

# 杭州市粉砂土地区旁侧基坑开挖对 区间隧道影响的实例分析

黄 绯, 王 屹, 熊晓亮, 夏 天, 俞奎皓

(杭州市勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

**摘 要:** 随着城市建设的发展, 地铁区间隧道旁侧基坑开挖也越来越多, 基坑开挖过程中对区间隧道的保护显得尤为重要。本文以杭州市上城区粉砂土地区某旁侧基坑开挖对已运营隧道的影响为例, 基坑围护设计方案阶段就需要考虑开挖对地铁隧道变形的影响, 从而对围护方案做合理加强, 分坑及添加支撑预应力伺服系统可以有效控制地铁隧道变形, TRD止水帷幕止水效果较好, 坑内未出现渗漏水情况, 邻地铁侧坑外严禁降水, 防止降水引起周边土体沉降。根据后续基坑围护监测数据, 结果表明, 坑底位置处围护结构变形较大, 第一道支撑轴力小于第二、三道支撑轴力。地铁监测数据结果表明, 围护结构施工时, 引起隧道变形较小, 隧道变形主要发生在基坑开挖阶段, 隧道底土层较硬时, 隧道变形呈现向上隆起趋势。

**关键词:** 基坑; 旁侧; 地铁隧道; 变形; 实测分析; 粉砂土

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S1-0046-07

## Case study of the influence of foundation pit excavation on interval tunnel in silty sand area of Hangzhou City

HUANG Fei, WANG Yi, XIONG Xiao-liang, XIA Tian, YU Kui-hao

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

**Abstract:** With the development of urban construction, there are more and more excavation of foundation pits on the side of subway section tunnels, and the protection of section tunnels during the excavation process is particularly important. In this paper, the impact of excavation of a side foundation pit in the silt land area of Shangcheng District, Hangzhou on the tunnel in operation is taken as an example. At the stage of foundation pit enclosure design, the impact of excavation on the deformation of subway tunnel needs to be considered, so that the enclosure scheme can be reasonably strengthened. Pit division and adding support pre-stressed servo system can effectively control the deformation of subway tunnel. TRD water stop curtain has good water stop effect. There is no water leakage in the pit. Dewatering is strictly prohibited outside the side pit adjacent to the subway, prevent precipitation from causing settlement of surrounding soil. According to the subsequent monitoring data of foundation pit support, the results show that the deformation of the support structure at the bottom of the pit is significant, with the first support axial force being smaller than the second and third support axial forces. According to subway monitoring data, the results indicate that during the construction of the retaining structure, the deformation of the tunnel is relatively small. The deformation of the tunnel mainly occurs during the excavation stage of the foundation pit. When the bottom soil layer of the tunnel is hard, the deformation of the tunnel shows an upward trend.

**Key words:** foundation pit; side; subway tunnel; deformation; measured analysis; silty sand

## 0 引 言

随着城市的发展, 由于地上用地紧张, 人们逐渐向地下要空间, 城市地下工程建设项目的数量和

规模也在迅速增大, 带动着深基坑工程向大、深方向发展。

Terzaghi、Peck 等提出了深基坑开挖引起周边土体产生位移的机理, 并认识到土的工程性质与空

间和时间是有关系的<sup>[1]</sup>。沈健<sup>[2]</sup>认为, 基坑的空间效应与基坑的几何形状、长宽比、施工顺序及方法、土层特点和支护结构等有关。

OU 等<sup>[3]</sup>为了研究三维情况下基坑中点最大位移与二维平面应变中基坑最大位移之比, 定义了参数 PSR (Plane Strain Ratio), 并利用此参数定量描述空间效应的影响。根据数值计算结果得出 PSR 的数值与  $L/B$  (长宽比)、距坑角的距离  $d$  有关。

俞建霖和龚晓南<sup>[4]</sup>利用三维有限元分析软件对深基坑工程的空间性状进行分析, 他们分别从围护结构位移的空间分布、土压力的空间分布、基坑几何尺寸对土压力的影响、基坑几何尺寸对围护结构水平位移的影响等方面进行研究。根据数值计算结果, 他们认为: 随着基坑长宽比的增大, 围护结构长边的最大水平位移不断增大, 空间效应减弱。其间存在着—临界长宽比, 当基坑长宽比超过临界长宽比后, 其最大水平位移已接近于按二维平面应变问题分析的结果。在基坑宽度相同的情况下, 临界长宽比 (或临界长度) 与开挖深度近似成线性增长关系; 随着基坑长宽比的增大, 围护结构短边的最大水平位移与基坑长宽比亦呈线性增长关系。

