

## 新型装配式混凝土框架中节点抗震性能研究

宋 扬<sup>1,2</sup>, 孙立建<sup>1,2</sup>, 江 建<sup>1,2</sup>, 白宇航<sup>3</sup>, 徐 东<sup>1,2</sup>

(1. 深圳市天健(集团)股份有限公司,广东 深圳 518034;2. 深圳市特区建工集团有限公司,广东 深圳 518034;3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,陕西 西安 710048)

**摘要:**为丰富装配式节点设计,提高装配式节点抗震性能,文章设计了一种新型装配式混凝土框架中节点,基于该新型装配式混凝土框架节点的试验,建立装配式节点有限元模型,对其在低周往复水平荷载作用下的非线性行为展开分析。随后,通过分析获取了装配式节点的应力云图、破坏形态、滞回曲线和骨架曲线,并与实际试验结果进行对比,验证了模型的合理性。此外,还对装配式节点进行了扩展参数分析,以探究相关影响规律。结果表明:型钢强度的改变对节点水平承载力和延性性能影响较小;混凝土强度和梁柱线刚度比  $k$  的提高可显著提高节点水平承载力,但节点延性性能会降低,合理的梁柱线刚度比可以提高装配式节点的抗震性能。

**关键词:**装配式结构; 框架节点; 非线性分析; 梁柱线刚度比; 有限元分析

中图分类号:TU398.9;TU352.1+1

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)04-0027-09

doi:10.13402/j.gcjs.2025.04.045

## Research on seismic performance of joints in new prefabricated concrete frames

SONG Yang<sup>1,2</sup>, SUN Lijian<sup>1,2</sup>, JIANG Jian<sup>1,2</sup>, BAI Yuhang<sup>3</sup>, XU Dong<sup>1,2</sup>

(1. Shenzhen Tagen Group Co., Ltd., Shenzhen 518034, Guangdong, China;

2. Shenzhen SEZ Construction Group Co., Ltd., Shenzhen 518034, Guangdong, China;

3. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

**Abstract:** To enrich the design of prefabricated joints and improve their mechanical performance, a new type of prefabricated joint has been designed. Based on the test of the new prefabricated concrete frame joint, the prefabricated joint model is established, and the nonlinear behavior of the prefabricated joint under low cyclic reciprocating horizontal load is analyzed by finite element method. The skeleton curve, stress nephogram, failure process and failure mode of the prefabricated joint are obtained, and compared with the actual test, the rationality of the model is verified, and the extended parameter analysis of the prefabricated joint is carried out to explore its influence law. The results indicate that changes in the strength of steel sections have a relatively small impact on the horizontal bearing capacity and ductility performance of joints; The increase of concrete strength and beam-column stiffness ratio  $k$  is beneficial to the horizontal bearing capacity of fabricated joints, but the ductility of joints would be reduced. Reasonable beam-column stiffness ratio can improve the seismic performance of fabricated joints.

**Key words:** prefabricated concrete; frame joint; nonlinear analysis; beam-column stiffness ratio; finite element analysis

现如今,装配式混凝土结构是建筑业的热点,它解决了建筑工程中建设时间长、劳动力成本高、施工精度差等问题,对我国经济、建筑体系的科

持续发展和推动绿色环保建筑具有重要的科学意义和应用价值<sup>[1-2]</sup>。

装配式混凝土结构是指构件在工厂内加工预

收稿日期:2024-07-22

作者简介:宋 扬(1968—),男,高级工程师,从事制冷及低温工程方面的研究。

通信作者:白宇航(1999—),男,硕士研究生,从事结构工程相关研究。

制,运输到现场之后,通过机械吊装和可靠的连接手段,把预制构件连接行成一个整体<sup>[3]</sup>。而节点作为主要传力部件,对结构抗震性能影响显著,为此国内外学者对装配式节点进行了广泛研究。章文纲等<sup>[4]</sup>提出了装配式齿槽式节点,并给出齿槽式节点的计算公式。LI 等<sup>[5]</sup>设计制作了一种创新的阶梯梁柱节点,节点连接处主要由方钢柱上阶梯式悬臂段和钢梁上反向阶梯梁端组成,通过螺栓连接实现干连接,解决了装配过程中梁翼缘上下表面不齐平问题。TIAN 等<sup>[6]</sup>提出了一种可拆卸的梁柱节点,使用高强度螺栓将 FTCS 柱和预制钢筋混凝土梁进行连接。BARAN 等<sup>[7]</sup>将梁端和柱端通过梁构件内的钢板和柱面上钢座和顶角进行连接,并通过有限元软件进行验证。结果表明:预制梁柱节点的力学性能与梁柱锚固细节和梁端钢筋配比密切相关,节点核心区域的部分破坏传递到连接构件上,提升了节点的强度、刚度;施加预紧力不能提高节点承载能力。赵斌等<sup>[8]</sup>提出了一种全装配式梁柱节点,但总耗能小于常规梁柱节点,需采取一定改善措施。CHOI 等<sup>[9]</sup>在节点区置入型钢,并后浇水泥基复合材料的梁柱节点。从试验结果来看,预制试件的节点强度是整体式钢筋混凝土结构预期强度的 1.15 倍。HUANG 等<sup>[10]</sup>提出了一种弯曲-剪切解耦预制梁柱节点(ACPH),并对其进行拟静力试验。试验结果表明:与现浇节点相比,ACPH 可以影响节点破坏模式,即使一半的耗能系统故障,ACPH 除了水平承载力降低外,仍能保持一定的抗震性能。综上所述,装配式节点预制构件质量可控,自复位功能好且施工工期短,但缺点是耗能能力所反映的抗震性能相较于传统钢筋混凝土节点还存在一定的不足,且针对装配式节点研究还不够丰富<sup>[11-13]</sup>。

