

装配式建筑结构性能与施工质量控制研究

李保林

6103221974****0719

摘要: 随着我国建筑业向工业化、绿色化、智能化转型升级,装配式建筑作为建筑产业现代化的核心载体,迎来了前所未有的发展机遇。然而,其结构性能的可靠性与施工过程的质量控制仍是行业关注的焦点与难点。本文旨在系统研究装配式建筑的结构性能特点,并深入探讨其施工全过程的质量控制关键技术与管理策略。首先,论文阐述了装配式建筑的发展背景与研究意义,分析了其结构体系(如装配整体式混凝土结构、钢结构、木结构)的性能优势与关键力学问题,包括节点抗震性能、整体性以及耐久性。其次,重点剖析了装配式建筑“设计-生产-物流-吊装-节点处理”全链条施工工艺,并识别了各环节中的质量风险点。在此基础上,从技术和管理两个维度,提出了基于BIM技术的信息化协同管理、预制构件制作精度控制、施工安装精度测量与调整、节点连接质量控制等关键技术措施,以及构建全过程、多主体的质量保证体系。最后,对装配式建筑未来的发展趋势进行了展望,以期为提升我国装配式建筑的整体质量水平提供理论参考和实践借鉴。

关键词: 装配式建筑; 结构性能; 节点连接; BIM技术

DOI: 10.69979/3060-8767.25.09.058

1 引言

1.1 研究背景与意义

传统现浇建筑模式因其粗放式、高能耗、高污染、劳动力密集等特点,已难以适应我国新时代高质量发展和“双碳”战略目标的要求。在此背景下,装配式建筑凭借其标准化设计、工厂化生产、装配化施工、一体化装修、信息化管理、智能化应用等现代化特征,成为推动建筑业变革的重要方向。国家及地方政府连续出台多项政策,如《国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见》等,为装配式建筑的发展提供了强有力政策支持。

然而,与成熟的现浇结构相比,装配式建筑的结构是由若干预制构件通过现场连接组装而成,其结构性能在很大程度上依赖于预制构件的自身质量、节点连接的可靠性以及施工安装的精度。任何环节的疏漏都可能埋下质量隐患,影响建筑的整体安全性、适用性和耐久性。近年来,个别项目出现的构件开裂、接缝渗漏、节点损伤等问题,暴露出其在结构性能和施工质量控制方面仍存在短板。因此,系统研究装配式建筑的结构性能机理,构建一套科学、高效、全过程的质量控制体系,对于保障工程安全、提升建筑品质、推动行业健康可持续发展具有极其重要的理论价值和现实意义。

1.2 国内外研究现状

国外发达国家如日本、德国、美国等,装配式建筑发展历史较长,技术体系成熟。其研究重点已从基本结构性能转向高性能建材、高韧性节点、自动化施工机器人以及基于物联网的智慧工地管理。尤其在抗震性能方面,通过大量试验和理论研究,发展了多种延性好、耗能能力强的节点形式。

国内研究起步相对较晚,但发展迅速。目前,国内学者的研究多集中于:

节点性能研究: 对各类装配式混凝土节点(框架节点、剪力墙节点)的抗震性能、抗剪性能进行了大量试验与有限元模拟分析。

结构体系研究: 探讨装配式剪力墙结构、框架结构的整体受力性能及设计方法。

质量控制研究: 针对构件生产缺陷、安装偏差等具体问题,提出相应的检测与处理办法,并开始探索BIM、RFID等技术在质量管理中的应用。

总体而言,现有研究多侧重于某一特定环节或技术点,缺乏从“结构性能本质”到“施工质量控制”的全链条、系统化的整合性研究。本研究旨在弥补这一不足,将性能研究与质量控制实践相结合,形成一个闭环的管理体系。

1.3 研究内容与方法

本研究主要包含以下内容:

分析装配式建筑主要结构体系的类型及其核心性能特点，阐明节点性能对整体结构的关键影响。

梳理装配式建筑从设计到运维的全生命周期施工流程，识别各阶段关键质量风险点。

从技术和管理两个层面，系统构建装配式建筑施工质量控制的关键技术与体系策略。

结合行业发展趋势，对未来质量控制模式的演进进行展望。

研究方法主要包括：文献研究法、系统分析法、案例分析法与归纳总结法。

2 装配式建筑结构性能分析

2.1 主要结构体系及其特点

装配式建筑主要结构体系包括装配整体式混凝土结构、装配式钢结构、装配式木结构以及钢-混凝土组合结构等。其中，装配整体式混凝土结构在我国应用最为广泛。

装配整体式混凝土结构：其核心是“等同现浇”设计理念，即通过可靠的节点连接，使装配后的结构在力学性能上等同于现浇整体式结构。主要包括框架结构、剪力墙结构及框架-剪力墙结构。其性能优势在于构件工厂化生产，质量稳定，尺寸精确；现场湿作业大幅减少，施工速度快。性能挑战在于节点的强度和延性是实现“等同现浇”的关键。

