

带黏滞阻尼器的装配式框架结构抗震性能试验研究

计嘉伟¹,何文福²,尚自端¹,王琨²,杨森²

(1. 上海核工程研究设计院股份有限公司,上海 200233; 2. 上海大学 力学与工程科学学院,上海 200444)

摘要:提出了一种全装配式混凝土减震框架结构,该框架结构采用直螺纹套筒连接,并采用黏滞阻尼器提升整体抗震性能。为研究所提出的全装配式混凝土减震框架结构的抗震性能,对1个单榀装配式减震框架试件和1个单榀装配式框架试件开展拟动力实验,对其破坏模式、塑性铰、滞回性能、刚度退化、延性和耗能能力进行研究。结果表明,装配式减震框架和装配式框架均发生弯剪破坏,破坏集中在接近柱中连接部位;与无阻尼器装配式框架相比,带黏滞阻尼器的装配式减震框架的正负向的极限承载力分别提高了97%和82%,耗能能力和刚度也显著提高。结合框架受力状态来看,装配式框架柱中部为纯受剪状态,抗剪性能需求高,易发生脆性破坏。因此,建议加强柱中连接节点处的抗剪性能,提高施工质量,确保连接部位的咬合力。

关键词:装配式混凝土减震框架;抗震性能;动力试验;黏滞阻尼器;直螺纹套筒

中图分类号:TU375

文献标志码:A

Experiment study on seismic performance of prefabricated frame structure with viscous damper

JI Jiawei¹, HE Wenfu², SHANG Ziduan¹, WANG Kun², YANG Sen²

(1. Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200233, China;

2. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: A fully precast concrete energy-dissipation frame structure is proposed. It adopts straight threaded sleeve connections and employs viscous dampers to enhance its overall seismic performance. To investigate the seismic performance of the proposed precast concrete energy-dissipation frame structure, pseudo-dynamic tests were carried out on a precast concrete energy-dissipation frame specimen and a precast frame specimen. The research focused on the failure modes, plastic hinge development, hysteretic behaviors, stiffness degradation, ductility, and energy dissipation capacities of the frame specimens. The results indicate that both the precast frame specimens with and without viscous dampers experienced flexural-shear failure, with the damage concentrated near the mid-height of the column joint. Compared with the precast frame without a damper, the precast energy-dissipation framework exhibited a 97% increase in positive ultimate bearing capacity and an 82% increase in negative ultimate bearing capacity. The energy dissipation capacity and stiffness were also significantly improved. Considering the stress state of the framework, the precast framework columns are in a pure shear state at mid-height, which requires high shear resistance and is prone to brittle failure. Therefore, it is recommended to strengthen the shear resistance of the mid-height connection joints, improve the construction quality, and ensure the gripping force of the connection parts.

Key words: precast concrete energy-dissipation frame; seismic performance; dynamic test; viscous damper; straight threaded sleeve

0 引言

节点是影响装配式框架结构抗震性能的主要因素之一。为提升装配式框架结构的整体性能,国内外学者主要从优化节点连接构造、发展高性能材料、应用消能减震装置等三方面展开大量试验、数值模拟及理论研究。杨森^[1]提出了一种基于成组耗能棒的预应力装配框架节点,采用试验分析与有限元验证相结合的方法,针对耗能棒的位置等因素进行参数分析。吴梧鸿^[2]提出了一种具有初始刚度大、延性性能好、耗能能力强的新型钢板阻尼器,并将其与装配式建筑结合,通过试验和 ABAQUS 有限元方法验证了其较好的抗震性能。罗顺祥^[3]提出了一种新型梁柱节点,该节点采用高强螺栓连接钢牛腿和梁柱预制构件。通过试验研究得出在钢牛腿和预制梁之间设置适当的安装缝隙可以增强梁端的转动能力。VALENTE^[4]在梁柱节点核心区设计了一种全新的新型摩擦阻尼器来增强连接节点的整体性能和抗震性能,并通过参数分析最终确定了摩擦装置滑移力的最佳值。

在消能减震装配式框架结构方面,HE 等^[5]进行了对带黏滞阻尼器和不带黏滞阻尼器的传统装配式框架试件的对比试验。研究表明,黏滞阻尼器在传统预制框架中发挥了显著的作用,并对结构的抗震性能起到积极的促进作用,黏滞阻尼器的引入有助于提高框架的整体稳定性和抗震能力。GUERRERO 等^[6]通过振动台试验研究了屈曲约束支撑对装配式钢筋混凝土结构的影响。结果表明在装配式混凝土结构中配置屈曲约束支撑可以增加附加阻尼,减小地震响应,延缓刚度退化。颜桂云等^[7]通过对装配式节点设置削弱型约束钢板阻尼器来增强抗震性能并开展试验研究。吴从晓等^[8]通过对装配式混凝土框架附设扇形铅黏弹阻尼器(sector lead viscoelastic damper, SLVD)来对装配式混凝土框架进行结构减震设计。

