

## 软土地层地铁车站超深地下连续墙槽壁稳定性分析

叶 如<sup>1</sup> 王 毅<sup>2</sup> 曹 昱<sup>1</sup> 雷 宇<sup>1</sup> 相龙胜<sup>3</sup> 周俊宏<sup>4</sup>(1. 宁波轨道交通集团有限公司建设分公司, 315101, 宁波; 2. 浙江华展研究设计院股份有限公司, 315012, 宁波;  
3. 中交隧道工程局有限公司, 100102, 北京; 4. 宁波市市域铁路投资发展有限公司, 315101, 宁波)

**摘 要** [目的]复杂地质和超深开挖条件下,地下连续墙成槽施工过程中槽壁的稳定性是目前工程界研究的难点和重点。为掌握宁波地铁7号线宁慈路站东侧WE-15幅76 m超深地下连续墙成槽施工时槽壁塌孔原因,需对该工程进行针对性分析并提出解决方案。[方法]利用PLAXIS 3D有限元软件模拟地下连续墙成槽施工过程,研究软土地层中地下连续墙施工过程中的槽壁稳定性特征及其主要影响因素,与现场超声波检测结果相结合验证模型的准确性。[结果及结论]槽壁水平位移的发展主要集中在成槽前期,即开挖至④<sub>2b</sub>粉质黏土层阶段,其原因是宁波地区第④层土层含粉砂性比较重,成槽抓斗反复抓土过程中会扰动泥浆,对槽壁形成卸力和冲击,在泥浆护壁上形成吸附孔隙,外围地下水极易涌入槽内,并带动局部粉砂涌入槽内,容易引发局部塌孔;成槽结束时槽壁水平位移最大值为18.18 mm,位于地面以下25 m处,与实际塌孔位置接近;泥浆重度和加固措施对槽壁稳定性具有显著影响,通过提高泥浆重度和对槽壁进行加固均能有效控制槽壁水平位移。

**关键词** 地铁车站; 地下连续墙; 槽壁塌孔; 槽壁水平位移; 槽壁加固

中图分类号 U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.022

## Analysis of Metro Station Ultra-deep Diaphragm Wall Trench Wall Stability in Soft Soil Stratum

YE Ru<sup>1</sup>, WANG Yi<sup>2</sup>, CAO Yu<sup>1</sup>, LEI Yu<sup>1</sup>, XIANG Longsheng<sup>3</sup>, ZHOU Junhong<sup>4</sup>

(1. Construction Branch of Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315101, Ningbo, China; 2. Zhejiang Huazhan Research and Design Institute Co., Ltd., 315012, Ningbo, China; 3. CCCC Tunnel Engineering Co., Ltd., 100102, Beijing, China; 4. Ningbo Regional Railway Investment and Development Co., Ltd., 315101, Ningbo, China)

**Abstract** [Objective] Under complex geological and ultra-deep excavation conditions, maintaining trench wall stability during diaphragm wall construction remains a critical challenge in engineering research. To identify the causes of trench wall

collapse during the construction of the 76 m ultra-deep diaphragm wall trench section (WE-15) on the east side of Ningci Road Station of Ningbo Metro Line 7, it is necessary to carry out targeted analysis and propose corresponding solutions.

[Method] The PLAXIS 3D finite element software is used to simulate the diaphragm wall trenching process, investigating the stability characteristics of trench walls in soft soil stratum and their key influencing factors. The accuracy of the model is validated by comparing the simulation results with on-site ultrasonic detection data. [Result & Conclusion] The horizontal displacement of the trench wall primarily occurs in the early stage of trenching, specifically when excavating the ④<sub>2b</sub> silty clay layer. The reason is that the fourth soil layer in Ningbo region contains a high silt content, and repeated excavation with a trenching grab disturbs the slurry, leading to uploading and impact effects on the trench wall. This process creates adsorption pores in the slurry wall, allowing groundwater to easily flow into the trench and carry local silt deposits, thereby increasing the risk of localized collapse. At the end of trenching, the maximum horizontal displacement of the trench wall is 18.18 mm, occurring at a depth of 25 m below ground level, closely aligning with the actual collapse location. The stability of the trench wall is significantly influenced by slurry density and reinforcement measures, and both increasing slurry density and reinforcing the trench wall effectively control horizontal displacement.

