

DOI: 10.7672/sgjs2026100051

预制现浇相间地下连续墙施工技术*

刘雪峰

(北京城乡建设集团有限责任公司,北京 100067)

[摘要] 针对城市地铁基坑工程中预制装配式地下连续墙墙幅接头施工精度低、长效防水难的难题,依托青岛地铁周村站出入口工程,提出预制现浇相间地下连续墙技术方案。研究了预制墙体的轻量化结构形式、节段竖向与横向连接构造及复合防水技术,构建了从工厂化预制到现场机械化吊装的完整施工工艺体系。结果表明:随着开挖深度增加,墙后土体位移及影响范围均增大,最小影响范围约为 3 倍开挖深度。该方案有效规避了预制墙幅直接拼接的施工与防水风险,提升了工程安全与施工效率。

[关键词] 地铁;装配式;地下连续墙;防水;位移;施工技术

[中图分类号] TU94⁺2;TU745.3

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)10-0051-06

Construction Technology of Prefabricated Cast-in-place Interphase Diaphragm Wall

LIU Xuefeng

(Beijing Urban & Rural Construction Group Co., Ltd., Beijing 100067, China)

Abstract: Aiming at the problems of low construction accuracy and long-term waterproof difficulty of prefabricated diaphragm wall joints in urban subway foundation excavation engineering, based on the entrance and exit project of Zhoucun Station of Qingdao Metro, the technical scheme of prefabricated cast-in-place interphase diaphragm wall is proposed. The lightweight structure form of the prefabricated wall, the vertical and horizontal connection structure of the segment and the composite waterproof technology were studied, and a complete construction technology system from factory prefabrication to on-site mechanized hoisting was constructed. The results show that with the increase of excavation depth, the displacement and influence range of soil behind the wall increase, and the minimum influence range is about 3 times the excavation depth. The scheme effectively avoids the construction and waterproof risk of direct splicing of precast wall, and improves the engineering safety and construction efficiency.

Keywords: subways; prefabricated; diaphragm wall; waterproof; displacement; construction

0 引言

在城市核心区,基坑工程普遍采用明挖法施工,面临工期长、成本高、环境干扰大等一系列挑战。因此,以建筑工业化理念为指导,发展高效、绿色的装配式支护技术已成为行业共识与重要研究方向。预制地下连续墙作为新型装配式围护结构,凭借其工厂化预制、现场快速拼装的特点,在提升工程质量、缩短施工周期、降低环境影响等方面展现出显著优势。杨毅秋等^[1]系统构建了装配式地下连续墙的设计与施工技术体系;夏宇泽^[2]、尹清

锋等^[3]对装配式钢制地下连续墙的变形特性及设计优化方法进行了探索。然而,无论采用何种材料,接缝性能始终是决定结构整体安全性的核心。在接头力学性能方面,研究主要集中于探讨不同连接形式的受力机理与破坏模式。针对横向接缝,部分学者通过数值模拟和试验分别研究了焊缝的受弯性能、预应力与剪力键复合式接头的承载力和螺栓连接方式的可靠性^[4-6];崔涛^[7]从功能集成的角度设计了集受力、防水、导向于一体的新型组合式接头。针对更复杂的竖向接缝,部分学者通过模型试验系统研究了不同咬合或连接构造的抗剪性能与抗弯性能,并分析了其破坏机理。为进一步提升墙体抗裂性能^[8-10],宋帅奇等^[11]对局部施加预应力

* 北京建工集团重点攻关项目(SGGA500920220001)

