

# 装配式建筑节点连接可靠性检测与抗震性能退化分析

胡家梁<sup>1</sup> 田学付<sup>2</sup>

1. 天津喜利得建筑质量鉴定检测有限公司 天津 300000

2. 天津顺港建设工程质量检测有限公司 天津 300000

**摘要:** 装配式建筑节点连接是保障结构安全的核心,其可靠性与抗震性能直接决定建筑服役安全性。本文梳理节点连接类型及构造特征,阐述可靠性检测理论、指标与方法,通过试验设计分析循环荷载下节点抗震性能退化规律,识别材料、构造等影响因素及耦合机制,最终提出检测优化、设计改进、施工管控及后期维护等措施,为装配式建筑节点可靠性提升、抗震性能优化提供科学依据与实践参考,助力建筑工业化高质量发展。

**关键词:** 装配式建筑;节点连接;可靠性检测;抗震性能退化

**引言:** 随着建筑工业化与“双碳”战略推进,装配式建筑因高效、环保优势广泛应用,但节点连接作为受力关键环节,其可靠性不足及抗震性能退化问题制约行业发展。地震作用下,节点易出现开裂、失效等隐患,严重影响结构整体安全。因此,开展节点连接可靠性检测与抗震性能退化分析,明确退化规律及影响因素,提出针对性优化措施,对完善装配式建筑技术体系、保障工程安全具有重要理论价值与现实意义。

## 1 装配式建筑节点连接类型及可靠性检测基础

### 1.1 装配式建筑节点连接常见类型及构造特征

#### 1.1.1 主要连接类型

湿式连接以灌浆套筒、后浇混凝土为核心,依靠胶结作用实现节点整体性,密封性好、受力可靠;干式连接包括螺栓、焊接、钢板连接,施工便捷、可拆卸,适用于临时或装配速度要求高的场景;混合连接结合两者优势,兼顾整体性与施工效率,应用日趋广泛。

#### 1.1.2 典型节点构造特征

梁柱节点需传递弯矩和剪力,构造上注重节点刚度与延性;墙板节点侧重密封与抗侧移,需满足保温防水要求;叠合板节点聚焦拼接处受力连续性,避免出现受力薄弱环节。

### 1.2 节点连接可靠性检测相关理论与标准

#### 1.2.1 可靠性检测核心理论

围绕强度、刚度、延性及耐久性展开,强度检测关注节点承载极限,刚度检测评估变形能力,延性检测保障塑性耗能,耐久性检测预防长期使用中的性能退化。

#### 1.2.2 相关行业标准

明确节点连接检测的技术要求、质量评定标准及验收规范,统一检测流程与指标阈值,为检测工作提供依据,确保检测结果具有客观性和可比性。

### 1.3 节点连接可靠性检测指标与方法

#### 1.3.1 核心检测指标

涵盖连接强度、变形能力、缺陷情况(裂缝、空洞、松动等)及耐久性参数,全面反映节点连接的安全性能与使用寿命。

#### 1.3.2 常用检测方法

无损检测(超声波、雷达、红外热像等)可实现非破坏性检测;荷载试验直接验证节点承载能力;现场实测法精准获取实际工况数据;智能检测技术(传感器、机器视觉)提升检测效率与精度。

#### 1.3.3 检测方法对比分析

无损检测适用于大面积排查,精度适中、效率高;荷载试验精度高但成本高、耗时久;智能检测技术高效便捷,局限性在于设备投入较高<sup>[1]</sup>。

### 1.4 检测数据处理与可靠性评价方法

#### 1.4.1 检测数据的采集与预处理

通过规范采集数据后,进行筛选、误差修正及标准化处理,剔除异常数据,确保数据真实性与准确性。

#### 1.4.2 可靠性评价指标体系

建立多维度评价模型,结合检测指标量化节点连接可靠性等级,明确合格标准,为节点维护、加固提供科学依据。

## 2 装配式建筑节点抗震性能退化试验设计与实施

### 2.1 试验目的与试验方案设计

#### 2.1.1 试验目的

明确装配式建筑节点在循环荷载作用下的抗震性能退化规律,重点分析节点强度、刚度、延性及耗能能力的衰减特征,验证前期节点可靠性检测方法的有效性,为节点抗震设计优化、质量控制及检测技术完善提供试验依据。

#### 2.1.2 试验方案

选取装配式建筑中具代表性的梁柱、墙板节点为试验对象,结合实际工程参数确定试件尺寸、混凝土强度等级、钢筋规格及连接件型号,保证试件与实际工程节点一致;采用拟静力与地震模拟相结合的加载方式,拟静力加载实行分级循环控制,地震模拟加载还原实际地震荷载特性,保障试验科学且有针对性。

## 2.2 试验材料与试验设备

### 2.2.1 试验材料

混凝土选用符合设计强度等级的商品混凝土,提供完整强度检测报告;钢筋采用HRB400级热轧带肋钢筋,明确其屈服强度、抗拉强度等性能参数;连接件包括螺栓、灌浆料、钢板,均选用符合行业标准的产品,根据节点受力要求确定规格,明确选取依据及性能指标。

