

DOI: 10.11779/CJGE2022S1019

# 空间效应下长条形基坑分段地下连续墙支护特性研究

饶秋琛, 李琦, 王倩

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311100)

**摘要:** 依托杭州市文一西路隧道基坑工程, 采用有限元分析方法探究了长条形基坑中分段地下连续墙的支护特性及效果, 结果表明: 不同区段地下连续墙水平变形均呈鼓肚型分布规律, 随地下连续墙埋深增大最大水平变形减小; 不同区段地下连续墙附近地表土体沉降规律基本一致, 呈凹型曲线分布, 地下连续墙埋深仅影响沉降数值, 并不影响其分布规律; 在长条形基坑长边设置不同埋深的分段地下连续墙后, 地表沉降及地下连续墙水平变形仍能够满足工程安全要求, 具有一定经济效益。

**关键词:** 长条形基坑; 地下连续墙; 数值模拟; 支护特性

中图分类号: TU473.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S1-0104-05

作者简介: 饶秋琛(1981—), 男, 浙江杭州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事隧道及基坑工程方面的设计与研究工作。  
E-mail: 1053209670@qq.com.

## Supporting characteristics of segmental diaphragm walls in strip foundation pits under spatial effects

RAO Qiu-chen, LI Qi, WANG Qian

(Huadong Engineering Corporation Limited, China Power Engineering Consulting Group Corporation, Hangzhou 311100, China)

**Abstract:** Based on the foundation pit project of West Wenyi Road Tunnel in Hangzhou, the supporting characteristics and effects of segmental diaphragm walls in strip foundation pits are investigated by using the finite element analysis method. The results show that the horizontal deformation of the diaphragm walls in different sections exhibits a drum belly distribution law, and the maximum horizontal deformation decreases with the increase of the buried depth of the diaphragm walls. The settlement law of the surface soil near the diaphragm walls in different sections is basically the same, with a concave curve distribution. The buried depth of the diaphragm walls only affects the settlement value, but does not affect its distribution law. If the segmental diaphragm walls with different depths are set at the long side of the strip foundation pit, the surface settlement and horizontal deformation of the diaphragm walls can still meet the engineering safety requirements and have certain economic benefits.

**Key words:** strip foundation pit; diaphragm wall; numerical simulation; supporting characteristic

## 0 引言

随着城市化建设步伐不断加快, 各类交通、商业设施逐步向地下空间转移, 大量地下空间亟待开发和利用, 这一过程必然伴随着基坑开挖与围护结构的安全问题<sup>[1]</sup>。地下连续墙(简称地连墙)具有刚度大、止水效果好等优点, 被广泛应用于基坑工程中<sup>[2]</sup>。随着绿色可持续发展的理念不断深入社会, 越来越多的工程项目要求在满足安全的前提下具备可持续发展的特点, 因此, 地下连续墙支护结构优化问题成为当下的研究热点。

在地连墙支护性能及结构优化方面, 研究人员开展了大量研究。刘新荣等<sup>[3]</sup>采用数值模拟方法对某暗埋隧道深基坑进行了研究, 认为基坑存在明显的坑角

约束作用, 限制拐角处地连墙侧向位移与支撑轴力。洪哲明等<sup>[4]</sup>提出了渠式切割装配式地下连续墙, 通过现场测试和数值模拟得出, 围护结构最大位移点随开挖深度增大逐渐下移, 围护结构顶端弯矩与顶部连接方式相关, 兼备支护与防渗功能。张德锋等<sup>[5]</sup>对比了预应力地连墙与传统地连墙的差异, 认为墙体施加预应力后可抑制墙体变形和裂纹萌生。蔡子勇等<sup>[6]</sup>采用遗传算法对地连墙厚度、墙体嵌入深度及支撑位置进行优化设计, 并利用现场监测数据对优化后的结构进行了评价。张宇奇等<sup>[7]</sup>提出了适用于狭小场地条件的地下连续墙配筋形式(桩式墙), 并通过数值模拟和监测结果分析了桩式墙的经济性和实用性。杨博等<sup>[8]</sup>研

究了高频振动沉模成孔方式的格栅状地下连续墙工作性能。结果表明，格栅状地下连续墙的墙身混凝土浇筑质量可满足施工强度和抗渗性能，且支护性能与传统支护桩和地连墙相近。Finno 等<sup>[9]</sup>、帅红岩等<sup>[10]</sup>采用有限元方法研究了不同基坑深度、地连墙埋深和墙身刚度条件下土体变形情况。贾曾潘等<sup>[11]</sup>研究了支护结构与主体地下结构相结合时地铁深基坑的变形特性，得出最大地表沉降、地连墙最大水平位移与开挖深度具有线性关系。