刘念武等<sup>[5]</sup>分析了杭州市凤起东路地铁站基坑开挖, 车站基坑标准段开挖深度 24.78 m, 端头井开挖深度 26.38 m, 基坑面积 137.8 m $\times$ 22.1 m, 场地土质主要为粉质黏土、淤泥质粉质黏土, 围护形式采用地下连续墙结合 9 道内支撑。根据现场基坑围护实测数据, 围护结构位移值在长边方向和短边方向呈现一定的空间效应, 端头井附近虽然开挖深度深, 土体最大侧向位移相对较小, 最大侧向位移发生在基坑长边方向的中部。邻近基坑的周边建筑物变形也受到空间效应影响, 基坑两侧土体沉降呈现明显的凹槽型, 距离围护结构约 9 m 的地方, 土体沉降达到最大值, 超出 22 m 时, 土体变化较为平缓。

吴才德等<sup>[6]</sup>采用数值方法研究宁波地区深厚软土基坑开挖引起隧道周边土体位移场的变化与基坑平面尺寸、基坑开挖深度之间的关系。根据文中研究结论, 基坑开挖深度和开挖面积的增大使坑外土体位移场影响范围增大; 隧道最大位移随邻近基坑开挖面积的增加呈非线性递增, 小于 1 万 m<sup>2</sup> 的基坑, 其开挖面积变化对隧道最大位移的影响更为显著; 隧道最大位移随基坑开挖深度的增加而增大, 而且基坑开挖面积越大, 基坑开挖深度对隧道最大位移影响越大; 基坑平面形状是影响邻近隧道

位移的又一重要因素, 合理的分坑施工可有效减小隧道位移; 采用分隔墙与隧道垂直的分坑措施对隧道位移控制更为有利。

李大鹏等<sup>[7]</sup>以规则的矩形基坑为研究对象, 通过基坑开挖后坑周土体不均匀变形引发的拱效应现象, 分析了深基坑空间效应的发生机理。他们认为, 基坑开挖后, 基坑中部土体变形较大, 而接近基坑拐角处由于受到约束, 土体变形较小, 由于土体的不均匀变形, 满足土拱效应的存在条件, 在基坑壁周边的土体中会形成拱效应现象。

赵永洪等<sup>[8]</sup>将杭州地铁 1 号线周边的国芳基坑工程设计施工作为工程实例, 该基坑开挖深度为 14.55 m, 邻地铁侧基坑开挖面积为 8 258.5 m<sup>2</sup>, 距离地铁隧道最近处约 17.8 m。场地土质主要为粉土粉砂、淤泥质粉质黏土, 围护结构采用地连墙结合 3 道钢筋混凝土支撑。为防止基坑开挖隧道变形过大, 整个基坑采取分坑处理, 将整个大基坑分成 2 个小基坑, 以增强基坑的空间效应, 同时, 在与隧道平行的基坑长边方向, 设置 6 片地中壁。根据后续隧道监测数据, 隧道竖向位移最大值为 -10.2 mm, 水平位移最大值为 -8.7 mm。

徐闻达<sup>[9]</sup>及刘建文等<sup>[10]</sup>提出了基坑开挖对邻近隧道变形的简化方法, 采用 Mindlin 解推导基坑开挖引起的对隧道的附加应力。

上述研究说明基坑时空效应对围护变形影响较大, 继而影响基坑周边构筑物的变形, 如何减小基坑的空间效应对基坑周边构筑物的保护显得尤为重要。

本文以杭州市粉砂土地区旁侧基坑开挖对区间隧道影响分析为例, 依据地铁设施保护设计方案, 并对实测数据进行分析, 得出基坑及隧道变形特点, 采取可靠变形控制措施, 对隧道变形控制较好, 取得了良好的社会效益及经济效益, 同时为类似项目提供借鉴。

## 1 工程概况

本工程位于杭州市上城区, 地下室面积较大, 约 29 700 m<sup>2</sup>, 周长 740 m, 基坑开挖深度 14.4 m, 基坑呈不规则矩形, 空间效应较差。基坑设计时, 将整个基坑分为 A 区、B 区, 先施工 A 区, 再施工 B 区, 其中近地铁侧的 B 区再细分为 3 个区, 先施工 B2 区, 再施工 B1、B3 区。

本项目采用桩墙结合支撑围护形式, 邻近地铁

设施区域 3 层地下室采用地下连续墙作为围护结构，其余范围采用钻孔灌注桩作为围护桩。邻近地铁区间隧道地下室范围采用 3 道混凝土支撑，其余地下室范围采用 2 道混凝土支撑。邻地铁侧止水帷幕采用 700 mm 厚 TRD 搅拌桩，穿透粉砂土进入淤泥质粉质黏土层。邻地铁侧基坑坑外侧不降水，深井作为应急井。本项目与地铁区间隧道相对位置关系见图 1。

