

装配式建筑预制构件吊装过程的结构变形协同控制

许以驰 詹明敏 张长安 郑卿鸿 丁剑东

中建海峡建设发展有限公司

摘要：建筑工业化推进步伐提速，装配式建筑凭借节能降耗、施工高效等突出优势普及度持续提升，预制构件吊装作为施工关键作业模块，结构变形调控关联着建筑安装精准度与整体稳固状态。本文围绕吊装过程中结构变形的协同调控问题，剖析预制构件吊装的力学表现及形变本质，探究核心影响条件，构建涵盖构件设计优化、施工流程规范、监测反馈联动的多层次协同调控方案，经实际工程应用检验方案可行性，研究致力于为提升装配式建筑吊装施工品质、降低形变隐患提供理论依据与技术借鉴，助力装配式建筑施工技术迭代完善。

关键词：装配式建筑；预制构件吊装；结构变形；协同控制；施工优化

引言

装配式建筑采用构件工厂预制、现场装配的施工模式，切实压缩工期、降低现场污染，已然成为建筑行业转型发展的核心路径，预制构件吊装作业中，自身特性、施工操作、外部环境等多重条件作用下常出现弯曲、剪切等结构形变，形变程度超出许可阈值便会造成员件拼接偏差、连接节点功能失效，更可能诱发安全风险。达成吊装过程中结构形变的协同调控，是维系装配式建筑施工品质的核心所在，本文围绕理论分析、影响因素、控制策略及实践应用展开探讨，深入钻研多环节多因素协同的形变调控路径，为破解吊装施工中的形变难题供给全新解决视角。

1 装配式建筑预制构件吊装结构变形的基础理论

1.1 预制构件的力学特性分析

预制构件作为装配式建筑的关键受力载体，力学特性主导着吊装过程中的变形反应，常选用混凝土、钢材等基材，呈现自重偏大、刚度分布不均衡的特征，吊装过程中要承载自身重量、吊具牵引力等复合荷载。截面形态、配筋比例、连接界面完好度等皆会作用于力学表现，薄壁构件易发生局部屈曲，配筋欠缺的构件吊装时可能出现裂缝，生产精度与养护水准同样会干扰力学特性的稳定状态，间接作用于吊装过程中的变形规律，全面剖析构件力学表现是构建适宜变形调控方案的前提^[1]。

1.2 吊装过程的受力机制探讨

预制构件吊装作为动态受力演化过程，受力机制具备复杂属性与瞬时效应，吊装启动阶段，构件从静态向动态过渡形成惯性力，吊具与构件接触部位同步呈现应力集中效应，起吊进程中，受力态势随吊点布设位置、起吊速率的变动持续调适，吊点布设缺乏合理性易促使构件产生超额弯矩，起吊速率偏快则放大

惯性力诱发的冲击载荷。临时支撑与构件间的相互作用效应重塑受力分布格局，支撑刚度欠缺或布设方式欠妥会导致构件受力失稳，引发额外形变，厘清吊装过程中受力传递路径与演化规律，为洞悉结构形变生成机理提供核心支撑。

1.3 结构变形的基本类型与演化规律

预制构件吊装阶段的结构形变核心涵盖弯曲形变、剪切形变、拼接部位形变三种形态，弯曲形变多见于梁、板类构件，自重与吊点弯矩的联合作用催生此类形变，形变幅度与构件跨距、截面惯性矩存在紧密关联，剪切形变在墙体、柱类构件中较为普遍，荷载横向分布失衡是主要诱因，具体呈现为构件截面的相对滑移现象，拼接部位形变源自构件连接界面的刚度落差，吊装冲击力作用下易形成缝隙或位置偏移^[2]。结构形变的演化呈现鲜明阶段性特征，起吊阶段形变呈快速攀升态势，平稳吊装阶段形变逐渐趋于平缓，就位阶段与其他构件或支撑的接触作用可能催生二次形变，明晰形变类型与演化规律，能够为形变精准调控提供可靠支撑。

2 预制构件吊装结构变形的影响因素分析

2.1 构件自身特性对变形的影响

构件自身属性构成吊装形变的内在诱因，几何维度参数与材质核心性能主导形变敏感程度，截面构型上矩形截面具备的抗弯折、抗剪切效能高于异形截面，薄壁构件因刚度偏弱，同等荷载条件下形变幅度更大，材质均一性会干扰形变分布状态，混凝土构件若存在骨料排布失衡、裂隙等瑕疵，易造成应力集中^[3]。促使局部形变加剧，预制构件自重与长度的配比关系同样关联形变程度，自重偏大、长度偏长的构件，吊装阶段形成的弯矩值更高，形变风险也相应提升，预制环节形成的质量瑕疵，诸如预埋件定位偏移、混凝土