[作者简介] 刘雪峰,工程师,E-mail:2590034408@qq.com

[收稿日期] 2025-10-11

的方案进行了数值模拟分析,验证了其在控制变形方面的有效性。

尽管接头形式不断创新,但这些研究也普遍证实接缝仍是结构的薄弱环节。刘永超等^[12]和石长城^[13]通过现场原型试验与数值模拟进一步指出,接缝的存在会削弱墙体的整体刚度与协同变形能力,尤其当失效接头位于坑底以上时,墙体变形会显著增大。然而,装配式地下连续墙在工程应用中也已展现出其综合优势,为确保这些优势得以发挥,具体的施工工艺与整体应用技术须得到保障。张琦^[14]针对高精度成槽需求,提出了优化成槽工艺与质量控制措施;韩胜^[15]聚焦预制、吊装及防水等环节,研发了相应的智能工装与自动化安装系统。同时,为解决防水问题,朱苗苗等^[16]提出了多重组合的逆向止水构造;王飞娅等^[17]设计了以橡胶止水带为主的新型防水接头。上述研究极大地推动了预制地下连续墙技术的发展,但现有成果多集中于单一接头形式的力学性能分析或纯装配体系的施工技术,对于如何通过体系创新来规避预制构件间强-强连接带来的施工精度要求高、防水处理难度大等系统性难题,相关研究尚不充分。

为此,本文依托青岛地铁周村站出入口工程,提出预制-现浇相间地下连续墙的新型施工技术。该方案通过在预制墙幅间设置现浇段,从根本上优化结构的整体防水性能并降低现场施工难度。本文将从整体性设计、竖向连接构造、关键施工工艺等层面,对该技术体系进行系统性研究与阐述,重点探讨墙体轻量化设计、节段间高强螺栓连接与复合防水技术、工厂化预制及现场机械化吊装等关键环节,以期形成一套安全可靠、经济高效的预制地下连续墙应用技术。

1 工程概况

青岛地铁周村站基坑工程的地下连续墙单幅墙体重近 65t,其吊装不仅需动用 200t 级以上的大型履带式起重机,且对作业环境极为敏感。当风速超过 6 级或起吊点存在微小偏差时,极易造成墙体摆动,一旦垂直度偏差超出 10mm,即需耗时调整,在城市核心区有限空间内安全风险极高。此外,作为结构防渗体系中的薄弱环节,墙体接缝的防水处理在砂性土、承压水等不良地质条件下难度巨大,槽壁失稳极易导致密封措施失效。该技术对复杂地质的适应性亦有限,当遭遇含孤石、建筑垃圾的杂填土或坚硬岩层时,成槽效率与设备磨损问题凸显,辅助钻进工艺亦可能引发安装精度偏差与围岩扰动等地质风险。

2 预制地下连续墙整体性设计

为降低施工复杂性并提升整体可靠性,本研究在周村站出入口两侧仅布置 4 幅预制地下连续墙(南、北两侧 2 幅)。各幅预制墙体之间不直接拼接,而是通过中间现浇连续墙进行连接,以此形成预制-现浇相间的结构体系。这种布置方式不仅简化了吊装和就位精度的控制要求,也在结构上显著改善了渗漏水问题。

预制地下连续墙在形式与宽度上保持统一,以实现标准化和通用化施工,从而降低模具制造及施工成本,墙体厚 760mm,单幅宽 3m,最大长度 17.3m。参考格形地下连续墙的构造理念,周村站预制地下连续墙采用轻量化设计,即在墙体内部设置闭合空腔并填充轻质材料,以减轻整体自重。优化后,整幅墙体减重比例达到 30%,最大质量降低至 64.27t,有效缓解了超重构件吊装带来的施工难度。

在竖向分节设计方面,每幅预制地下连续墙分为上下 2 段:上节长 10m,重约 37.15t;下节长 7.3m,重约 27.12t。上下节连接端预埋钢制接头,通过高强螺栓实现拼装连接,以保证竖向传力的连续性和整体受力性能。这种分段与连接方式兼顾了吊装可操作性与结构整体性,为大尺寸预制地下连续墙在受限施工环境下的应用提供了可行路径,其剖面设计如图 1 所示。