本工程西侧邻近杭州地铁区间隧道上行线隧道（近侧）21.5 m，下行线隧道（远侧）37.6 m，地铁隧道管片采用装配式钢筋混凝土管片，混凝土强度等级为 C50，管片外径 6 200 mm，厚 350 mm，宽 1 200 mm，环向分 6 块，采用 5.8 级螺栓连接，错缝拼装。

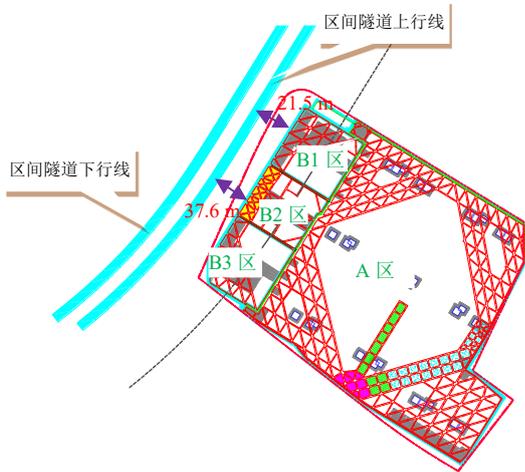


图 1 本项目与邻近地铁设施的位置关系

Fig. 1 Location relationship between the project and the adjacent subway facilities

## 2 工程地质条件

基坑开挖范围内地质条件如下：①<sub>1</sub> 杂填土，杂色，松散，稍湿，主要由块石、碎石、建筑垃圾混粉土组成，少量砂土和黏性土充填其中，该层块石含量不均匀；③ 砂质粉土，灰黄色、黄灰色，湿，中密，含云母，少量铁锰质氧化物，主要由粉土组成，该层分选性好，颗粒均匀；⑥ 淤泥质粉质黏土，灰色，流塑，含有机质，偶见少量贝壳碎屑及未完全腐化的植物，干强度高，高韧性，为高灵敏度土，切面有光泽；⑦ 粉质黏土，灰黄色、褐黄色，可塑，含云母、氧化铁锰质斑点，无层理，切面较光滑，干强度中等，韧性中等。其中杂填土较薄，厚度约 2~3 m，粉土粉砂层较厚，厚度约 20 m，淤泥质粉质黏土厚度约 2 m，为薄层。粉土层为本工程主要影响地层。

## 3 地铁设施保护措施

在基坑围护设计方案中，采取了以下措施对已建地铁隧道进行保护。

(1) 将本基坑总体分为 3 期，分期进行施工。通过分区块施工软分坑的形式增加围护体空间、时间效应。

对于邻近地铁设施的基坑分为 3 个区，如表 1 所示，其中 B1 区面积 2 096 m<sup>2</sup>，B2 区面积 1 790 m<sup>2</sup>，B3 区面积 2 137 m<sup>2</sup>，分坑使得基坑具有较好的空间效应，可以有效减少基坑外侧土体变形，从而控制地铁设施变形。

(2) 邻地铁西侧采用 TRD 工法水泥土墙作止水帷幕，TRD 止水帷幕在实际工程应用中止水效果显著优于其他形式的搅拌桩止水帷幕，从而防止基坑漏水，杜绝漏水带来的安全隐患。

(3) 邻地铁西侧外墙与围护桩无空隙，减小围护结构在地下室结构完成后侧移。

(4) 西侧采用 1 000 mm 厚地下连续墙结合 3 道钢筋混凝土水平内支撑，加强基坑整体围护刚度，见图 2。

表 1 基坑分坑面积统计表

Table 1 Statistical table of pit area of foundation pit

基坑分区	地下室层数	基坑挖深 h/m	分坑面积 S <sub>a</sub> /m <sup>2</sup>	基坑隧道 距离 L <sub>1</sub> /m
A区	地下3层	14.4	—	—
B1区	地下3层	14.4	2 096	45.1
B2区	地下3层	14.4	1 790	39.4
B3区	地下3层	14.4	2 137	48.8

