meeting the deformation control criteria for rail transit structures.

Key words: deep foundation pit excavation; subway; overpass; entrance and exit; finite element analysis; impact analysis

0 引言

地铁作为一种高速、便捷的交通工具, 深受人民群众的欢迎。近年来, 各大中城市掀起地铁建设热潮, 纷纷梦想着早日构建起属于自己城市的轨道

交通线网。大量基坑工程与运营中的地铁设施相邻, 需要采取有效措施控制基坑和地铁设施的变形。国内学者及工程界针对深基坑开挖对邻近地铁设施影响进行了大量的研究, 影响对象以盾构隧道为主, 但将地铁天桥及出入口这类高架或地面结构

作为影响对象的案例较少。

梅祯等^[1]以苏南地区城市轨道交通结构附近的一个基坑工程为例,通过三维有限元分析模拟了基坑的施工过程,并反演了适合模拟基坑施工过程的计算参数。在此基础上,他们研究了不同开挖距离、基坑尺寸、开挖深度、基坑数量和施工技术对相邻地铁高架结构的影响。洪伟东^[2]通过对杭州西部某软土深基坑工程开挖过程中桩身位移、深部土体位移、支护轴力和立柱沉降的监测,收集了开挖过程中的监测数据,对数据结果进行了分析,总结了基坑开挖的变化规律。根据深基坑工程的典型剖面,利用 Plaxis 软件建立了深基坑二维有限元分析模型,模拟分析了基坑支护结构在不同工况下的支撑轴向力和基坑变形的变化情况。闫磊等^[3]结合工程实例,运用有限元分析软件,建立了地铁出入口结构旁侧基坑开挖施工引起变形及内力影响的分析模型,基坑施工对出入口结构的影响确定在合理可控范围内,同时得出结论,基坑施工引起的出入口变形主要集中在附属结构地面位置附近。宫本福^[4]结合北京地铁 14 号线西铁营站南侧新建基坑工程实例,分析了在考虑或不考虑既有地铁围护结构的两种工况下,新建基坑对既有地铁出入口结构变形的影响,并进一步分析了基坑施工对既有地铁出入口结构变形影响的现场监测数据,提出了既有地铁车站出入口结构的变形控制指标。葛鹏飞等^[5]以杭州九沙大道 1 号人行通道开挖工程为例,介绍了基坑支护方法和监测方案,并分析了开挖过程中土体水平位移、地表沉降和地下水位变化的现场监测结果,指出钻孔灌注桩与高压旋喷桩相结合,保证了基坑支护结构、开挖施工和周围环境的安全。王振楠^[6]以苏南无锡地区新建地铁站跨越地铁高架线的基坑工程为例,研究了基坑开挖施工过程中的变形规律以及基坑开挖对下部穿越运营地铁线路的影响。姜叶翔等^[7]以杭州地铁 2 号线附近某综合楼基坑工程为例,利用 Midas 有限元软件建立三维模型进行数值模拟,根据现场实测数据,分析了软土地区深基坑开挖对邻近既有地铁隧道的影响。数值模拟和实测数据表明,在软土地区,在基坑与地铁隧道之间设置一排隔离桩可以有效降低基坑开挖对隧道的影响。隔离桩采用全套管施工工艺,成桩速度、成槽速度和地墙宽度控制良好,并及时浇筑混凝土。经实测,支护桩(墙)施工对隧道影响不大。结合严格分层分块开挖,基坑变形得到了有效控制,整个施工过程实施得相当成功。唐鹏军^[8]以

西安地铁入口处附近的一个深基坑工程为例,使用数值模拟计算软件,结合实际场地的水文地质和工程地质条件,建立了三维数值模型,并对深基坑的施工过程和地铁出入口安全性评估进行了动态模拟。寿树德^[9]首先建立了考虑施工扰动叠加影响的软土地区基坑水平支护结构有限土压力计算模型,推导了有限土压力的计算表达式,给出了断裂角的简化计算公式。分析了有限土中断裂角的影响因素及其对土压力分布的影响;其次,采用三维有限元数值分析方法和 HSS 土本构模型,模拟了软土地区相邻基坑的整体工况;最后结合相邻基坑的实测工程数据,对支撑轴向力、支护结构变形、基坑外地表沉降、围护墙后土压力等进行了监测。徐良仲等^[10]以杭州地铁 6 号线侧某商业项目基坑工程为例,通过 Plaxis 三维有限元软件建立三维模型进行数值模拟,并通过施工过程的评估,预测基坑后续变形。分析了深基坑开挖对邻近既有地铁站的影响。与施工前评估相比,施工过程评估需要考虑地基土的强度折减、围护结构的施工质量、时空效应、基坑现有变形等问题,并结合理论和经验进行反分析,以降低土体强度、挡土结构的刚度等指标,由此计算得到的结果与实际情况偏差较小。