本文提出了一种全装配式混凝土减震框架结构,该装配式框架结构的梁柱节点和柱-柱节点均采用直螺纹套筒连接,可实现无灌浆快速装配。装配式框架内布置黏滞阻尼器,黏滞阻尼器的应用可显著提升装配式框架的抗震性能。为研究所提出装配式减震框架结构的抗震性能,本文设计制作了两榀装配式框架试件,包括全装配式混凝土框架(prefabricated concrete frame, PCF)和全装配式混凝土减震框架(prefabricated concrete frame with viscous dampers, PCFV),开展了拟动力试验,从破坏模式、塑性发展、延性性能、耗能指数、等效黏滞阻尼比、强度和刚度等方面对装配式框架的抗震性能进行研究。

1 新型装配式框架试验设计

1.1 新型装配式框架结构体系

本文所提出的装配式框架结构体系构造形式见图 1。装配式框架结构连接主要包括梁-梁连接节点和柱-柱连接节点分别见图 1 (b)、(c)。柱-柱连接节点位置位于柱中反弯点处,且上下预制柱段均外伸一段凸台,在吊装施工时可以提供临时支撑,大幅减少了现场支撑的使用。现场施工时直接利用上下预制柱段凸台对位进行准确对接,待下柱段纵向向外伸钢筋与上柱段纵筋完成对位后,即可旋转套筒至两段钢筋的连接中心处,完成钢筋连接,见图 1 (d),最后将连接区套筒拧紧后再后浇混凝土,完成装柱-柱节点连接。梁-梁节点连接区远离节点核心区,预制柱段连接区伸出一段短梁,短梁端部伸出榫头,在现场吊装时可直接将梁端榫头与柱端牛腿相搭接,通过直螺纹套筒完成纵筋连接,最后在梁连接区进行后浇混凝土作业,完成梁-梁节点装配。框架的半干式连接可大幅提高装配效率。

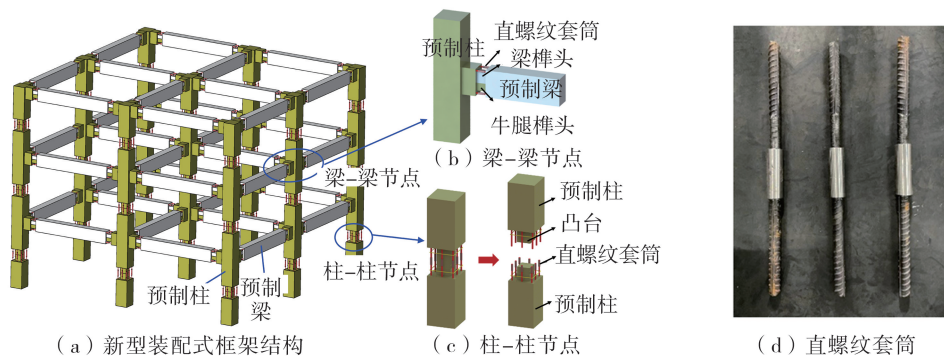


图 1 新型装配式框架结构体系

Fig. 1 Novel precast frame structure system

1.2 试件设计

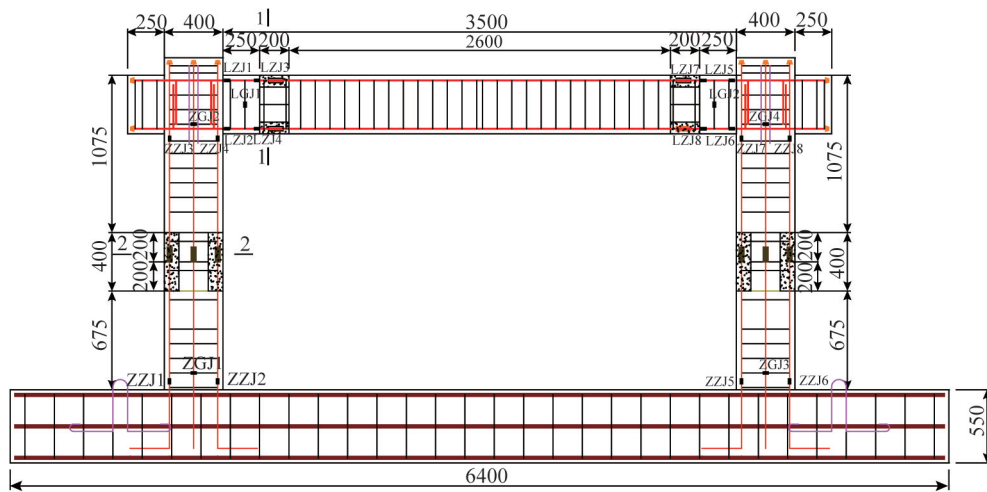
试验试件为两榀单层单跨的混凝土框架,包括 1 榀全装配式混凝土框架(PCF)和 1 榀配置黏滞阻尼器的全装配式混凝土减震框架(PCFV)^[9-11],试件尺寸见表 1。试件的尺寸设计来自某装配式办公楼项目中配置黏滞阻尼器的一榀框架,梁和柱的尺寸按照 1/2 的比例缩尺并取整,墙的高度及宽度考虑到为试件预留足够的空间用于安装阻尼器。试件配筋情况见图 2。

