

# 近距离基坑开挖施工对邻近地铁车站影响实例分析

俞森滔

(杭州运河恒尚运营管理有限公司, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 紧邻地铁车站的基坑工程在施工时容易引起地下车站结构的变形, 严重时甚至会影响车站结构的安全。本文以杭州市区某连接地铁车站的基坑工程为背景, 运用 Midas GTS 软件建立三维数值模型预测基坑施工对车站的影响, 并对车站变形监测数据进行了分析, 通过分析得出如下主要结论: 在车站侧设置长立柱桩与车站地连墙顶部冠梁连接、分小坑施工、被动区加固、盖挖法施工等措施有效控制了地铁设施的变形。数值分析结果和监测数据均表明该基坑工程支护方案合理, 有效控制了地下车站结构的变形, 具有重要的工程实践意义。

**关键词:** 深基坑; 复杂环境; 变形控制; 地铁设施; 监测

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)04-0413-08

## Case study of the influence on subway station induced by excavation of adjacent foundation pit

YU Sentao

(Hangzhou Yunhe Hengshang Operation Management Co., Ltd., Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

**Abstract:** The excavation project adjacent to the subway station is prone to cause deformation of the underground station structure during construction, and in severe cases, it may even affect the safety of the station structure. Taking a foundation excavation project connecting a subway station in the urban area of Hangzhou for example, the paper establishes a three-dimensional numerical model using Midas GTS software to anticipate the impact of foundation pit construction on the station. The deformation monitoring data of the station is analyzed as well. The main conclusion is summarized as follows: Implementation of various measures, such as setting longer column piles on the station side and connected to the crown beam atop the diaphragm wall, subdividing the large pit into smaller ones for construction, reinforcing passive areas, and adopting cover excavation method, effectively control the deformation of subway facilities. The numerical analysis results and subway facility displacement monitoring data validate the rationality of the support scheme of foundation pit project in proficiently controlling underground station structure deformations, which has significant practical engineering implications.

**Key words:** deep foundation pit; complex environment; deformation control; subway facilities; monitor

## 0 引言

近年来, 杭州城市空间布局模式逐渐走向以轨道交通线为轴的纵深发展, 自 2012 年地铁 1 号线首通之后, 每年的平均建设里程数高达 52 km, 发展速度惊人。随着地铁线网的密集, 越来越多的建设项目位于地铁保护区内, 相关的管理制度和规范标准也日益完善<sup>[1-2]</sup>。在轨道交通保护区内进行外部

作业, 尤其是基坑工程, 开挖卸荷作业势必引起地铁隧道产生相应的附加变形<sup>[3-4]</sup>, 严重时可能影响地铁正常运营。在邻近地铁的情况下, 基坑支护结构除应满足基坑自身的稳定性要求外, 尚需采取一系列变形控制措施来减小对地铁设施的影响, 如采用刚度较大的围护体系、轴力自动补偿钢支撑、土体加固、设置隔离桩、控制降水、分区施工等<sup>[5-8]</sup>, 满足相关变形控制指标的要求。

本文结合杭州主城区紧邻已运营地铁站的基坑工程实例，介绍了复杂环境下的基坑支护设计方案，并通过有限元分析及与监测数据的对比，表明基坑开挖对邻近地铁车站的变形影响较小，其成功实施对杭州地区类似项目具有一定的参考和借鉴意义。

### 1 工程概况

本项目位于杭州市西湖区，地下建筑面积约 2 002 m<sup>2</sup>，为连接杭州某已运营地铁站和邻近已建商业地块的地下空间工程，设 1 层地下室，基础采用钻孔灌注桩。基坑总面积约 3 300 m<sup>2</sup>，周长约 315 m，平行于地铁方向的长度为 110 m，垂直于地铁方向的宽度约 30 m，基坑最大开挖深度为 10.40 m。基坑周边环境见图 1，北侧为已建道路，下伏地铁车站，本基坑开挖至地铁车站外墙边，南侧与已建商业 4

层地下室相连，基础底埋深约 20 m。

基坑开挖范围内以杂填土和淤泥质土为主，其中淤泥质土层厚度分布不均匀，西部薄东部厚，最厚约 14 m。地铁车站底板位于⑥<sub>1</sub>粉质黏土层；出入口底板位于④粉质黏土层中。地质剖面如图 2 所示。

场地地下水主要为孔隙潜水及承压水，孔隙潜水水位埋深约 1.0~2.5 m，对工程影响较大。承压水位于⑧<sub>3</sub>圆砾层中，埋藏较深，对本工程影响较小。

