

双侧基坑施工对既有地铁隧道变形的影响

陈溪宁

(南京高等职业技术学校,江苏 南京 210004)

摘要: 双侧基坑开挖卸载会引起周边既有构建筑物的变形,严重时会引起构建筑物的倒塌。为此,以软土地区某临近地铁的双侧基坑工程为背景,运用有限元软件建立三维基坑-隧道模型,通过控制变量法,分析两侧基坑开挖顺序和地下连续墙厚度对基坑自身和既有隧道变形的影响,并将数值结果与实测结果对比。基于现场实测数据,探讨基坑不同开挖阶段隧道管片收敛和竖向位移的变形规律。研究表明:计算结果与实测结果吻合较好;两侧基坑交替开挖比仅单侧基坑先开挖能更好地控制地连墙水平位移、隧道水平和竖向变形;增加地下连续墙厚度能有效减小地连墙和隧道变形,最佳地连墙厚度为1.0 m;既有隧道水平和竖向变形主要发生在第二阶段和第三阶段施工,且基坑开挖卸载对弯曲段隧道的变形影响更为显著。本文成果可为类似工程提供一定的借鉴与参考。

关键词: 双侧基坑; 既有地铁隧道; 变形规律; 现场实测; 有限元分析

中图分类号: U45

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)01-0037-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.01.006

Influence of double-sided foundation pit construction on deformation of existing subway tunnels

CHEN Xining

(Nanjing Technical Vocational College, Nanjing 210004, Jiangsu, China)

Abstract: Unloading during double-sided foundation pit excavation can cause deformation of surrounding existing structures, and can cause collapse of the structures in more serious cases. Therefore, a double-sided foundation pit project near a subway in a soft soil area is taken as the background, the finite element software is used to establish a three-dimensional foundation pit-tunnel model, and the control variable method is used to analyze the influence of the excavation sequence of the foundation pits on both sides and the thickness of the diaphragm wall on the deformation of the foundation pit itself and the existing tunnels, and compare the numerical results with the measured results. Based on the on-site measurement, the deformation laws of tunnel segment convergence and vertical displacement at different excavation stages of foundation pit are discussed. The results show that the calculated results are in good agreement with the measured results; the alternating excavation of the two sides of the foundation pit can better control the horizontal displacement of the diaphragm wall and the horizontal and vertical deformation of the tunnel than the excavation of only one side of the foundation pit; increasing the thickness of the diaphragm wall can effectively reduce the deformation of the diaphragm wall and the tunnel. The optimal thickness of the diaphragm wall is 1.0 m. The horizontal and vertical deformations of the existing tunnel mainly occur in the second and third stages of the construction, and the influence of foundation pit excavation unloading on the deformation of the curved section tunnel is more significant. The results can provide a certain reference for similar projects.

收稿日期: 2024-06-28

作者简介: 陈溪宁(1998—),女,助理讲师,从事土木工程方面的研究。

Key words: double-sided foundation pit; existing subway tunnels; deformation law; on-site measurement; finite element analysis

随着我国城市化进程的加快建设,地下空间开发加速,城市用地渐趋紧张,导致新建深基坑紧邻既有地下结构工程越来越多^[1]。基坑开挖卸载会破坏原有土层地应力平衡,不可避免对地铁隧道、地下管线等产生不利影响。因此,针对深基坑施工对周边环境的影响问题已逐渐成为岩土工程研究的热点之一。

不少学者依托深基坑实例,对该问题进行了一系列的研究。陈锦剑等^[2]基于上海地区某深基坑工程案例,运用有限元分析法分析了双侧基坑施工下运营的动力响应特征,探讨了开挖方案、基坑与隧道距离的影响规律;伍尚勇等^[3]通过Midas/GTS建立三维数值模型,分析了广州某邻近地铁隧道的基坑工程实例,并与现场实测结果对比,分析了双侧基坑施工对中间地铁隧道的影响;李安兴等^[4]依托重庆市六号线大剧院站工程背景,运用数值手段分析了支护方式、开挖顺序对轨道结构的影响程度;吕高乐等^[5]以某软土地区双侧深基坑工程为研究对象,采用数值手段动态模拟了基坑开挖过程,分析了基坑开挖引起的坑内外土体变形以及既有结构的变形;彭丽云等^[6]针对双侧基坑穿越既有线路的难题,遵循分区分块施工原则,提出了交叉开挖方案,通过现场实测,评估该施工方案的合理性。双侧基坑开挖对邻近构筑物变形影响显著,尤其对地铁隧道变形控制要求严格的工程^[7-9]。然而,关于双侧基坑开挖对中间地铁隧道的的影响研究仍旧匮乏,尤其是软土等复杂地质,并且研究方向主要还停留在有限元分析阶段。