隧道基坑为典型的长条形基坑，且存在一定坡率，空间效应显著，一般情况下地下连续墙深度通常为定值。若将其设置成不同嵌固深度的地下连续墙，可达到节约成本的目的，为此本文依托杭州市文一西路隧道基坑工程，采用有限元分析方法探究了长条形基坑中分段地下连续墙的支护特性。

## 1 工程概况

文一西路（东西大道—荆长大道）提升改造工程位于杭州市余杭区，本段道路呈东西走向，本标段西起东西大道西，东至良睦路，全长约 4.50 km，道路红线宽 50 m，隧道最大开挖深度约 17.50 m，其中明挖暗埋段长 2960 m。隧道采用明挖顺作法（局部盖挖）施工，围护结构主要采用地下连续墙、SMW 工法桩、钻孔灌注桩，内支撑采用砼支撑+钢支撑，钻孔灌注柱段围护结构外侧采用三轴搅拌桩止水帷幕。基坑整体开挖宽度 29.5~48.0 m，整体开挖深度 0~16.9 m。

本隧道基坑开挖深度较大，最大开挖深度约17.50 m，基坑安全等级为一级。根据沿线土层的沉积年代、沉积环境、岩性特征及物理力学性质，确定岩土分层和定名。结合项目勘察钻探及室内土工试验成果，按地层时代（即地层上下顺序及其沉积年代）划分了10个工程地质层组，以圆圈内阿拉伯数字表示，分别为：①<sub>1</sub> 杂填土、①<sub>2</sub> 素填土、①<sub>3</sub> 淤泥质填土、②<sub>1</sub> 粉质黏土、②<sub>2</sub> 黏质粉土、③<sub>1</sub> 细砂、③ 淤泥质黏土、④<sub>1</sub> 粉质黏土、④<sub>2</sub> 粉质黏土与粉土互层、④<sub>3</sub> 粉砂、⑤ 淤泥质黏土、⑥<sub>1</sub> 粉质黏土、⑥<sub>2</sub> 粉质黏土、⑥<sub>3</sub> 细砂、⑦<sub>1</sub> 粉质黏土、⑧<sub>1</sub> 细砂、⑧<sub>2</sub> 中砂、⑧<sub>4</sub> 圆砾、⑧<sub>4</sub> 夹层粉质黏土、⑨<sub>1</sub> 粉质黏土、⑩<sub>a-1</sub> 全风化泥质粉砂岩、⑩<sub>a-2</sub> 强风化泥质粉砂岩、⑩<sub>a-3</sub> 中风化泥质粉砂岩、⑩<sub>b-1</sub> 全风化角砾岩、⑩<sub>b-2</sub> 强风化角砾岩、⑩<sub>b-3</sub> 中风化角砾岩。

其中,基坑坑底位于③淤泥质黏土、④<sub>1</sub>粉质黏土、⑤淤泥质黏土、⑥<sub>1</sub>粉质黏土层。开挖范围内穿越的主要地层:①<sub>1</sub>杂填土、②<sub>1</sub>粉质黏土、③淤泥质黏土、④<sub>1</sub>粉质黏土、④<sub>3</sub>粉质黏土夹粉土、⑤淤泥质黏土、⑥<sub>1</sub>粉质黏土。

工程设计采用分段式地下连续墙，地下连续墙采用 C35 混凝土，厚度为 800 mm。由于隧道基坑为长条形状，纵向长度较大，且宽度较大，因此需要根据现场实际工程地质情况合理设置地下连续墙的插入深度，以达到节约材料、经济适用的目的，地下连续墙横剖面图如图 1 所示。

