

传统风格建筑钢-混凝土双枋-柱节点力学性能分析

董金爽^{1,2}, 公衍茹¹, 姜宝石¹, 隋 龔²

(1. 海南大学土木建筑工程学院, 海南 海口 570228; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要 目的 研究传统风格建筑双枋-柱节点的破坏特征及力学特性。方法 设计了3个典型传统风格建筑双枋-柱节点试件及1个单枋-柱节点试件, 对其施加正弦波动力循环荷载, 对其滞回曲线、骨架曲线、承载力及延性等进行分析。结果 将传统风格建筑与黏滞阻尼器相结合, 可显著提升传统风格建筑双枋-柱节点试件的抗倒塌能力及承载力, 延性性能提高了12.7%, 承载力提高了15.7%; 双枋-柱节点试件承载能力及延性均高于单枋-柱节点。结论 在雀替位置处合理设置黏滞阻尼器可显著改善传统风格建筑双枋-柱节点试件的力学性能。

关键词 传统风格建筑; 双枋-柱节点; 黏滞阻尼器; 力学性能

中图分类号 TU398 文献标志码 A

Mechanical Properties Analysis on Chinese Traditional Style Architecture for Di-Lintel-Column Joint

DONG Jinshuang^{1,2}, GONG Yanru¹, JIANG Baoshi¹, SUI Yan²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou, China, 570228; 2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, China, 710055)

Abstract: In order to research the failure characteristic and mechanical properties of typical di-lintel column joints, 3 specimens of di-lintel-column joints in Chinese traditional style architecture and 1 lintel-column joint were designed and tested under wine wave dynamic cycle load. The mechanical performances such as hysteretic characteristics, load capacity and ductility have been analyzed. Results indicate that the collapse resistance and bearing capacity of Chinese traditional style architecture with viscous damper are greatly improved. The displacement ductility is increased by 12.7%, the carrying capacity is increased by 15.7%. The bearing capacity and ductility of the di-lintel-column joints are higher than the lintel-column joint. The mechanical properties of Chinese traditional style architecture were improved significantly after viscous dampers were placed at the sparrow position.

收稿日期: 2022-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51968018); 海南省自然科学基金项目(520RC544)

作者简介: 董金爽(1989—), 男, 博士, 主要从事钢-混凝土组合结构等方面研究。

Key words: Chinese traditional style architecture; di-lintel-column joint; viscous damper; mechanical behavior

中国古建筑木结构以木构架作为主要承重构件^[1]。相比于西方砖石建筑,木构架耐久性较差,外界环境及人为因素对其影响较大^[2-3]。传统风格建筑是指采用钢材、混凝土等材料建造出外形与古木结构相似的一种建筑类型^[4]。该种建筑既保持了古木结构建筑的造型美,又具有良好的耐久性。目前,针对传统风格建筑,国内外开展了一系列研究,且多集中在其外形外观^[5-6]、施工工艺等方面^[7-9],而对其力学性能的研究相对较少,通行规范也未有相应设计规定。薛建阳等^[10-13]开展了钢结构及混凝土传统风格建筑的研究,结果表明,传统风格建筑与常规梁-柱节点力学特性有较大不同。隋龔等^[14]研究表明,传统风格建筑梁-柱节点抗震性能难以满足通行规范的相关要求。

传统风格建筑由于采用古木结构形制,柱子多为变截面,导致截面尺寸较小部位的轴压比较大,易发生剪切破坏,对抗震极为不利^[15]。当前传统风格建筑多为官式大木作的殿堂式建筑,该类型结构外围外檐柱常采用双枋-柱构造形式。鉴于针对传统风格建筑节点方面的研究较少,并考虑形制因素导致柱为变截面的影响,笔者在雀替处布设黏滞阻尼器,变截面柱采用钢-混凝土组合结构,形成附设黏滞阻尼器的双枋-柱节点,对其施加正弦波动力循环荷载,研究该节点滞回曲线、骨架曲线、承载力及延性。研究表明,在雀替位置处合理设置黏滞阻尼器可显著改善传统风

