

地连墙围护作用下大直径沉井施工对邻近轨道交通桥梁变形影响分析*

陈伟¹ 倪蕾¹ 曹占林²

(1. 南京上铁地方铁路开发有限公司, 210003, 南京; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海)

摘要 [目的] 大直径沉井施工易引发周边土体位移, 进而可能影响其邻近运营轨道交通桥梁的稳定性和安全性。因此, 有必要研究地连墙围护作用下大直径沉井施工引起的周边土体位移对邻近运营轨道交通桥梁变形的影响。[方法] 以南通市 2[#] 墙-井复合结构及沪苏通长江铁路大桥为研究对象, 对沉井下沉过程进行现场监测, 总结并分析沉井周边土体位移变化情况及其变化对其邻近运营轨道交通桥梁变形的影响规律。[结果及结论] 沉井下沉过程中易出现姿态倾斜现象, 特别是在首次下沉阶段和更换取土下沉方法阶段, 所导致的姿态倾斜表现较为明显; 沉井开挖下沉过程会引起周围土体大范围变形, 但在地连墙围护结构的限制约束下, 其周围土体径向变形量显著低于当前沉井工程中周围环境扰动的控制量 $0.3\% H$ (H 为下沉深度); 在地连墙围护结构的隔离和支护作用下, 可将沉井施工中轨道交通桥梁桥墩的水平位移及沉降分别控制在 2.0 mm 和 0.2 mm 以内。沉井采用地连墙围护结构, 能够保护其邻近运营轨道交通桥梁的安全。

关键词 轨道交通; 沉井; 地连墙; 变形分析

中图分类号 443.13⁺¹

DOI: 10.16037/j.1007-869x.20253063

Impact Analysis of Large-diameter Caisson Construction on Adjacent Rail Transit Bridge Deformation under Diaphragm Wall Retaining Effect

CHEN Wei¹, NI Lei¹, CAO Zhanlin²

(1. Nanjing Shanghai Railway Local Railway Development Co., Ltd., 210003, Nanjing, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Large-diameter caisson construction tends to induce displacement in surrounding soil, which may affect the stability and safety of nearby operational railway bridges. Therefore, it is necessary to study the impact of surrounding soil displacement caused by large-diameter caisson

construction under the confinement of diaphragm walls on adjacent operational rail transit bridge deformation. [Method] Taking the No. 2 wall-caisson composite structure in Nantong City and the Shanghai-Suzhou-Nantong Yangtze River Bridge as research objects, field monitoring was conducted on the caisson sinking process. The variation in caisson surrounding soil displacement and its influence law on adjacent operational rail transit bridge deformation are summarized and analyzed. [Result & Conclusion] During the caisson sinking process, attitude inclination is prone to occur, especially in the initial sinking phase and the replacing soil excavation sinking method phase, where the inclination is particularly pronounced. The excavation and sinking of caisson may cause large-scale surrounding soil deformation. However, under the confinement of diaphragm wall retaining structure, the radial deformation of surrounding soil is significantly lower than the current $0.3\% H$ (H as sinking depth) control limit for environmental disturbance in caisson projects. With the isolation and support provided by diaphragm wall retaining structure, the horizontal displacement and settlement of rail transit bridge piers during caisson construction can be controlled within 2.0 mm and 0.2 mm , respectively. The use of diaphragm wall retaining structure in caisson construction ensures the safety of adjacent operational rail transit bridges.

Key words rail transit; caisson; diaphragm wall; deformation analysis

随着我国经济发展, 与运营铁路邻近的基建工程施工愈发频繁^[1-3]。由于 TB 10671—2019《高速铁路安全防护设计规范》对运营铁路桥墩和路基变形控制要求极为严格, 我国沿海软土地区工程施工对运营铁路桥梁的施工影响正成为制约轨道交通规划与建设的重要因素。

沉井下沉过程往往伴随周边土体的竖向及水平位移, 周边环境效应决定沉井能否顺利施工与安

* 上海市自然科学基金面上项目 (20ZR1459900)