**Key words** underground station; underground diaphragm wall; trench wall collapse; trench wall horizontal displacement; trench wall reinforcement

## 0 引言

城市轨道交通车站主体结构围护尺寸逐渐增大、加深,华东地区如宁波,土质结构复杂,给地下连续墙成槽施工中槽壁稳定性控制带来很多问题与挑战。

目前,国内外学者针对地下连续墙成槽施工引

起槽壁失稳机制及变形分析进行了一些研究。文献[1]采用有限元软件分别建立二维和三维模型对槽壁破坏模式进行了稳定性研究,得出保证槽壁稳定的安全系数和临界深度。文献[2]考虑土体的分层特征,推导出深厚软弱地层中地下连续墙槽壁的稳定安全系数表达式。文献[3]确定成槽施工的扰动范围,构建槽壁局部失稳计算模型,基于塑性极限破坏理论推导跨软弱夹层槽壁局部稳定安全系数表达式。文献[4]采用极限平衡分析法,得到槽壁整体失稳的最小泥浆重度及安全系数计算方法。文献[5]采用FLAC 3D软件对地下连续墙施工进行模拟,分析苏州地区粉土地层中地连墙施工对土体的扰动及对周边建筑物的影响。文献[6]依托苏州某工程地下连续墙施工,通过对成槽施工进行数值模拟,分析得出高水位区穿越粉砂层槽壁变形特征和影响规律。

综上,现有研究重点关注了地下连续墙成槽施工对土体和周边建筑物的扰动,而对复杂地质条件下超深地下连续墙成槽土体变形特性及其影响因

素的研究较少。

宁波地铁7号线宁慈路站深基坑工程处于复杂地质中,在实际施工中容易出现槽壁塌孔现象。为此,本研究采用数值模拟方法研究地下连续墙成槽施工槽壁变形特征,对比分析地下连续墙槽壁稳定性影响因素,并提出应对措施,以期同类成槽工程进行质量控制和参数优化提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

宁波地铁7号线宁慈路站车站主体规模为 $150.0\text{ m} \times 20.3\text{ m}$ (内净),围护结构采用 $1.0\text{ m}$ 和 $1.2\text{ m}$ 的地下连续墙(含构造段),场地整平地面标高为 $2.70\text{ m}$ ,车站东侧围护结构所在区间的土层主要为黏土层、黏土-粉砂互层以及粉细砂层,如图1所示。区间内的孔隙潜水主要赋存于表部填土和浅部粉质黏土、淤泥质土层中,水位一般在 $0.5 \sim 1.0\text{ m}$ 。其中,车站东侧标准段WE-15幅地下连续墙槽段开挖过程中出现槽壁塌孔现象。

