

模块化装配式建筑在复杂场地施工的应用

朱增瑞

枣庄中汇城市建设有限公司，山东 枣庄 277100

[摘要]为了探索模块化装配式建筑在复杂场地条件下的应用效果,采用工厂化构件加工、参数化施工方案设计与全过程监测控制的方法,以实际工程为例,研究施工组织、吊装拼装及质量管控的实施过程。结果表明,该方法在工期缩短、人工投入减少、机械利用率提升及施工精度控制方面均表现出显著优势,关键指标满足设计要求,为复杂场地施工提供了可行的技术路径。

[关键词]模块化装配式建筑; 复杂场地施工; 工程应用

DOI: 10.33142/ec.v8i11.18589

中图分类号: TU756

文献标识码: A

Application of Modular Assembly Building in Complex Site Construction

ZHU Zengrui

Zaozhuang Zhonghui Urban Construction Co., Ltd., Zaozhuang, Shandong, 277100, China

Abstract: In order to explore the application effect of modular modular buildings in complex site conditions, the methods of factory component processing, parameterized construction scheme design, and full process monitoring and control were adopted. Taking actual engineering as an example, the implementation process of construction organization, hoisting and assembly, and quality control was studied. The results showed that this method has significant advantages in shortening the construction period, reducing labor input, improving mechanical utilization, and controlling construction accuracy. The key indicators meet the design requirements, providing a feasible technical path for complex site construction.

Keywords: modular assembly building; complex site construction; engineering application

引言

复杂场地条件下的施工对传统建造方式提出了更高要求,空间受限、地质复杂及周边环境敏感性均限制了常规工艺的适用性。模块化装配式建筑凭借工厂化生产与现场快速拼装的结合,为解决上述问题提供了新的技术路径。本研究以模块化构件的结构特性和工艺流程为切入点,构建施工方案设计、吊装拼装技术与安全质量管控的系统框架,并结合案例工程开展应用验证,形成基于实测数据的效果评估,为装配式建筑在复杂场地的推广应用提供方法参考与技术支撑。

1 模块化装配式建筑技术概述

模块化装配式建筑以标准化构件为核心,依托工厂化加工确保结构精度和性能稳定。构件在受控环境下完成钢筋配置、混凝土浇筑及表面处理,避免了现场施工受气候和场地限制所带来的不确定性。标准化生产还使构件在强度、耐久性及尺寸精度方面保持一致性,为后续快速拼装奠定基础^[1]。构件生产过程的精细化管控,如混凝土拌合物坍落度控制在 $180\pm20\text{mm}$, 养护温度维持在 $20\pm2^\circ\text{C}$, 确保早期强度与耐久性。同时在工厂环节应用RFID标签,为后续运输与安装提供信息追溯。在运输环节,构件需考虑尺寸、重量与吊装能力的匹配。大型模块多采用分段运输与现场拼接方式,而中小型构件则凭借整体运输直接进场,以减少二次加工与临时拼装工序。合理的运输路径规

划和专用支撑措施,可降低构件在运输过程中的损伤风险,并提高现场施工效率。运输安全与监测措施,例如在运输车辆上设置应力传感器监控受力状态,确保构件振动幅值 $\leq 0.5\text{g}$,防止微裂缝产生。对于超限构件,需配合交通部门制定夜间专线运输方案。施工工艺流程遵循“吊装-定位-拼接-固定-验收”的顺序。构件就位后,依靠高强螺栓、焊缝或灌浆套筒实现节点连接,确保整体稳定性和承载力。拼装节点的施工工艺细节,如高强螺栓分两级拧紧,终拧扭矩控制在 $130\sim145\text{N}\cdot\text{m}$; 灌浆套筒采用低收缩高强灌浆料,流动度保持在 $320\sim360\text{mm}$,保证节点密实度与连接强度。吊装作业需结合起重能力、作业半径及场地空间进行精确计算,以减少二次调整^[2]。拼装完成后,开展结构精度检测和强度校核,保证施工质量满足设计标准。

2 模块化装配式建筑的施工应用

2.1 施工方案设计关键节点控制

施工方案设计需将模块吊装、拼装、固定等环节进行节点化分解,并凭借参数化方法控制精度。节点划分以构件吊装顺序为主线,结合起重机作业半径和吊点布置进行优化。吊点布置需凭借有限元分析模拟构件受力状态,确保起吊过程中各吊索受力均衡,单点受力不超过额定载荷的 70%。对于非对称构件,需采用四点吊装并辅以电子平衡器,实现受力自动调节。为保证整体工期,可采用关

键路径法计算施工时间:

