

高怡,方有珍,彭剑锋,等.装配式混凝土框架混合连接中节点抗震性能模拟[J].地震工程学报,2024,46(6):1387-1394.DOI:10.20000/j.1000-0844.20221101001

GAO Yi, FANG Youzhen, PENG Jianfeng, et al. Numerical simulation on seismic performance of hybrid-connection joints in prefabricated concrete frame structures[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(6): 1387-1394. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20221101001

## 装配式混凝土框架混合连接中节点抗震性能模拟

高怡,方有珍,彭剑锋,吴涛

(苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215011)

**摘要:** 基于框架结构“强节点弱构件”的抗震需求和节点易于实现可靠连接,提出一种新型钢筋混凝土框架装配式混合连接节点形式。考虑梁端刚/柔性两种连接方式,采用有限元软件 ABAQUS 建立 2 个新型钢筋混凝土框架装配式混合连接中节点模型和 1 个现浇对比试件模型,并对其进行水平循环往复荷载下的抗震性能模拟。根据模拟数据整理,对试件滞回性能、节点转动刚度、耗能能力和破坏模式进行对比分析。研究表明:装配式混合连接节点采取钢管混凝土实现了节点区混凝土斜压带和钢板斜拉带协同抗剪机理,提高了节点核心区抗剪能力,更好地满足“强节点”的抗震需求;装配式连接节点梁端刚/柔性连接方式均不同程度实现了梁端塑性铰区远离节点区;梁端刚性连接装配式连接节点试件的塑性铰区距离节点区最远,其整体性最好,初始抗弯刚度最大;梁端柔性连接装配式连接节点试件的塑性铰区范围较大,损伤耗能发展持续,而梁端刚性连接试件的塑性铰区相对集中,损伤耗能发展快速充分。

**关键词:** 装配式混凝土结构;混合连接节点;梁端连接方式;抗震性能;数值模拟

中图分类号: TU374

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)06-1387-08

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20221101001

## Numerical simulation on seismic performance of hybrid-connection joints in prefabricated concrete frame structures

GAO Yi, FANG Youzhen, PENG Jianfeng, WU Tao

(College of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, China)

**Abstract:** To meet the seismic requirements of “strong joint and weak member” of frame structures, facilitate convenient construction, and achieve the reliability of joints, this paper proposes a novel beam-column joint of prefabricated concrete frames. Considering the rigid/flexible connection mode at the beam end, two specimens of interior joints of prefabricated reinforcement concrete frames and a cast-in-place specimen for comparison were designed using the finite element software ABAQUS. The seismic performance of these specimens under lateral cyclic loading was simulated. Their hysteretic behavior, rotational stiffness, energy-dissipation capacity, and failure

收稿日期: 2022-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478286, 52178149), 江苏省教育厅重大科研项目(18KJA560003)

第一作者简介: 高怡(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事组合结构抗震性能研究。E-mail: 2247092935@qq.com。

通信作者: 方有珍(1972-), 男, 安徽望江人, 博士, 教授, 主要从事钢结构、组合结构抗震研究。E-mail: Fyz72@mail.usts.edu.cn。

mode were compared and studied. The results show that the concrete-filled steel tube adopted in the prefabricated beam-column joint realizes the cooperative shear mechanism of the concrete compression field and the steel tension field in the panel zone, improves its shear capacity, and meets the seismic requirement of "strong joint." The prefabricated beam-column joints with rigid/flexible connection mode at the beam ends keep the plastic hinge zone of the beam end away from the connection area. The prefabricated beam-column joint with a rigid connection at the beam end has the largest initial bending stiffness and the best integrity. The plastic hinge zone of the specimen with a flexible connection at the beam end is large, and its damage energy-dissipation process is sustainable, whereas the plastic hinge zone of the specimen with a rigid connection is concentrated, and its damage energy dissipation is developed rapidly.

**Keywords:** prefabricated concrete structures; hybrid-connection joints; connection type at beam end; seismic performance; numerical simulation

## 0 引言

自20世纪80年代开始,我国建筑业进入快速发展阶段,施工技术水平不断提升,逐步成为我国四大支柱产业之一。随着社会经济发展和人们生活质量提高,节能减排和保护环境日益被人们重视。传统的建筑业劳动力需求量大,施工质量受现场影响,环境污染严重,而预制装配式建筑工厂化生产、现场组装,施工速度快,人工需求量小,且节能环保,势必在未来建筑工程中得到大力推广<sup>[1]</sup>。而预制装配式建筑整体性取决于现场装配连接传力的可靠性,因此,针对装配式混凝土框架结构的装配连接力学性能进行研究显得尤为迫切。

