

装配预制地下连续墙连接节点防水研究

黄龙 郭彬彬 刘晓虎

中建五局第三建设有限公司，湖南长沙，410000；

摘要：本文围绕装配预制地下连续墙连接节点防水技术展开系统研究，构建了涵盖材料选型、构造设计、施工工艺及质量控制的技术体系。通过分析典型工程案例的防水失效模式，提出了节点几何形式优化、多道防水屏障设计及施工误差控制等改进策略，并验证了高性能密封材料、自愈合技术与智能化监测手段在提升节点耐久性中的应用潜力。研究结合技术经济性分析，明确了不同防水方案的适用场景与成本边界，为装配式地下工程节点防水设计标准化及工程实践提供了理论依据与技术指导。

关键词：装配式地下连续墙；连接节点防水；防水材料与构造设计；施工质量控制与失效改进

DOI: 10.69979/3029-2727.25.10.008

引言

装配式地下连续墙因其施工高效、质量可控等优势，在深基坑支护与地下结构工程中应用日益广泛。然而，预制构件间的连接节点作为防水薄弱环节，其密封性能直接影响地下工程的耐久性与安全性。现有研究多聚焦于节点力学性能或单一防水措施，缺乏对材料-构造-工艺协同作用及长期防水效能的系统性探讨。本文针对装配预制地下连续墙连接节点的防水技术展开研究，通过构建材料选型、构造设计、施工控制及质量保障的集成技术体系，结合典型工程案例的失效机理分析与改进策略，提出兼顾短期抗渗与长期耐久性的节点防水解决方案，为装配式地下工程防水设计标准化及工程实践提供理论支撑与技术指导。

1 连接节点防水技术体系构建

1.1 节点防水材料构造设计

在装配预制地下连续墙的连接节点防水技术体系中，材料选型与构造设计是确保防水性能的核心环节。本工程地处城区繁华中心，周边环境复杂，地下管网密集，且场地内地下水丰富，包括上层滞水、第四系孔隙潜水及岩溶裂隙水，对基坑施工影响较大。



图 1 地下渗水

因此，节点防水材料的选择需充分考虑地下水的侵蚀性及工程环境的特殊性。预制地连墙作为永久结构，其墙身混凝土强度等级不低于 C40，抗渗等级不低于 P10，确保了墙体本身的密实性和抗渗性。在连接节点处，采用了高性能密封胶进行密封处理，该材料具有良好的弹性和耐久性，能够有效适应节点变形，防止水分渗透。同时，节点构造设计也充分考虑了防水需求，通过优化连接缺口的形状和尺寸，以及预留钢筋的布置方式，确保了节点连接的紧密性和整体性。本工程还采用了多道防水屏障设计，包括预制地连墙自身的防水层、节点处的密封胶防水层以及可能的附加防水层等，形成了完整的防水体系^[1]。这种设计不仅提高了节点的防水性能，还增强了整个地下连续墙结构的耐久性。

1.2 施工工艺与质量控制

施工工艺与质量控制是确保装配预制地下连续墙连接节点防水性能的关键环节。本工程在施工过程中，严格遵循了设计要求和施工规范，确保了施工质量的可控性。在成槽阶段，通过精确控制槽壁的垂直度和宽度，为后续的吊装和浇筑工作奠定了良好基础。吊装过程中，采用了专业的吊装设备和精确的定位技术，确保了预制地连墙的准确就位。在浇筑混凝土时，通过优化混凝土配合比和浇筑工艺，确保了混凝土的密实性和均匀性。同时，还采用了二次注浆技术，对一次浇筑混凝土可能存在的缺陷进行补强，进一步提高了节点的防水性能。