为丰富装配式节点设计,提高装配式节点抗震性能,本文提出一种新型装配式混凝土框架节点,并在新型装配式混凝土框架中节点试验的基

础上,采用非线性有限元模拟研究装配式节点的受力性能,通过有限元参数扩展分析,研究设计参数对装配式节点受力性能的影响,以期可为此类新型装配式框架节点后续研究提供参考。

## 1 试验概况

试验设计并制作了 4 个新型装配式混凝土框架中节点试件,对其柱端进行低周往复水平加载,主要考虑了轴压比  $n$  以及梁-柱连接方式对中节点性能的影响。4 个试件设计参数如表 1 所示,图 1 为 4 个试件尺寸设计图。新型装配式混凝土框架中节点和梁处的型钢材质均为 Q235,钢材焊接方式为双面角焊缝焊接,梁-柱连接形式分别为栓焊连接与 Z 字形螺栓连接。试验加载制度基于位移进行控制,示意图及现场照片如图 2、3 所示。

## 2 有限元模型的建立

### 2.1 本构模型

采用 ABAQUS 软件对新型装配式混凝土框架节点进行模拟,混凝土本构模型选择《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)推荐的本构关系,并添加了混凝土塑性损伤模型。混凝土力学性能来源于节点成型时,同批次 100 mm × 100 mm × 100 mm 混凝土立方体试块压力试验,试验所得混凝土本构如表 2 所示。钢筋本构和螺栓本构为双直线模型,型钢本构模型采用五段式溯流模型,钢材力学性能指标如表 3 所示。

