

# 污染土处理对下方地铁区间隧道影响的实例简析

洪子涵, 陈俊辉, 毕爽爽  
(杭州市勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 污染土处理项目需要对土体进行开挖, 并在土方取样检验后换填, 基坑暴露时间比常规基坑项目更长。当处理区域位于地铁沿线时, 上方基坑卸荷作用会导致地铁隧道的变形。本文以杭州地铁 4 号线上方某污染土处理项目为例, 通过 Midas GTS 有限元软件建立三维有限元模型进行数值模拟, 对施工变形进行预评估, 结合地铁保护监测实测数据进行分析, 揭示了污染土开挖时对下方地铁区间隧道的影响规律, 总结了地铁保护区范围内相关控制措施, 可供类似工程参考。

**关键词:** 污染土处理; 分坑开挖; 地铁区间隧道; 施工预评估; 数值分析

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S1-0014-06

## Impact of contaminated soil treatment on underground tunnel beneath: a case study

HONG Zi-han, CHEN Jun-hui, BI Shuang-shuang

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

**Abstract:** The contaminated soil treatment includes several stages, i.e. excavation, soil sampling, contamination check, and backfilling. The exposure of the excavation takes longer time than conventional foundation excavations. The unloading of the upper foundation pit will lead to the deformation of the subway tunnel. In this paper, a contaminated soil treatment project above Hangzhou metro line 4 was taken as an example. Midas GTS finite element software was used to establish a three-dimensional model for numerical simulation, and construction deformation was predicted. Combined with the measured data of subway protection monitoring, the influence of contaminated soil treatment excavation on the underground tunnel was analyzed. The relevant control measures are summarized within the scope of the subway protection zone, which can be used as a reference for similar projects.

**Key words:** contaminated soil treatment; excavation; subway tunnel; pre-evaluation of construction; numerical analysis

## 0 引言

高速发展的城市建设需要对大量旧工业或医疗设施废弃物污染的土体进行处理。污染土处理项目将污染土开挖后, 需对土方进行污染检验后方可回填, 基坑暴露时间较普通基坑项目更长。污染土处理工程邻近已运营或在建的地铁设施, 应针对污染土处理项目特点采取有效手段控制基坑变形, 以保障地铁设施满足变形控制要求。

刘国彬等<sup>[1]</sup> 通过实测分析, 总结了基坑施工引起下方隧道隆起的变形规律。魏纲<sup>[2]</sup> 通过国内基坑

工程实测案例, 研究了基坑开挖对下方地铁 1 号线盾构隧道变形的影响, 对隧道竖向位移、水平向位移以及水平向收敛的实测数据进行了分析, 其结果验证了理论分析和计算公式的可靠性。李家平<sup>[3]</sup> 通过数值模拟分析, 研究了地基加固、抗拔桩以及考虑时空效应的分块、限时开挖等技术措施减小下部隧道变形的效果, 而且数值模拟结果与现场实测数据基本吻合, 可供今后类似工程参考。徐良仲等<sup>[4]</sup> 以杭州地铁 6 号线旁侧某基坑工程为例, 通过有限元模拟分析, 对参数取值进行了强度折减反演, 与理论计算值吻合, 可为后续设计和围护优化提供重要

依据。王卫东等<sup>[5]</sup>以上海新金桥广场基坑上跨地铁区间隧道工程为例,建立了该基坑工程的数值分析模型,模型充分考虑了设计中隧道周围土体加固等影响因素,通过对实际施工工况的模拟,动态分析了上方基坑开挖卸荷对地铁隧道的影响,为优化设计和施工提供了有益的参考。张玉成等<sup>[6]</sup>以位于地铁正上方的海珠广场发展项目为例,通过数值分析模型,得出基坑开挖对开挖面以下土体有显著的竖向卸荷作用,同时管片应力状态也会产生改变,为类似工程提供借鉴。

本文以杭州市某已施工完成的污染土处理项目为例,利用 Midas GTS 有限元软件,采用土体硬化(HS)模型对其进行数值模拟,模拟参数取值考虑了地基土强度折减、围护结构施工质量、时空效应、基坑既有变形等诸多问题,对土体强度、围护结构刚度等指标进行了折减。模拟结果与地铁保护实测数据进行了比较,验证了数值分析的有效性,总结了地铁保护区范围内控制地铁隧道变形的相