为此,本文基于软土地区某临近地铁的双侧基坑工程为背景,运用数值手段分析两侧基坑开挖顺序和地下连续墙厚度对基坑自身和既有隧道变形的影响,并结合现场实测数据,探讨基坑不同开挖阶段隧道管片收敛和竖向位移的变形规律,以期对双侧基坑工程提供一点借鉴。

1 工程概况

1.1 工程简介

杭州某拆迁安置房项目总建筑面积为

221 318 m²,总用地面积为 53 221 m²,基坑总面积为 24 278 m²,基坑周长为 1 301 m,基坑深度为 9.7~10.4 m。地铁六号线区间盾构穿过项目深基坑,将其分为南北两个基坑。其中,北侧基坑距既有隧道约为 10 m,南侧基坑距既有隧道约为 10.4 m,图 1 为基坑与盾构隧道的剖面关系。区间内隧道埋深为 10.2~12.2 m,隧道外径为 6.6 m。

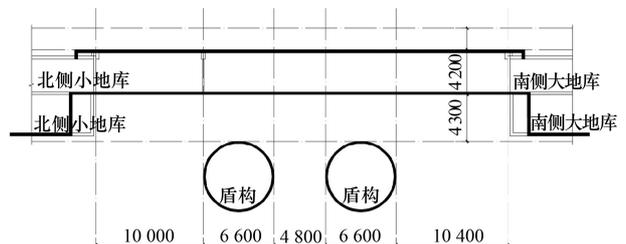


图 1 基坑与盾构隧道的剖面关系 mm

1.2 基坑分区基坑支护体系

由于基坑形状不规则,基坑面积大,且横穿既有地铁隧道,对南北两基坑进行分区。其中北侧基坑分为 N1~N3 三个小区块,南侧基坑分为 S1~S7 七个小块,详细基坑分区如图 2 所示。

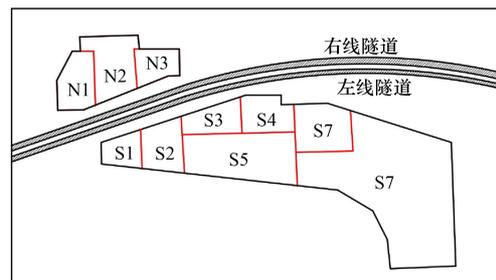


图 2 基坑分区示意

(1) 北侧基坑靠近地铁侧采用地下连续墙外加两道钢筋混凝土内支撑,墙顶设 1 根压顶梁。地下连续墙厚度为 1 000 mm,墙深为 35 m;第一道内支撑截面尺寸为 800 mm×700 mm,第二道内支撑截面尺寸为 1 200 mm×800 mm;压顶梁截面尺寸为 800 mm×800 mm。

(2) 北侧基坑远离地铁侧采用钻孔灌注桩外加两道钢筋混凝土内支撑,桩顶设 1 根压顶梁。围护桩桩径为 900 mm,桩距为 1 100 mm;两道内支撑截面尺寸同上,压顶梁截面尺寸为 1 000 mm×800 mm。

(3) 南侧基坑靠近地铁侧采用地下连续墙外加两道钢筋混凝土内支撑,墙顶设 1 根压顶梁,

墙内外增设三轴水泥搅拌桩加固。地下连续墙厚度为 1 000 mm，墙深为 35 m；两道内支撑截面尺寸同上，压顶梁截面尺寸为 800 mm × 800 mm；三轴水泥搅拌桩桩径为 850 mm，桩距为 600 mm。

(4) 南侧基坑远离地铁侧采用钻孔灌注桩外加 1 道钢筋混凝土内支撑，桩顶设 1 根压顶梁。围护桩桩径为 900 mm，桩距为 1 100 mm，内支撑截面尺寸为 800 mm × 700 mm，压顶梁截面尺寸为 1 000 mm × 800 mm。