表 1 试件尺寸

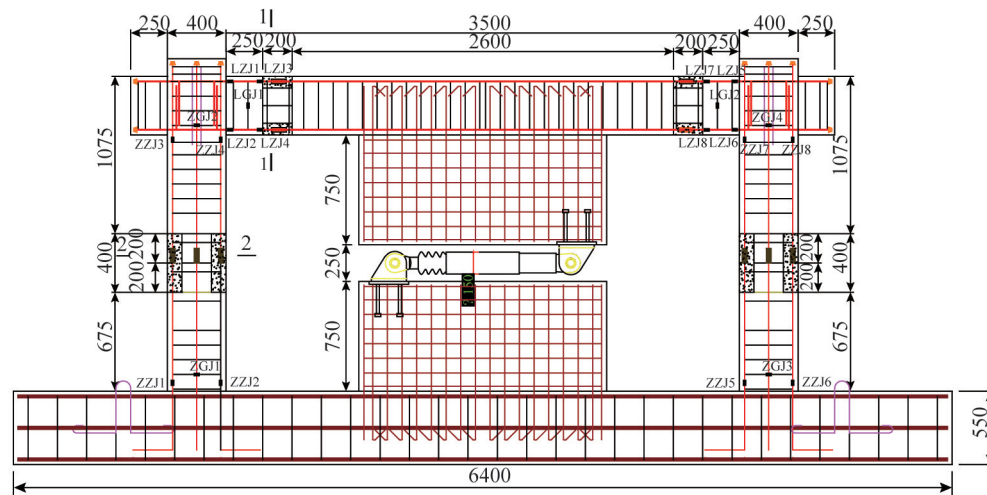
Table 1 Dimensions of the specimens

mm

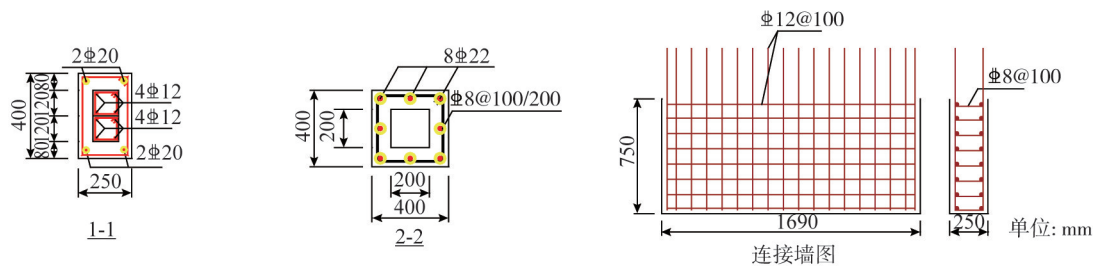
框架柱		框架梁		阻尼连接墙	
柱截面	400×400	梁截面	400×250	截面	1690×750
柱净长	上 1195,下 675	梁净长	2600	厚度	250
凸台截面	200×200	牛腿截面	150×150		
凸台净长	200	牛腿净长	200		



(a) 试件PCF图



(b) 试件PCFV图



(c) 试件截面图

图 2 试件配筋图

Fig.2 Reinforcement of the specimens

1.3 材性试验

本次试验试件采用同批次 C50 混凝土制作而成,正式试验之前在万能试验机上测试试块立方体抗压强度,平均轴心抗压强度为 53.6 MPa。钢筋强度测试结果见表 2。此外,本试验准备了 2 个完全相同的黏滞阻尼器,一个用于 PCFV 框架试验,另一个用于阻尼器性能测试。试验前通过理论及数值模拟的方式确定装配式框架的承载力,阻尼器最大出力为框架屈服荷载的 40%^[12],约为 100 kN,阻尼器具体参数见表 3,试验得到阻尼器滞回曲线见图 3。

表 2 钢筋力学性能试验结果

Table 2 Mechanical properties of steel rebars

钢筋等级	直径/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
HRB400	10	426	609	23.0
	12	426	579	23.5
	20	439	596	20.6
	22	445	608	20.8

表 3 黏滞阻尼器力学性能

Table 3 Mechanical properties of the viscous damper

阻尼系数 $C/(kN \cdot (s/m)^{0.2})$	阻尼指数 α	最大阻尼出力/kN	最大加载速度/mm/s	最大位移行程/mm
141.0	0.21	106.0	437.0	± 100.0

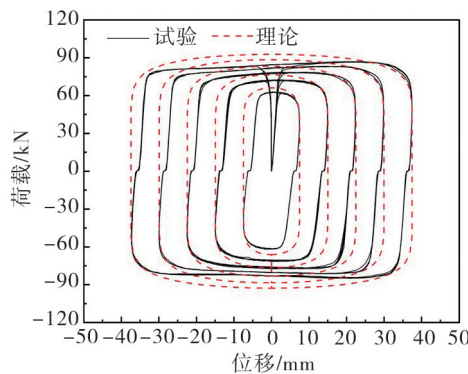


图 3 黏滞阻尼器滞回曲线

Fig. 3 Hysteretic curves of the viscous damper

1.4 加载方案

黏滞阻尼器为速度相关型的耗能减震装置,因此框架试件采用动力试验方法^[13]。试验加载以位移幅值和加载频率控制,考虑到黏滞阻尼器主要用于自振频率在 0.2 ~ 1.0 Hz 的中高层建筑,本次试验依次对每个加载级采用了 0.1、0.2、0.3、0.5、1.0 Hz 这 5 种加载频率,覆盖了原型结构的自振频率。由于试验设备限制,高频加载只能在较低的位移幅值下实现,因此随着位移的增加,所使用的频率逐渐降低。加载工况见表 4,每种工况循环加载 3 次。

