

DOI: 10.7672/sgjs2026040062

地铁车站横向洞盖法管幕加固施工技术研究*

吴兆鹏,都方竹

(山东建筑大学土木工程学院,山东 济南 250101)

[摘要] 依托济南市某换乘车站研究横向管幕的承载机理,通过建立车站主体与管幕支护结构的三维有限元模型,分析管幕支护在横向洞盖法工程中的加固效果。基于数值模拟结果,对横向管幕的施工组织和方案进行优化,提出具体的施工控制措施。结果表明,施作管幕可以最大降低地表约50%的沉降量,横向管幕通过在施工区域周围形成封闭的刚性支护框架,能够承载和分散地层压力,有效控制施工过程中的地层沉降,特别是在车站开挖的关键扰动区域,验证了管幕结构在实际施工中提供的支持和保护作用。

[关键词] 地铁车站;洞盖法;管幕;支护;沉降;数值模拟

[中图分类号] U455.4

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0062-06

Research on Construction Technology of Pipe Curtain Reinforcement for the Horizontal Hole Cover Method of Subway Station

WU Zhaopeng, DU Fangzhu

(School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China)

Abstract: Based on the study of a transfer station in Jinan City, the load-bearing mechanism of horizontal pipe curtains was investigated. A three-dimensional finite element model of the station main structure and pipe curtain support system was established to analyze the reinforcement effect of the pipe curtain support in horizontal hole cover method engineering. According to numerical simulation results, the construction organization and scheme of horizontal pipe curtains were optimized, and specific construction control measures were proposed. The results show that installing pipe curtains can reduce surface settlement by approximately 50% in both horizontal and vertical directions. Horizontal pipe curtains form a sealed, rigid support framework around the construction area, enabling them to bear and disperse stratum pressure, effectively controlling stratum settlement during construction, particularly in key disturbed zones during station excavation. This validates the supportive and protective role of pipe curtain structures in practical construction.

Keywords: subway stations; hole cover method; pipe roof; supports; subsidence; simulation

0 引言

受城市空间结构与土地资源的限制,地下交通成为解决当前资源问题的有效途径^[1]。然而地下车站施工空间受限、环境敏感性高,如何减少施工对周边环境及结构的扰动并实现施工安全的目标成为了工程领域的研究重点。洞盖法作为灵活、高效的地下空间施工方法,在城市地铁建设中得到了广泛应用^[2],但其施工过程中易发生地层变形和结构位移问题,为降低这种不利影响,横向管幕技术

被引入洞盖法施工中,通过预先在施工区域周围形成支护框架以承载和分散地层压力,从而有效控制施工过程中的地层沉降^[3]。相比传统支护方法,横向管幕能够更好地适应复杂的地质条件,尤其是在软弱地层环境下表现出显著的优势。但横向管幕结构的复杂性以及地层与结构间的相互作用机制尚未完全明晰,实际施工中的效果和应用仍有待研究。

现有研究主要围绕横向管幕施工的技术特点及工程应用展开,涵盖管幕结构设计、施工工艺及地层-结构相互作用分析等方面^[4-6]。李勋^[7]针对不同地质条件下管幕结构的受力性能进行分析,并提

* 山东省自然科学基金(ZR2024QE156)

[作者简介] 吴兆鹏,硕士,助理工程师,E-mail:847696935@qq.com

[收稿日期] 2025-09-05

出了基于地质参数的设计优化建议;吴浩^[8]、赵文等^[9]均通过数值模拟与现场监测相结合的方式,研究了管幕施工对地层变形的控制效果。以上研究为管幕技术的理论发展和工程应用提供了重要支持,但仍存在不足之处,例如过多关注管幕本身的受力性能与结构稳定性,而其对洞盖法车站施工形变的影响机制缺乏分析;基于地铁施工环境的复杂性和地质条件的多样性,现有研究成果的工程适用性和普遍性有待进一步验证。

