

整体装配式建筑连接节点抗震性能研究

安天翼 郝亮 吴长全
承德建元科技股份有限公司 河北 承德 067000

摘要：本文聚焦于整体装配式建筑连接节点的抗震性能，系统阐述了装配式建筑的定义、特点及连接节点的种类与功能。通过试验研究与数值模拟方法，深入探究了节点抗震性能的影响因素，包括设计参数、施工质量与地震波特性。提出了基于多维度指标的抗震性能评估体系，并对比分析了现有加固技术与新型加固技术的优劣。最后，探讨了加固方案的优化设计，旨在为装配式建筑连接节点的抗震设计提供理论与实践指导。

关键词：整体装配式建筑；连接节点；抗震性能

引言：随着工业化建筑技术的快速发展，整体装配式建筑因其高效、环保的特点而受到广泛关注。连接节点作为装配式建筑的关键部位，其抗震性能直接关系到整体结构的安全性和稳定性。本研究旨在深入探讨装配式建筑连接节点的抗震性能，分析其影响因素，提出有效的抗震设计与加固策略，为提升装配式建筑的抗震能力提供科学依据，促进装配式建筑技术的进一步推广与应用。

1 整体装配式建筑连接节点概述

1.1 装配式建筑的定义与特点

装配式建筑是指通过工厂预制建筑构件（如梁、柱、楼板、墙体等），运输至施工现场后通过可靠连接节点组装成完整建筑的工业化建造方式。其核心特点包括：（1）模块化与标准化。构件采用统一设计标准，实现批量生产，降低定制化成本。例如，预制墙板可预留标准化接口，确保与梁柱的快速匹配。（2）高效节能环保。施工周期缩短30%-50%，减少现场湿作业和建筑垃圾；工厂化生产可精准控制材料用量，降低能耗（如混凝土养护能耗减少20%以上）。

1.2 连接节点的种类与功能

连接节点是装配式建筑的结构安全核心，需满足强度、刚度及抗震等要求，主要分为以下类型：

1.2.1 按部位分类。梁柱节点：多采用套筒灌浆、螺栓连接或焊接，传递弯矩与剪力。例如，钢筋套筒灌浆节点通过高强灌浆料填充预制构件预留孔洞，形成整体性。楼板节点：常见叠合楼板与预制梁的连接，通过后浇混凝土带或抗剪键槽确保楼面荷载传递。墙体连接节点：包括水平缝（如环氧树脂胶粘接）和竖向缝（如预应力拉结），需兼顾抗剪与防水功能。特殊用途节点：

如抗震阻尼节点、可拆卸节点，用于提升结构韧性或适应建筑功能变更需求^[1]。

1.2.2 功能与重要性。结构整体性：节点需等效现浇结构，避免成为薄弱环节。例如，日本“NewRC技术”通过高强钢筋与混凝土优化节点抗震性能。施工便捷性：如欧洲流行的“DryConnection”（干式连接）技术，通过螺栓快速安装，减少现场依赖。耐久性与适应性：节点设计需考虑材料收缩、徐变及环境腐蚀，如采用不锈钢螺栓或防腐涂层。

2 整体装配式建筑连接节点抗震性能研究方法

2.1 试验研究方法

试验研究通过物理模型模拟地震作用，直接观测节点的破坏模式与性能极限，是抗震性能评价的基础。

2.1.1 试验设计。模型构建：1）缩尺模型。根据相似理论（如几何相似比1:2~1:5）设计节点试件，材料需与原型一致（如C40混凝土、HRB400钢筋）。2）边界条件模拟。固定端采用地锚螺栓约束，自由端设置液压作动器施加荷载，还原实际梁柱节点受力状态。3）典型节点类型。如套筒灌浆节点、螺栓连接节点、混合连接节点等，需对比不同连接形式的抗震差异。

加载方式：1）拟静力试验：采用低周反复加载（如位移控制），模拟地震往复作用。加载制度常按《建筑抗震试验规程》（JGJ/T101-2015）设计，如“力-位移混合控制”阶段。2）振动台试验：针对整体结构节点，输入地震波（如El-Centro波、Taft波），研究多维地震耦合效应^[2]。

2.1.2 数据采集与分析。关键参数测量：应力应变。通过应变片（贴于钢筋与混凝土表面）和光纤传感器（监测内部损伤）采集；位移与变形。采用LVDT（线性位移传感器）或非接触式光学测量（如DIC数字图像相关技术）；破坏形态。记录裂缝开展、钢筋屈服、混凝土压溃等关键现象。

基金项目名称：生态涵养区超低能耗混凝土模块化低层民居的研发与应用

项目编号：202302F031

性能指标分析：承载力退化：对比峰值荷载与残余强度，评估节点耗能能力；刚度退化曲线：通过滞回环斜率变化分析刚度损失率；延性系数：极限位移与屈服位移比值（ $\mu \geq 3.0$ 为高延性节点）。

