

装配式住宅建筑现场安全管理研究

龚仕毅

上海建工一建集团有限公司 上海 201315

【摘要】本文以某装配式住宅建筑项目为例，分析了装配式建筑施工中的安全管理体系及其应用效果。通过对该项目的现场安全风险因素进行系统分析，识别出结构体系、工艺协同和环境制约三个维度的安全风险。针对这些风险，提出了基于熵权-改进灰色聚类法的量化评价模型，通过BIM技术、三维激光扫描、GIS物流仿真等先进技术实现动态安全管控。研究表明，通过精确控制吊装垂直度、灌浆密实度、工序交叉频率等关键指标，项目安全事故率降低了51%，质量验收一次通过率提高至98.6%，整体工期缩短了12天，达到了显著的技术经济效益。

【关键词】装配式；住宅建筑；现场安全管理

引言：

随着城市化进程的加速，装配式建筑因其高效、环保、节能等优势，成为现代建筑行业的发展趋势。特别是在城市核心区，由于施工场地限制，传统建筑方式面临着日益严峻的挑战。装配式住宅建筑作为一种工业化建造模式，采用预制构件的施工方式，能够在一定程度上提高施工效率、降低资源消耗，且在抗震性能、施工精度等方面具有优势^[1]。但是装配式建筑的施工过程涉及到多个环节，如构件吊装、工序衔接、物流运输等，且这些环节之间具有高度的协同性，容易产生安全隐患。基于此，本文旨在通过研究某装配式住宅建筑项目的施工安全管理体系，结合现代信息技术，探索装配式建筑施工过程中安全管控的有效路径，为类似项目的施工提供借鉴与参考。

1 工程概述

以某装配式住宅建筑项目为例，该项目选址于城市中心区域，规划总建筑面积7.1万m²，采用装配整体式混凝土剪力墙结构体系，预制率达40%。项目由8栋标准化高层住宅组成，单栋建筑高度42.04m，地下2层为现浇钢筋混凝土结构车库及设备用房，地上14层住宅采用模块化设计，标准层高3.3m。工程采用工业化建造模式，主体结构预制构件涵盖叠合板、预制外墙板、预制楼梯及预制阳台四大类，其中水平构件占比68%，竖向构件采用钢筋套筒灌浆连接技术。项目抗震设防烈度为7度，设计使用年限50年，结构安全等级二级。施工过程中面临城市核心区物流组织复杂、构件吊装精度要求高（垂直度偏差≤5mm）、多专业交叉作业密集等挑战，通过BIM技术实现构件生产-运输-安装全过程数字化管理，并采用三维激光扫描技术进行施工质量动态监测。

2 现场安全管理体系分析

2.1 安全风险因素

装配式住宅建筑现场安全管理风险因素具有显著的工业

化施工特征，其风险源可系统性归纳为结构体系特殊性、工艺协同复杂性及环境制约性三大维度。

从结构体系角度分析，装配式混凝土剪力墙结构的核心风险集中于预制构件吊装与节点连接环节。预制外墙板、叠合板等大型构件的吊装作业受城市核心区作业面狭窄、塔吊覆盖半径受限等因素影响，易引发构件倾覆或碰撞事故；而钢筋套筒灌浆连接技术的施工质量风险尤为突出，灌浆密实度不足、套筒定位偏差超限（>3mm）或灌浆料凝固期扰动等问题，可能直接削弱结构抗震性能。

模块化施工过程中现浇与预制工序的时空交叉矛盾较为显著，叠合板节点现浇区钢筋绑扎与支撑体系搭设存在高空临边作业风险，且预制构件临时斜撑体系的稳定性受多工序动态荷载叠加影响，支撑失稳概率较传统现浇结构提升约37.4%。同时，工业化建造模式下构件生产-运输-安装全过程供应链管理风险需重点关注，构件运输路线规划不当易导致进场时序错位，造成堆场超载或二次倒运，而构件几何尺寸偏差（如预制楼梯踏面平整度超差±2mm）可能引发安装阶段的结构错位风险。

环境制约性风险则表现为城市中心区域施工场地集约化特征，构件堆场与施工机械布局受限导致物流动线交叉，同时噪声与粉尘控制标准严苛，进一步压缩了安全作业冗余空间。BIM协同管理平台若未实现设计-生产-施工数据的实时互通，可能会导致信息孤岛现象加剧多专业施工冲突，形成安全隐患的潜在触发点。

2.2 安全风险评价

针对装配式住宅建筑现场安全风险的多维性与动态性特征，构建了基于熵权-改进灰色聚类法的量化评价模型，通过风险因子耦合度分析与风险等级动态划分实现精准评估^[2]。在评价指标体系设计阶段，结合工业化建造特征，将一级指标划分为结构体系风险、工艺协同风险及环境制约风险