全运营。为揭示大型深埋式沉井基础贯入过程与周边土体的变形变位规律,文献[4-7]对上海软土地区盾构接收井施工引起的周边地面变形进行了现场测量,并建立了动态力学模型验证了模型的合理性。文献[8]对某锚碇沉井基础首次降排水引起的附近大堤沉降进行了监测,认为其竖向变形主要是由于承压含水层压缩而导致的,不同下沉阶段宜采用不同开挖方法。文献[9]开展了滨海软土深埋沉井基础的室内模型试验,研究了沉井基础在水平静荷载下对周边土体变形影响。文献[10]介绍了一种基于 CEL 方法的动态连续数值技术,真实地反映了内部土体开挖与沉井贯入之间的耦合过程,但非常耗时。文献[11]利用 Abaqus 软件研究了大型深埋式沉井基础在双水平顶推力作用下的墙背土体变形及相应的机理,得出在沉井埋深范围内与沉井埋深相等的水平范围内墙后反力分布形式对土体变形有显著影响。

在施工场地受限、周边建筑物密集的环境中,对沉井施工过程中的地层变形的有效控制至关重要。然而,通常仅能将传统沉井开挖引起的周围环境扰动控制在 0.3% 以内,这一变形量仍对邻近建筑物的安全构成潜在威胁。此外,圆形地下连续墙为围护结构^[12],该结构不仅能够在基坑开挖阶段发挥止水 and 挡土功能,还可在后续顶管施工中作为工作井的外墙,实现多功能一体化设计。然而,现有文献中尚未有墙-井复合结构在下沉施工中对运营轨道交通桥梁及周围地层变形影响的研究。

基于此,本文以临江涉铁沉井工程为例,开展富水砂层沉井施工地层变形和桥墩位移监测,分析沉井下沉过程中周围地层的变形特性,以及墙-井复合结构施工对轨道交通桥梁、墩柱的变形影响规律。为后续类似邻近运营轨道交通桥梁的沉井工程施工提供经验与借鉴。

1 工程案例

1.1 设计概况

南通市 2[#]墙-井复合结构位于沪苏通长江公铁大桥 1[#]桥墩和 2[#]桥墩之间,距大桥水平距离为 97.04 m。2[#]顶管井兼做工作井和接收井,采用外侧环形地连墙+沉井结构,地连墙为临时结构,沉井为永久结构。地连墙内径为 29.8 m,厚度为 1.2 m,墙高为 64.4 m;沉井上口内径为 18.4 m,厚度为

1.7 m,于 -16.3 m 处加厚至 1.9 m,设计制作高度为 49.6 m,下沉深度为 48.4 m。沉井底部设置井字形底梁,底梁截面厚度为 1.5 m,高度为 6.0 m。地连墙采用三轴搅拌桩进行槽壁加固,分幅连接处采用 MJS 止水。地连墙底部采用 MJS 进行满堂加固,加固深度为 8 m。墙-井复合结构如图 1 所示。