车站为地下 2 层岛式车站，双柱三跨箱形框架结构；标准段宽度约 21.3 m，顶板覆土厚度为 2.745~3.358 m，站台板宽度为 12.6 m。车站基础底标高约-17.50 m，埋深 16.26~18.03 m，采用 0.8 m 厚地连墙做竖向围护体，地连墙墙高约 30 m，与主体结构外墙采用复合墙的连接方式，车站主体断面

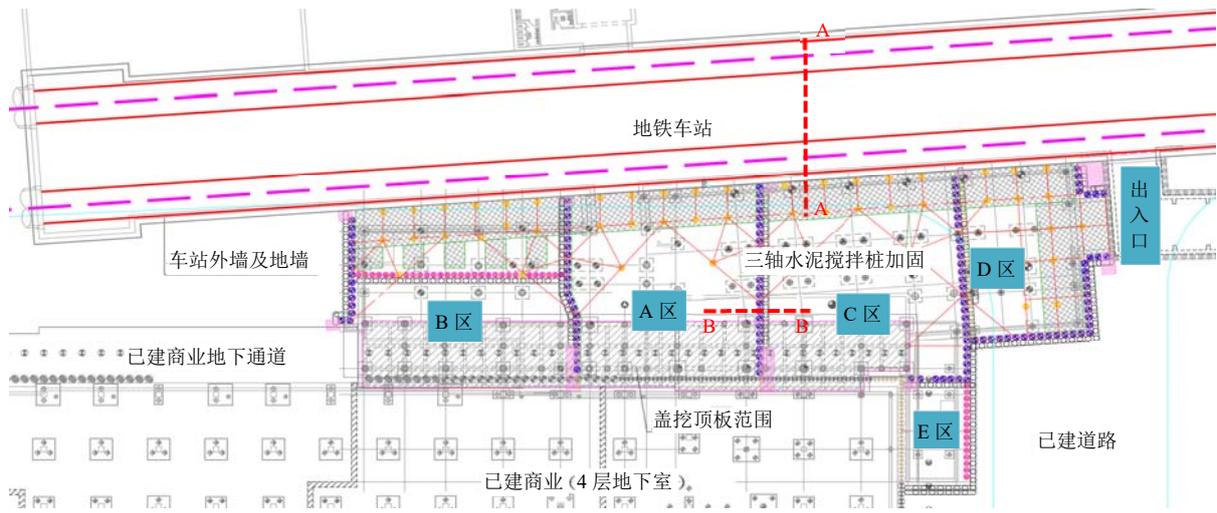


图 1 基坑周边环境图  
Fig. 1 Surrounding environments of the foundation pit

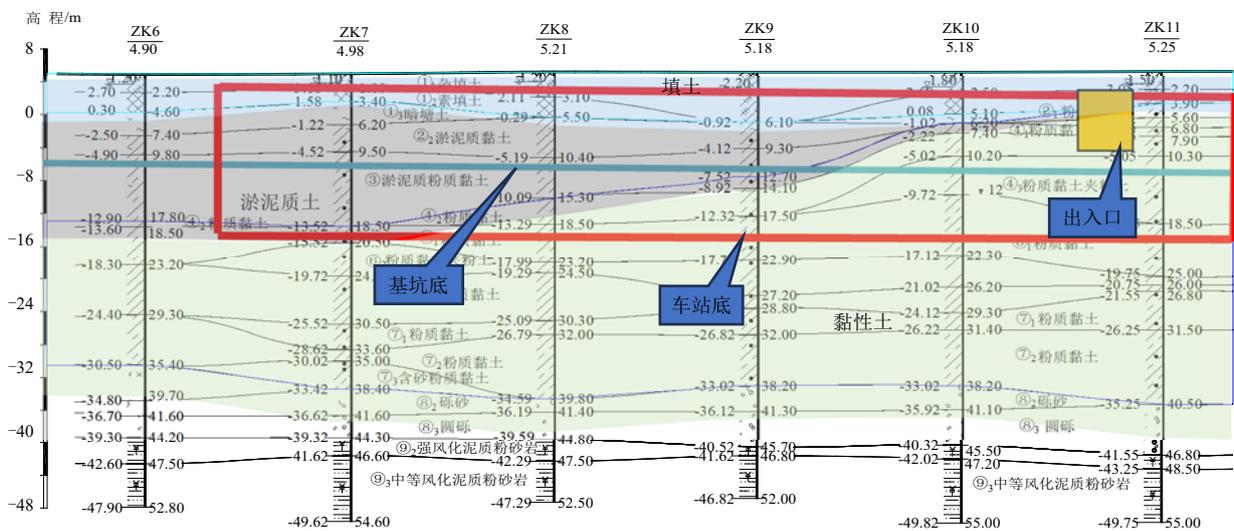


图 2 地质剖面图  
Fig. 2 Geological profile

如图3所示。出入口基础底标高约-9.60 m，埋深约9.70 m，采用SMW工法桩做竖向围护体。

车站底部位于本基坑底以下约7.1 m，出入口底部位于基坑底以上约0.8 m。

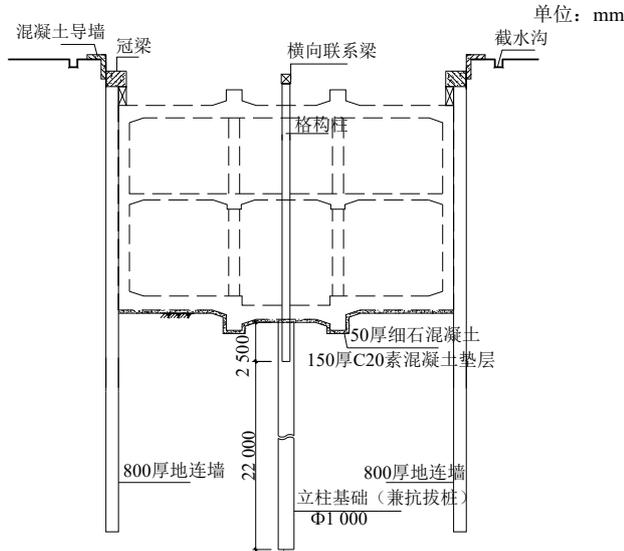


图3 车站主体断面图

Fig. 3 Sectional diagram of the subway station

## 2 地铁设施变形控制标准

根据已运营地铁设施现状调查和第三方长期监测数据分析，地铁设施安全状况可按相关规范<sup>[1]</sup>要求划分成Ⅲ类，车站及附属结构的保护等级为A级。地铁结构变形控制指标详见表1。

表1 地铁结构变形控制指标

Table 1 Deformation control indicators for subway structures

项目	预警值/ mm	报警值/ mm	控制值/ mm
车站水平(竖向)位移	3	4	5
出入口及附属结构水平 (竖向)位移	6	8	10