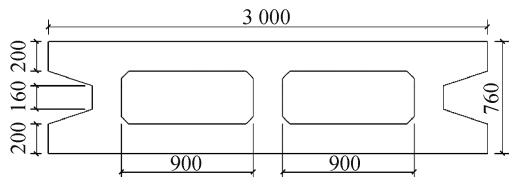


图 1 地下连续墙剖面

Fig.1 Section of diaphragm wall

3 预制地下连续墙连接设计要点

3.1 上下幅间连接技术

预制地下连续墙的整体性能在很大程度上取决于上下幅间的连接质量,该部位是决定结构止水效果和整体稳定性的关键环节。

青岛地铁周村站出入口工程为典型的明挖基坑,场地主要处于富水砂层中,该类地层具有高透水性和低黏聚力,在地下水力梯度作用下极易发生管涌、流砂与基底隆起破坏等问题。成槽施工过程中,常见的缩径、侵限等病害会进一步加剧围护体系的不稳定性;若止水效果不足,易引发坑内涌水、涌砂和坑外地表过量变形。相较于传统现浇结构,预制地下连续墙在接缝部位更易出现渗漏,周村站

工程通过设置现浇地下连续墙连接各预制幅段,以缓解幅间渗漏问题。本研究重点聚焦于上下幅间的止水构造优化。

结合国内既有研究与工程实践经验,如浙江省建筑设计研究院滨江新大楼工程中首例预制-现浇咬合式地下连续墙,及深圳地铁 15 号线铲湾中站 9m 宽幅预制地下连续墙的应用成果,本项目采用预埋钢结构接头作为上下幅的主要连接构件,并通过高强螺栓实现拼装,如图 2 所示。

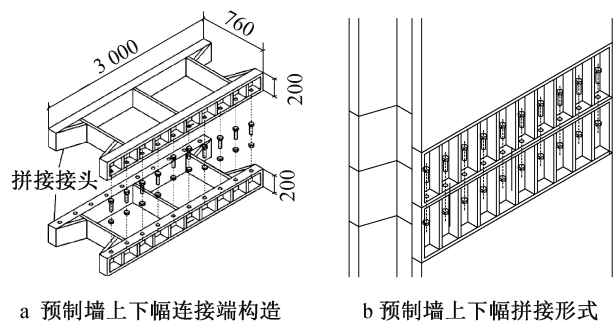


图 2 预制地下连续墙上下幅连接构造

Fig. 2 The upper and lower connection structure of prefabricated diaphragm wall

3.2 横向幅间连接技术

预制装配式地下连续墙的横向拼接接头需同时满足接缝止水抗渗与剪力传递的要求。目前常用的接头形式主要包括刚性接头与柔性接头。其中,刚性接头不仅能承受墙段间的竖向剪切作用,使相邻槽段形成整体共同承担上部结构竖向荷载,协调不均匀沉降,还兼具止水功能。因此,本设计采用刚性接头,具体为十字穿孔钢板接头。该接头在预制阶段于墙段一侧预埋半幅十字穿孔钢板,另一侧设置与之匹配的凹槽。施工时将带钢板段与带凹槽段对接,并在凹槽区涂抹遇水膨胀止水胶。吊装就位后,止水胶遇水膨胀,填充接缝间隙,实现密封防渗,使 2 幅墙段形成整体协同工作,共同抵抗外部水土压力。

预制装配式地下连续墙采用的十字穿孔钢板接头构造如图 3 所示。

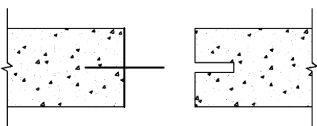


图 3 横向刚性接头

Fig. 3 Transverse rigid joint

3.3 地下连续墙接头防渗技术

预制装配式地下连续墙存在大量接缝,若接缝

防水处理不当,易引发工程隐患。目前主要采用的防水措施包括:提高混凝土抗渗性能,强化构件自防水能力;接头处设置橡胶止水带或密封条;接缝预设注浆系统,拼装后实施注浆补强。防水材料的选择需兼顾止水性能与施工适应性,避免影响拼装精度。

