

装配式房屋结构安全性能评估方法

欧俊康 罗杰中

重庆国信检测技术有限公司 重庆 400025

摘要: 装配式建筑作为建筑工业化核心方向,其“构件预制-现场装配”特性使安全性能评估面临挑战。本文聚焦装配式房屋结构安全评估,首先分析核心结构类型、构造特性及全生命周期风险,构建涵盖构件、节点、整体结构的多层次评估指标体系,明确指标构建原则、权重及分级标准。在此基础上,提出构件级、节点连接级、整体结构级及全生命周期动态评估方法,设计动态评估框架,厘清各阶段评估重点与结果应用路径。研究形成完整评估体系,为精准把控装配式房屋安全状态、推动行业高质量发展提供技术支持,成果可直接应用于工程实践,提升评估效率与准确性。

关键词: 装配式建筑; 结构安全; 性能评估

引言: 在建筑工业化与绿色政策推动下,装配式房屋因施工快、资源省、质量稳等优势在城乡建设中广泛应用。但其安全性能依赖预制构件质量与连接可靠性,部分项目因评估粗放、管控不足出现构件破损、节点松动等隐患,制约发展。现有评估多沿用现浇标准,针对性弱,难精准识别风险。本文立足其结构特性,系统研究评估方法,构建适配、科学的评估体系,明确实施路径,为全周期安全管控及行业高质量发展提供保障。

1 装配式房屋结构特性与安全风险分析

1.1 核心结构类型与构造特性

装配式房屋核心结构类型主要包括装配式混凝土结构(PC)、装配式钢结构、装配式木结构及混合结构,不同类型在构造与性能上呈现显著差异。装配式混凝土结构以预制墙板、楼板、梁柱为核心构件,通过灌浆套筒、浆锚搭接等方式连接,兼具混凝土刚度与装配效率优势;装配式钢结构由预制钢构件通过螺栓、焊接连接而成,具有强度高、自重轻、抗震性能优的特点;装配式木结构依赖标准化木构件拼装,环保性突出但对防腐防火要求较高。共性构造特性表现为构件标准化生产、现场装配连接、结构整体性依赖节点性能。与传统现浇结构相比,装配式结构构件生产精度要求更高,现场施工对吊装、定位等工艺把控更为严格,且结构传力路径与现浇结构存在差异,节点部位成为受力关键与薄弱环节,这些特性直接决定了其安全性能评估需重点关注构件质量与连接可靠性。

1.2 全生命周期安全风险特征

装配式房屋全生命周期涵盖生产、施工、运维三个核心阶段,各阶段安全风险呈现不同特征且相互关联。生产阶段风险主要源于构件质量管控不足,包括原材料

性能不达标、模具精度偏差、预应力施工参数失控、养护环境不当等,易导致构件强度不足、尺寸偏差、表面裂缝等缺陷。施工阶段风险集中在构件运输、吊装及装配环节,运输过程中的碰撞易造成构件边角破损,吊装偏差可能引发构件受力不均,节点连接施工不规范(如灌浆不饱满、螺栓紧固力矩不足)则直接影响结构整体性^[1]。运维阶段风险具有隐蔽性与累积性,环境侵蚀(潮湿、酸碱腐蚀)会加速构件老化与节点锈蚀,装修改造带来的荷载变化可能超出结构设计承载能力,地震、强风等灾害作用则易引发节点失效、结构变形等严重问题。全生命周期风险呈现链式传递特征,生产阶段的微小缺陷可能在施工或运维阶段放大,最终演变为重大安全隐患。

2 装配式房屋结构安全性能评估指标体系构建

2.1 评估指标构建原则

装配式房屋结构安全性能评估指标体系构建需遵循四项核心原则。一是针对性原则,聚焦装配式结构“构件预制-现场装配”的核心特性,重点围绕构件质量、节点连接、结构整体性等关键风险点设置指标,避免照搬现浇结构评估指标。二是科学性原则,指标设计基于结构力学原理与现行行业规范,明确各指标物理意义与量化标准,确保评估结果客观反映结构安全状态。三是系统性原则,指标体系需覆盖生产、施工、运维全生命周期,涵盖构件、节点、整体结构三个层面,形成完整的风险识别与评估链条。四是实用性原则,指标数据需易于通过现场检测、试验等方式获取,避免设置过于复杂或难以量化的指标,适配工程现场评估的实际需求,同时兼顾不同结构类型的通用性与特殊性,确保指标体系在各类装配式房屋中均能有效应用。

