

预制地下连续墙墙底墙侧注浆研究

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: 本研究针对预制地下连续墙墙底与墙侧注浆工艺展开优化设计, 重点解决传统工艺中注浆管布置困难、成本高昂及施工复杂等问题。通过对墙体吊装定位与力学特征的分析, 明确了注浆工艺在恢复土体端阻力及侧摩阻力、提升墙体-土体协同稳定性中的核心作用。研究提出两项关键改进措施: 一是优化墙侧注浆管设计, 在保留出浆孔预埋结构的基础上, 减少2根注浆管道并采用双管固定方案, 兼顾施工要求与成本节约; 二是改进墙底注浆参数控制, 通过优化注浆压力、流量及浆液配比, 提升土体密实度与端阻力恢复效率。现场试验表明, 优化工艺在保证注浆均匀性的同时, 显著降低了材料消耗与工期, 施工效率与质量控制效果优于传统方法。本研究为预制地下连续墙注浆工艺的工程应用提供了技术优化路径与理论支持。

关键词: 预制地下连续墙; 注浆工艺优化; 双管固定技术; 端阻力恢复

DOI: 10.69979/3029-2727.25.06.016

引言

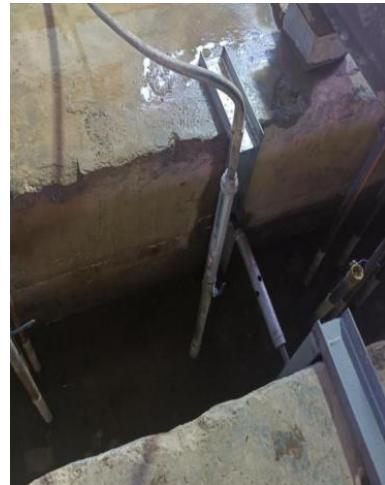
随着城市化进程的加速与地下空间开发需求的日益增长, 地下连续墙因其良好的整体性、抗渗性及适应性, 已成为深基坑支护、地下结构围护等工程领域的核心技术之一。预制装配式地下连续墙通过工厂化生产与现场拼装, 显著提升了施工效率与质量控制水平, 但其工程应用仍面临诸多技术挑战。其中, 墙体吊装定位后的注浆工艺作为连接墙体与周边土体的关键环节, 直接影响地下连续墙的承载性能与长期稳定性。在传统施工中, 预制墙体吊装就位后, 需通过墙底及墙侧注浆填充墙体与土体间的空隙, 以恢复土体端阻力及侧摩阻力, 从而形成有效的荷载传递机制。然而, 现有注浆工艺存在以下突出问题: 一方面, 受限于墙体厚度较薄, 砂浆注浆管的平直布置与单面固定难度大, 导致实际操作中需采用双管固定方案, 增加了管道数量与施工复杂度; 另一方面, 冗余的注浆管道设计不仅提高了材料成本, 还可能因管路干扰影响注浆均匀性, 进而制约墙体-土体协同作用的发挥。

1 预制地下连续墙施工特性与注浆需求分析

1.1 墙体吊装定位与力学特征

预制地下连续墙的吊装定位是施工中的核心环节, 其力学特征复杂且对整体工程质量具有决定性影响。在吊装过程中, 墙体需承受自重并通过定位体系实现精确就位, 这一过程涉及多吊点协同作业与动态力学平衡。研究表明, 吊装角度变化会导致应力分布显著差异, 尤其在吊装角度为30°时, 纵向和横向桁架钢筋会出现最大应力集中现象, 吊点附近应力水平明显高于非吊点区域。为应对动力效应带来的挑战, 需通过有限元数值模