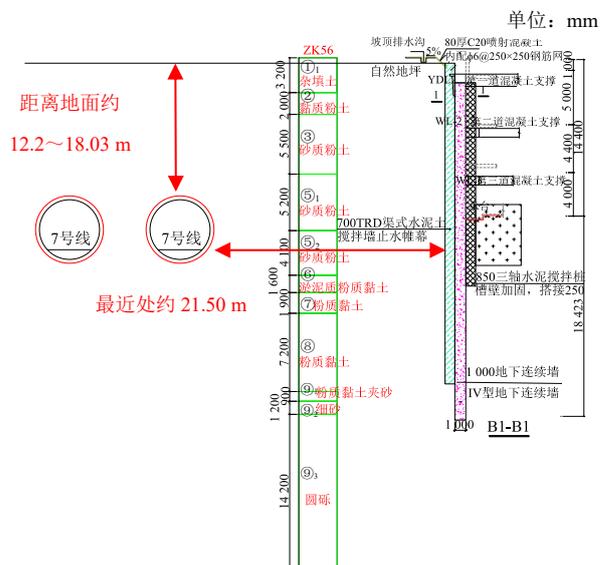


图 2 基坑典型剖面图

Fig. 2 Typical section of foundation pit

(5) 邻地铁侧坑外不降水, 坑外设置应急井。

(6) B2 区基坑支撑采用轴力伺服系统控制围护变形。后续在施工过程中, 根据围护变形施加轴力 2 500 kN。

### 4 基坑监测数据分析

基坑监测项主要包含水位、土体测斜、支撑轴力、地表沉降等, 本文主要选取支撑轴力、深层土体水平位移、地下水位等监测数据进行分析(图 3~7)。

根据监测数据可知, 地下水位随时间变动较小, 水位维持在-2.5~-2.0m, 基坑开挖过程中 TRD 止水帷幕止水效果较好, 未发生渗漏水事故。

B1 区第一道支撑轴力 4 687 kN, 第二道支撑轴力 7 277 kN, 第三道支撑轴力 7 788 kN; B2 区第一道支撑轴力 3 481 kN, 第二道支撑轴力 4 495 kN, 第三道支撑轴力 5 881 kN; B3 区第一道支撑轴力 4 987 kN, 第二道支撑轴力 7 982 kN, 第三道支撑轴力 7 883 kN。第一道支撑轴力明显小于第二、三道支撑轴力。

B2 区因添加轴力伺服系统, 轴力明显小于其余两区。B2 区对应土体测斜最大为 11.04 mm, B1 区对应土体测斜最大为 34.79 mm, B3 区对应土体测斜最大为 41.15 mm, B2 区土体测斜明显小于其他

两区, 说明轴力伺服系统对于控制围护变形效果较为显著。土体变形最大位置位于坑底位置附近。图 5 中 CX6 孔位置增加了轴力伺服系统, 基坑围护变形较小, 变形趋势因轴力伺服系统的干扰, 与其他测斜孔的变形趋势不尽相同, 但总体累计位移明显小于其他测斜孔。