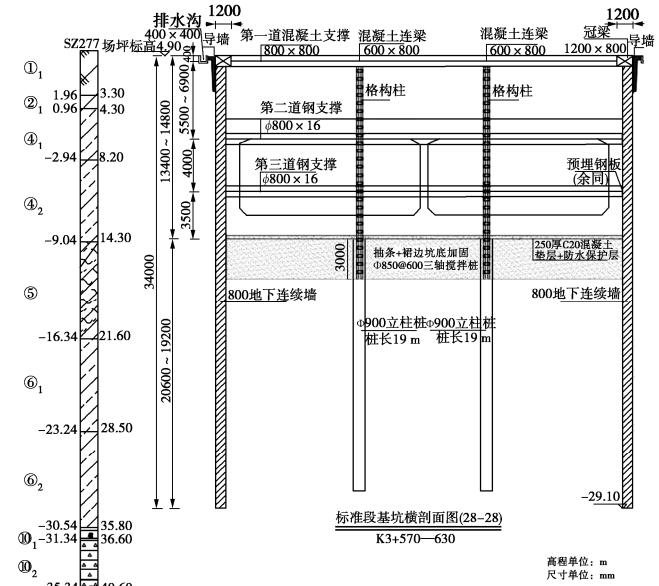


图 1 典型断面支护示意图

Fig. 1 Schematic diagram of support for typical section

2 计算模型介绍

## 2.1 计算参数

本次计算采用 MIDAS-GTS NX 进行模拟分析，结合实际地层情况，基坑穿越土层自上而下主要为杂填土、粉质黏土、淤泥质黏土、粉质黏土夹粉土，故本次计算将地层进行了一定简化，仅考虑了以上 4 层地基土，表 1 为地勘报告提供的土层基本参数。

表 1 土层基本计算参数

Table 1 Basic parameters of soil layers

土层	重度 $\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	黏聚力 $c/kPa$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	压缩模量 $E_{s1-2}/MPa$
1	17.5	10	8	3
2	19.5	40	18	10
3	19.9	8	25	9
4	20.6	2	28	15

在基坑开挖数值计算中,选择合适的土体本构模型及模型参数是关键,根据前人研究成果可知,采用考虑小应变刚度特性的HSS硬化模型(即MIDAS-GTS NX中自带的修正莫尔库伦模型)能够较为合理地反映实际土层应力变形情况。

在 HSS 硬化模型中，除了地勘报告提供的地基土重度、黏聚力、内摩擦角等基本指标外，还存在多个需要进行复杂土工试验的参数，即三轴固结排水试验参考割线模量。鉴于此，本文参考文献[12]中的取值

依据, 确定了土层 1 至土层 4 的 HSS 模型参数, 具体如表 2 所示。

表 2 土层 HSS 模型计算参数

Table 2 Parameters of HSS model of soil layers

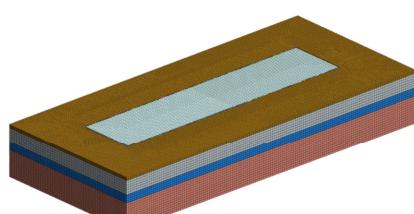
序号	参数	土层 1	土层 2	土层 3	土层 4
1	$E_{50}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	5.1	6.0	2.4	6.5
2	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	5.1	6.0	2.4	6.5
3	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	35.6	43.9	15.2	50.6
4	$G_0^{\text{ref}} / \text{MPa}$	100	100	100	100
5	$\gamma_{0.7} / (10^{-4})$	2.7	2.7	2.7	2.7
6	$p^{\text{ref}} / \text{kPa}$	100	100	100	100
7	$\nu_{\text{ur}}$	0.2	0.2	0.2	0.2
8	$R_f$	0.9	0.9	0.9	0.9
9	$m$	0.7	0.7	0.7	0.7
10	$\psi$	0	0	0	0

表 2 中各序号对应参数的意义依次如下: 1 为三轴固结排水试验参考割线模量, 2 为标准固结试验参考切线模量, 3 为三轴固结排水卸载再加载试验的卸载再加载模量, 4 为动剪切初始模量, 5 为剪切模量衰减到初始剪切模量 70% 时对应的剪切应变, 6 为参考应力, 7 为加卸载泊松比, 8 为破坏比, 9 为模量应力水平相关幂指数, 10 为剪胀角。

基坑支护结构主要涉及地下连续墙、内支撑、冠梁等结构, 均采用线弹性本构模型。其中: 地下连续墙采用 C35 钢筋混凝土, 厚度为 800 mm, 弹性模量取 31.5 GPa, 泊松比取 0.2; 冠梁采用 C35 钢筋混凝土, 尺寸为 1200 mm×800 mm, 弹性模量取 31.5 GPa, 泊松比取 0.2; 第一道内支撑采用 C30 钢筋混凝土材料, 尺寸为 800 mm×800 mm, 弹性模量取 30 GPa, 泊松比取 0.2; 第二、三道内支撑采用钢支撑, 尺寸为  $\Phi 800 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ , 重度为  $23.5 \text{ kN/m}^3$ , 弹性模量取 200 GPa, 泊松比取 0.3。