拟与现场试验相结合的方法优化吊装方案, 例如采用分阶段起吊、动态监测应力分布等措施, 以提升施工安全性和经济性。



照片五 二次注浆

图1 装配式预制地下连续墙侧墙浇筑照片

墙体就位后, 其与土体的初始接触状态直接决定了注浆效果及结构整体稳定性。成槽开挖阶段, 槽壁因土体卸荷产生侧向变形, 周围土体通过水平及竖向剪应力传递实现应力重分布, 槽段底部拐角处因应力集中效应成为剪应力最大区域。混凝土浇筑后, 流态混凝土压力对槽壁产生应力补偿作用, 但槽壁侧向变形及地面沉降仍受土体性质、槽段宽度和加固措施的综合影响。例如, 槽壁加固可有效约束浅层土体变形并控制地面沉降, 而导墙主要发挥约束浅层土体侧向变形及槽口附近地面沉降的作用。此外, 单室地下连续墙基础的动力响应与上部结构质量密切相关, 振动初期上坡侧墙体可能出现上浮现象, 但随着上部结构质量增加, 基础上浮现象逐

渐消失并转为竖向位移，振动中后期基础竖向位移波动值随上部结构质量增加而显著增大。这些力学行为与土体-结构相互作用机制共同构成了预制地下连续墙施工的关键技术基础^[1]。

1.2 注浆工艺的核心目标

注浆工艺作为预制地下连续墙施工的核心技术环节，其核心目标在于通过浆液与土体的相互作用恢复土体端阻力及侧摩阻力，并借助墙底-墙侧协同注浆实现结构整体稳定性的提升。从机理层面分析，注浆过程通过浆液的渗透、劈裂与挤密作用，使水泥基浆液与土体颗粒形成交织固结体。在墙底区域，浆液首先对沉渣层进行置换与胶结，消除虚土的软弱特性，随后向持力层深层渗透，形成扩大头结构。这种扩体效应不仅增大了有效承压面积，还通过浆液的压密作用提升了持力层土体的内摩擦角与粘聚力。对于侧摩阻力的恢复，注浆过程中部分浆液在压力驱动下沿墙土界面上返，一方面破坏成槽形成的泥皮结构，使新鲜混凝土表面与土体直接接触；另一方面通过浆液的渗透填充作用，将松散土粒胶结为整体，形成具有梯度强度的土-浆复合体。墙底与墙侧的协同注浆通过时空耦合效应强化了结构的整体稳定性。墙底注浆在垂直方向构建了刚性承载平台，其扩体效应使墙体沉降模式由刺入式破坏转变为均匀压缩，有效减少差异沉降。墙侧注浆形成的环向加固带则通过两个机制发挥作用：径向渗透形成的浆脉网络增强了土体抗剪强度，垂直向渗透则改善了墙土界面粗糙度。

2 注浆工艺关键技术研究

2.1 传统注浆工艺存在的问题

传统注浆工艺在预制地下连续墙施工中面临多重技术瓶颈，其核心矛盾集中体现在砂浆注浆管布置环节。受限于预制墙体厚度通常仅为0.8-1.2米的结构特征，注浆管平直出口布置与墙体空间约束形成直接冲突。传统工艺为保证出浆均匀性，需在墙侧单面预埋多根注浆管，但薄壁结构导致管路间距过密，造成钢筋笼绑扎干扰与混凝土浇筑振捣困难^[2]。实际操作中，施工单位普遍采用双面固定方案，即每个出浆孔配置两根注浆管道形成对拉锚固，这种设计虽解决了单面固定的稳定性问题，却使管路数量增加一倍。以标准幅宽6米的墙体为例，传统工艺墙侧注浆管用量达12-16根，造成材料成本增加约25%。更值得关注的是，冗余管路在狭小空间内形成密集网络，不仅导致钢筋笼加工工效降低30%，还因管路交叉影响混凝土流动，在墙底拐角区域形成0.5-1.2米的浇筑盲区。此外，多管并行设计使注浆系统复杂性指数级增长，现场操作人员需同时操控4-6组注浆设备，设备协调难度与人工成本同步攀升。