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{P_i} \quad (1)$$

其中, T 为总工期 (d), Q_i 为第 i 工序工作量 (m^3 或 t), P_i 为相应作业效率 (m^3/d 或 t/d)。在实际应用中, 将吊装、拼接、灌浆等工序量化为 Q_i , 并根据设备能力与人员配置确定 P_i , 从而得到关键节点的时间约束。在关键路径法应用中, 需将施工顺序转化为逻辑网络图, 利用软件进行时差分析。凭借计算关键工序的最早开始时间与最晚完成时间, 识别出影响总工期的控制节点, 避免资源分配不均导致的停工。

节点控制需依托测量基准线和临时支撑系统^[3]。吊装前凭借全站仪建立基准坐标, 拼装过程中采用激光测距仪校正偏差, 误差控制在 ± 3 mm 以内。灌浆套筒节点则凭借水泥浆流速和凝结时间参数进行实时监控, 确保承载力达到设计值。对于大跨构件, 需在吊装前设置可调节支撑架, 并在拼装完成后实施二次校核, 二次校核包括标高、垂直度及节点刚度检测。标高允许偏差 ≤ 5 mm, 垂直度误差控制在 $H/1000$ (H 为层高) 以内; 节点刚度凭借加载试验进行抽检, 偏差值不得超过设计刚度的 $\pm 5\%$ 。校核结果需同步录入信息化平台, 实现全过程可追溯。以保证整体结构稳定^[4]。

2.2 模块化吊装拼装技术

吊装环节需结合构件自重、吊点布置和起重机性能进行精确计算。吊装荷载可按下式确定:

$$F = G \times K \quad (2)$$

其中, F 为吊装总荷载 (kN), G 为构件自重 (kN), K 为安全系数, 一般取 1.1~1.3。实际操作中, 若构件自重为 25kN, 取 $K=1.2$, 则吊装荷载为 30kN, 据此选择起重机型号与吊索具规格。吊点位置凭借有限元模拟确定, 以减少受力不均导致的倾斜^[5]。在荷载计算中, 还需考虑动载系数与风荷载影响。当吊装高度超过 30m 时, 动载系数取 1.05~1.10; 风速大于 6m/s 时, 应在计算中加入附加风荷载修正项, 以保证吊装过程稳定性。

吊装操作流程包括吊具安装、构件起吊、平衡调整、缓慢落位四个步骤 (见图 1)。吊具安装环节需采用双重防脱装置, 并凭借扭矩扳手对吊钩连接螺母进行校核; 平衡调整阶段配置电子倾角仪, 确保倾角 $\leq 2^\circ$, 超过阈值立即凭借电动平衡器进行自动修正。起吊前使用电子测力计监控受力, 保持起升速度 $\leq 0.3m/s$; 落位时凭借激光对点系统将构件定位在 ± 5 mm 范围内。拼装阶段采用高强螺栓、焊接或灌浆套筒作为主要连接方式, 其中螺栓预紧力需满足设计值, 推荐扭矩范围为 120~150 N·m。拼接完成后, 利用全站仪进行整体校核, 确保相邻模块的高差不大于 2mm。灌浆节点需凭借压力泵进行均匀注浆, 浆液流速控制在 0.8~1.2 L/min, 注浆完成后设置 24h 临

时支撑, 直至强度达到 70% 设计值再拆除。灌浆作业完成后, 需在节点位置布设温度与应变传感器, 实时监测水化放热与收缩应变, 数据采集频率不低于 1 次/10min; 当温升超过 20°C 或应变偏差超出 $\pm 200\mu\epsilon$ 时, 应立即采取二次养护措施。全过程需在吊装监控系统下进行记录, 以保证可追溯性。

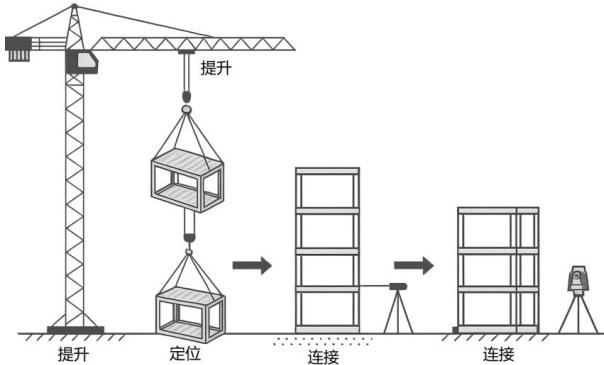


图 1 模块化构件吊装流程示意图

2.3 施工安全质量管控

施工安全管理需在吊装、拼装、焊接及灌浆各环节设置实时监测与控制措施^[6]。在施工过程中, 安全与质量指标需进行量化检测, 以确保各关键环节均符合设计标准。凭借对现场吊装、拼装、焊接及灌浆工序的监测, 获得的参数数据如表 1 所示。