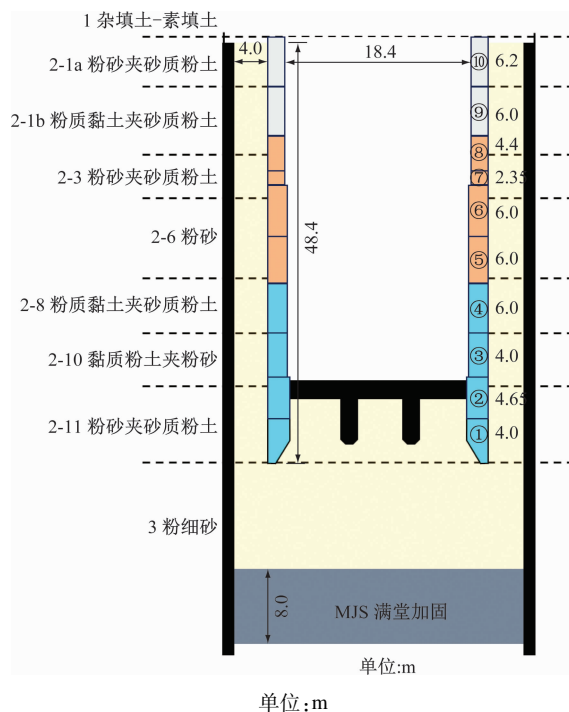


图 1 墙-井复合结构示意图

Fig. 1 Diagram of wall-caisson composite structure

场地以弱透水~中等透水的砂质粉土、粉质黏土及粉砂为主。基坑开挖位于地下水位以下时,浅部土层中的孔隙潜水易引起流砂、管涌等现象,进而会引起基坑失稳及影响钻孔桩的孔壁稳定。土层物理力学指标如表 1 所示。

1.2 下沉过程

为有效降低沉井施工过程中的倾斜和沉降风险,本研究提出采用地下连续墙这种新型围护结构,结合组合施工技术可显著提升沉井的适应性和变形控制性能。具体而言,在沉井制作前,首先进行地下连续墙的成槽施工。尽管地下连续墙的引入在一定程度上延长了施工周期,但其对沉井周围变形的隔绝效果显著,为邻近建筑物和地层提供了优异的保护作用。

在 2[#]墙-井复合结构中沉井,采取 10 次制作、3 次下沉方案。在前 24.0 m,采用排水法下沉施工

表 1 土层物理力学指标

Tab. 1 Physical and mechanical indexes of soil layer

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

工艺;在后 24.8 m,采用不排水法下沉施工工艺。下沉期间,采用辅助下沉组合施工方法,即刃脚高压射水技术、触变泥浆减阻技术、沉井下沉辅助系统,有效保证了沉井结构的顺利下沉。沉井下沉时形成了类似锅底状的开挖面(见图 2)。沉井下沉施工中要严格控制开挖深度,不得超挖。

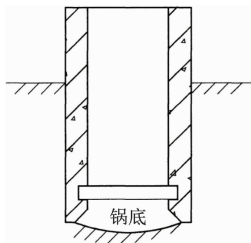


图 2 沉井开挖锅底示意图

Fig. 2 Bowl-shaped excavation of the caisson

2 现场监测

沉井施工过程中常面临倾斜、偏位、突沉及下沉困难等技术难点,其中初沉阶段是最不利且风险最高的施工环节,因此对该阶段的监测与控制至关重要。尽管环形地下连续墙作为围护结构在理论上具有显著优势,但其在复杂地质环境中的实际表现仍缺乏系统性数据支撑。为此,本研究通过现场监测进一步验证其变形控制效果,并评估墙-井复合结构施工对运营轨道交通桥梁的变形影响。监测点位的布设遵循 TB 10314—2021《邻近铁路营业线施工安全监测技术规程》,点位布设如图 3 所示。桥墩位移自动化监测点布设在②号桥墩上,测点包括 3 个墩顶测点(QD1、QD2、QD5)和 2 个墩身测点(QD3、QD4)。地连墙与桥墩之间布设 3 个深层土体位移监测点(SC1、SC2、SC3)。其中,铁路桥墩沉降、水平位移监测报警值为:水平位移累计值绝对

