

新型剪切耗能连接件在装配式框架梁柱节点中的抗震性能研究

郝进锋, 曲明洋, 刁法伟

(东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 本文提出了一种新型装配式框架梁柱节点形式, 在设计中融合了销轴连接系统与布设于梁端上下两侧的可更换耗能阻尼器, 旨在提升结构的抗震性能、施工效率, 并降低震后修复成本。基于ABAQUS软件建立了一个传统现浇节点模型及四个不同参数的装配式节点模型, 对各模型的损伤分布、滞回性能与耗能能力等抗震性能指标进行对比分析。研究结果表明: 传统现浇节点主要发生梁端弯剪破坏, 表现出脆性失效特征; 而所提出的装配式节点则以阻尼器先行破坏为主, 整体破坏模式具有明显延性特征。在循环荷载作用下, 装配式节点展现出低屈服、高延性和良好的耗能能力。进一步研究不同参数的耗能连接构件对节点性能的影响发现, 优化阻尼器的形式与尺寸可显著提升节点的承载力与延性, 而混凝土强度和轴压比对其抗震性能影响相对较小。本研究可为附加耗能器配置下的装配式框架结构节点抗震设计提供理论依据与工程参考。

关键词: 装配式框架结构; 剪切耗能连接件; 抗震性能; 有限元分析; 延性破坏

中图分类号: TU391; TU352.11

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)01-0136-08

Seismic Performance of New Shear Energy Dissipation Connectors in Prefabricated Frame Beam-Column Joints

HAO Jinfeng, QU Mingyang, DIAO Fawei

(School of Civil Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang China)

Abstract: This study proposes a novel prefabricated beam-column joint for frame structures, incorporating a pin-type connection system and replaceable energy-dissipating dampers installed on the upper and lower sides of the beam end. The design aims to enhance seismic performance, improve construction efficiency, and reduce post-earthquake repair costs. Using ABAQUS finite element software, one conventional cast-in-place joint and four prefabricated joint models with varying parameters were developed to analyze and compare their seismic behaviors, including damage distribution, hysteretic response, and energy dissipation capacity. The results indicate that the cast-in-place joint primarily experiences brittle flexure-shear failure at the beam end, whereas the proposed prefabricated joint fails through damper fracture, exhibiting a more ductile failure mode. Under cyclic loading, the prefabricated joints demonstrate low yielding strength, high ductility, and favorable energy dissipation characteristics. Parametric analysis further reveals that optimizing the damper configuration and dimensions significantly enhances the load-bearing capacity and ductility of the joint, while variations in concrete strength and axial compression ratio have limited influence on seismic performance. This research provides theoretical support and practical guidance

收稿日期: 2025-06-12

修回日期: 2025-07-28

接受日期: 2025-08-13

作者简介: 郝进锋(1968-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为装配式结构等方面研究

通信作者: 曲明洋(2002-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为装配式结构等方面研究, Email: 17591617875@163.com

引用格式: 郝进锋, 曲明洋, 刁法伟. 新型剪切耗能连接件在装配式框架梁柱节点中的抗震性能研究[J]. 河南科学, 2026, 44(1): 136-143.

Hao J F, Qu M Y, Diao F W. Seismic performance of new shear energy dissipation connectors in prefabricated frame beam-column joints[J]. Henan Science, 2026, 44(1): 136-143.

for the seismic design of prefabricated frame joints equipped with supplemental energy dissipation devices.

Key words: prefabricated frame structure; shear-type energy dissipating connector; seismic performance; finite element analysis; ductile failure

0 引言

近年来,随着工程建设技术的不断进步和环保意识的日益增强,装配式建筑凭借其施工速度快、节能环保、构件制造规范化以及震后修复成本低等独特优势,受到广泛关注。装配式建筑中的梁、柱等主要构件在工厂预制,现场拼装,显著提升了施工效率。然而,相较于传统现浇结构,装配式结构的整体性有所下降,尤其是作为关键受力部位的梁柱节点连接性能尚需进一步优化,直接关系到结构的安全性与稳定性^[1]。