## 3 基坑支护方案

本工程北侧即地铁车站主体，东侧为车站附属结构出入口，基坑紧贴车站。基坑普遍开挖深度为10.40 m，围护设计方案中采取了以下措施对已运营地铁车站进行保护：

(1) 采用分隔桩将大基坑化小，充分利用空间效应控制基坑变形。整个基坑分为A、B、C、D、E这5个区域，详见图1。整体施工顺序为A区→B区、C区→D区、E区。基坑分区信息如表2所示。

表2 基坑分区信息

Table 2 Information of foundation pit division

区号	面积/m <sup>2</sup>	周长/m	平行于车站长度/m
A	837	116	28.1
B	955	124	31.7
C	971	126	28.5
D	148	50	32.9
E	160	52	—

(2) 紧贴地铁车站侧利用其地连墙，沿地连墙边设19根立柱桩，加高原地连墙冠梁，与立柱桩顶部支撑连接成整体，控制车站竖向变形。

(3) 北侧、东侧邻近地铁结构，基坑回填采用C15素混凝土浇筑至车站顶板标高，提高回填以质量控制长期侧向变形。

(4) 基坑东西两侧及内部分隔桩均采用Φ1000@1200大直径钻孔灌注桩+2道钢筋混凝土支撑的形式，止水帷幕采用三轴水泥搅拌桩套打法施工，桩底穿透淤泥质土层进入坑底以下6 m深度，有效防止桩间挤土。

(5) 采用刚度较大的支撑梁，邻近地铁侧第1道支撑梁设置栈桥板，邻近南侧商业地块位置利用已有顶板作为支撑，控制车站水平位移。

(6) 车站地连墙侧坑内被动区土体采用三轴水泥搅拌桩进行裙边加固。加固土与地连墙接缝处采用高压旋喷桩填充，确保坑内加固效果。

地铁边基坑支护剖面图(A-A剖面)如图4所示，基坑分区支护剖面图(B-B剖面)如图5所示。

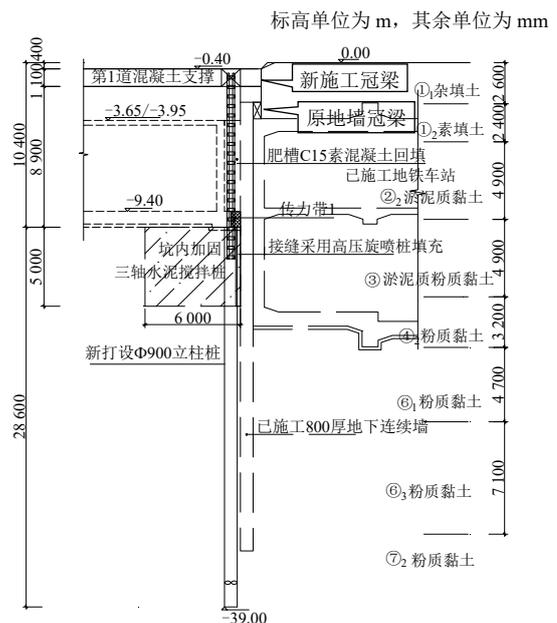


图4 地铁边基坑支护剖面图(A-A剖面)