关措施,对类似工程有参考意义。

## 1 项目简介

### 1.1 项目概况

项目位于杭州市拱墅区半山街道原杭钢厂区内。污染土壤治理需开挖的基坑深度在 0~6.0 m(开挖深度均从现状自然地面算起),其中挖深 0~1 m,面积 9 673 m<sup>2</sup>;挖深 1~2 m,面积 13 348 m<sup>2</sup>;挖深 2~4 m,面积 21 074 m<sup>2</sup>;挖深 4~6 m,总面积 5 294 m<sup>2</sup>,共计面积约 49 839 m<sup>2</sup>。

污染土处理范围下方为地铁区间隧道,隧道正上方基坑普遍为 4 m,局部为 6 m,基坑底距离地铁区间隧道约 10.5~14.5 m。盾构隧道内径为 5.5 m,衬砌采用拼装管片,管片厚度 0.35 m,采用 C50 混凝土,其标准环管片环宽 1.2 m。污染土处理范围详见图 1。

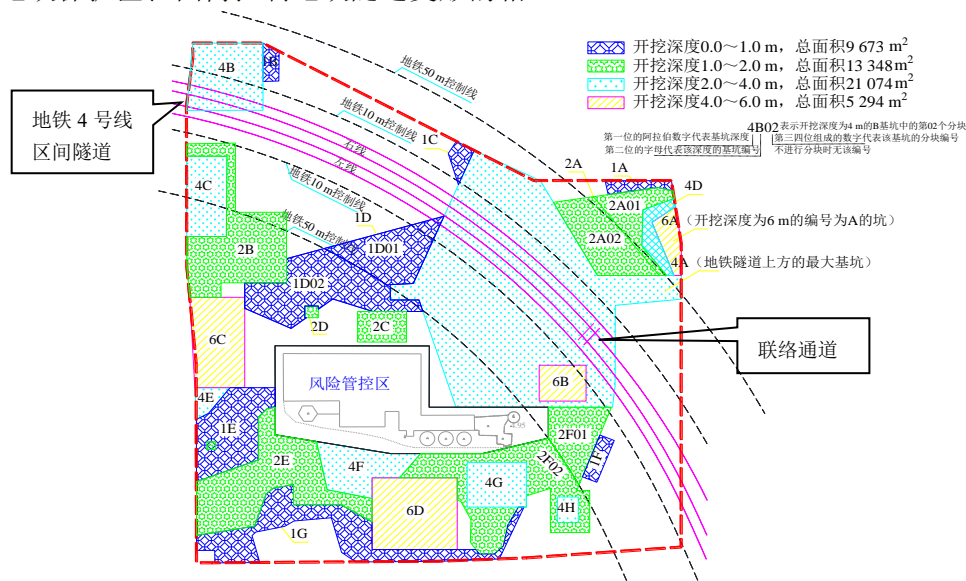


图 1 污染土处理范围平面示意图

Fig. 1 Plan view of the contaminated soil treatment area

### 1.2 工程地质条件

根据本项目地质勘察报告,基坑影响范围内的土体主要为填土和粉质黏土。项目北侧浅部地表含有 1.5~4 m 厚的填土,仅个别钻孔有淤泥质土,且厚度不厚,其余均为粉质黏土,整体土质相对较好。南侧除约 2 m 厚填土外,均为中风化粉砂岩。

孔隙潜水赋存于①层填土及浅部黏性土中,水源补给一般,黏性土水量较贫乏,一般具各向异性,填土联通性稍好。土层渗透系数为  $1.0 \times 10^{-5}$  cm/s,属较弱透水性。水位埋深为 1.30~2.90 m,年水位

变幅约为 2.0 m。

## 2 邻地铁侧围护方案

由于本项目下方为地铁区间隧道,基坑分坑面积等需满足规范要求,遂将隧道正上方 4A 基坑分为 21 个小坑(见图 2),将隧道正上方 4B 基坑分为 3 个小坑,旁侧 4C 和 6B 各分为一个小坑,小坑分坑跳挖,小坑内分层开挖,基坑开挖后及时分层回填,并采用小型机械压实。为避免在地铁上方进行围护桩基施工,围护形式以放坡开挖为主,仅在靠

