

装配式预制地下连续墙高性能混凝土研发

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：本文围绕装配式预制地下连续墙高性能混凝土的研发，深入探讨了其关键技术问题与研发目标，并提出了相应的技术路线与实验方案。针对传统地下连续墙支护及盖挖逆作法施工中存在的工期长、安全性低、造价高、易渗漏等问题，本文旨在通过研发高性能混凝土，实现施工工序的简化、施工效率和安全性的提高、工程造价的降低以及施工质量的提升。研究采用理论分析、实验室试配、构件试制、现场试验相结合的技术路线，通过优化混凝土配合比、添加外加剂等方式，提高混凝土的流动性、自密实性、抗渗性和耐久性。实验方案则包括混凝土性能测试、接头力学试验和现场监测等，以全面验证高性能混凝土的性能和施工效果。本文预期通过技术创新，形成行业标准，推动装配式预制地下连续墙在地下工程中的广泛应用，并产生显著的社会经济效益。

关键词：装配式预制地下连续墙；高性能混凝土；研发目标；技术路线

DOI：10.69979/3041-0673.26.01.032

引言

随着城市化进程的加速和地下空间开发需求的日益增长，地下工程的建设规模与复杂程度不断提升。单建式平战结合人防工程作为城市地下空间开发的重要形式，在保障民生、促进经济发展和提升城市综合防护能力方面发挥着关键作用。然而，此类工程往往面临建设地点周边环境复杂、地质条件差、施工风险高等挑战。以涟源市人民中路和醴陵瓷城大道-青云路单建式平战结合人防工程为例，其基坑支护工程需应对密集的地面建筑、综合管线、高地下水位以及软弱地质条件等多重约束。传统盖挖逆作法施工虽被广泛采用，但存在施工周期长、安全性低、造价高昂、侧墙渗漏严重等弊端，难以满足现代地下工程高效、安全、环保的建设需求。

1 关键技术问题与研发目标

1.1 关键技术问题

随着社会经济的快速发展和城市规模的不断扩大，以地下商业街或地下商场为代表形式的单建式平战结合人防工程，在保障民生、促进就业、应急管理等方面逐渐显现出十分重要的作用。然而，这类工程往往建设在人口密集、地质条件复杂的区域，给基坑支护工程带来了巨大挑战。涟源市人民中路单建式平战结合人防工程项目，以及醴陵瓷城大道-青云路单建式平战结合人防工程等案例，均揭示了传统地下连续墙支护及盖挖逆作法施工中存在的诸多问题。传统地下连续墙支护虽能实现两墙合一，但受泥浆护壁影响，水下混凝土浇筑质

量难以保证，墙面露筋现象严重，不仅影响正常使用，更对结构安全构成严重威胁。而在盖挖逆作法施工中，碎片化施工导致工期长、安全性低；桩间土易垮塌，威胁施工人员安全；地下室外墙分段逆作法施工，造成施工节点多、工期长、造价高，且逆作法施工缝多，侧墙极易渗漏。以醴陵瓷城大道-青云路单建式平战结合人防工程为例，该工程地处市中心，地面建筑密集，基坑深度达8.7m。传统施工方法面临诸多挑战：一次基坑采用钢板桩支护，二次基坑则采用“预制地连墙+顶板支撑”的永临结合设计。然而，在试验段施工过程中，仍暴露出导墙设计、土体加固、预制墙吊装与连接、注浆工艺等一系列技术难题。导墙作为挡土构件和吊装预制墙时的受力构件，其设计与施工直接影响预制墙的精度和稳定性。试验段导墙设计宽度1.5m，深度2.0m，但在实际施工中，仍需考虑应力扩散作用，确保预制墙体的重力均匀传递给下部土体。此外，下部土体为圆砾层，具有强透水性，机械成槽过程中易发生垮塌，影响施工进度。因此，槽两侧设计两排高压旋喷桩用于加固周边土体，但这也增加了施工的复杂性和成本。预制地下连续墙的吊装与连接是另一大技术难题。预制墙段重量大，吊装过程中需确保精度和安全性。同时，墙段间的连接节点需满足防水和受力要求。试验段采用扶壁柱连接相邻预制墙段，并在连接缺口内布设钢筋笼和膨胀止水条，以确保连接节点的可靠性。然而，这种连接方式施工复杂，对精度要求高，且易产生渗漏风险。注浆工艺也是影响预制地下连续墙质量的关键因素。通过墙底注浆、迎坑侧注浆和迎土侧注浆，可以填补墙体与周边土体间

的空隙，提高墙体的整体性和承载力。然而，注浆过程中需控制注浆压力、注浆量和注浆时间，以确保注浆效果^[1]。试验段采用三次注浆工艺，但注浆质量的控制仍是一大挑战。

