

# 轨道交通桥梁近距施工墙-井复合结构影响分析\*

陈伟<sup>1</sup> 倪蕾<sup>1</sup> 周吟<sup>2</sup> 邓成龙<sup>2</sup> 狄宏规<sup>3</sup> 曹占林<sup>3</sup> 姚琦钰<sup>4</sup>

(1. 南京上铁地方铁路开发有限公司, 210003, 南京; 2. 中铁二十四局集团有限公司, 200070, 上海;  
3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海; 4. 麦克马斯特大学, L8S4L7, 安大略省)

**摘要** [目的]运营铁路的邻近施工变形控制是当前轨道交通规划与建设的重中之重。因此,有必要研究地连墙-沉井复合结构(以下简称“墙-井复合结构”)参数对沉井内部开挖引起的结构受力变形特征及周边土体位移变化规律。[方法]以南通市沪苏通轨道交通桥梁近距施工墙-井复合结构工程为例,采用有限元软件对墙-井复合结构的内力、变形及周边地面沉降规律进行分析。[结果及结论]①沉井在圆形地连墙保护下的水平变形较小,增加沉井和地连墙的厚度会减小墙-井复合结构自身的最大变形和受力;在夹芯土宽度为3~5 m范围内,夹芯土宽度的增大会导致地连墙受力和变形均有所增大,特别是在夹芯土宽度为5 m处会出现骤增点。②封底混凝土及夹芯土的隆起量受墙-井复合结构的厚度影响较小,但在夹芯土宽度为3~5 m范围内,土体隆起量先增大后减小,转折点在夹芯土宽度为4.5 m处。③沉井和地连墙厚度的增大会使周围地面沉降边界减小,尤其是沉井厚度的减弱效应较为显著;夹芯土宽度对地面沉降的影响较大,夹芯土宽度大于3.5 m时的地面沉降开始显著增大。④合理设计墙-井复合结构可以提高沉井的稳定性,减少沉井施工对周围环境的变形影响。

**关键词** 轨道交通; 墙-井复合结构; 近距施工; 影响分析

**中图分类号** TU753; U443.13<sup>+</sup>1

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2025.05.015

## Impact Analysis of Wall-Caisson Composite Structure Construction Adjacent to Rail Transit Bridge

CHEN Wei<sup>1</sup>, NI Lei<sup>1</sup>, ZHOU Yin<sup>2</sup>, DENG Chenglong<sup>2</sup>, DI Honggui<sup>3</sup>, CAO Zhanlin<sup>3</sup>, YAO Qiyu<sup>4</sup>

(1. Nanjing Shanghai Railway Local Railway Development Co., Ltd., 210003, Nanjing, China; 2. China Railway 24th Bureau Group Co., Ltd., 200070, Shanghai, China; 3. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 4. McMaster University, L8S4L7, Ontario, Canada)

**Abstract** [Objective] The construction deformation control adjacent to operational railways is of utmost importance in cur-

rent rail transit planning and construction. Therefore, it is necessary to study the effect of the diaphragm wall-caisson composite structure (hereinafter referred to as WCCS) parameters on the structural stress deformation characteristics, which are caused by the caisson interior excavation and the change patterns of the surrounding soil displacement. [Method] In the case study of a composite structure construction project adjacent to Shanghai-Suzhou-Nantong Railway Bridge in Nantong City, the finite-element software is used to analyze the internal forces, deformations, and the surrounding ground settlement patterns of the WCCS. [Result & Conclusion] Firstly, the caisson under the protection of a circular diaphragm wall exhibits relatively small horizontal deformation. Increasing the thickness of both the caisson and diaphragm wall will reduce the maximum deformation and stress in the WCCS itself. However, within the 3~5 m width range of sandwiched soil, the widening of sandwiched soil leads to increased stress and deformation in the diaphragm wall, with a sudden spike particularly observed at the 5 m width of sandwiched soil. Secondly, the uplift value of the bottom-sealed concrete and sandwiched soil is less affected by the thickness of the WCCS. However, within the 3~5 m width range of sandwiched soil, the soil uplift value first increases and then decreases, with the turning point occurring at the 4.5 m width of sandwiched soil. Thirdly, increasing the thickness of the caisson and diaphragm wall reduces the boundary of surrounding ground settlement, with particularly significant weakening effect of the caisson thickness. The width of sandwiched soil has a significant impact on ground settlement, which begins to increase markedly when the width exceeds 3.5 m. Lastly, a well-designed WCCS can improve the stability of the caisson and reduce the deformation impact of caisson construction on the surrounding environment.

