

装配式混凝土模块化建筑的预制精度控制与施工工艺研究

刘书敬

中集建造(天津)有限公司 天津 300170

摘要: 装配式混凝土模块化建筑依托工厂预制、现场拼装的优势,是绿色建筑发展的重要方向,其预制精度与施工工艺直接决定建筑质量与安全性。本文结合BIM、三维扫描等技术,分析设计、生产、运输等环节精度影响因素,明确各阶段控制要点及误差修正方法,剖析现有吊装、连接工艺短板,提出优化方案及效果评价体系,为提升建筑施工质量、效率及绿色性提供理论与实践参考。

关键词: 装配式;混凝土模块化建筑;预制精度控制;施工工艺优化

引言:随着建筑工业化与绿色低碳理念深入推进,装配式混凝土模块化建筑因高效、环保、集成度高的特点广泛应用,其“模块集成”模式对预制精度和施工工艺提出严苛要求。当前行业存在预制误差超标、施工效率偏低、连接质量隐患等问题,制约其规模化发展。基于此,本文聚焦精度控制与工艺优化,结合行业实践,系统开展研究,助力推动该类建筑技术升级与产业高质量发展。

1 装配式混凝土模块化建筑相关理论与技术基础

1.1 装配式混凝土模块化建筑核心概念

(1) 定义:装配式混凝土模块化建筑是将建筑整体拆分为若干标准化、模块化的预制单元,通过工厂智能制造完成单元生产,再运输至现场进行快速组装、连接,最终形成完整建筑体系的新型建造模式。与传统装配式建筑单一构件拆分、现场逐件安装的模式不同,其核心是“模块集成”,每个预制单元可提前集成墙体、楼板、门窗等构件,实现“一件成型、整体安装”。(2) 核心特征:核心特征体现在五大方面,一是工厂化预制,构件生产环境可控,质量更稳定;二是模块化组装,现场施工流程简化,大幅缩短工期;三是集成化程度高,模块内部可提前完成水电、装修等工序;四是绿色低碳,减少现场浇筑、建筑垃圾与能耗;五是高效便捷,降低现场人力需求。同时突出精度要求高、设计-生产-施工全流程协同性强的显著特点。

1.2 预制模块的组成与分类

(1) 模块组成:主要由受力构件与非受力构件构成。受力构件包括模块化空心剪力墙、夹心叠合墙等,承担建筑主体荷载,要求精度达标、承载力符合设计标准;非受力构件包括构造混凝土侧墙、ALC内隔墙等,主要起围护、分隔作用,需满足隔音、保温及安装适配要求,二者协同保障模块整体性能。(2) 模块分类:按功能可分为居

住模块、公共设施模块等,居住模块聚焦居住功能,公共设施模块适配医院、学校等场景;按结构形式分为承重模块与非承重模块,承重模块作为建筑主体结构,预制时需强化受力设计,非承重模块仅承担围护功能,施工中注重与承重模块的连接适配^[1]。

1.3 核心技术支撑体系

(1) 数字化技术:以BIM技术为核心,贯穿设计、生产、施工全流程,采用LOD400级专业协同设计标准,可实现设计阶段碰撞检测、生产阶段参数同步、施工阶段模拟推演,同时完成构件信息追溯,保障全流程精准可控。(2) 预制生产技术:依托工厂智能化生产线,结合激光数字化模具制作、自动浇筑与智能巡检技术,严格控制生产精度,确保预制模块误差控制在 $\pm 2\text{mm}$,达到行业领先水平,保障模块现场装配的适配性。(3) 连接与装配技术:采用螺栓连接、套筒灌浆、后浇混凝土节点等可靠连接工艺,保障模块间连接牢固、受力均匀;搭配模块化吊装、精准定位调平技术,提升现场装配效率与质量,实现模块快速对接。

2 装配式混凝土模块化建筑预制精度控制研究

2.1 预制精度控制的核心影响因素

(1) 设计因素:设计环节是预制精度控制的源头,核心影响因素包括模块拆分合理性、节点构造设计科学性 & 公差预留充足度。模块拆分若未结合生产、运输及装配需求,易导致模块尺寸偏差过大,增加现场装配难度;节点构造设计不合理,如外墙转角处构件结合面设计错误、连接节点预留空间不足,会直接影响模块对接精度,引发装配间隙超标等问题;公差预留不足则会导致模块生产、运输过程中的微小误差无法抵消,最终影响整体装配精度。(2) 生产因素:生产环节是精度误差的主要产生环节,涉及多个关键控制点的误差来源。模具精度是基础,模具加工偏差、安装松动或长期使用后的磨损,