设计采用叠合板式混凝土结构防水构造体系,其防水构造分为 3 类(见图 4):①普通防水构造适用于无承压水地层,接缝处设置钢筋笼后整体浇筑,依靠混凝土自密实实现防水;②外贴防水构造适用于有承压水且地质较好的地段,接缝处内侧抹防水砂浆并外贴防水卷材,形成内外双道防线;③局部增强防水构造,针对存在承压水及不均匀沉降的地层,接缝处设置可破坏式砂浆初防水层,并辅以钢板固定式止水带作为第 2 道保障,适应接缝变形需求。

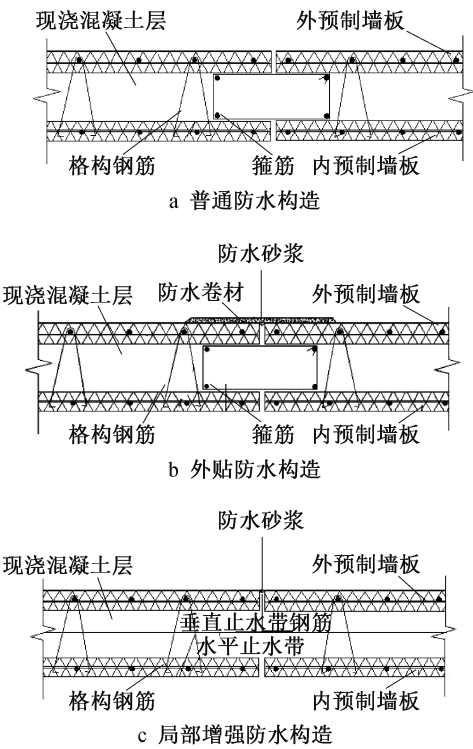


图 4 预制墙连接接头防渗设计

Fig. 4 Anti-seepage design of precast wall connection joint

4 预制现浇相间连续墙关键施工工序

4.1 成槽施工

在预制-现浇相间连续墙施工过程中,成槽质量直接决定了墙体的垂直度、拼装精度及后续止水效果,是整个工序的控制重点。采用液压成槽机进行机械化开挖,施工顺序为先预制墙槽段、再现浇墙槽段,如图 5 所示。

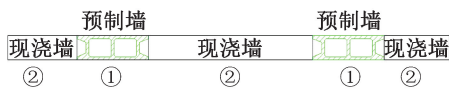


图 5 预制地下连续墙施工顺序

Fig. 5 Construction sequence of prefabricated underground diaphragm wall

在工序划分上,预制墙槽段宽 3m,采用单抓法开挖;现浇槽段宽 6m,采用三抓成槽法,即先开挖槽段两侧土体,再开挖中间土体,以避免抓斗受力不均造成槽壁偏斜。开挖过程需分层、分次进行,直至达到设计槽底标高。

施工前,成槽机应精准就位,其主钢丝绳需与槽段轴线严格重合。掘进过程中应遵循稳、准、轻放、慢提的作业原则,并通过经纬仪对钢丝绳及导杆进行双向监控,以实时控制垂直度。开挖完成后,应采用超声波测壁仪对槽壁质量进行检测,确保槽壁垂直度控制在 3‰以内,从而满足预制墙幅吊装与现浇段整体成型的几何精度要求。

通过上述成槽工艺与质量控制措施,能在保证施工效率的同时显著提升成槽精度与墙体整体性,为后续预制墙体的安装和现浇段的衔接提供可靠保障。

4.2 吊装施工

预制墙体吊装阶段是保证结构安装精度与施工安全的关键环节。本工程采用双机抬吊、空中回直的施工工艺,即以现场 150t 履带式起重机作为主机,80t 履带式起重机作为副起重共同作业。该工艺能在吊装过程中保持墙体受力均衡,避免因偏心荷载导致构件倾斜或扭转。