2.2 分层面评估指标

评估指标体系按构件、节点、整体结构三个层面划分,形成多层次、立体化的评估网络。构件层面指标聚焦预制构件自身质量与性能,包括材料性能指标(混凝土强度、钢材屈服强度、木材含水率等)、构件质量指标(尺寸偏差、外观缺陷等级、裂缝宽度与长度)及耐久性指标(混凝土碳化深度、钢筋锈蚀速率、木材防腐等级)。节点层面指标重点关注连接可靠性,涵盖连接方式适配性(结合结构类型与受力场景评估)、连接质量指标(灌浆套筒饱满度、螺栓紧固力矩、焊接缺陷等级)及节点力学性能指标(抗拔承载力、抗剪承载力、变形能力)。整体结构层面指标聚焦结构整体安全性能,包括承载力指标(构件与整体结构极限承载力、正常使用承载力)、变形性能指标(结构挠度、层间位移角、节点转角)、抗震性能指标(抗震构造完整性、结构延性、耗能能力)及稳定性指标(抗倾覆系数、抗滑移系数、整体稳定系数),各层面指标相互关联,共同支撑安全性能综合评估^[2]。

2.3 指标权重确定与分级标准

指标权重采用层次分析法(AHP)与熵权法相结合的组合赋权法确定,兼顾主观经验与客观数据。先通过层次分析法构建递阶层次结构,邀请行业专家对各指标重要性进行两两比较打分,得到主观权重;再基于工程实测数据,通过熵权法计算各指标信息熵与客观权重;最终采用加权平均法融合主客观权重,确保权重分配科学合理。评估指标分级标准参考《装配式混凝土结构技术标准》《钢结构工程施工质量验收标准》等现行规范,结合工程实践经验划分四级安全等级:安全(指标达标率 $\geq 90\%$)、基本安全($75\% \leq$ 达标率 $< 90\%$)、不安全($60\% \leq$ 达标率 $< 75\%$)、危险(达标率 $< 60\%$)。针对关键指标(如节点灌浆饱满度、结构承载力)设置严格阈值,若此类指标不达标,直接判定结构安全等级为不安全或危险,确保核心风险点得到重点管控。

3 装配式房屋结构安全性能核心评估方法

3.1 构件级安全评估方法

构件级安全评估采用“外观检测+性能检测+耐久性评估”的综合方法。外观检测结合目测与辅助设备,利用无人机排查高处构件、内窥镜检测隐蔽部位,重点识别裂缝、破损、缺棱掉角等缺陷,记录缺陷位置、尺寸与形态;对检测发现的疑似缺陷,采用超声检测进一步判定深度与范围。性能检测针对不同构件类型选取适配方法,混凝土构件采用回弹法或超声回弹综合法检测

强度,必要时进行钻芯取样验证;钢构件通过光谱分析确认材质、拉伸试验检测力学性能;木构件检测含水率与腐朽程度。耐久性评估基于环境监测数据与材料性能检测结果,采用老化模型预测构件剩余使用寿命,混凝土构件重点分析碳化深度与钢筋锈蚀速率,钢构件关注锈蚀程度,木构件评估防腐防火层有效性,最终结合外观、性能与耐久性检测结果,综合判定构件安全等级。

3.2 节点连接安全评估方法

节点连接安全评估以“无损检测为主、力学试验为辅”,结合数值模拟验证。无损检测针对不同连接类型选取专项技术,灌浆套筒连接采用超声波法或X射线法检测灌浆饱满度,通过波形分析与成像技术识别空洞、不密实等缺陷;螺栓连接采用扭矩扳手检测紧固力矩,结合超声检测识别螺栓松动或疲劳损伤;焊接节点采用超声波探伤或磁粉探伤,排查裂纹、未焊透等缺陷。力学试验选取典型节点进行现场或试验室加载试验,测试节点抗拔、抗剪承载力与变形能力,验证节点力学性能是否满足设计要求。数值模拟构建节点精细化有限元模型,输入实测材料参数与缺陷数据,模拟不同荷载工况下节点应力分布与破坏模式,预测节点长期工作性能^[3]。综合无损检测结果、力学试验数据与数值模拟分析,全面评估节点连接安全可靠。

3.3 整体结构安全评估方法

整体结构安全评估采用“规范验算+数值模拟+荷载试验”相结合的方法。规范验算基于构件与节点检测数据,按照现行结构设计规范,验算整体结构在恒载、活载、风荷载、地震作用等工况下的承载力、变形与稳定性,重点核查结构抗侧移能力、抗震构造完整性等关键指标。数值模拟构建整体结构有限元模型,细化构件与节点参数,模拟静力与动力工况下结构整体响应,分析结构薄弱部位与受力瓶颈,预测极端工况下结构破坏模式。荷载试验选取关键区域进行现场堆载试验或动力测试,堆载试验通过分级加载监测结构挠度、应变变化,验证结构实际承载能力;动力测试采用脉动法获取结构自振频率、振型等参数,评估结构整体刚度与完整性。综合三类方法结果,结合结构使用年限与环境条件,全面判定整体结构安全性能。