由此可见,国内关于深基坑开挖对车站主体及隧道影响的研究已较为深入,可借鉴上述针对车站主体及隧道的研究手段及方法,逐步完善针对地铁天桥及出入口的影响研究。

1 项目概况

临政储出【2018】23 号地块项目(三期)位于杭州市临安区,项目西至锦北街道潘山村陈家坞安置地,南至科技大道,紧邻湖光山社小区。项目位置如图 1 所示。整个项目分一、二、三期,总用地面积约为 132 600 m²,总建筑面积约为 238 245 m²。主要由 14 幢叠拼、12 幢 20 层的小高层、5 幢商业及住宅用楼、1 幢酒店及 3 幢商业组成,局部设 1 层或者 2 层地下室。主体结构采用框架-剪力墙结构,独立柱基。目前一期地下室已施工完成,二期正在施工,三期地块暂未施工。

三期地块位于场地西南角,场地南侧邻近杭州地铁 16 号线八百里站 C 号、D 号出入口,基坑与出入口基础最小平面距离约 7.6 m,距离八百里站最近处约 45 m,距离高架区间最近处约 46 m。项目与邻近地铁设施的位置关系如图 2 所示。



图1 项目位置示意图

Fig. 1 Location of the project

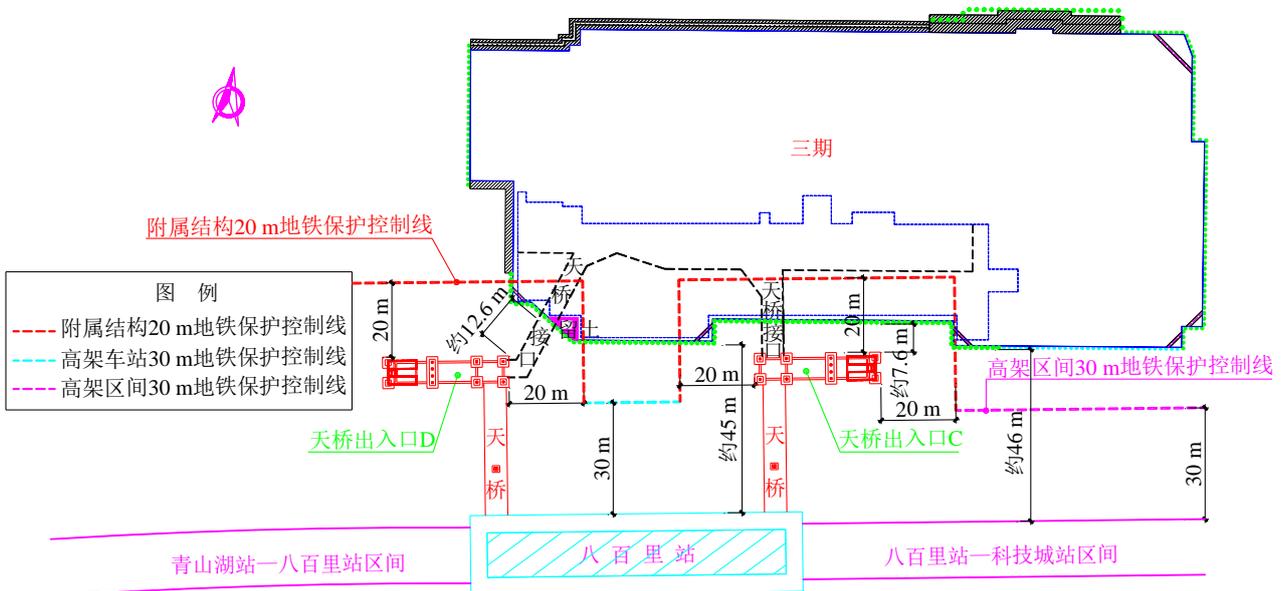


图2 项目与邻近地铁设施的位置关系

Fig. 2 Relative position of the project and adjacent metro facilities

2 工程地质条件

根据勘察资料,本项目基坑开挖范围影响主要地层为④₂强风化泥质粉砂岩、④₂₋₃强偏中等风化泥质粉砂岩及⑤₃中等风化泥质粉砂岩。本项目场地内土

