

装配式混凝土结构施工质量控制关键技术及应用研究

杨征益

天津国际工程建设监理有限公司 天津 300171

摘要：装配式混凝土结构作为建筑工业化的重要形式，其施工质量直接关系到建筑的安全性、耐久性与使用功能。相较于传统现浇结构，其质量控制重点前移至设计、生产与物流环节，并在现场装配阶段呈现出新的特点与挑战。本文系统分析了装配式混凝土结构从构件生产、运输存储到现场吊装、连接成型全流程中的质量风险点。在此基础上，重点研究了以BIM技术为核心的数字化协同设计、基于物联网的构件生产全过程追溯、高精度测量与智能纠偏的吊装定位、以及套筒灌浆连接等关键节点的智能化监控等四项质量控制关键技术。最后，结合工程案例，阐述了这些关键技术的集成应用路径与成效，旨在为提升我国装配式建筑的整体施工质量水平提供理论依据与实践参考。

关键词：装配式混凝土结构；施工质量；质量控制；智能建造

1 引言

在“双碳”目标与建筑业转型升级的背景下，装配式建筑以其绿色、高效、节能的优势迎来快速发展期。装配式混凝土结构是其中的主流形式。然而，其“设计-生产-运输-装配”的离散式建造模式，打破了传统现浇施工的连续性，使得质量风险点更为分散且隐蔽，对全过程、精细化的质量控制提出了更高要求。常见的质量通病如构件尺寸偏差、预埋件定位不准、接缝渗漏、套筒灌浆不实等，不仅影响观感与使用，更可能引发结构安全隐患。因此，系统识别施工全过程的关键质量控制环节，并研究与之匹配的现代技术手段，是实现装配式建筑高质量发展的核心课题。本文旨在构建一个覆盖装配式混凝土结构施工全链条的质量控制关键技术体系，并探讨其集成应用模式。

2 装配式混凝土结构施工全流程质量风险分析

质量控制始于风险识别。装配式混凝土结构的施工质量风险贯穿于以下四个主要阶段：

(1) 构件生产阶段：这是质量控制的源头。风险集中于：①模具的精度与刚度不足导致构件外形尺寸超差；②钢筋下料、绑扎及预埋件（如套筒、吊钉、管线盒）定位偏差，直接影响后续装配；③混凝土配合比、浇筑、振捣、养护不当，导致构件强度不足、裂缝、蜂窝麻面等。

(2) 运输与存储阶段：此阶段风险具有动态性和偶然性。包括：①运输途中因固定不当造成的构件磕碰、裂缝；②现场堆放场地不平整、垫块设置不当导致的构件变形或损坏；③存储期间缺乏保护，导致预埋件锈蚀、饰面污染。

(3) 现场吊装与安装阶段：这是质量控制的核

心环节。风险点包括：①测量放线误差及首层基准面偏差的累积放大效应；②吊装过程中因吊点不合理、操作不当引起的构件应力集中或碰撞；③安装时相邻构件的标高、轴线、垂直度调节失控，导致接缝宽度不均、错台。

(4) 节点连接与后浇施工阶段：此阶段风险最为隐蔽且致命。主要包括：①钢筋套筒灌浆料的强度、流动性不达标，灌浆操作工艺（封仓、排气、保压）不规范，导致灌浆不饱满，严重影响结构整体性；②浆锚搭接、螺栓连接等节点的施工精度与紧固力不足；③后浇混凝土区域（如叠合层、梁柱节点）的界面处理、模板支设与浇筑质量缺陷。

上述风险环环相扣，传统依赖人工经验、事后检查的质量管理方式已难以应对。必须引入以预防为主、过程可控、数据驱动的关键技术。

3 施工质量控制关键技术研究

针对上述风险，本文提出并深入剖析四项关键技术：

3.1 基于BIM的数字化协同设计与生产深化技术

BIM技术是装配式建筑实现全过程质量管控的“数字基石”。

设计协同与碰撞检查：在三维协同设计环境中，整合建筑、结构、机电、装修各专业模型，提前发现并解决管线与预埋件、钢筋与套筒之间的空间冲突，从源头避免“错漏碰缺”流入生产与施工环节。

构件深化设计与数字化加工图：基于统一BIM模型，进行构件拆分与深化设计，自动生成包含所有几何信息、钢筋明细、预埋件定位的数字化加工图。该图纸可直接驱动自动化生产线（如数控机床切割钢筋、智能模具定位），确保生产精度。

