

装配式混凝土结构施工质量控制关键因素分析

陈 超

新疆北新国际工程建设有限责任公司南非事业部 新疆 乌鲁木齐 830002

摘 要：随着我国建筑工业化进程的加速推进，装配式混凝土结构（Prefabricated Concrete Structure, PCS）因其在提升施工效率、保障工程质量、减少环境污染及节约资源等方面的显著优势，已成为建筑业转型升级的核心方向。然而，作为一种将传统现场湿作业大量转移至工厂预制、再通过现场装配完成的新型建造模式，其施工过程呈现出“工厂+现场”双阶段、多主体协同、接口复杂等新特点，对质量控制提出了前所未有的挑战。本文旨在系统性地剖析装配式混凝土结构施工全过程中的质量控制关键因素。文章首先阐述了PCS的基本内涵与发展现状，继而从设计源头、构件生产、物流运输、现场施工以及信息化管理五大维度，深入探讨了影响最终工程质量的核心要素。在此基础上，提出了针对性的优化策略与管控措施。研究表明，实现PCS高质量发展的核心在于构建一个覆盖“全生命周期、全产业链条、全参与方”的集成化质量管理体系，尤其需要强化设计引领作用、提升构件生产精度、规范现场安装工艺，并深度融合BIM等信息技术，以打通信息壁垒，实现全过程的精细化、标准化和智能化管控。

关键词：装配式混凝土结构；施工质量；关键因素；全过程控制；BIM技术

引言：21世纪全球建筑业正经历绿色、智能与工业化变革，我国作为最大建筑市场，面临劳动力成本上升、资源环境约束趋紧等压力。《“十四五”建筑业发展规划》等将发展装配式建筑作为战略举措。装配式混凝土结构（PCS）是主要结构形式之一，它工厂预制部品部件，现场吊装连接，实现“像造汽车一样造房子”，在缩短工期、保证质量均一性、降低污染等方面有优势。但其质量控制逻辑发生根本转变，传统现浇结构质量问题多源于现场施工环节偏差，PCS质量隐患则潜藏于设计拆分、构件生产、运输、现场吊装等多个环节，微小失误可能因“误差累积效应”放大，影响构件安装与结构安全。所以，系统识别并管控全链条关键质量因素，是确保装配式建筑目标实现、推动我国建筑产业现代化的根本保障，意义重大。

1 装配式混凝土结构概述

1.1 基本概念与特点

装配式混凝土结构是指由预制混凝土构件（或部件）通过可靠的连接方式装配而成的混凝土结构。其核心特点是“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”。这种模式将建筑产品分解为一系列标准化的“零件”，在高度自动化的工厂环境中进行批量生产，从而最大程度地规避了现场恶劣天气、工人技能水平参差不齐等不利因素对混凝土成型质量的影响。

1.2 主要结构体系与连接方式

目前主流的PCS体系包括装配式框架结构、装配式剪力墙结构、框架-剪力墙结构以及叠合板-剪力墙混合

结构等。其核心在于预制构件之间的连接技术，其中湿式连接是国内应用最为广泛的方式。钢筋套筒灌浆连接通过高强无收缩灌浆料将带肋钢筋与金属套筒牢固结合，传力可靠，是竖向构件如预制柱、墙的主要连接手段；浆锚搭接连接则利用预留孔道内的灌浆料实现钢筋间的间接搭接；而后浇混凝土区连接则在预制构件边缘预留外伸钢筋，现场支模后浇筑混凝土形成整体，常用于水平接缝及关键受力节点^[1]。这些连接方式的施工质量直接决定了整个结构的承载力、刚度和延性，是装配式混凝土结构质量控制的重中之重。

2 装配式混凝土结构施工质量控制关键因素分析

装配式混凝土结构的施工质量并非仅由现场安装决定，而是由一个始于设计、终于运维的完整链条所共同塑造。任何一个环节的疏漏都可能成为质量事故的导火索。以下将从五个相互关联的维度，逐一剖析其关键控制因素。

2.1 设计阶段：质量控制的源头

设计是工程建设的灵魂，也是质量控制的起点。在装配式混凝土结构中，设计的意义远超传统范畴，它必须体现“集成化、一体化”的正向设计思维。拆分设计的合理性直接关系到后续生产、运输和吊装的可行性与经济性，不合理的拆分方案不仅会增加成本，更可能迫使生产或施工单位采取妥协措施，从而埋下质量隐患。例如，过长或过重的预制外墙板在运输和吊装过程中极易产生裂缝，这本质上源于设计阶段对物流与施工条件的忽视。更为关键的是接口与节点的精细化设计，装配