装配式钢结构：具有强度高、自重轻、抗震性能好、施工周期极短的特点。其性能控制重点在于构件加工精度、高强度螺栓连接质量、现场焊接质量以及防火防腐处理。

装配式木结构：绿色环保，节能保温性能优异。其性能关键在于木材的等级处理、连接件（金属齿板、螺栓等）的强度以及结构的防潮防腐。

2.2 节点连接性能研究

节点是装配式结构的“生命线”，其性能直接决定了结构的整体性、稳定性和抗震能力。

框架节点：主要为梁柱节点。常见形式有套筒灌浆连接、锚环连接、牛腿式连接等。研究重点是其抗弯能力、剪切刚度、耗能能力及破坏模式。在地震作用下，理想的节点应具备足够的强度和良好的延性，形成“强柱弱梁、强节点弱构件”的耗能机制。

剪力墙节点：包括竖向连接（墙身与基础、墙身与

墙身）和水平连接（墙与楼板）。竖向连接通常采用灌浆套筒、浆锚搭接等方式传递钢筋应力。其性能关键在于保证钢筋应力的有效传递，避免应力集中。水平接缝的抗剪性能是保证剪力墙协同工作的关键。

楼板连接：预制楼板之间的接缝处理影响楼盖的整体性。需通过后浇混凝土带和连接钢筋保证其水平力的有效传递。

2.3 整体结构性能与耐久性

整体性能：通过合理的节点设计和施工，现代装配式结构能够达到与现浇结构等同的整体性、刚度和稳定性。大量振动台试验和理论研究已证明了这一点。

耐久性：工厂化生产的构件养护条件好，混凝土密实度高，从而提升了构件本身的抗渗、抗碳化及耐腐蚀性能。然而，耐久性风险点转移到了现场连接的“缝”上。接缝处的防水、密封材料的老化、灌浆料的不密实等问题，都可能成为耐久性的薄弱环节，需要重点关注。

3 装配式建筑施工流程与质量风险识别

装配式建筑施工是一个多阶段、多专业协同的系统工程，其流程可分解为：设计深化→构件生产→物流运输→现场吊装安装→节点处理与后浇→室内装修。

3.1 设计深化阶段

风险点：设计与生产、施工脱节；构件拆分不合理，导致无法生产或吊装；预留预埋（如钢筋、套筒、管线）定位不准，导致现场无法对接；节点设计复杂，难以施工。

3.2 构件生产阶段（工厂内）

风险点：混凝土配合比不当，导致强度不足或开裂；钢筋尺寸、间距偏差，影响与套筒的连接；预埋件（吊点、套筒）安装偏差过大；模具变形或清理不净，导致构件尺寸误差或表面缺陷；养护制度不规范，影响早期强度。

3.3 物流运输与堆放阶段

风险点：构件运输途中因固定不当发生碰撞、开裂；现场堆放场地不平整、支撑点不合理，导致构件变形或损坏。

3.4 现场吊装与安装阶段

风险点：测量放线偏差，导致构件定位不准；吊装

方案不当，发生碰撞或倾覆；临时支撑设置不牢靠，结构失稳；构件安装标高、垂直度、平整度偏差超限。

3.5 节点处理与后浇阶段

风险点：钢筋与套筒对中失败，无法插入；灌浆料质量不合格或留置时间过长；灌浆操作不规范（未封堵、排气不净、压力不足）导致套筒内不密实，形成重大质量隐患；后浇混凝土界面处理不干净、浇水不足，导致新旧混凝土结合不良。

4 装配式建筑施工质量控制关键技术与体系建设

质量控制需从事后补救转向事前预防和事中控制，依托技术和管理双轮驱动。

4.1 基于信息化的全过程协同管理技术

BIM 技术应用：建立全专业 BIM 模型，进行碰撞检查、净高分析，从源头避免设计冲突。进行施工模拟，优化吊装顺序和施工方案。将 BIM 模型与预制构件生产管理系统（PCIS）对接，实现设计数据直接驱动生产线，确保加工精度。在施工现场，利用 BIM 模型进行三维交底，指导工人精确安装。

物联网（IoT）与 RFID 技术：为重要构件粘贴 RFID 芯片或二维码标签，集成构件型号、生产信息、质量检验数据、运输状态、安装位置等信息。通过手机扫描，即可实现构件从工厂到吊装的全过程质量追溯，确保“对号入座”，防止错用。