施工模拟与方案优化：通过4D施工模拟（BIM+时

间), 可视化推演构件吊装顺序、塔吊运行路径、临时支撑布置, 优化施工方案, 提前识别潜在的质量与安全风险, 并对一线工人进行直观交底。

3.2 基于物联网的构件生产与物流追溯技术

为每个预制构件赋予唯一的“身份证”(如RFID芯片或二维码), 构建全过程质量追溯系统。

生产过程监控: 在生产线关键工位(钢筋绑扎、模具合模、混凝土浇筑、养护窑)设置传感器或数据采集点, 将构件对应的材料批次、生产时间、工艺参数、质检报告等信息自动关联至其“身份证”。

物流与仓储管理: 通过RFID读写器, 实时追踪构件出厂、运输轨迹、进场验收、堆场位置等信息, 实现构件状态的可视化管理, 防止误用、错用。

现场扫码调取: 现场施工人员通过移动设备扫描构件二维码, 即可即时调取该构件的全部生产信息、三维模型、安装指导视频及验收标准, 实现信息向作业面的精准传递。

3.3 高精度测量与智能纠偏的吊装定位技术

确保构件“装得准”是保证结构精度和接缝质量的前提。

高精度放样与基准传递: 采用高精度全站仪、激光扫平仪等进行现场控制网测设和放样, 减少测量累积误差。推广使用放样机器人, 将BIM模型中的三维坐标直接投射到作业面, 极大提高放线效率和精度。

智能吊装与就位辅助系统: 在塔吊吊钩或构件上安装无线倾角传感器、位移传感器和摄像头, 实时将构件的空中姿态、位置数据传输至控制终端。操作人员结合BIM模型, 可实现构件的毫米级微调与精准就位。

安装精度快速检测与反馈: 构件就位后, 使用三维激光扫描仪对已安装部分进行快速扫描, 生成点云模型, 与设计BIM模型进行比对, 自动分析位置偏差并生成报表。该数据可用于指导后续构件安装的纠偏, 形成“测量-安装-校验”的闭环质量控制。

3.4 套筒灌浆等关键节点的智能化监控技术

针对套筒灌浆这一最关键的隐蔽工程, 必须实现过程的可视化与可追溯。

灌浆料质量监控: 对灌浆料的水料比、搅拌时间、初始流动度进行严格监测和记录, 确保材料性能达标。

灌浆过程实时监测系统: 采用灌浆饱满度智能监测技术。一是在每个套筒出浆口安装透明管或电子传感器, 直观观察或电子信号确认浆料流出; 二是更先进的内窥镜摄像法或预埋传感器法(如电阻率传感器、超声传感器), 在灌浆过程中或结束后, 直接探测套筒内部

浆料填充情况, 数据实时上传云端。

工艺标准化与监控: 强制要求采用手持式专用电动灌浆机, 并对其灌浆压力、流量进行监控。灌浆操作全程录像, 与构件信息绑定存档, 实现责任可追溯。

4 关键技术的集成应用与工程实践

上述技术并非孤立存在, 其最大效能在于系统性集成应用。以某装配式混凝土剪力墙住宅项目为例, 其质量控制技术集成应用路径如下:

(1) 前期策划阶段: 建立全专业BIM模型, 完成构件拆分、深化设计和数字化交底。制定基于物联网和BIM的质量追溯整体方案。

(2) 构件生产与运输阶段: 工厂依据BIM深化模型组织生产, 关键数据录入MES系统并与构件RFID绑定。运输车辆安装GPS, 构件进场时扫码验收。

(3) 现场施工阶段:

吊装前: 使用放样机器人进行测量定位。

吊装中: 采用带传感辅助的智能吊装系统, 吊装人员通过平板电脑查看构件信息和就位指引。

节点施工: 套筒灌浆作业采用智能监测系统, 灌浆数据与视频自动上传至项目管理平台。关键部位(如首层、转换层)安装后, 采用三维激光扫描进行阶段性精度复核。

(4) 协同管理平台: 构建一个集成BIM模型、物联网数据、质量验收表单、问题整改流程的数字项目管理平台。所有质量信息(设计、生产、运输、施工、检测)在平台上汇聚、共享与流动。质量隐患可通过平台发起、指派、整改、闭合, 实现全过程透明化、可追溯的精细化管理。

应用成效: 该项目的实践表明, 通过关键技术的集成应用, 实现了以下质量提升: ①构件安装一次合格率提升至98%以上; ②套筒灌浆等隐蔽工程验收一次通过率达到100%; ③整体施工精度(层高、垂直度)显著优于规范要求; ④质量问题追溯时间从平均2天缩短至即时可查; ⑤有效减少了因返工造成的材料浪费和工期延误。