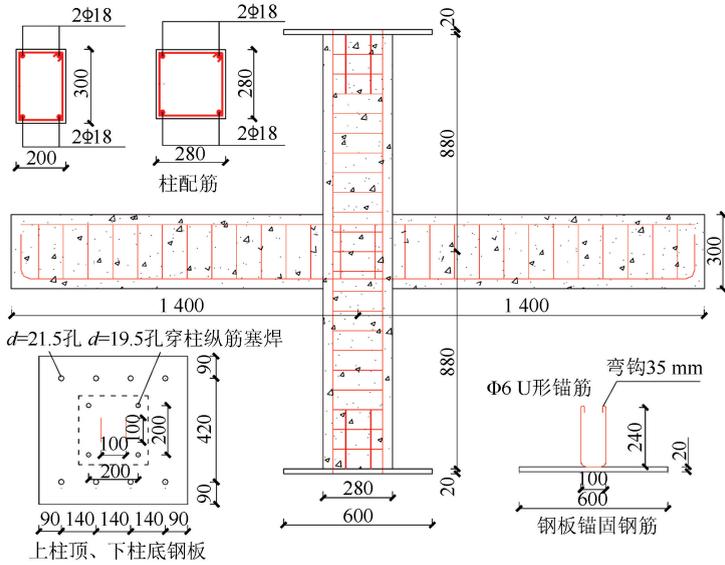
迄今,诸多国内外学者在装配式混凝土框架梁柱节点方面展开了系列研究:李正良等<sup>[2]</sup>提出了装配式钢管混凝土柱-带钢接头的钢筋混凝土梁柱节点,并进行了抗震试验研究,结果显示采用钢接头连接的节点具有良好的抗震延性。Guan等<sup>[3]</sup>对考虑纵筋锚固长度和叠合拼接的预制装配式连接进行了试验研究,结果显示,其力学发展进程理想,且可采用单调荷载模型预估塑性较长度。郭小农等<sup>[4-5]</sup>提出一种预制混凝土梁端,其节点采取预埋槽钢与型钢混凝土柱螺栓连接,通过试验和有限元模拟,结果显示,槽钢埋深和梁端箍筋影响节点承载力和变形能力,且槽钢偏心对节点力学性能产生不利影响。Nzabonimpa等<sup>[6]</sup>提出一种在柱与预制梁连接部位预埋钢板并采取机械连接的装配式节点形式,试验结果进一步表明,预埋钢板强度和刚度合理设置可实现该装配式节点较为优越的抗震性能。Huang等<sup>[7]</sup>提出一种采用钢结构节点区与梁柱通过螺栓连接的新型装配式高强节点,抗震试验和数值模拟验算了该新型节点具有较高承载力和良好的力学性

能。杨辉<sup>[8]</sup>提出了一种新型干湿混合式局部后张预应力装配式混凝土框架梁柱节点,试验结果表明,钢筋和混凝土间的滑移对节点性能影响较小,节点抗震指标较理想。许伟志等<sup>[9]</sup>考虑到两类典型的装配式节点非线性行为与现浇节点的区别,研究了这些区别对框架结构地震响应产生的影响。

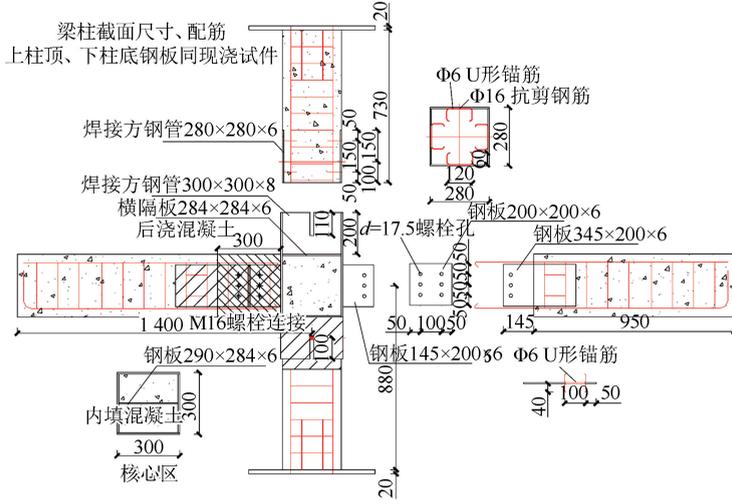
综上,针对装配式钢筋混凝土框架梁柱连接节点形式的研究成果有限,目前多数连接方式均难以实现混凝土抗剪桁架的传力模式,且连接部位局部混凝土浇筑施工较为困难。为此,本文基于框架结构“强节点弱构件”的抗震需求和更好地保证节点易于实现可靠连接,提出了一种可通过焊接组装的新型钢筋混凝土梁柱混合连接节点形式。考虑梁端装配的连接方式,设计了2个新型钢筋混凝土框架装配式混合连接中节点试件和1个现浇对比试件,采用有限元软件ABAQUS对其进行抗震性能数值模拟,以揭示新型装配式钢筋混凝土框架梁柱混合连接中节点的抗震机理。