强度达标不足等,会进一步放大形变效应,干扰整体吊装精准度。

2.2 吊装施工参数的影响作用

吊装施工参数构成形变调控的核心外部条件,直接作用于构件受力态势与形变反馈,吊点布设属于核心参数范畴,对称布设能够让构件受力均衡,抑制弯曲形变,吊点数量欠缺或布设位置偏移易造成荷载分布失稳,催生超额弯矩,吊具品类与吊索倾角对形变存在影响,柔性吊具常因拉伸形变传导额外荷载^[4]。吊索倾角偏小会放大水平分力,促使构件侧向形变加剧,起吊及移动速率不容忽视,起吊速率过快易形成较大惯性力,诱发冲击形变,移动阶段加速、减速操作失当会引发构件振动,进而拓展形变区间,临时支撑的刚度指标、布设密度及安装精准度,经由受力传导作用于构件形变,支撑力度欠缺易造成构件临时受力失稳。

2.3 外部环境条件的干扰效应

外部环境要素改变构件受力态势与材质效能,间接作用于吊装形变,风荷载作为核心主导的环境干扰项,高层装配式建筑吊装场景中侧向风荷载易促使构件产生水平偏移与振动现象,抬升形变隐患,风速越高、构件迎风面积越广,形变幅度越突出,温度变化同样会诱发形变,骤升或骤降的温度条件促使构件出现热胀冷缩效应^[5]。约束条件若阻碍自由形变便会催生温度应力,诱发额外形变,施工场地地面平整程度与吊装器械稳固状态同样作用于形变情况,地面沉降易造成吊装器械倾斜,造成构件受力偏向,器械振动经由吊具传导至构件本体,放大动态形变效应,环境要素的随机属性与不确定特征,提升了形变协同调控的复杂程度。

3 装配式建筑预制构件吊装结构变形协同控制策略

3.1 构件优化设计与预处理协同

构件设计环节的优化属于形变调控的源头性举措,需契合吊装受力特征开展靶向设计,截面设计环节需依据构件品类与跨距科学选取截面构型,扩大惯性矩强化抗形变效能,薄壁构件可增设加劲肋巩固局部刚度指标,配筋规划需优化钢筋排布方式,聚焦吊点周边及构件端部等薄弱区域强化处理,增进构件整体承载效能。预留形变补偿区间、优化预埋件布设方位等手段,能够为吊装阶段的形变调适提供支撑条件,构件预制环节需严格把控生产品质,保障材质均一性与尺寸精准度,规避缺陷引发的形变放大效应,吊装作业前需对构件实施全面检测,针对存在微小形变的构件开展预处理操作,保障吊装初始状态的稳固性能。

3.2 施工过程多环节协同控制

施工阶段的多环节协同调控构成形变管控的核心要义,吊具甄选、吊点布设、起吊运作与临时支撑的协同联动必不可少,吊具甄选需契合构件属性,刚性吊具应作为优选以弱化拉伸形变,异形构件可量身打造专用吊具,保障受力均衡状态,吊点布设需经力学解析加以完善,依据构件自重分布态势明确吊点数量与布设方位,达成荷载均衡,可调式吊点装置可在必要时启用,动态调适受力态势。起吊运作需恪守慢起、稳移、缓落准则,把控起吊速率与加速度参数,弱化惯性力冲击效应,移动阶段维持构件水平姿态,规避侧向振动现象,临时支撑系统需同吊装流程形成联动,提前完成安装且保障刚度达标,支撑点布设需与构件受力节点精准对应,吊装就位阶段实时调适支撑高度与刚度指标,与吊具联动承载荷载,渐进式完成受力传导,规避支撑滞后引发的过量形变。

3.3 监测与反馈调整协同机制

实时监测与动态反馈的协同机制构建,构成形变管控成效的核心保障,吊装作业前期结合构件品类与形变隐患,布设靶向性监测点位,聚焦吊点周边、构件端部及拼接界面等核心区域的形变数据捕捉,依托高精度传感设备完成实时数据搜集,无线传输技术将监测数据传导至控制中枢,搭建数字化监测体系。对形变数据开展实时解析,研判形变走向及是否逾越许可阈值,监测数据反馈形变逼近阈值时,触发反馈调适机制,调整吊点受力状态、优化起吊速率、强化临时支撑强度等举措,及时遏制形变蔓延态势,多专业协同沟通体系同步搭建,监测人员、吊装作业人员与技术人员实时联动衔接,保障调适措施高效落地,构建监测-解析-反馈-调适的闭环协同管控模式,达成形变的动态精准调控。