近工业遗址较近的位置设置拉森钢板桩。为控制地铁区间隧道变形，地铁隧道 10 m 范围内施工荷载

不超过 10 kPa，地铁隧道 10~50 m 保护区范围内荷载不超过 20 kPa，方案详见图 2、图 3。

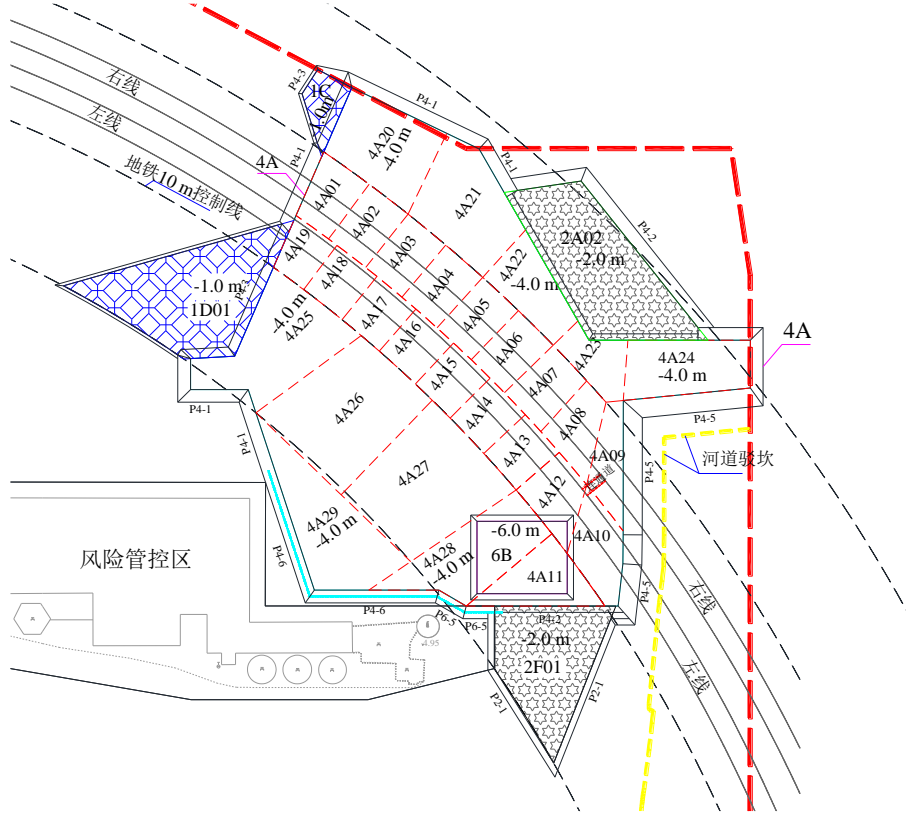


图 2 地铁正上方基坑分坑平面图

Fig. 2 Layout plan of the pit division above the subway

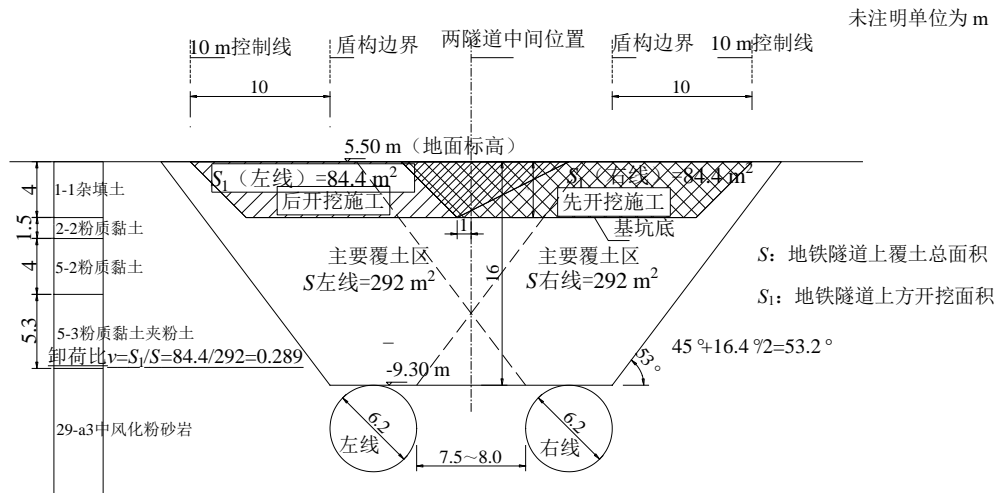


图 3 4A 基坑剖面图

Fig. 3 Profile of 4A excavation

### 3 有限元数值模拟

#### 3.1 模型参数概况

采用大型商业有限元数值软件 Midas GTS 建立三维有限元模型，进行基坑各个阶段的施工工况对地铁区间隧道变形的影响分析，分析基坑开挖时地

铁区间隧道的位移响应。土体材料本构模型采用土体硬化 (HS 模型) [7-9]，基坑支护结构、支撑、换撑、隧道衬砌结构等采用弹性材料类型。基坑支护结构、支撑、隧道衬砌结构等采用板单元模拟，换撑采用锚锭杆模拟。详见表 1、表 2。