吊装作业前,应确保吊点布置与墙体重心严格一致,避免因偏心起吊引发结构受力不均。在起吊过程中,2 台起重机需保持同步抬吊,当墙体离地 0.3~0.5m 时进行稳定性复核,确认构件平衡后逐步提升。墙体旋转与回直由主起重机牵引、副起重机配合完成,通过协调回转角度使墙体逐渐竖直,以确保后续入槽作业的平顺性与精度。在墙体接近设计位置后,副起重机逐步卸荷,最终由主起重机完成就位和入槽。整个吊装过程须保持起重机运行平稳,下放时不得强行入槽,以防损伤槽壁或引发位移偏差。该施工工艺能在有限施工空间内完成大吨位构件的平稳转运与精确安装,对降低超重预制墙体的吊装风险、保障槽壁稳定性及墙体入槽精度具有显著效果,为后续拼装与现浇段施工提供了可靠条件。

5 预制地下连续墙施工工艺

5.1 预制地下连续墙施工工艺

预制地下连续墙的工厂化生产遵循标准化作业流程:底模固定→芯模安装→侧模安装→模具固定→混凝土浇筑→混凝土养护。整个生产工艺主要包括模具准备、钢筋骨架成型、混凝土浇筑及养护等核心工序。

1)生产流程始于模具的准备与定位。首先,将高刚度钢制底模在预制台座上进行精确定位与调平,并涂刷脱模剂,此举是保证墙体最终几何尺寸精度与表面光洁度的基础。随后,依据设计图纸进行下排钢筋的布设与绑扎,并通过预设的砂浆垫块精确控制钢筋保护层厚度。

2)为实现墙体的轻量化设计,在下排钢筋骨架完成后,需进行芯模安装。芯模用以在墙体内部形成预设的闭合空腔,其安装精度直接关系到墙体截面的均匀性和结构受力性能。芯模就位后,随即进行上排钢筋绑扎,从而形成一个完整的、具有空间刚度的钢筋笼骨架。

3)钢筋笼制作完成后,进入合模工序。依次安装侧模,并利用高强螺栓或专用夹具将整个模具系统紧固锁定。此步骤至关重要,须确保模具各部件连接紧密、稳固,以抵抗后续混凝土浇筑过程中产生的巨大侧压力,防止胀模、漏浆等质量缺陷的发生。

4)在所有准备工作检查合格后,开始进行混凝土浇筑。浇筑过程需连续、均匀、分层进行,并辅以高频振捣器充分振捣,以排除混凝土内部气泡,确保其密实性与匀质性。混凝土浇筑完成后,立即进入养护阶段。根据生产计划,可采用蒸汽养护或覆盖洒水等标准养护方式,为混凝土水化反应提供适宜的温湿度环境,保证其早期强度的正常增长和长期性能的稳定。

待混凝土达到规定的脱模强度后,即可脱模。最终成型的预制地下连续墙成品表面平整、棱角分明,外观质量优良。

5.2 现场应用

依托青岛地铁周村站出入口工程,开展预制地下连续墙现场应用。出入口标准段开挖宽度 7.4m,开挖深度 12~16m。预制地下连续墙深度约为基坑开挖深度的 0.8~1.2 倍。现场预制地下连续墙吊装如图 6 所示。

为进一步提升预制-现浇接缝止水性能,在构件拼装接缝处增设 1 条遇水膨胀聚氨酯止水胶带(见图 7),以形成机械连接-弹性填充-化学膨胀多重止



图 6 预制地下连续墙吊装过程

Fig. 6 Hoisting process of the prefabricated diaphragm wall

水体系,从而有效保障上下幅间的密封性和整体结构的防渗性能。



图 7 聚氨酯遇水膨胀止水带

Fig. 7 Polyurethane water-swelling waterstop

出入口基坑不同开挖深度下地下连续墙间距与墙后土体位移关系如图 8 所示。预制地下连续墙安装就位后,随出入口基坑开挖深度的增加,墙后土体位移及影响范围均呈增大趋势,但其影响随距离的增加而减小。随着开挖深度的增加,土体变形速率及影响范围扩展速率均显著提升。在深基坑工程实践中,需重点关注墙后土体变形发展,采取有效控制措施,以降低对周边建筑物及交通环境的不利影响,确保既有结构安全。

