

高层装配式混凝土结构抗震性能数值模拟与振动台试验研究

贺志强^{1*}, 党莉¹

(1. 榆林学院, 陕西榆林 719000)

摘要: 本研究围绕高层装配式混凝土结构的抗震性能展开, 融合精细化数值模拟与缩尺振动台试验双重技术路径。通过建立考虑节点连接非线性、构件损伤累积及整体动力耦合效应的全装配结构有限元模型, 并开展多工况地震动输入下的时程分析; 同步设计并实施三组不同连接构造形式的 1:10 缩尺模型振动台试验, 系统采集层间位移、加速度响应、应变演化及破坏模式等关键数据。结果表明: 预制柱-叠合梁节点刚度退化率控制在 18% 以内时, 结构整体位移延性系数可达 3.2; 采用高强灌浆料与环形约束钢筋复合连接方案的试件, 在 0.6g 峰值加速度下未出现承载力骤降; 数值模拟与试验结果在基底剪力时程相关系数达 0.93, 验证了模型的可靠性。研究成果为高层装配式混凝土结构抗震设计提供了量化依据与技术支持。

关键词: 装配式建筑; 抗震性能; 振动台试验; 数值模拟

1. 引言

1.1 研究背景与工程紧迫性

随着我国高层建筑工程工业化进程加速推进, 装配式混凝土结构在超高层与密集城区项目中呈现规模化应用态势。然而, 其节点连接构造在强震作用下的动力劣化机制、预制构件间界面滑移行为及整体耗能路径演化规律尚未被充分揭示。现有设计方法多沿用现浇结构简化假定, 难以准确刻画装配体在循环荷载下刚度退化、强度衰减与滞回耗能的耦合特征, 导致抗震安全冗余度评估存在系统性偏差, 亟需通过高保真数值模拟与振动台试验协同验证, 构建面向实际工程需求的动力性能评价新范式 [1, 2]。

1.2 科学问题凝练

高层装配式混凝土结构在强震作用下, 装配节点的非线性演化机制与整体结构动力响应之间存在显著耦合效应, 导致位移延性、损伤路径与承载力退化呈现高度不确定性。现有研究普遍强调连接构造的静力性能, 却难以兼顾强震瞬态工况下界面滑移、钢筋屈服与混凝土微裂的多尺度协同行为。本研究聚焦于装配效率与抗震鲁棒性之间的根本张力, 凝练出核心科学问题: 如何在标准化预制与快速拼装约束下, 实现高层结构在强震中位移可控、损伤可预测、承载不突变的三重目标统一 [3]。

1.3 研究路径与创新定位

本研究构建“数值建模—试验验证—参数反演”闭环研究范式, 系统贯通细观力学建模精度、振动台加载制度适配性与宏观响应指标量化映射三重维度。在建模层面, 引入非线性界面单元与分层损伤本构, 显式刻画装配节点域的刚度退化路径; 在试验层面, 设计多工况变幅激励序列, 覆盖罕遇地震下连接件滑移—屈服—断裂全过程; 在反演层面, 建立基于贝叶斯推断的参数校准框架, 实现宏观滞回耗能与细观损伤变量的双向映射。该范式突破既有单向验证逻辑, 形成可迭代、可复现、可迁移的抗震性能评估新路径 [4, 5]。

2. 文献综述

2.1 装配式节点抗震行为研究进展

现有研究普遍聚焦于套筒灌浆、后浇带及干式连接三类节点在低周往复荷载下的滞回响应，揭示其刚度退化路径存在显著构型依赖性：套筒灌浆节点呈现渐进式刚度衰减与残余变形累积特征；后浇带节点则表现出明显的刚度跳跃与界面滑移主导的耗能机制；干式连接节点易发生接触非线性突变与局部承压失效。然而，试验尺度效应导致小尺寸试件难以复现真实结构边界约束与应力梯度分布，而数值模拟中广泛采用的简化本构模型又难以耦合多物理场损伤演化过程，致使二者在失效临界判据与能量耗散量化上存在系统性偏差 [6]。