**Key words** rail transit; wall-caisson composite structure; adjacent construction; impact analysis

随着我国铁路线网的持续加密和融合建设,轨道交通线路运营期间的邻近施工也越来越多<sup>[1]</sup>。TB 10182—2017《公路与市政工程下穿高速铁路技

\* 上海市自然科学基金面上项目(20ZR1459900)

术规程》对运营铁路桥墩和路基变形控制要求极为严格,是当前城市轨道交通近距施工的重点关注对象。地下连续墙和沉井因其结构承载力高、稳定性好等特点,在城市建设中获得了广泛应用<sup>[2]</sup>。

沉井施工会引起周边土体位移,易对周围已有轨道交通结构造成安全隐患。文献[3]建立了三维 PLAXIS 3D 软件数值模型,研究了双 LDDB(大直径深埋)沉箱交替安装引起的地面沉降和径向位移。文献[4]通过 ADINA 3D 软件模型,分析了沉井在下沉与封底过程中,其结构自身的应力分布与变形情况,及其对周边邻近高层建筑与堤岸构筑物的影响。文献[5]利用 FLAC 3D 软件,建立了采用 TRD(混合搅拌壁式地下连续墙)复合支护结构的基坑开挖过程模型,研究了地面沉降与围护结构变形的关系。文献[6]利用 ANSYS 软件,建立了大型沉井初沉阶段的有限元模型,重点研究了大型沉井初沉阶段的受力特性及开裂控制。文献[7]研究了钢套管钻孔灌注桩施工对高铁路基变形的影响。然而,已有研究中均未报道过墙-井复合结构中,沉井内部开挖引起的结构受力特征及周边土体位移变化规律。

地连墙可以减少开挖施工引起的周边土体位移和地下水扰动,对超深沉井的下沉施工安全及轨道交通桥梁的安全运营至关重要。本文以南通市沪苏通轨道交通桥梁近距施工地连墙-沉井复合结构(以下简称“墙-井复合结构”)工程为例,分析不同参数下的结构内力、周围土体变形等变化规律,研究墙-井复合结构的设计合理性。本文研究可为运营铁路的邻近施工变形控制提供经验与借鉴。

## 1 工程概况

李港水厂项目位于沪苏通长江公铁大桥 1<sup>#</sup>墩与 2<sup>#</sup>墩之间,与大桥水平距离分别为 43.00 m、97.04 m。2<sup>#</sup>盾构接收井位于长江大堤外浅滩砂质土地带,含水率极高,因此采用墙-井复合结构形式。地连墙底部采用  $\phi$  2 400 mm MJS(全方位高压喷射)满堂加固 8 m。沉井为圆形钢筋混凝土结构,底部设置井字形底梁。2<sup>#</sup>墙-井复合结构纵断面示意图如图 1 所示。