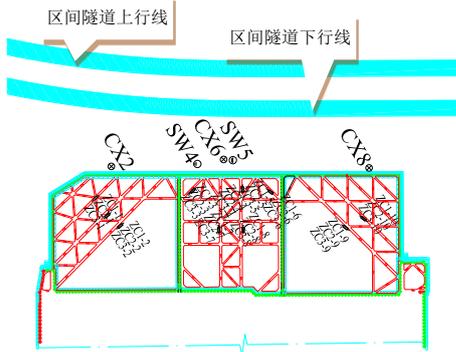


图 3 基坑监测平面图  
Fig. 3 Monitoring plan of foundation pit

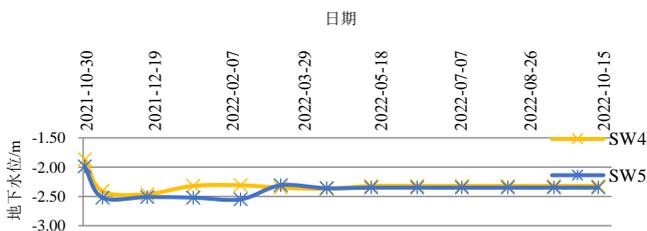


图 4 地下水位时间曲线  
Fig. 4 Time curves of groundwater level

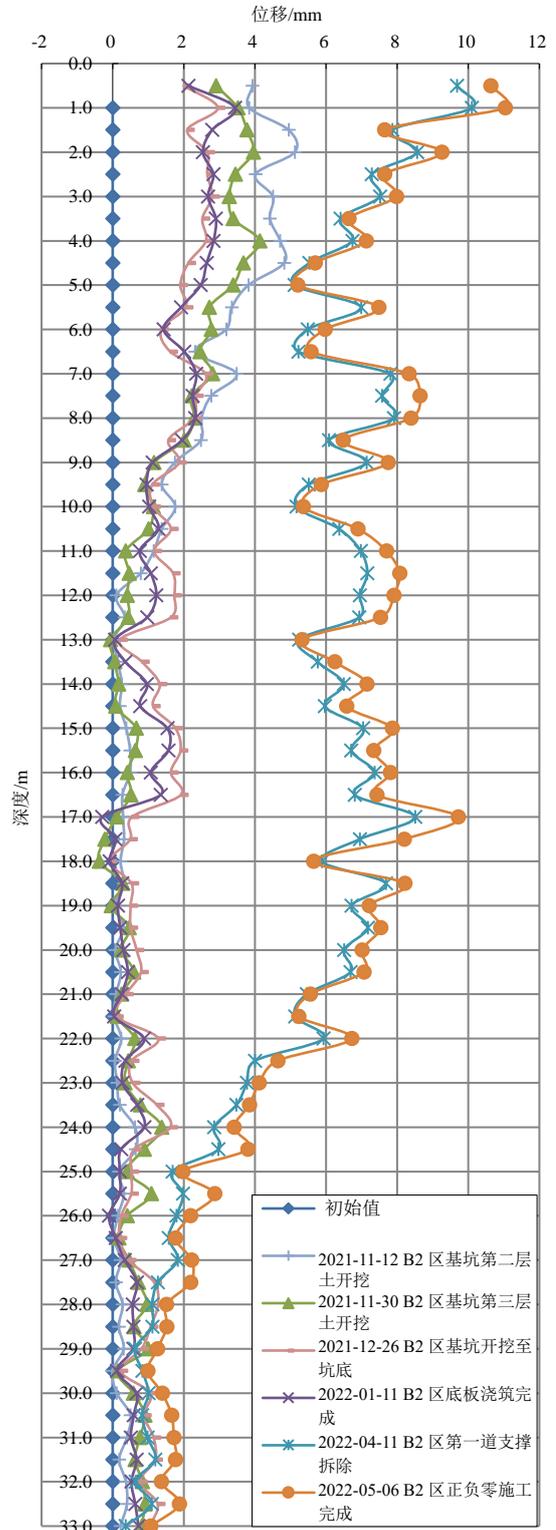


图 5 CX6 孔测斜曲线图  
Fig. 5 CX6 well oblique curves

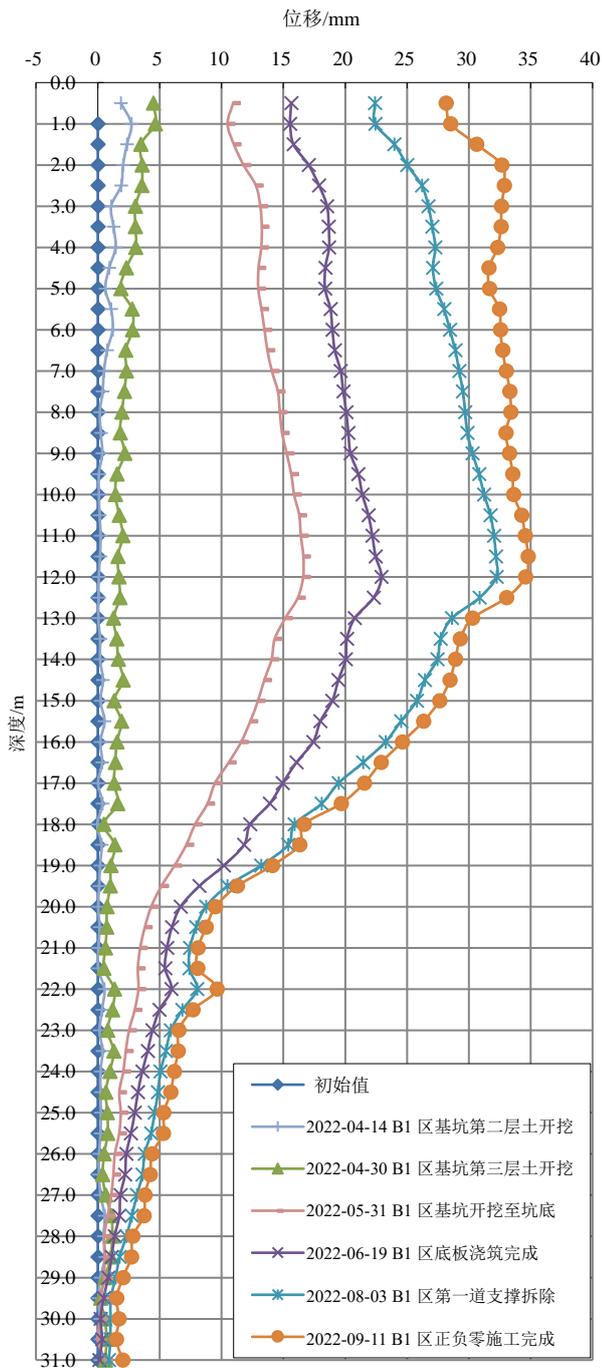


图6 CX8孔测斜曲线图

Fig. 6 CX8 well oblique curves

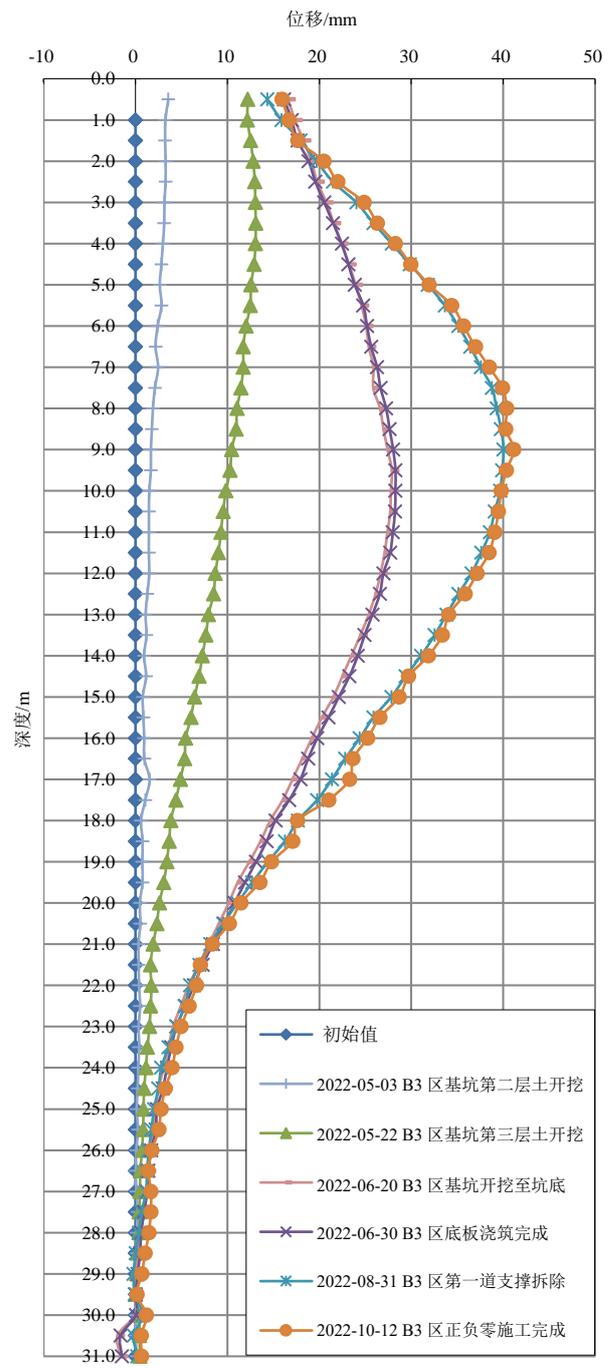


图7 CX2孔测斜曲线图

Fig. 7 CX2 well oblique curves

## 5 地铁监测数据分析

根据地铁设施区间隧道人工监测数据显示,截至2023年3月16日停测,人工监测数据最大累计变化量:道床沉降上行线为5.9 mm,下行线为5.7 mm;收敛上行线为4.3 mm,下行线为5.0 mm;水平位移上行线为2.3 mm。整个施工过程中,地铁设施变形较小,见图8~10。

整个基坑施工过程中,TRD、地连墙、工程桩

等桩基施工、基坑开挖均会引起隧道变形。TRD施工、地连墙施工、围护桩与工程桩施工引起隧道道床沉降约-1 mm。

B2坑开挖阶段,隧道变形迅速变大,道床竖向变形为3.9 mm,变形趋势变为上抬,B1、B3基坑开挖时,隧道变形也有上抬趋势,但总体变形趋势较为平缓。同时隧道收敛变形趋势与道床竖向变形趋势一致。水平变形相对竖向变形及收敛变形较小,变化趋势较为平稳,最大约2 mm,朝基坑侧。