(5) 基坑采用三轴水泥土搅拌桩作止水帷幕，桩径为 850 mm，桩距为 600 mm。

2 基坑开挖顺序有限元分析

2.1 模型概况

为消除模型边界效应对计算结果的影响，建立 350 m × 320 m × 50 m (X × Y × Z) 的基坑模型，如图 3 所示。其中，X 为隧道方向，Y 为垂直隧道方向，Z 为竖直隧道方向。采用软件内置的板单元模拟地下连续墙、围护桩、隧道管片、止水帷

幕，用梁单元模拟压顶梁、内支撑，通过自动划分网格功能生成模型网格。模型共 39 573 个节点，124 541 个单元。三维模型表面设为自由边界，底部设为完全固定约束，侧面设法向约束。

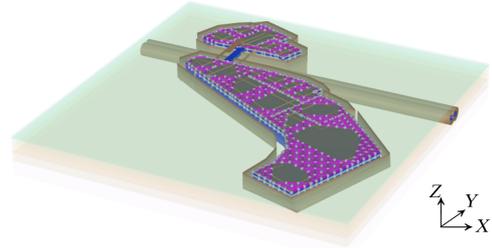


图 3 三维基坑模型

2.2 模型参数设定

已有研究表明^[10]，考虑了土体小应变刚度特性的 HS-small (HSS) 模型适用于软土地区基坑开挖工程。因此，工程土体采用 HSS 本构模型 (共包含 HS 模型的 11 个参数和两个小应变参数)，参数取值参考文献^[11-12]，表 1 为各土层模型参数。

围护桩通过等效刚度原则等效成一定厚度的实体墙，表 2 为基坑和隧道结构的模型参数取值。

表 1 土层 HSS 模型参数

土层名称	容重/ (kN·m ⁻³)	有效黏聚力/ kPa	有效内摩擦角/ (°)	剪胀角/ (°)	三轴切线模量/ MPa	固结切线模量/ MPa	刚度应 力水平 相关幂 指数	卸载 再加 载切 线模 量/ MPa	卸载 再加 载泊 松比	参考 应力/ kPa	正常 固结 条件 下的 侧压 力系 数	破坏比	初始 参考 剪切 模量/ MPa	0.7 倍 初始参 考剪切 模量时 对应的 剪应变/ × 10 ⁻⁴
杂填土	19.6	7.8	12.9	0	3.8	3.8	0.9	11.4	0.2	100	0.64	0.92	33.2	2.5
砂质粉土	19.9	7.9	27.8	0	7.4	7.4	0.9	22.2	0.2	100	0.58	0.88	66.3	2.5
淤泥质 粉质黏土	17.8	6.4	26.7	0	2.4	3.1	0.9	13.0	0.2	100	0.62	0.90	37.1	2.5
粉质黏土	19.8	10.8	27.4	0	5.5	7.1	0.9	29.7	0.2	100	0.56	0.81	87.4	2.5
粉砂	20.8	6.9	31.6	0	20.0	20.0	0.8	60.0	0.2	100	0.52	0.97	150.8	2.5

表 2 基坑和隧道结构的模型参数

结构名称	容重/(kN·m ⁻³)	弹性模量/GPa	等效厚度/m	泊松比	截面面积/m ²
隧道管片	25	30.0	0.30	0.2	—
地下连续墙	25	31.5	1.00	0.2	—
围护桩	25	31.5	0.80	0.2	—
止水帷幕	25	31.5	0.75	0.2	—
内支撑	25	30.0	—	0.2	0.56 或 0.96
压顶梁	25	30.0	—	0.2	0.64 或 0.80

2.3 施工模拟工况

为准确模拟双侧基坑施工对中间既有隧道的影响,采用动态模拟施工过程,共设置 12 个施工步。且基坑开挖遵循分区分块施工原则,将基坑分为 3 次开挖。其中:方案 1 为两侧基坑交叉施工;方案 2 为先开挖小基坑再开挖大基坑;方案 3 为先开挖大基坑再开挖小基坑。表 3 为实际施工工序内容。