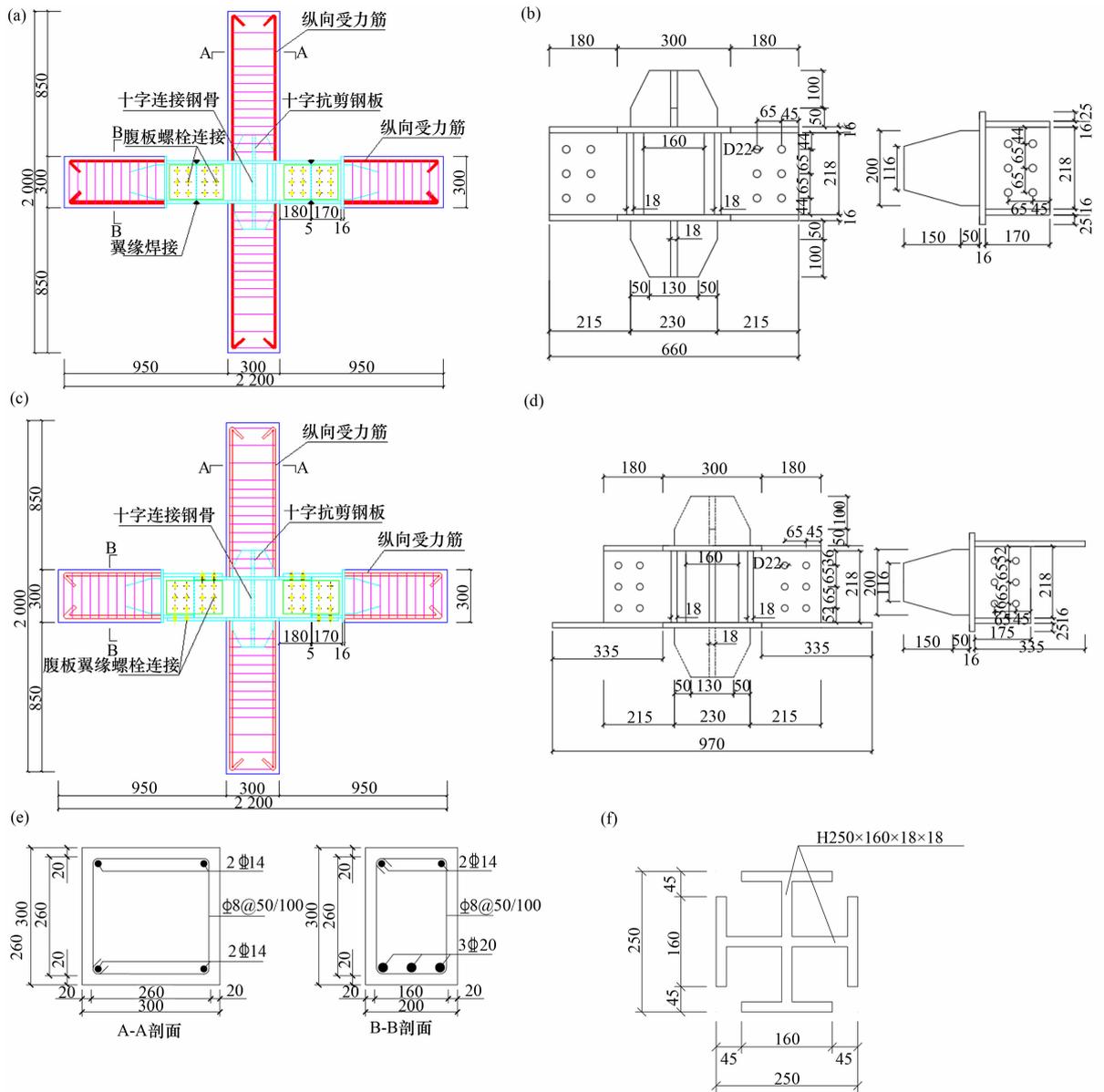
### 2.2 钢材本构

为保证计算精度,本文所有试件均采用 8 节点六面体缩减积分实体单元(C3D8R),而钢筋采用两节点线性三维桁架单元(T3D2 单元)<sup>[14]</sup>,为使求解结果满足精度要求,本模型大部分网格尺寸为 50 mm × 50 mm,节点域附近网格尺寸为 8 mm,图 4 为典型试件 Z 字形拼接节点各部分网格划分示意。

表 1 新型装配式混凝土框架中节点设计参数

试件编号	混凝土强度等级	型钢强度	柱高/mm	梁跨度/mm	柱截面尺寸( $h \times b$ )/mm	梁截面尺寸( $h \times b$ )/mm	连接形式	轴压比
PFJ 2	C30	Q235	2 000	2 200	300 × 300	300 × 200	栓焊连接	0.36
PFJ 3	C30	Q235	2 000	2 200	300 × 300	300 × 200	Z 字型连接	0.36
PFJ 4	C30	Q235	2 000	2 200	300 × 300	300 × 200	Z 字型连接	0.18
PFJ 5	C30	Q235	2 000	2 200	300 × 300	300 × 200	Z 字型连接	0.54

注:  $h$  为柱截面高度, mm;  $b$  为柱截面宽度, mm。



(a) PFJ 2; (b) PFJ 2 柱端型钢和梁端型钢示意; (c) PFJ 3~5;  
 (d) PFJ 3~5 柱端型钢和梁端型钢示意; (e) 剖面示意; (f) 十字钢骨横截面示意

图1 试件设计

mm

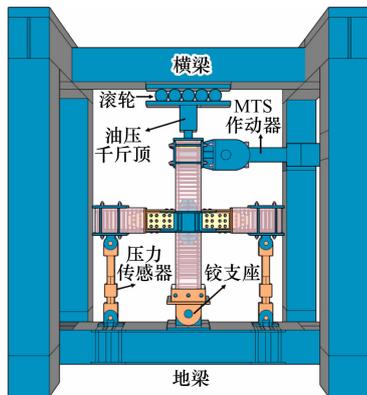


图2 试件加载装置



图3 试验加载现场照片

表 2 C30 混凝土的配合比及力学性能

水泥	单位体积用量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )				立方体 抗压强 度/MPa	棱柱体 轴心抗压 强度/MPa	弹性模 量/ $\times 10^4$ MPa	抗拉强 度/MPa
	砂	5~10 mm 粗骨料	10~20 mm 粗骨料	水				
389	497	639	639	205	36.59	28.53	3.176 2	2.86

表 3 钢材力学性能指标

钢材类型		屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/ $\times 10^5$ MPa	屈服应变
柱型钢	翼缘 18 mm	268.1	424.2	2.02	1 327
	腹板 18 mm	268.1	424.2	1.99	1 327
梁型钢	翼缘 16 mm	263.2	417.3	1.93	1 364
	腹板 10 mm	472.7	540.0	2.02	2 340
纵筋	B14	468.8	625.7	2.15	2 180
	B20	472.8	646.3	2.15	2 199
箍筋	B8	444.0	595.8	2.12	2 094
连接板	5 mm	432.5	575.6	2.09	2 069