表 4 加载工况表

Table 4 Loading condition

幅值/mm						频率/Hz						幅值/mm						频率/Hz					
1	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	22	0.1	0.2	0.3	0.5	—	50	0.1	0.2	—	—	—	54	0.1	0.2	—	—	—
2	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	26	0.1	0.2	0.3	—	—	58	0.1	0.2	—	—	—	62	0.1	0.2	—	—	—
4	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	30	0.1	0.2	0.3	—	—	66	0.1	0.2	—	—	—	70	0.1	0.2	—	—	—
6	0.1	0.2	0.3	0.5	—	34	0.1	0.2	0.3	—	—	74	0.1	0.2	—	—	—						
10	0.1	0.2	0.3	0.5	—	38	0.1	0.2	—	—	—												
14	0.1	0.2	0.3	0.5	—	42	0.1	0.2	—	—	—												
18	0.1	0.2	0.3	0.5	—	46	0.1	0.2	—	—	—												

2 试验结果与分析

2.1 破坏形态

2 个试件的最终破坏形态见图 4,试件 PCF 和试件 PCFV 的破坏形态较为相似。框架柱为受剪破坏,破坏时 2 个试件的框架柱都出现了大量的斜裂缝和少量的水平裂缝。此外,不同程度的混凝土破碎、剥落在新老混凝土交界面的柱中出现,塑性铰范围较大。试件破坏时,试件 PCF 的左柱和试件 PCFV 的右柱的中部都发生了大范围的劈裂,混凝土大块剥落,钢筋裸露。由试验现场的观测记录可知,造成这种破坏模式的原因是在框架柱的中部发生了局部的破坏,这与连接区抗剪能力不足和箍筋配置不足有关。此外,破坏为局部的脆性破坏,损伤快速累积,导致 2 个试件都提前达到极限承载力。

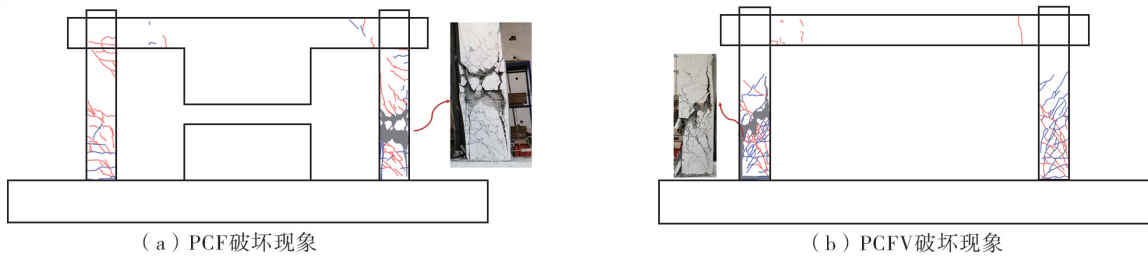


图 4 试件破坏形态

Fig. 4 Failure modes of the specimens

2.2 塑性铰发展

采用塑性铰来表征结构破坏的区域及破坏的程度,塑性铰的出现往往伴随着结构的严重变形,将塑性铰长度定义为混凝土的压碎区和混凝土明显开裂部位两者的平均高度^[14-15]。2 个试件框架柱的塑性铰见图 5,塑性铰长度结果见表 5。由图 5 可知,2 个框架左右柱的破坏程度都有较大差异,并且 2 个试件框架柱的破坏都发生在接近柱中的部位,主要原因为框架一侧柱的新老混凝土交界处咬合力不足及箍筋配置不足,使框架提前达到极限承载力。

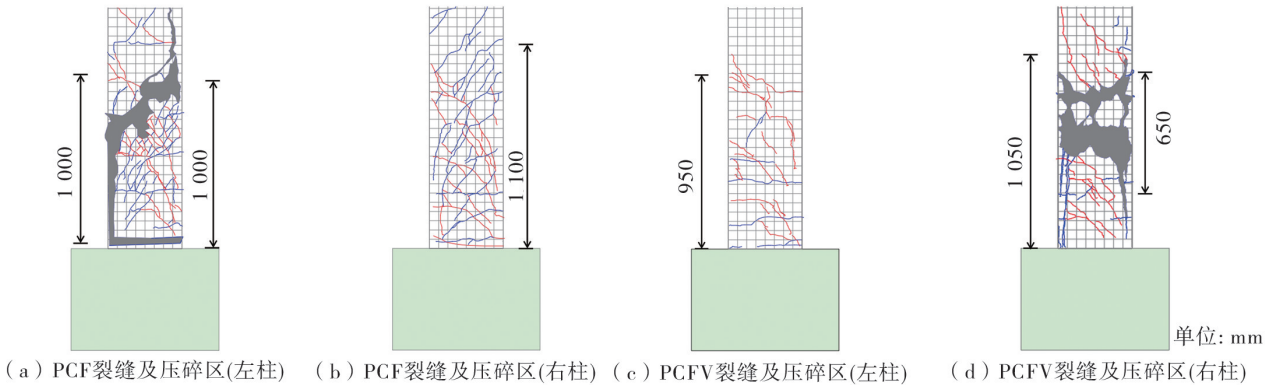


图 5 柱塑性铰长度及塑性发展情况

Fig. 5 Plastic hinge length and the development of plasticity

表 5 柱塑性铰长度

Table 5 Plastic hinge lengths of the column

		mm					
试件		左柱	右柱	试件	左柱	右柱	
PCF	裂缝区长度	1000	1100	PCFV	裂缝区长度	950	
	压碎区长度	1000	0		压碎区长度	0	650
	均值	1000	550		均值	475	850
平均值		775		平均值		662.5	

