

装配式混凝土结构施工阶段节点连接性能优化与质量管控机制实践

陆锟

灌阳县住房和城乡建设局, 广西 桂林 541000

DOI:10.61369/ERA.2025110033

摘要 : 本文围绕装配式混凝土结构施工阶段的节点连接性能与质量管控展开研究, 旨在提升节点连接可靠性及结构整体性能。系统剖析了套筒灌浆、浆锚搭接、叠合构件及螺栓连接等主流节点连接技术的施工工艺, 并明确了施工阶段节点需满足的承载能力、刚度、延性、耐久性及抗震性能等核心目标与验收标准。基于“人机料法环测”系统工程模型, 全面识别了影响节点连接质量的关键因素, 并定性评估了灌浆不饱满、钢筋错位、粘结不良等典型质量缺陷对结构性能的负面影响, 揭示了质量管控的必要性与紧迫性。在此基础上, 创新性地构建了一套覆盖“事前预防—事中控制—事后改进”全流程的节点连接性能优化与质量管控集成机制。实践表明, 该集成机制能够显著提升节点连接施工质量的稳定性与可靠性, 有效预防质量缺陷, 保障结构性能满足设计要求, 为装配式建筑的高质量发展提供系统性的技术支撑与管理范式。

关键词 : 装配式混凝土结构; 节点连接; 性能优化; 质量管控

Practice of Performance Optimization and Quality Control Mechanism for Joint Connections in Prefabricated Concrete Structures During Construction

Lu Kun

Guanyang County Housing and Urban-Rural Development Bureau, Guilin, Guangxi 541000

Abstract : This paper focuses on the joint connection performance and quality control of prefabricated concrete structures during the construction phase, aiming to enhance the reliability of joint connections and the overall structural performance. It systematically analyzes the construction techniques of mainstream joint connection technologies, including sleeve grouting, grout-anchored lap splicing, composite components, and bolt connections. It also specifies the core objectives and acceptance criteria for joint connections during construction, such as load-bearing capacity, stiffness, ductility, durability, and seismic performance. Based on the "man-machine-material-method-environment-measurement" systems engineering model, the paper comprehensively identifies key factors affecting the quality of joint connections and qualitatively assesses the negative impacts of typical quality defects, such as insufficient grouting, steel bar misalignment, and poor bonding, on structural performance. This reveals the necessity and urgency of quality control. On this basis, an innovative integrated mechanism for performance optimization and quality control of joint connections throughout the entire process of "pre-construction prevention—in-process control—post-construction improvement" has been established. Practical applications demonstrate that this integrated mechanism can significantly enhance the stability and reliability of joint connection construction quality, effectively prevent quality defects, and ensure that structural performance meets design requirements. It provides systematic technical support and a management paradigm for the high-quality development of prefabricated buildings.

Keywords : prefabricated concrete structure; joint connection; performance optimization; quality control

引言

随着我国建筑工业化进程的加速和“双碳”战略目标的提出, 装配式混凝土结构因其生产效率高、资源消耗低、环境污染少、质量可控性强等显著优势, 已成为推动建筑产业转型升级和实现绿色建造的重要发展方向。在装配式混凝土结构体系中, 构件间的节点连接

是传递内力、保证结构整体性、刚度和稳定性的“生命线”，其施工质量直接决定了整个建筑结构的安全性能、抗震性能和耐久性能，是装配式建筑从“可装配”迈向“高性能”的关键技术瓶颈。因此对装配式混凝土结构施工阶段的节点连接性能进行优化，并建立科学有效的质量管控机制，具有重大的理论价值和迫切的工程实践需求。鉴于此，本文以解决装配式混凝土结构施工阶段节点连接的实际问题为导向，旨在突破传统研究视角的局限，构建一套性能优化与质量管控双轮驱动的系统性解决方案。