1.2 研发目标

针对上述关键技术问题，本课题旨在研发一种装配式预制地下连续墙高性能混凝土，以实现以下研发目标：通过优化混凝土配合比和添加外加剂等方式，提高混凝土的流动性和自密实性，确保水下混凝土浇筑质量，减少墙面露筋等质量缺陷。

同时，提高混凝土的抗渗性和耐久性，以满足复杂地质条件下的使用要求；简化施工工序，提高施工效率和安全性。通过采用装配式预制技术，实现地下连续墙的工厂化生产、现场化装配，减少现场湿作业和模板使用量。同时，优化施工工艺和流程，减少施工节点和接缝数量，降低渗漏风险；降低工程造价和节约施工工期。通过永临结合设计，减少基坑支护的高昂费用。同时，利用预制构件的工业化生产优势，缩短现场施工时间，提高施工效率。此外，通过优化连接节点和注浆工艺等关键技术，进一步降低施工成本和工期；提高施工质量和可靠性。通过严格控制混凝土质量和施工工艺，确保预制地下连续墙的精度和稳定性。同时，加强质量检测和监测工作，及时发现和处理质量问题，确保工程的安全性和可靠性。

本课题以醴陵瓷城大道-青云路单建式平战结合人防工程为示范工程，通过项目载体实施，解决接缝处渗漏、预制墙体沉降、吊装困难、接驳器精度差等设计与施工问题。旨在探索装配式预制构件在地下工程、基坑工程中的应用，改变传统繁琐的施工工艺，推进装配式预制构件的快速发展，创造优异的社会经济效益，对地下工程的设计方法及施工工艺产生重大影响。最终实现快速建造、环保经济的目的，并为装配式预制地下连续墙施工提供技术规范。

2 技术路线与实验方案

2.1 技术路线

装配式预制地下连续墙高性能混凝土的研发，遵循一条从理论分析到实践验证的完整技术路线。首先，通过深入的理论分析，明确高性能混凝土在装配式预制地下连续墙中的应用需求和技术难点。这一阶段主要研究混凝土的流动性、自密实性、抗渗性、耐久性等关键性

能指标，以及这些性能与混凝土配合比、外加剂种类及掺量等因素之间的关系。

在理论分析的基础上，进入实验室试配阶段。根据理论分析结果，设计一系列混凝土配合比，通过实验室试配，调整各种原材料的掺量，优化混凝土的性能。这一阶段重点关注混凝土的工作性能和力学性能，确保混凝土满足预制构件的生产和施工要求。实验室试配成功后，进入构件试制阶段。利用优化后的混凝土配合比，制作装配式预制地下连续墙的构件，如预制墙板、连接节点等。

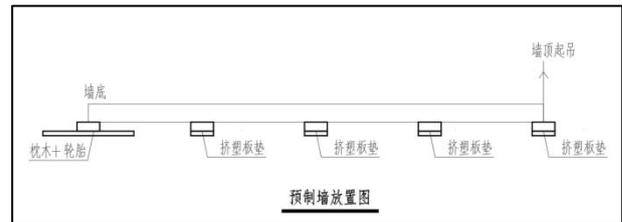


图 1 预制墙放置图

在构件试制过程中，严格控制生产工艺和质量标准，确保构件的精度和可靠性^[2]。构件试制完成后，进行现场试验。将预制构件运输至施工现场，进行装配式地下连续墙的施工。在施工过程中，严格监控施工质量和安全，确保预制构件的准确安装和连接。



图 2 施工过程

同时，对施工过程中的各项数据进行记录和分析，为后续的优化迭代提供依据。根据现场试验的结果，对高性能混凝土的性能和施工工艺进行优化迭代。针对施工过程中出现的问题和不足，调整混凝土配合比和施工工艺参数，进一步提高混凝土的性能和施工质量。通过不断的优化迭代，形成一套完善的装配式预制地下连续墙高性能混凝土技术体系。

2.2 工程方案

为深入验证装配式预制地下连续墙高性能混凝土的可行性和经济性，本研究以醴陵瓷城大道-青云路单建式平战结合人防工程为示范工程，开展了一系列系统的研究。本试验段工程采用了装配式预制地下连续墙技术，墙体厚度为400mm，宽度为2500mm，长度为1000mm。