层的物理力学参数如表1所示,典型地质剖面如图3所示。拟建场地主要分布有两层地下水,上层潜水及下部基岩裂隙水。潜水埋藏较浅(埋深0.40~2.70m左右)。基岩裂隙水水量微弱,主要赋存于下部基岩风化裂隙中,对本项目工程建设影响不大。

表1 典型土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of typical soils

土层名称	重度 γ / (kN/m ³)	压缩模量 E_{s1-2} / MPa	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)	地基承载力特征值 f_{ak} / kPa
④ ₂ 强风化泥质粉砂岩	(21.5)	35.0	(40.0)	(30.0)	460
④ ₂₋₃ 强偏中等风化泥质粉砂岩	(21.5)	40.0	(40.0)	(30.0)	460
⑤ ₃ 中等风化泥质粉砂岩	(22.5)	不可压缩	(60.0)	(30.0)	1 400

注: ()内为经验值。

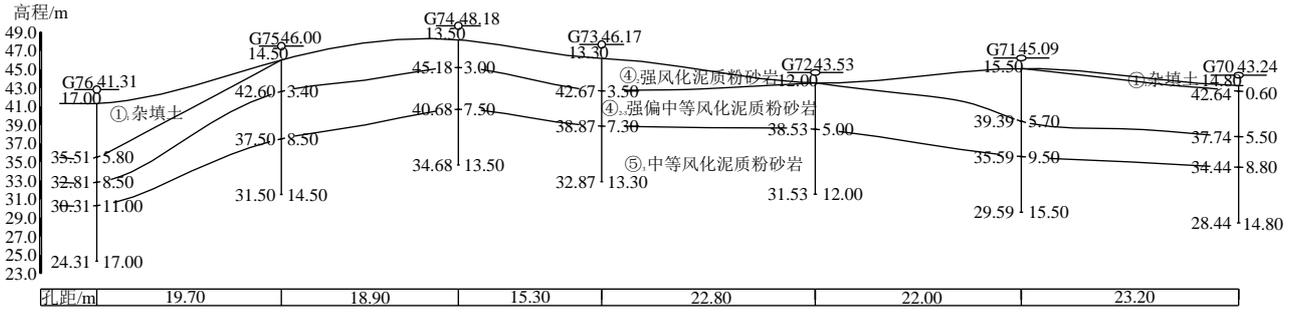


图 3 典型土层剖面
Fig. 3 Typical soil profile

3 邻地铁侧围护方案

3.1 邻地铁侧典型剖面

根据浙江省标准《建筑基坑工程技术规程》(DB33/T 1096—2014)^[11] 的有关规定, 本项目基坑工程根据开挖深度、周边环境条件及重要性因素分为三个设计等级。本项目基坑安全等级定为一

二级, 支护结构重要性系数为 1.1~1.0。其中南侧紧邻地铁天桥出入口, 基坑工程安全等级定为一

级, 支护结构重要性系数定为 1.1。南侧紧邻地铁天桥出入口, 开挖深度为 7.25 m, 不具备放坡空间, 采用 $\Phi 1\ 000$ 旋挖灌注桩悬臂支护。邻地铁侧典型剖面如图 4 所示。