## 1 试验试件设计

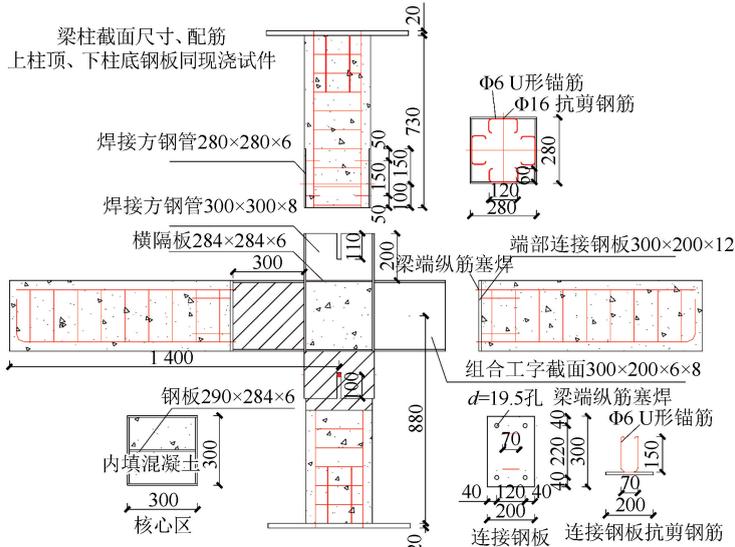
以实际层高3.6m的混凝土框架结构中层中节点为研究对象,截取中节点相连框架柱梁反弯点之间部位子结构作为试件原型。基于江苏省结构重点实验室设备加载能力,按1:1.6缩尺设计<sup>[10-12]</sup>1个现浇钢筋混凝土框架中节点对比试件和2个梁端刚/柔性连接的新型装配式钢筋混凝土梁柱混合连接节点试件。试件材料:混凝土为C30;纵筋为HRB335;箍筋和U形抗剪筋为HPB300;钢板为Q235;柔性连接为6.6级M16高强螺栓。试件设计详见图1所示。



(a) 现浇试件CFJ



(b) 梁端柔性连接试件HFJ



(c) 梁端刚性连接试件RFJ

图 1 试件具体构造及尺寸图(单位:mm)

Fig.1 Dimension and details of specimens (Unit: mm)

## 2 有限元模型建立

本文采用有限元软件 ABAQUS 对试验试件进行建模分析。

### 2.1 几何模型

试验方案包括:(1)建立现浇混凝土对比试件钢筋笼纵筋上下端部与端板进行绑定,再嵌固于混凝土中;装配式混合连接节点试件首先对节点区、混凝土梁与柱各自分别建立模型,其次针对组装过程中焊接连接部位采取绑定,螺栓连接部位螺栓与内置

抗剪连接板接触面采用接触处理,其中柔性连接试件的组装连接部位中,内置抗剪连接板和混凝土梁端预留连接钢筋,嵌固于后浇混凝土中。(2)试件边界处理措施:基于试验加载方案将柱端板和梁端耦合到对应辅助加载铰支座销栓处,其中柱顶铰作为加载点仅约束平面外变形,柱底铰仅释放平面内转动约束;梁端铰释放平面内所有约束。(3)试件模型单元选择和网格划分:试件中混凝土、钢板和螺栓均采用实体单元 C3D8R;钢筋采用桁架单元 T3D2。三个试验试件模型见图 2。