根据基坑开挖范围、深度和土质条件情况，合理选取模型尺寸以减少边界条件对计算结果的影

响。综合考虑确定分析模型尺寸为 280 m (X 方向) × 220 m (Y 方向) × 40 m (Z 方向), 见图 4。模型边界采用标准约束形式, 即在侧面施加法向约束, 在底面施加完全约束, 顶面自由。

表 1 土体 HS 模型参数

Table 1 Parameters of HS model for the soils

层号	$E_{50}/\text{MPa}$	$E_{oed}/\text{MPa}$	$E_{ur}/\text{MPa}$	$G_0/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}$
1-1	3.0	3.0	15.0	30.0	—
1-2	2.5	2.5	12.5	25.0	$1.5 \times 10^{-4}$
2-2	4.0	4.0	20.0	40.0	$1.5 \times 10^{-4}$
2-3	7.0	7.0	35.0	70.0	$1.5 \times 10^{-4}$
4-1	2.2	2.2	11.0	22.0	$1.5 \times 10^{-4}$
5-2	7.0	7.0	35.0	70.0	$1.5 \times 10^{-4}$
5-3	6.0	6.0	30.0	60.0	$1.5 \times 10^{-4}$
7-2	11.0	11.0	55.0	110.0	$1.5 \times 10^{-4}$
17-1	13.0	13.0	65.0	130.0	$1.5 \times 10^{-4}$
29-a1	8.0	8.0	40.0	—	—
29-a2	18.0	18.0	90.0	—	—
29-a3	50.0	50.0	—	—	—

表 2 结构材料参数

Table 2 Structural material parameters

名称	材料类型	轴向刚度 $EA/$ (kN/m 或 kN)	抗弯刚度 $EI/$ (kN·m <sup>2</sup> /m 或 kN·m <sup>2</sup> )	泊松比
隧道衬砌	弹性	$34.5 \times 10^6$	$2.88 \times 10^6$	0.20

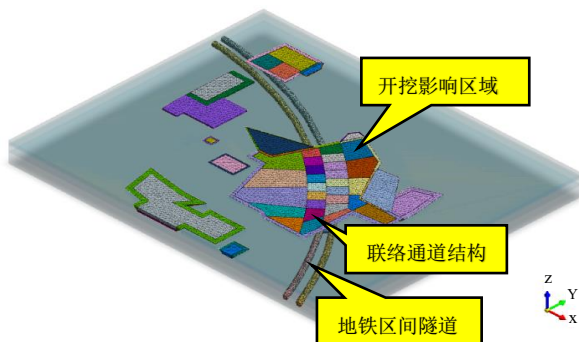


图 4 基坑与地铁隧道相对位置关系图

Fig. 4 Relative position of the excavation and the subway tunnel

### 3.2 地铁结构变形预测

根据 Midas GTS 数值模拟分析结果, 通过分坑跳挖的工况, 预测地铁区间隧道结构的最终变形为: 水平位移 0.53 mm, 竖向位移 1.34 mm; 联络通道结构的最终变形为: 水平位移 0.31 mm, 竖向位移 0.70 mm, 详见表 3。土体及区间隧道总位移云图详见图 5 和图 6。