Fig. 4 Profile of foundation pit support adjacent to the subway (A-A profile)

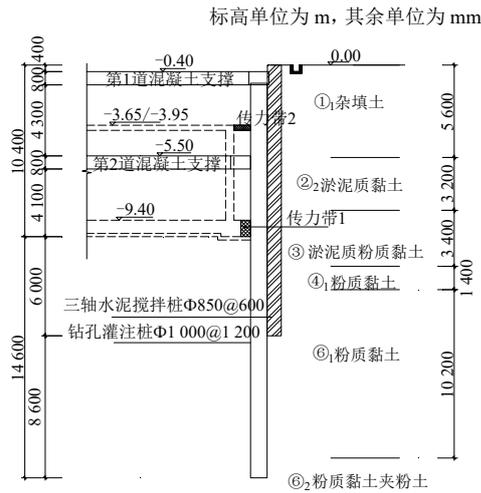


图5 基坑分区支护剖面图 (B-B剖面)

Fig. 5 Profile of partition support for the foundation pit (B-B profile)

车站侧第1道支撑设置栈桥板, 施工期空车从车站上方通行, 重车均从栈桥上通行, 避免车站正上方附加荷载改变, 减少施工对车站以及附属结构的影响。邻近南侧已建商业地下室一侧利用已有顶板作为支撑进行盖挖施工。

第1道支撑平面如图6所示, 第2道支撑平面如图7所示。

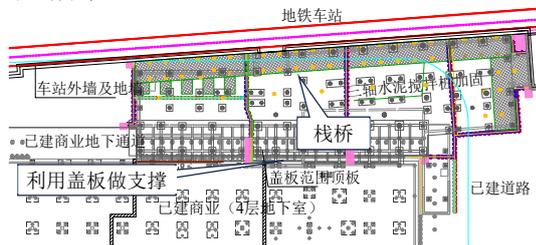


图6 第1道支撑平面图

Fig. 6 Layout of the first layer supporting

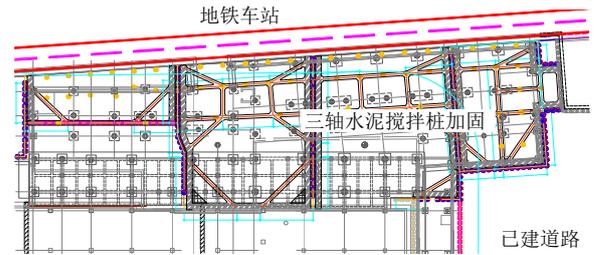


图7 第2道支撑平面图

Fig. 7 Layout of the second layer supporting

## 4 有限元分析

### 4.1 计算模型

为分析基坑工程各施工工况下地铁车站的位移响应, 采用 Midas GTS NX 有限元软件对本工程主要开挖工况进行模拟。其中地铁车站结构和围护结构采用板单元, 支撑采用梁单元进行模拟。土体材料采用 HS 模型。模型采用标准固定边界, 即左、右边界施加水平约束, 底边界施加水平和垂直两个方向约束。计算模型如图8所示。