5 当前挑战及应对策略

尽管关键技术为装配式混凝土结构的施工质量控制带来了革命性提升, 但在推广应用上仍面临诸多挑战, 需系统性地加以应对。

5.1 当前面临的主要挑战

(1) 技术与成本壁垒: BIM、物联网、智能传感等技术的软硬件投入较高, 对中小型施工企业和预制构件厂构成了一定的成本压力。同时, 掌握跨学科知识的复合型人才严重短缺, 制约了技术的深度应用。

(2) 数据孤岛与标准缺失：设计、生产、施工、监理各方使用的软件平台不一，数据格式互不兼容，形成“数据孤岛”，阻碍了信息的无缝流转与全链条追溯。此外，针对智能检测设备（如灌浆饱满度监测仪）的行业认证标准、数据交付标准尚不完善。

(3) 管理流程与组织变革滞后：新技术的引入不仅是工具革新，更要求传统的项目管理流程、组织架构乃至合同模式进行深刻变革。如何将数字化质量控制流程与现有的质量安全责任体系深度融合，是管理层面临的难题。

5.2 应对策略建议

(1) 推行梯度化应用与政策引导：鼓励企业根据自身规模和发展阶段，从单项技术应用（如仅应用BIM进行碰撞检查）起步，逐步向集成系统升级。政府可通过补贴、示范项目评选、税收优惠等政策，降低企业初期投入风险。

(2) 加快标准体系与生态建设：行业主管部门应牵头制定覆盖设计、生产、施工、验收全过程的数字化交付与信息互认标准，推动建立开放、协同的产业互联网平台。同时，加快制定智能建造设备与工法的技术标准。

(3) 深化产教融合与流程再造：高校与职业院校应调整课程体系，培养“懂技术、善管理、精工艺”的新型工程人才。企业则需主动开展内部培训，并围绕数字化质量控制主线，重构岗位职责、审批流程和绩效考核体系，建立适应智能建造的扁平化、网络化组织。

6 结论

装配式混凝土结构的施工质量控制是一个涉及多环节、多主体的复杂系统工程。本研究通过全流程风险分析，明确了质量控制的关键痛点，并针对性提出了以BIM协同、物联网追溯、智能测控和节点过程监控为核心的四大关键技术。实践证明，将这些现代信息技术与建造工艺深度融合，构建“数据驱动、过程可视、闭环管

理”的智能质量控制模式，是有效提升装配式建筑施工质量的根本路径。

未来，随着人工智能、数字孪生、机器视觉等技术的进一步发展，装配式建筑的质量控制将向更深度的智能化迈进：如利用AI图像识别自动检查构件表面缺陷；通过数字孪生体实时映射物理建筑的施工状态，实现质量风险的预测性预警；以及施工机器人自主完成高精度安装作业等。持续推动技术创新与管理模式变革，将是保障装配式建筑行稳致远的关键。

综上所述，装配式混凝土结构施工质量的提升，是一条以技术革新为驱动、以管理变革为保障、以标准建设为基础的系统工程。本文所研究的四项关键技术及其集成应用模式，构成了当前阶段提升质量控制效能的“工具箱”。面对挑战，唯有坚持系统性思维，推动技术、管理、标准、人才协同发展，才能将装配式建筑的质量优势从理论转化为普遍的现实。展望未来，随着数字孪生、人工智能与机器人技术的深度融合，装配式建筑的施工质量将迈向更高程度的可预测、可控制与可保证，为建造高品质、高性能的现代化建筑提供坚实支撑。

参考文献

- [1]张季超, 楚先锋, 王鹏, 等. 物联网技术在预制构件生产与质量管理中的应用研究[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(03): 1-6.
- [2]叶浩文, 周冲, 孙晖. 基于三维激光扫描的装配式建筑安装精度检测方法研究[J]. 图学学报, 2021, 42(01): 143-149.
- [3]刘晓刚, 马荣全, 徐文, 等. 钢筋套筒灌浆饱满度检测技术研究与应用[J]. 建筑技术, 2020, 51(04): 390-393.
- [4]樊则森, 李张苗. 智能建造在装配式建筑中的应用探索与实践[J]. 城市住宅, 2021, 28(05): 46-50.
- [5]肖绪文, 冯大阔. 关于推动我国智能建造与建筑工业化协同发展的思考[J]. 工程管理学报, 2020, 34(06): 1-6.