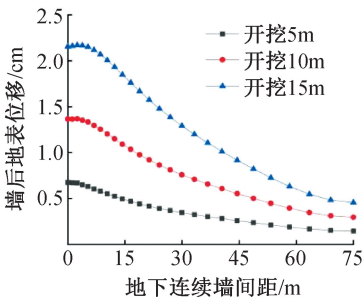


图 8 不同开挖深度下地下连续墙间距与墙后土体位移关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between the spacing of diaphragm wall and the displacement of soil behind the wall under different excavation depths

6 结语

1)通过在墙体内部设置闭合空腔并填充轻质材料,实现了预制地下连续墙的轻量化设计。优化后,最大整幅墙体减重比例达到 30%,最大单幅质

量控制在 64. 27t,有效降低了大型构件吊装与安装过程中的安全风险和施工难度。

2)上下幅间采用预埋钢结构接头结合高强螺栓连接,并辅以聚氨酯遇水膨胀止水胶形成复合止水体系。该构造形式能兼顾受力传递与止水性能,确保接缝间隙控制精度,提高结构整体刚度与渗漏控制能力,为富水砂层等复杂地质条件下基坑支护提供了可靠保障。

3)预制墙体在工厂化条件下实现标准化生产,几何尺寸精度与成品质量均优于传统现浇工艺。配合机械化吊装与装配化施工,可显著提升施工效率,缩短工期,并在环境保护与资源节约方面具有优势。

综上所述,预制现浇相间地下连续墙技术能在满足结构安全性与防渗要求的同时,实现施工效率与质量的双重提升,展现出良好的工程应用前景。未来研究可进一步围绕接头耐久性评价、复杂地层适应性及装配式支护体系的标准化设计开展,以推动该技术在城市轨道交通及大型基坑工程中的规模化推广与应用。

参考文献:

[1] 杨毅秋,周慧超,杨贵生,等. 装配式地下连续墙设计施工技术研究[J]. 铁道工程学报,2020,37(2):91-97.
YANG Y Q, ZHOU H C, YANG G S, et al. Research on the design and construction technique of prefabricated diaphragm walls[J]. Journal of railway engineering society, 2020, 37(2): 91-97.

[2] 夏宇泽. 装配式钢制地下连续墙变形特征分析及应用研究[D]. 北京:北京交通大学,2024.
XIA Y Z. Characterization of deformation of assembled steel diaphragm wall and application research [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2024.

[3] 尹清锋,赵伯明,夏宇泽,等. 装配式钢制地下连续墙设计影响因素分析[J]. 施工技术(中英文),2025,54(14):65-72.
YIN Q F, ZHAO B M, XIA Y Z, et al. Analysis of design influencing factors for prefabricated steel diaphragm wall [J]. Construction technology, 2025, 54(14): 65-72.

[4] 崔涛. 装配式地连墙横向焊接缝抗弯性能数值模型分析[J]. 城市轨道交通研究,2024,27(12):153-158.
CUI T. Flexural performance numerical model analysis of transverse welded joints in prefabricated diaphragm walls [J]. Urban mass transit, 2024, 27(12): 153-158.

[5] 杨忱. 装配式混凝土地连墙水平接头抗弯及抗剪承载特性研究[D]. 南京:东南大学,2023.
YANG C. Study on bending and shear bearing characteristics of horizontal joints of prefabricated concrete diaphragm wall [D]. Nanjing: Southeast University, 2023.