本文以横向管幕技术辅助的洞盖法车站为研究对象,结合工程案例和数值模拟分析,研究横向管幕承载机理及施工过程中地层变形与结构位移影响规律,并提出相应的施工优化建议。

1 工程概况

济南市某换乘车站为一字形结构,东西向布置,车站周边规划已基本完成,如图1所示。施作管幕后,通过竖井开挖横通道,4个导洞前后土方开挖并施作车站结构,边导洞施作车站围护结构,及时与管幕形成稳定的支撑结构,保证施工安全。

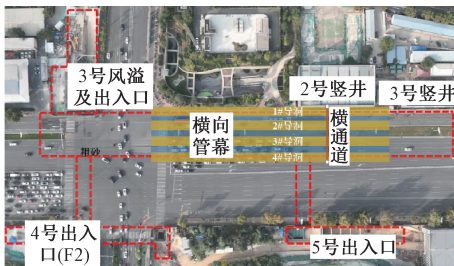


图1 换乘车站平面

Fig. 1 Transfer station layout

场地区域地形起伏显著,地势变化较大,勘察期间勘探孔内未遇到地下水,具体地质剖面如图2所示。车站主体范围内地层主要为杂填土、粉质黏土、黏土、中风化石灰岩等。

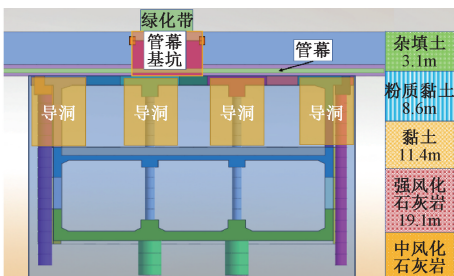


图2 地铁车站地质横剖面

Fig. 2 Geological cross-section of subway station

2 管幕力学模型分析

横向管幕结构的承载机理与传统梁结构的力学行为具有较强的相似性,因此,可基于 Winkler 弹

性地基梁理论建立地铁车站横向管幕结构的力学模型^[10]。假定导洞未开挖时,管幕受上方土压力和地基反力的平衡作用下静力平衡。当导洞开挖后,由于开挖扰动其上方管幕区将承受附加荷载。同时,开挖对周围土层的扰动作用会在一定范围内引起附加荷载,改变局部土体的应力状态。根据上述假设,横向管幕的理论模型如图3所示。

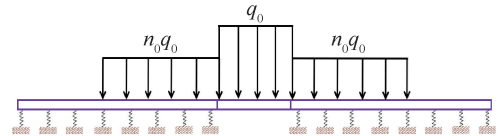


图3 管幕弹性地基梁模型

Fig. 3 Model of elastic foundation beam for pipe curtain

对土体和管幕的相互作用做出合理假设以简化计算并明确作用机理,视管幕为具有均匀力学性能的弹性地基梁,其承载能力由其自身刚度及与地基之间的相互作用共同决定。地基反力随变形呈线性分布,满足 Winkler 地基假设。在导洞开挖前,上方土压力通过地基反力均匀分布在管幕上,管幕处于静止状态。而开挖后松动土压力作为附加荷载施加于管幕上,导致局部结构变形,并引起应力重分布。扰动范围内的附加荷载呈现非均匀分布,具体分布形式取决于地质条件、开挖工艺及支护方式。该模型通过简化复杂的土体-结构相互作用,清晰描述导洞开挖对横向管幕力学行为的影响,尤其是管幕在附加荷载作用下的变形规律及应力分布特性。

管幕结构以横向布置的形式覆盖导洞顶部,增强开挖区域的稳定性。开挖高度和跨度直接影响导洞内的支护需求及管幕的受力分布。较大的开挖高度和跨度会增加上方土压力的集中作用,使管幕需要更高的刚度和强度以抵抗附加荷载。导洞数量和相邻导洞之间的间距显著影响整体开挖面的扰动范围。而在实际工程中,不均匀间距可能引发复杂的应力集中。钢管直径决定了单根钢管的刚度和承载能力,钢管间距则影响整体刚度和荷载分布。

3 横向洞盖法数值模拟

3.1 模型建立

1) 本构模型

结合工程实际情况,选用修正莫尔-库仑模型作为土体本构模型,对较薄夹层土进行适当简化;管幕、围护桩等构件由钢材和混凝土制成,采用线弹性本构模型描述其力学行为;桩基使用一维桩单元、界面单元和桩端单元的组合形式,模拟其与土