2.3 滞回性能

试件 PCF 和试件 PCFV 的荷载-位移滞回曲线见图 6。由图可知,加载初期,试件处于弹性工作阶段,加载曲线几乎呈线性变化,无残余变形。随着加载位移的增大,试件出现开裂和损伤,纵向钢筋开始屈服,试件进入了刚度退化阶段,耗能不断增加。通过 2 个试件的滞回曲线对比分析可得,在柱-柱连接处由于新老混

混凝土的界面滑移等原因,预制试件承载力下降快速,滞回曲线出现捏缩现象,构件表现出一定的脆性破坏特征;而黏滞阻尼器的及连接墙的设置可以提高构件的承载力,提高滞回曲线的饱满程度。

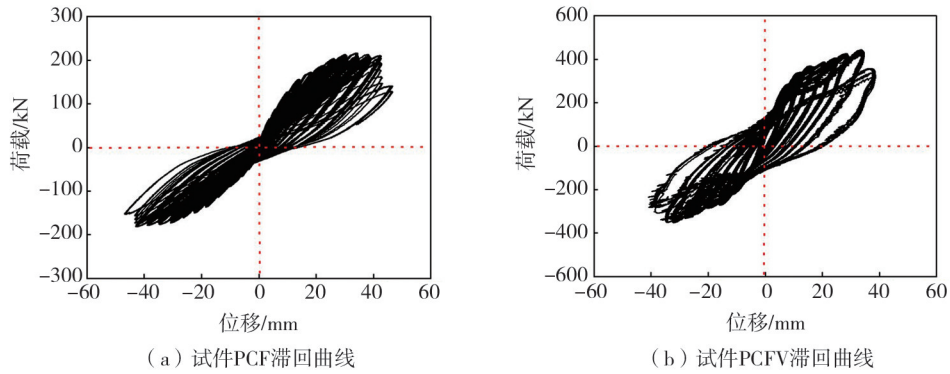


图6 试件滞回曲线

Fig. 6 Hysteresis curves of the specimens

选取典型位移幅值工况如 10、22、34 mm,研究加载频率对框架抗震性能的影响。同位移幅值而不同加载频率工况下的滞回环见图 7。同位移幅值下,加载频率越大,试件 PCFV 的滞回曲线越饱满,这与黏滞阻尼器的速度强化特性相一致,而试件 PCF 的滞回曲线受加载频率的影响很小。试验结果表明,黏滞阻尼器能在预制装配式框架中发挥良好作用,极大地提升了框架抗震性能。