值 $\geq 2.4 \text{ mm}$,沉降累计值 $\geq 2.4 \text{ mm}$ 。

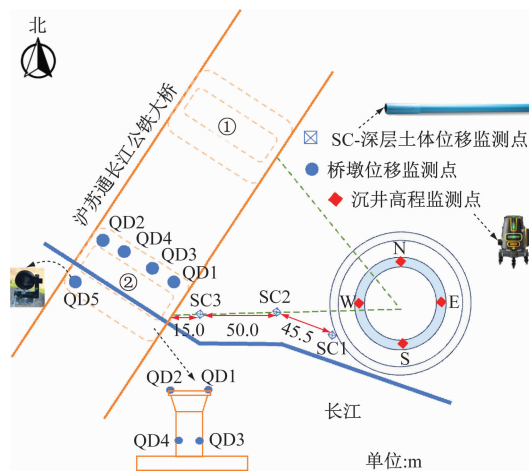


图 3 现场监测点位布设

Fig. 3 Layout of on-site monitoring points

桥墩沉降、水平位移采用独立高程及平面坐标系。沉降,“-”表示沉降,“+”表示上升。位移,“-”表示向北、西位移,“+”表示向南、东位移。SC1 点位深度为 48 m,每 6 m 设 1 个测点;SC2 点位深度为 24 m,每 3 m 设 1 个测点;SC3 点位深度为 18 m,每 3 m 设 1 个测点。径向位移以朝向沉井中心移动为正,以偏离沉井中心为负。沉井高程监测点在东南西北 4 个方位上各设 1 个,以冠梁上布置的基准点为基点,用激光水平仪投射到沉井对应位置的刻度线上,实时读取沉井该点位的下沉数据。对沉井下沉高程,每 3 h 测量 1 次,用以分析沉井的下沉姿态与下沉速度,用于指导后续施工。

3 结果分析

3.1 沉井下沉高度

沉井下沉施工中,下沉深度随时间变化情况如

图4所示。沉井在下沉期间,发生了4次小范围的姿态倾斜,但均满足GB/T 51130—2016《沉井与气压沉箱施工规范》要求(沉井四角高差允许值 $<1.5\%L_1-2.0\%L_1$,且 ≤ 500 mm, L_1 为沉井直径)。沉井在第一次下沉阶段的姿态波动较大,出现了2次小范围的姿态倾斜。在第一次下沉阶段,沉井入土深度较浅,且挖掘机出土效率满足不了沉井平衡的取土状态,易产生姿态倾斜的情况,是沉井施工控制的关键时期。第3次小范围姿态倾斜发生在排水下沉与不排水下沉的交替阶段。由于本工程初次采用不排水下沉施工方式,锅底取土不均匀,导致沉井姿态出现局部倾斜。通过后续实施的姿态调整措施,沉井逐渐恢复了正常姿态。第4次小范围姿态倾斜出现在S-3阶段初期,此时沉井已完成第三次拼装接高。由于长细比过大且逐渐嵌入承压水层,沉井姿态再次发生倾斜偏位。通过调换取土仓、侧壁泥浆减阻、刃脚高压射水以及下压辅助系统等一系列纠偏措施,沉井下沉的稳定性得到了有效控制。

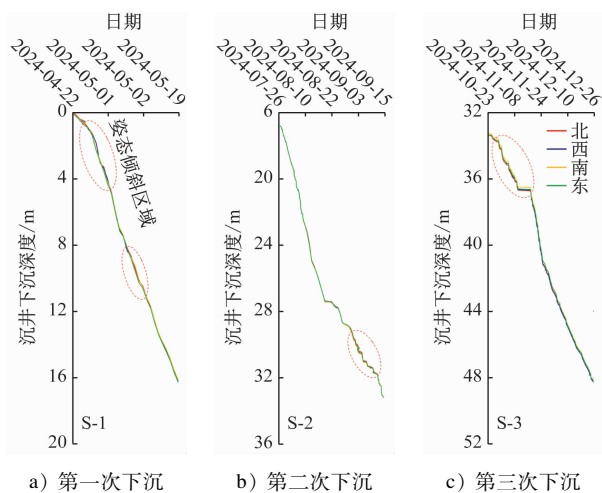


图4 沉井下沉深度

Fig. 4 Three sinking depths of the caisson

3.2 深层土体位移

在富水砂层地层中,砂土易发生液化现象,尤其是大直径沉井的下沉施工扰动。因此通过准确监测测斜管与地层协同变形来表征沉井施工引起的位移。提取2024年4月22日—12月26日中SC1、SC2、SC3测点的测斜孔实测数据,其径向水平位移如图5和图6所示。