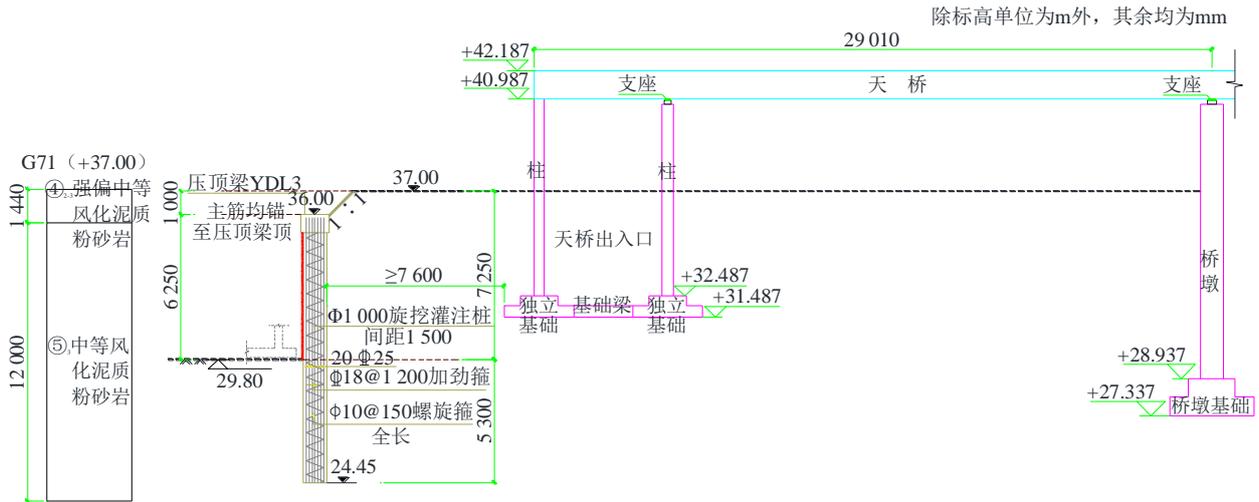


图 4 基坑邻地铁侧典型支护剖面图
Fig. 4 Typical support profile of the excavation near the subway side

3.2 典型支护剖面复核验证

选取邻近地铁侧典型支护剖面, 采用理正深基坑支护结构设计计算软件进行围护桩在不同工况下的内力及变形计算、基坑整体稳定验算及抗倾覆稳定验算。邻地铁侧典型支护剖面计算简图如图 5 所示。

基坑开挖深度 7.25 m, 围护墙最大位移约 15 mm, 约为 0.2%*H*, 符合浙江省标准《建筑基坑工程技术规程》(DB33/T 1096—2014) 一级基坑的支护结构变形控制值 (0.2%~0.5%*H*) 要求。图 6 为内力位移包络图。

围护体系整体稳定、抗倾覆指标均满足规范要求, 计算结果如表 2 所示。

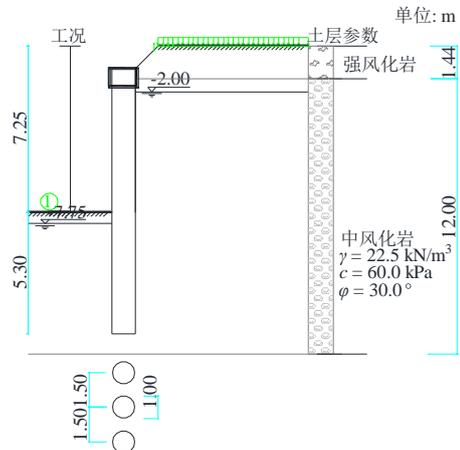


图 5 邻地铁侧典型支护剖面计算简图
Fig. 5 Calculation diagram of typical support profile near the subway side

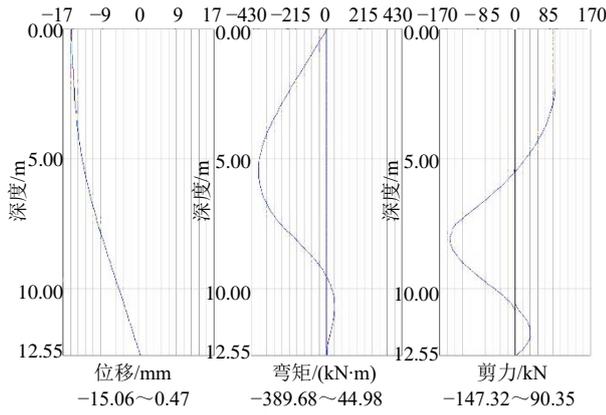


图6 邻地铁侧典型支护剖面内力位移包络图

Fig. 6 Envelope diagram of internal force and displacement of typical support profiles adjacent to the subway