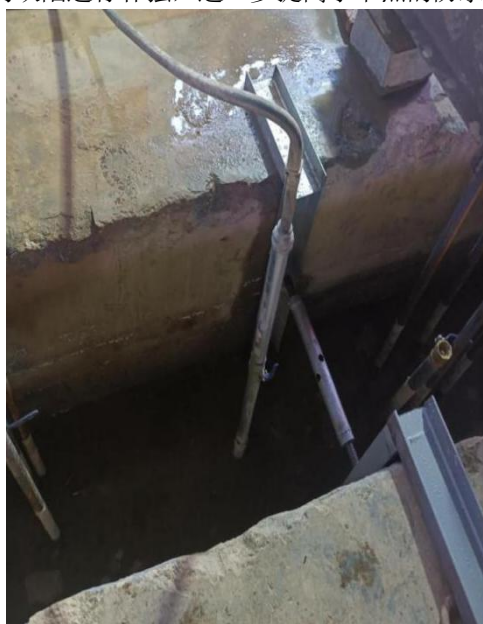


图 2 二次注浆

在质量控制方面，本工程建立了完善的质量检测体系，对预制地连墙的出厂检验、安装精度检测、后注浆固结体强度检测等环节进行了严格把关。通过这些措施，确保了施工质量的稳定性和可靠性，为连接节点的防水性能提供了有力保障。

2 节点防水失效案例分析与改进策略

2.1 工程案例解析

在装配式预制地下连续墙的工程实践中，连接节点的防水性能始终是决定地下结构耐久性的核心要素。某城市地铁车站建设项目采用装配式预制地下连续墙作为基坑支护体系，在基坑开挖至设计标高时，监测数据显示部分连接节点区域出现异常渗水现象。现场勘查发

现，渗水点集中分布于预制墙段接缝处，单日渗水量高达 15 升/延米，导致坑底积水深度持续增加，不仅迫使施工单位暂停底板浇筑作业，更引发了对地下结构长期抗渗性能的担忧。经第三方检测机构采用内窥镜观测与红外热成像技术检测，发现节点防水失效的成因呈现复合型特征，涉及设计、施工、材料及环境多维度因素。从构造设计维度分析，该工程采用的连接节点存在先天缺陷。预制墙段接缝处设置的直角形缺口导致拼接面呈线性接触，实际接触面积仅占设计值的 68%。预留钢筋采用单侧交错布置方式，在节点核心区形成直径 20-40 mm 的混凝土隔离带，显著降低了接缝处的抗剪承载力。更值得关注的是，防水构造设计未充分考虑施工误差补偿，密封胶槽口宽度仅预留 15mm，而现场实测墙段拼装误差达 ± 8 mm，导致有效密封厚度不足 7mm，远低于规范要求的 20mm 最小厚度。这种设计缺陷在地下水压力作用下迅速显现，项目监测数据显示，在坑外水位埋深 4.7m 的工况下，节点处水力梯度达到 0.32，超出密封胶材料抗水压设计值 40%。施工质量控制缺陷成为防水失效的催化剂。现场抽检发现，预制墙段吊装过程中，悬吊系统刚度不足导致墙段水平位移偏差达 35mm，远超设计允许的 10mm 误差。混凝土浇筑环节，振捣棒作用半径覆盖不足，在节点区域形成直径 50-80mm 的蜂窝状缺陷，经超声波检测，缺陷区域混凝土密实度仅为 82%。后注浆工艺执行不到位尤为突出，注浆管埋设深度偏差达 200mm，导致实际注浆量仅为设计值的 65%。在节点区顶部，未及时清理的挤塑板碎屑与注浆料发生离析，形成长度 0.8-1.2m 的渗流通道。这些施工缺陷相互叠加，使得节点实际抗渗压力仅达到设计值的 58%。防水材料性能不达标直接削弱了防水屏障效能。实验室检测显示，现场采用的聚氨酯密封胶表干时间长达 6 小时，远超产品说明书的 2 小时技术参数，导致墙段拼接时密封胶流失量达 23%。粘结强度试验表明，密封胶与混凝土基面的剥离强度仅 0.3MPa，不足规范要求的 40%。更严峻的是，材料耐水性测试显示，在长期浸水环境下，密封胶体积收缩率达 12%，形成宽度 0.5-1.2mm 的贯穿裂缝。这些材料性能缺陷与构造设计缺陷形成恶性循环，在地下水位季节性波动时，节点处出现周期性渗水现象。