由图5可知:距离地连墙仅有0.5 m的SC1测点的径向位移在S-1、S-2、S-3沉井下沉阶段是波动

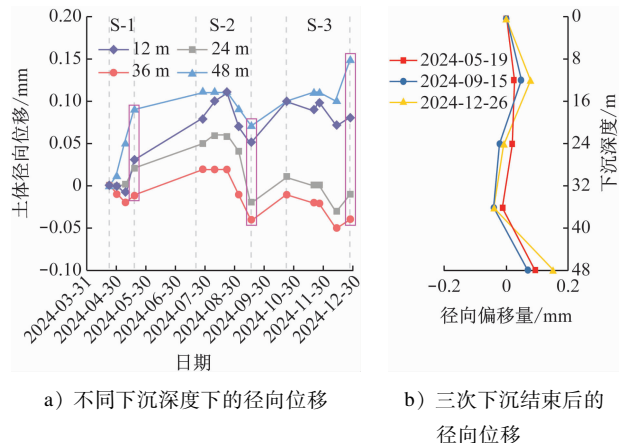


图5 SC1测点土体径向位移

Fig. 5 Radial soil displacement at monitoring point SC1

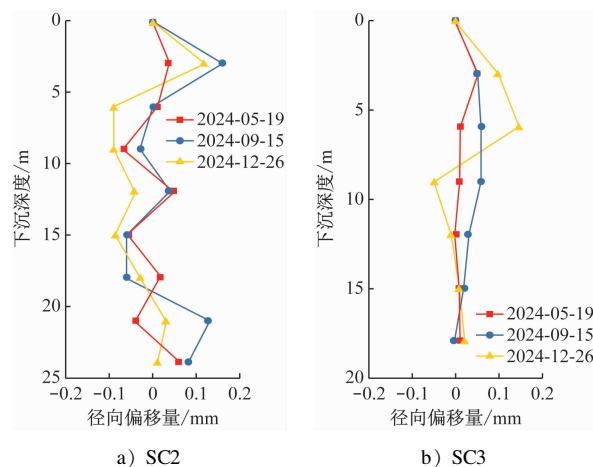


图6 不同下沉阶段的土体径向位移

Fig. 6 Radial soil displacement at different sinking stages

的,浅层和深层土体向沉井重心移动,中间部位的土体向偏离沉井方向移动,运动趋势呈现鼓肚形,图6也有类似的运动趋势。同时SC1、SC2、SC3的径向位移浮动范围均在 $-0.10 \sim 0.15$ mm,地连墙约束下的周围土体变形完全优于目前沉井开挖引起的周围环境扰动控制量 $0.3\% H$ (H 为下沉深度),这对周边建筑起到了安全防护的作用。

3.3 桥墩位移

沉井施工全过程中,QD1、QD2、QD3、QD4和QD5这5个桥墩测点在X、Y、Z 3个方向上的位移演变规律如图7所示。在温度、湿度和风力等环境因素影响下,桥墩在X方向上的位移变化范围为 $-1.0 \sim 2.0$ mm,在Y方向上的位移变化范围为 $-1.5 \sim 2.0$ mm,在Z方向上的沉降变化范围在 $-0.2 \sim 0.1$ mm。沉井施工引起的水平位移和沉降量变化量均较低,尚未达到监测预警要求。因此,