3.4 全生命周期动态评估方法

全生命周期动态评估基于“数据追溯+阶段评估+风险预警”构建,实现安全状态的实时把控。搭建全生命周期数据库,整合生产阶段构件质量检测数据、施工阶段安装与验收数据、运维阶段监测与检修数据,确保数据可追溯、可更新。采用阶段化评估模式,生产阶段

开展构件出厂质量验收评估,施工阶段进行安装质量与临时安全评估,运维阶段定期开展全面安全评估与专项风险评估。引入物联网技术,在结构关键部位布设传感器,实时监测构件应力、节点位移、环境参数等数据,结合机器学习算法构建动态评估模型,实时分析数据变化趋势,识别异常波动。设定分级风险预警阈值,当监测数据超出阈值或评估结果达到不安全等级时,自动触发预警,推送整改建议,实现从“被动评估”向“主动预警”的转变,保障结构全生命周期安全。

4 全生命周期安全性能动态评估策略

4.1 动态评估框架

全生命周期安全性能动态评估框架采用“数据层-模型层-应用层”三级架构,实现数据整合、智能评估与决策支撑的闭环管理。数据层负责多源数据采集与整合,通过传感器、检测设备、管理系统等渠道,收集生产、施工、运维各阶段的构件质量、节点性能、结构响应、环境条件等数据,经清洗、标准化处理后存入数据库。模型层构建融合机器学习与数值模拟的动态评估模型,基于历史数据训练模型参数,结合实时数据动态更新评估结果,同时嵌入风险识别算法,精准定位安全隐患。应用层提供多样化功能模块,包括安全等级评估、风险预警、报告生成、整改跟踪等,通过可视化平台直观呈现评估结果,支持管理人员快速获取关键信息,实现评估与管控的无缝衔接,确保框架兼具科学性与实用性。

4.2 各阶段评估重点

动态评估按全生命周期各阶段划分重点,实现精准化管控。生产阶段评估重点为构件质量验收,聚焦原材料性能、构件尺寸精度、外观缺陷、力学性能等指标,采用出厂检测与抽样复核相结合的方式,确保构件质量符合设计要求,杜绝不合格构件流入施工现场。施工阶段评估重点包括构件吊装质量、节点连接施工质量及临时支撑安全性,吊装过程中监测构件受力与定位偏差,节点施工后重点检测连接质量,定期核查临时支撑稳定性,避免施工过程中出现结构失稳。运维阶段评估重点为结构长期性能与风险隐患,定期检测构件老化、节点松动等情况,结合环境监测数据评估腐蚀、风化影响,

针对极端天气或结构改造后的关键节点开展专项评估,及时发现并处置安全隐患,保障结构长期安全运行^[4]。

4.3 评估结果应用

评估结果应用贯穿全生命周期,形成“评估-整改-验证-优化”的闭环管理。生产阶段若评估发现构件质量不达标,立即退回整改,整改后重新评估,直至符合标准;对共性问题优化生产工艺,从源头提升构件质量。施工阶段依据评估结果调整施工方案,针对节点连接质量不合格等问题,采取补灌浆、重新紧固等整改措施,整改完成后组织复核评估;结合评估数据优化吊装顺序与临时支撑布置,提升施工安全性与效率。运维阶段根据评估结果制定差异化运维方案,对基本安全等级构件加强监测,对不安全构件及时维修加固,对危险构件采取停用或更换措施;利用评估数据积累优化后续装配式房屋设计与施工,完善评估指标体系与方法,推动装配式建筑安全管控水平持续提升,实现评估结果的资源化利用。

结束语

装配式房屋结构安全性能评估是保障工程质量、推动行业健康发展的核心技术支撑。本文系统梳理装配式房屋结构特性与全生命周期安全风险,构建涵盖多层面的评估指标体系,提出构件级、节点级、整体结构级及全生命周期动态评估方法,设计完整的动态评估策略,形成科学全面的评估体系。随着评估技术的不断完善,将为装配式建筑高质量发展筑牢安全屏障,助力建筑工业化与绿色建筑发展目标的实现。

参考文献

- [1]宋春雷.模块化装配式钢结构房屋建筑的施工技术[J].工程建设与设计,2025(15):197-199.
- [2]熊立红,刘学洋.装配式AAC板构式结构地震易损性及安全性[J].建筑科学,2024,40(1):66-75.
- [3]谷锡民,孟芯玉,井淇,等.浅析装配式砌体结构及其抗震性能研究[J].中国建筑装饰装修,2023(22):48-50.
- [4]陈建德.房屋建筑工程中的装配式混凝土结构施工技术[J].中国住宅设施,2022(4):10-12.