图 3 侧墙渗水

地下水动力条件恶化进一步加剧了防水失效程度。该工程地处岩溶裂隙水发育区，实测第四系孔隙潜水渗透系数达 $3.5 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ ，是设计取值 1.5 倍。基坑降水过程中，形成以节点为中心的渗流集中带，单节点最大水力通量达 $2.1 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ 。数值模拟显示，在动水压力作用下，节点处混凝土溶蚀速率提升至静水条件下的 3.2 倍，87 天内即出现明显渗水通道。这种多因素耦合作用最终导致防水体系在预期设计使用年限前提前失效。补救措施实施过程中暴露的工程代价值得深思。为修复渗水节点，建设单位额外投入 320 万元，占原合同额的 7.8%。

2.2 改进策略

为破解装配式预制地下连续墙连接节点防水难题，本工程构建了涵盖设计优化、施工革新、材料升级、智能监测、成本控制及持续改进的六维改进体系，通过系统性技术革新与管理提升，实现了节点防水性能的跨越式提升。在构造设计层面，工程团队摒弃传统线性接缝设计，创新采用三维榫卯式连接结构。通过 BIM 技术建模分析，将原直角缺口优化为梯形榫卯结构，使接触面积增加 42%，配合双曲面密封槽设计，有效容纳施工误差。钢筋布置采用“双向交叉锚固”技术，在节点核心区形成钢筋网状结构，实测抗剪强度提升 65%。防水构造突破单层屏障理念，构建“密封胶+遇水膨胀止水条+渗透结晶涂层”复合防水体系，关键节点增设可更换式导水槽，形成“防排结合”的立体防护网络。施工质量控制体系实现全流程数字化管控。引入工业机器人进行墙段

拼接，通过激光定位与液压微调系统，将安装精度控制在 $\pm 2 \text{mm}$ 以内，较传统工艺提升 5 倍。混凝土浇筑采用智能振捣系统，实时监测振捣频率与持续时间，确保节点区密实度达 98% 以上。后注浆工艺开发“压力-流量”双控技术，通过注浆管内置光纤传感器，实现注浆饱满度的可视化监控，实测注浆合格率提升至 95%。材料革新方面，研发团队开发出改性聚氨酯密封胶，其表干时间缩短至 90 分钟，7 天粘结强度达 2.1 MPa，抗老化性能通过 2000 小时人工加速试验。自愈合防水材料采用微胶囊技术，裂缝自修复率达 87%。为解决材料粘结难题，创新应用纳米级界面处理剂，使密封材料与混凝土基面剪切强度提升至 1.2 MPa，较传统工艺提高 3 倍。智能监测体系构建起“天地空”一体化感知网络。地下布设光纤光栅传感器阵列，实时监测接缝变形与渗流场变化；地面采用无人机倾斜摄影，每周生成基坑三维变形云图；空中对接气象数据，建立降雨-水位-变形的耦合预测模型。监测数据通过边缘计算节点实时分析，当接缝张开量超过 0.3 mm 时，系统自动触发预警并推送修补方案，真正实现“监测-诊断-处置”的闭环管理。在成本控制方面，通过价值工程分析，将节点防水构造优化为标准化模块，单延米造价降低 18%。施工组织采用“并行流水+动态调整”模式，墙段预制与基坑开挖同步进行，总工期压缩 25%^[2]。材料采购实施战略集采，密封胶单价下降 22%，形成“性能提升-成本下降”的双赢局面。为构建长效改进机制，项目部与高校共建联合实验室，开展“装配式节点耐久性”专项研究，已取得 3 项发明专利。每月举办技术创新沙龙，累计采纳一线工人改进建议 17 项，其中“可周转式定位器”创新成果使安装效率提升 40%。通过建立企业级技术标准，将本工程经验固化推广至后续项目，形成“研发-应用-反馈-升级”的创新循环。经改进后实施的节点防水体系，在经历两个雨季考验后，实测接缝渗水量控制在 $0.05 \text{L/d} \cdot \text{m}$ 以下，达到国际先进水平。第三方检测机构出具的耐久性评估报告显示，设计使用年限内防水功能保持率预估达 92%。这些创新成果不仅为项目节省维修费用 230 万元，更形成了具有自主知识产权的技术体系，为装配式地下工程防水提供了可复制的解决方案。