表2 邻地铁侧典型支护剖面稳定性计算结果

Table 2 Calculated results of stability of typical support profiles adjacent to the subway

计算项目	计算值	规范要求值	是否满足
整体稳定安全系数	3.81	1.35	满足
抗倾覆安全系数	2.06	1.25	满足

4 有限元数值模拟

4.1 二维 Plaxis 数值分析

利用 Plaxis 二维有限元仿真软件进行分析计算。基坑与南侧地铁设施属于典型的平面应变问题，因此采用平面应变模型分析基坑开挖对地铁的影响。

基坑开挖宽度按 85 m 考虑，这里选择地铁附近开挖宽度的一半进行模拟。坑外土体的计算范围取基坑开挖深度的 3 倍以上，并考虑到地铁设施与基坑的相对位置关系，基于此，计算模型尺寸为 120 m 宽，30 m 深。基坑施工阶段超载取 20 kPa。模型约束条件为在几何建模的底部施加完全约束，在两侧的垂直边界施加滑动约束。

基坑土体采用 Plaxis 内置的摩尔-库仑模型 (MC 模型)，围护桩、出入口基础、天桥、内支撑选用弹性模型，围护桩相当于一定厚度的连续墙，根据等抗弯刚度原理进行内力分析。

建立基坑施工对地铁设施影响的二维有限元分析模型，网格划分如图 7 所示。经计算，基坑开挖到底工况下，地铁出入口基础最大水平位移为 3.31 mm，最大竖向位移为 1.94 mm；天桥最大水平位移为 3.36 mm，最大竖向位移为 1.90 mm。主要工况下地铁天桥及出入口基础位移如图 8、图 9 所示，地铁设施位移结果汇总于表 3。

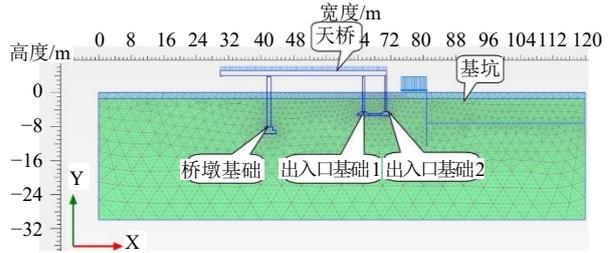


图7 二维 Plaxis 计算模型网格划分图

Fig. 7 Meshing diagram of two-dimensional Plaxis computational model

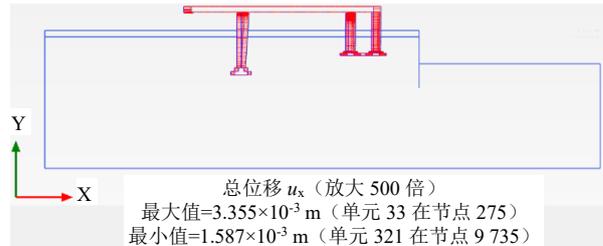


图8 地铁天桥及出入口基础水平位移云图

Fig. 8 Horizontal displacement cloud map of subway overpass and entrance/exit foundation

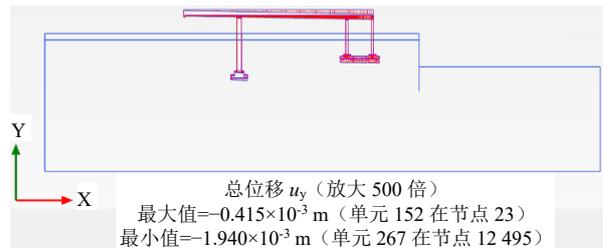


图9 地铁天桥及出入口基础竖向位移云图

Fig. 9 Vertical displacement cloud map of subway overpass and entrance/exit foundation

表3 主要工况下地铁天桥及出入口基础最大位移

Table 3 Maximum displacement of subway overpasses and entrances/exits foundation under main working conditions

基坑围护结构	地铁出入		地铁天桥		相邻柱基沉降差/mm	
	口最大变形/mm	最大变形/mm	最大变形/mm	最大变形/mm	桥墩与出入口	出入口基础1基础1与2
水平位移/mm	9.48	3.31	1.94	3.36	1.90	0.000 031 5L
竖向位移/mm	3.31	1.94	3.36	1.90	0.000 072 0L	