当前,梁柱节点的连接方式及耗能构件设计成为抗震研究的热点。合理布置延性耗能装置,能够将结构损伤有效集中于耗能部件,从而优化整体损伤机制,提升结构抗震性能^[2-5]。例如,许高娟和欧进萍^[6]提出的摩擦-金属屈服两级耗能节点,能够在小震时通过摩擦耗能,大震时依靠阻尼器屈服耗能,实现多阶段耗能效果。李定斌^[7]设计的狗骨式金属阻尼器,实验证明双翼缘结构的耗能性能优于单翼缘。Li等^[8-9]研发的拉压型耗能器通过外加约束钢板有效防止大变形。童超^[10]采用上部安装耗能器、下部配置钢牛腿的方式,进一步增强结构抗剪能力。李向民等^[11-12]提出在节点设置低屈服、高延性杆件,同样有效提高了抗震性能。此外,Dywidag公司设计了高延性耗能连接(Dywidag Ductile Connector, DDC)^[13],该构件安装方便,价格低廉,在美国已经得到推广应用。我国学者也对该设计做了研究^[14],发现引入该种延性连接件虽然较大程度上提高了结构的抗震性能,但是当构件出现损伤后,难以实现快速更换与修复。

基于此,本文提出了一种新型装配式混凝土梁柱节点,该设计结合了销轴系统和安装在梁端上下侧的可更换耗能连接阻尼器,阻尼器主要承担节点弯矩,销轴承担剪力,从而实现弯矩剪力的有效分配。此外,通过削弱梁端上下侧的厚度,使得损伤向指定位置集中,从而保护柱子免受破坏,旨在实现“强柱弱梁”的原则,并具有集中损伤能力和震后快速恢复功能。同时,本文对该节点的抗震性能及其力学特性展开了系统研究,为该设计在实际框架结构中的应用提供理论依据。

1 装配式梁柱节点有限元模型建立

1.1 节点设计

传统现浇混凝土梁柱节点虽具有整体性好的优势,但其施工受限于现场支模、养护周期等问题,难以满足现代建筑工业化的发展需求;现有的装配式节点常因接缝处应力集中导致抗震能力下降,且损伤常集中于不可更换区域。为解决上述问题,本研究提出一种新型装配式混凝土梁柱节点,有关节点形式以及阻尼器的尺寸见图1。其设计理念包括:①内力协同机制:将阻尼器与销轴系统相结合,阻尼器主要承担弯矩,销轴承担剪力,两者协同工作,共同形成完整的荷载传递路径。②可更换设计:阻尼器系统由锚固构件、连接构件和核心耗能构件组成,锚固构件预埋在混凝土中,耗能构件则通过预留孔洞与其他构件连接组成一体。核心耗能构件与主体结构分离,确保震后快速修复。③对称力偶平衡:销轴系统由预埋在柱中的侧面钢板和置于梁中轴位置的销轴组成,这样的设计可以在地震荷载作用下形成对称的力偶去平衡所在截面的弯矩,有助于上下

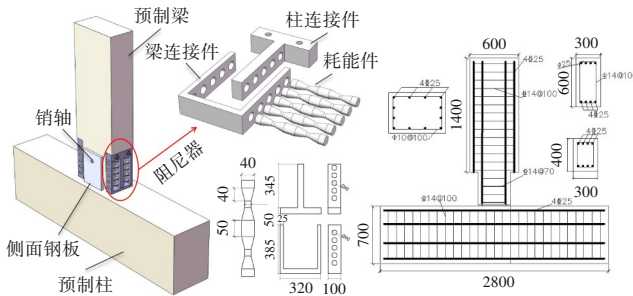


图1 梁柱连接节点尺寸及配筋图(单位:mm)

Fig.1 Size and reinforcement diagram of beam-column joint

侧阻尼器发挥同样的作用。

为系统评估新型节点的抗震性能,本研究建立了五个梁柱节点模型,其编号根据施工工艺命名:CIP-1为传统现浇节点(CIP),作为对比基准,用于比较本文所提出的装配式梁柱节点形式;PC-1至PC-4为装配式混凝土节点(PC)。具体而言,在建立一个传统现浇节点的基础上,通过改变混凝土的强度、轴压比以及耗能区域过渡段处的宽度,建立四个装配节点,以评估这些因素对结构抗震性能的影响。相关数据见表1。

表1 试件参数

Tab.1 Parameters of specimens			
试件编号	混凝土强度等级	轴压比	过渡段宽度/mm
CIP-1	C50	0.2	—
PC-1	C50	0.2	10
PC-2	C50	0.2	0
PC-3	C40	0.2	10
PC-4	C50	0.4	10

1.2 材料属性

本研究中混凝土的本构模型采用混凝土塑性损伤模型(CDP),应力-应变以及损伤因子等参数按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)计算得出^[15]。ABAQUS中需要的通用参数包括膨胀角、偏心率、双轴压缩屈服应力与单轴压缩屈服应力之比(F_{b0}/f_{c0})、混凝土开裂过程中裂缝宽度与应力之比(K_c)以及黏性系数,数据见表2。