本次隧道竖向变形趋势为向上隆起,相对常规

基坑开挖对变形影响趋势不一致, 由于隧道顶位于基坑下方, 基坑开挖卸载导致隧道上方土体松弛,

而隧道底为粉质黏土层, 该层土体性质较好, 可减弱隧道向下沉降趋势。

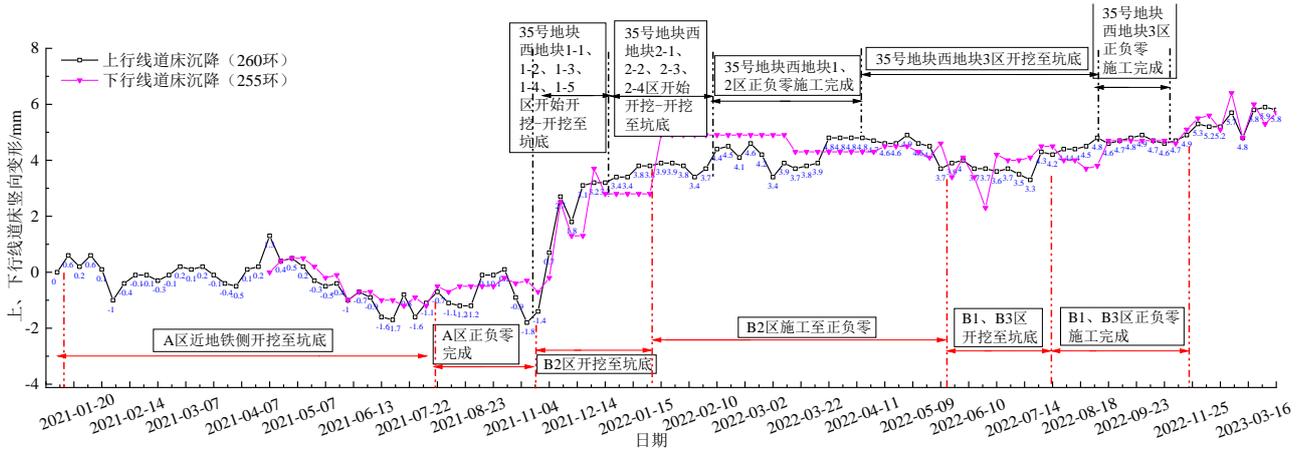


图 8 道床竖向变形时程曲线  
Fig. 8 Time history curve of ballast settlement

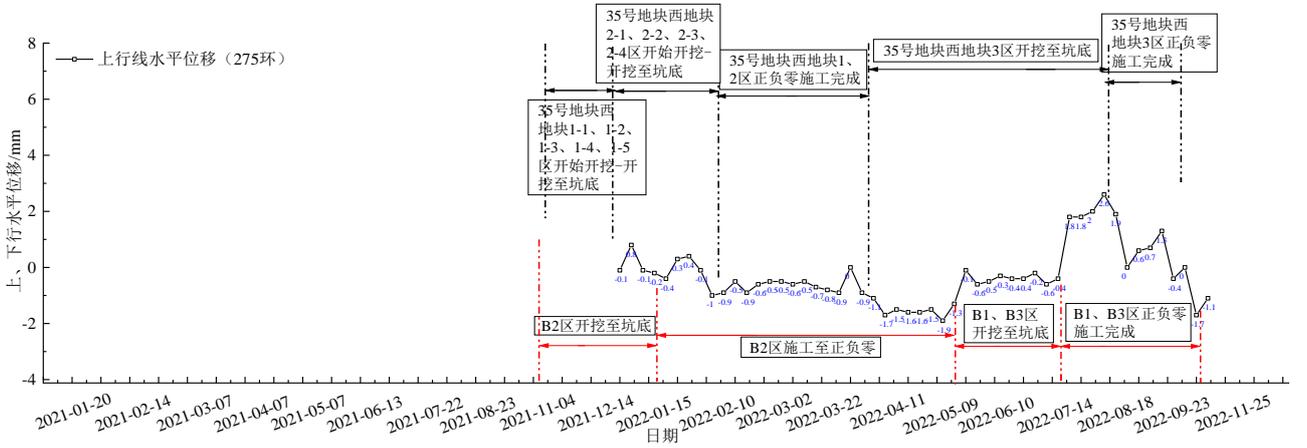


图 9 水平位移时程曲线  
Fig. 9 Time history curve of horizontal displacement

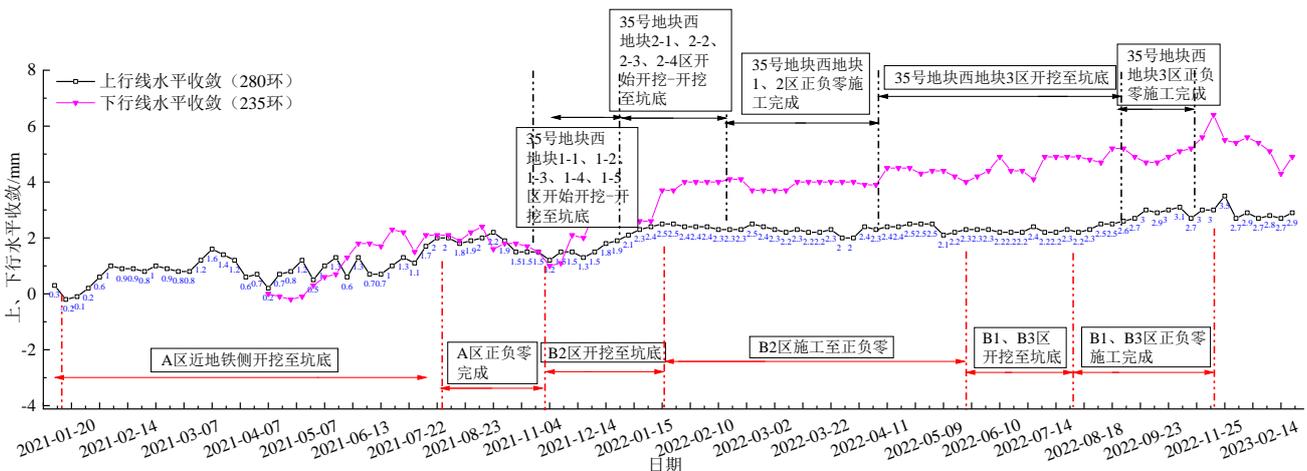


图 10 收敛时程曲线  
Fig. 10 Time history curve of convergence

### 6 结论

(1) 基坑周边存在地铁设施时, 基坑围护设计

方案应考虑对地铁设施的保护。

(2) 地铁侧止水帷幕建议采用止水效果较好的 TRD 搅拌桩等止水帷幕, 防止渗漏水。

(3) 基坑开挖面积较大时,可采用分坑,分坑空间效应较好,能有效减少基坑侧土体变形,土体最大变形位置位于坑底位置附近。

(4) 邻地铁侧禁止降水,防止降水引起周边土体沉降。

(5) 轴力伺服系统可有效减少基坑围护体侧向变形。

(6) 地铁隧道底土体较硬时,隧道竖向变形趋势表现为隆起。

## 参考文献

- [1] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation Engineering Manual[M]. Second Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [2] 沈健. 基于“*m*”法的软土地区基坑工程时空效应研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.  
SHEN Jian. Research on time-space effect in soft soil excavations based on “*m*” method[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2006.
- [3] OU C Y, CHIOU D C, WU T S. Three-dimensional finite element analysis of deep excavations[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(5): 337-345.
- [4] 俞建霖, 龚晓南. 深基坑工程的空间性状分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 21-25.  
YU Jian-lin, GONG Xiao-nan. Spatial behavior analysis of deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1): 21-25.
- [5] 刘念武, 陈奕天, 龚晓南, 等. 软土深开挖致地铁车站基坑及邻近建筑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1515-1526.  