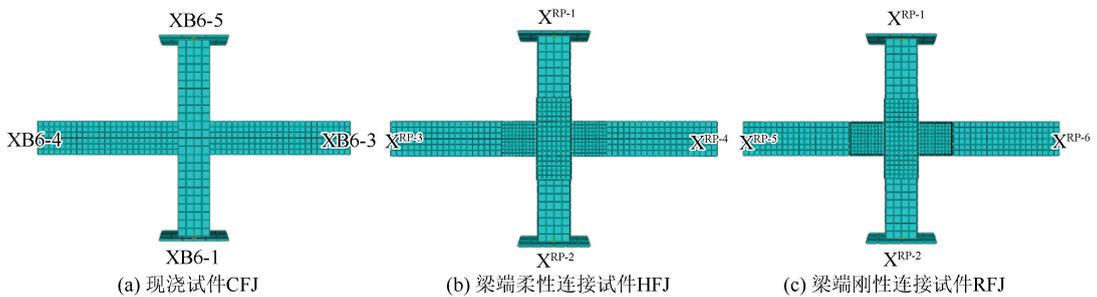


图 2 试件有限元模型

Fig.2 FEM models of specimens

### 2.2 材料本构确定

#### (1) 钢材

钢材匀质、各向同性,钢板和钢筋均选用常规双折线弹塑性强化本构,见式(1)。循环荷载下采用混合强化准则。

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon, & (\varepsilon \leq \varepsilon_y) \\ \sigma_y + E_{st}(\varepsilon - \varepsilon_y), & (\varepsilon > \varepsilon_y) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_y$  为钢材屈服应变; $\sigma_y$  为钢材屈服应力; $E_s$  为弹性模量; $E_{st}$  为强化模量,取  $0.02E_s$ 。

#### (2) 混凝土

混凝土循环本构基于单轴受压下的应力应变曲线模型,参照文献[13]加以修正,进一步采用 ABAQUS 软件对应的混凝土塑性损伤 (Concrete Plastic Damage, CPD) 模型。摩擦角取  $35^\circ$ ,受拉恢复系数取 0,受压恢复取 0.7。

### 2.3 接触面处理措施

试件模型中抗剪连接件螺栓连接部位、装配式连接后浇混凝土与周边预制构件接触面均定义为摩擦型接触:即切向罚摩擦,法向硬接触。混凝土与混凝土接触面摩擦系数取 0.6,混凝土与钢材接触面取 0.4,钢材与钢材接触面取 0.3。

### 2.4 模拟中加载方案确定

本文试验方案参照文献[14],首先,在柱顶耦合点施加轴向力,达到设计轴压比 0.4 并维持恒定,随

后进行循环往复水平位移加载。由于现有有限元软件无法准确模拟加载循环次数对混凝土酥松脱落的影响,为此模拟加载等级均采用一次循环,前四级为加载相的侧移(水平加载位移与试件顶底铰之间距离比值)分别为 0.375%、0.5%、0.75%、1.0%,后续加载级按照相对侧移的 0.5%递增,加载至超过框架结构大震层间侧移限值(1/30)的相对侧移的 3.5% 后结束。

## 3 有限元模型验证

为了验证本文模型建立的可行性,选取文献[14]中试验试件 RCJ 作为模拟对象,参照本文建模方式建模和模拟,对其模拟滞回特征和破坏模式进行对比分析。

### 3.1 滞回曲线

通过模拟数据整理得到了试件 RCJ 的荷载-位移滞回曲线,与试验进行对比,结果如图 3 所示。

由图 3 发现:(1)有限元模型的周边接触面紧凑且混凝土材料均匀密实,而实际试验试件周边连接界面存在间隙且混凝土材料不均匀,内部存在孔隙和微裂缝。因此,加载初期试验试件模拟刚度(7.23 kN/mm)明显大于试验值(5.00 kN/mm)。(2)有限元软件 ABAQUS 采取混凝土塑性损伤模型来考虑混凝土材料的损伤退化,但仍不能完全准