邻近运营轨道交通桥梁的大直径沉井施工中,地连墙围护结构的创新应用,能够在桥墩水平变形和沉降约束中起到重要作用。

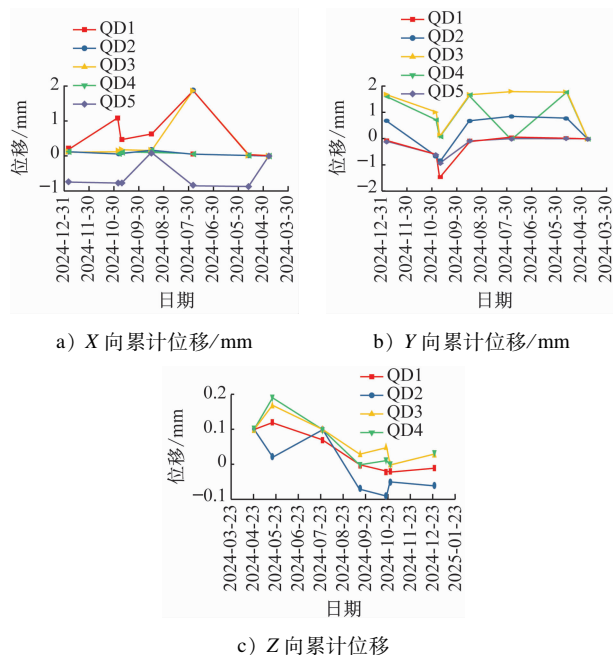


图7 桥墩累计位移

Fig. 7 Cumulative pier displacement

4 结论

1) 沉井下沉阶段易出现姿态倾斜现象,其中首次下沉阶段和更换取土下沉方法导致的姿态倾斜较为明显,采用辅助纠偏措施有助于沉井姿态的纠偏复位。

2) 在地连墙约束下,沉井周围土体径向变形量显著低于目前沉井工程中的周围环境扰动控制量 $0.3\% H$,这对周边建筑起到了安全防护作用。

3) 在地连墙围护结构的限制作用下,沉井开挖下沉过程中桥墩的X、Y方向上的水平位移分别控制在 $-1.0 \sim 2.0 \text{ mm}$ 和 $-1.5 \sim 2.0 \text{ mm}$ 内,Z方向上的沉降量控制在 $-0.2 \sim 0.1 \text{ mm}$ 内,较大程度上保护了轨道交通桥梁的安全。

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] 朱兆斌. 软土地区轨道交通桥梁下方灌注桩小净距施工影响[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(7): 152.
- ZHU Zhaobin. Impact of small clearance bored pile construction under rail transit bridges in soft soil area[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(7): 152.
- [3] 王纲. 市域铁路大直径盾构并行施工对邻近高铁路基变形影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(2): 153.
- WANG Gang. Influence analysis of city railway large-diameter shield parallel construction on adjacent high-speed railway subgrade deformation[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(2): 153.
- [4] PENG F L, WANG H L, GUO J G, et al. Measurement and simulation of ground deformation due to pneumatic caisson construction[C]//Contemporary Topics in Ground Modification, Problem Soils, and Geo-Support. Orlando, Florida, USA: American Society of Civil Engineers, 2009: 41-48.
- [5] PENG F L, WANG H L, TAN Y, et al. Field measurements and finite-element method simulation of a tunnel shaft constructed by pneumatic caisson method in Shanghai soft ground[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(5): 516.
- [6] 王海林,彭芳乐,郭建刚,等. 气压沉箱竖井施工对周边环境影响的数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊1): 62.
- WANG Hailin, PENG Fangle, GUO Jiangang, et al. Numerical simulation of influence on surrounding strata due to shaft construction with pneumatic caissons[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S1): 62.
- [7] WANG H L, PENG F L, TAN Y. Site monitoring and development of real-time monitoring program for new pneumatic caisson construction[C]//Geo-Frontiers 2011. Dallas, Texas, USA: American Society of Civil Engineers, 2011: 182-191.
- [8] 龚维明,朱建民,穆保岗,等. 南京长江四桥北锚碇沉井首次降排水下沉研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊2): 537.
- GONG Weiming, ZHU Jianmin, MU Baogang, et al. Dewatering sinking of north anchorage caisson of Fourth Nanjing Yangtze River Bridge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 537.
- [9] DARGA, NARASIMHA. Lateral load: deflection response of an embedded caisson in marine clay[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2012, 30(1): 1.
- [10] LAI F, LIU S, DENG Y, et al. Numerical investigations of the installation process of giant deep-buried circular open caissons in undrained clay[J]. Computers and Geotechnics 2020, 118:103322.
- [11] SUN Y, SU J, XIA X, et al. Numerical analysis of soil deformation behind the reaction wall of an open caisson induced by horizontal parallel pipe-jacking construction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(12): 1-9.
- [12] 张旭海. 城市轨道交通车站基坑围护结构渗漏点对其周边地

下水渗流场变化规律的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(8): 217.