LIU Nian-wu, CHEN Yi-tian, GONG Xiao-nan, et al. Analysis of deformation characteristics of foundation pit of metro station and adjacent buildings induced by deep excavation in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1515-1526.
- [6] 吴才德, 曾婕, 成怡冲, 等. 深基坑开挖空间效应对周围土体及邻近隧道的影响研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(2): 91-95.  
WU Cai-de, ZENG Jie, CHENG Yi-chong, et al. Influence study of spatial effect of deep foundation pit excavation on around soil and adjacent tunnel[J]. Building Structure, 2016, 46(2): 91-95.
- [7] 李大鹏, 唐德高, 闫凤国, 等. 深基坑空间效应机理及考虑其影响的土应力研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2014, 48(9): 1632-1639.  
LI Da-peng, TANG De-gao, YAN Feng-guo, et al. Mechanics of deep excavation's spatial effect and soil pressure calculation method considering its influence[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2014, 48(9): 1632-1639.
- [8] 赵永洪, 鲍志杰, 姬耀斌. 邻近地铁边深基坑工程设计与施工实践[J]. 浙江建筑, 2020, 37(6): 31-35.  
ZHAO Yong-hong, BAO Zhi-jie, JI Yao-bin. Engineering design and construction practice of deep foundation pit near a metro[J]. Zhejiang Construction, 2020, 37(6): 31-35.
- [9] 徐闻达. 基坑开挖对邻近地铁隧道变形的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
XU Wen-da. Research on the influence of foundation pit excavation on the deformation of adjacent metro tunnel[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [10] 刘建文, 施成华, 雷明锋, 等. 基坑开挖对下卧地铁隧道影响的解析计算方法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2019, 50(9): 2215-2225.  
LIU Jian-wen, SHI Cheng-hua, LEI Ming-feng, et al. Analytical method for influence analysis of foundation pit excavation on underlying metro tunnel[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2019, 50(9): 2215-2225.