## 2 有限元建模分析

### 2.1 有限元模型

基于 2<sup>#</sup>墙-井复合结构建立三维有限元模型,研

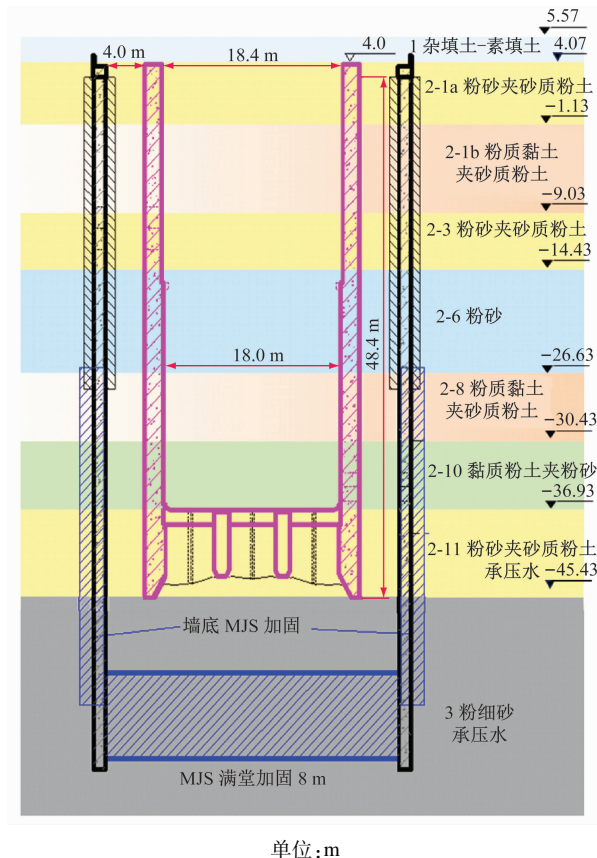


图 1 2<sup>#</sup>墙-井复合结构纵断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vertical section of 2<sup>#</sup> wall-caisson composite structure

究在超深沉井最不利开挖工况下,墙-井复合结构的受力及变形情况,以及周围土体的沉降规律。沉井内径为 18.4 m,厚度为 1.7 m,高为 49.6 m,沉井入土深度为 48.4 m。沉井底部设置井字形底梁,底梁截面厚为 1.5 m,高为 6.0 m。沉井井身混凝土强度为 C35。地连墙内径为 29.8 m,厚为 1.2 m,高为 65.4 m。地连墙结构混凝土强度为 C30。夹芯土厚度为 4 m,沉井所处土层物理力学参数如表 1 所示。

模型中,地连墙和沉井采用板单元,井字梁采用梁单元,土层采用实体单元。2<sup>#</sup>墙-井复合结构网格模型如图 2 所示。模型边界尺寸为 150 m(长)×150 m(宽)×100 m(高),边界条件为边界约束和井字梁节点铰接方式。

模型假定如下:①各地层界线水平,忽略地层互层现象,且考虑各层土质各向同性;②不考虑上层滞水、地面堆载等因素对沉井施工的影响;③土体采用修正摩尔-库伦塑性本构模型,混凝土结构采用弹塑性本构模型;④忽略开挖方式对沉井受力和变形的影响。

表 1 土层物理力学参数  
Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil layer

地层名称	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	渗透系数/(cm/s)		黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
		水平	垂直		
2-1a 粉砂夹砂质粉土	18.4	$5.5 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3}$	4.1	29.5
2-1b 粉质黏土夹砂质粉土	17.8	$7.0 \times 10^{-5}$	$3.5 \times 10^{-5}$	12.3	10.7
2-3 粉砂夹砂质粉土	18.7	$5.5 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3}$	3.4	30.3
2-6 粉砂	18.9	$7.0 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$	2.3	32.0
2-8 粉质黏土夹砂质粉土	17.5	$7.5 \times 10^{-5}$	$4.0 \times 10^{-5}$	13.9	11.2
2-10 黏质粉土夹粉砂	17.5	$4.0 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-4}$	10.9	23.9
2-11 粉砂夹砂质粉土	18.6	$6.0 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-3}$	3.0	31.3
3 粉细砂	19.0	$7.0 \times 10^{-3}$	$6.5 \times 10^{-3}$	1.7	33.7

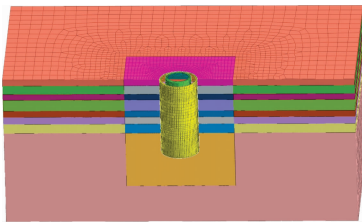


图 2 2#墙-井复合结构网格模型

Fig. 2 Grid model of 2#wall-caisson composite structure

2.2 环形地连墙影响因素分析

基于实际工程地连墙厚度,选取不同地连墙厚度(0.9 m、1.2 m、1.5 m、1.8 m、2.1 m)进行分析。不同地连墙厚度下,沉井与地连墙的受力及变形情况如图 3 所示。不同地连墙厚度下,封底混凝土及夹芯土隆起量如图 4 所示。不同地面沉降量下,地连墙厚度与地面沉降边界的关系如图 5 所示。