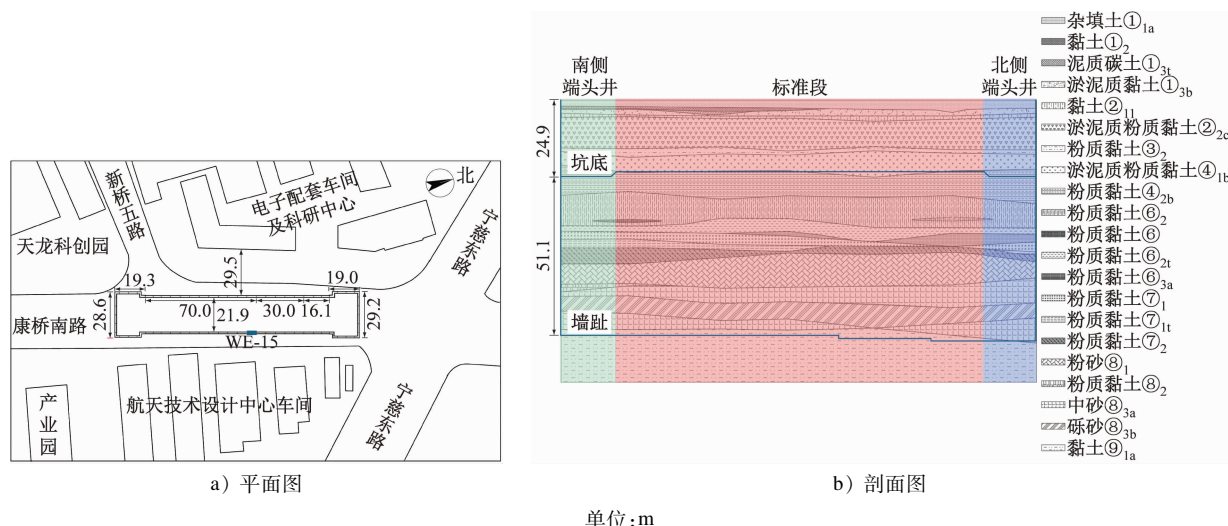


图1 宁慈路站工程信息简图

Fig.1 Diagram of Ningci Road Station engineering information

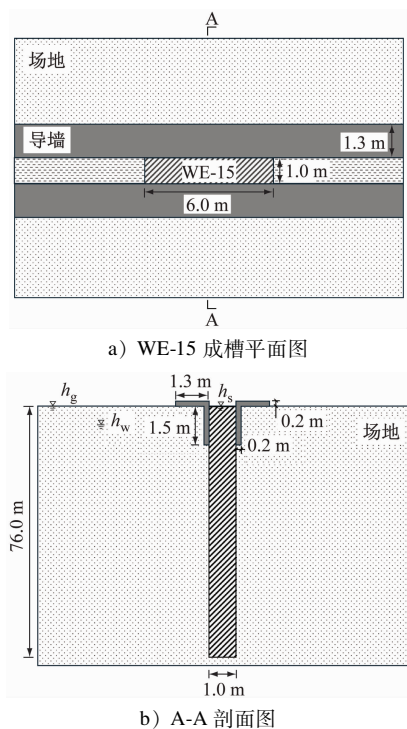
### 1.2 地下连续墙成槽方案

图2为宁慈路站WE-15幅地下连续墙槽段示意图,槽段长 $6\text{ m}$ ,宽 $1\text{ m}$ ,深 $76\text{ m}$ 。两侧设置导墙,导墙翻边长为 $1.3\text{ m}$ ,顶部高出地面 $0.2\text{ m}$ ,深 $1.7\text{ m}$ ,竖直方向厚 $0.2\text{ m}$ 。为保证成槽垂直度,先挖槽段两端的单孔,最后挖中间部分。成槽的超声波检测结果表明成槽过程中出现槽壁塌孔现象。因此,有必要分析槽壁塌孔原因,研究槽壁稳定性影响因素。

## 2 有限元模型建立及验证

### 2.1 模型建立

采用Plaxis 3D软件对地下连续墙成槽施工进行模拟,建立有限元模型如图3所示。为消除边界效应的影响,模型计算域尺寸设定为 $50\text{ m} \times 60\text{ m} \times 150\text{ m}$ ,单元总数为 $86\,451$ 个,节点总数为 $124\,061$ 个。数值模拟对应的施工步骤如图4所示。



注:  $h_g$  为地面标高;  $h_w$  为潜水水位;  $h_s$  为泥浆液面标高。

图2 槽段示意图

Fig. 2 Diagram of trench section

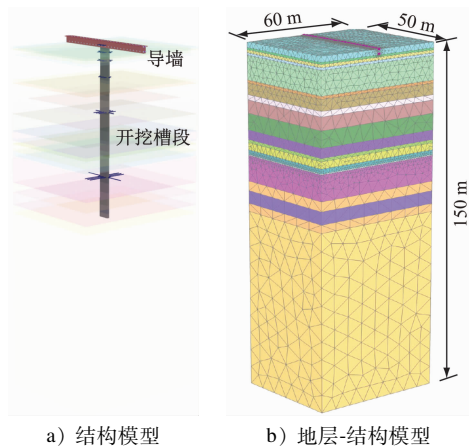


图3 有限元模型图

Fig. 3 Diagram of finite element model

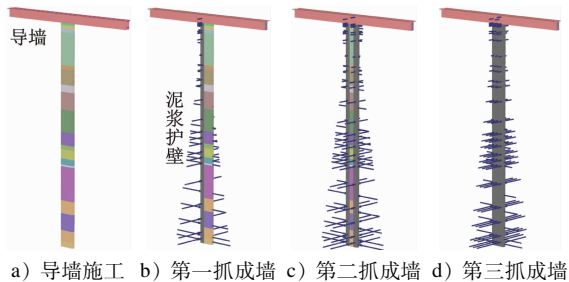


图4 有限元分阶段施工图

Fig. 4 Diagram of finite element phased construction drawings

1) 地应力平衡。在初始状态,将重力施加到土体模型上,还原地层原位初始应力状态。

2) 导墙施工。激活导墙结构单元,采用“生死单元法”冻结导墙中间的土体,激活圆木支撑。

3) 槽段开挖。冻结指定深度范围内的土体单元,激活槽壁及槽底的泥浆支护力。继续向下开挖时,将施加于上一层槽底的压力冻结,并在开挖后的槽壁及槽底继续施加相应的泥浆支护力。