ZHANG Xuhai. Seepage point impact in urban rail transit station foundation pit enclosure structure on the variation law of surrounding groundwater seepage field[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(8): 217.

· 收稿日期:2025-02-26 修回日期:2025-03-20 出版日期:2025-06-10

Received:2025-02-26 Revised:2025-03-20 Published:2025-06-10

· 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 31 页)

LIU Xian, ZHANG Chenguang, ZHANG Yan, et al. Experimental study on the longitudinal joint of shield tunnels reinforced with composite cavity[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(2): 376.

[20] 柳献, 张乐乐, 李刚, 等. 复合腔体加固盾构隧道衬砌力学行为的宏观分析模型[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 78.

LIU Xian, ZHANG Lele, LI Gang, et al. A macroscopic analysis model for the mechanical behaviors of a shield tunnel segment lining reinforced with a composite cavity[J]. Modern Tunnelling

Technology, 2014, 51(5): 78.

· 收稿日期:2023-04-28 修回日期:2023-06-15 出版日期:2025-06-10

Received:2023-04-28 Revised:2023-06-15 Published:2025-06-10

· 第一作者:孙雪兵,正高级工程师,103982434@qq.com

通信作者:柳献,教授,xian.liu@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 36 页)

HAI Wenlong, WANG Yahui, WANG Huaixiu. Gas load forecasting based on optimization of GRU neural network using IPSO algorithm[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(2): 126.

· 收稿日期:2023-06-02 修回日期:2023-07-06 出版日期:2025-06-10

Received:2023-06-02 Revised:2023-07-06 Published:2025-06-10

· 第一作者:周意,硕士研究生,hbhg_zy@163.com

通信作者:王章琼,副教授,wzqcug@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

(上接第 42 页)

[19] 张文彤. SPSS 统计分析基础教程[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社, 2017.

ZHANG Wentong. Basic course of SPSS statistical analysis[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2017.

[20] 段志强, 王力, 李立功, 等. 单盾盾隧道掘进机在砂岩、砂质泥岩地层中的掘进参数关系研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(7): 120.

DUAN Zhiqiang, WANG Li, LI Ligong, et al. Relation of tunneling parameters of single shield TBM in sandstone and sandy mud-

stone stratum[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(7): 120.

· 收稿日期:2023-05-28 修回日期:2023-10-11 出版日期:2025-06-10

Received:2023-05-28 Revised:2023-10-11 Published:2025-06-10

· 第一作者:时健,博士研究生,924532404@qq.com

通信作者:张仕林,博士研究生,高级工程师,zhangshilin.2005@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

(上接第 47 页)

ZHANG Yingxin, WANG Zhansheng, TAO Yufan, et al. Thrust prediction during diagonal cutting of concrete diaphragm wall for TBM based on machine learning[J]. Henan Science, 2024, 42(12): 1792.

[10] 邱广宇, 房欣悦, 张旺. 基于机器学习的高速列车车头型多目标优化设计[J]. 大连交通大学学报, 2024, 45(4): 41.

QIU Guangyu, FANG Xinyue, ZHANG Wang. Multi-objective optimization design of high-speed train head shape based on machine learning[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2024, 45(4): 41.

[11] 史刚. 基于机器学习的装载机铲装作业性能预测与优化研究[D]. 柳州:广西科技大学, 2024.

SHI Gang. Research on prediction and optimization of loader shoveling performance based on machine learning[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2024.

[12] YAO J, EDSON C P, YU S, et al. Bucket loading trajectory optimization for the automated wheel loader[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2023, 72(6): 6948.

[13] 陆怀民, 张云廉, 刘晋浩. 土壤切削弹粘塑性有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 100.

LU Huaimin, ZHANG Yunlian, LIU Jinhao. Elastoviscoplastic finite element analysis of soil cutting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 100.

· 收稿日期:2025-02-13 修回日期:2025-04-20 出版日期:2025-06-10

Received:2025-02-13 Revised:2025-04-20 Published:2025-06-10

· 通信作者:曹昱,工程师,515141032@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