格建筑双枋-柱节点试件的力学性能。

1 试 验

1.1 典型双枋-柱节点构造形式

古木结构殿堂式建筑外围檐柱多采用双枋-柱形式。与传统梁柱节点相比,其节点域的范围较大,可分为上、中、下三个核心区域(见图 1)。荷载作用下,核心区域处于压、弯、剪复合受力状态,其力学性能与常规梁-柱节点相比具有显著差异。

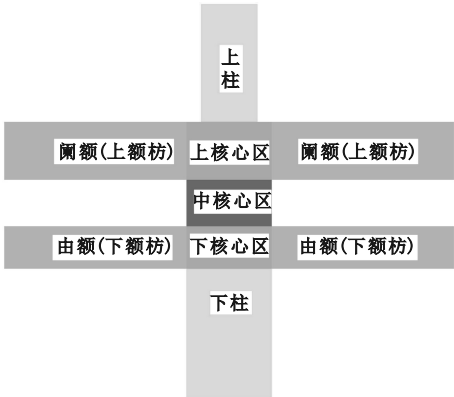


图 1 双枋-枋节点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of di-lintel column joint

1.2 试件设计

依据《营造法式》中木结构的尺寸规定,并结合舟山佛学院大殿工程实例,共设计 4 个缩尺比为 1:2.6 的试件,包括两个有阻尼器的双枋-柱节点试件,编号分别为 BD-2、BD-3,1 个未设阻尼器的双枋-柱节点试件,编号为 BD-1,1 个单枋-柱节点,编号为 BB-1。试件参数见表 1。

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of specimen

试件 编号	纵筋				箍筋					
	闌额		由额		上柱	下柱	闌额	由额	上柱	下柱
	顶部	底部	顶部	底部						
BB-1	3 Φ 12	3 Φ 12	—	—	—	8 Φ 12	Φ 8@50	Φ 8@50	—	Φ 8@50
BD-1	3 Φ 12	3 Φ 12	3 Φ 10	3 Φ 10	—	8 Φ 12	Φ 8@50	Φ 8@50	—	Φ 8@50
BD-2	3 Φ 12	3 Φ 12	3 Φ 10	3 Φ 10	—	8 Φ 12	Φ 8@50	Φ 8@50	—	Φ 8@50
BD-3	3 Φ 12	3 Φ 12	3 Φ 10	3 Φ 10	—	8 Φ 12	Φ 8@50	Φ 8@50	—	Φ 8@50

表2 试验加载工况

Table 2 The test loading mode

工况	加速度/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	控制位移 L / mm	频率/Hz	速度/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	工况	加速度/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	控制位移 L / mm	频率/Hz	速度/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	50.0	5.0	1.59	5.0	7	500.0	53.0	1.55	19.0
2	100.0	8.0	1.78	6.0	8	570.0	65.0	1.50	21.0
3	150.0	11.0	1.86	10.0	9	585.0	77.0	1.39	31.0
4	250.0	15.0	2.05	11.0	10	600.0	88.0	1.31	34.0
5	350.0	27.0	1.81	13.0	11	700.0	100.0	1.29	43.0
6	460.0	40.0	1.71	15.0	12	800.0	115.0	1.23	47.0

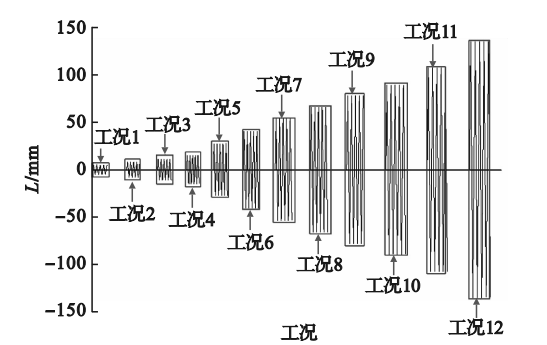


图4 加载制度示意图

Fig. 4 Sketch of test loading regime

1.4 黏滞阻尼器选型及安装

根据试验加载特点,选择速度型黏滞阻尼器,设计参数见表3,阻尼器与枋及柱连接方式见图5。试件 BD-2 安装阻尼器 FV-1,试件 BD-3 安装阻尼器 FV-2。阻尼器与试件连接设计参数见图6。