层的相互作用,其余结构与地层部分均采用实体单元划分,位移边界设为自动约束。

2) 模型参数

综合考虑计算精度和开挖影响的边界效应,根据既有研究结果和工程经验并结合圣维南原理,取模型尺寸为 $144\text{m} \times 86\text{m} \times 40\text{m}$,计算模型总共划分单元数 157 093 个,施工步序分为 180 步。计算模型中各结构参数依据工程勘探资料选择,车站主体结构的顶板、中板、底板以及顶纵梁为 C30 混凝土,边墙、冠梁、钢管柱基础为 C40 混凝土。地层物理指标模拟参数如表 1 所示。对管幕和管内水泥砂浆等受力敏感结构的网格划分进行加密处理,模型及网格划分如图 4 所示。

表 1 地层物理指标

Table 1 Physical indicators of strata

| 地层信息 | 黏聚力 c/kPa | 内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$ | 泊松比 | 重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | 静止土压力系数 |
|------------|--------------------|---------------------------|------|--|---------|
| 杂填土 | 10 | 10 | 0.35 | 19.2 | — |
| 黄土 | 24 | 13 | 0.30 | 18.9 | 0.42 |
| 粉质黏土 | 31 | 14 | 0.29 | 18.8 | 0.41 |
| 碎石 | 1 | 35 | 0.25 | 21.0 | 0.42 |
| 粉黏土 | 30 | 15 | 0.28 | 19.2 | 0.40 |
| 中风化石灰岩 | 400 | 40 | 0.17 | 26.7 | 0.35 |
| 中风化石灰岩(破碎) | 200 | 35 | 0.20 | 25.0 | 0.42 |

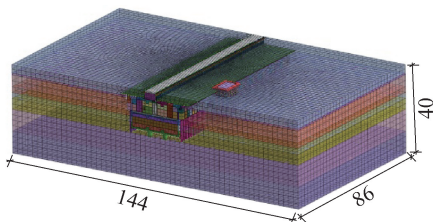


图 4 整体模型(单位:m)

Fig. 4 Overall model(unit:m)

3.2 地表变形分析

车站开挖地表沉降位移云图如图 5 所示,考虑到竖井开挖后,暗挖采取前后同时开挖的方式,选取整个车站的前、中、后 3 个横向沉降面。地表沉降随模型横向宽度的变化如图 6 所示,其中 Y-DCH 和 W-DCH 分别代表有管幕和无管幕支护下的地表沉降曲线。由图 6 可知,最大位移区域集中在施工区域的中心位置,从最大位移区域向外,位移值逐渐减小,向外影响范围逐渐减弱,这与地层应力释放和支护作用密切相关。

无管幕支护下的最大沉降位于剖面中心区域,沉降曲线呈 V 形,沉降幅值较大,最大约 24mm,表明土体开挖过程中地层产生显著变形,沉降难以控

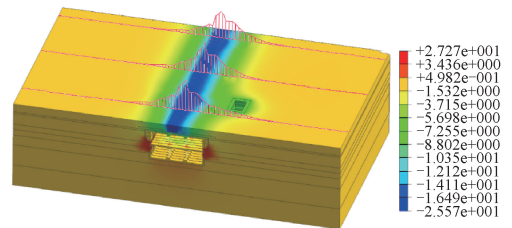


图 5 地表沉降位移云图(单位:mm)

Fig. 5 Cloud map of ground subsidence displacement (unit:mm)

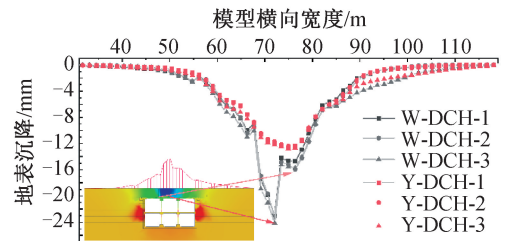


图 6 地表沉降随模型横向宽度的变化

Fig. 6 Variation of ground subsidence with the lateral width of the model

制;而施作管幕支护后,在相同位置,曲线呈 U 形,最大沉降值明显降低,相比无管幕沉降量减少了约 50%,表明管幕能显著降低地表沉降的幅度,尤其是在中部关键区域。同时沉降曲线整体较平缓,不受施工步序剧烈变化的扰动影响,管幕可以有效控制地表沉降的集中发展。