[6] 王靖宗. 螺栓横向连接分节预制地下连续墙力学性能研究[D]. 杭州:浙江科技大学,2024.
WANG J Z. Research on mechanical properties of segmental

prefabricated diaphragm wall with bolt transverse connection [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology,2024.

[7] 崔涛. 新型预制地下连续墙接头性能研究[J]. 施工技术, 2019,48(12):36-38.

CUI T. Research on the performance of new prefabricated underground diaphragm wall joints[J]. Construction technology, 2019,48(12):36-38.

[8] 刘晓东,穆保岗,黄李骥,等. 装配式地连墙不同节点形式的界面抗剪能力对比试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2025,52(5):99-107.

LIU X D,MU B G,HUANG L J,et al. Comparative test study on interfacial shear resistance of different joints of prefabricated diaphragm walls [J]. Journal of Hunan University (natural sciences), 2025,52(5):99-107.

[9] 穆保岗,肖世伟,刘晓东,等. 装配式地下连续墙竖缝钢管咬合刚性接头的抗弯及抗剪试验[J]. 中国公路学报, 2025,38(4):121-130.

MU B G,XIAO S W,LIU X D,et al. Experimental study on bending and shear of vertical steel pipe interlocking rigid joints in prefabricated diaphragm wall[J]. China journal of highway and transport, 2025,38(4):121-130.

[10] 肖世伟. 装配式地连墙竖向接头承载性能试验研究[D]. 南京:东南大学,2023.

XIAO S W. Experimental study on mechanical properties of prefabricated diaphragm wall vertical joint [D]. Nanjing: Southeast University,2023.

[11] 宋帅奇,黄博文,潘乾通. 局部张拉预应力装配式地连墙受力及变形分析[J]. 混凝土, 2019(10):125-129,134.

SONG S Q,HUANG B W,PAN Q T. Analysis of the force and deformation of the partially prestressed precast underground continuous wall[J]. Concrete, 2019(10):125-129,134.

[12] 刘永超,贺文贤,李泽源,等. 装配式地连墙接缝变形特性研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2024,41(2):75-84.

LIU Y C,HE W X,LI Z Y,et al. Research on joint deformation characteristics of prefabricated diaphragm walls [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2024,41(2):75-84.

[13] 石长城. 地铁装配式地连墙原位试验及受力变形机理研究[D]. 天津:天津大学,2021.

SHI C C. The in-situ test and studies on mechanical mechanism of prefabricated diaphragm wall [D]. Tianjin: Tianjin University,2021.

[14] 张琦. 装配式地铁车站地连墙兼作主体结构侧墙施工技术[J]. 广东建材, 2023,39(4):96-98.

ZHANG Q. Construction technology of assembled subway station diaphragm wall as side wall of main structure [J]. Guangdong building materials, 2023,39(4):96-98.

[15] 韩胜. 永临一体装配式地下连续墙预制及安装施工技术研究——以深圳地铁 8 号线三期溪涌站项目为例[J]. 隧道建设(中英文), 2025,45(S1):260-269.

HAN S. Prefabrication and installation technology of permanent and temporary integrated prefabricated diaphragm wall;a case of Xichong Station of Shenzhen Metro Line 8 phase III [J]. Tunnel construction, 2025,45(S1):260-269.

[16] 朱苗苗,王宏俊,刘海峰. 地下连续墙组合型钢逆向多路径止水结构设计[J]. 四川建材, 2025,51(6):93-95,119.

ZHU M M,WANG H J,LIU H F. Design of reverse multi-path water stop structure of composite steel for underground continuous wall[J]. Sichuan building materials, 2025,51(6):93-95,119.

[17] 王飞娅,龙道选. 装配式地下连续墙拼装接头性能研究[J]. 四川建筑, 2024,44(4):265-267.

WANG F Y, LONG D X. Study on performance of assembled joints of assembled diaphragm wall [J]. Sichuan architecture, 2024,44(4):265-267.