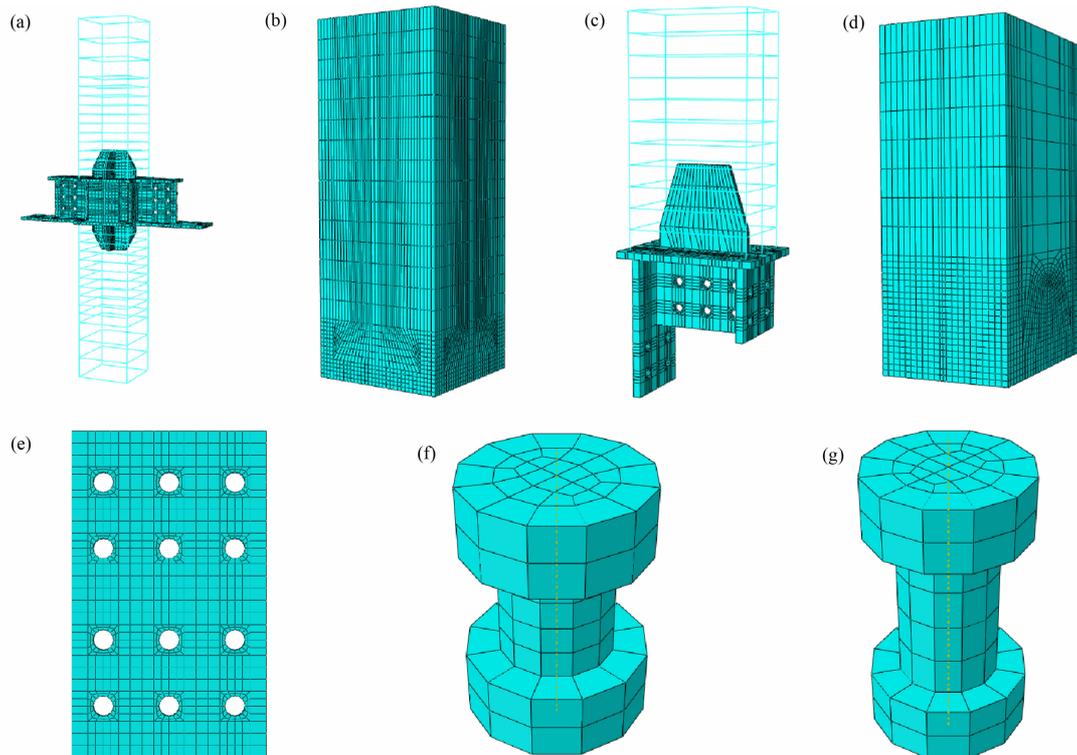


图 4 节点试件各部分网格划分

### 2.3 相互作用

由于各部分材料各异、变形不一,新型装配式混凝土框架节点需要考虑各接触界面的相互作用关系。钢筋骨架与混凝土之间的接触关系采用嵌入式约束(embedded region);剪切板与混凝土身采用面面接触(surface to surface),摩擦系数,

按粗糙混凝土界面取值,取 $0.2 \sim 0.6$ <sup>[15-16]</sup>;连接板与型钢采用面面接触(surface to surface),考虑到两板间较光滑,摩擦系数 $\mu$ 取值为 $0.25$ <sup>[17]</sup>。

### 2.4 施加荷载与边界条件

模型的边界条件与试件实际试验的加载条件一致,柱顶施加水平往复荷载和轴向力,梁端采

用连杆连接, 柱底采用铰接, 边界条件及荷载加载示意如图 5、6 所示。图 5 中;  $U_1 \sim U_3$ 、 $UR_1 \sim UR_3$  指的是 ABAQUS 软件的 6 个自由度, 用以约束模型运动。将梁端  $U_2$ 、 $U_3$ 、 $UR_1$  和  $UR_2$  设置为 0, 只允许其  $X$  方向平动和  $Z$  方向转动, 将柱底端  $U_1 \sim U_3$  设置为 0, 只允许其转动。图 6 中:  $F_N$  为竖向集中荷载, 即施加的轴向力;  $P_1$  为施加水平位移时作用的力, 二者的单位均为 kN。

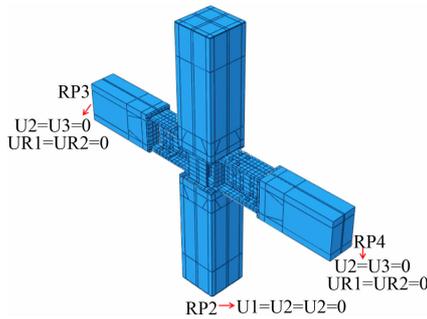


图 5 有限元模型边界条件示意

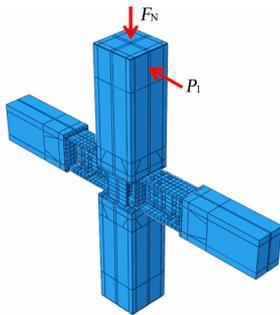


图 6 有限元模型荷载示意

除了初始分析步以外, 本文有限元模型还设有 3 个分析步如下。

(1) 步骤 1: 对预制混凝土梁柱连接的高强螺栓施加预紧力;