地层在无支护条件下开挖,导致应力场重分布,地层因失去支撑而发生大范围沉降,而管幕起到了对土层的支撑作用,增加了开挖地层的整体刚度,分担和缓解开挖引起的应力重分布,将沉降限制在管幕范围内,有效减小地层塑性变形,同时约束了沉降扩散。

无支护下的地表沉降云图如图 7 所示,分析发现沉降的分布规律明显与施工区域及施工方法密切相关,沉降值在施工区域中心处达到最大值,约 25mm。最大沉降点位于开挖区域正上方,与施工深度和地层扰动密切相关,且沉降值沿纵向变化不大,施工影响主要集中在开挖区域附近,但随着结构的施作,整体沉降稳定,沉降衰减幅度随着距离的增加逐渐趋于平缓。

有无管幕下的地表沉降对比如图 8 所示,其中 W-Z1 和 W-Z2 分别为无管幕情况下的回填区与管幕施作区的沉降数据,Y-Z1 和 Y-Z2 为有管幕支护下的回填区与管幕施作区的沉降数据。由图 8 可知,W-Z1 和 W-Z2 表现出地表沉降的显著波动性,特别是在竖井开挖横通道的区域,沉降值最大可达

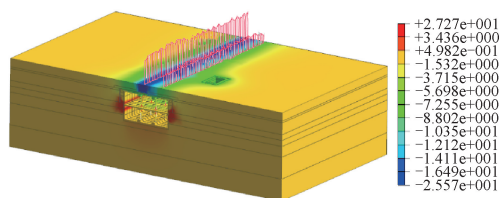


图7 地表沉降云图(单位:mm)

Fig. 7 Cloud map of surface settlement (unit: mm)

25.2mm,之后沉降波动略有减小,维持在较稳定的水平,但仍呈现出明显的周期性波动,沉降值多在18~22mm。而在管幕支护下,Y-Z1和Y-Z2的沉降曲线相对更为平稳,回填区的沉降值在10~12mm,管幕施作区沉降值在6~8mm。

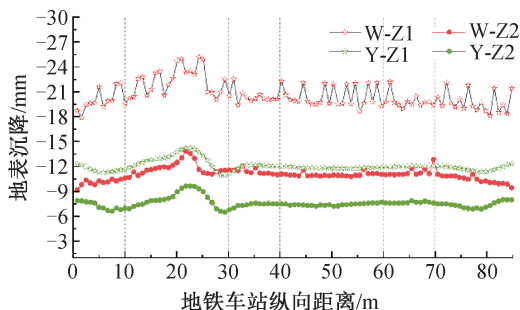


图8 地表沉降对比

Fig. 8 Comparison of surface settlement

无论管幕下的沉降曲线波动较大,沉降值在各个区段间变化显著,施作管幕的地表沉降相对平稳,波动较小,这是因为管幕作为支护结构,提供均匀的支撑作用,可以限制施工扰动对地表沉降的影响。回填土区域沉降显著大于管幕区域,体现出施工中支护措施的显著效果。在需要进行地下施工或地表承受额外负载的地区,采用管幕可有效控制地表沉降。

3.3 横向管幕变形分析

横向管幕在施工中的沉降分布特征及变形规律如图9所示。沉降值从两端向中心逐渐增大,沉降最大值位于管幕正下方中心区域,约23.3mm,两端区域的沉降值较小。横向管幕的施工扰动较均匀,导致沉降分布呈现明显的横向对称性,左右两侧的沉降变化大体均衡。中心区域沉降梯度较大,反映出该区域土体的应力释放集中,沉降变化幅度较大。管幕两端区域沉降值变化缓慢,梯度较小,施工扰动在该区域的传递效应较弱。横向管幕的施作也会破坏土体的初始应力平衡,尤其在中心区域,作为管幕工作区且最后回填覆土,土体的竖向荷载骤变,导致沉降值达到最大。管幕施工后,周围土体受到挤压向中部移动,同时土体发生回弹作