式建筑的质量通病多发于构件间的接口处,设计必须对所有连接节点——包括结构连接、管线穿插、防水密封等——进行详尽的三维深化,明确钢筋避让路径、预埋件精确定位、灌浆孔与出浆孔的设置、密封胶槽的构造等细节。任何设计上的模糊或冲突,都会在现场引发“打架”现象,导致返工甚至结构性缺陷。而这一切的实现,高度依赖于BIM技术的深度应用。高质量的BIM正向设计能够提前进行碰撞检查,模拟施工全过程,精确提取构件清单和预埋件信息,为工厂精准生产提供唯一数据源。若BIM应用流于表面,仅用于可视化展示,则无法发挥其在质量预控方面的巨大潜力,设计源头的质量控制也就无从谈起。

2.2 构件生产阶段:质量形成的基石

工厂化生产是装配式混凝土结构保证构件内在质量与外观质量的关键优势所在,但这一优势的兑现,必须建立在严格且科学的质量管理体系之上。原材料的稳定性与专用配合比的严格执行是基础,不同功能的构件对混凝土性能有差异化要求,必须予以精准匹配。模具作为构件的“母版”,其自身的尺寸精度、刚度和表面光洁度直接决定了构件的几何尺寸和外观品质,长期使用后的变形与磨损若得不到及时校正,将导致构件尺寸超差,严重影响现场装配精度。尤为关键的是各类预埋件与预留孔洞的精准定位,吊点、套筒、线盒、水管接口等的位置、标高、角度必须与设计图纸严丝合缝,这通常依赖于高精度的定位工装和严格的复核制度,因为几毫米的定位偏差,在多层装配后可能累积成数厘米的错位,最终导致无法安装^[2]。此外,即便在受控的工厂环境中,混凝土的浇筑、振捣与养护工艺仍需精细把控,以避免离析、蜂窝麻面等缺陷,特别是对于带有装饰面层的构件,对表面气泡、色差的控制要求极高。蒸汽养护的温湿度曲线也必须科学设定,以保证强度正常发展并防止早期开裂。最后,每一块构件都应拥有唯一的身份标识,并经过全面的出厂检验,确保不合格品被严格拦截在工厂大门之内。

2.3 物流运输与堆放阶段:质量保障的脆弱环节

从工厂到工地的“最后一公里”,往往是构件损伤的高发区,却常常被各方所忽视。运输方案绝非简单的车辆调度,而是一项需要专项设计的系统工程。不同形状、重量的构件需要定制专用的运输架和固定方式,以抵抗运输途中的颠簸与冲击。运输路线也需提前进行详细勘察,确保道路、桥梁的承载能力和转弯半径满足超限运输的要求。一旦在运输途中发生剧烈颠簸或急刹,轻则造成构件表面损伤,重则导致内部开裂或预埋件松动,

为后续施工埋下隐患。同样,装卸与堆放环节也必须高度规范化。必须使用与构件匹配的专用吊具,严禁任何形式的野蛮装卸。堆放场地需坚实平整,并设置专用的堆场支架,构件应按型号、规格分类有序堆放,且层数不宜过多,以防底层构件因长期受压而损坏。对于饰面砖或涂料饰面的构件,还需额外采取保护措施,防止在堆放期间发生刮蹭或污染,确保其以最佳状态抵达安装位置。

2.4 现场施工阶段:质量集成的关键战场

现场施工是将所有前期成果集成为一个完整建筑实体的最终环节,其复杂性和不确定性最高,无疑是质量控制的焦点与难点。成功的现场施工始于一份详尽的专项施工方案和充分有效的技术交底,必须明确吊装顺序、临时支撑体系、灌浆工艺、后浇节点处理等关键工序,并确保所有管理人员和作业人员深刻理解设计意图和工艺标准。精准的测量放线与标高控制是所有后续工作的基准,现场的测量基准网必须精确建立,每一块构件的安装位置、标高、垂直度都依赖于此,尤其是首层或转换层的安装精度,它将作为后续所有楼层的基准,一旦出现偏差,其后果将是灾难性的。构件吊装过程需平稳、缓慢,就位后必须立即通过可调节斜撑、千斤顶等工具进行精调和临时固定,确保其在灌浆或后浇混凝土硬化前保持绝对稳定,而临时支撑体系本身的设计与搭设也必须满足严格的承载力和稳定性要求。在诸多现场工序中,钢筋套筒灌浆连接的质量堪称“皇冠上的明珠”,其成败直接关乎结构安全。这要求从灌浆料的质量控制入手,必须使用经认证的、与套筒匹配的高强无收缩灌浆料,并严格按说明书控制水料比;在操作上,需遵循“一点灌注、多点出浆”的原则,确保浆料从下口注入,直至上部所有出浆孔均匀、连续流出浓浆后方可封堵,整个过程需专人旁站监督并留存影像资料;更重要的是,必须采用X光、雷达或内窥镜等方法对灌浆饱满度进行抽样检测,确保套筒内无空洞、无断腔^[3]。此外,后浇节点与叠合层的施工也不容小觑,后浇区的钢筋绑扎、模板支设、混凝土浇筑与振捣必须严格按照规范执行,确保新旧混凝土结合良好,形成可靠的结构整体;而叠合板上部的现浇层厚度、钢筋保护层控制同样是常见的质量薄弱点。最后,外墙、阳台等部位的接缝防水与密封处理是建筑功能性的关键,必须按设计要求清理基层、铺设密封胶条、打注耐候密封胶,并通过淋水试验来验证其可靠性。