2.2 数值模拟方法

数值模拟通过计算机仿真补充试验局限，可高效参数化分析复杂工况，降低成本与周期。

2.2.1 有限元分析软件应用

通用软件：如ABAQUS（非线性分析能力强）、ANSYS（多物理场耦合）、OpenSees（专注于抗震分析）。

建模要点：1）材料本构模型。混凝土采用“塑性损伤模型（CDP）”，钢筋选用“双线性随动硬化模型”。2）接触与粘结。钢筋与灌浆料界面需定义“粘结-滑移关系”（如《混凝土结构设计规范》GB50010建议的 τ - s 曲线）。

2.2.2 三维数值模型构建

几何参数化：基于BIM模型导出IGES格式，在软件中细化网格（混凝土单元尺寸 $\leq 20\text{mm}$ ，钢筋采用Truss或Beam单元）。

边界条件：底部固结，顶部施加位移时程或加速度时程（如调幅后的 $\text{PGA} = 0.4\text{g}$ 地震波）。

2.2.3 模拟与试验对比验证

结果校准：将模拟滞回曲线、应力云图与试验数据对比，误差需控制在15%以内。

敏感性分析：探究参数（如灌浆料强度、螺栓预紧力）对节点性能的影响规律。例如，某研究显示螺栓预紧力每增加10%，节点初始刚度提升8%。

3 整体装配式建筑连接节点抗震性能影响因素分析

3.1 节点设计参数

节点设计参数是抗震性能的先天决定因素，需通过精细化计算与优化实现安全性与经济性的平衡。

3.1.1 连接长度与构造形式

锚固长度：钢筋在套筒或混凝土中的锚固长度不足会导致粘结滑移失效。根据《装配式混凝土结构技术规程》（JGJ1-2014），锚固长度需 ≥ 15 倍钢筋直径（HRB400级钢筋）。

节点区构造：如梁柱节点核心区增设箍筋（间距 $\leq 100\text{mm}$ ）或钢板套箍，可提升抗剪能力。日本“带翼缘套筒节点”通过扩大接触面，使节点耗能能力提高30%^[3]。