注：L 为相邻柱基的中心距离，mm。

4.2 三维 Midas 数值分析

三维模型中，本项目围护墙采用板单元模拟，出入口基础结构及天桥采用实体单元模拟，支撑采用梁单元模拟。模型约束条件为通过在模型底部施加完全约束，两侧竖向边界施加滑动约束来实现。Midas GTS NX 中模型建立如图 10 所示，模型长 300 m，宽 200 m，高 30 m。

经计算，基坑开挖到底工况下，基坑围护结构

最大水平位移为 14.80 mm; 出入口基础最大水平位移 0.72 mm, 最大竖向位移 1.28 mm; 天桥最大水平位移 0.03 mm, 最大竖向位移 0.64 mm。主要工况下地铁天桥及出入口基础位移云图如图 11~12 所示, 地铁设施位移计算结果如表 4 所示。

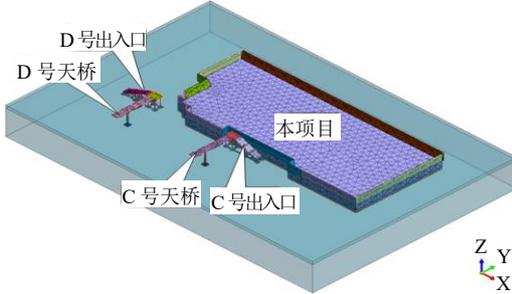


图 10 三维 Midas 数值计算模型

Fig. 10 Three-dimensional Midas numerical calculation model

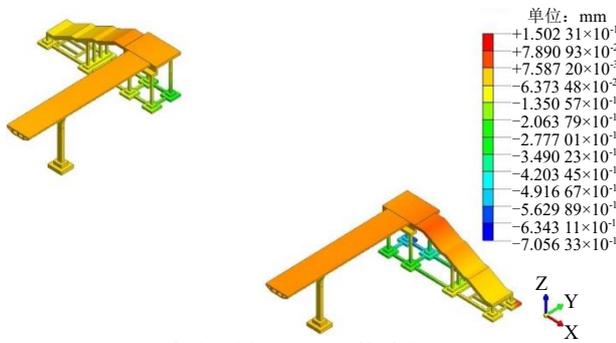


图 11 地铁天桥及出入口基础水平位移云图

Fig. 11 Horizontal displacement cloud map of subway overpasses and entrances/exits foundation

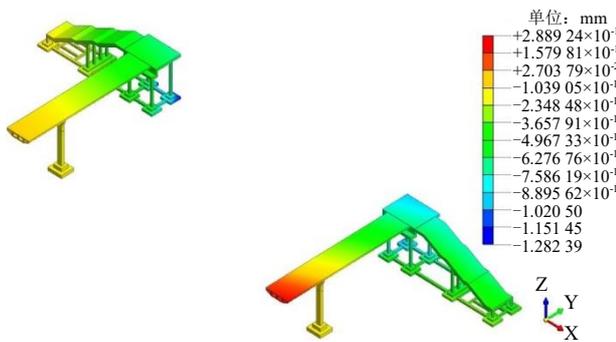


图 12 地铁天桥及出入口基础竖向位移云图

Fig. 12 Vertical displacement cloud map of subway overpasses and entrances/exits foundation

表 4 主要工况下地铁天桥及出入口基础最大位移
Table 4 Maximum displacement of subway overpasses and entrances/exits foundation under the main working conditions mm

基坑围护结构	地铁出入口最大变形		地铁天桥最大变形		车站主体与附属结构交接处差异沉降
	水平位移	竖向位移	水平位移	竖向位移	
水平位移	7.31	0.72	0.03	0.64	0.19

将表 3 中二维数值分析结果与表 4 中三维数值分析结果进行对比, 如表 5 所示:

表 5 地铁天桥及出入口基础最大位移二维、三维计算结果对比表

Table 5 Comparison table of 2D and 3D calculation results for the maximum displacement of subway overpasses and entrances/exits foundation mm

对比项目	基坑围护结构	地铁出入口最大变形		地铁天桥最大变形	
		水平位移	竖向位移	水平位移	竖向位移
		二维	9.48	3.31	1.94
三维	7.31	0.72	1.28	0.03	0.64