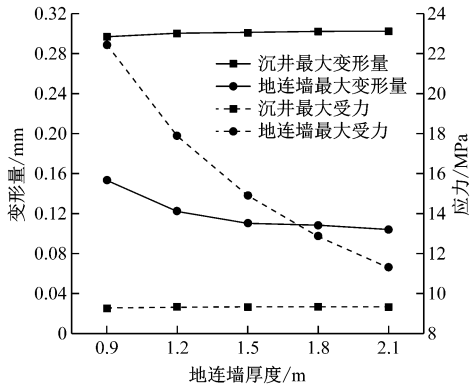


图 3 不同地连墙厚度下沉井与地连墙的受力及变形情况

Fig. 3 Stress and deformation of the caisson and the diaphragm wall under different thicknesses of the diaphragm wall

由图 3 可知:作为沉井辅助施工结构,圆形地连墙直接接触外界土体,在地连墙厚度为 0.9~2.1 m

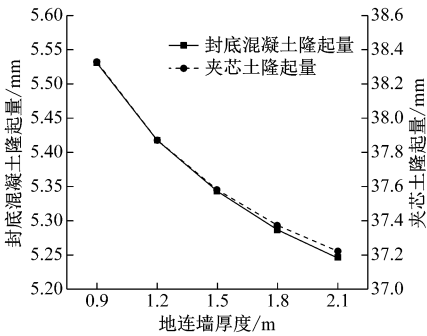


图 4 不同地连墙厚度下封底混凝土及夹芯土隆起量

Fig. 4 Uplift amount of the bottom-sealed concrete and sandwiched soil under different thickness of the diaphragm wall

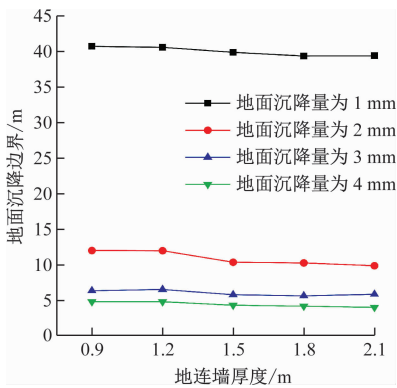


图 5 不同地面沉降量下地连墙厚度与地面沉降边界的关系

Fig. 5 Relationship between the thickness of the diaphragm wall and the boundary of ground settlement under different amounts of ground settlement

范围内,地连墙厚度的增大对沉井最大变形量影响不大,沉井最大变形量在 0.005 mm 内。沉井最大受力虽然逐渐增大,但其值在 0.17 MPa 内浮动。由此可知,地连墙厚度对沉井的受力与变形影响较小。随着地连墙厚度的增大,沉井的最大变形值和

最大应力值基本保持不变,而圆形地连墙的最大受力及变形量呈抛物线趋势下降,且减小趋势变缓。

由图4可知:在地连墙厚度为0.9~2.1 m范围内,封底混凝土和夹芯土的隆起程度逐渐减小,但二者的变化幅度基本一致。由此可知,地连墙厚度对地连墙底部的封底混凝土有一定影响,但其应用时需考虑地连墙增厚的经济效应。封底混凝土效果较好,对沉井底部的夹芯土上浮有抑制作用。

由图5可知:沉井开挖下沉过程中会引起周围地面的不均匀沉降,地连墙限制了大部分土体的位移,较大程度地保护了沉井及周边建筑物的安全。不同地连墙厚度约束下的地面沉降范围略有差异,地连墙越厚,同等沉降量下周围地面沉降的影响范围越小,但变化量不大。综上所述,地连墙厚度对沉井、地连墙变形及受力,夹芯土及封底混凝土隆起量和地面沉降量虽有不同影响,但影响并不显著。因此,实际工程中,地连墙厚度的选取需综合考虑现场情况和经济效应。

### 2.3 沉井厚度因素影响分析

基于实际工程的2<sup>#</sup>沉井厚度,分别建立井厚为1.3 m、1.5 m、1.7 m、1.9 m、2.1 m、2.3 m的有限元模型,其他参数保持不变。不同沉井厚度下,沉井与地连墙的受力及变形情况如图6所示。不同沉井厚度下,封底混凝土及夹芯土隆起量如图7所示。不同地面沉降量下,沉井厚度与地面沉降边界的关系如图8所示。