## 2.2 模型建立

采用三维模型进行基坑开挖模拟, 地连墙和土体均采用实体单元进行模拟, 其它结构材料均采用梁单元进行模拟。由于隧道基坑存在一定坡率, 实际施工过程中地连墙采用分段处理且各段地连墙深度不尽相同, 因此在模型中地连墙-地连墙、地连墙-土体间采用 GOODMAN 薄层单元进行接触处理, 如图 2 所示。结合隧道基坑的自然坡率, 将地下连续墙分段处理, 各段之间的高差为 2 m。



(a) 长条形基坑整体模型示意图

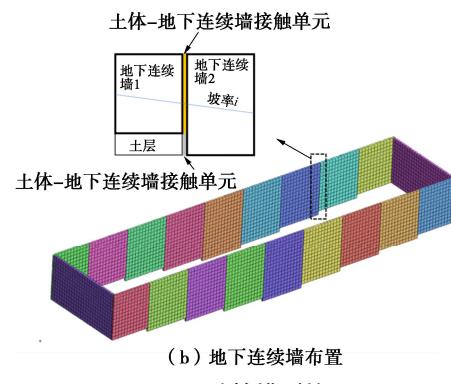


图 2 计算模型简图

Fig. 2 Schematic diagram of computational model

## 2.3 施工步骤

在基坑开挖过程中, 通过激活、钝化命令来实现各土层或结构单元的施工, 具体工序如下: ①场地平整, 地应力平衡, 位移清零; ②施工地下连续墙; ③施工第一道钢筋混凝土支撑, 开挖第一层土体; ④施工第二道钢支撑, 开挖第二层土体; ⑤施工第三道钢支撑, 开挖至基坑底部。

## 3 计算结果分析

### 3.1 地下连续墙水平位移

于各段地下连续墙中部设置一系列监测点, 提取得基坑开挖完成时不同区段地下连续墙的水平位移分布曲线, 如图 3 所示。从图 3 可知, 不同区段的地下连续墙水平位移分布曲线大致呈鼓肚型分布, 符合一般规律。随着地下连续墙埋深增大, 地下连续墙水平位移整体呈逐渐减小趋势, 其中最大水平位移大致出现在坑底上部 1~3 m 位置。

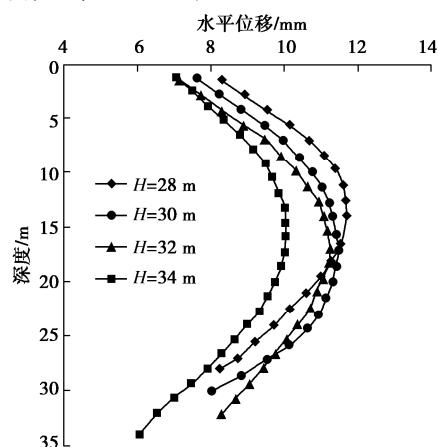


图 3 地下连续墙水平位移

Fig. 3 Horizontal displacements of diaphragm walls

根据基坑工程技术规范要求的最大侧向位移限制, 长条形隧道基坑中采用此类分段地下连续墙能够满足变形要求。

### 3.2 坑外地表沉降

于各段地下连续墙中部邻近地表设置一系列监测

点, 提取得不同区段的地表土体沉降曲线, 如图 4 所示。从图 4 可知, 坑外地表土体沉降呈凹型曲线分布, 随着与基坑边缘距离增加, 地表沉降呈现先增大后减小的趋势, 在距基坑边缘约 13 m 附近达到最大值, 然后急剧减小进而趋于 0。此外, 地下连续墙深度仅影响地表土体沉降分布曲线量级, 并不影响其最大值出现位置。从图 5 可知, 地表最大沉降值随着地下连续墙深度增大而减小, 在  $H=30$  m 和  $H=32$  m 时出现一定突变。从控制地表沉降的角度来讲, 不同区段地下连续墙附近的地表沉降最大值均在 12 mm 以内, 满足本工程的变形控制要求。值得指出的是, 不同区段地下连续墙附近的地表环境(如荷载、地质条件)等较为复杂, 实际工程中应综合考虑, 在保证工程安全前提下合理设置分段地下连续墙结构, 进而有效节约工程成本。