表 3 地铁结构变形预测值

Table 3 Predicted deformation of the subway structures

地铁结构	项目	变形预测值/mm
区间隧道结构	水平位移	+0.53
	竖向位移	+1.34
联络通道结构	水平位移	+0.31
	竖向位移	+0.70

注: 水平位移中“+”代表往本项目基坑内方向; 竖向位移中“+”代表向上隆起, “-”代表向下沉降。

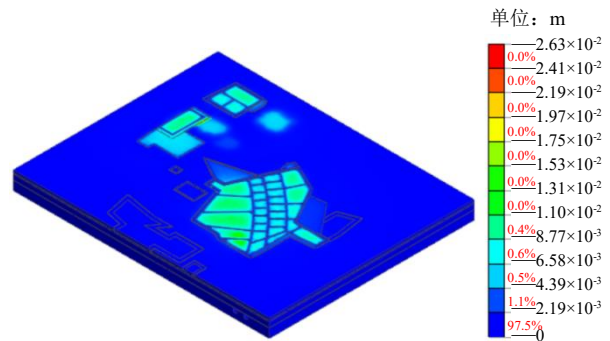


图 5 土体总位移云图

Fig. 5 Cloud map of total displacement of the soil

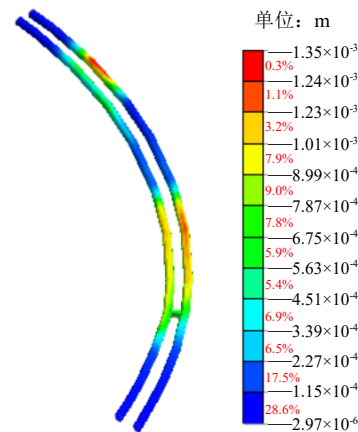


图 6 区间隧道总位移云图

Fig. 6 Cloud map of total displacement of the tunnel

## 4 地铁保护实测数据分析

由表 3 可知, 通过 Midas GTS 软件数值模拟计算预测了地铁区间隧道的变形情况。本节通过地铁保护监测实测数据与数值计算模拟结果进行对比, 分析地铁区间隧道变形情况, 地铁保护监测布置平面图详见图 7。

由地铁监测数据可以得出整个工期中由于分坑跳挖及回填的工况安排, 地铁区间隧道处于反复开挖隆起和回填沉降的一个趋势, 由于空间效应的影响导致隆起量逐渐累积, 最终土方全部回填完成后地铁区间隧道拱底隆起量最大值为 1.5 mm, 与

Midas 预测计算结果 1.34 mm 基本吻合。地铁监测数据详见表 4 和图 8。

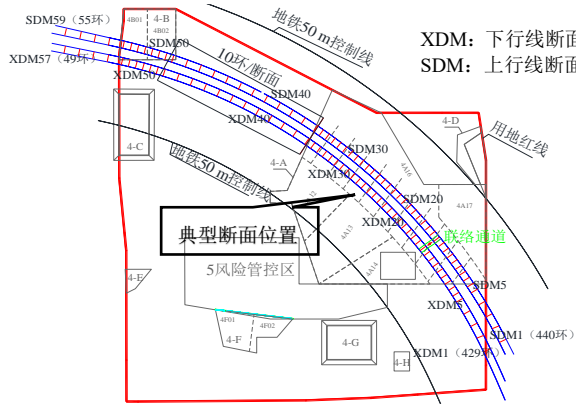


图 7 地铁保护监测布点图

Fig. 7 Instrumentation plan for protective monitoring of the subway

表 4 地铁区间隧道变形实测值

Table 4 Measured deformation of the subway tunnel

项目	累计最大变化量/mm		备注
	监测点号	变化量	
拱底沉降	ZCJ28(275)	+1.5	左线
水平位移	ZWY27(280)	-0.9	
水平收敛	ZSL28(275)	+1.8	
拱顶沉降	ZGD34(245)	-1.7	右线
拱底沉降	YCJ13(360)	+1.3	
水平收敛	YSL50(120)	+1.9	
拱顶沉降	YGD27(290)	-1.7	