确反映混凝土在往复荷载下的拉压酥松脱落过程,以致模拟滞回曲线未呈现较为明显的捏缩现象,试件受到极限承载力后呈显著下降趋势。(3)模拟滞

回曲线总体规律与试验曲线基本一致,但其极限承载力相对试验较高,主要由于模型的整体性优于试验试件。

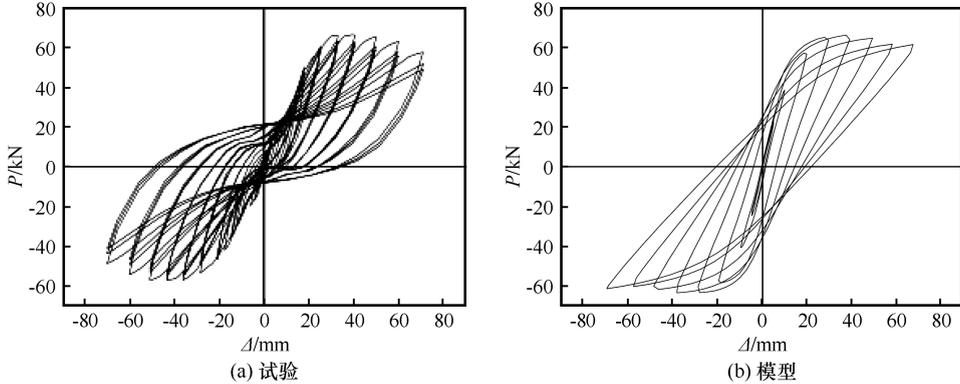


图 3 荷载-位移曲线

Fig.3 Load-displacement hysteretic curves

### 3.2 破坏模式

试件的破坏模式可通过外在现象显示,而数值模拟仅能通过模拟应力云图反映。基于模拟结果,

提取试件极限承载力对应的应力云图与试验破坏模式进行对比,如图 4 所示。

由图4可以看出:(1)模拟云图显示混凝土达到

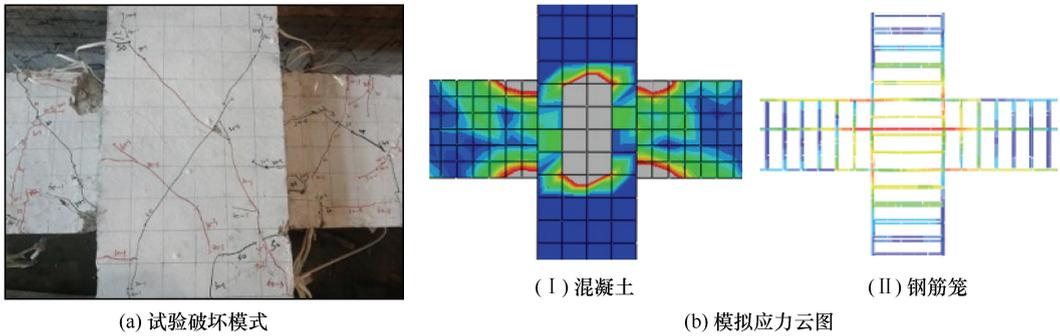


图 4 破坏模式

Fig.4 Failure modes of specimens

压溃应力,钢筋进入了屈服,即试件破坏表现为节点核心区混凝土压溃和梁端形成塑性铰区,与试件试验破坏现象基本吻合。(2)模拟节点核心区箍筋与梁端纵筋的应力均进入屈服状态,但梁端箍筋与柱端纵筋应力较小,这与试验钢筋应变测试结果完全一致。

基于以上滞回曲线和破坏模式对比表明,采用本文有限元建模与模拟方法具有可行性。

## 4 模拟结果分析

### 4.1 滞回性能

通过模拟结果数据整理分析,得到了各试件的弯矩-侧移角滞回曲线与骨架曲线(图 5)。

由图 5 对比可知:(1)模拟加载初期,各试件均处在弹性状态,其中装配式混合连接节点采用钢管

混凝土更好地满足了强节点的抗震需求,其中梁端刚性连接试件 RFJ 初始抗弯刚度最大( $13.82 \times 10^3$  kN·m/rad),现浇试件 CFJ 初始抗弯刚度最小( $9.06 \times 10^3$  kN·m/rad)。(2)随着模拟加载继续,装配式混合连接节点试件由于塑性铰区不同程度的外移而破坏,显得相对滞后,其中梁端刚性连接试件 RFJ 连接处的刚度突变导致应力集中,而破坏发生于相对集中的瞬时,且极限承载力达到最大(82.98 kN)。(3)装配式混合连接节点试件中,梁端柔性连接试件 HFJ 的破坏发生在剪切板连接处且范围较大,而塑性铰区发展缓慢,极限破坏出现相对延缓。(4)现浇试件 CFJ 的滞回曲线的滞回环狭长,耗能面积较小。而装配式混合连接节点试件由于塑性铰区不同程度外移,弯曲塑性铰发展相对充分,滞回环