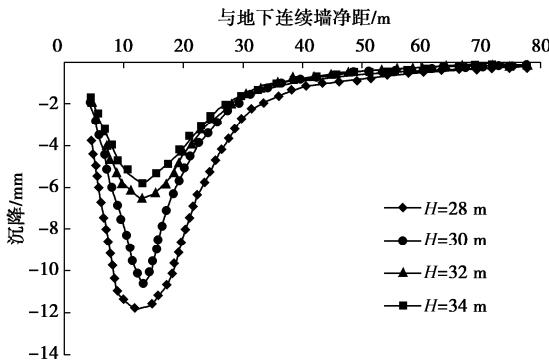


图 4 地表沉降分布曲线

Fig. 4 Distribution curves of surface settlement

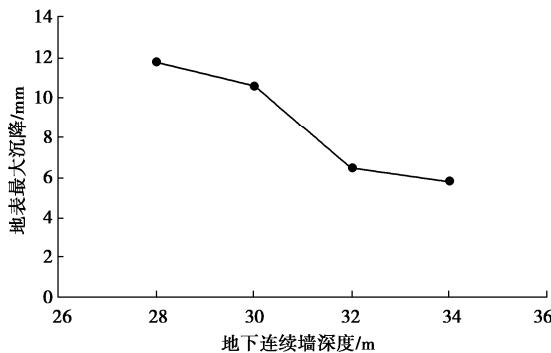


图 5 地表最大沉降与地下连续墙深度的关系曲线

Fig. 5 Relationship between maximum surface settlement and depth of diaphragm walls

### 3.3 潜在破裂面水平位移

将墙后土体中的潜在滑裂面( $45^\circ + \varphi/2$ )延伸线布置一系列监测点, 提取得潜在滑裂面的水平位移数据, 如图 6 所示, 可以看出, 随着与基坑边缘距离增加, 水平位移呈先增大后减小趋势。从图 7 可知, 地下连续墙深度越大, 墙后土体潜在滑裂面土体变形值越小, 两者存在线性相关关系。从数值上来看, 分

段地下连续墙对墙后土体稳定影响并不明显。

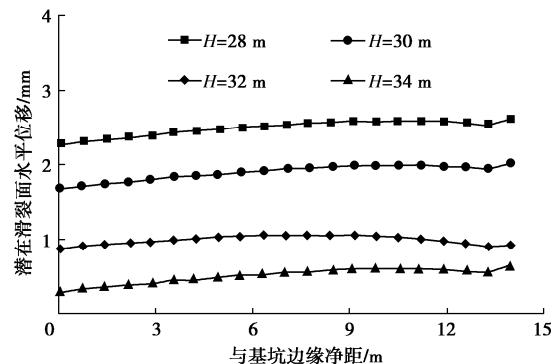


图 6 潜在破裂面水平位移分布曲线

Fig. 6 Horizontal displacement of potential rupture surface

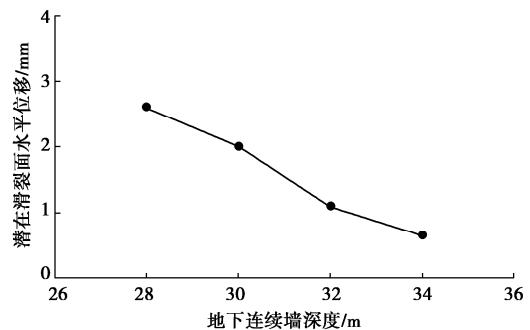


图 7 潜在破裂面水平位移与地下连续墙深度关系曲线

Fig. 7 Relationship between horizontal displacement of potential rupture surface and depth of diaphragm walls

## 4 结 论

(1) 与传统地下连续墙类似, 分段地下连续墙的水平变形趋势基本一致, 主要差异来自于各段地下连续墙的埋深, 本工程中不同埋深条件下的地下连续墙水平位移最大值均能满足规范要求。

(2) 各区段地下连续墙附近地表土体沉降曲线趋势基本一致, 呈凹型曲线分布, 地下连续墙埋深增大并不影响最大沉降出现位置, 仅影响其量级。

(3) 从分布规律来看, 各区段地下连续墙后潜在滑裂面处土体的水平变形随着地下连续墙埋深增大而减小, 但从数值上来看, 采用分段地下连续墙对墙后土体的稳定影响较小。