2.4 开挖顺序的影响

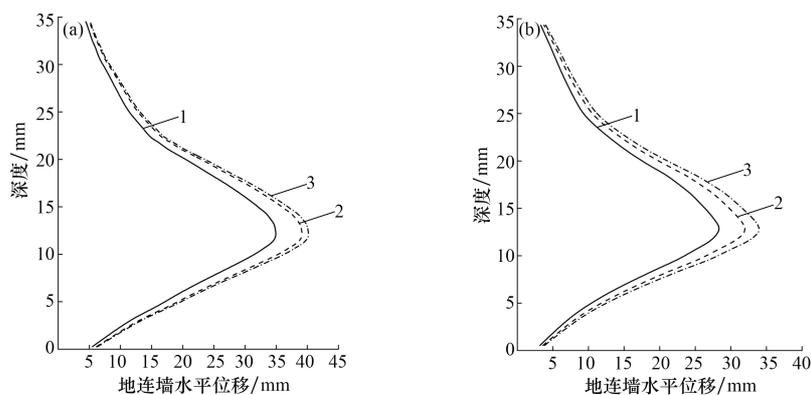
图 4 为不同开挖顺序下两侧基坑 N2、S3 两区块中部位置地下连续墙水平位移曲线(地连墙厚度

为 1 m)。由图 4 可知:地下连续墙水平位移的变化规律基本一致。沿深度方向,地连墙水平位移首先迅速增大,在约 12 m 深处达到峰值,随后逐渐减小并趋于稳定。对于 N2、S3 区块的观测点地连墙水平位移峰值,方案 1 < 方案 2 < 方案 3。可见,两侧基坑交替开挖方案对限制地连墙自身变形效果更好。

图 5 为不同开挖顺序下左线隧道竖向和水平位移收敛曲线。由图 5 可知:不同开挖顺序的隧道竖向和水平位移收敛曲线变化规律基本一致。

表 3 施工工序内容

工况	阶段	方案 1	方案 2	方案 3
1	第一阶段	初始地应力平衡,位移归零。		
2		激活隧道管片,位移归零。		
3		激活地下连续墙结构、内支撑立柱。		
4	第二阶段	S1、S3、N2 开挖至 1.5 m,激活首道内支撑。	N1 ~ N3 开挖至 1.5 m,激活首道内支撑。	S1、S3、S5 开挖至 1.5 m,激活首道内支撑。
5		S1、S3、N2 开挖至 5.5 m,激活第二道内支撑。	N1、N2、N3 开挖至 5.5 m,激活第二道内支撑。	S1、S3、S5 开挖至 5.5 m,激活第二道内支撑。
6		S1、S3、N2 开挖至坑底。	N1、N2、N3 开挖至坑底。	S1、S3、S5 开挖至坑底。
7	第三阶段	N1、N3、S2、S4、S7 开挖至 1.5 m,激活首道内支撑。	S1、S3、S5 开挖至 1.5 m,激活首道内支撑。	S2、S4、S6、S7 开挖至 1.5 m,激活首道内支撑。
8		N1、N3、S2、S4、S7 开挖至 5.5 m,激活第二道内支撑。	S1、S3、S5 开挖至 5.5 m,激活第二道内支撑。	S2、S4、S6、S7 开挖至 5.5 m,激活第二道内支撑。
9		N1、N3、S2、S4、S7 开挖至坑底。	S1、S3、S5 开挖至坑底。	S2、S4、S6、S7 开挖至坑底。
10	第四阶段	S5、S6 开挖至 1.5 m,激活首道内支撑。	S2、S4、S6、S7 开挖至 1.5 m,激活首道内支撑。	N1 ~ N3 开挖至 1.5 m,激活首道内支撑。
11		S5、S6 开挖至 5.5 m,激活第二道内支撑。	S2、S4、S6、S7 开挖至 5.5 m,激活第二道内支撑。	N1 ~ N3 开挖至 5.5 m,激活第二道内支撑。
12		S5、S6 开挖至坑底。	S2、S4、S6、S7 开挖至坑底。	N1 ~ N3 开挖至坑底。



观测点: (a) N2; (b) S3

1—方案 1; 2—方案 2; 3—方案 3。

图 4 地下连续墙水平位移曲线

沿着隧道方向，两者均呈现“先增大后减小”的趋势。隧道竖向和水平位移主要发生在基坑范围内，尤其是双侧基坑部分。

图5(a)隧道水平位移收敛曲线中方案1、2、3的水平收敛最大值分别为4.9、5.8、6.0 mm，其中方案2、3的水平收敛最大值均超过工程规定的预警值。同时，方案2、3的水平收敛最大值比方案1分别高约18.3%、22.5%。可见，对于双侧基坑穿越中间隧道的工程，两侧基坑交替施工的方案优于仅单侧基坑先施工的方案。这是由于两侧基坑交替施工引起的两侧基坑土压力差值远小于单侧基坑引起的土压力差值。此外，方案3水平收敛大于方案2水平收敛，是由于南侧基坑的临空面比北侧基坑开挖，先施工南侧基坑的卸载量更大，引起的土压力差值更大。