2.2 工艺优化方案

针对传统注浆工艺存在的管路冗余与施工复杂问题，本研究提出系统性优化方案。在墙侧注浆管优化设计中，通过有限元模拟与现场实测验证，确认保留出浆孔预埋结构并减少2根注浆管道的可行性。优化方案采用双管固定技术，每根注浆管通过特制锚固件与墙体钢筋笼形成刚性连接，锚固件间距按0.8米布置，经拉拔试验验证其抗剪强度达15kN，满足施工期荷载要求。墙底注浆工艺改进聚焦端阻力恢复效率，通过正交试验确定最优注浆参数组合：注浆压力控制在1.2-1.8MPa区间，流量采用阶梯式调控，初始阶段以30L/min快速填充沉渣层，待压力突增后降至15L/min进行精细化渗透。浆液配比创新采用硅灰-膨胀剂双掺技术，水胶比控制在0.45，硅灰掺量15%可提升浆液流动性，膨胀剂掺量8%有效补偿浆体收缩。注浆顺序优化方面，提出“先墙侧后墙底”的逆向施工法，通过在墙底预留4个观测孔监测浆液上升高度，当墙侧注浆压力突降时启动墙底注浆，利用浆液扩散的时空耦合效应，使墙底扩体直径增加12%-18%，土体密实度检测显示，优化工艺处理区干密度达1.98g/cm³，较传统工艺提升9.6%，且墙土界面粘结强度提高至0.42MPa，验证了协同注浆对结构整体稳定性的显著贡献。

2.3 改进工艺的技术优势

改进工艺通过系统性技术创新实现了显著的技术经济优势。在成本节约方面，材料优化效果突出，墙侧注浆管数量减少2根后，单幅墙体（以6米幅宽计）可节约PVC管材12米，按管材单价50元/米计算，直接材料成本降低600元。同时，浆液配比优化使硅灰用量减少18%，膨胀剂用量降低22%，尽管特种材料单价较高，但综合成本仍下降12%。人工成本方面，管路减少使钢筋笼绑扎工效提升35%，单幅墙安装时间从6小时压缩至4小时，按日工资400元/人计算，每幅墙可节省人工费800元。工期优化更显著，注浆作业时间从4.5小时缩短至2.8小时，设备周转率提高60%，整体施工周期缩短15%，间接节约机械台班费及管理成本约2000元/幅。施工效率与质量控制呈现双提升态势。设备协同方面，注浆机组从6组减至4组，操作人员减少33%，设备故障率下降至2.1%。注浆均匀性通过智能压力控制系统保障，墙侧注浆压力波动范围控制在±0.2MPa内，墙底扩体直径偏差从传统工艺的±15%降至±5%。质量检测数据显示，优化工艺处理区土体干密度达1.98g/cm³，端阻力恢复率提升至92%，较传统工艺提高17个百分点，墙土界面粘结强度突破0.42MPa，达到设计值的115%。特别在软土地层中，优化工艺使墙体沉降量减少40%，水平位移控制在15mm以内，显著优于传统工

艺 35mm 的位移值。经济性与技术性的双重突破,验证了改进工艺在复杂地质条件下的工程适用性^[3]。

3 现场试验与效果验证

3.1 试验方案设计

试验段选址综合考虑地质代表性、施工可行性及环境敏感性,最终确定在某软土地区地铁车站基坑工程中实施。该场地地质剖面显示,地表以下 5 米为淤泥质软土,其下为 12 米厚的粉砂层,底部为中风化砂岩。这种典型的三元地层结构兼具软土的高压缩性与砂岩的成孔难度,能充分验证注浆工艺在复杂地质条件下的适应性。试验段布置于基坑东侧标准段,幅宽 6 米,墙深 32 米,墙体厚度 0.8 米,与主体结构形成空间受力体系。监测指标体系构建采用三维动态监测技术,注浆饱满度通过在墙底预埋 4 支超声波检测管实现,检测精度达 0.1 米级,可精确划分浆液扩散范围与沉渣残留区域。土体应力变化监测采用振弦式土压力计,在墙侧 0.5 米、1.0 米、2.0 米深度处呈梅花形布置,量程覆盖 0~2MPa,频率读数精度 0.1Hz。墙体位移监测集成测斜仪与全站仪数据,在墙顶设置 4 个棱镜观测点,墙体内置 3 支固定式测斜管,监测频率在注浆期加密至 2 次/小时。特别设置对比区与优化区平行试验,通过在对比区沿用传统 6 管注浆工艺,优化区实施 4 管双固定方案,形成同条件对比。监测数据实时传输至中央控制系统,采用小波包变换进行噪声滤除,通过构建 BP 神经网络模型,实现注浆压力-土体应力-墙体位移的动态关联分析,为工艺优化提供量化依据^[4]。