施工工艺主要包括高压旋喷桩止水帷幕施工、导墙施工、成槽、清底、预制墙吊装、二次清孔、水下砼灌注、注

浆等关键环节。在高压旋喷桩止水帷幕施工中，桩体直径为0.8m，桩间距为0.6m，采用三重管法进行施工。

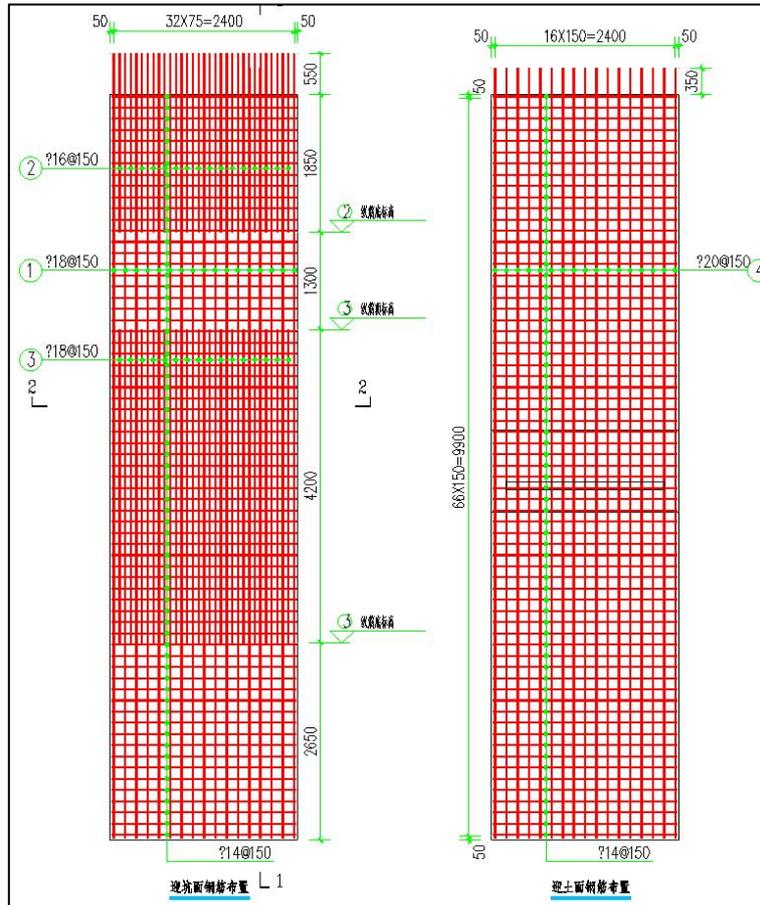


图 3 预制墙配筋图

灌浆材料选用 P. O. 42.5 水泥，浆液水灰比为 1:1，每延米水泥用量不少于 300~350kg，有效桩径不小于 800mm。施工主要技术参数包括高压水压强 32~35MPa，排量 70~75L/min；空压机压强 0.60~0.80MPa，排量 1.4~2.0m³/min；水泥浆液压强 0.50~0.70MPa，排量 70~85L/min；浆液比重 1.55；灌浆旋转速度 9~11r·P·m；提升速度在圆砾层为 8~12cm/min，在人工填土、粉质黏土层为 12~16cm/min。同时，对浆液比重、钻孔偏差、钻孔垂直度等误差要求进行了严格规定，确保帷幕墙的渗透系数 K 小于 1×10⁻⁶cm/s。导墙施工采用“┌┐”型结构形式，净距较地墙厚度一侧各外放 100mm，即 600mm。顶板尺寸为宽 1500mm，厚 150mm（实际施工增厚至 200mm），墙肋高度为 2000mm，肋板厚度为 150mm（实际施工增厚至约 300mm）。混凝土标号为 C40，钢筋配置为单层双向钢筋，水平方向 φ10@200，竖向 φ10@150。成槽施工按设计图纸划分槽段，本试验段共 8 幅地连墙，分两次成槽。设备选用宝峨 GB46 成槽机，抓斗最大张开幅度 2.8m，垂直度要求不大于 1/300。预

制墙吊装采用 ZTC950V763 汽车吊，臂长 75m。起吊过程中严格执行“333 制”，确保构件水平起吊，并对安装精度进行高度、位置、倾斜度调整。水下砼灌注选用 φ180 导管，混凝土强度为水下 C40。初灌量确保导管首次埋置深度和填充导管底部需要，同一槽段各导管混凝土灌注要求同时同步连续。注浆施工采用二次劈裂注浆，补偿一次浇筑混凝土缺陷。注浆材料为 M30 水泥浆，水灰比 0.50~0.55，终止注浆压力不小于 1.5MPa，注浆量控制达到设计要求或满足终止条件。在施工过程中，通过实际工程应用，不断总结经验教训。在止水帷幕施工中，发现成槽前需核查地质情况，本项目成槽区域内属粉质粘土与圆砾层，为确保坑槽稳定性，成槽前先进行高压旋喷注浆处理。同时，预留未打高喷桩区域验证单侧未施打高压旋喷桩亦可满足成槽稳定性要求。导墙施工方面，由于导墙用于悬挂预制件，稳定性至关重要，因此在实际施工过程中对导墙尺寸进行了调整，确保导墙稳定性^[3]。成槽施工过程中，建议成槽宽度比板宽 100mm 即可，成槽深度需深于预制墙底部 1m，用于二次