三大类，下设6项二级指标，涵盖预制构件吊装偏位率、套筒灌浆密实度合格率、多工序交叉作业频率、构件运输延误率、物流动线交叉密度、BIM协同误差值等关键参数，并结合工程实际情况确定三级指标。具体情况如下表1所示：

表1：安全风险评价指标

一级指标	二级指标	三级指标
结构体系 风险A	预制构件吊装偏位率A1	吊装垂直度偏差A11
		临时支撑位移量A12
	套筒灌浆密实度合格率A2	灌浆料充盈度A21
		套筒定位偏差A22
工艺协同 风险B	多工序交叉作业频率B1	现浇与预制工序交叉次数B11
		支撑体系动态荷载变化频率B12
	构件运输延误率B2	运输路径拥堵指数B21
进场时序错位率B22		
环境制约 风险C	物流动线交叉密度C1	堆场周转率C11
		运输车辆滞留时间C12
	BIM协同误差值C2	模型与现场偏差值C21
		数据更新延迟时间C22

权重分配采用熵权法与德尔菲法相结合的双重校验机制，通过10名装配式施工专家两轮背对背评分，消除主观判断偏差，确保指标权重的科学性与客观性^[3]。具体情况如下表2所示：

表2：指标权重

指标	权重	等级
A11	0.193	1
A12	0.087	4
A21	0.074	5
A22	0.067	8
B11	0.152	2
B12	0.069	7
B21	0.083	6
B22	0.046	11
C11	0.099	3
C12	0.052	10
C21	0.062	9
C22	0.016	12

装配式住宅建筑现场安全风险管控需聚焦核心工艺环节的技术协同与动态调控。吊装垂直度偏差作为结构体系的核心风险源，需依托三维激光扫描技术与塔吊防碰撞系统实现毫米级动态纠偏；现浇与预制工序的时空冲突则需通过BIM进度模拟优化工序逻辑，并强化支撑体系荷载实时监测机制。针对场地集约化约束，采用GIS物流仿真与无人机航拍技术重构物流动线，降低堆场周转压力与二次倒运风险。套筒灌浆工艺缺陷及BIM模型偏差问题，需集成超声检测与点云配准算法实现隐蔽工程穿透式管控，而物联网边缘计算技术可有效压缩信息协同延迟窗口。工程实践中，应根据风险等级实施差异化监测策略，对高敏感性环节采用高频次校准与冗余防护，中低风险领域侧重标准化流程优化，从而实现安全效能与施工成本的动态平衡。

2.3 安全管理措施

2.3.1 技术管理

装配式住宅建筑现场技术管理应以施工过程管控为核心，重点加强吊装、灌浆、支撑等关键工序的质量与安全管理。在吊装作业中，需严格控制构件垂直度偏差不超过3mm，通过实时监测塔吊荷载与倾角数据，动态调整吊点位置与吊索张力，配合吊钩可视化系统、防碰撞装置的使用，确保吊装安全；套筒灌浆作业应采用双模式检测技术，保证灌浆料充盈度达到96%以上，同时将套筒定位偏差控制在±2mm范围内，确保连接节点质量。施工过程中重点监控现浇与预制工序的交叉作业，单日交叉次数超过6次时及时优化施工方案，并通过实时监测临时支撑体系位移量，确保位移量不超过8mm，必要时启动液压补偿装置^[4]。构建实行智能化生产、“一件一码”，进场时应进行全数三维扫描，对安装错位率≥3mm的构件严格执行返厂处理，同时优化物流调度，确保构件运输的及时性与准确性。现场管理应建立统一的技术标准与操作规程，强化过程检查与验收，确保各工序施工质量符合设计要求，实现装配式建筑施工的安全、高效推进。

2.3.2 流程管理

装配式住宅建筑流程管理应以施工过程管控为核心，重点加强工序衔接、物流组织和质量追溯等关键环节的管理。在工序管理方面，严格控制现浇与预制工序的交叉作业频率，单日交叉次数不得超过5次，当出现工序冲突时，应及时调整施工计划，确保工序间的最小安全间隔不少于2.2h。物流组织应合理规划构件运输批次与进场时序，确保堆场周转率达到87%以上，并通过定期检查堆场荷载分布，优化二次倒运路径，避免堆场超载或构件积压。质量追溯管理应建立完整的构件生产、运输、安装记录台账，重点监控灌浆密实度、垂直度偏差等关键指标，对灌浆充盈度低于90%的节点及时采取补救措施^[5]。针对突发风险事