(4) 分段地下连续墙对长条形基坑的控制效果较好, 可结合实际地形地质条件, 合理设置各区段地下连续墙的尺寸, 进而达到节约成本的目的。

## 参考文献:

- [1] 戴清峰, 谭宇, 黄涛, 等. 中风化岩超深基坑“两墙合一”地下连续墙设计研究与实践[J]. 建筑结构, 2020, 50(20): 133–137, 117. (DAI Qing-feng, TAN Yu, HUANG

- Tao, et al. Design research and practice of “one wall acted as two” for underground diaphragm wall in super-deep foundation pit on moderately weathered rock[J]. Building Structure, 2020, **50**(20): 133 – 137, 117. (in Chinese))
- [2] 楼恺俊, 俞 峰, 夏唐代, 等. 黏土中地下连续墙支护结构的稳定性分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, **54**(9): 1697 – 1705. (LOU Kai-jun, YU Feng, XIA Tang-dai, et al. Stability analysis of diaphragm wall retained structure in clay[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, **54**(9): 1697 – 1705. (in Chinese))
- [3] 刘新荣, 王林枫, 陈 峰, 等. 内撑式地连墙变形特征及其参数优化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, **17**(3): 727 – 738. (LIU Xin-rong, WANG Lin-feng, CHEN Feng, et al. Research on deformation characteristics and parameter optimization of diaphragm wall with interior bracing structure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, **17**(3): 727 – 738. (in Chinese))
- [4] 洪哲明, 俞 峰, 陈 鑫, 等. 渠式切割装配式地下连续墙受力性状研究[J]. 建筑科学, 2021, **37**(7): 44 – 51. (HONG Zhe-ming, YU Feng, CHEN Xin, et al. Bearing behavior of trench-cutting assembled diaphragm wall[J]. Building Science, 2021, **37**(7): 44 – 51. (in Chinese))
- [5] 张德锋, 张竹庭, 李伟强, 等. 上海某办公楼深基坑工程预应力地下连续墙优化设计研究[J]. 建筑结构, 2021, **51**(增刊 1): 2065 – 2069. (ZHANG De-feng, ZHANG Zhu-ting, LI Wei-qiang, et al. Optimal design and research on prestressed diaphragm wall for a deep foundation pit of an office building in Shanghai[J]. Building Structure, 2021, **51**(S1): 2065 – 2069. (in Chinese))
- [6] 蔡子勇, 汤建铭, 唐建桥, 等. 深厚软土基坑地下连续墙支护优化设计及其评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, **18**(9): 2299 – 2306. (CAI Zi-yong, TANG Jian-ming, TANG Jian-qiao, et al. Optimization design and evaluation of diaphragm wall support in deep soft soil foundation pit[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, **18**(9): 2299 – 2306. (in Chinese))
- [7] ZHANG Yu-qi, QIU Yun-jun, GUO Jian-tao, et al. Design and application of pile-style reinforcement for underground diaphragm wall under narrow site condition[J]. Tunnel Construction, 2022, **42**(S1): 389 – 395.
- [8] 杨 博, 孙邦宾, 郭 彤, 等. 格栅状地下连续墙现场试验与基坑支护性能分析[J]. 科学技术与工程, 2015, **15**(14): 205 – 210. (YANG BO, SUN Bang-bin, GUO Tong, et al. Investigation on in-situ experiment and performance of grille diaphragm wall for foundation pit supporting[J]. Science Technology and Engineering, 2015, **15**(14): 205 – 210. (in Chinese))
- [9] FINNO R J, BLACKBURN J T, ROBOSKI J F. Three-dimensional effects for supported excavations in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(1): 30 – 36.
- [10] 帅红岩, 陈少平, 曾 执. 深基坑支护结构变形特征的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(增刊 2): 374 – 380. (SHUAI Hong-yan, CHEN Shao-ping, ZENG Zhi. Numerical simulation of deformation characteristics of supporting structure of deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(S2): 374 – 380. (in Chinese))
- [11] 贾曾潘, 陈保国. “两墙合一”条件下地铁车站深基坑变形特性[J]. 北京交通大学学报, 2021, **45**(3): 47 – 54. (JIA Zeng-pan, CHEN Bao-guo. Deformation characteristics of deep foundation pit of metro station under the condition of “One Wall Acted as Two”[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, **45**(3): 47 – 54. (in Chinese))
- [12] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. 岩土力学, 2021, **42**(3): 833 – 845. (GU Xiao-qiang, WU Rui-tuo, LIANG Fa-yun, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(3): 833 – 845. (in Chinese))

(编校: 明经平)