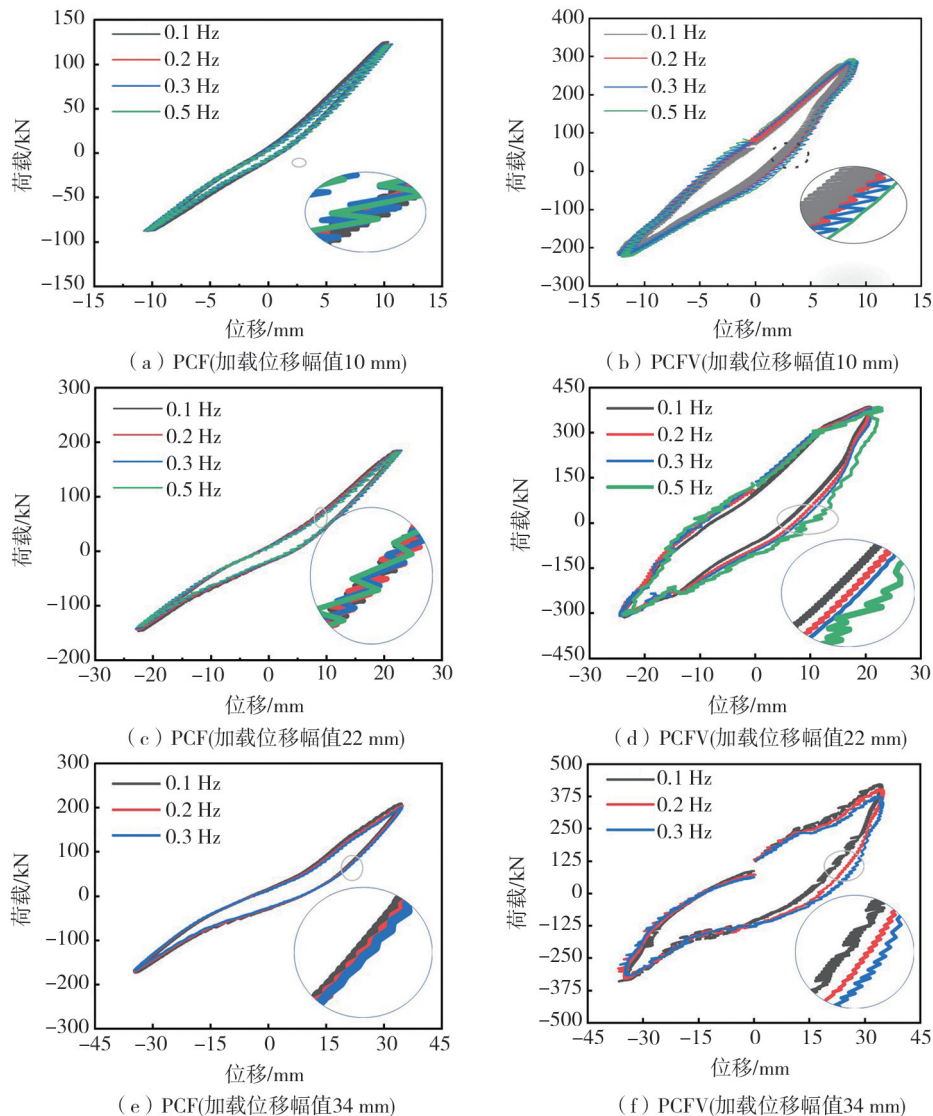


图7 不同频率相同位移下试件的滞回曲线

Fig. 7 Hysteretic curves of the specimens under different frequencies and the same displacement

2.4 刚度退化

本文采用割线刚度研究结构的刚度退化行为,PCF 和 PCFV 的单向刚度退化曲线图见图 8。由图可知,试件的正负向刚度退化的趋势相似。随着试件的应变积累,材料开始发生塑性变形,试件裂缝扩展和破坏逐渐增加,刚度随加载位移的增大逐渐减小。且试件的刚度退化主要集中在试件开裂后至屈服阶段(PCF 屈服位移为 20.68 mm,PCFV 屈服位移为 16.90 mm),这一阶段为裂缝数量增多的主要阶段。而加载后期,裂缝的数量不再发生大幅度的改变,刚度逐渐减小但退化速度放缓。

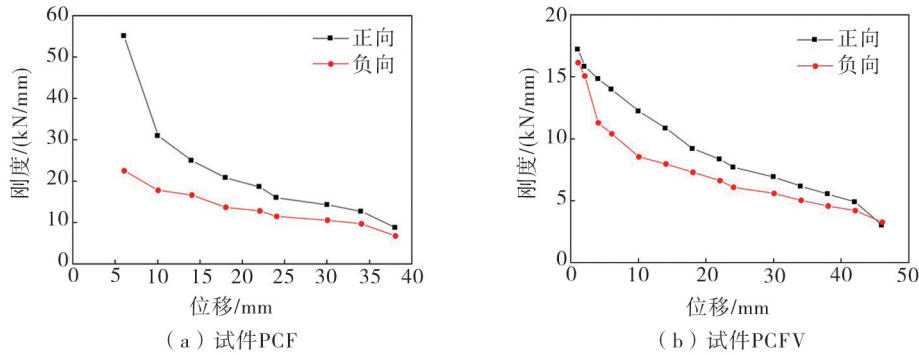


图 8 试件刚度退化

Fig. 8 Stiffness degradation of the specimens

2.5 位移与延性

延性性能结构或者构件抗震性能的重要衡量指标^[16]之一,通常用延性系数表示,定义为极限水平位移(荷载破坏时能达到的最大位移) D_u 与屈服水平位移(构件进入屈服点对应的水平位移) D_y 的比值,屈服点采用“等能量法”确定。试件 PCF 和试件 PCFV 的位移和延性系数见表 6。由表可知,试件 PCFV 极限位移角和延性系数均略小于试件 PCF,主要原因是黏滞阻尼器和连接墙构造提高了装配式框架梁的刚度,从而改变构件的受力机制,使框架柱提前破坏。

表 6 试件位移与延性

Table 6 Displacement and ductility of the specimens

试件编号	加载方向	屈服位移/mm	破坏位移/mm	延性系数	极限位移角	平均值
PCF	正向	20.68	44.29	2.14	1/45	2.01
	负向	-24.74	-46.71	1.89	1/45	
PCFV	正向	16.90	37.27	2.21	1/55	1.99
	负向	21.45	38.19	1.78	1/51	

2.6 耗能能力

构件的耗能能力可以通过累积耗能和等效黏滞阻尼比系数来衡量。累积耗能 E 为试件滞回曲线包围的面积^[17],本文取每个加载步下加载频率为 0.1 Hz 时第一圈滞回曲线包围的面积。而等效黏滞阻尼比定义为弹性势能与结构耗能之比。试件 PCF 和 PCFV 框架在 0.1 Hz 载荷下的单圈耗能和等效黏性阻尼比见图 9。随着位移的增大,各试件的耗能不断增加。在同一加载位移下,试件 PCFV 的累积耗能和等效黏滞阻尼比均远大于试件 PCF,主要原因是为在同一位移加载下,试件 PCF 的承载力比试件 PCFV 低。这证明了黏滞阻尼器在该预制结构中能发挥显著效果,大幅提高预制结构的耗能能力。