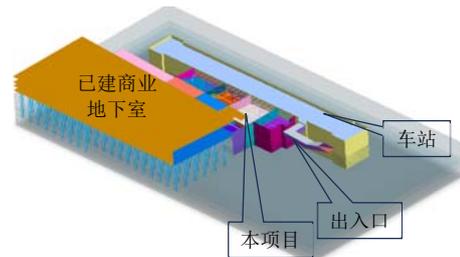


图8 计算模型

Fig. 8 Calculation model

结合项目地勘报告的提供土体力学参数及杭州、上海地区 HS 模型相关参数的研究<sup>[9-10]</sup>, 各层土主要物理力学性质参数如表3所示。

表3 各层土主要物理力学性质参数

Table 3 Main physical and mechanical properties of each soil layer

层号	土层名称	重度 $\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ /(°)	切线、割线模量/MPa	卸载模量/MPa	$M$
① <sub>1</sub>	杂填土	(17.5)	(12.0)	(9.0)	(4.0)	(20.0)	0.5
① <sub>2</sub>	素填土	(17.6)	(13.0)	(8.0)	(4.0)	(20.0)	0.5
② <sub>2</sub>	淤泥质黏土	17.9	10.5	7.0	2.3	11.5	0.8
③	淤泥质粉质黏土	18.2	10.5	7.5	2.7	13.5	0.8
④ <sub>2</sub>	粉质黏土	19.5	32.5	14.5	6.0	30.0	0.8
⑥ <sub>1</sub>	粉质黏土	19.5	34.0	11.5	5.9	29.5	0.8
⑥ <sub>2</sub>	粉质黏土夹粉土	19.0	26.5	15.0	6.0	30.0	0.8
⑥ <sub>3</sub>	粉质黏土	19.1	32.0	12.5	5.8	24.0	0.8
⑦ <sub>2</sub>	粉质黏土	19.1	28.5	11.5	5.7	28.5	0.8
⑦ <sub>3</sub>	含砂粉质黏土	18.8	15.5	14.5	4.7	23.5	0.8
⑧ <sub>1</sub>	粉细砂	19.6	2.5	27.5	9.1	45.5	0.5
⑧ <sub>3</sub>	圆砾	(20.0)	(5.0)	(35.0)	(15.0)	(75.0)	0.5

注: 表中( )内的数值为土层参数经验值;  $M$ 指刚度应力水平相关幂指数。

③<sub>3</sub> 圆砾  $\psi=5^\circ$ ，其余土层取 0；破坏比  $R_f$  可根据经验取值，②<sub>2</sub>、③层淤泥质土取 0.7，其余土层取 0.9。除表 3 中所列出的主要参数外，其余参数取值为：参考应力  $p_{ref}=100 \text{ kPa}$ ， $K_0^{NC} = 1 - \sin\phi$ ，卸荷再加荷泊松比  $\nu_{ur}=0.2$ 。

4.2 计算结果

经计算，A 区基坑开挖到底时对车站主体及附

属结构影响较大，车站主体及附属结构位移云图如图 9 所示；分隔墙凿除时车站主体及附属结构位移云图如图 10 所示。主要工况下，车站主体和附属结构最大累计变形量如表 4 所示。

根据有限元计算结果，预测基坑施工对地铁设施的影响较小，能满足轨道交通设施变形控制要求。

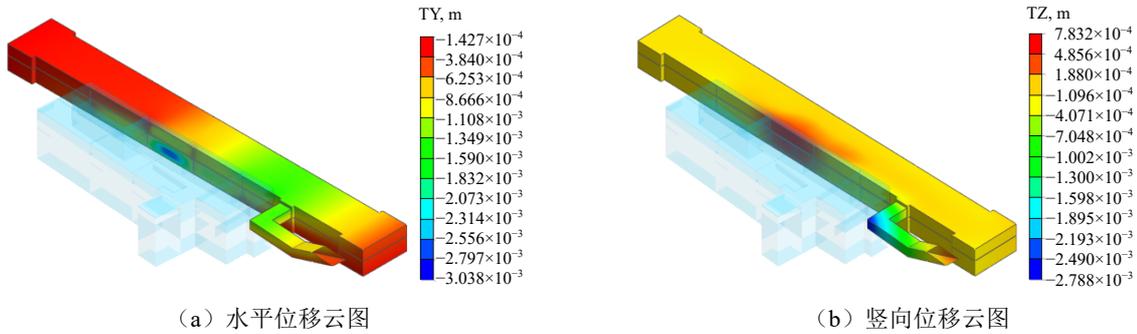


图 9 车站主体及附属结构位移云图 (A 区开挖到底)

Fig. 9 Displacement nephogram of the station and auxiliary structure (excavation to the bottom in zone A)

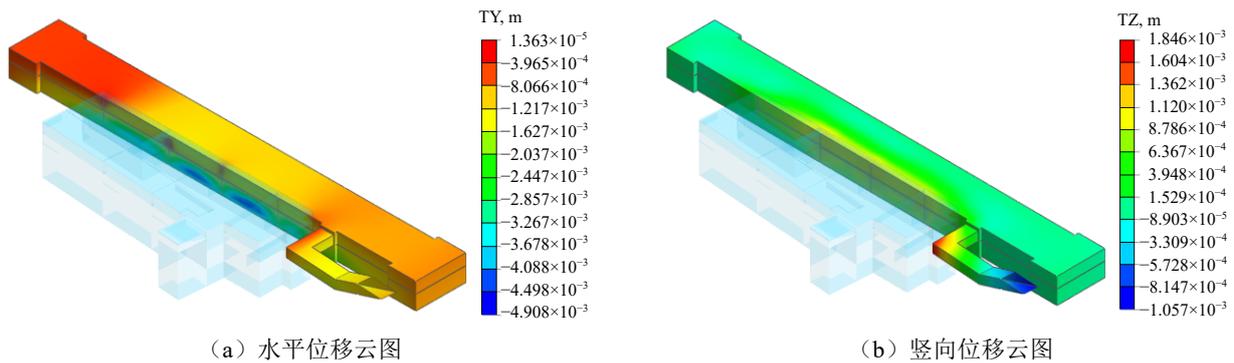


图 10 车站主体及附属结构位移云图 (分隔墙凿除)