饱满,耗能面积大;装配式混合连接节点试件中,梁端柔性连接试件塑性铰区发展持续充分,滞回环呈

较饱满的梭形,而梁端刚性连接试件的塑性铰区发展集中于装配式节点区,滞回环呈饱满的纺锤形。

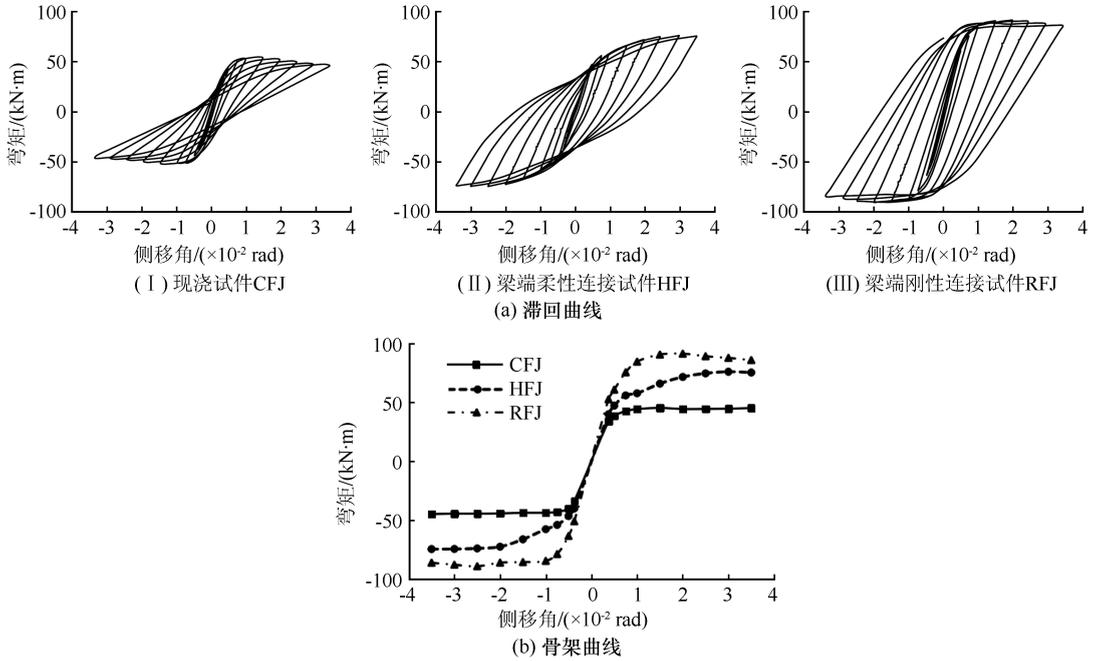


图5 弯矩-侧移角滞回曲线与骨架线

Fig.5 Hysteretic and skeleton curves of bending moment-drift ratio

### 4.2 节点转动刚度

节点转动刚度退化规律是其损伤进程的直观体现。本文引入峰值转动刚度(即节点弯矩-侧移滞回曲线中滞回环加载峰值点连线的斜率)进行表征。基于节点弯矩-侧移滞回曲线计算,得到了各试件峰值转动刚度如图6所示。

### 4.3 耗能能力

结构耗能能力通常采用等效黏滞阻尼系数  $h_e$  表示,等效黏滞阻尼系数越大,结构损伤越严重,耗能能力越优。等效黏滞阻尼系数  $h_e$  按照式(2)并依据滞回环(图7)进行计算:

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{(S_{ABC} + S_{CDE})}{(S_{\Delta OBF} + S_{\Delta ODG})} \quad (2)$$

式中:  $S_{ABC}$  为上半滞回环面积;  $S_{CDE}$  为下半滞回环面积;  $S_{\Delta OBF}$  为三角形  $OBF$  面积;  $S_{\Delta ODG}$  为三角形  $ODG$  面积。

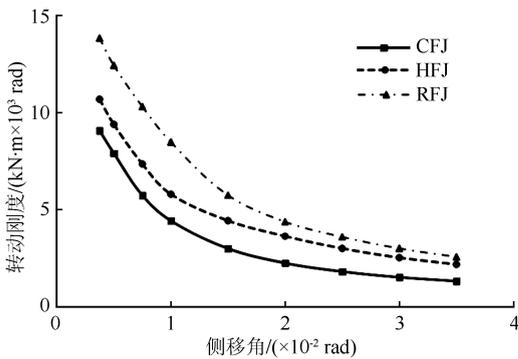


图6 峰值转动刚度

Fig.6 Peak rotational stiffness

经图6对比分析发现:(1)装配式混合连接节点采用钢管混凝土已更好地满足强节点的抗震需求,梁端采用刚性连接的试件RFJ初始转动刚度最大。(2)装配式混合连接节点试件加载前期转动刚度退化规律均与现浇试件CFJ相同,其中梁端采用刚性连接的试件RFJ在加载后期退化稍快。