2.5 信息化与协同管理:质量控制的赋能引擎

在装配式混凝土结构复杂的多参与方协作模式下,信

息的高效、准确流转是保障质量的前提,而信息化技术正是打通这一任督二脉的关键。BIM与物联网(IoT)的深度融合,使得全过程追溯成为可能。通过BIM模型集成构件从设计、生产、运输到安装的全生命周期信息,并在构件上粘贴RFID标签或二维码,扫码即可获取其“前世今生”,实现质量问题的快速溯源与责任界定。一个统一的项目管理信息平台,能够使业主、设计、总包、构件厂、监理等各方实时共享图纸、变更、进度、质量检验报告等核心信息,有效打破信息孤岛,大幅减少因沟通不畅导致的错误与返工。更进一步,数字化监测与预警技术的应用,正在将质量控制从被动的事后检验推向主动的过程干预。例如,在关键的灌浆工序部署传感器,实时监测压力、流量等参数,一旦偏离预设的安全阈值,系统即可自动报警,提醒相关人员及时介入,从而将质量风险扼杀在萌芽状态。

3 质量控制优化策略与建议

针对上述贯穿全过程的关键因素,亟需一套系统性的优化策略来加以应对。首先,必须强化设计的引领作用,大力推行EPC或BIM总承包模式,让设计单位能够深度介入生产与施工环节,从源头上解决接口冲突与拆分不合理等问题,并强制推行基于BIM的正向设计和协同工作流程。其次,应构建构件厂的星级评价与市场准入制度,由行业协会或政府主管部门建立综合评价体系,对企业的模具、设备、工艺、质保体系等进行全面评级,实行优质优价,以此倒逼整个行业提升质量管理水平。再次,需要制定并普及精细化的施工工法,总结提炼成熟的吊装、灌浆、防水等关键工序的标准化作业指导书,并借助VR/AR等新兴技术进行沉浸式培训,从根本上提升一线工人的技能水平和质量意识^[4]。同时,必须完善全过程的质量追溯与责任体系,利用信息化手段建立“一构件一档案”的追溯机制,明确各参与方在各环节的质量责任边界,做

到权责清晰,赏罚分明。最后,还应加强第三方检测与政府监管力度,加大对灌浆饱满度、连接节点性能等隐蔽工程的飞检频次,并推动监管部门从传统的“事后验收”模式转向“过程巡检”和“飞行检查”,利用大数据分析识别区域性的质量风险点,实现更精准、更高效的监管。

4 结语

装配式混凝土结构的施工质量控制是一项复杂的系统工程,绝非单一环节或单一主体所能胜任。本文通过系统分析,揭示了其质量控制的核心在于对“设计、生产、运输、施工、管理”五大环节关键因素的有效驾驭。其中,设计是源头,决定了质量的上限;生产是基础,奠定了质量的基石;运输是保障,守护了质量的完整性;施工是集成,实现了质量的最终呈现;而信息化则是贯穿始终的赋能工具,提升了质量控制的效率与精度。未来,随着智能建造技术的深度融合,装配式混凝土结构的质量控制将朝着更加自动化、智能化的方向发展。例如,基于AI的视觉识别技术可用于自动检测构件缺陷,机器人可执行高精度的灌浆作业。然而,无论技术如何演进,以人为本、精益管理的核心理念不会改变。只有建立起覆盖全产业链、全生命周期的集成化质量文化,才能真正释放装配式建筑的巨大潜能,为我国建筑业的高质量、可持续发展奠定坚实的基础。

参考文献

- [1]刘士伟.装配式混凝土结构施工质量技术要点探析[J].内江科技,2025,46(09):107-109.
- [2]陈恒福.装配式混凝土结构施工质量缺陷控制方法研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(19):48-50.
- [3]刘文东.装配式混凝土结构施工技术要点与质量控制策略[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(24):119-121.
- [4]沈晓冬.装配式混凝土结构施工质量监管要点分析[J].工程质量,2025,43(S1):4-8.