表3 黏滞阻尼器参数

Table 3 Parameters of viscous damper

阻尼器编号	F/kN	$C/((\text{kN}\cdot\text{s})\cdot\text{m}^{-1})$	α	s/mm
FV-1	80	88	0.36	± 30
FV-2	50	60	0.30	± 30

注: F 为阻尼器设计荷载; C 为阻尼系数; α 为阻尼指数; s 为设计位移。

2 试件破坏特征

2.1 试件 BB-1

(1)开裂阶段($L\leq 15\text{ mm}$)。试件产生少量裂缝,荷载与位移基本呈正比例关系,卸载后残余变形不显著。总体上,该阶段裂缝

多为细微裂缝,刚度无显著退化。

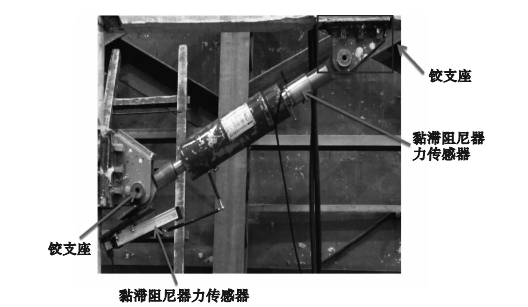


图5 阻尼器与枋及柱连接方式示意图

Fig. 5 Installation drawing of viscous damper

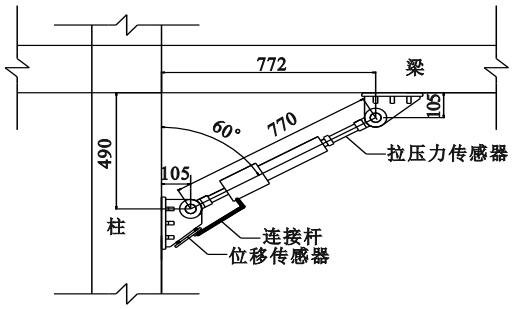


图6 黏滞阻尼器与试件连接布置参数

Fig. 6 Schematic diagram of connection between viscous damper and specimen

(2)屈服阶段($27\text{ mm}\leq L\leq 53\text{ mm}$)。随控制位移增大,试件表现为非线性特性;卸载后,残余变形显著,试件的刚度及强度有不同程度衰减,混凝土出现少量剥落。

(3)极限阶段($65\text{ mm}\leq L\leq 88\text{ mm}$)。节点区域混凝土破坏较严重,纵筋外露,梁柱连接部位出现一系列扩展趋向核心区延伸的斜裂缝,刚度及强度退化严重。