表2 CDP模型通用参数

Tab.2 Parameters of CDP model				
膨胀角/°	偏心率	F_{b0}/f_{c0}	K_c	黏性系数
30	0.1	1.16	0.667	0.005

金属阻尼器采用Q235钢材,其本构关系参考谢鲁齐^[16]的研究,屈服强度为267.95 MPa,极限强度为458.56 MPa。采用随动强化本构,相关计算参考张庆玲^[17]的研究。随动强化模型用于描述材料在塑性变形过程中的应力-应变行为,基本公式为:

$$\alpha_k = \frac{C_{kin,k}}{\gamma_k} (1 - e^{-\gamma_k \epsilon_p}) + \alpha_{k,1} e^{-\gamma_k \epsilon_p}, \tag{1}$$

式中: α_k 是背应力,描述了材料在塑性变形中的硬化或软化效应; $C_{kin,k}$ 是强化模量,描述随动强化的速率比; γ_k 是随着塑性应变的增加背应力的变化率; ϵ_p 是塑性应变。

在ABAQUS中,循环硬化模型用于描述材料在反复加载(如地震作用)下的应力-应变关系,基本公式为:

$$\sigma_y = \sigma_{y0} + Q_{\infty} (1 - e^{-b \bar{\epsilon}_{pl}}), \tag{2}$$

式中: σ_y 是当前应力状态; σ_{y0} 是等效应力; Q_{∞} 是材料的极限硬化应力,表明材料的最终硬化水平; b 是硬化速率常数; $\bar{\epsilon}_{pl}$ 是塑性应变。

1.3 模型建立以及网格划分

首先在ABAQUS的部件模块建立各个构件,再对部件进行网格划分。划分方式采用结构化网格,通过切割截面保证网格为正六面体网格,以提高计算效率^[18]。梁、柱、耗能部件等实体单元均采用三维实体减缩积分单元(C3D8R)、钢筋采用两节点三维桁架单元(T3D2)。钢筋装配后通过布尔运算将各个钢筋合并为钢筋笼,以模拟钢筋之间的绑扎约束。对部件的工作完成后,在装配模块完成拼接。

装配完成后进行接触设置,首先定义接触属性,包括切向行为和法向行为。切向行为采用罚接触,摩擦系数取0.35,法向行为采用软接触。在主从面的选取上,采用刚度大、网格粗为主面的原则,对各个接触面进行定义。对于销轴连接的接触关系,为实现销轴在孔洞中的有效旋转,将销轴构件设置为铰接。钢筋笼与混凝土采用内置区域的方式,并且忽略钢筋与混凝土之间的滑移影响。

边界条件的设置首先要分别在梁端、柱顶、柱底的表面设置参考点(参考点用PR表示):RP-1、RP-2、RP-3,并与相应截面进行耦合。根据实际的边界条件,把约束和荷载分别施加于耦合点上。RP-2处施加 x 和 y 方向的位移约束,以及 y 方向和 x 方向的旋转约束,RP-3处施加除 x 轴旋转方向的其他所有约束。边界条件见图2。

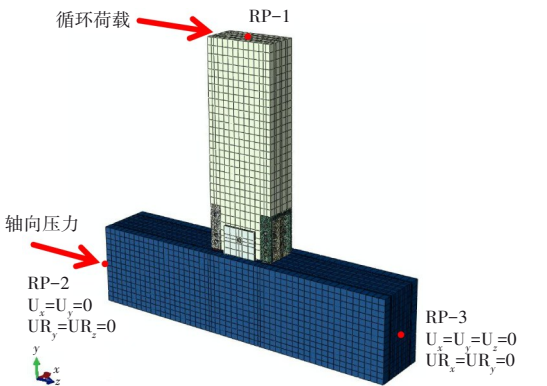


图2 网格划分及荷载条件

Fig.2 Grid division and load conditions

1.4 位移-荷载施加

对梁端的加载采用位移逐级递增的方式,每一级的位移幅值由目标旋转角确定。加载位置为梁端截面的RP-1,见图2。旋转角设定值为0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%、3.5%、4.0%、4.5%和5.0%,梁端距离销轴的长度为1500 mm,对应的梁端位移分别为7.5、15、22.5、30、37.5、45、52.5、60、67.5 mm和75 mm。荷载-位移曲线见图3。