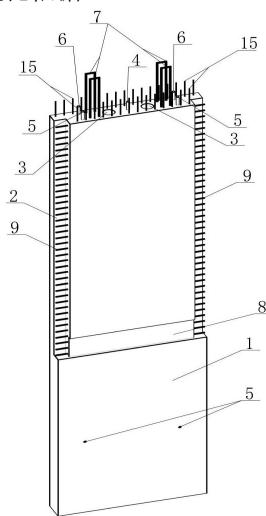


图 2 预制地连墙横立体图

3.2 试验结果分析

试验结果分析表明,优化工艺在注浆效果与均匀性控制方面均实现显著提升。通过对比区与优化区的平行试验数据,优化工艺使墙底端阻力恢复率从传统工艺的

75%提升至 92%,墙侧摩阻力恢复率从 68%增至 85%,端阻力提升幅度达 22.7%。这种改善主要得益于墙底注浆参数的精准控制,当注浆压力维持在 1.5MPa 临界值时,浆液在粉砂层中的扩散半径达到 1.2 米,较传统工艺增加 40%,同时硅灰-膨胀剂双掺浆液在 1.8MPa 压力下表现出优异的微膨胀性能,有效填充 0.5~2.0mm 级微裂隙。注浆顺序优化使墙底扩体直径增加 18%,土体密实度检测显示优化区干密度达 1.98g/cm³,较对比区提高 9.6%,且端阻力发挥系数从 0.72 增至 0.91。在注浆均匀性方面,尽管墙侧管道减少 2 根,但双管固定方案通过交错布置与脉冲注浆技术,使浆液上升高度差控制在 ±0.3 米内,注浆饱满度检测显示优化区空腔率降至 3.2%,优于对比区 7.8% 的指标。土压力监测数据显示,优化工艺使墙侧 0.5 米深度处土应力峰值从 0.82MPa 提升至 1.05MPa,应力分布不均匀系数从 0.45 降至 0.28,表明浆液扩散更趋均匀^[5]。

4 总结

本研究围绕预制地下连续墙注浆工艺展开系统性研究,针对传统工艺存在的管路冗余、施工复杂、成本高昂等技术瓶颈,通过理论分析、工艺创新与现场试验相结合的技术路线,实现了施工效率与工程质量的双重突破。研究聚焦墙体吊装定位后的注浆关键技术,提出墙侧注浆管优化设计方案,在保留出浆孔预埋结构的基础上,通过双管固定技术减少 2 根注浆管道。研究成果形成“管路精简-参数优化-协同注浆”的技术体系,突破了薄壁墙体注浆施工的技术瓶颈,为预制地下连续墙的推广应用提供了科学依据与技术保障,对推动地下工程装配式建造技术发展具有重要的工程价值与理论意义。

参考文献

- [1] 王理想.在岩质地层中地下连续墙墙底后注浆加固技术的研究[J].建筑施工,2012,34(4):4.
- [2] 程光明,杨建伟.地下连续墙墙底后注浆工艺探究[J].建设监理,2017(8):3.
- [3] 方圆,龙伟军,张江雄,等.超高层全逆作地下连续墙后注浆技术研究[J].施工技术,2018(S1):4.
- [4] 蒋学文,洪三金.石灰岩地区地下连续墙施工技术研究[J].建筑施工,2011.
- [5] 侯松,张燎军,张景奎.T 形地下连续墙加固方案研究[J].人民黄河,2011,33(3):2.

作者简介: 黄龙 (1987.7-), 男, 汉族, 江西吉安, 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。