图5(b)隧道竖向位移曲线中方案1的竖向位移最大值约为4.7 mm，方案2、3的水平收敛最大值分别为4.9、5.2 mm，较方案1增大了约4.2%和10.6%。同样可以看出，两侧基坑交替施工对既有隧道竖向变形的控制效果更佳，但两侧基坑开挖顺序对中间既有隧道的水平变形影响更为显著。

综上所述，工程采取方案1的开挖顺序最佳。

2.5 地下连续墙厚度的影响

为确定临近地铁侧地下连续墙最优厚度，建立0.6、0.8、1.0、1.2 mm⁴种地连墙厚度工况（开挖顺序为方案1）。表4为不同工况下N2、S3两区块地连墙水平位移峰值和左线隧道竖向和水平变形峰值。由表4可知：当地连墙厚度为0.6 m时，由于支护体系强度不足，基坑发生倒塌，因而无计算结果。随着地连墙厚度的增大，基坑自身和既有隧道变形均显著提升，尤其当地连墙厚

表4 不同地下连续墙厚度的模拟结果

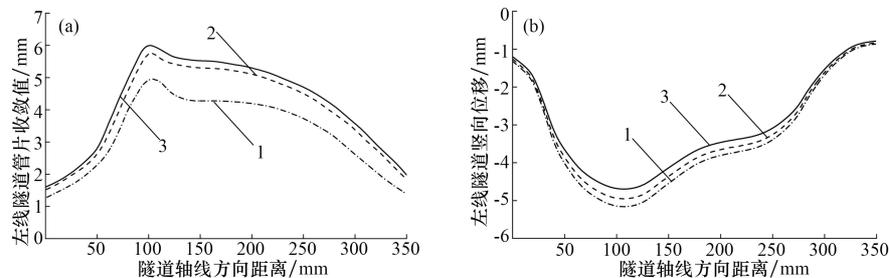
地连墙厚度/m	不同地下连墙水平变形/mm		隧道水平收敛/mm	隧道竖向位移/mm
	N2	S3		
0.6	—	—	—	—
0.8	51.7	42.3	9.7	8.1
1.0	35.1	28.4	4.9	4.7
1.2	31.8	25.8	4.5	4.4

度从0.8 m增加至1.0 m时，基坑和隧道变形减小幅度为32%~49%；但当地连墙厚度超过1.0 m后，增加地连墙厚度对基坑和隧道变形的控制效果有限。综合安全和经济两方面，工程最佳地下连续墙厚度为1.0 m。

3 现场实测分析

为进一步分析双侧基坑开挖对中间隧道的影响，在区间隧道布置一系列的监测点，并与有限元结果对比。图6为不同施工阶段左线隧道管片收敛值和竖向位移曲线。由图6可知：在区间范围为0~150 m时，实测值与模拟值的吻合度较高，实测值和模拟值的误差在可控范围内；在区间范围为150~350 m时，两个指标的实测值均比模拟值大很多。这是因为该区间隧道为弯曲段，但数值模型中将隧道简化为直线，而弯曲段的隧道管片整体刚度小于直线段的隧道管片整体刚度。隧道竖向和水平变形的实测曲线和模拟曲线总体上吻合较好，说明建立的数值模型准确，土层和结构计算参数选取合理。

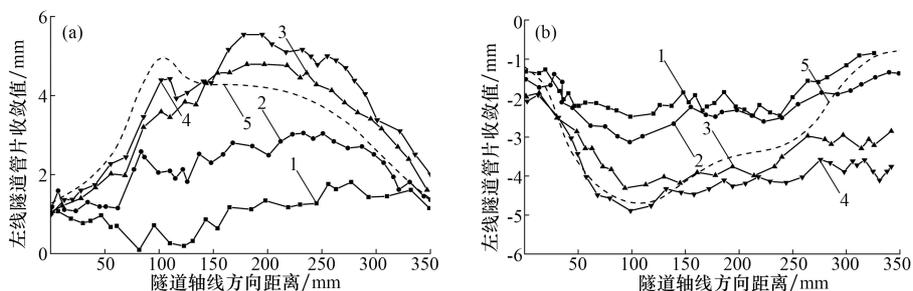
在不同开挖阶段，隧道管片收敛值和竖向位移的实测曲线均呈现“凸”型。当工况6、9施工完成后，隧道管片收敛和竖向位移均显著增大，