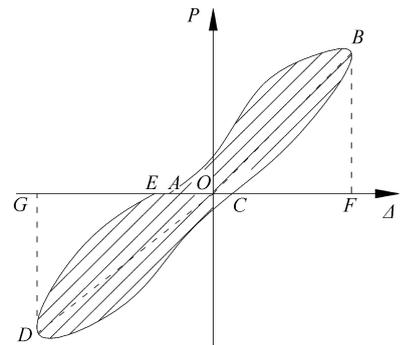


图7 计算滞回环

Fig.7 Hysteretic loop for calculation

基于模拟滞回曲线计算,得到了所有试件的等效黏滞阻尼系数如图8所示。

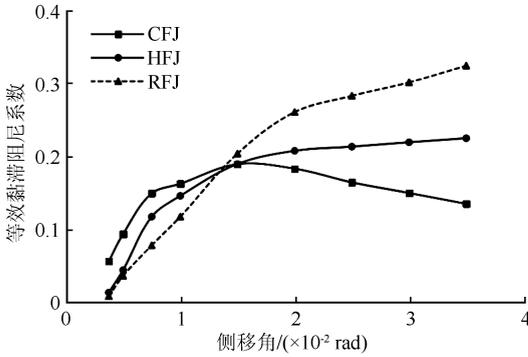


图 8 试件等效黏滞阻尼系数

Fig.8 Equivalent viscous damping coefficients of specimens

通过对图 8 对比分析可知:(1)模拟加载初期,所有试件基本处在弹性状态,等效黏滞阻尼系数 $h_e$ 。

基本小于现行《混凝土结构设计规范》<sup>[13]</sup>推荐的 0.05。(2)随着模拟加载的继续,现浇试件 CFJ 损伤发展最快,而装配式混合连接节点中的梁端刚性连接试件 RFJ 损伤发展最慢。(3)模拟加载至侧移达到 1.5%后,现浇试件 CFJ 等效黏滞阻尼系数逐步减小,而装配式混合连接节点试件等效黏滞阻尼系数仍在增大,其中梁端刚性连接试件 RFJ 增大幅度最为显著,主要在于其塑性铰区外移最大,塑性铰区混凝土耗能发展较为充分。

#### 4.4 破坏对应应力云图

数值模拟破坏模式可通过应力云图加以显示。本文提取了模拟试件对应极限承载力破坏模式时刻的应力云图如图 9 所示。

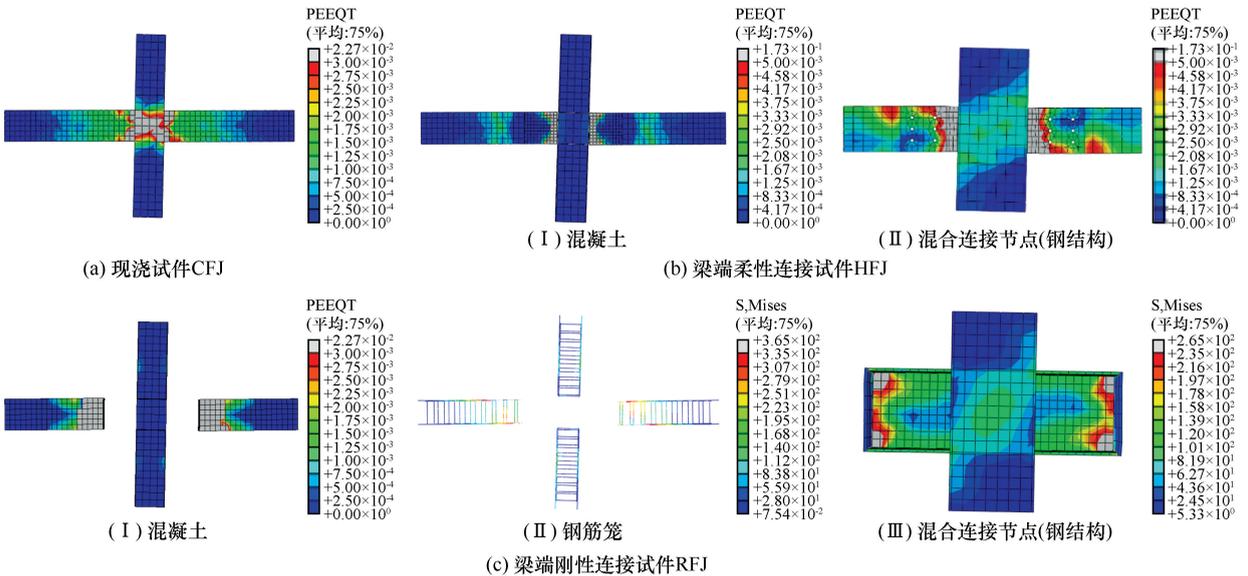


图 9 试件破坏时刻应力云图

Fig.9 Cloud map of stress of specimens at failure time

图 9 中可以看出:(1)现浇试件 CFJ 破坏集中体现在节点核心区域,出现较明显的塑性损伤,其相应的箍筋与梁端纵筋均已屈服;装配式混合连接节点试件的核心区为钢管混凝土,同时梁端刚/柔性连接试件均不同程度地实现了梁端塑性铰外移,其中梁端刚性连接试件 RFJ 塑性铰外移最大,交接处混凝土梁的塑性铰位移发展较为明显。(2)装配式混合连接节点采用钢管混凝土,增强了核心区混凝土约束,有效实现了混凝土压力带和钢板拉力带协同抗剪机理。