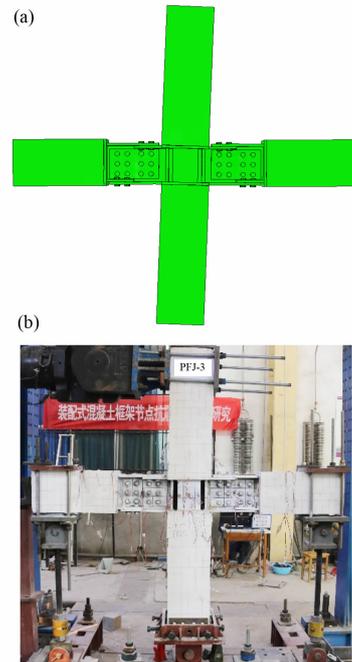
(2) 步骤 2: 在装配式混凝土柱顶的耦合参考点施加竖向集中荷载, 轴向施加力;

(3) 步骤 3: 采用位移加载方式, 在柱的顶端耦合参考点施加水平位移。

### 3 装配式节点计算结果分析

#### 3.1 装配式节点变形及应力规律

通过 ABAQUS 有限元模拟, 可获得装配式节点的变形及应力云图。典型试件 PFJ 3 模型及最终试验照片如图 7 所示, 图 8 和图 9 为 PFJ 3 的变形及应力云图。



(a) 节点模型; (b) 节点试验照片

图 7 节点 PFJ-3 模型及试验照片

以 PFJ 3 为典型试件进行概括说明, 新型装配式混凝土框架节点试验主要破坏模式为剪切破坏, 主要破坏位置为下柱端型钢与混凝土连接处, 同时节点试件梁端也存在竖向斜裂缝, 节点域型钢翼缘发生弯曲变形; 试件有限元分析结果与实际试验基本保持一致, 柱端和梁端靠近节点域处混凝土损伤明显, 存在失效现象, 型钢十字抗剪钢板及梁柱连接处翼缘到达屈服, 存在弯曲变形; 模拟与试验差异在于: 有限元分析上柱底和下柱顶的破坏形态基本相同, 而试验试件只在下柱顶发生剪切破坏, 主要原因为试验加载端夹头约束了部分上柱柱体, 导致上柱计算长度减少, 上下弯矩存在差异, 下柱顶成为受力最大区域。

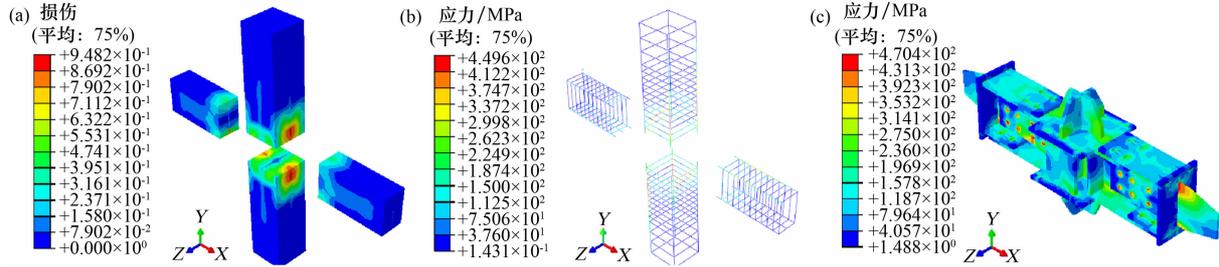
综合来看, 有限元分析与试验结果具有较高的吻合度, 能够很好地模拟试件混凝土损伤、钢筋屈服及梁柱连接处型钢屈曲等破坏形态。

#### 3.2 有限元模型验证

将试验与模拟所得的滞回曲线与骨架曲线进行对比, 验证其合理性, 图 10 和图 11 为其曲线对比, 表 4 为节点试验和模拟特征值对比。图 10、11 中:  $P$  和  $\Delta$  均为工程结构当中滞回曲线标准用法。  $P$  为上柱端测量位置所受到的力, kN;  $\Delta$  指的是其对应的位移, mm。

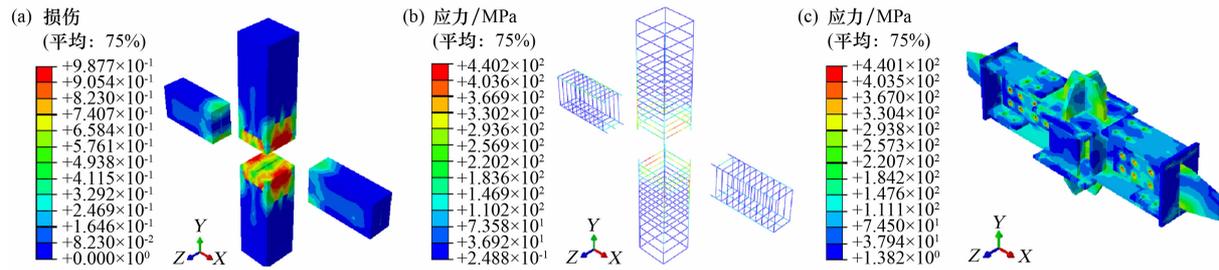
由图 10 和图 11 可知,由 ABAQUS 有限元计算出的骨架曲线与试验结果骨架曲线基本吻合,走势大体相似。同时各个试件特征点的平均误差为 5.11%,表明水平承载力吻合较好,部分差值较大,这是由于装配式构件在拼装和试验安装导致存在间