会直接传递至预制模块，导致构件尺寸偏差；钢筋定位偏差，如钢筋间距、保护层厚度不符合设计要求，不仅影响模块受力性能，还会干扰预埋件安装精度；混凝土浇筑与养护质量不佳，会导致模块出现收缩、开裂、表面凹凸不平等缺陷，影响外观及尺寸精度；此外，预埋件错位、遗漏或固定不牢固，也会严重影响后续装配对接精度^[2]。（3）运输与存储因素：运输与存储过程中的不当操作，易导致预制模块破损，进而影响精度。运输过程中，模块固定不牢固、车辆颠簸或装卸时碰撞，会造成模块边角破损、整体变形；现场堆放场地规划不合理，如地面不平整、堆放层数过多，或垫支方式不当，会导致模块受力不均，出现表面划伤、拼接面磨损等问题，间接影响后续安装精度；同时，模块溯源管理缺失，无法准确追踪模块生产、运输全过程信息，一旦出现精度问题，难以快速定位根源，影响误差修正效率。

2.2 各环节预制精度控制要点

（1）设计阶段精度控制：以BIM协同设计为核心，搭建多专业协同设计平台，结合生产、运输、装配全流程需求，优化模块拆分方案，确保拆分后的模块尺寸标准化、适配性强。明确各模块及构件的精度控制指标，细化公差预留标准，针对外墙转角、连接节点等关键部位，优化构造设计，避免设计缺陷。同时，开展预制与施工可行性评审，组织设计、生产、施工单位协同论证，提前排查设计环节可能影响精度的隐患，从源头保障精度控制的合理性。（2）生产阶段精度控制：强化模具精度管理，采用激光数字化模具制作技术，确保模具加工精度符合设计要求，同时建立模具定期校验制度，定期对模具尺寸、平整度进行检测、调整，避免模具磨损导致的精度偏差。推行钢筋加工与安装的数控化控制，采用数控钢筋切断机、弯曲机等设备，确保钢筋尺寸、间距精准，安装时采用定位架固定，防止钢筋移位。规范混凝土浇筑标准化作业，控制浇筑速度、振捣频率，加强养护管理，控制养护温度、湿度，减少混凝土收缩变形；应用自动化检测技术，对生产过程中的关键环节进行实时监测，及时发现并纠正精度误差^[3]。（3）运输与存储阶段精度控制：优化运输方案与路线，选择平整、畅通的运输路线，减少运输过程中的颠簸；采用专用运输设备，对模块进行牢固固定，做好边角防护，避免碰撞损坏。规范现场堆放场地规划，平整堆放地面，设置合理的垫支点，控制堆放层数，防止模块表面磨损、拼接面错位，保障模块安装精度不受影响；采取防雨、防潮、防碰撞的防护措施，保护模块外观及尺寸精度。引入智慧物流系统，结合二维码技术，实现模块生产、运输、存储全流程溯

源，精准追踪模块信息，便于及时排查精度问题。

2.3 预制精度检测与误差修正方法

（1）精度检测技术：采用三维扫描、机器视觉等自动化检测方法，替代传统人工检测，提升检测效率与精度。三维扫描技术可对预制模块进行全方位扫描，快速获取模块尺寸、外观形态等数据，与设计模型进行对比，精准识别尺寸偏差、表面缺陷等问题；机器视觉技术可实时监测模块生产、装配过程中的关键部位，自动识别预埋件位置偏差、构件拼接间隙等问题，实现检测过程的自动化、智能化，确保检测覆盖模块尺寸、外观、预埋件位置等所有关键指标。（2）误差识别与修正：建立预制精度误差数据库，收集设计、生产、运输、存储各环节的误差数据，分类记录误差类型、数值及产生场景，通过数据分析，精准识别误差产生的根源，明确误差传导路径。针对不同类型的误差，提出针对性的修正措施：对于尺寸偏差较小（ $\leq 2\text{mm}$ ）的模块，采用打磨、调整连接件等方式进行现场修正；对于偏差较大或存在结构性缺陷的模块，及时返回工厂进行返工处理，确保修正后的模块精度符合设计要求，最终实现预制模块误差 $\leq 2\text{mm}$ 的控制目标，保障后续装配施工的顺利开展^[4]。