## 2.2 计算参数与步骤

土体本构采用小应变土体硬化本构模型(HSS),物理力学指标见表1。采用面荷载 $\sigma$ 来模拟泥浆的压力,

$$\sigma = \gamma_s h \quad (1)$$

式中:

$\gamma_s$ ——泥浆重度;

$h$ ——成槽深度。

表1 土层物理力学性质指标

Tab. 1 Indicators of physical and mechanical properties of soil layers

地层编号	名称	厚度/ m	天然重度/ ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/( $^\circ$ )	压缩模 量/MPa
① <sub>1a</sub>	杂填土	2.47	20.0	0.0	10.0	2.0
① <sub>2</sub>	黏土	0.90	18.0	18.9	11.0	3.0
① <sub>3b</sub>	淤泥质黏土	1.30	17.1	11.8	7.6	2.1
② <sub>1</sub>	黏土	1.10	18.2	17.5	10.4	3.0
② <sub>2c</sub>	淤泥质粉 质黏土	10.60	17.8	13.0	9.1	2.6
③ <sub>2</sub>	粉质黏土	1.30	18.7	12.3	9.2	3.3
④ <sub>1b</sub>	淤泥质粉 质黏土	5.00	18.2	13.0	9.1	2.8
④ <sub>2b</sub>	粉质黏土	8.10	18.3	16.2	10.4	3.0
⑥ <sub>2</sub>	粉质黏土	7.30	18.6	21.0	13.2	4.0
⑥ <sub>2t</sub>	粉质黏土	4.20	19.1	8.0	22.8	8.0
⑥ <sub>3a</sub>	粉质黏土	1.40	18.9	19.9	11.5	4.0
⑦ <sub>1</sub>	粉质黏土	3.10	19.3	26.5	12.4	6.0
⑦ <sub>1t</sub>	粉质黏土	2.00	19.7	3.0	30.0	10.0
⑦ <sub>2</sub>	粉质黏土	0.30	19.0	25.2	14.1	5.2
⑧ <sub>1</sub>	粉砂	11.30	20.0	3.0	35.0	13.0
⑧ <sub>3a</sub>	中砂	4.30	20.2	0.0	36.0	15.0
⑧ <sub>3b</sub>	砾砂	5.60	20.5	0.0	38.0	18.0
⑧ <sub>3a</sub>	中砂	3.60	20.2	0.0	36.0	15.0
⑨ <sub>1a</sub>	黏土		19.7	32.9	16.0	7.3

为了模拟现场施工情况,该模型以实际施工参数为基准,即: $\gamma_s$ 取 $10.8 \text{ kN}/\text{m}^3$ 、 $h$ 最大值为 $76 \text{ m}$ ;



泥浆液面标高  $h_s$  取 2.7 m, 潜水水位  $h_w$  取 2.2 m。

### 2.3 数值模拟计算结果

第三抓成槽后, 中部槽段槽壁的整体水平位移如图 5 a) 所示, 两侧的土体向槽内移动, 槽壁水平位移最大值为 18.18 mm, 位于地面以下 25 m 左右的④<sub>2b</sub>粉质黏土层, 该土层处的泥浆发生塌孔的概率很大; 图 5 b) 为现场超声波检测结果图, 槽段沿 Y-Y' 方向宽度为 1 000 mm, 沿 h 方向的深度为 76 m, 检测结果中塌孔位置与有限元计算的结果一致。

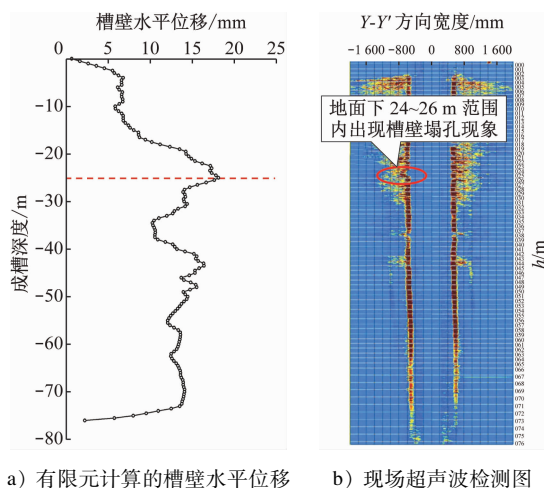


图 5 成槽后槽壁水平位移

Fig. 5 Horizontal displacement of trench wall after trenching

成槽过程中槽壁水平位移的变化速度如图 6 所示。不同开挖深度对应的最大水平位移分别为 2.33 mm、4.31 mm、4.99 mm、8.89 mm、17.8 mm 和 18.18 mm。当开挖深度超过塌孔所在的深度时, 槽壁水平位移最大值的变化受开挖深度变化影响较小, 即槽壁水平位移的发展集中在成槽前期。因此, 在成槽施工前期需要密切关注槽壁稳定性, 以防止出现过大的位移或大面积的塌孔。