隙,造成拼装误差,同时有限元模拟中,螺栓连接、混凝土与型钢的粘结滑移,没有在模拟中体现,综合因素导致两者对比差值相差较大,但也在可接受范围内。总体分析数据可以得出 ABAQUS 的有限元模拟具有较好的精确性,验证了模型的合理性。



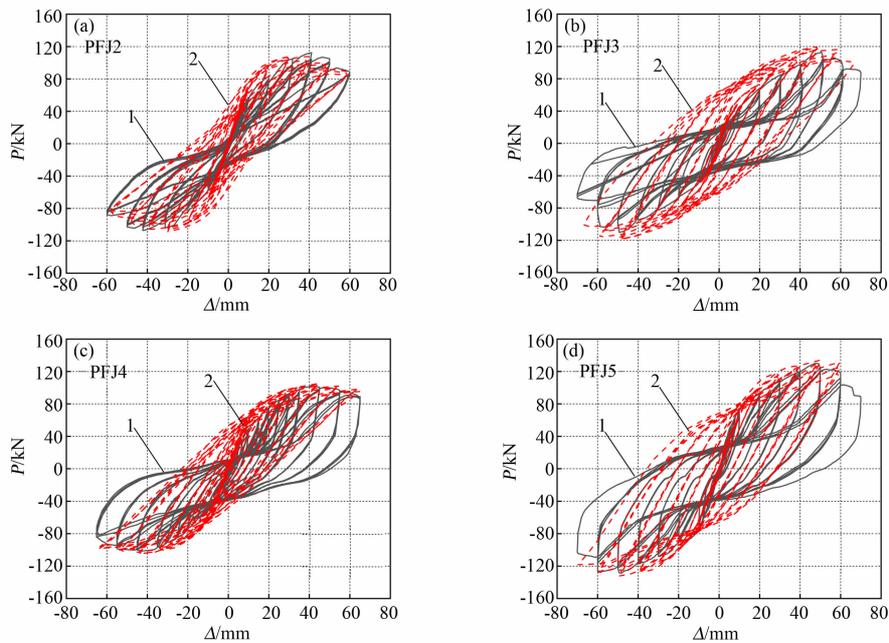
(a) 混凝土损伤云图; (b) 钢筋应力云图; (c) 型钢应力云图

图 8 PFJ 3 试件峰值荷载作用下混凝土、钢筋及型钢应力云图



(a) 混凝土损伤云图; (b) 钢筋应力云图; (c) 型钢应力云图

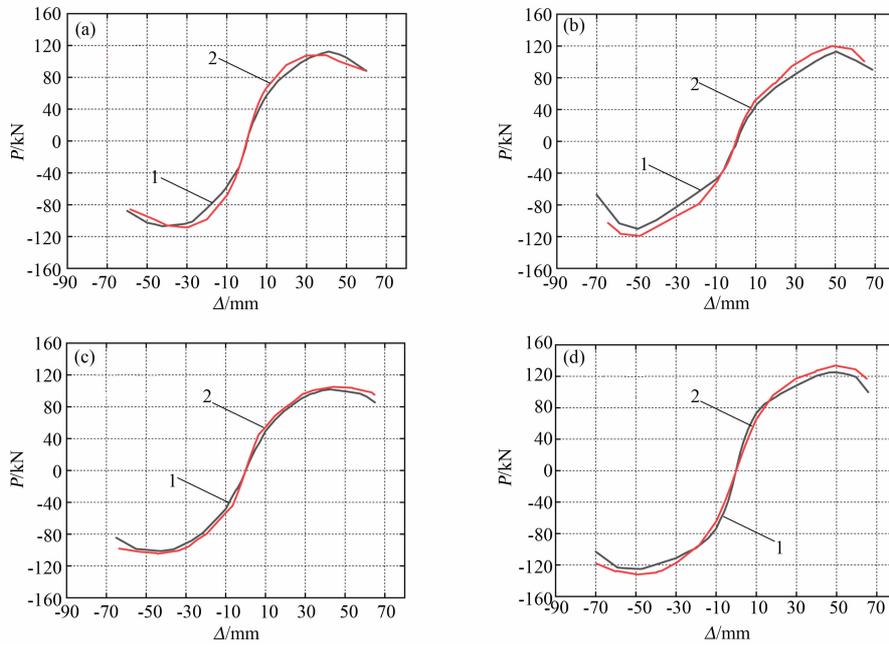
图 9 PFJ 3 试件极限荷载作用下混凝土、钢筋及型钢应力云图



(a) PFJ 2; (b) PFJ 3; (c) PFJ 4; (d) PFJ 5

1—试验; 2—有限元。

图 10 试验与模拟滞回曲线对比



(a) PFJ 2; (b) PFJ 3; (c) PFJ 4; (d) PFJ 5

1—试验; 2—有限元。

图 11 试验与模拟骨架曲线对比

表 4 试验和有限元水平承载力及位移对比

试件编号		屈服荷载/kN	屈服位移/mm	峰值荷载/kN	峰值位移/mm	极限荷载/kN	极限位移/mm
PFJ2	试验	73.11	14.82	112.41	41.11	95.55	55.41
	有限元	89.76	17.48	108.23	34.85	92.00	54.02
	$\delta$	22.77%	17.95%	-3.72%	-15.23%	-3.72%	-2.51%
PFJ3	试验	65.33	18.89	113.44	48.40	96.43	61.47
	有限元	75.35	19.23	119.67	48.45	101.72	64.43
	$\delta$	15.34%	1.80%	5.49%	0.10%	5.49%	4.82%
PFJ4	试验	64.23	19.09	101.61	49.60	86.37	65.13
	有限元	73.03	19.58	104.31	50.82	88.73	66.20
	$\delta$	13.70%	2.57%	2.66%	2.46%	2.73%	1.64%
PFJ5	试验	92.67	18.71	124.99	47.21	106.24	55.27
	有限元	96.00	19.83	132.87	49.28	112.95	67.32
	$\delta$	3.59%	5.99%	6.31%	4.38%	6.32%	21.80%

注: 差值  $\delta = (\text{模拟结果} - \text{试验结果}) / \text{试验结果} \times 100\%$ 。