Fig. 10 Displacement nephogram of the station and auxiliary structure (removal of partition walls)

表 4 车站主体和附属结构最大累计变形量

Table 4 Maximum cumulative deformation of the station and auxiliary structure

主要工况	车站主体		附属结构	
	最大变形量/mm		最大变形量/mm	
	水平位移	竖向位移	水平位移	竖向位移
A 区开挖到底	3.04	0.78	1.39	-2.79
B、C 区开挖到底	3.90	1.34	1.66	-2.21
D、E 区开挖到底	4.19	1.32	2.55	1.36
分隔墙凿除	4.91	1.38	2.63	1.85

铁车站内隧道单线 30 个断面，上下行共 60 个断面，各监测项目沿同一断面布设，包括车站道床沉降、车站水平位移、隧道与车站差异沉降及轨道高差。

5.2 监测数据

土方开挖期间各监测项目最大累计变形量如表 5 所示，满足表 1 中提出的变形控制指标。施工期间地铁典型断面的道床沉降累计变形时程曲线如图 11~12 所示，典型断面水平位移累计变形时程曲线如图 13~14 所示。

表 5 各监测项目最大累计变形量

Table 5 Maximum cumulative deformation of each monitoring item

监测项目	上行线/mm	下行线/mm
水平位移	1.8	-2.0
竖向位移	1.4	-1.2

5 地铁实测数据分析

5.1 地铁监测内容

采用自动化监测和人工监测两种手段对基坑施工过程中地铁设施的变形进行实测。影响范围为地

通过分析施工期间地铁结构变形数据情况可知：

(1) 桩基施工和第1道支撑施工引起地铁车站变形较小，上行线以下沉为主，下行线以上浮为主。土方开挖期间上行线表现为少量上浮趋势，上浮量最大为1.4 mm左右，下行线表现为少量下沉趋势，下沉量为1.2 mm左右，上下行变形趋势不一致是因为车站在一侧开挖，应力不对称对车站产

生了不同程度的影响。

(2) 桩基施工期间车站上行线水平位移达到2.0 mm，变形控制效果较好。基坑开挖至顶板浇筑完成过程中，上行线最大水平位移为1.8 mm，下行线最大水平位移为2.0 mm，分隔桩凿除时地铁水平位移均发生突变。说明近距离桩基施工与凿除振动对于邻近地铁结构影响较大。

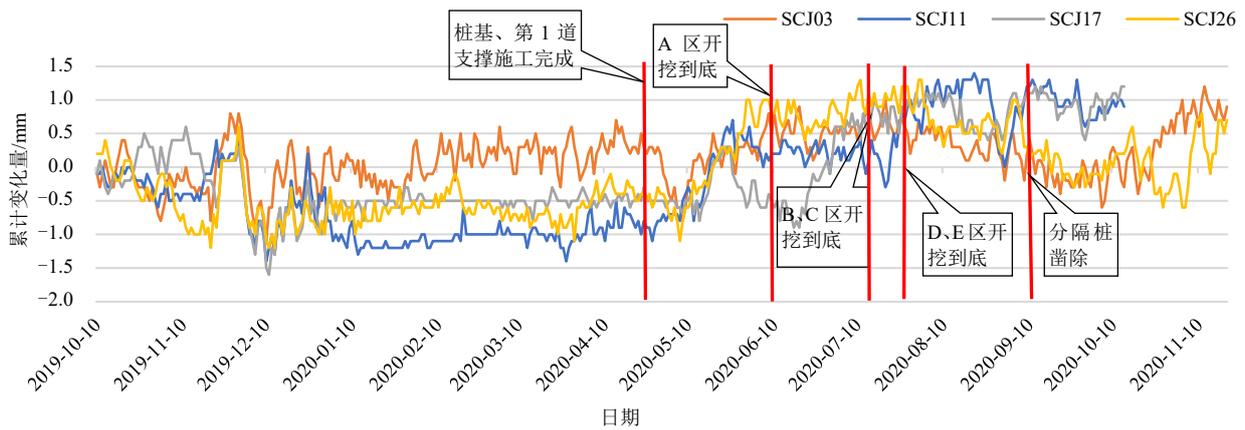


图 11 上行线典型断面道床沉降累计变形时程曲线

Fig. 11 Time history curves of cumulative roadbed settlement at typical sections of the upward line