## 5 结论

本文采用有限元软件 ABAQUS 对 2 个装配式混合连接节点试件和 1 个现浇节点进行数值模拟分

析,得出以下结论:

- (1) 装配式混合连接节点采用钢管混凝土节点,其核心区有效实现了节点区混凝土压力带和钢板拉力带协同抗剪机理,显著提高了节点核心区抗剪能力,更好地满足了框架结构“强节点”的抗震需求。
- (2) 装配式混合连接节点梁端刚/柔性连接均实现了梁端塑性铰区远离节点区,进一步满足了“强节点弱构件”的抗震要求。
- (3) 装配式混合连接节点的梁端刚性连接试件中的塑性铰区距离节点核心区最远,其整体性最优,初始抗弯刚度最大。
- (4) 装配式混合连接节点的梁端柔性连接试件中的梁端塑性铰区范围较大,损伤发展延续;而梁端刚性连接试件的塑性铰区范围相对集中,损伤发展

快速且充分。

## 参考文献(References)

- [1] 范力,吕西林,赵斌.预制混凝土框架结构抗震性能研究综述[J].结构工程师,2007,23(4):90-97.  
FAN Li, LÜ Xilin, ZHAO Bin. Summary of investigation on seismic behavior of precast concrete frame structures[J]. Structural Engineers, 2007, 23(4): 90-97.
- [2] 李正良,徐妹亚,刘红军,等.新型装配式钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁框撑体系振动台试验研究[J].土木工程学报,2016,49(2):22-30.  
LI Zhengliang, XU Shuya, LIU Hongjun, et al. Shake table test on a new type of precast CFST column-RC beam braced frame structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(2): 22-30.
- [3] GUAN D Z, JIANG C, GUO Z X, et al. Development and seismic behavior of precast concrete beam-to-column connections[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2018, 22(2): 234-256.
- [4] 郭小农,高舒羽,裴进玉,等.预制混凝土梁端预埋槽钢节点静力性能试验[J].同济大学学报(自然科学版),2017,45(9):1258-1264.  
GUO Xiaonong, GAO Shuyu, PEI Jinyu, et al. Experimental study on static performance of embedded channel joints of precast concrete beams[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(9): 1258-1264.
- [5] 郭小农,裴进玉,李国强,等.预制混凝土梁端预埋槽钢节点承载性能数值研究[J].建筑钢结构进展,2017,19(1):26-32.  
GUO Xiaonong, PEI Jinyu, LI Guoqiang et al. Numerical research on the ultimate load capacity of embedded channel joint of precast concrete beam[J]. Progress in Steel Building Structures, 2017, 19(1): 26-32.
- [6] NZABONIMPA J D, HONG W K, PARK S C. Experimental investigation of dry mechanical beam-column joints for precast concrete based frames[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2017, 26(1): e1302.
- [7] HUANG Y F, MAZZAROLO E, BRISEGHIELLA B, et al. Experimental and numerical investigation of the static performance of innovative prefabricated high-strength composite columns[J]. Engineering Structures, 2018, 159: 227-244.
- [8] 杨辉.局部后张预应力装配式框架节点抗震性能及应用研究[D].南京:东南大学,2020.  
YANG Hui. Seismic behavior and application study on local post-tensioned precast concrete beam-to-column connections[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [9] 许伟志,王曙光,贲驰,等.考虑两类装配式节点非线性行为的框架结构响应分析[J].工程力学,2022,39(7):158-169.  
XU Weizhi, WANG Shuguang, BEN Chi, et al. Response analysis of frame structures considering the nonlinear behavior of two types of precast joints[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(7): 158-169.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.组合结构设计规范:JGJ 128—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of structures: JGJ 128—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [13] 周文峰,黄宗明,白绍良.约束混凝土几种有代表性应力-应变模型及其比较[J].重庆建筑大学学报,2003,25(4):121-127.  
ZHOU Wenfeng, HUANG Zongming, BAI Shaoliang. Introduction and comparison of several representative confinement models for concrete[J]. Journal of Chongqing Architecture University, 2003, 25(4): 121-127.
- [14] 赵云.装配整体式钢筋混凝土框架梁柱节点抗震性能试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2020.  
ZHAO Yun. Experimental study on seismic behavior of beam-column joints of assembled monolithic reinforced concrete frames[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.

(本文编辑:任 栋)