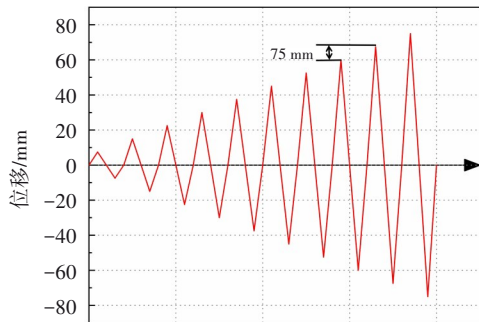


图3 位移加载曲线

Fig.3 Loading curve of displacement

2 有限元模型验证

为验证建立有限元模型的合理性和ABAQUS模拟的可行性,针对谢鲁齐^[16]实验进行验证。按照试验要求对试件REDC-PCF-R1进行建模,模型相关尺寸见图4(a)。该模型混凝土等级为C50,REDC构件采用Q235钢材,其他金属构件采用Q345钢材,钢筋均采用HRB400。通过对梁端施加水平往复荷载,得到骨架曲线见图4(d)。

图4(b)为验证模型的受压损伤云图,与图4(c)所示的实验破坏形态对比可以看出,该节点的破坏形态主要集中于梁端靠近耗能构件REDC处,混凝土损伤破坏的区域整体一致。根据图4(d)的骨架曲线对比显示,实验结果曲线与模拟结果曲线的走势基本相似。在梁端位移处于较小的幅值区间内,两条曲线几乎重合,随着梁端位移的变化,两条曲线之间的变化逐渐扩大,但仍在误差范围内,显示出了较高的拟合度。对实验与模拟进行具体数值上的对比,实验与模拟的初始刚度分别为12.128 kN/mm和14.923 kN/mm,相差18.73%;屈服荷载分别为157.438 kN和161.075 kN,相差2.31%;屈服位移分别为22.94、18.16 mm,相差26.32%;极限荷载分别为191.754 kN和197.859 kN,相差3.1%。初始刚度、屈服荷载以及屈服位移的误差均在10%及以下,仍在

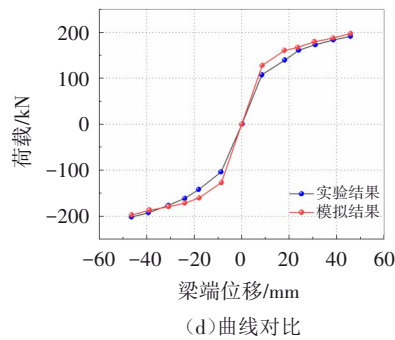
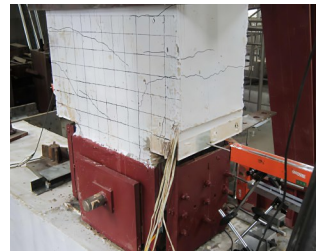
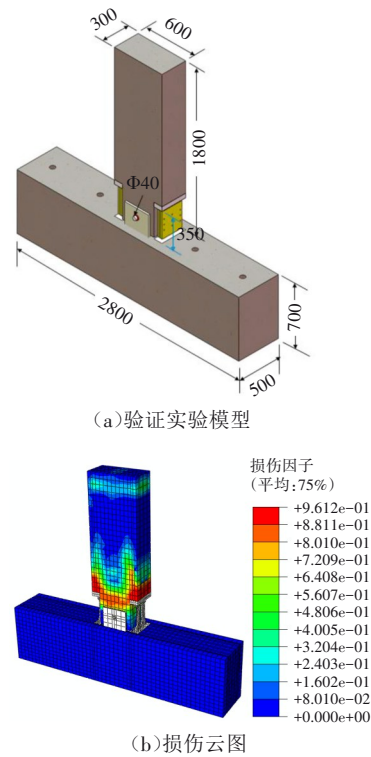


图4 验证模型与数据模拟对比

Fig.4 Comparison of validation model and data simulation

可接受范围内,这进一步证明了该有限元模型模拟该节点力学行为方面的合理性。

3 模型计算结果分析

3.1 破坏形态

损伤云图和应力云图能够直观地反映出结构在受力过程中的应力集中区域和潜在的破坏点,其中

损伤云图按照损伤因子的大小来展示结构的损伤程度,损伤因子取值范围为[0,1];应力云图基于材料的本构模型计算所得应力张量场,通过等效应力直观反映应力集中区域。本研究所建立的节点的损伤云图以及两种形式阻尼器的应力云图见图5。

1)现浇节点(CIP-1)作为整体刚性连接,在外荷载作用下呈现出显著的应力重分布现象——剪力和弯矩集中于梁柱交界面,致使柱端核心区形成贯通的损伤带(损伤因子 $D \geq 0.82$),且混凝土压碎区域向柱身扩展,表明传统现浇节点易引发非延性破坏模式。