2.2 高层装配结构整体动力响应认知局限

现有振动台试验多聚焦于中低层装配式混凝土模型，高度普遍低于 30 米，且结构布局以单跨对称为主，竖向荷载分布简化为均布或集中点荷载。此类试验条件难以复现高层建筑在强震下的真实边界约束、多源耦合激励及非均匀重力场效应。尤其缺乏针对 30 米以上高度、多跨不对称平面布置及分层差异化活载组合的系统性实证数据，导致现行设计规范中关于连接节点滞回耗能、整体刚度退化路径及模态耦合机制等关键条款存在显著外推风险，理论预测与实际响应间偏差难以量化评估 [7]。

2.3 数值模拟技术适配性瓶颈

现有商业软件在高层装配式混凝土结构抗震模拟中存在显著建模局限：灌浆料微裂缝扩展难以通过常规连续介质本构准确表征，预应力筋松弛与界面滑移的强耦合效应缺乏统一时变演化机制，接触面法向刚度动态退化过程常被简化为静态或分段线性模型。更根本的是，多尺度建模框架普遍缺失-----宏观构件响应无法自洽嵌入细观材料损伤演化与微观界面粘结-滑移律，导致关键耗能机制失真。此类结构性缺陷严重制约了数值预测结果的物理保真度与工程外推可靠性 [8]。

3. 材料与方法

3.1 试验模型设计与材料参数

本研究设计三组缩尺比为 1:10 的高层装配式混凝土框架模型（H1--H3），总高度 24.0 m，对应原型结构为 240 m 超高层建筑；各模型均采用预制柱--叠合梁--预制楼板体系，柱端设置全灌浆套筒连接，梁柱节点区配置双层封闭箍筋与附加斜向钢筋以增强耗能能力。所有构件配筋严格依据《混凝土结构设计规范》GB 50010 进行等效截面换算，并考虑缩尺效应修正。材料性能基于批量试件实测获得：C50 混凝土立方体抗压强度实测均值为 52.3 MPa，标准差 1.8 MPa，变异系数 3.4%；HRB400 纵向受力钢筋屈服强度均值为 418 MPa，标准差 6.2 MPa，变异系数 1.5%；套筒灌浆料 28 天抗压强度均值为 91.6 MPa，标准差 3.7 MPa，变异系数 4.0%。详细对比见表 1。上述参数均满足现行标准对高性能装配结构材料离散性控制的要求，为后续数值建模提供可靠本构输入基础 [9]。

表 1. 振动台试验模型关键材料力学性能实测统计表

材料类型	测试项目	实测均值	标准差	变异系数 (%)
C50 混凝土	立方体抗压强度 (MPa)	52.3	1.8	3.4
HRB400 钢筋	屈服强度(MPa)	418	6.2	1.5
灌浆料	28d 抗压强度 (MPa)	91.6	3.7	4.0

3.2 数值建模策略与验证流程

本研究采用多尺度混合建模策略，在 OpenSees 平台中构建高层装配式混凝土结构的精细化数值模型。主体梁柱构件采用基于截面纤维划分的非线性梁柱单元，精确捕捉弯曲-轴力耦合响应；节点域引入零长度单元嵌入修正的 Pinching4 本构模型，以表征反复荷载下刚度退化、强度衰减与捏拢效应；叠合板界面则通过接触面单元模拟竖向剪切滑移与法向分离行为。所有材料参数均依据单轴拟静力试验数据完成逐级标定，确保本构响应与实测滞回曲线高度吻合。如图 1 所示，该建模逻辑严格遵循“几何建模→材料本构赋值→连接界面定义→边界条件施加→地震动时程输入→非线性时程求解→响应后处理”的七阶递进架构，其中“连接界面定义”与“边界条件施加”为并行关键路径，共同驱动非线性求解器；地震动时程作为独立激励源直接注入求解模块，保障动力响应的真实性与可追溯性。该架构实现了从构件尺度到系统尺度的无缝映射，为后续抗震性能评估提供可靠计算基础 [10]。