3 装配式混凝土模块化建筑施工工艺研究

3.1 施工工艺研究重点阐述

（1）吊装工艺研究重点：核心是结合模块参数及现场条件制定专项吊装方案，提升作业效率；明确吊装顺序需遵循“先下后上、先内后外”原则，规避模块碰撞、衔接不畅等个例问题；优化人工定位方式，提升对接精度；建立多塔吊协同管控机制，防范作业重叠、信号干扰等安全隐患。（2）节点连接工艺研究重点：聚焦节点连接规范操作，杜绝节点松动等个例问题；优化灌浆、封堵工艺，确保灌浆饱满、封堵严密，避免缝隙空洞，保障节点承载力及结构整体性，防止渗漏；结合模块特性优化连接工艺，提升工艺适配性，消除质量隐患。（3）施工组织与协同工艺研究重点：打通设计、生产、施工协同链路，确保设计方案兼顾施工可行性，避免模块与现场需求不匹配导致的施工停滞；细化专项方案交底，确保作业人员精准掌握工艺及精度要求；强化产业工人专业技能培训，规范操作流程；严格执行验收标准，确保施工质量可控。

3.2 关键施工工艺优化方案

（1）吊装工艺优化：以BIM技术为核心，通过施工模拟精准规划吊装顺序、路径及塔吊摆放位置，避开作业盲区 and 干扰因素；采用“BIM+激光扫描”协同技术，实时捕捉模块吊装过程中的位置数据，与设计模型对比校

准,实现模块精准定位,将定位误差控制在允许范围内;研发模块化吊装平衡架与智能调平系统,减少吊装过程中模块的晃动和倾斜,提升吊装稳定性,同时优化多塔吊协同作业管控流程,明确各塔吊作业范围和信号规范,消除安全隐患。(2)节点连接工艺优化:推广标准化连接节点设计,统一节点尺寸和连接流程,提升连接适配性和施工规范性;采用自动化灌浆设备,精准控制灌浆量和灌浆速度,确保灌浆密实度,避免出现空洞、缝隙等问题;优化接缝防水与密封工艺,选用高性能密封材料,规范密封操作流程,提升节点防水性能;引入无损检测技术,对连接节点进行全面检测,及时排查连接质量隐患,确保节点连接牢固、符合设计要求^[5]。(3)施工组织优化:建议建立跨专业协同团队,整合设计、生产、施工等各方资源,实现各环节无缝衔接,提前解决设计与施工、生产与施工的衔接问题;建议完善施工交底与培训体系,开展针对性的工艺培训和技能考核,提升产业工人专业能力,确保作业人员熟练掌握优化后的施工工艺;建议优化劳动力配置,根据施工进度合理调配人力,提高施工效率;建议推行智能化施工管理,利用物联网、大数据技术实时监测施工过程,实现施工进度、质量、安全的动态管控。

3.3 工艺研究的效果评价指标与方法

(1)评价指标:围绕施工全流程设定四大核心评价指标,全面衡量工艺优化效果。施工效率以工期缩短比例为核心,对比优化前后的施工工期,评估吊装、连接等关键工序的效率提升情况;施工质量以精度达标率为核心,检测模块定位、节点连接等关键环节的精度是否符合标准;成本控制以人工与材料节约比例为核心,核算优化后人工投入、材料损耗的减少情况;绿色环保以

废弃物与噪声减少比例为核心,评估施工过程中建筑垃圾、施工噪声的控制效果,契合绿色建筑发展要求。(2)评价方法:采用案例对比分析与现场试验数据验证相结合的方式,确保评价结果科学准确。选取同类装配式混凝土模块化建筑项目,对比工艺优化前后的各项指标,分析优化方案的优势;通过现场试验,收集施工效率、质量、成本等相关数据,与优化目标对比,验证优化方案的可行性与有效性;同时参考国内同类成熟项目的效益数据,借鉴其先进评价经验,进一步完善评价体系,确保评价结果具有客观性和参考价值。

结束语

本文围绕装配式混凝土模块化建筑预制精度控制与施工工艺展开研究,明确了精度控制核心要点、误差修正路径及工艺优化方案,验证了优化措施的可行性与有效性。该研究可有效解决行业施工痛点,提升建筑质量与效率,契合绿色建筑发展要求。未来可结合智能建造技术深化研究,完善相关体系,推动该类建筑实现更广泛、高质量的应用。

参考文献

- [1]张连生,曾令发.装配式混凝土建筑预制构件吊装精度控制研究[J].陶瓷,2025,16(10):150-152.
- [2]蔺建文.预制装配式建筑施工技术研究[J].中国建筑金属结构.2023,22(01):105-107.
- [3]程琦杰,马向民,杜志鹏,等.装配式建筑叠合板施工技术[J].工程建设与设计,2021,11(20):171-173.
- [4]邓席军.基于预制装配式混凝土结构的施工工艺[J].中国建筑金属结构,2024,23(4):91-93.
- [5]林榕.新型预制装配式混凝土结构在医院综合楼施工中的应用[J].江西建材,2023,31(7):175-181.