注：地铁结构水平位移中“+”代表往本项目基坑内方向；竖向位移中“+”代表向上隆起，“-”代表向下沉降。

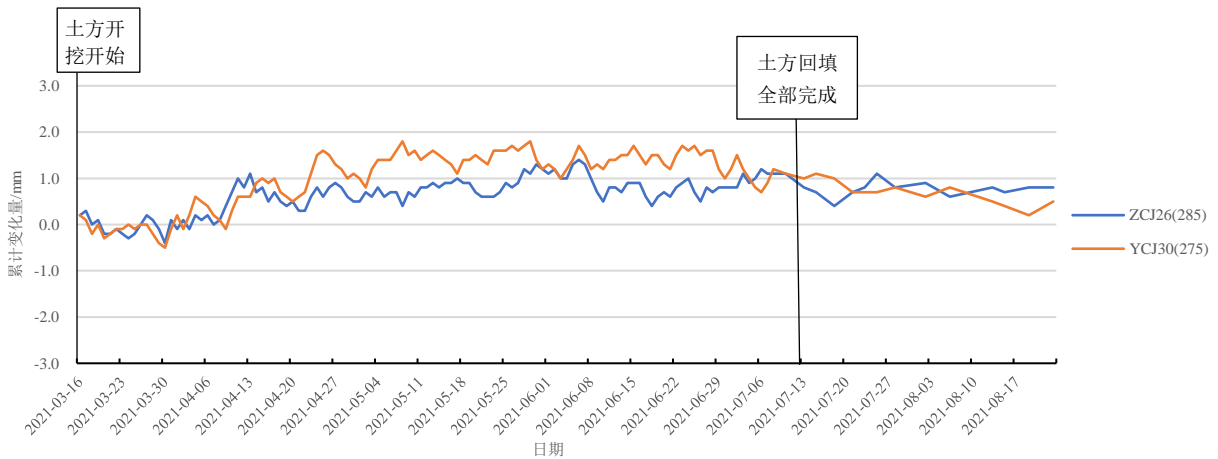


图 8 自污染土处理开始的典型断面地铁隧道沉降时程图

Fig. 8 Settlement at typical section of the subway tunnel along with time since the beginning of contaminated soil treatment

### 5 结论

本文以杭州市某污染土处理项目为背景，通过 Midas GTS 有限元计算软件对上方污染土处理施工对地铁区间隧道的影响进行了模拟分析，并与地铁保护监测数据进行比较，得出以下结论：

(1) 污染土基坑开挖时应考虑时空效应，分坑跳挖施工，污染土检测完成后应及时回填，减少基坑暴露时间。

(2) 严格控制地铁边单体基坑开挖面积和邻地铁测开挖长度，控制基坑开挖面积。

(3) 项目施工严格按照“分段、分层、对称、均衡、限时”开挖和回填，开挖一段回填一段，开挖后尽快回填，分层回填厚度<1.5 m，控制下部隧道的上浮。回填土压实时选用轻型压实工具，减小

对地铁影响。

(4) 地铁保护范围严格控制坑边超载，地铁隧道 10 m 范围内荷载不超过 10 kPa，地铁隧道 10~50 m 保护区范围内荷载不超过 20 kPa，可以有效控制地铁隧道变形。

(5) 通过有限元模拟分析，隧道隆起模拟结果与地铁保护监测数据基本符合，可以为类似工程的设计方案的制定和地铁隧道的保护提供重要的依据。

### 参考文献

[1] 刘国彬, 吉茂杰. 基坑施工对下方隧道影响研究[J]. 建筑技术, 2002, 33(2): 116-117.

LIU Guo-bin, JI Mao-jie. Research on impact of foundation construction on tunnel beneath it[J]. Architecture Technology, 2002, 33(2): 116-117.



- [2] 魏纲. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1421-1428.  
WEI Gang. Measurement and analysis of impact of foundation pit excavation on below existed shield tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1421-1428.
- [3] 李家平. 基坑开挖卸载对下卧地铁隧道影响的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(增刊): 1345-1348, 1360.  
LI Jia-ping. Numerical analysis of influence of deep excavation on underlying metro tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(S): 1345-1348, 1360.
- [4] 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.
- [5] 王卫东, 吴江斌, 翁其平. 基坑开挖卸载对地铁区间隧道影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊): 251-255.  
WANG Wei-dong, WU Jiang-bin, WENG Qi-ping. Numerical modeling of affection of foundation pit excavation on metro tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S): 251-255.
- [6] 张玉成, 杨光华, 姚捷, 等. 基坑开挖卸荷对下方既有地铁隧道影响的数值仿真分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 109-115.  
ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, YAO Jie, et al. Numerical simulation and analysis of effect of excavation of foundation pits on metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 109-115.
- [7] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2283-2290.  
WANG Wei-dong, WANG Hao-ran, XU Zhong-hua. Experimental study of parameters of hardening soil model for numerical analysis of excavations of foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2283-2290.
- [8] 王海波, 宋二祥, 徐明. 地下工程开挖土体硬化模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(3): 351-354.  
WANG Hai-bo, SONG Er-xiang, XU Ming. Hardening-soil-model for underground construction[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(3): 351-354.
- [9] 白时雨, 王文军, 谢新宇, 等. 考虑扰动影响的土体小应变硬化模型参数试验研究及其在基坑工程中的应用[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 206-216.  
BAI Shi-yu, WANG Wen-jun, XIE Xin-yu, et al. Experimental study on HS-small model parameters of soil considering disturbance and its application in foundation pit engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(1): 206-216.