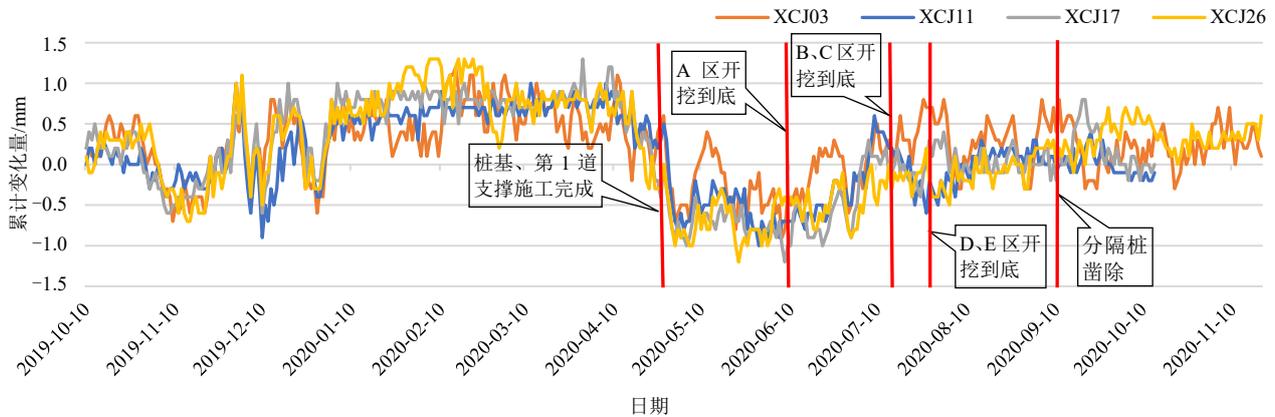


图 12 下行线典型断面道床沉降累计变形时程曲线

Fig. 12 Time history curves of cumulative roadbed settlement at typical sections of the downward line

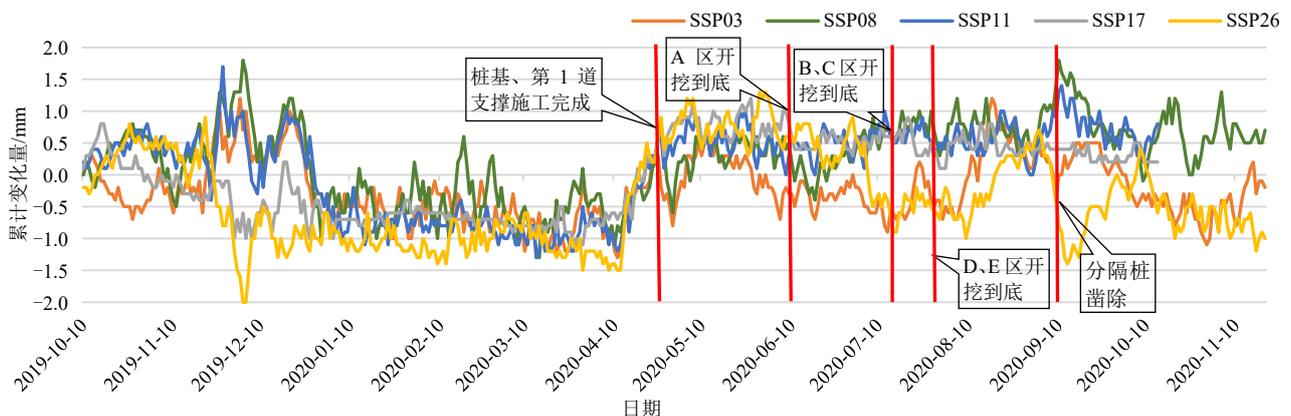


图 13 上行线典型断面水平位移累计变形时程曲线

Fig. 13 Time history curves of cumulative horizontal displacement at typical sections of the upward line