## 3 施工参数影响与优化

在基准模型基础上, 分别研究泥浆重度、潜水位和槽壁加固对槽壁水平位移的影响特征。

### 3.1 泥浆重度的影响分析

如图 7 所示, 当  $\gamma_s$  从 10.8 kN/m<sup>3</sup> 增加到 13.0 kN/m<sup>3</sup> 时, 槽壁水平位移最大值降低到 5.96 mm。当  $\gamma_s$  增加到 11.5 kN/m<sup>3</sup> 后, 原工况槽壁塌孔位置处的水平位移显著降低。由此可知, 适当提高  $\gamma_s$  可以有效减小成槽施工过程中的槽壁水平位移, 但当  $\gamma_s$  大于 12.0 kN/m<sup>3</sup> 后, 进一步增加泥浆重度的效

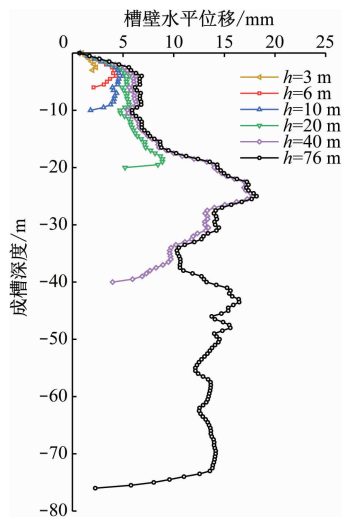


图 6 不同开挖深度下槽壁水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of trench wall at different excavation depths

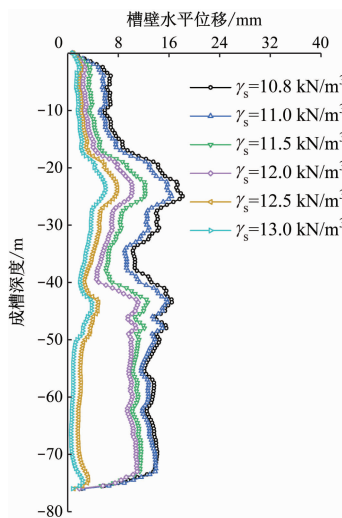


图 7 不同泥浆重度下槽壁水平位移

Fig. 7 Horizontal displacement of trench wall at different slurry densities

果变得不明显。

### 3.2 槽壁加固影响分析

考虑到地面以下 25 m 处存在槽壁塌孔, 采用  $\Phi 850@600$  三轴搅拌桩加固槽壁, 桩长 30 m。如图 8 所示, 槽段上半部分的槽壁水平位移明显降低, 地面以下 25 m 处的位移从未加固的 18.18 mm 降低为 11.90 mm, 加固后的最大位移为 15.19 mm, 在地面以下 45 m 处。可见槽壁加固可以显著降低加固范围内的槽壁水平位移, 降低槽壁塌孔概率。