用。这种作用在中心区域叠加,导致沉降值进一步增加。

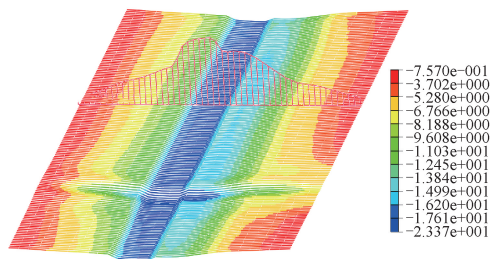


图9 横向管幕整体沉降云图(单位:mm)

Fig. 9 Cloud map of overall settlement of horizontal pipe curtain (unit: mm)

横向管幕的沉降分布表现为中心最大、两端最小的碟形形态,中心区域沉降值显著,沉降梯度大;外围区域沉降值较小,变化平缓。针对中心区域高沉降,建议采用加厚管幕或注浆加固等措施,提高支护刚度。在施工过程中加快中心区域的支护施作,避免因滞后支护引发的沉降集中。

4 管幕施工控制优化

4.1 施工设计与工序

4.1.1 管幕设计

1) 使用 $\phi 406 \times 18 @ 600$ 无缝钢管,钢管材质选用Q235B,确保结构的高强度和耐久性。钢管内部填充M20微膨胀水泥砂浆。

2) 设计采用 $\phi 42$ 注浆管与钢管侧壁牢固焊接的方案,并通过注入水泥浆实现扩散半径 $\geq 0.25\text{m}$ 。钢管的连接方式采用等强焊接技术,相邻管节的焊缝位置错开1m布置,有效分散应力集中点。

3) 采用螺旋出土顶管工艺,以分节推进的方式在两侧顶进 $\phi 406$ 钢管。分节长度严格控制在0.65~2.35m范围内,各节管间采用焊接连接。

4.1.2 施工工序

本工程的管幕施工顺序如下:①步序1,南侧管幕施工,优先完成南侧管幕打设;②步序2,北侧管幕施工,管线迁改完成后,开始北侧管幕的打设工作,与南侧施工实现整体衔接;③步序3,中间节管幕与底部加固施工,临时底板破除后,将基坑回填至管幕底标高;④步序4,基坑回填与桩间处理,使用水泥石屑混凝土进行基坑回填,并逐步破除桩间网喷混凝土,回填至支撑位置;⑤步序5,最终回填与土壤处理,基坑回填至原状标高,确保回填密实度 $\geq 95\%$ 。具体施工步骤如图10所示。