由图6可知:增大沉井厚度可有效降低其最大变形与受力,但对地连墙的结构安全影响较小。由图7可知:增大沉井厚度对夹芯土及封底混凝土隆起量的影响与圆形地连墙情况基本一致,结构厚度

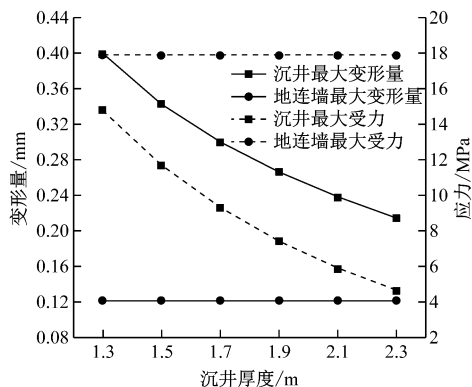


图6 不同沉井厚度下沉井与地连墙的受力及变形情况

Fig. 6 Stress and deformation of the caisson and the diaphragm wall under different thicknesses of the caisson

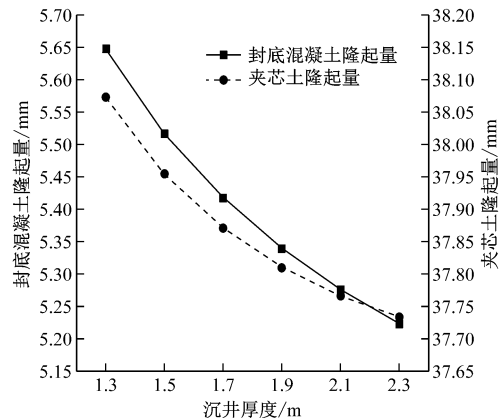


图7 不同沉井厚度下封底混凝土及夹芯土隆起量

Fig. 7 Uplift amount of the bottom-sealed concrete and sand-wiched soil under different thickness of the caisson

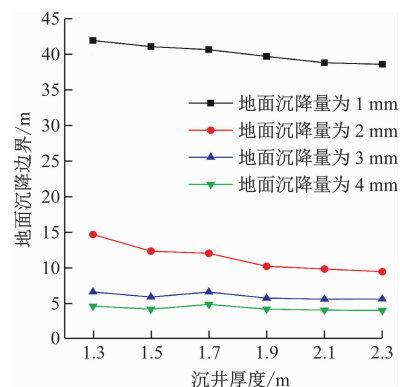


图8 不同地面沉降量下沉井厚度与地面沉降边界的关系

Fig. 8 Relationship between the thickness of the caisson and the boundary of ground settlement under different amounts of ground settlement

增大减小隆起量,但影响效果有限。由图8可知:增大沉井厚度会约束由于内部开挖引起的周围土体沉降范围。当外界存在隔挡结构时,内部开挖造成的影响会大幅降低,因此,适当减小沉井厚度可增加工程经济性。

### 2.4 夹芯土宽度因素影响分析

夹芯土同沉井及地连墙直接接触,是反映结构开挖影响效应的直接部位。在开挖过程中,圆形地连墙和沉井的变形受内外两侧土体相互作用,而夹芯土为有限边界土体,其作用于地连墙和沉井上的应力分布较为特殊。基于实际工程的2<sup>#</sup>墙-井复合结构夹芯土宽度,建立夹芯土宽度为3.0 m、3.5 m、4.0 m、4.5 m、5.0 m的有限元模型,其他参数保持不变。不同夹芯土宽度下,沉井与地连墙的受力及变形情况如图9所示。不同夹芯土宽度下,封底混凝土及夹芯土的隆起量如图10所示。不同地面沉降量下,夹芯土宽度与地面沉降边界的关系如图11所示。

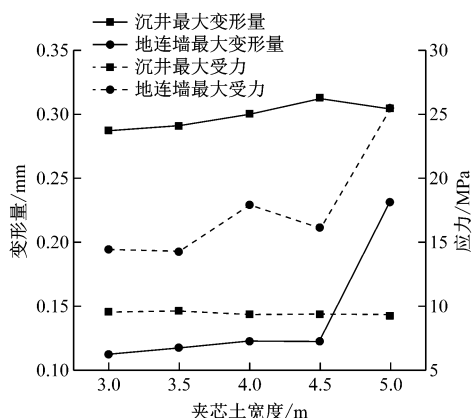


图9 不同夹芯土宽度下沉井与地连墙的受力及变形情况

Fig.9 Stress and deformation of the caisson and the diaphragm wall under different width of the sandwiched soil