## 4 结论

1) WE-15 槽段深度达 76 m, 穿透含粉砂性比

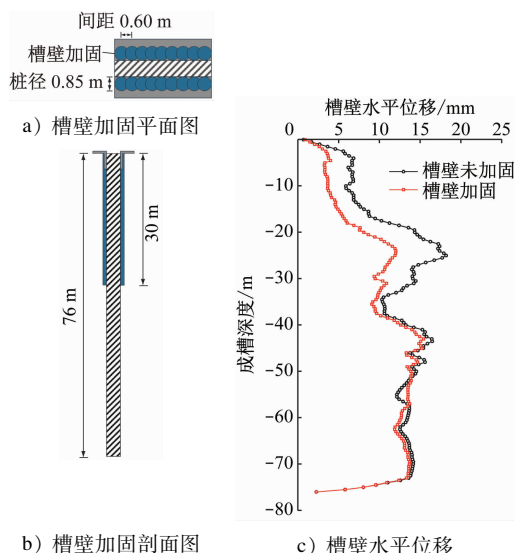


图8 槽壁加固及槽壁水平位移

Fig.8 Horizontal displacement and reinforcement of trench wall

较重的第④层黏土层,成槽抓斗反复抓土过程会扰动泥浆,对槽壁形成卸力和冲击,形成局部塌孔。

2) 槽壁水平位移的发展主要集中在成槽前期,即开挖至④<sub>2b</sub>层。成槽结束时槽壁水平位移最大值为18.18 mm,位于地面以下25 m处。

3) 提高泥浆重度和对槽壁进行加固均能有效地控制槽壁水平位移。

由于槽壁塌孔位置在承压含水层以上,本文所建模型中未考虑承压含水层,在后续的研究中考虑引入承压含水层以优化所建模型。

## 参考文献

- [1] LI A J, MERIFIELD R S, LIN H D, et al. Trench stability under bentonite pressure in purely cohesive clay[J]. International Journal of Geomechanics, 2014, 14(1): 151.
- [2] 王启云, 林华明, 臧万军, 等. 深厚软弱地层地下连续墙槽壁稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(35): 58.
- [3] 安辰亮, 吴文亮, 赵小鹏, 等. 跨软弱夹层地下连续墙槽壁局部稳定性分析[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(3): 7.
- [4] 路乾, 胡长明, 王晓华, 等. 地下连续墙成槽施工槽壁整体稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(3): 864.
- [5] 朱宁, 周洋, 刘维, 等. 苏州粉土地层地连墙施工对地层扰动影响研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊1): 529.
- [6] 严朝锋, 张孟喜, 周忠群. 高水位区地下连续墙穿越粉砂层槽壁稳定性数值分析[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(18): 51.
- [7] YAN Chaofeng, ZHANG Mengxi, ZHOU Zhongqun. Numerical analysis of the stability of diaphragm wall crossing silty sand in high water area[J]. Construction Technology, 2021, 50(18): 51.
- [8] CHRISTIE A B, LEE J, SUTHERLAND I, et al. An XPS study of ion-induced compositional changes with group II and group IV compounds[J]. Applications of Surface Science, 1983, 15(1/2/3/4): 224.
- [9] 李群湛. 城市轨道交通交流牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(2): 199.
- [10] 盛望群. 基于CDEGS的交流电气化铁路对沿线油气管道电

- nal of Geomechanics, 2014, 14(1): 151.
- WANG Qiyun, LIN Huaming, ZANG Wanjun, et al. Stability analysis of trench of diaphragm wall in deep water-soaked soft stratum [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(35): 58.
- AN Chenliang, WU Wenliang, ZHAO Xiaopeng, et al. Local stability analysis of diaphragm wall trench wall crossing weak interlayer[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(3): 7.
- LU Qian, HU Changming, WANG Xiaohua, et al. Analysis on the overall stability of trenching construction of diaphragm wall[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(3): 864.
- ZHU Ning, ZHOU Yang, LIU Wei, et al. Study of silty soil behavior disturbed for installation of diaphragm wall in Suzhou[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S1): 529.
- YAN Chaofeng, ZHANG Mengxi, ZHOU Zhongqun. Numerical analysis of the stability of diaphragm wall crossing silty sand in high water area[J]. Construction Technology, 2021, 50(18): 51.

· 收稿日期:2024-11-21 修回日期:2024-12-25 出版日期:2025-03-10  
Received:2024-11-21 Revised:2024-12-25 Published:2025-03-10  
· 通信作者:叶如,高级工程师,67846783@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第117页)

LI Junhao. Study on the influence of AC power supply system on induced voltage and current of subway tunnel grounding system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.

- [8] CHRISTIE A B, LEE J, SUTHERLAND I, et al. An XPS study of ion-induced compositional changes with group II and group IV compounds[J]. Applications of Surface Science, 1983, 15(1/2/3/4): 224.
- [9] 李群湛. 城市轨道交通交流牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(2): 199.
- LI Qunzhan. Industrial frequency single-phase AC traction power supply system and its key technologies for urban rail transit[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(2): 199.
- [10] 盛望群. 基于CDEGS的交流电气化铁路对沿线油气管道电

磁干扰影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(8): 2101.

SHENG Wangqun. Study on influence of AC electrified railway on electromagnetic interference of oil and gas pipelines along the line based on CDEGS[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(8): 2101.

- 收稿日期:2022-12-05 修回日期:2023-03-21 出版日期:2025-03-10  
Received:2022-12-05 Revised:2023-03-21 Published:2025-03-10  
· 通信作者:龙意仁,高级工程师,1305586220@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license