2)本研究所提出的装配式节点通过“阻尼器-销轴系统”协同机制实现内力定向传递:销轴系统承担剪力,阻尼器通过塑性变形耗散弯矩能量,导致损伤集中分布于梁端削弱区以及阻尼器的连接区域,柱中受损程度低(损伤因子 $D \leq 0.16$),符合“强柱弱梁”的设计原则。

3)进一步对四个装配节点进行分析,以PC-1为基准作对比。PC-2通过改变阻尼器的形式——将过

渡段长度设置为0,使混凝土受压损伤区域明显减少且均匀分布于梁端交界处,证明通过阻尼器过渡段的设计可以有效改变节点的耗能形式。PC-3因混凝土强度降低至C40,梁端损伤出现局部化特征(局部 $D \geq 0.80$),削弱了混凝土整体耗能贡献。PC-4在轴压比提升至0.4工况下,损伤与PC-2相似,只在柱中略有不同,表明轴压比对节点的耗能机制影响较小。

4)PC-1与PC-2的阻尼器在过渡区形式上不同:PC-1的过渡区厚度为10 mm,PC-2的过渡区为夹角形,两个阻尼器形式的应力云图见图5(f)和(g),从图中可以看出,核心耗能构件沿轴向方向受力均匀,且主要集中于过渡段处。相比之下,PC-2的阻尼器在过渡段区域的应力分布更加集中,比PC-1有更好的能量耗散能力。

3.2 滞回曲线及骨架曲线分析

从图6可以看出,CIP-1节点的滞回曲线呈现先上升后迅速下降的趋势。这是由于节点达到峰值位移时,混凝土发生开裂,导致局部破坏,承载力降低。而PC-1节点表现出了饱满的滞回曲线,这是由于梁