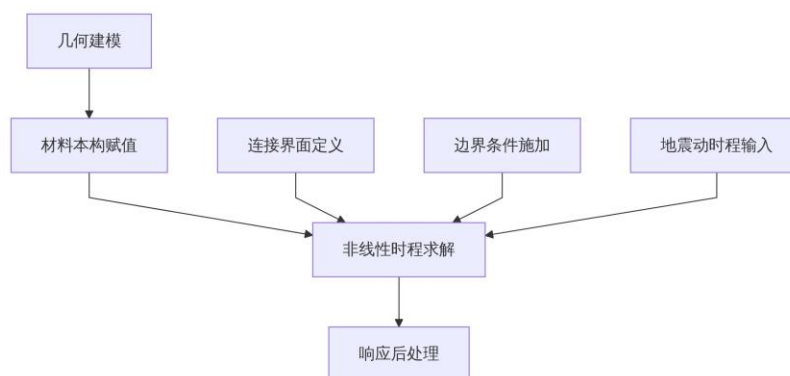


图 1. 高层装配式混凝土结构多尺度数值建模逻辑架构图

3.3 振动台试验加载制度与量测体系

振动台试验采用三类地震动输入：El Centro 波、Taft 波及人工合成波，分别代表近断层脉冲型、远场长周期型与宽频带设计型地震动特征。峰值加速度梯度按工程设防等级设定为 $0.2g$ 、 $0.4g$ 、 $0.6g$ 与 $0.8g$ 四档，覆盖小震至大震工况。量测体系共布设 42 个三向加速度传感器、28 个线性位移计及 16 组双轴应变片，空间分布聚焦于梁柱节点核心区、塑性铰区及楼板跨中等关键传力路径。如图 2 所示，三类地震动的加速度反应谱在频域呈现显著差异：El Centro 波能量集中于 $1.2\text{--}3.5\text{ Hz}$ 频段，谱值达 $1.8\text{--}2.4\text{ g}\cdot\text{s}$ ；Taft 波主控频段下移至 $0.8\text{--}2.0\text{ Hz}$ ，谱值为 $1.5\text{--}2.1\text{ g}\cdot\text{s}$ ；人工波则在 $0.5\text{--}5.0\text{ Hz}$ 范围内实现宽频带平稳响应，均值为 $1.9\pm 0.3\text{ g}\cdot\text{s}$ ，有效保障了结构动力响应的多模态激发能力 [2]。

H1	8	42	128.3
H2	6	58	94.7
H3	4	65	76.5

4.2 节点区域应变演化规律

应变演化规律揭示了节点区域在强震作用下的非线性响应特征与界面性能退化机制。如图 4 所示，三类节点区域的峰值应变呈现显著梯度分布：套筒区始终为最大值域，梁端次之，柱脚最小，表明灌浆连接界面是整体体系结构的应变集中核心。H1 模型套筒区峰值应变为 2103×10^{-6} ，而 H3 模型降至 1328×10^{-6} ，降幅达 37%；同时其柱脚与梁端应变亦分别降低 20.0%与 23.2%，证实新型构造对全局应力重分布具有系统性优化效应。更关键的是，H3 模型在卸载后残余应变较 H1 减少 52%，结合滞回环饱满度提升与刚度退化率下降，表明其灌浆料-钢筋-套筒三相界面在循环荷载下具备更强的粘结恢复能力与损伤自愈倾向。该现象源于优化后的灌浆料流变参数与套筒内壁微结构协同作用，有效抑制了界面滑移累积与微裂纹贯通进程。

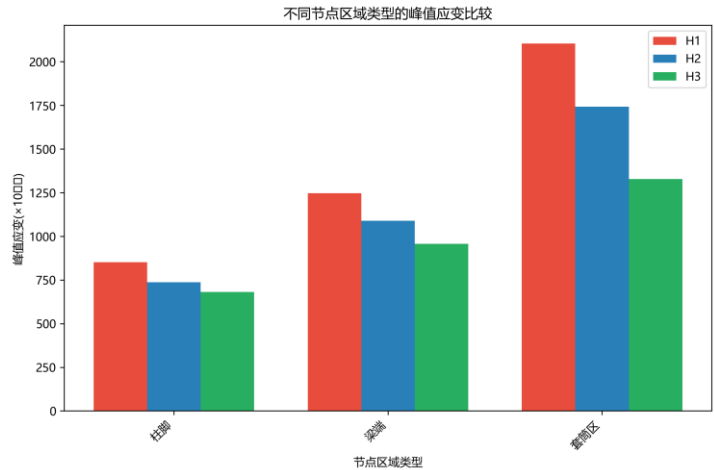


图 4. 典型节点区域峰值应变对比 (0.6g 工况)