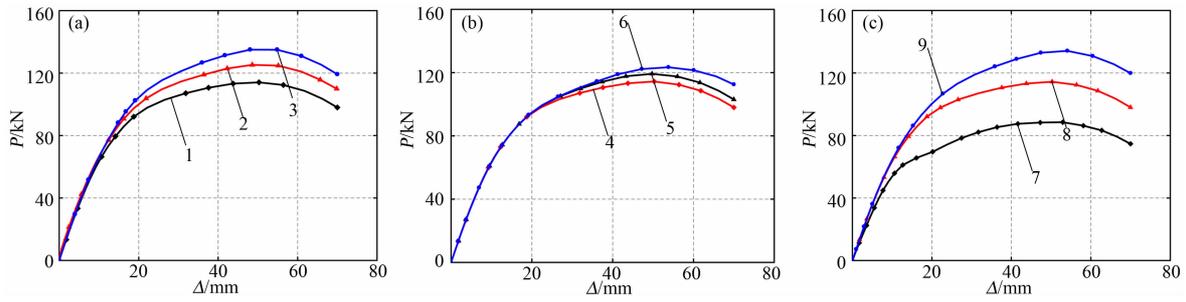
### 3.3 参数分析

在试验的基础上, 本文通过有限元分析软件 ABAQUS 对影响节点域受力性能较大的混凝土强度、型钢强度和梁柱线刚度比进行变参分析。数值模拟结果如图 12 所示, 表 5 为有限元参数对节点各特征点的影响。

从图 12(a) 和表 5 分析可以得出, 混凝土强度对于新型装配式混凝土框架中节点的初始刚度影响较小, 在加载前期, 不同型号的混凝土曲线

基本重叠, 但混凝土强度对于构件的峰值荷载影响比较大, 新型装配式混凝土框架中节点的承载能力随着混凝土的强度提高而提高, 与混凝土等级为 C30 的构件进行对比分析, 其他构件水平承载力显著提升, 其中 C40 节点承载能力提高了 9.81%, C50 的提高了 18.38%, 但混凝土强度等级对此类型节点的后延性影响不明显, 主要可以提高构件的水平承载力。

从图 12(b) 和表 5 分析可以得出, 在屈服荷



(a) 混凝土强度; (b) 型钢强度; (c) 梁柱线刚度比

1—C30; 2—C40; 3—C50; 4—Q235; 5—Q345; 6—Q390; 7— $k=1.38$ ; 8— $k=1.58$ ; 9— $k=1.78$ 。

图 12 试验参数对节点特征位移和水平承载力的影响

表 5 有限元参数对节点各特征点的影响

分析参数		屈服荷载/kN	屈服位移/mm	峰值荷载/kN	峰值位移/mm	极限荷载/kN	极限位移/mm	$\mu$
混凝土强度	C30	95.89	20.06	114.09	50.27	96.90	70.00	3.49
	C40	100.97	20.50	125.28	48.59	106.49	69.84	3.41
	C50	112.80	24.30	135.06	48.06	113.27	70.00	2.88
型钢强度	Q235	95.89	20.06	114.09	50.27	96.90	70.00	3.49
	Q345	99.04	22.45	119.27	49.77	101.38	70.00	3.12
	Q390	100.83	23.61	123.41	53.79	110.53	70.00	2.96
梁柱线刚度比 $k$	1.38	68.54	19.14	95.50	52.95	81.18	70.00	3.66
	1.58	95.89	20.06	114.09	50.27	96.90	70.00	3.49
	1.78	111.28	25.36	130.16	54.11	119.04	70.00	2.76