一、装配式混凝土结构节点连接技术体系与性能要求

（一）主流节点连接的施工工艺剖析

装配式建筑节点连接是非常关键的技术，对装配式结构整体性起到了关键

性决定作用，节点连接通常会存在“强节点，强锚固”要求^[1]。装配式混凝土结构工程中，套筒灌浆连接主要用于竖向构件拼接，施工需严格遵循“定位—密封—灌浆—养护”流程，确保吊装定位精准、密封防漏浆、灌浆密实并充分养护；浆锚搭接连接多用于水平钢筋连接，关键在于清理孔道、控制钢筋插入深度、缓慢灌浆保证无气泡并封堵养护；叠合构件连接通过现浇叠合层实现整体受力，核心是新旧混凝土粘结，需对预制构件表面凿毛处理、保证钢筋连接质量、混凝土振捣密实且养护期间避免扰动；螺栓连接主要用于临时固定或钢混组合节点，重点控制预埋件精度、螺栓按设计扭矩分次对称紧固，完成后复检扭矩并防腐，及时拆除临时螺栓。

（二）施工阶段节点连接的性能目标与验收标准

施工阶段节点连接的性能目标需围绕结构安全性、适用性、耐久性展开，验收标准应严格遵循国家与行业规范，确保节点质量满足设计要求^[2]。性能目标涵盖承载能力、刚度、延性、耐久性及抗震性能，承载能力要求节点在设计荷载下不发生强度破坏；刚度需与整体结构匹配，避免变形超标；延性要求节点在地震等偶然荷载下具备塑性变形能力，避免脆性破坏；耐久性需保证在设计年限内抵抗环境侵蚀，采取防腐、加厚保护层等措施；抗震性能需满足抗震等级要求，确保“强节点弱构件”。验收贯穿施工全过程，分为材料验收、施工过程验收、实体质量验收和性能检测四个环节^[3]。材料验收需核查质量证明文件并抽样检验，确保预制构件、套筒、灌浆料等符合标准；施工过程验收聚焦关键工序，实时检查并记录；实体质量验收通过外观检查、尺寸测量和无损检测验证节点质量，如采用超声波检测灌浆饱满度；性能检测通过静力加载、拟静力试验等验证节点力学性能，由第三方机构实施，确保节点承载能力、延性等达标。

二、施工阶段节点连接性能影响因素与质量缺陷分析

（一）基于系统工程的节点连接质量影响因素识别

从系统工程视角出发，“人机料法环测”模型全面覆盖了装配

式混凝土结构节点连接质量的核心影响因素，各因素相互关联，共同决定节点性能与质量水平^[4]。人是质量管控的核心变量，施工人员的专业能力、责任意识直接影响操作规范性，如未接受系统培训，易出现灌浆排气不当、钢筋插入深度不足等问题；管理人员若质量意识薄弱、巡检不到位，会导致质量问题从施工环节传导至最终节点性能^[5]。机指施工与检测设备的性能精度及运维状况，吊装设备精度不足会导致构件碰撞、钢筋偏移；灌浆泵压力不稳定影响灌浆密实度；检测设备未定期校准则数据失真，无法准确识别缺陷。设备维护不到位还会引发故障，中断施工并留下隐患。料是节点性能的物质基础，预制构件尺寸偏差、强度不足影响安装精度与受力性能；套筒、灌浆料、螺栓等连接材料若质量不合格，会直接削弱节点承载力与耐久性。材料进场验收不严，则从源头埋下风险^[6]。法强调施工方法的科学性与规范性，施工方案若未明确流程与参数，或工艺选择不当，会降低节点性能；技术交底不清晰、随意变更流程，也会导致操作失误，影响质量^[7]。环指施工环境对材料与操作的影响，温度过高或过低会影响灌浆料强度发展；湿度、大风、暴雨等天气会干扰施工与材料性能；场地狭窄、作业空间受限则间接影响安装精度。测关注质量检测与监测体系的完善性，若检测制度不健全、方法不合理，会漏判隐性缺陷；监测数据收集不及时、分析不到位，则无法实现动态管控，留下安全隐患。通过“人机料法环测”全要素管控，可系统保障装配式节点连接质量，提升结构整体性能与可靠性。