本次分析分别使用 Plaxis 2D 及 Midas GTS NX 软件针对本项目施工对邻近地铁设施的影响进行了二维及三维有限元分析, 计算了基坑施工对地铁设施的水平、竖向位移及差异沉降、相邻柱基沉降差等的影响。通过对数值模拟结果整理分析, 可得出以下结论:

- (1) 由表 3、表 4 可知, 基坑施工对地铁设施的影响较小, 满足轨道交通设施变形控制值要求。
- (2) 由表 5 可知, 基坑围护结构的水平位移二维、三维计算结果基本接近, 但因二维模型里无法体现基坑围护结构的整体性及空间效应, 地铁天桥及出入口结构二维计算结果比三维计算结果更大。

5 基坑变形监测

5.1 监测点布置

根据设计要求及周围环境、基坑围护特点, 坑周一圈布设深层土体水平位移监测点、地下水位监测点、地表水平位移及沉降监测点。

5.2 监测报警值

本项目施工期间基坑变形监测报警值见表 6。

表 6 基坑监测报警指标

Table 6 Monitoring and alerting indicators for the excavation

监测项目	警戒值	
	日变化量	累计变化
深层土体测斜	连续 3 d 变化速率大于 3 mm/d	累计值 40 mm
地下水位	1 d 水位变化幅度超过 50 cm	—
地表水平位移及沉降	连续 3 d 变化速率大于 3 mm/d	水平位移大于 40 mm 沉降大于 30 mm

5.3 基坑监测数据

本项目施工期间基坑最大累计变形量见表7。

表7 基坑最大累计变形量

监测项目	累计最大值	是否报警
深层土体测斜	12.9 mm	未报警
地下水水位	-2.416 m	未报警
地表水平位移	8.66 mm	未报警
地表沉降	26.19 mm	

5.4 监测工作总结

根据基坑监测数据分析可知,本工程基坑开挖期间:

(1) 各测斜孔深层土体最大水平位移小于设计报警值,位移主要发生在各部位基坑开挖阶段;周围地表的水平位移和沉降,以及基坑外地下水位的变化也在正常范围内。

(2) 本工程基坑围护结构的设计和施工取得了成功,施工过程中基坑变形得到了很好的控制。基坑围护结构整体稳定,基坑监测数据及时、准确地反映了基坑变形情况,指导施工。整个施工过程和监测工作进展顺利。

6 地铁变形监测

6.1 监测点布置

根据相关要求及本项目特点,C出入口布设竖向位移、水平位移观测点各9点;D出入口布设竖向位移、水平位移观测点各9点;八百里车站布设竖向位移、水平位移观测点各4点。

6.2 监测报警值

本项目施工期间地铁结构变形控制标准见表8。

表8 地铁结构变形控制标准

序号	监测项目	控制值/mm	报警值/mm	预警值/mm	变化速率报警值/(mm/d)	备注
1	水平位移	±3.0	±2.4	±1.8	大于1	报警值为控制值的
2	竖向位移	±3.0	±2.4	±1.8	大于1	80%,
3	车站主体与附属差异沉降	±3.0	±2.4	±1.8	大于1	预警值为控制值的60%

6.3 地铁变形数据

本项目施工期间地铁结构最大累计变形量见表9。

表9 地铁结构最大累计变形量

监测项目	累计最大值	二维计算值	三维计算值	备注
水平位移	1.20	3.31	0.72	未报警
竖向位移	1.70	1.94	1.28	未报警
车站主体与附属差异沉降	0.10	—	0.19	未报警

由上表可知,实测数据比二维计算结果更小,与三维计算结果数值很接近,一致性较高。

6.4 监测工作总结

通过分析从项目施工期间地铁结构变形数据情况可知:

(1) 在基坑施工期间产生了少量向基坑侧的水平位移,监测数据均在报警值内,速率变化较小。

(2) 在基坑施工期间产生了少量向上隆起变形,监测数据均在报警值内,速率变化较小。

7 结论

(1) 本次安全评估结合基坑围护方案的施工条件,进行了理论和经验分析、二维有限元数值分析(Plaxis 2D)和三维有限元数值计算(Midas GTS NX),对基坑的各个方面进行了研究,对地铁车站和附属结构在不同施工条件下的变形进行了分析。通过将理论计算结果与实测数据进行比较,实测数据比二维计算结果更小,与三维计算结果数值很接近,一致性较高。