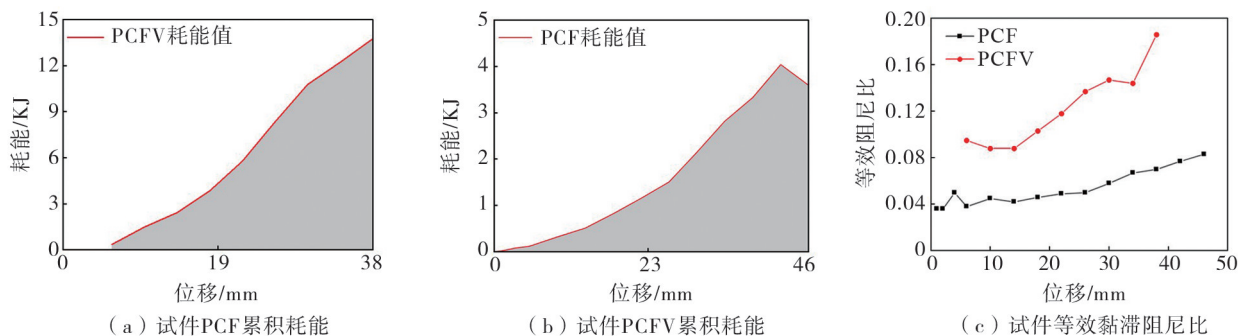


图 9 试件累积耗能和等效黏滞阻尼比

Fig. 9 Energy dissipation and equivalent viscous damping ratio of the specimens

2.7 钢筋应变分析

试件应变片柱纵筋 ZZJ1 应变和梁纵筋 LZJ1 应变见图 10,应变片布置图见图 2。由图可知,预制框架 PCF 和减震框架 PCFV 的柱纵筋 ZZJ1 均发生了屈服,梁纵筋 LZJ1 均未出现屈服,这与实验现象一致。梁纵筋 LZJ1 的应变略低于屈服应变,与试件的裂纹分布和破坏模式表现出较好的一致性。

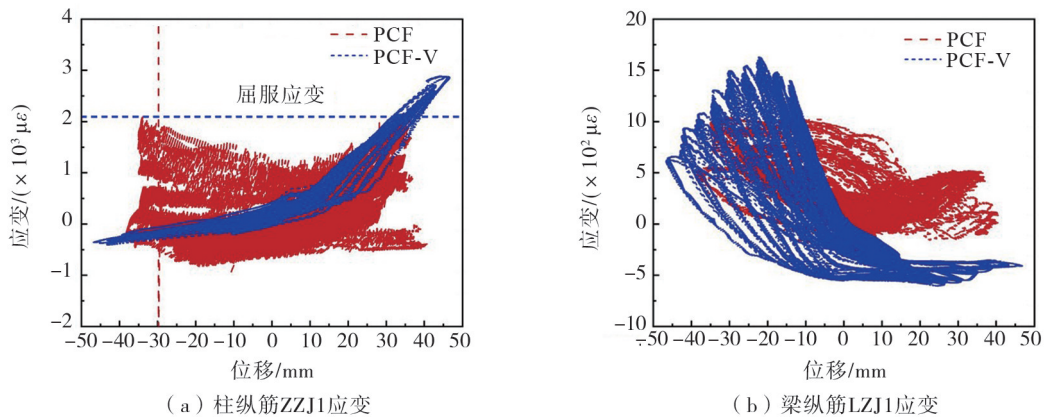


图 10 钢筋应变

Fig. 10 Rebar strains

2.8 受力分析

为了研究框架柱的受力模式,给出为弹性状态下简化的框架的弯矩和剪力包络图,见图 11。由图可知,在水平荷载作用下,框架柱中部为纯剪状态。由于框架柱的中部新老混凝土界面抗剪性能不足和箍筋配置不足,框架柱在中部出现受剪破坏,并造成损伤快速累积。左右柱的施工质量等可能存在差异,其中一根柱一旦发生损伤,会导致整个试件的快速破坏。此外,在对框架进行动力加载时,因实验条件制约而没有对框架柱施加轴向压力,这也是削弱上下凸台接触面摩擦力的原因。

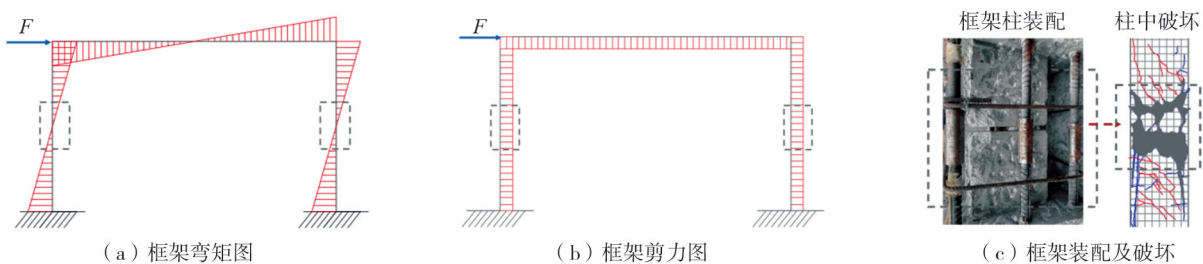


图 11 框架受力图

Fig. 11 Stress diagram of the frame

3 结论

本文对一榀装配式框架(PCF)和一榀装配式减震框架(PCFV)开展了拟动力试验,得出如下结论:

1) 试件 PCF 和试件 PCFV 均为弯剪破坏,框架柱的破坏集中在接近柱中的部位,破坏时柱中凸台连接处发生了水平滑移。试件破坏时框架梁受损较小。试件的破坏不再集中在柱底,破坏时 2 个试件的框架柱塑性铰范围较大,试件 PCF 的框架柱的塑性铰比试件 PCFV 的塑性铰长度长 17%。