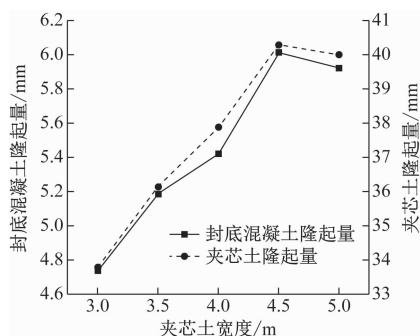


图10 不同夹芯土宽度下封底混凝土及夹芯土隆起量

Fig. 10 Uplift amount of the bottom-sealed concrete and sandwiched soil under different width of the sandwiched soil

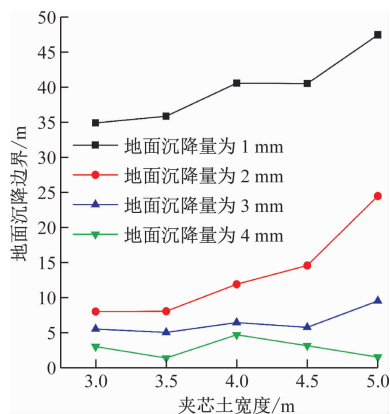


图11 不同地面沉降量下夹芯土宽度与地面沉降边界的关系

Fig. 11 Relationship between the width of the sandwich soil and the boundary of ground settlement under different amounts of ground settlement

地连墙的折减荷载和夹芯土的压力荷载作用在沉井侧壁,夹芯土宽度有所增大,进而使沉井侧壁的荷载逐渐增大,沉井变形也随之变大,但其最大受力却随之减小。究其原因可能是夹芯土厚度的增大,导致底部夹芯土的有限约束效应有所减小,土体由挤密到逐渐松散,夹芯土体的土压力逐渐变小。地连墙最大受力及变形随着夹芯土宽度的增大而增大,尤其是夹芯土宽度为5 m时的地连墙变形量和受力值均突然激增。

由图10可知:不同夹芯土宽度下,夹芯土及封底混凝土的隆起量均为先增大后减小,曲线转折点在夹芯土宽度为4.5 m处,这可能是由于夹芯土宽度变大导致的沉井底部浮力增大导致的。由此可知,夹芯土的上浮效应主要取决于沉井内部取土量,以及夹芯土范围内的土体体积。

由图11可知:夹芯土宽度对墙-井复合结构的影响显著,不同夹芯土宽度条件下,地面沉降范围变化趋势为先缓慢增大后急速增大。由此可知,随着夹芯土宽度的增大,地连墙的隔断效应和土体径向约束效应逐渐变弱,在设计时需合理控制墙-井复合结构尺寸。

### 3 结语

以南通市沪苏通轨道交通桥梁近距施工墙-井复合结构工程为例,采用有限元软件,分析结构设计参数对墙-井复合结构的内力、变形及周边地面沉降的影响。主要获得以下结论:

1) 从结构受力状态分析,沉井在圆形地连墙保护作用下的变形较小,沉井和地连墙厚度的增大仅会减小自身结构的最大变形和受力,对另一方的影响较小,而夹芯土宽度的增大,会导致地连墙的受力和变形均增大,骤增点在夹芯土宽度为4.5 m处。

2) 封底混凝土及夹芯土的隆起量受地连墙及沉井结构的厚度影响较小,夹芯土宽度影响下的隆起量先增大后减小,转折点在夹芯土宽度为4.5 m处。

3) 在地面沉降方面,当沉井和地连墙厚度增大时,周围地面沉降边界均呈现出减小的趋势,其中,沉井厚度的减弱效应大于地连墙厚度的减弱效应。夹芯土对地面沉降的影响较大,夹芯土宽度大于3.5 m后开始出现地面沉降激增现象。