(2) 通过初步环境调查与最终调查对比,地铁车站及其附属构筑物监测区域未发现新的裂缝,也未发现明显的渗漏水等新病害点。根据监测数据和现场调查的综合分析,基坑施工没有明显的不良影响。

(3) 山地基坑土质条件一般都较好,技术层面上可以根据项目情况较规范有所突破,比如不设支撑、不硬分坑等,在降低围护成本的同时亦可增加施工便利性。

参考文献

- [1] 梅祯,肖军华,王炳龙. 基坑开挖对临近基坑地铁高架结构变形的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文),

- 2019, 41(4): 51-58.
- MEI Zhen, XIAO Jun-hua, WANG Bing-long. Influence of foundation pit excavation on the deformation of adjacent subway elevated structure[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(4): 51-58.
- [2] 洪伟东. 软土地区某临河写字楼基坑开挖效应分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- HONG Wei-dong. Analysis on excavation effect of foundation pit of a riverside office building in soft soil area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [3] 闫磊, 王敦显, 李乾坤, 等. 基坑施工对临近地铁出入口的影响分析[J]. 工程质量, 2021, 39(7): 87-90.
- YAN Lei, WANG Dun-xian, LI Qian-kun, et al. Analysis on the influence of foundation pit construction on neighboring metro entrance[J]. Construction Quality, 2021, 39(7): 87-90.
- [4] 宫本福. 新建基坑对既有地铁车站出入口的变形影响分析[J]. 市政技术, 2017, 35(3): 161-164.
- GONG Ben-fu. Influence analysis of new foundation pit on existing metro access structure[J]. Journal of Municipal Technology, 2017, 35(3): 161-164.
- [5] 葛鹏飞, 吴赛钢, 薛飞. 杭州九沙大道人行通道基坑监测分析[J]. 山西建筑, 2011, 37(13): 72-73.
- GE Peng-fei, WU Sai-gang, XUE Fei. On supervision analysis of foundation pit along pedestrian paths of Jiusha avenue in Hangzhou[J]. Shanxi Architecture, 2011, 37(13): 72-73.
- [6] 王振楠. 邻近轻轨桥墩基础的地铁基坑稳定性研究[D]. 江苏苏州: 苏州科技大学, 2021.
- WANG Zhen-nan. Research on stability of metro foundation pit adjacent to light rail pier foundation[D]. Suzhou, Jiangsu: Suzhou University of Science and Technology, 2021.
- [7] 姜叶翔, 赖小勇, 张宏建, 等. 深基坑开挖对邻近既有地铁隧道的影响分析[J]. 地基处理, 2020, 2(3): 231-235.
- JIANG Ye-xiang, LAI Xiao-yong, ZHANG Hong-jian, et al. Impact of deep excavation on adjacent subway tunnels [J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(3): 231-235.
- [8] 唐鹏军. 邻近地铁出入口深基坑支护方案的研究及优化[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(3): 186-191.
- TANG Peng-jun. Optimization of deep foundation excavation supporting scheme close to the metro station entrance[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(3): 186-191.
- [9] 寿树德. 软土地基相邻基坑施工相互影响及变形控制研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2021.
- SHOU Shu-de. Study on interaction between adjacent foundation pits under construction in soft soil and the deformation control[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2021.
- [10] 徐良仲, 赖小勇, 李慧慧. 基于已有实测数据的深基坑开挖对邻近地铁车站影响的实例简析[J]. 地基处理, 2021, 3(3): 238-245.
- XU Liang-zhong, LAI Xiao-yong, LI Hui-hui. Case study on impact of deep excavation on adjacent subway tunnels based on the existing measured data[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(3): 238-245.
- [11] 浙江省住房和城乡建设厅. 建筑基坑工程技术规程: DB33/T 1096—2014[S]. 杭州: 浙江工商大学出版社, 2014.
- Zhejiang Provincial Department of Housing and Urban Rural Development. Technical Specification for Building Foundation Excavation Engineering: DB33/T 1096—2014[S]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University Press, 2014.