2) 试件 PCF 的滞回曲线主要呈弓形和反 S 形,捏拢明显,耗能较差。相比之下,试件 PCFV 的滞回曲线则主要呈梭形而更加饱满,具有更强的耗能能力。试件 PCFV 正负向的极限承载力分别提高了 97% 和 82%;耗能提高了 350%;黏滞阻尼比提高了 1.3 倍,峰值荷载的割线刚度提高了近 1 倍,表明配置黏滞阻尼器的减震框架可以极大地提高结构的抗震性能。试件 PCF 和试件 PCFV 的延性系数分别为 2.01、1.99,表明新型装配式框架具有较强的变形性能。

3) 从试件破坏形态和抗震性能来看,框架柱的连接区是主要受力薄弱部位,在往复荷载作用下框架柱呈剪切破坏模式,主要原因是新老混凝土连接面抗剪性能不足和连接区箍筋配置不足,可通过在上下凸台处设置抗剪键或连接区箍筋加密等措施改善框架的剪切破坏。

参考文献:

- [1] 杨森. 基于成组耗能棒的预应力装配混凝土框架节点抗震性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
YANG Sen. Research on the seismic performance of a prestressing precast frame joint based grouped energy dissipation bars [D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)
- [2] 吴梧鸿. 带新型钢板耗能装置的装配式组合框架抗震性能试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
WU Wuhong. Experimental research on the seismic performances of a precast composite frame with new steel plate energy dissipation device [D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)
- [3] 罗顺祥. 新型全装配式混凝土框架梁柱节点抗震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
LUO Shunxiang. Research on seismic performance of a new type of fully assembled concrete frame beam-column joint [D]. Changsha: Hunan University, 2021. (in Chinese)
- [4] VALENTE M. Improving the seismic performance of precast buildings using dissipative devices[J]. Procedia Engineering, 2013, 54: 795-804.
- [5] HE W F, KANG J Z, YANG S, et al. Experimental research on the seismic characteristics of a precast frame structure with a viscous damper[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2023, 27(4): 959-980.
- [6] GUERRERO H, JI T J, ESCOBAR J A, et al. Effects of Buckling-Restrained Braces on reinforced concrete precast models subjected to shaking table excitation[J]. Engineering Structures, 2018, 163: 294-310.
- [7] 颜桂云, 黄冠骅, 滕军, 等. 装配式耗能减震节点连接中削弱型约束钢板阻尼器滞回性能试验[J]. 振动与冲击, 2021, 40(15): 98-106, 122.
YAN Guiyun, HUANG Guanhua, TENG Jun, et al. Tests for hysteretic performance of weakened constrained steel-plate damper in prefabricated energy dissipation joints[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(15): 98-106, 122. (in Chinese)
- [8] 吴从晓, 李定斌, 黄青青, 等. 加装 SLVD 的预制装配式混凝土消能减震框架抗震性能分析[J]. 地震工程学报, 2020, 42(1): 80-89.
WU Congxiao, LI Dingbin, HUANG Qingqing, et al. Seismic performance of precast concrete energy-dissipation frame structures with sector lead viscoelastic damper[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(1): 80-89. (in Chinese)
- [9] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
GB 50011—2001 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese)
- [10] JGJ 101—1996 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
JGJ 101—1996 Specification of test methods for earthquake resistant building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese)
- [11] JGJ 1—2014 装配式混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
JGJ 1—2014 Technical specification for precast concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [12] 王子龙. 黏滞阻尼器减震结构简化设计方法与优化研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2020.
WANG Zilong. Simplified design method and optimization research for viscous damper damping structures [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [13] 周云, 尹庆利, 林绍明. 带黏滞阻尼器腋撑钢筋混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 64-73.
ZHOU Yun, YIN Qingli, LIN Shaoming. Experimental investigation on seismic performance of RC frame structures with viscous damper energy dissipation haunch braces[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 64-73. (in Chinese)
- [14] GUAN D Z, GUO Z X, YIN H, et al. Study on plastic hinge length of precast beam-column connections reinforced partially with high-strength rebars[J]. Journal of Southeast University (Nature and Science Edition), 2019, 49(4): 645-651
- [15] 管东芝, 郭正兴, 尹航, 等. 部分高强度筋装配式框架梁柱连接塑性铰长度研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 645-651.
GUAN Dongzhi, GUO Zhengxing, YIN Hang, et al. Study on plastic hinge length of precast beam-column connections reinforced partially with high-strength rebars[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(4): 645-651. (in Chinese)
- [16] 江永涛. 新型装配式混凝土墙抗震性能试验及正截面受弯承载力研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
JIANG Yongtao. Study on the seismic behavior and normal section bending bearing capacity of the new precast concrete wall [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015. (in Chinese)
- [17] 查小琴, 张欣耀, 张亚军, 等. 利用常用办公软件 Excel 和 Origin 快速求取滞回环面积的方法[J]. 理化检验(物理分册), 2009, 45(8): 486-488, 490.
ZHA Xiaolin, ZHANG Xinyao, ZHANG Yajun, et al. Rapid calculation method of loop area by using usual office software of excel and origin [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2009, 45(8): 486-488, 490. (in Chinese)