4) 设计施工时,应综合考虑墙-井复合结构的受力状态和经济效应,对于墙-井复合结构的合理设

计可提高结构稳定性,减少对轨道交通桥梁周围环境的变形影响。

## 参考文献

- [1] 李恒一,王志杰,何晟亚,等. 地铁基坑下穿铁路桥的桥墩保护设计方案合理性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(7): 180.  
LI Hengyi, WANG Zhijie, HE Shengya, et al. Rationality study on pier protection and design scheme of metro foundation pit under-crossing railway bridge[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(7): 180.
- [2] 张永涛,杨钊,李德杰,等. 桥梁大型沉井基础建造技术发展展望[J]. 桥梁建设, 2023, 53(2): 17.  
ZHANG Yongtao, YANG Zhao, LI Dejie, et al. Developments and prospects of large bridge open caisson foundation construction technology[J]. Bridge Construction, 2023, 53(2): 17.
- [3] LAI F, ZHANG N, LIU S, et al. Ground movements induced by installation of twin large diameter deeply-buried caissons: 3D numerical modeling[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(9): 2933.
- [4] 邓友生,万昌中,闫卫玲,等. 大型圆形沉井结构应力及其周边沉降计算[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 502.  
DENG Yousheng, WAN Changzhong, YAN Weiling, et al. Stress of large cylindrical caisson structure and its adjacent settlement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 502.
- [5] LIU Y, ZHANG Q, LIU R, et al. Numerical simulation and field monitoring of deformation characteristics of TRD composite supporting structure for deep foundation pit in quaternary stratum: a case study in Qingdao[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(5): 2691.
- [6] 施洲,李佳奇,秦搏聪,等. 大型沉井基础初沉阶段受力特性及开裂控制[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(2): 9.  
SHI Zhou, LI Jiaqi, QIN Bocong, et al. Mechanical characteristics and cracking control of large caisson foundation in initial sinking stage[J]. China Railway Science, 2021, 42(2): 9.
- [7] 陕耀,肖蔚雄,马伟叁,等. 软土地区钢套管钻孔灌注桩施工对临近高速铁路基变形影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(7): 2372.  
SHAN Yao, XIAO Weixiong, MA Weisan, et al. Influence of developed Benoto piling on deformation of adjacent high-speed railway subgrade in soft soil area[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(7): 2372.
- 收稿日期:2024-09-10 修回日期:2024-10-10 出版日期:2025-05-10  
Received:2024-09-10 Revised:2024-10-10 Published:2025-05-10  
• 第一作者:陈伟,工程师,819634337@qq.com  
通信作者:曹占林,博士研究生,2210741@tongji.edu.cn  
• ©《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 86 页)
- [5] 李文辉,刘堂红,周苗苗,等. 变截面隧道与典型缓冲结构气动效应缓解效果对比分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(5): 1572.  
LI Wenhui, LIU Tanghong, ZHOU Miaomiao, et al. Comparative analysis on aerodynamic mitigation effects between tunnels with variable cross-section and typical tunnel hoods[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(5): 1572.
- [6] 尹小春,卢耀辉,赵宏星,等. 隧道工况下高速列车动态气密性数值分析方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2022, 43(5): 52.  
YIN Xiaochun, LU Yaohui, ZHAO Hongxing, et al. Numerical analysis method for dynamic air tightness value of high-speed train [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2022, 43(5): 52.
- [7] 熊小慧,耿语堂,董天韵,等. 隧道内高速列车与轨道附加板气动交互特性研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(5): 1930.  
XIONG Xiaohui, GENG Yutang, DONG Tianyun, et al. Study on aerodynamic interaction between high-speed train and track accessional panels in tunnel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(5): 1930.
- [8] 马冰冰,王宗昌,周新喜,等. 动车组通过隧道车内外瞬变压力实车试验[J]. 中国高新技术, 2022(6): 86.  
MA Bingbing, WANG Zongchang, ZHOU Xinxi, et al. Real train test on transit pressure internal and external vehicle when high-speed train travels through tunnels[J]. China High-Tech, 2022(6): 86.
- [9] PARK J. Investigation of low damped carbody oscillation for Korean high-speed EMU experimental train[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2022, 236(1): 109.
- 收稿日期:2023-03-04 修回日期:2023-04-25 出版日期:2025-05-10  
Received:2023-03-04 Revised:2023-04-25 Published:2025-05-10  
• 通信作者:张宝珍,高级工程师,zbz19880113@163.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