4.2 预制构件生产质量控制

模具精度控制：定期检测并校正模具，确保其刚度和尺寸稳定性。

钢筋工程控制：采用自动化钢筋加工设备，确保钢筋尺寸精确。采用专用定位工装，保证预埋套筒、预埋件的安装精度在毫米级。

混凝土浇筑与养护：严格执行配合比，采用振动台等设备保证密实度。采用自动控温控湿养护窑，实现标准养护。

4.3 施工安装精度测量与调整技术

高精度测量技术：采用全站仪、激光扫平仪等设备，对放线、构件安装进行精准测控。推广使用“测量机器人”，实现自动化、高效率的精度复核。

可调式临时支撑系统：采用可微调的斜支撑和竖向

支撑，在构件就位后，可方便地进行标高和垂直度的精细调整。

4.4 节点连接质量控制核心技术

钢筋套筒灌浆连接：

材料控制：严格检验灌浆料质量，确保其流动度、强度、竖向膨胀率等指标合格。

工艺控制：推行“灌浆枪持压压浆法”，确保套筒内腔充盈密实。严格进行工艺检验和现场平行试件制作，这是验证灌浆质量是否合格的硬性指标。

过程监控：对灌浆作业进行全程录像，实现责任可追溯。

后浇混凝土质量控制：对预制构件结合面进行凿毛、清理处理，在浇筑前充分浇水湿润。采用高流动性、微膨胀的自密实混凝土，确保其能充分填充每一个角落，并与老混凝土牢固结合。

4.5 全过程质量保证体系的构建

组织体系：建立建设方、设计、生产、施工、监理多方协同的质量管理小组，明确各方责任界面。

制度体系：编制《装配式建筑施工质量标准化手册》，明确各环节的工艺标准、验收标准和记录文件。建立样板引路制度，重大工序（如灌浆）实行持证上岗制度。

检验体系：建立“工厂首件验收、进场抽检、安装测量、连接节点专项检验”的四级检验制度。运用回弹仪、钢筋扫描仪、灌浆内窥镜等工具进行实体质量检测。

持续改进：建立质量问题数据库，定期分析质量通病原因，反馈至设计和生产环节，形成“设计-生产-施工”闭环反馈的持续改进机制（PDCA 循环）。

5 结论与展望

5.1 结论

装配式建筑的结构性能，特别是抗震性能和整体性，核心在于节点。通过科学的“等同现浇”节点设计和高精度的施工，完全可以保证其结构安全可靠。

装配式建筑施工质量是一个涉及设计、生产、吊装、连接的全系统问题。其质量控制必须树立“全过程、一体化”的管理思想，打破各环节间的信息壁垒。

质量控制需以现代信息技术（BIM、IoT）为支撑，实现数据的无缝传递和过程的透明化、可追溯化，这是提升管理效率和质量保证能力的关键。

节点连接（尤其是灌浆套筒）是质量控制的“重中

之重”，必须通过严格的材料检验、工艺控制、平行试件检验和过程监控来确保万无一失。

建立一套权责清晰、标准明确、检验严格、持续改进的质量保证体系，是确保装配式建筑长期质量的根本保障。

5.2 展望

未来，装配式建筑的质量控制将向更加智能化、一体化的方向发展：

智能建造深度融合：施工机器人将广泛应用于构件安装、焊接、灌浆、打磨等危险或重复性高的作业，彻底消除人为操作误差。基于5G和AI的图像识别技术，可自动识别构件安装偏差和节点缺陷。

“建筑工业互联网”平台：将设计、生产、物流、施工、运维全部接入统一平台，实现全生命周期数据的实时采集、分析和决策，质量风险可被自动预警和干预。

新型连接技术与材料：干式连接、预应力连接等新型节点技术将不断成熟，进一步简化施工，提高质量可靠性。高性能灌浆料、新型密封胶等材料性能将不断提升。

质量保证与保险机制结合：引入工程质量潜在缺陷保险（IDI），通过保险公司的第三方风控团队进行全

过程质量风险评估和监督，利用市场机制倒逼参建各方提升质量责任意识。

通过技术迭代和管理创新双管齐下，装配式建筑的质量必将得到越来越坚实的保障，从而更好地发挥其综合优势，推动中国建造迈向高质量的新时代。

参考文献

- [1] 国务院办公厅. 关于大力发展装配式建筑的指导意见[Z]. 2016.
- [2] 李云峰, 王翠玲. 装配式混凝土结构节点抗震性能研究进展[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(5):1-15.
- [3] 刘洋, 张季超. 装配式建筑质量管理常见问题与对策研究[J]. 施工技术, 2019, 48(18):75-78.
- [4] 赵勇, 王晓峰, 李碧峰. 装配整体式混凝土结构套筒灌浆连接技术研究与应用[J]. 建筑技术, 2018, 49(10):1039-1042.
- [5] PrefabFoundation. QualityManagementinPrefabricatedConstruction[M]. 2019.
- [6] 王宏, 叶浩文, 周冲. 基于BIM的装配式建筑全过程质量追溯体系研究[J]. 图学学报, 2021, 42(2):312-319.