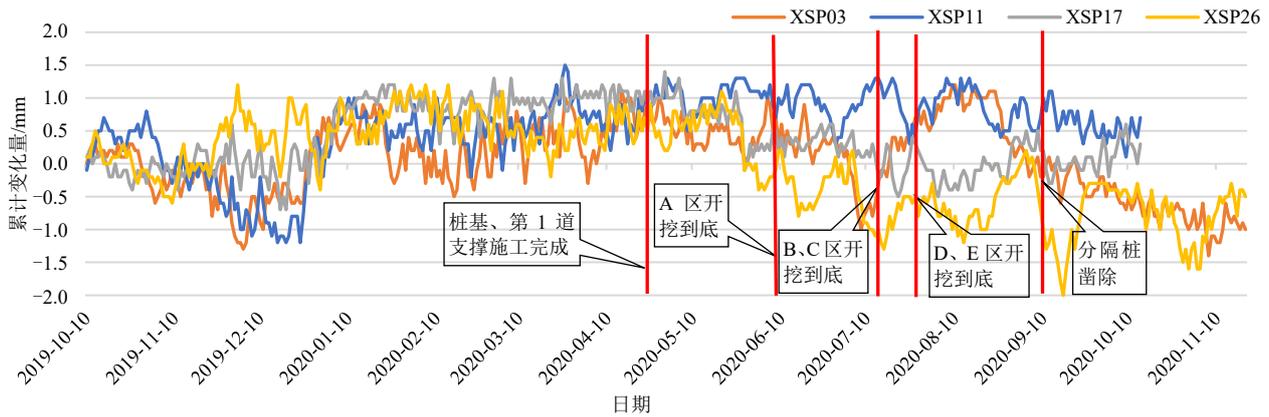


图14 下行线典型断面水平位移累计变形时程曲线

Fig. 14 Time history curves of cumulative horizontal displacement at typical sections of the downward line

实测数据中车站主体上行线为近项目基坑一侧, 基坑土方开挖期间车站上行线变形趋势表现为隆起, 凿除分隔墙时变形最大, 实测隆起值约 1.30 mm, 对应位置有限元计算结果为 1.38 mm, 误差较小, 且变形趋势一致, 结果较为吻合。实测车站主体水平位移均不超过 2 mm, 而有限元计算的水平位移较实测值偏大, 但计算结果与实测数据均不超过 5 mm, 具有一定的参考性。

## 6 结论

基于某紧贴地铁车站的基坑案例, 建立了模拟开挖过程的三维有限元模型, 并通过实测数据的对比分析, 得出结论如下:

(1) 通过基坑内布置隔离桩分区域开挖施工, 使“大坑化小”, 是地铁保护区内行之有效的基坑支护做法, 该方法充分利用空间效应, 能有效减少对地铁结构的影响。

(2) 采用坑内被动区土体加固、加大支撑刚度等措施, 在减小基坑本体变形的同时能有效控制地铁结构变形, 是保护运营地铁设施的有效手段。

(3) 紧贴运营地铁车站的单侧开挖会引起车站结构的不对称变形, 且开挖过程中车站以上浮为主。近距离桩基施工及凿除振动对地铁车站的影响较大, 往往会引起地铁位移突变, 需采取振动较小的施工机械。

(4) 三维有限元分析法能反映复杂基坑分区开挖工况, 采用硬化土模型模拟土体, 是分析基坑开挖对周边敏感建(构)筑物影响的理想方法。

## 参考文献

[1] 浙江省住房和城乡建设厅. 城市轨道交通结构安全保

护技术规程: DB 33/T 1139—2017[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2017.

Zhejiang Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development. Technical Code for Protection of Urban Rail Transit Structures: DB 33/T 1139—2017[S]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2017.

[2] 浙江省住房和城乡建设厅. 城市轨道交通结构监测技术规范: DB33/T 1224—2020[EB/OL]. (2021-04-30) [2023-11-30]. [https://jst.zj.gov.cn/art/2021/4/30/art\\_1228990170\\_256.html](https://jst.zj.gov.cn/art/2021/4/30/art_1228990170_256.html).

Zhejiang Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development. Technical Specification for Monitoring of Rail Transit Structures: DB33/T 1224—2020[EB/OL]. (2021-04-30) [2023-11-30]. [https://jst.zj.gov.cn/art/2021/4/30/art\\_1228990170\\_256.html](https://jst.zj.gov.cn/art/2021/4/30/art_1228990170_256.html).

[3] 丁智, 王达, 王金艳, 等. 浙江地区软弱土深基坑变形特点及预测分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 506-512.

DING Zhi, WANG Da, WANG Jinyan, et al. Deformation characteristics of Zhejiang soft soil deep foundation pits and their predictive analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 506-512.

[4] 许旭平, 冯洪良. 基坑施工对邻近盾构隧道的影响分析[J]. 地基处理, 2022, 4(2): 153-160.

XU Xuping, FENG Hongliang. Analysis of foundation pit construction effects on adjacent tunnels[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(2): 153-160.

[5] 潘周展. 基坑工程变形控制及对地铁隧道的保护措施[J]. 福建建筑, 2018(12): 44-47.

PAN Zhouzhan. Foundation pit engineering deformation control and protective measures for metro tunnel[J]. Fujian Architecture & Construction, 2018(12): 44-47.

[6] 陈颖, 张冬梅. 紧邻地铁隧道的深基坑工程设计与施