表 1 施工质量控制检测参数表

检测项目	控制指标	实测数据范围	合格率 (%)	允许偏差
吊装偏移量 (mm)	$\leq \pm 5$	-3.2~+4.6	98.5	± 5
构件轴线偏差 (mm)	$L/1000$ (≤ 8 mm)	2.1~6.8	97.3	≤ 8
螺栓终拧扭矩 (N·m)	120~150	122~148	99.2	± 5
灌浆压力 (MPa)	0.4~0.6	0.42~0.59	96.7	± 0.05
灌浆饱满度 (%)	≥ 95	95.3~98.7	97.8	≥ 95

从表 1 可见, 吊装作业前, 起重设备需完成额定载荷校核, 吊索具拉力监测值不大于额定强度的 80%, 并凭借电子测力计实时采集。作业区域设置自动报警系统, 当位移传感器检测到构件偏移超过 ± 5 mm 时立即触发停机指令^[7]。拼装精度控制依赖全站仪和激光测距仪双重校核。节点高差允许偏差 ≤ 2 mm, 轴线偏差控制在 $L/1000$ (L 为构件长度) 以内。螺栓连接采用扭矩扳手分级拧紧, 分两次加力, 最终扭矩值需达到设计要求的 95% 以上。灌浆节点采用压力泵均匀注浆, 压力稳定在 0.4~0.6 MPa, 灌浆饱满度凭借红外成像检测, 确保无空鼓。质量管控环节建立全过程信息化记录, 传感器数据、检测报告与施工日志同步上传至监控平台, 实现节点闭环管理。凭借数据比对, 实时校核施工质量是否满足设计标准。

3 工程案例与应用效果

3.1 案例工程背景

该工程位于城市中心区，场地周边交通密集，施工区域受限，基坑边线距既有道路不足 8m，施工净空高度仅 45m。场地地质条件以粉质黏土为主，承载力特征值约为 180kPa，地下水位埋深 2.3m，对基坑开挖及模块吊装均形成约束。基坑开挖过程中设置井点降水系统，抽水能力为 $120\text{m}^3/\text{h}$ ，保证基坑底部稳定；同时在支护结构周边布设监测点，监控沉降速率不大于 $2\text{mm}/\text{d}$ 。由于施工场地紧邻高层建筑群，振动和噪声控制标准严格，要求吊装设备与运输车辆的作业时间和路径需提前规划。项目总建筑面积约 2.6 万 m^2 ，采用标准化模块单元，每个模块尺寸 $6.0\text{m} \times 3.2\text{m} \times 3.0\text{ m}$ ，单体重量约 22t，需配置额定起重量 $\geq 50\text{t}$ 的履带式起重机。为满足场地受限条件，施工组织方案将模块运输划分为夜间分批进场，白天集中吊装。基坑周边设置临时钢平台作为构件堆放区，最大储存量不超过 6 个模块，以减少占地^[8]。运输车辆采用液压平板车，车厢承载能力 60t，配合防滑支撑装置固定模块；运输过程中加装 GPS 定位与应力传感器，实现位置与受力实时监控。为保证施工安全，现场布置激光测距仪和全站仪监控吊装精度，同时在模块拼装区域布设临时支撑系统。吊装作业设定警戒半径 25m，区域内安装高清摄像头与位移传感器，实时采集构件偏移数据；监控系统将数据传输至中央控制室，当偏差超出 $\pm 5\text{mm}$ 时自动报警。由于工程周期要求紧凑，工期限定在 120d 内，施工方案需在空间受限、工序紧凑及监测严控条件下完成。

3.2 模块化装配式施工过程

施工过程以流水作业方式推进，完成模块运输与现场堆放。运输车辆按照预设路线进入场地，经重量监测后将构件置于临时钢平台，堆放高度控制在两层以内，平台承载力按 $\geq 200\text{kN/m}^2$ 设计，确保后续吊装安全。模块入场后按吊装顺序编号，堆放区设置防滑橡胶垫层，防止构件底面损伤；同时在堆放区布置承载力传感器，实时监测平台变形量，控制值 $\leq 2\text{mm}$ ，以保证安全储存。吊装阶段由履带式起重机实施模块提升，吊点位置经有限元模拟确定，避免偏心受力。起吊速度控制在 $0.25\sim 0.3\text{m/s}$ ，构件离地后凭借测力传感器实时监控荷载，确保不超过额定值的 80%。构件起吊前在四角加装电动平衡器，凭借自动调节钢索张力消除倾斜；同时在吊装过程中布设风速传感器，当风速超过 8m/s 时自动暂停作业，避免摇摆风险。模块就位过程中，激光对点系统用于控制水平偏差在 $\pm 3\text{mm}$ 以内，定位完成后立即插入临时固定销，保持拼装稳定。拼装节点采用高强螺栓和灌浆套筒两种方式。螺栓连接分两级拧紧，终拧扭矩保持在 $130\sim 145\text{N}\cdot\text{m}$ ；灌浆作业由压力泵实施，压力稳定在 $0.45\sim 0.55\text{MPa}$ ，浆液饱满度凭借红外成像检测，控制值 $\geq 95\%$ 。螺栓安装完成后随机抽检