4 协同控制策略的实践应用与效果分析

4.1 实践应用场景与实施流程

协同控制策略适用于多层及高层装配式建筑中墙板、梁、板、柱等各类预制构件的吊装作业场景,作业开展前的筹备工作涵盖构件力学表现解析、施工参数优化规划、监测系统部署及相关人员专项培训,厘清各参与方在协同流程中的具体职责,吊装作业推进中,严格依照优化后的吊点布设与起吊参数规范操作,同步激活监测系统捕捉形变数据,临时支撑与吊装作业团队紧密协作,依据构件就位情况灵活调适支撑方位与刚度指标。多构件协同吊装场景下,需规划科学的吊装次序,规避相邻构件吊装作业的相互干扰,依托监测数据动态调适各构件吊装节奏,达成整体形变

的协同管控目标,作业收尾阶段,汇总梳理吊装精准度与形变相关数据并展开深度分析,为后续同类构件吊装作业积累实践经验与技术参照。

4.2 实施过程的关键控制要点

协同控制策略的顺畅落地需紧扣系列核心控制要点,设计与施工的深度协同需保障构件设计参数与施工实际工况精准适配,施工方案充分吸纳设计核心诉求,结合吊装力学特性与现场环境条件细化执行细则,设备与人员的协同联动要求吊装设备、监测设备与操作人员、技术人员形成高效配合,操作人员需熟悉设备性能与监测数据解读逻辑,操作与监测工作同步衔接无间隙,动态调整的敏捷性不可或缺,依托实时监测数据快速校准执行偏差,规避形变累积叠加引发的连锁影响,多因素统筹协同需全面覆盖构件物理属性、施工关键参数及外部环境条件的综合作用,杜绝单一维度管控导致的整体形变失稳风险。施工全过程的质量管控需持续强化,定期校验吊具承重能力与支撑结构稳定性,通过标准化操作流程确保监测数据的精准可靠,为协同管控提供坚实数据支撑,针对墙板、梁柱、梁板等不同品类构件与高低层建筑、复杂场地等施工场景,需动态适配管控重心,墙板吊装侧重垂直度管控,梁柱构件聚焦轴线偏差调节,实现贴合实际需求的针对性协同管控目标。

4.3 协同控制的应用效果评价

在多层及高层装配式建筑各类预制构件吊装作业中,协同管控方案的实践反馈充分印证其实际价值,能够有效压制预制构件吊装阶段的结构形变幅度,构件优化设计环节提升本体抗形变潜力,降低固有形变隐患,施工各环节协同管控杜绝操作疏漏或参数偏差诱发的额外形变,监测反馈协同体系实现形变动态把控,保障形变始终处于许可区间。墙板吊装的垂直度偏差进一步收窄,梁板类构件的弯曲形变控制在设计阈值内,柱体拼接的同轴度显著改善,该策略落地后构件吊装安装精准度全面优化,拼接部位间隙大幅缩

减,杜绝形变引发的返工隐患,协同管控模式降低吊装阶段振动与冲击效应,减少构件破损概率,提升施工安全系数与作业效能,施工过程中因形变问题导致的材料损耗率降低,作业周期得到合理压缩,后续跟踪监测显示构件长期使用仍保持良好结构稳定性,此类协同管控方案达成吊装形变的系统性把控,为装配式建筑施工品质筑牢坚实支撑。

5 结语

装配式建筑预制构件吊装阶段的结构形变协同管控,属于涵盖设计规划、施工执行、监测反馈等多环节的系统性工程,核心理论支撑与影响条件的剖析,催生构件优化、施工联动、监测反馈相融合的多层面协同管控方案,工程实践检验方案实用价值,各环节与多因素的深度契合,方能从源头把控、过程管控、反馈调节三个维度实现形变全面管控,精进吊装施工品质。当前装配式建筑向高层化与复杂化演进,吊装形变管控面临更为严苛的标准,后续可进一步融合数字化模拟、智能化监测等先进技术,迭代优化协同管控方案,达成形变精准预判与自适应调控,为装配式建筑行业高质量发展提供更为坚实的技术保障。

参考文献:

- [1] 王继茂, 邓泽伟. 面向装配式预制构件吊装的智慧工地系统研发与应用 [J]. 建筑机械, 2025,(10):25–28+36.
- [2] 张鑫, 张雷, 屈阳阳, 等. 基于安全理念的装配式工程预制构件吊装施工技术研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2025,(18):189–191.
- [3] 徐泮芹, 符吉, 陈士, 等. 装配式建筑预制构件高效吊装及连接施工技术研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2025,(16):154–156.
- [4] 翟俊智. 装配式建筑预制构件运输与吊装施工的成本管理研究 [J]. 江西建材, 2025,(07):306–307+313.
- [5] 李国. 装配式建筑预制构件吊装工艺优化及施工 [J]. 陶瓷, 2025,(03):196–198.