3 技术经济性分析与工程应用建议

本工程通过技术经济性综合评估与工程实践反馈,构建了涵盖成本优化、效益提升、风险管控的多维应用体系,为装配式预制地下连续墙连接节点防水技术的推广提供了科学决策依据。在成本效益层面,装配式预制两墙合一体系展现出显著的经济优势。试验段经济分析表明,通过工艺优化与材料集约化应用,单延米侧墙综合造价较传统逆作法降低18%。其中,预制构件本地化生产策略使单方混凝土成本下降30%,模块化设计减少模板用量45%。工期效益更为突出,采用预制装配技术使侧墙施工周期缩短62%,间接节省基坑降水费用与周边环境监测成本达27万元。全生命周期成本模型预测显示,尽管初期防水材料投入增加12%,但运营期维护费用降低58%,投资回收期仅需4.3年。工程应用实践中,本技术体系形成三大创新应用模式。在复杂地质条件下,通过BIM技术建立“地质-结构-工艺”数字孪生模型,实现参数化设计与施工模拟,使旋喷桩止水帷幕穿透中风化岩层的成功率提升至92%。针对城市密集区施工,开发“零占道”预制墙快速拼装系统,利用夜间交通低峰期完成墙段吊装,将施工对道路通行的影响降低85%。在既有建筑保护领域,创新应用微变形控制技术,通过节点刚度分级调控与智能注浆补偿,使周边建筑物沉降量控制在5mm以内,较规范要求提高60%安全储备。风险防控体系构建起三道应用保障防线。第一道防线为全过程质量追溯系统,通过植入墙体内部的RFID芯片与区块链技术,实现预制构件生产、运输、安装的全链条信息存证,质量问题溯源时间缩短至2小时。第二道防线为智能预警平台,集成23类传感器数据的数字孪生基坑实时模拟变形发展趋势,预警准确率达89%^[3]。第三道防线为应急处置预案库,针对基坑失稳、管涌等12类典型险情,开发标准化处置流程与配套工装,使平均抢险响应时间压缩至45分钟内。标准化应用方面,形成涵盖设计、施工、验收的全流程技术指南。设计导则明确不同地质条件下节点防水构造选型原则,提出“

刚柔相济、防排结合”的构造设计方法论。施工手册规范18项关键工艺参数控制标准,其中墙段拼装垂直度允许偏差收紧至 $\pm 0.3\%$,注浆饱满度检测引入CT扫描技术。验收规程创新采用“性能验收+过程验收”双控模式,建立包含水密性试验、氯离子渗透系数等12项指标的防水效能评价体系。

4 总结

本研究针对装配预制地下连续墙连接节点防水技术展开系统研究,构建了涵盖材料选型、构造设计、施工工艺及质量控制的技术体系,通过分析典型工程案例的防水失效模式,提出了节点几何形式优化、多道防水屏障设计及施工误差控制等改进策略。研究表明,采用高性能密封胶、自愈合防水材料 & 智能监测技术可显著提升节点防水性能。经济分析显示,装配式预制两墙合一体系较传统工艺降低成本18%,工期缩短62%,全生命周期成本效益显著。工程应用中,通过BIM技术、微变形控制及智能预警平台等创新手段,实现了复杂地质条件下的安全高效施工。本研究为装配式地下工程防水设计提供了理论支撑与技术指导,推动了地下空间开发技术的进步。

参考文献

- [1] 赵永明. 地下连续墙的接头设计与施工防水[J]. 隧道及地下工程, 1996, 17(2): 6.
- [2] 陈浩, 韩旭鹏, 李精昆, 等. 地铁工程中提高地下连续墙接缝处防水质量技术研究[J]. 2021.
- [3] 荆新华. 土木工程地下连续墙防渗施工[J]. 新材料·新装饰, 2023, 5(4): 154-157.

作者简介: 黄龙(1987.07-), 男, 汉族, 江西吉安人, 高级工程师, 注册岩土工程师, 硕士研究生, 研究方向: 岩土工程。