注:  $\mu$  = 极限位移/屈服位移。

载前, 型钢屈服强度对此类新型装配式混凝土框架中节点的刚度影响并不明显, 各型钢屈服强度的荷载-位移曲线在试验加载开始至达到屈服荷载前基本重叠, 曲线在试验后期下降趋势基本相同, 新型装配式混凝土框架中节点的水平承载能力随着型钢屈服强度的提高而略有增大, Q345 和 Q390 型号的构件与型钢为 Q235 的新型装配式混凝土框架中节点的水平承载能力进行比较, 其峰值水平承载能力分别增加了 4.54% 和 8.17%, 从峰值承载能力可以看出差异较小。

由图 12(c) 和表 5 可以看出, 梁柱线刚度比  $k$  对新型装配式混凝土框架中节点试验前期弹性段刚度影响较小, 但对构件的峰值荷载和极限荷载影响比较大。与梁柱线刚度比  $k=1.38$  的节点峰值承载能力相比较, 梁柱线刚度比为 1.58 和 1.78 的节点峰值荷载分别增加了 19.47% 和 36.29%, 这说明新型装配式混凝土框架中节点的水平承载能力随着梁柱线刚度比的增加而逐渐增加, 梁柱

线刚度比对于装配式混凝土节点的强度具有显著提升, 合理的梁柱线刚度比还可以提高装配式混凝土节点的延性性能。

## 4 结 论

(1) 本文对比分析了新型装配式混凝土框架中节点有限元模型结果与试验结果, 各试件模拟与试验特征点平均误差为 5.11%, 验证了模型的合理性。

(2) 从试验与模拟结果来看, 混凝土发生主要破坏, 型钢和钢筋仍具有承载能力, 同时各试件峰值荷载均大于 100 kN 且延性系数大部分大于 3, 说明新型装配式混凝土框架中节点抗震性能较好, 设计较为合理。

(3) 从新型装配式混凝土框架中节点变参分析结果来看, 混凝土强度的提高可较为显著增强节点受力性能; 型钢强度的提高对装配式混凝土框架节点的水平承载力以及延性性能影响都不明

显;梁柱线刚度比  $k$  可以显著提高装配式节点的受力性能;本文的试验和数值模拟结果可为该类型节点的后续推广应用提供理论基础。

### 参考文献:

- [1] 侯莉娜,黄炜,何梦迪.不同肋格形式装配式复合墙体抗震性能研究及拓优评价[J].西安理工大学学报,2022,38(2):253-262.
- [2] 李树天,马斌,王聪.基于Cov-AHP与云模型的装配式建筑施工安全风险评价研究[J/OL].西安理工大学学报;1-9[2024-05-20].
- [3] 建设部科学技术司.中国建设行业科技发展五十年1949~1999[M].北京:中国建筑工业出版社,2000:5-12.
- [4] 章文纲,程铁生,迟维胜,等.装配式框架钢纤维混凝土齿槽节点[J].建筑结构学报,1995(3):52-58.
- [5] LI Y, CHENG X, AN Y, et al. Experimental study on the seismic behavior of an innovative stepped beam-column joint[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 214:108480.
- [6] TIAN S, WU J, MO J, et al. Seismic behaviour of a novel demountable joint connecting FTCS columns and RC beams[J]. Structures, 2023, 54:746-763.
- [7] BARAN E, MAHAMID M, BARAN M, et al. Performance of a moment resisting beam-column connection for precast concrete construction[J]. Engineering Structures, 2021, 246:113005.
- [8] 赵斌,吕西林,刘丽珍.全装配式预制混凝土结构梁柱组合件抗震性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2005(1):81-87.
- [9] CHOI H, CHOI Y, CHOI C. Development and testing of precast concrete beam-to-column connections[J]. Engineering Structures, 2013, 56:1820-1835.
- [10] HUANG H, YUAN Y, ZHANG W, et al. Seismic behavior of a replaceable artificial controllable plastic hinge for precast concrete beam-column joint[J]. Engineering Structures, 2021, 245:112848.
- [11] 吴超,谢建,刘锋.装配式混凝土框架梁柱节点研究动态和展望[J].混凝土,2020,366(4):128-133;137.
- [12] 黄炜,胡高兴.可恢复预制装配式RC梁柱节点抗震性能研究[J].工程力学,2022,39(12):165-176.
- [13] 王海深,康迎杰,潘鹏.全装配式自复位耗能钢筋混凝土框架梁柱节点抗震性能研究[J].建筑结构学报,2022,43(4):158-166.
- [14] 庄茁,廖剑晖.基于ABAQUS的有限元分析和应用[M].北京:清华大学出版社,2009.
- [15] COELHO A M G. Characterization of the ductility of bolted end plate beam-to-column steel connections[D]. Coimbra(Portugal):University of Coimbra,2004.
- [16] BALATY P, GJELSYILK A. Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress[J]. Journal of materials in civil engineering, 1990, 2(1):46-49.
- [17] CAI J, PAN J, WU Y. Mechanical behavior of steel-reinforced concrete-filled steel tubular(SRCFST) columns under uniaxial compressive loading[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 97:1-10.