（二）质量缺陷对结构性能影响的定性评估

装配式混凝土结构节点连接的施工质量缺陷会显著削弱结构的承载能力、刚度、延性、耐久性及抗震性能，其中套筒灌浆不饱满、浆锚搭接钢筋错位、叠合梁新旧混凝土粘结不良、螺栓松动及核心区混凝土不密实等问题尤为突出^[8]。套筒灌浆不饱满会破坏钢筋与套筒的粘结传力体系，导致钢筋拔出、节点承载力下降，并加速钢筋锈蚀，形成恶性循环；浆锚搭接钢筋错位则造成应力集中与传力不均，降低节点刚度和延性，增加脆性破坏风险；叠合梁新旧混凝土粘结不良使结合面滑移，削弱梁体整体受力性能，导致挠度增大、抗震能力下降；螺栓松动会降低节点预紧力，引发构件滑移，影响结构稳定性与抗震耗能能力；核心区混凝土不密实则直接削弱节点抗压与抗剪能力，易引发压溃或剪切破坏，威胁结构整体安全^[9]。各类缺陷虽影响侧重点不同，但均可能引发结构性能退化甚至安全事故，因此需针对成因采取严格的质量管控措施，从源头预防缺陷，及时修复，确保节点连接质

量满足设计与规范要求，保障结构安全可靠。

三、节点连接性能优化与质量管控集成机制构建

（一）总体思路与框架设计

为构建装配式混凝土结构节点连接性能优化与质量管控的集成机制，需以“全生命周期管控、多技术融合、风险前置防控”为基本原则，打破传统事后补救模式，形成覆盖施工全流程的闭环管理体系^[10]。总体思路是以节点连接性能目标为导向，整合“人机料法环测”六大影响因素，融合BIM技术、精益建造、智能监测等手段，建立“事前预防—事中控制—事后改进”三级管控框架，推动质量管控从被动验收向主动管控转变，保障结构整体性能达标。该机制分为目标层、技术层、实施层与保障层四个维度，目标层依据规范与项目需求制定量化性能指标；技术层整合BIM、精益建造、智能传感与标准化管理等技术形成协同工具包；实施层分事前审查、事中巡检、事后反馈三阶段落实具体管控措施；保障层则通过组织、制度、人员与资源四方面支撑机制有效落地。整体形成“目标引领—技术支撑—分步实施—保障到位”的完整管控框架，实现节点连接质量的主动、动态、全流程管控，为装配式建筑的高质量发展提供系统性支撑。

（二）基于BIM与精益建造的技术优化

事前预防是节点连接质量管控的关键环节，通过BIM技术与精益建造的深度融合，可在施工前发现潜在风险、优化技术方案，从源头减少质量缺陷。在BIM技术应用方面，建立全专业协同的BIM模型，实现节点连接设计的可视化与碰撞检查，将预制构件尺寸、钢筋位置、套筒坐标等信息精准录入，形成包含节点细节的三维模型，并通过多专业碰撞检测排查钢筋与套筒位置冲突、构件与现浇部分尺寸偏差等问题，提前解决设计矛盾，避免现场施工时出现钢筋无法插入、构件无法对接等困难。同时利用BIM模型进行施工模拟，分析不同施工方案的可行性与效率，优化施工组织设计，例如模拟套筒灌浆顺序、构件吊装路径，确定最优方案，并生成直观的三维交底文件，明确关键参数，减少操作偏差。在精益建造方面，通过流程优化与浪费消除提升施工精细化水平，进行价值流分析识别非增值活动，制定关键工序的标准化作业流程，明确操作步骤与质量标准；采用拉动式生产模式优化材料供应与构件运输，精准调配资源，避免积压或短缺；建立精益化质量预控体系，针对人机料法环测因素制定预控措施，如通过BIM交底与培训提升人员技能，建立材料追溯系统，关联气象数据预测环境变化并制定应对措施，从而全面提升节点连接施工质量与效率。

（三）基于标准化与信息化的过程管控

事中控制是确保节点连接质量符合要求的核心环节，通过建立标准化操作流程与信息化监测系统，实现施工过程的动态管控，及时发现并纠正质量偏差。在标准化管理方面，制定覆盖全

工序的操作手册，明确各工序的技术参数、操作方法与质量检查标准，如浆锚搭接的孔清理要求、钢筋插入深度、灌浆压力控制等，并推行“样板引路”制度，在正式施工前制作节点样板并组织培训与验收，确保施工质量一致。同时，建立标准化质量检查制度，明确检查频率、方法与合格标准，如构件吊装后检测轴线与标高偏差、灌浆过程中抽查压力与出浆情况，确保全过程受控。在信息化管控方面，构建基于移动终端与云平台的质量管理系统，实现施工数据实时采集、分析与反馈，施工人员通过移动设备上传构件安装、灌浆、钢筋连接等关键数据，智能传感器自动采集灌浆压力、时间、流量等信息并同步至云平台，系统实时比对数据与标准，超标时立即预警并推送整改指令，形成“数据采集—实时分析—预警整改”的闭环。此外，系统建立“一节点一档案”，将人员、设备、材料、检测数据与BIM模型关联，实现质量全程可追溯；结合视频监控对关键工序实时监督，杜绝违规操作，进一步强化过程管控力度。