3.1.2 截面尺寸与几何特性

截面尺寸：梁柱节点区的截面高度比（ h/b ）影响弯矩传递效率。试验表明，当 $h/b \geq 2.5$ 时，节点抗弯刚度显著增强。

开孔与削弱：为管道预留的节点区开孔需避开应力

集中区域，否则易引发裂缝贯通。有限元分析显示，开孔边缘加强环可使应力集中系数降低40%。

3.1.3 材料属性

混凝土强度：C40以上混凝土可减少压溃风险，但过高强度（如C80）可能导致脆性破坏。

钢筋与连接件性能：高延性钢筋（如HRB500E）的屈服应变需 ≥ 0.015 ；螺栓连接节点中，8.8级高强螺栓的预紧力误差应控制在 $\pm 5\%$ 以内。

新型材料应用：纤维增强水泥基复合材料（ECC）可替代普通混凝土，其裂缝分散特性使节点延性系数提升至4.0以上。

3.2 施工质量

施工质量是设计意图落地的关键环节，微缺陷可能引发节点性能的显著退化。

3.2.1 节点连接的准确性

构件安装偏差：预制构件轴线偏差需 $\leq 3\text{mm}$ ，否则会导致附加偏心弯矩。激光跟踪仪校准技术可将安装误差控制在1mm内。

灌浆密实度：套筒灌浆不饱满（空隙率 $> 5\%$ ）会降低粘结强度。采用超声波检测（UT）或X射线成像可量化密实度^[4]。

3.2.2 材料选择与工艺控制

灌浆料性能：高强无收缩灌浆料（如M80级）的流动度应 $\geq 300\text{mm}$ ，2h强度 $\geq 35\text{MPa}$ 。

焊接与螺栓施工：焊缝需满足二级焊缝标准（无气孔、夹渣）；螺栓终拧扭矩需采用数显扳手校验。

3.2.3 环境与过程管理

低温施工：环境温度 $< 5^\circ\text{C}$ 时需添加早强剂，否则灌浆料强度发展延迟50%以上。

工人培训：日本通过“技能评价制度”确保节点施工人员100%持证上岗。

3.3 地震波特性

地震动的频谱特性、持时和峰值加速度（PGA）直接影响节点的非线性响应。

3.3.1 频谱特性

软土地场：长周期地震波（如墨西哥1985地震，主频0.5Hz）易激发高层结构高阶振型，导致节点累积损伤加剧。

硬岩场地：短周期波（如Northridge地震）主要考验节点初始刚度，加速度反应谱在0.1~0.5s区间陡升。

3.3.2 地震动强度指标

PGA影响：当 $\text{PGA} > 0.3\text{g}$ 时，多数节点进入塑性阶段。统计显示，PGA每增加0.1g，螺栓连接节点的残余变

形增大15%。

能量持时：长持时地震（如2011日本东北地震，持时> 60s）会引发节点低周疲劳，刚度退化速率提高2~3倍。

3.3.3 地震波选择与调幅

天然波与人工波：天然波（如El-Centro波）用于再现历史地震特性；人工波（如GB50011规范波）用于标准化对比。

双向与竖向地震：三维地震输入下，节点扭转效应使剪力分布不均匀，某些区域应力增加20%~30%。

4 整体装配式建筑连接节点抗震性能评估与优化

4.1 抗震性能评估指标

节点的抗震性能需通过多维度指标综合衡量，反映其承载力、变形能力与耗能特性。

4.1.1 位移与变形指标

层间位移角（ θ ）：极限状态控制在1/50（框架结构）至1/100（剪力墙结构），超限会导致非结构构件破坏。

残余变形：震后残余位移 $\leq 0.5\%$ 层高时，可判定为“可修复损伤”。

4.1.2 应力与承载力指标

应力集中系数（ K_t ）：节点核心区 $K_t \leq 2.0$ 时，可避免局部压溃；套筒灌浆节点钢筋应力不宜超过 $0.9f_y$ （屈服强度）。

承载力退化率：低周反复荷载下，第三循环峰值荷

载较第一循环降低 $\leq 15\%$ 为合格。

4.1.3 能量耗散与延性

等效粘滞阻尼比（ heq ）：优质节点 $heq \geq 0.15$ ，反映滞回环饱满度。

延性系数（ μ ）： $\mu = \Delta u / \Delta y \geq 3.0$ （ Δu 为极限位移， Δy 为屈服位移），日本AIJ标准要求关键节点 $\mu \geq 4.0$ 。

4.2 评估方法

4.2.1 统计分析方法

概率密度函数拟合：基于大量试验数据（如100组节点样本），建立位移角 θ 的对数正态分布模型，计算超越概率。

敏感性排序：通过Spearman相关系数分析，显示灌浆缺陷对节点承载力的影响权重达35%，高于螺栓预紧力（20%）。

4.2.2 可靠性分析方法

一次二阶矩法（FOSM）：计算节点可靠度指标 $\beta \geq 2.5$ （对应失效概率 $\leq 0.6\%$ ）。

蒙特卡洛模拟：考虑材料强度、几何尺寸等随机变量，预测5000次地震下的节点存活率为98.7%。

前沿技术：机器学习（如XGBoost算法）可整合试验与模拟数据，评估准确率达90%以上。

4.3 加固技术与优化

4.3.1 现有加固技术对比

表1 现有加固技术对比

技术类型	优点	缺点	适用场景
碳纤维布包裹	施工快（2h/节点），增韧20%	高温失效（> 300℃）	梁柱节点抗剪加固
钢套筒加固	刚度提升40%，耐久性好	自重增加，影响建筑功能	重型工业厂房节点
粘滞阻尼器	耗能能力提升3倍，可更换	造价高（¥5000/个）	高层建筑抗震升级

4.3.2 新型加固技术研发

形状记忆合金（SMA）加固：镍钛合金丝预埋于节点区，利用超弹性恢复变形，试验显示可减少残余位移60%。

3D打印钢节点套：拓扑优化设计轻量化网格结构，重量减轻30%的同时承载力提高15%（荷兰代尔夫特大学实验验证）。

4.3.3 加固方案优化设计

多目标优化模型：以“成本最低+性能最优”为目标，采用NSGA-II算法生成Pareto前沿解集。例如，某项目优化后方案节省造价12%且 $\mu \geq 3.5$ 。

模块化加固体系：预制可拆卸钢-ECC复合护套，实现“检测-加固-监测”一体化，适用于既有建筑改造。

结束语

本文通过对整体装配式建筑连接节点抗震性能的深

入探讨，揭示了节点设计、施工质量控制以及地震动特性对节点抗震性能的重要影响。提出了一系列抗震性能评估与优化方法，为装配式建筑的抗震设计提供了理论支撑和实践指导。未来，随着材料科学、结构设计与施工技术的不断进步，装配式建筑的抗震性能有望得到进一步提升，为构建更加安全、可持续的城市环境贡献力量。

参考文献

[1]张志勇,李宏男,王光谦.装配式混凝土结构连接节点抗震性能研究[J].土木工程与管理学报,2020,(02),28-29.
[2]刘立涛,赵永彪,王庆伟.装配式钢结构连接节点抗震性能试验研究[J].建筑结构,2020,(12),129-130.
[3]陈彬,谢阳阳,张华,等.装配式木结构连接节点抗震性能分析及优化[J].木结构建筑,2020,(04),45-46.
[4]吴灵枢.新型装配式框架结构梁柱节点抗震性能研究[J].建筑技术科学,2021,(10):103-104.