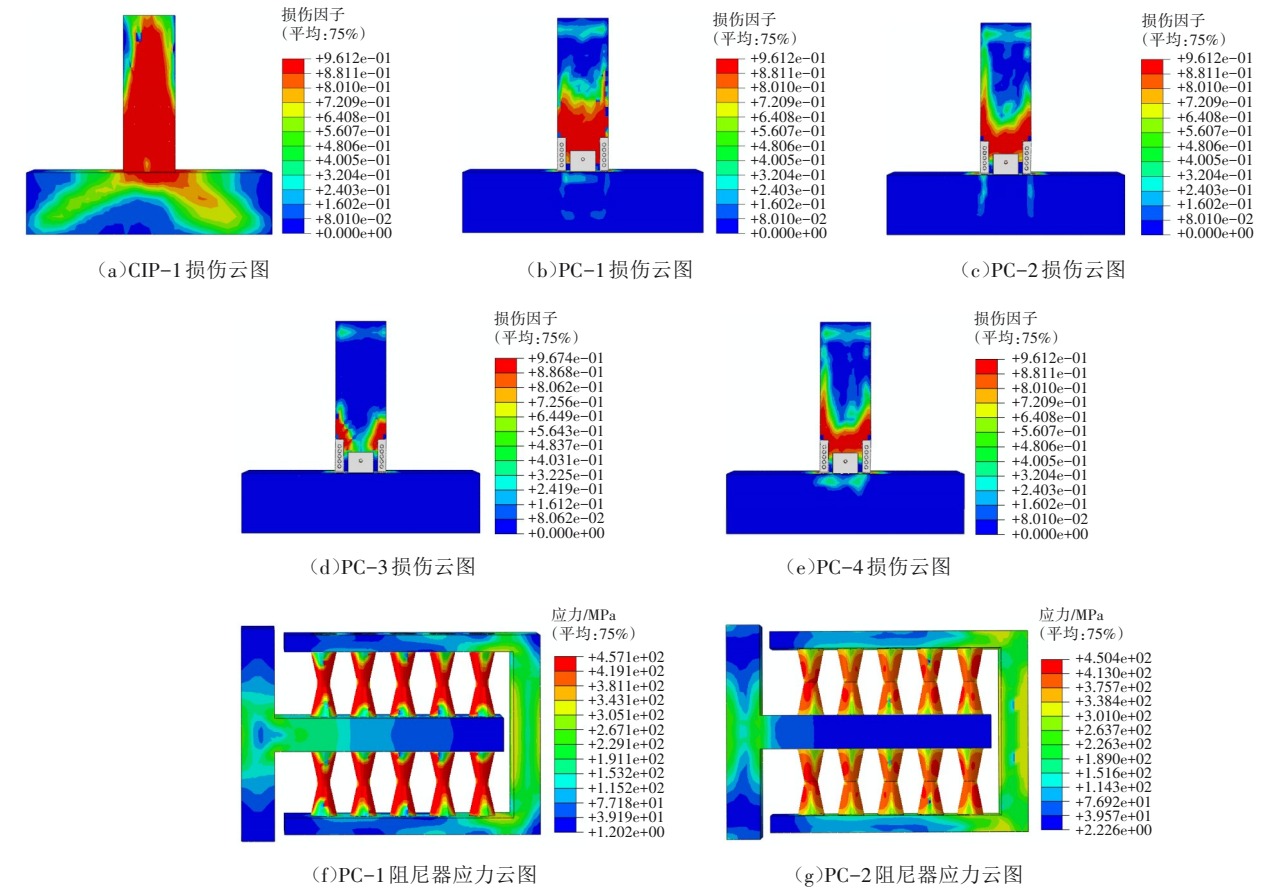


图5 有限元分析结果

Fig.5 Finite element analysis results

柱间预留 15 mm 空隙,有效避免了混凝土柱被压碎的现象。

图7为试件的骨架曲线,该曲线由荷载-位移曲线的各级加载循环峰值点连接形成。PC节点的骨架曲线基本相同,表现出了较好的对称性,表明节点在拉伸和压缩的作用下提供较为一致的传递路径,减小应力集中现象。与现浇节点的骨架曲线对比,装配节点的极限位移明显大于现浇节点,这是由于在初始位移作用下,装配节点的梁和柱都保持弹性,且屈服后的刚度主要由阻尼器承担。这一特性也说明结构的损伤主要集中于阻尼器及其连接处,而现浇节点的延性往往只依赖于混凝土和钢筋的协同工作,破坏形式为脆性破坏。

表3为根据骨架曲线及滞回曲线计算所得的相关力学参数。与传统现浇节点相比,装配节点的屈服位移普遍较小。这意味着在较小的变形下,装配节点就进入了屈服阶段,限制了结构的非线性变形。通过控制梁柱节点在地震作用下的塑性应变,从而降低结构的损伤以及震后修复的成本。装配节点的极限荷载与屈服荷载的比值在2.03与2.2之间,而现浇节点为1.55,屈服位移与极限位移之比最小为8.6,现浇节点为2.02,这些参数表明装配节点的延性要高于现浇节点。这是因为该装配节点

的阻尼器采用的是具有较好延性的Q235钢材,在剪切屈服后出现钢材硬化,进一步提升了节点的承载能力。

3.3 刚度退化及耗能分析

结构在位移荷载增大的情况下表现出的刚度退化的现象能够反映结构的累计损伤,是表示结构抗震性能的重要指标。根据《建筑抗震试验规程》(JCJ/T 101—2015)^[19],刚度可用割线刚度 K_i 表示,其计算公式为:

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|}, \tag{3}$$

其中, $+F_i$ 、 $-F_i$ 分别为第*i*次正、反方向峰值点荷载值; $+\Delta_i$ 、 $-\Delta_i$ 分别为第*i*次正、反方向峰值点位移值。

计算所得刚度退化曲线如图8所示,现浇节点的初始刚度最大,峰值刚度达到了25 kN/mm,明显高于其他试件,说明现浇节点有较高的初始刚度和承载能力,但是随着位移的增大,其刚度退化速率更快,体现了它较差的延性。其他装配节点虽然初始刚度低于现浇节点,但是刚度退化程度更为平缓,尤其是在大位移阶段,表现出较好的延性和抗震性能。