### 2.2.2 试验设备

加载设备采用电液伺服加载系统,用于施加循环荷载;位移计、应变片分别用于测量节点位移及构件应变;数据采集系统实现试验数据的实时采集、存储与传输;无损检测设备包括超声波探伤仪、拉力试验机等,用于试验前后节点缺陷检测及材料性能验证。

## 2.3 试验过程与数据采集

### 2.3.1 试验准备

严格按照设计图纸制作试件,养护至规定强度后进行安装固定,调试加载设备及测量仪器,确保设备运行正常;合理布置测点,在节点关键受力部位粘贴应变片、安装位移计,保证数据采集的准确性。

### 2.3.2 试验实施

按照预设加载制度进行分级加载,每级加载后保持荷载稳定,观察并记录节点受力状态、变形情况及表面破坏现象,直至节点达到极限破坏状态,停止加载<sup>[2]</sup>。

### 2.3.3 数据采集

全程采集荷载-位移滞回曲线、钢筋及混凝土应变数据、节点缺陷发展数据及能量耗散数据,同步记录加载过程中的异常情况,确保数据完整、真实,为后续分析提供支撑。

## 2.4 试验现象分析

### 2.4.1 节点破坏过程

分阶段描述节点破坏特征,开裂阶段表现为节点表面出现细微裂缝,裂缝多集中在连接件与混凝土交接处;屈服阶段裂缝逐渐扩展,钢筋开始屈服,节点刚度明显下降;极限破坏阶段裂缝贯通,混凝土出现压碎现象,连接件失效,节点丧失承载能力。

### 2.4.2 典型破坏模式

主要包括混凝土压碎、钢筋屈服断裂、连接件松动或断裂、焊缝缺陷扩展等,其中混凝土压碎多发生在节点核心区,钢筋屈服断裂与荷载循环次数密切相关,连

接件失效是导致节点抗震性能退化的关键因素之一。

## 3 装配式建筑节点抗震性能退化规律及影响因素分析

### 3.1 抗震性能退化评价指标

#### 3.1.1 承载力退化

重点分析极限承载力、屈服承载力随加载循环次数的变化规律,表现为随加载次数增加,两种承载力逐步衰减,后期衰减速率加快,核心是节点材料疲劳与损伤累积导致承载能力下降。

#### 3.1.2 刚度退化

分析初始刚度、切线刚度的退化趋势,通过量化计算明确刚度衰减幅度,初始阶段刚度退化较快,后期趋于平缓,切线刚度随荷载循环呈现非线性衰减特征,反映节点抗变形能力的下降。

#### 3.1.3 延性与能量耗散退化

探究延性系数、能量耗散系数的变化特征,延性系数下降表明节点塑性变形能力减弱,能量耗散系数衰减则说明节点吸收地震能量的能力降低,两者均与节点损伤程度正相关。

## 3.2 节点抗震性能退化规律分析

### 3.2.1 基于试验数据的退化曲线拟合

结合试验采集的荷载、位移等数据,拟合承载力、刚度、延性的退化模型,量化描述各指标的退化速率与变化趋势,为后续退化机制分析提供数据支撑。

### 3.2.2 退化阶段划分

明确初期退化、快速退化、稳定退化三个阶段的特征及临界条件,初期退化由材料弹性变形主导,快速退化对应节点裂缝扩展与钢筋屈服,稳定退化阶段节点损伤累积趋于稳定。3.2.3不同节点类型的退化差异对比

湿式节点整体性强,退化速率较慢,承载力与刚度保持性较好;干式节点依赖连接件传力,退化速率较快,后期易出现连接件松动导致性能突变,两者退化规律差异显著<sup>[3]</sup>。

## 3.3 抗震性能退化影响因素识别与分析

### 3.3.1 材料因素

混凝土强度越高,节点退化越慢;钢筋屈服强度与延性直接影响节点耗能能力;连接件材质不佳易导致疲劳断裂,加速退化进程。

### 3.3.2 构造因素

节点几何尺寸合理可延缓退化;钢筋布置均匀能提升节点整体性;湿式连接比干式连接更能抑制退化。

### 3.3.3 施工因素

施工精度不足、灌浆不密实、焊接质量缺陷,会形成节点受力薄弱环节,加快性能退化。3.3.4环境因素

温湿度变化会加剧材料老化,腐蚀介质会损伤钢筋与连接件,导致节点长期退化速率加快。

### 3.4 多因素耦合下的退化机制解析

#### 3.4.1 单因素对退化的作用机制

明确材料性能与施工质量是影响退化的主要因素，构造与环境因素为次要因素，各因素通过影响节点损伤累积速率作用于退化过程。

#### 3.4.2 多因素耦合效应

分析因素间相互作用，如低强度混凝土与劣质连接件耦合会显著加速退化，良好施工质量可缓解环境因素的不利影响，耦合效应会改变单因素的作用强度与退化规律。

## 4 装配式建筑节点连接可靠性提升及抗震性能优化措施

### 4.1 节点连接可靠性检测优化建议

#### 4.1.1 检测方法的优化组合

结合智能检测技术与传统检测方法，形成优势互补的检测体系。将传感器、机器视觉等智能技术融入检测过程，实现节点缺陷的实时监测、数据自动采集与分析，有效提升检测精度与效率；针对不同检测场景，合理搭配无损检测（超声波、雷达）与荷载试验等方法，对节点缺陷进行全面排查，避免单一检测方法的局限性，确保检测结果的准确性与全面性，为节点可靠性评估提供科学支撑。