4.2 管幕施工流程

管幕施工工艺流程如图11所示。

1) 施工准备与测量布点

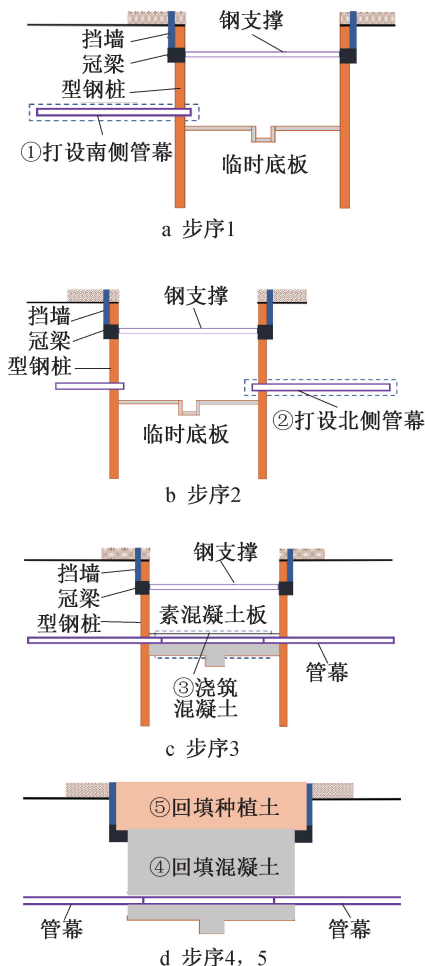


图 10 管幕施工工序

Fig. 10 Construction process of pipe curtain

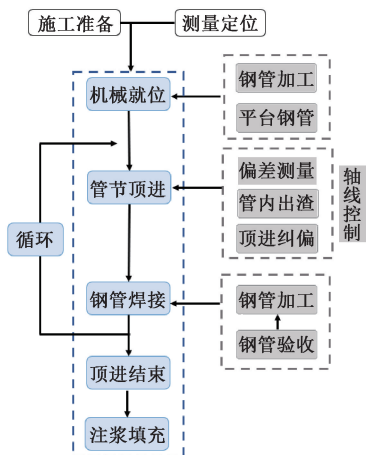


图 11 管幕施工流程

Fig. 11 Construction process of pipe curtain

管幕钻机及作业平台进场后,首先在场外地完成设备的安装与调试;管幕钢管采用垂直吊运与水平转运相结合的方式,准确标定管幕位置,在基坑喷锚面上按编号完成放样。车站结构设计包含 2% 的放坡,施工过程需严格控制精度。

2) 钻机就位及仪器定位

根据设计钻孔位置,确定钻机具体摆放点,并搭设对应的操作平台;操作平台采用梁式支架,依据钻孔高度铺设轨道;钻机安装完成后,通过水准仪和地质罗盘进行标高复核。

3) 顶进施工

调整导向钻杆标靶位置,使其与成像仪器的中心线重合。顶进楔形钻头,实时监测导向孔的方向并及时纠偏。在导向孔完成后,接入螺旋钻杆及第 1 节钢管,钢管顶入土体后始终保持超前楔形钻头。控制顶进速度与出土量相协调。根据成孔钢管的面向角及倾角变化情况对施工钢管的角度及方位变化进行判断和定位。顶进纠偏角度应保持在 0.5° 以内。

4) 管内水泥砂浆填充

钢管顶进到位并完成管内渣土清理后,对管幕钢管进行水泥砂浆填充。钢管口采用 1cm 厚的钢板封端,钢板上预留 $\phi 50$ 灌浆孔和 $\phi 50$ 排气孔。通过注浆机进行 M20 微膨胀水泥砂浆的填充,注浆导管插入钢管前端 50cm 处,退管与注浆进度协调一致。

5) 中间节焊接及二次注浆

在基坑南北两侧的管幕钢管完成顶进后,要进行中间节钢管连接及二次注浆。焊接前,清除管幕顶标高以下范围的临时底板及喷锚层,并用水泥石屑填充至管幕底标高,以提供稳定的焊接作业面。

6) 临时结构破除、基坑回填

管幕中间节完成焊接及二次注浆后,对管幕之间的缝隙进行密实处理。缝隙填充采用水泥石屑,浇筑 100mm 厚的 C20 混凝土板。管幕顶部 1.5m 范围内使用种植土回填至地面标高。

4.3 管幕优化

1) 改进开挖顺序。优先在中柱附近区域分区、分段开挖,开挖后及时施加临时支护,防止土体回弹力直接作用于中柱底部。施工前使用数值模拟预测中柱在不同开挖顺序下受力状态,优化施工步骤。

2) 中柱结构加固。提高中柱设计刚度,采用高强钢筋混凝土并增加截面尺寸。施工中增设临时钢支撑,形成“柱-支撑”联合承载体系,减小中柱单独承受的隆起压力。

3) 注浆控制土压力。在中板两侧土体内注浆,优化土体的承载性能,减少水平推力的传递。设置土体排水系统,降低地下水对土体稳定性的影响,从而减小对中板的水平位移压力。

4)改进回填材料与工艺:采用高强度、低压缩性材料,如砂砾土或水泥土混合物作为回填材料,确保填料均匀性。在回填过程中严格按照规范分层回填、分层碾压,每层厚度 $\leq 30\text{cm}$,并采用机械振动压实设备,提高填料密实度。