在本文中采用能量耗散系数来衡量节点的能量耗散能力,能量耗散系数的物理意义是该加载循环

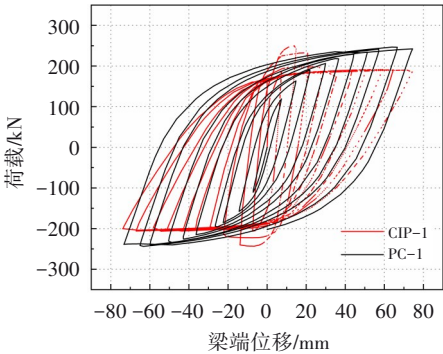


图6 滞回曲线对比
Fig.6 Comparison of hysteretic curves

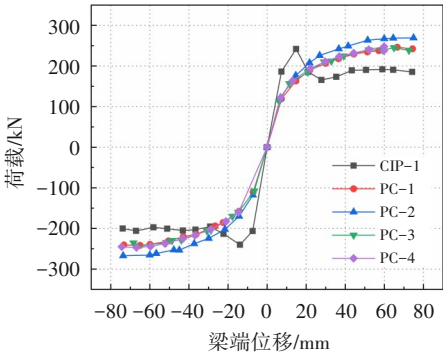


图7 骨架曲线对比
Fig.7 Comparison of skeleton curves

表3 试件的相关力学参数

Tab.3 Related mechanical parameters of specimens

试件	F_y /kN	F_m /kN	Δ_y /mm	Δ_m /mm	θ_y /°	θ_m /°	F_m/F_y	Δ_y/Δ_m	θ_y/θ_m
CIP-1	156.25	241.80	7.35	14.86	0.49	0.99	1.55	2.02	2.02
PC-1	119.17	246.14	7.35	66.59	0.49	4.44	2.07	9.06	9.06
PC-2	122.02	268.69	6.77	64.55	0.45	4.30	2.20	9.53	9.56
PC-3	112.47	244.98	6.21	64.91	0.41	4.33	2.18	10.45	10.56
PC-4	121.94	247.74	6.96	59.88	0.46	3.99	2.03	8.60	8.67

注: F_y 为屈服荷载, F_m 为极限荷载, Δ_y 为梁端屈服位移, Δ_m 为极限位移, θ_y 为屈服转角, θ_m 为节点极限转角。

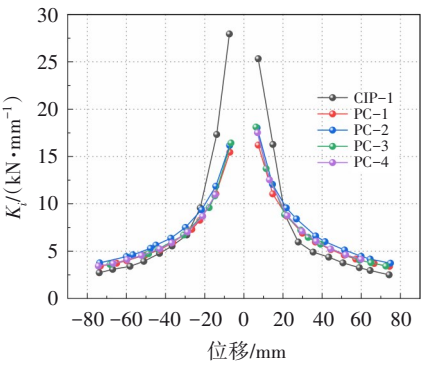


图8 刚度退化曲线

Fig.8 Stiffness degradation curve

内的耗能与弹性应变能之比,其计算公式可以表示为^[19]:

$$E=\frac{S_{ABC}+S_{CDA}}{S_{OBE}+S_{ODF}},\tag{4}$$

其中: $S_{ABC}+S_{CDA}$ 是滞回环内阴影部分面积, $S_{OBE}+S_{ODF}$ 是两三角形面积,如图9所示。

各节点的能量耗散系数见表4,现浇节点的能量耗散系数最低,这表明现浇节点的裂缝扩展速度较快,当裂缝发展到关键部位,结构会迅速失去承载能力。装配节点PC-1的能量耗散系数高于现浇节点14.49%,装配节点作为半刚性节点,传力路径清晰,损伤区域集中,且远离梁柱核心区域。对于四个装配节点的能量耗散系数显示,阻尼器无过渡区与过渡段厚度为10 mm相比,能量耗散系数提高了6.33%。其他三个参数均只有较小的提升,这也说明对于该装配节点形式,对阻尼器形式的进一步优化是提升节点耗能性能的方向。

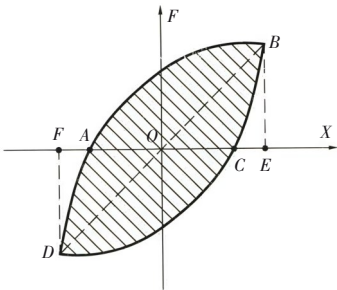


图9 能量耗散系数

Fig.9 Energy dissipation coefficient

表4 能量耗散系数

Tab.4 Energy dissipation coefficient

试件	CIP-1	PC-1	PC-2	PC-3	PC-4
能量耗散系数	2.07	2.37	2.52	2.30	2.38

4 结论

本文提出了一种装配式框架结构梁柱节点形式,通过与传统现浇节点做对比,并研究了阻尼器形式、轴压比、混凝土强度对节点性能的影响。得出如下结论:

1)本文计算了适用于ABAQUS的钢材和混凝土本构关系,并建立相应的有限元模型。通过对比应力-应变曲线,结果表明模型与已有实验数据的误差在工程允许范围内,验证本文有限元模型建立的合理性。

2)装配式梁柱节点采用销轴连接,避免了现场二次浇筑作业,显著提高了工程建设效率。分析结果表明,混凝土的损伤主要集中在梁端削弱处以及阻尼器连接区域,柱连接部位基本保持在弹性状态,符合“强柱弱梁”的设计原则,避免了连续倒塌现象的发生。

3)与现浇节点相比,本文所提出的装配节点的初始刚度较现浇节点降低了36%,但是其刚度退化速率慢于现浇节点,表现出更好的延性。且PC-2屈服荷载较CIP-1降低了21.91%,这表明装配节点可以通过进入塑性阶段来实现有效耗能,以此保护节点的关键部位。

4)研究结果表明,阻尼器的优化在能量耗散系数上提高了6.33%,其他参数的调整对结构抗震性能的影响较小。装配式框架节点对抗震性能的进一步提升主要在阻尼器形式的改进以及尺寸的调整上。

参考文献:

[1] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2001 Code for seismic design of buildings[S].