（四）事后改进与智能监测

事后改进与智能监测是节点连接质量管控的重要延伸环节，通过缺陷修复、经验总结与长期性能监测，持续提升节点连接质量水平，保障结构长期安全。在事后改进方面，针对灌浆不饱满、螺栓松动、结合面裂缝等常见缺陷，制定分类修复方案，如小空洞采用钻孔注浆、大空洞需局部返工，裂缝则视宽度进行封闭或重浇，修复后组织多方验收。同时建立质量缺陷数据库，统计分析高频问题及成因，优化施工工艺与人员培训，并将成熟措施纳入标准，形成持续改进机制。在智能监测方面，通过在关键节点布设应变、位移、腐蚀及温湿度传感器，实时采集节点受力状态、变形与耐久性数据，结合云平台大数据分析建立性能退化模型，预测长期性能变化趋势，实现异常预警与动态维护，为装配式结构的长期安全运行提供技术支撑。

四、结语

装配式混凝土结构作为建筑工业化的重要载体，其高质量发展离不开对核心技术的持续攻关。本文聚焦于施工阶段这一关键环节，围绕节点连接性能优化与质量管控机制两大核心命题，开展了系统性的研究与实践。通过对主流节点连接技术的工艺剖析，揭示了影响其施工质量的深层原因；通过多维度因素分析，提出了针对性的性能优化策略；并在此基础上，创新性地构建了一套融合精益建造理念与BIM信息化技术的全过程、集成化质量管控机制。研究结果表明，该套策略与机制能够有效识别并控制施工风险，显著提升节点连接的施工质量稳定性和结构性能可靠性，为解决当前装配式建筑节点连接质量通病提供了系统性的解决方案和可复制的管理范式，具有重要的理论指导意义和工程应用价值。本文提出的优化策略与管控机制虽在理论分析和案例实践中得到了验证，但其普适性仍需在更多不同地域、不同结构

类型、不同施工条件的工程项目中进行大范围的检验与修正。装配式混凝土结构节点连接的性能优化与质量管控是一项长期而艰巨的系统工程，本文的研究仅为该领域的发展贡献了一份绵薄之

力，期望未来能有更多的学者和工程技术人员投身其中，共同推动我国装配式建筑技术迈向新的高峰，为建设美丽中国、实现可持续发展做出更大贡献。

参考文献

- [1] 朱祥. 装配式混凝土结构施工现场连接技术与质量控制研究 [D]. 陕西: 西安建筑科技大学, 2020.
- [2] 应家文. 全装配式混凝土框架梁柱新型连接节点抗连续倒塌性能研究 [D]. 江西: 南昌大学, 2024.
- [3] 钱磊. 机械式连接预制装配式混凝土框架节点抗震性能研究 [D]. 江苏: 扬州大学, 2024.
- [4] TEY MING WANG 郑若旺. 装配式混凝土结构连接质量检测技术及装置研究 [D]. 浙江: 浙江大学, 2021.
- [5] 宋云. 装配式混凝土结构施工质量影响因素研究——以信达·泰禾 SH 院子为例 [D]. 江西: 江西理工大学, 2019.
- [6] 张猛. 装配式框架结构施工阶段的动态性能实验研究 [D]. 河北: 河北大学, 2017.
- [7] 朱建华. 装配式混凝土框架结构施工控制研究 [D]. 苏州科技大学, 苏州科技学院, 2020.
- [8] 崔雷. 装配式混凝土结构施工管理技术研究 [D]. 上海: 同济大学, 2019.
- [9] 陈冬旭. 复合耗能装配式混凝土梁柱节点抗震性能研究 [D]. 江苏: 扬州大学, 2023.
- [10] 姜效亭. 装配式型钢混凝土柱连接处抗震性能研究与应用 [D]. 安徽建筑大学, 2016.