5)地基改良与排水:在回填前进行地基土体改良,例如通过水泥搅拌桩或深层注浆加固软弱土层。建立有效的排水系统,降低地下水位并减少土体固结沉降。

5 结语

1)地层在无支护条件下开挖会发生应力场重分布而发生大范围沉降;施作管幕最大可降低约50%的地表沉降量。管幕可有效控制地表沉降的集中发展,增加了地层的整体刚度,减小地层塑性变形,表现出优异的控制效果。

2)地铁站开挖最大沉降点位于开挖区域正上方,与施工深度和地层扰动密切相关且沉降值沿纵向变化不大,施工影响主要集中在开挖区域附近,整体沉降衰减幅度随着距离的增加逐渐趋于平缓。施作管幕后地表沉降曲线相对平稳,波动较小,在需要进行地下施工或地表承受额外荷载的地区,采用管幕可以有效控制地表沉降。

参考文献:

- [1] 崔光耀,宋博涵,何继华,等.超近接上跨既有隧道施工影响分区及加固措施效果[J].长江科学院院报,2023,40(6):114-118,125.
CUI G Y, SONG B H, HE J H, et al. Impact zoning and effect of reinforcement measures for ultra-close construction overcrossing existing tunnel[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(6): 114-118, 125.
- [2] 李铁生.管幕洞桩法地铁站设计施工关键技术研究[J].隧道建设(中英文),2020,40(4):531-537.
LI T S. Key technologies for design and construction of metro station by pipe-roof PBA method[J]. Tunnel construction, 2020, 40(4): 531-537.
- [3] 李伟伟,董驾潮,金文强,等.地下工程咬合型管幕构件抗弯承载力研究[J].建筑结构,2024,54(6):38-45,17.
LI W W, DONG J C, JIN W Q, et al. Study on flexural bearing capacity of secant pipe roofing members in underground engineering[J]. Building structure, 2024, 54(6): 38-45, 17.

- [4] 钟雪.地铁站新管幕法破坏模式及其承载力计算方法研究[J].铁道标准设计,2022,66(6):90-97.
ZHONG X. Destruction mode and bearing capacity calculation method of new tubular roof method in subway station[J]. Railway standard design, 2022, 66(6): 90-97.
- [5] 张向阳,曹静远,王小勇,等.管幕-隔离桩组合结构保护地铁隧道施工技术[J].施工技术(中英文),2025,54(6):151-157,163.
ZHANG X Y, CAO J Y, WANG X Y, et al. Construction technology of tube curtain-isolation pile combined structure to protect subway tunnel[J]. Construction technology, 2025, 54(6): 151-157, 163.
- [6] 李茂文.浅埋管幕施工及其受弯引起地表沉降预测方法[J].地下空间与工程学报,2023,19(4):1367-1376.
LI M W. Prediction method of surface subsidence caused by construction of shallow buried pipe curtain and its bending[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2023, 19(4): 1367-1376.
- [7] 李勋.超浅埋暗挖车站洞桩法施工横向管幕承载机理及地表沉降预测方法研究[D].济南:山东建筑大学,2023.
LI X. Research on the bearing mechanism of horizontal pipe curtain and the prediction method of ground surface settlement in the construction of super shallow buried and underground excavated station using the pile method[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2023.
- [8] 吴浩.基于盖挖联合管幕技术的顶板暗筑施工[J].施工技术(中英文),2021,50(22):37-40.
WU H. Concealed roof construction based on the technology of cover-cut combined pipe curtain[J]. Construction technology, 2021, 50(22): 37-40.
- [9] 赵文,孙远,柏谦,等.小直径管幕工法横导洞施工现场试验及参数优化[J].东北大学学报(自然科学版),2023,44(3):432-439.
ZHAO W, SUN Y, BAI Q, et al. Excavation field test and parameters optimization of the transverse pilot tunnel with small diameter tube curtain construction method[J]. Journal of Northeastern University (natural science), 2023, 44(3): 432-439.
- [10] 徐磊,王宏宇,杨克栋.管幕法连拱隧道下穿高速公路路基段沉降变形规律分析[J].公路交通技术,2024,40(4):43-50.
XU L, WANG H Y, YANG K D. Analysis of settlement and deformation law of subgrade section for multi-arch tunnel with the pipe roof method underpassing expressway[J]. Technology of highway and transport, 2024, 40(4): 43-50.