[2] 吴从晓,赖伟山,周云,等. 新型预制装配式消能减震混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2015,48(9):23-30.
Wu C X, Lai W S, Zhou Y, et al. Experimental study on seismic behaviors of new energy-dissipative prefabricated concrete frame structure joints[J]. China Civil Engineering Journal, 2015,48(9):23-30.

[3] Nakaki S D, Englekirk R E, Plaehn J L. Ductile connectors for a precast concrete frame[J]. PCI Journal, 1994, 39(5):46-59.

[4] Oh S H, Kim Y J, Ryu H S. Seismic performance of steel structures with slit dampers[J]. Engineering Structures,

- 2009,31(9):1997-2008.
- [5] Köken A, Köroğlu M A. Experimental study on beam-to-column connections of steel frame structures with steel slit dampers[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, 29(2):04014066.
- [6] 许高炳,欧进萍. 预制装配式结构梁柱节点被动耗能减振技术研究现状及展望[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(6):1183-1199.
Xu G W, Ou J P. State-of-the-art and prospect of prefabricated beam-column connection with passive energy dissipation technology[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(6):1183-1199.
- [7] 李定斌. 预制装配式混凝土框架金属消能减震连接体系抗震性能研究[D]. 广州:广州大学, 2019.
Li D B. Seismic performance of precast concrete frame with metal energy-dissipative damping connection system[D]. Guangzhou:Guangzhou University, 2019.
- [8] Li D B, Wu C X, Zhou Y, et al. A precast beam-column connection using metallic damper as connector: Experiment and application[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 181:106628.
- [9] Xie L Q, Wu J, Zhang J Y, et al. Experimental study on mechanical behaviour of replaceable energy dissipation connectors for precast concrete frames[J]. Structures, 2021, 33:3147-3162.
- [10] 童超. 单侧屈服装配式混凝土框架梁柱节点抗震性能研究[D]. 南京:东南大学, 2022.
Tong C. Seismic performance of precast concrete frame beam-column joints with unilateral buckling [D]. Nanjing:Southeast University, 2022.
- [11] 李向民,高润东,许清风. 预制装配式混凝土框架高效延性节点试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8):3453-3463.
Li X M, Gao R D, Xu Q F. Experimental study on high ductile joints for precast RC frame[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(8):3453-3463.
- [12] 李向民,高润东,许清风. 预制装配式混凝土框架高效延性节点:CN201210214798.0[P]. 2012-10-17.
Li X M, Gao R D, Xu Q F. High-efficiency ductile joints of precast concrete frame:CN201210214798.0[P]. 2012-10-17.
- [13] Englekirk R E. An innovative design solution for precast prestressed concrete buildings in high seismic zones [J]. PCI Journal, 1996, 41(4):44-53.
- [14] Wang C L, Liu Y, Zhou L, et al. Concept and performance testing of an aluminum alloy bamboo-shaped energy dissipater[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2018, 27(4):e1444.
- [15] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2002 Code for design of concrete structures[S].
- [16] 谢鲁齐. 可更换耗能连接的受力机理及其装配式混凝土框架节点的抗震性能研究[D]. 南京:东南大学, 2020.
Xie L Q. Mechanical mechanism of replaceable energy-dissipative connections and seismic performance of its precast concrete frame joints[D]. Nanjing:Southeast University, 2020.
- [17] 张庆玲. 循环载荷作用下Q235钢力学响应特性及本构模型研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2020.
Zhang Q L. Mechanical response characteristics and constitutive model of Q235 steel under cyclic loading [D]. Qinhuangdao:Yanshan University, 2020.
- [18] 庄茁,由小川,廖剑晖,等. 基于ABAQUS的有限元分析和应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.
Zhuang Z, You X C, Liao J H, et al. Finite element analysis and application based on ABAQUS[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2009.
- [19] JGJ/T 101—2015 建筑抗震试验规程[S].
JGJ/T 101—2015 Specification for seismic test of buildings[S].

(编辑 许军策)