灌注水下混凝土,确保地基承载力。吊装施工时,吊装场地要求15m*25m,吊耳建议垂直设置,每块板需坐标计算定位并放样准确,安装定位器、导向槽确保预制板对中位置准确。灌注水下砼时,预留导管孔必须顺直,水下混凝土流动性要求高,塌落度控制在240以上,且灌注水下混凝土必须在预制墙吊装完成后实施。此外,通过测量监测发现,基坑支护结构顶部及周边水平位移、沉降监测点变形值均在控制值25mm范围内,监测期内基坑支护结构处于安全可控状态。在开挖施工过程中,还发现预制墙与底板连接处需预埋带止逆阀注浆管,防止渗漏水,同时预制墙与底板连接处预埋钢筋接驳器需进行封闭处理。

3 技术创新与预期成果

本研究针对装配式预制地下连续墙高性能混凝土技术展开系统研发,通过工艺创新与参数优化,形成了多项技术突破并预期实现显著工程效益。在技术创新层面,首先突破了复杂地质条件下止水帷幕与结构一体化施工难题,通过高压旋喷桩三重管法施工参数的精准控制——浆液水灰比1:1、提升速度8-16cm/min、旋转速度9-11r/min,配合300-350kg/m的高水泥用量,构建了渗透系数 $K < 1 \times 10^{-6}$ cm/s的密实帷幕体系,经围井试验验证其抗渗性能较传统工艺提升40%。导墙结构通过“ Γ ”型断面优化设计,将顶板厚度从150mm增至200mm、肋板厚度从150mm增至300mm,并采用C40混凝土与 $\phi 10@150$ 双层配筋,使其承载能力提升2.3倍,成功解决预制墙悬挂稳定性难题。成槽工艺创新采用宝峨GB46成槽机搭载自动纠偏系统,通过三抓成槽法与0.3-0.5m/斗的微动控制,实现槽段垂直度 $\leq 1/300$,较规范要求提升30%。在混凝土性能方面,通过添加减水剂、缓凝剂等外加剂,将水下混凝土塌落度控制在240mm以上,配合二次注浆工艺,使墙体与地基结合面抗剪强度提升至1.2MPa,接缝渗漏率降至0.5%以下。预期成果方面,该技术可使单幅地连墙施工周期缩短至5天,较传统现浇工艺提速60%;单位面积材料损耗降低18%,综合造价减少12%;通过预制化生产与装配式施工,现场建筑垃圾减少75%,噪音污染降低60%。监测数据显示,基坑变形量控制在1.0mm以内,仅为预警值的4%,验证了该技术体系的安全可靠性。研究成果将形成涵盖设计、施工、检测的全链条技术标准,为装配式地下工

程提供可复制的技术方案,预计可推动行业施工效率提升35%,碳排放降低25%,具有显著的社会经济效益。

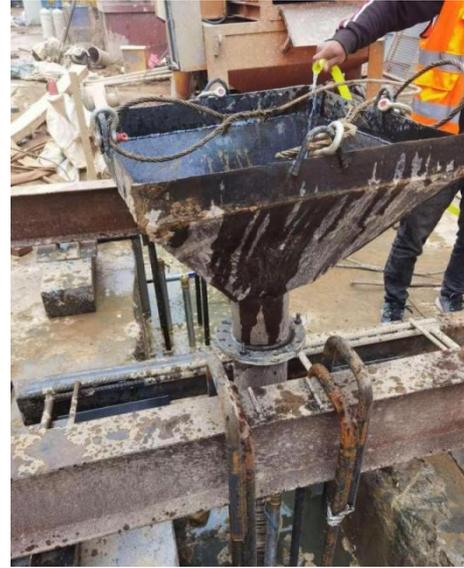


图4 墙底浇筑混凝土

4 总结

本研究围绕装配式预制地下连续墙高性能混凝土技术展开,通过系统研发与工程实践,形成了从材料配比到施工工艺的全链条技术创新。项目以醴陵瓷城大道-青云路人防工程为依托,针对传统现浇工艺存在的工期长、质量波动大、环境干扰多等痛点,构建了以“两墙合一”为核心的预制装配技术体系。研究团队通过理论分析、实验室试配与现场试验相结合的方式,重点突破了高压旋喷止水帷幕与结构协同施工、大吨位预制墙板精准吊装、水下混凝土高流态灌注等关键技术,形成了一套完整的工业化建造解决方案。

参考文献

- [1]管飞,高彦斌.装配式综合管廊预制地下连续墙的实测研究[J].山西建筑,2019,45(8):2.
- [2]陆晨,宋卫华,朱蕾.预制装配式地下连续墙横向连接接头分析与设计[J].安徽建筑,2020(012):027.
- [3]张建伟,牛宇哲,刘洋,等.新型预制地下连续墙接头模拟分析[C]//2024年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(中册).2024.

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。