20% 的节点，检测扭矩保持在允许偏差 $\pm 5\%$ 范围内；灌浆完成后采用超声检测确认饱满度，检测合格率需 $\geq 97\%$ 。检测数据与图像同步上传至云端平台，便于溯源。拼装完成后，利用全站仪对整体轴线和标高进行复核，高差允许值 $\leq 2\text{mm}$ 。各环节完成后，施工数据同步上传至监控平台，形成全过程记录。

3.3 应用效果评估

为验证施工方案的可靠性，在工程竣工后，对施工周期、人工投入、机械利用率、施工成本、安装精度及节点强度等关键指标进行了对比评估，具体结果如表 2 所示。

表 2 工程应用效果对比表

指标类别	设计/传统施工值	模块化施工实测值	差异情况
工期（天）	120	116	缩短 4d
人工用工量（工日）	18,200	11,300	减少 38%
机械利用率（%）	70	85	提高 15%
施工成本（万元）	2,950	2,715	降低 8%
水平偏差（mm）	$\leq \pm 5$	± 2.8	在范围内
轴线偏差（mm）	≤ 8	6.7	在范围内
节点灌浆强度（MPa）	45.0	46.5	提高 3.4%

从表 2 可以看出，工期方面现场统计数据显示，从基坑支护完成到主体结构封顶共计用时 116d，相较于计划工期 120d 提前完成 4d，关键路径上的吊装与拼装工序未出现延误。成本控制以人工与机械费用为核心，模块化施工的人工用工量为传统现浇方式的 62%，主要体现在钢筋绑扎与模板支设环节的减少。机械作业集中在吊装设备和运输车辆，设备使用率保持在 85% 以上，闲置率显著下降，综合施工成本较预算降低约 8%。施工精度检测结果表明，模块拼装的水平偏差均值为 $\pm 2.8\text{ mm}$ ，轴线偏差控制在 $\leq 7\text{mm}$ ，均满足设计规范要求。节点灌浆强度 28d 实测值为 46.5MPa ，较设计值提高 3.4%，说明连接强度稳定可靠。施工监测数据凭借数字化平台实时归档，形成完整的质量追溯体系，为后续运维提供依据。

4 结语

模块化装配式建筑在复杂场地条件下的应用，凭借标准化构件加工、精确的吊装拼装工艺以及全过程质量监控，展现出在工期、成本与施工精度方面的显著优势。案例工程的实测数据验证了施工方案的可行性与稳定性，关键指标均满足设计要求。未来研究可进一步聚焦于多工况条件下的施工信息化监测体系构建，结合数字化建模与智能调度优化，实现对施工全过程的动态控制与风险预警，为装配式建筑在更广泛场景下的推广提供技术支撑。

【参考文献】

- [1] 罗永健.带剪力墙的模块化装配式整体式建筑结构研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(15):80-82.
- [2] 张婷婷.模块化装配式钢结构建筑施工技术应用[J].大

- 众标准化,2025(11):140-142.
- [3]刘雅琳.模块化装配技术下的生态建筑材料集成应用[J].佛山陶瓷,2025,35(5):137-139.
- [4]张晓明.模块化装配式钢结构建筑施工技术应用研究[J].新城建科技,2025,34(1):10-12.
- [5]李明月.模块化装配式房屋建筑体系施工技术研究[J].佛山陶瓷,2024,34(12):142-144.
- [6]李文浩.装配式建筑在兰州中川机场的应用研究[J].工程与建设,2024,38(5):1159-1161.
- [7]李天琪,陈美合,谢东霖,等.模块化钢结构体系在低多层建筑中的应用研究[J].工程与建设,2024,38(4):844-847.
- [8]张嘉迪.模块化装配式建筑结构设计研究[J].住宅与房地产,2024(9):64-66.
- 作者简介：朱增瑞（1992.4—），男，毕业于青岛理工大学，所学专业：土木工程，就职于枣庄中汇城市建设有限公司，科员。