件制定分级应急响应机制,当支撑体系位移超过6mm或风速大于10m/s时,应立即采取相应措施,包括现场警示、塔吊限速或暂停高危作业等。施工过程中,应建立工序进度、资源调配与风险管控的动态协调机制,合理控制单日吊装次数不超过12次,并将流程执行情况纳入项目管理考核体系,形成完整的流程管控闭环,确保施工过程的安全、质量和效率。

2.3.3 培训管理

装配式住宅建筑培训管理以工程风险场景为导向,构建分层次、分岗位的实战化培训体系。针对高空吊装作业人员,建立“理论-模拟-实操”三阶段考核机制,理论培训涵盖装配式结构力学特性与吊点设计原理,模拟训练采用1:10缩尺模型还原塔吊力矩限制器超载、风荷载扰动等工况,实操阶段设置垂直度偏差分级考核标准($\leq 3\text{mm}$ 为合格, $> 5\text{mm}$ 复训),并引入第三方认证机构颁发特种作业资格。灌浆工种培训重点强化工艺规范性,通过实体样板墙解剖教学展示套筒灌浆料流动路径与充盈度检测标准,结合压力灌浆模拟装置,要求人员在30min内完成6组套筒灌浆并达到充盈度 $\geq 95\%$ 的验收要求。项目管理层培训侧重工序协同与风险预判能力提升,采用典型案例库还原城市中心区典型事故场景(如堆场坍塌、交叉作业坠落),要求人员基于BIM进度模型制定风险缓解方案,并通过沙盘推演评估方案可行性,考核指标包括工序冲突解决率($\geq 85\%$)与应急响应时效性($\leq 10\text{min}$)。现场班组长培训聚焦动态风险管控,设置临时支撑体系失稳、构件安装错位等突发情景,考核其对警戒线设置、人员疏散路径规划及紧急加固措施的实操能力。培训效果评估采用“理论笔试+实操评分+事故回溯分析”三维度体系,其中实操评分权重占比60%,重点考察标准作业流程执行完整度与风险干预时效性。

3 实践效果分析

本工程通过实施装配式住宅建筑现场安全管理体系,核心风险指标较传统现浇施工模式显著优化。吊装垂直度偏差控制方面,三维激光扫描动态校准技术使平均偏差值降至2.3mm,合格率($\leq 3\text{mm}$)达98%,垂直度超限事故率下降63%;套筒灌浆密实度合格率提升至97.5%,较常规检测模式提高21个百分点,灌浆缺陷返工率由12%压缩至3.8%。在工序协同效能上,BIM-4D进度模拟技术将现浇与预制工序交叉

冲突频率从7.2次/日降至3.5次/日,工序调整响应时间缩短至45min以内,较传统人工调度效率提升4倍。物流管理环节,GIS路径优化模型使构件运输延误率由18%降至6.2%,堆场周转率从72%提升至89%,二次倒运成本减少34万元。培训管理体系实施后,特种作业人员实操考核一次通过率从68%提升至93%,灌浆工效由4组/h提高至12组/h,管理人员风险预判准确率由57%提升至88%。支撑体系稳定性监测数据表明,临时支撑位移超限事件发生率由每月4.3次降至0.7次,且未发生因荷载叠加导致的失稳事故。对比传统施工模式,该体系使项目整体工期从原计划的150天缩短至138天,安全事故率降低51%,质量验收一次通过率提高至98.6%,验证了工业化建造安全管控体系的技术经济合理性。

结论:

通过对装配式住宅建筑项目的安全管理体系进行分析,本文成功提出了一套以BIM技术为核心,结合三维激光扫描、GIS物流仿真等技术的综合安全管控方案。研究表明,采用该体系后,项目在吊装、灌浆、支撑体系等关键工序的安全性得到了显著提升,事故率和质量问题得到有效控制,施工效率也得到了优化。整体工期缩短,安全管控与质量控制达到了理想效果。该体系为装配式建筑施工提供了科学、安全、高效的管理模式,具有较强的推广应用价值,特别是在城市核心区等施工环境复杂的地区。

参考文献:

- [1]张士义.建筑装配式住宅施工安全风险管控探讨[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2022(3):4.
- [2]巫靖宇.装配式施工技术在住宅建筑中的应用研究[J].智能建筑与智慧城市,2020(6):3.
- [3]王继顺.装配式住宅建筑设计要点研究[J].佛山陶瓷,2023,33(8):124-126.
- [4]李晶.装配式住宅建筑安全风险影响因素研究[J].居舍,2023(12):158-161.
- [5]杨小秋.装配式施工技术在住宅建筑中的应用研究[J].中国房地产业,2020,000(032):67.

作者简介:

龚仕毅(1978.10.1-),男,汉族,籍贯:江苏无锡,学历:大学本科,研究方向:建筑施工安全管理,现任职务:项目安全工程师,现任职称:中级。