#### 4.1.2 检测流程规范化

建立节点全生命周期检测体系，实现事前、事中、事后全过程管控。事前检测重点针对节点材料、连接件性能及预制构件质量进行检验，从源头规避质量隐患；事中检测聚焦施工过程中的节点安装、灌浆、焊接等关键工序，及时发现并整改施工缺陷；事后检测涵盖节点竣工验收、使用期间定期检测及大修检测，跟踪节点性能变化，形成完整的检测档案，为节点维护与加固提供依据，全面提升节点连接可靠性<sup>[4]</sup>。

### 4.2 节点抗震性能优化设计措施

#### 4.2.1 材料优化

优先选用高延性混凝土、高强度抗震钢筋等高性能材料，提升节点的抗损伤、抗退化能力；选用耐腐蚀、抗疲劳的高性能连接件，如高强度螺栓、专用灌浆料等，增强连接件的传力性能与耐久性，减少因材料性能不足导致的节点抗震性能退化，为节点抗震提供坚实的材料保障。

#### 4.2.2 构造优化

结合节点受力特性，改进节点几何构造，增大节点核心区尺寸，减少应力集中现象；优化钢筋布置，合理设置箍筋加密区，增强节点核心区的约束能力，提升节点的延性与能量耗散能力；针对湿式、干式节点的不同特点，优化连接构造，湿式节点加强灌浆密实度设计，干式节点优化连接件布置，确保节点在地震作用下能够有效传递内力，避免过早破坏。

### 4.3 施工质量控制措施

(1) 加强施工过程质量控制，重点管控连接件安装精度，严格按照设计要求调整连接件的位置、间距与紧固力矩，避免因安装偏差导致节点受力不均；强化灌浆质量检测，采用超声波探伤等方法检验灌浆密实度，及时处理灌浆空洞、不饱满等缺陷，杜绝施工过程中形成的受力薄弱环节，保障节点施工质量。(2) 建立完善的施工质量追溯体系，规范施工工序管理，明确各工序的质量责任与验收标准，对节点施工的每一道工序进行全程记录与验收，确保施工过程可追溯、可核查；加强施工人员专业培训，提升施工人员的操作技能与质量意识，减少人为操作失误，从施工环节提升节点连接可靠性与抗震性能<sup>[5]</sup>。

### 4.4 后期维护与加固措施

(1) 建立节点定期检测与评估机制，根据节点使用环境与服役年限，制定合理的检测周期，对节点的老化程度、损伤情况进行全面排查与评估，及时发现节点松动、裂缝、腐蚀等问题，建立维护档案，为后期维护与加固提供准确依据，避免小损伤发展为重大安全隐患。

(2) 针对检测发现的节点缺陷，制定针对性加固方案：对松动的螺栓进行紧固或更换，对开裂的焊缝进行修补、补强，对灌浆不密实的节点进行二次灌浆补强；对于老化、损伤严重的节点，采用外包钢板、粘贴碳纤维布等加固方法，提升节点的承载能力与抗震性能，延长节点服役寿命，保障装配式建筑结构整体安全。

## 结束语

本文围绕装配式建筑节点连接可靠性检测与抗震性能退化展开系统研究，明确了节点连接类型、检测方法、抗震性能退化规律，剖析了多因素耦合作用下的退化机制，提出了全方位优化措施。研究虽取得一定成果，但智能检测技术的深度应用、复杂工况下的退化研究仍需完善。未来可进一步结合工程实践深入研究，推动节点技术迭代，为装配式建筑结构安全提供更坚实的保障，助力行业可持续发展。

## 参考文献

- [1]刘洋洋.装配式建筑梁柱节点连接技术研究[J].工程技术研究,2025,10(2):92-94.
- [2]胡振东.装配式建筑结构节点连接方式及施工技术改进研究[J].城市建设理论研究,2024,(35):181-183.
- [3]杜晓恒.装配式建筑节点连接性能数值模拟研究[J].四川建材,2025,51(10):122-124.
- [4]陈晓燕,张兴峰.绿色建材在装配式建筑抗震性能中的作用[J].居舍,2025,(15):68-70.
- [5]王英.影响装配式建筑构件连接节点质量的因素分析[J].混凝土,2024,(12):175-177.