(a) 管片收敛值；(b) 竖向位移

1—方案1；2—方案2；3—方案3。

图5 左线隧道变形曲线



(a) 管片收敛值; (b) 竖向位移

1—实测值 (工况 3); 2—实测值 (工况 6); 3—实测值 (工况 9); 4—实测值 (工况 12); 5—模拟值。

图 6 左线隧道变形监测结果

但当工况 12 完成后, 隧道管片收敛和竖向位移的增幅有限。这是因为临近隧道侧基坑施工对隧道变形的影响更大, 而工况 12 为远离隧道侧的基坑施工。当基坑施工完成后, 左线隧道管片收敛的最大值约为 5.5 mm, 左线隧道竖向位移的最大值约为 4.9 mm, 两种均小于设计规定的控制值 (8 mm), 说明工程所设计的基坑支护形式和所采取的开挖方案能有效地控制中间地铁隧道变形, 从而保证地铁的运营安全。

4 结 论

(1) 随着深度的增加, 地下连续墙水平位移先迅速增大, 随后迅速减小并逐渐趋于稳定, 并在深度为 12 m 处达到最大值; 沿着隧道方向, 既有隧道管片收敛值和竖向位移呈“先增大后减小”的趋势, 主要变形发生在双侧基坑部分。

(2) 两侧基坑交替开挖方案 (方案 1) 的地下连续墙变形和隧道变形均明显小于仅单侧基坑先施工的方案 (方案 2、方案 3); 随着地下连续墙厚度的增大, 地下连续墙变形和隧道变形均呈不同程度的减小, 但当地下连续墙厚度超过 1.0 m 后, 这种变形控制作用显著降低。综合安全和经济两方面, 工程最佳地下连续墙厚度为 1.0 m。

(3) 现场实测结果表明, 在双侧基坑施工过程中, 中间隧道水平和竖向变形主要发生在施工的第二、第三阶段, 且基坑开挖卸载对弯曲段隧道的变形影响更为显著。

参考文献:

[1] 张晓功, 郑坚杰, 邵志坤. 地铁施工对市政隧道的影

响分析与保护[J]. 工程建设, 2024, 56(2): 47-53.

[2] 陈锦剑, 王建华, 杜毅, 等. 两侧深基坑开挖影响下浅埋运营隧道的位移特性[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(6): 1163-1167; 1173.

[3] 伍尚勇, 杨小平, 刘庭金. 双侧深基坑施工对紧邻地铁隧道变形影响的分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 3452-3458.

[4] 李安兴, 唐秋元, 李杨秋. 双侧深基坑开挖对紧邻已有建(构)筑物变形影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增刊 2): 629-636.

[5] 吕高乐, 易领兵, 杜明芳, 等. 软土地区双侧深基坑施工对邻近地铁车站及盾构隧道变形影响的分析[J]. 地质力学学报, 2018, 24(5): 682-691.

[6] 彭丽云, 李焱, 刘德欣. 两侧双基坑开挖对密贴既有线路基变形的影响[J]. 建筑结构, 2019, 49(增刊 2): 942-948.

[7] 刘传林. 软土地区双侧深基坑开挖对中间地铁隧道变形影响[J]. 桂林理工大学学报, 2023, 43(4): 631-638.

[8] 马凯伦, 董明礼, 曹义, 等. 两侧双基坑开挖对密贴地铁车站的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(增刊 2): 1043-1048.

[9] 蔡宗洋, 张戈, 潘毫. 软土地区地铁区间两侧深基坑对称开挖影响分析[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(4): 93-98; 106.

[10] 李青, 徐中华, 王卫东, 等. 上海典型黏土小应变剪切模量现场和室内试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3263-3269.

[11] 赵保, 田雷, 赵伟阳, 等. 杭州富水粉砂水泥土 HSS 模型参数实验研究[J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49(1): 53-59.

[12] 金兴平, 孙思, 钱晖, 等. 杭州地区淤泥质土中隧道暗挖变形控制分析[J]. 公路, 2018, 63(4): 269-275.