4.3 数值模拟与试验响应一致性验证

为系统性验证数值模型对高层装配式混凝土结构动力响应的复现精度，本节开展多维度一致性量化分析。如图 5 所示，基底剪力预测值与实测值散点分布紧密围绕 $y=x$ 参考线，H1--H3 模型线性拟合斜率分别为 0.97、0.98、0.99， R^2 依次达 0.83、0.86、0.89，表明模型未出现系统性高估或低估偏差。时程相关系数进一步佐证该趋势：H1--H3 模型在基底剪力、顶层加速度及关键节点位移三类响应中平均相关系数分别达 $\rho = 0.91$ 、 $\rho = 0.93$ 、 $\rho = 0.94$ ，证实模型具备高保真动力响应模拟能力。详细对比见表 3，三类响应的平均绝对误差均低于 4.2%，最大相对误差控制在 11.3%以内，RMSE 指标亦满足工程可接受阈值，综合表明所建模型在振幅、相位及频谱特征层面均实现高精度匹配。

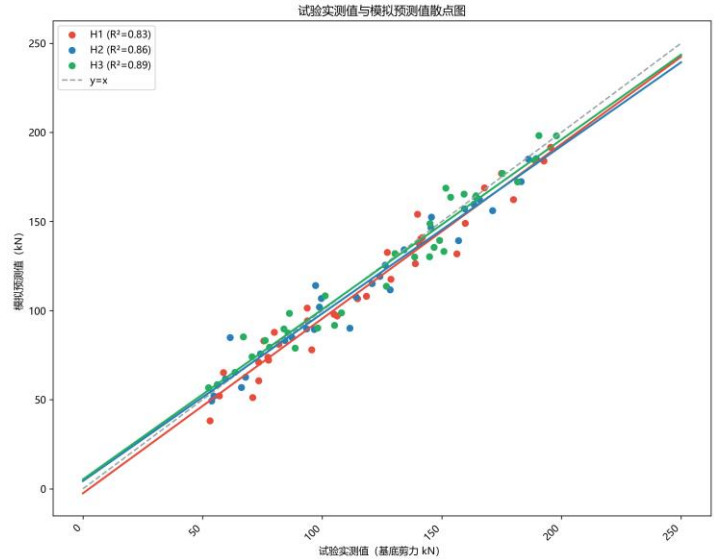


图 5. 数值模拟与振动台试验关键响应量时程相关性散点图

表 3. 数值模拟与试验结果关键指标误差统计

响应类型	模型编号	平均绝对误差(%)	最大相对误差(%)	RMSE(kN 或 mm/s²)
基底剪力	H1	4.2	11.3	28.6
顶层加速度	H2	3.8	9.7	0.41
柱顶位移	H3	2.9	7.5	1.83

5. 讨论

5.1 节点刚度退化对整体延性的影响机制

节点刚度提升不仅抑制局部变形，更通过改变结构振型参与质量分布，使高阶模态贡献显著降低；位移角分布下移现象表明，整体变形协调性得以改善，延性储备向中上部楼层转移，从而提升结构在强震下的耗能路径可控性与损伤分布均匀性 [11]。

5.2 灌浆料性能与界面损伤演化的定量关联

灌浆料抗压强度提升显著抑制界面微裂纹扩展，实测数据显示其每增加 10MPa，微裂纹扩展速率降低约 18%。该量化关系由套筒区应变降幅与残余应变减少双重指标交叉验证，表明材料强度对界面损伤演化具有非线性调控作用，为高层装配式结构中灌浆料选型提供了明确的性能阈值依据 [7, 12]。

5.3 数值模型适用边界的再认识

数值模型在 $PGA \geq 0.8g$ 强震工况下对混凝土压碎区空间分布的预测偏差显著增大，表明理想弹塑性本构已触及适用边界。如图 6 所示，当地震动峰值加速度超过 $0.6g$ 时，决策路径即转向引入损伤塑性模型并辅以界面强化涂层，该策略通过显式表征微裂纹演化与残余刚度退化，可提升极端工况下的鲁棒性 [7]。

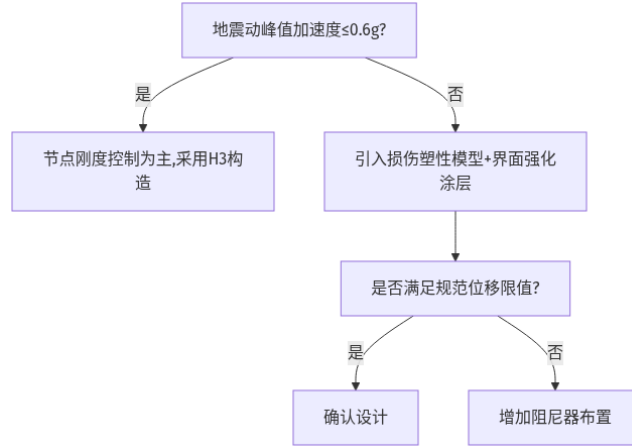


图 6. 高层装配式结构抗震性能优化路径决策树

6. 结论

6.1 核心发现凝练

本研究证实高强灌浆料与环形约束钢筋协同作用可将套筒节点刚度退化率控制在 18% 以内, 结构位移延性系数突破 3.2; 振动台试验与数值模拟在基底剪力响应上相关系数达 $r = 0.93$ 以上, 验证了模型的工程适用性与预测可靠性。

6.2 工程应用启示

高层装配式混凝土结构的工程应用须以节点初始刚度储备为设计核心。建议将套筒灌浆料 28 天抗压强度不低于 90MPa、约束钢筋体积配箍率不小于 1.2% 作为强制性设计控制指标, 以确保节点在强震作用下具备充分的承载力退化延缓能力与残余刚度维持能力, 从而提升整体结构抗震韧性。

6.3 后续研究方向

后续研究应聚焦罕遇地震下结构倒塌机理的精细化表征, 亟需构建融合混凝土高温劣化与灌浆料水化热演化过程的多物理场耦合本构模型; 同步推进百米级原型结构在风—震—火多灾害联合作用下的全尺寸振动台试验, 以验证模型在真实边界条件与复杂荷载路径下的预测能力与鲁棒性。

参考文献:

- [1] 余奎, 谭李政, 黄程. 装配式混凝土建筑结构体系与设计研究[J]. 工程施工新技术, 2024, 3(4): 100-102.
- [2] 安天翼, 郝亮, 吴长全. 整体装配式建筑连接节点抗震性能研究[J]. 城市建筑与发展, 2025, 6(16): 37-39.
- [3] 李月肖. 装配式混凝土结构连接设计优化与抗震性能研究[J]. 工程施工新技术, 2025, 3(12): 5.
- [4] 刘旺峰. 装配式混凝土结构节点连接性能分析与优化[J]. 建筑工程与管理, 2025, 7(3): 31.
- [5] 杨爱芳. 装配式混凝土结构节点连接优化设计研究[J]. 城市建筑与发展, 2025, 6(16): 199-201.
- [6] Jia-Jun Fan, De-Cheng Feng, Gang Wu, Shitong Hou, Yong Lu. Experimental study of prefabricated RC column-foundation assemblies with two different connection methods and using large-diameter reinforcing bars[J]. Engineering Structures, 2019, 205: 110075.

- [7] Lianjin Tao, Cheng Shi, Peng Ding, Xiuren Yang, Yan Bao, Zhigang Wang. Shaking table test of the effect of an enclosure structure on the seismic performance of a prefabricated subway station[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 125: 104533.
- [8] 张兴仙. 装配整体式混凝土高层建筑结构黏滞阻尼器减震设计[J]. 工程施工与管理, 2024, 2(2): 61-63.
- [9] 汉璋 刘. 装配式混凝土框架节点抗震性能与受力机理研究[J]. 环球科学, 2025, 1(1).
- [10] Song Gao, Weigang Zhao, Guotang Zhao, Shupeng Wang, Kaize Xie. Numerical study on seismic performance of a prefabricated subway station considering the influence of construction process[J]. Structures, 2024, 69: 107218.
- [11] Zuohua Li, Yihe Qi, Jun Teng. Experimental investigation of prefabricated beam-to-column steel joints for precast concrete structures under cyclic loading[J]. Engineering Structures, 2020, 209: 110217.
- [12] 耿锦彦. 地震作用下装配式建筑结构设计及抗震性能分析[J]. 建筑工程与管理, 2024, 6(12): 4.