(4)破坏阶段($100\text{ mm}\leq L\leq 115\text{ mm}$)。梁柱连接部位的混凝土已有大量剥落,上柱

柱根混凝土被压碎,斜裂缝继续延伸,且宽度增大。试件破坏形态见图 7。

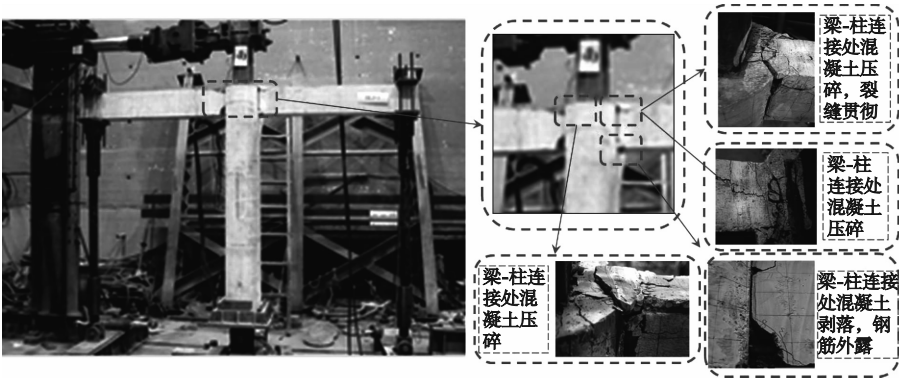


图 7 试件 BB-1 破坏形态

Fig. 7 Failure pattern of BB-1 specimen

2.2 试件 BD-1

(1)开裂阶段($L\leq 15\text{ mm}$)。试件滞回曲线为线性,卸载后无显著残余变形,开裂荷载为 16.8 kN,由额首先出现裂缝。

枋柱连接部位混凝土剥落严重,中核心区阑额与由额间出现混凝土鳞状剥落,试件刚度及强度退化显著。

(2)屈服阶段($27\text{ mm}\leq L\leq 53\text{ mm}$)。控制位移增大的过程中,试件滞回曲线逐渐呈现较显著的拐点,整体上处于弹塑性工作阶段,刚度有一定程度退化。

(4)破坏阶段($100\text{ mm}\leq L\leq 115\text{ mm}$)。枋柱连接处混凝土有大量剥落,已有裂缝宽度较大,纵筋外露。层间转角达 1/38 时,试件形成可变体系,无法继续承载,试验结束。试件破坏状态见图 8。

(3)极限阶段($65\text{ mm}\leq L\leq 88\text{ mm}$)。

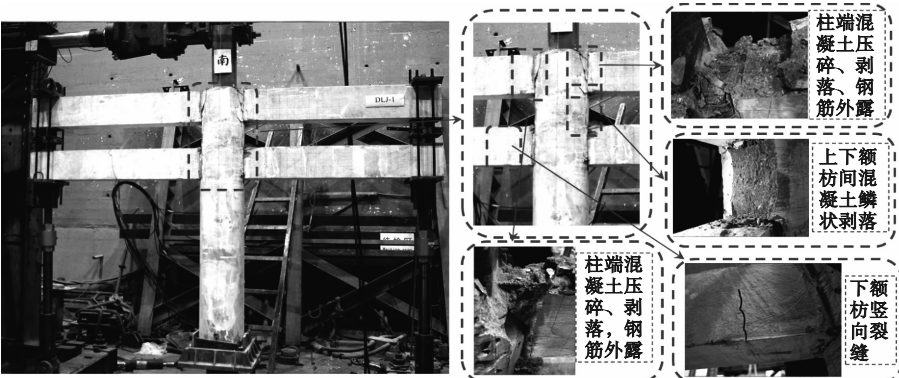


图 8 试件 BD-1 破坏形态

Fig. 8 Failure pattern of BD-1 specimen

2.3 试件 BD-2

试件 BD-2 及 BD-3 为设置黏滞阻尼器的试件,从开始加载至加载结束全过程中,两试件受力及变形特点基本相同,笔者以 BD-2 为例进行分析。

曲线呈线性特性,卸载时无残余变形,裂缝主要为细微裂缝。试件开裂荷载为 18.9 kN,与试件 BD-1 相比,提高了 12.5%。

(1)开裂阶段($L\leq 15\text{ mm}$)。试件滞回

(2)屈服阶段($27\text{ mm}\leq L\leq 53\text{ mm}$)。试件呈现显著的非线性特性,梁柱连接部位纵筋屈服,试件裂缝显著增多,上柱柱根处产

生约45°斜裂缝,刚度及强度均有一定的退化。

(3)极限阶段($65\text{ mm}\leq L\leq 88\text{ mm}$)。荷载与位移呈显著的非线性关系,变形的增速比荷载增加的快;卸载后,残余变形显著。试件

呈现明显的刚度及强度衰减。

(4)破坏阶段($100\text{ mm}\leq L\leq 115\text{ mm}$)。核心区混凝土有压溃现象,压溃部位面积较大,箍筋及纵筋外露。试件破坏特征见图9。

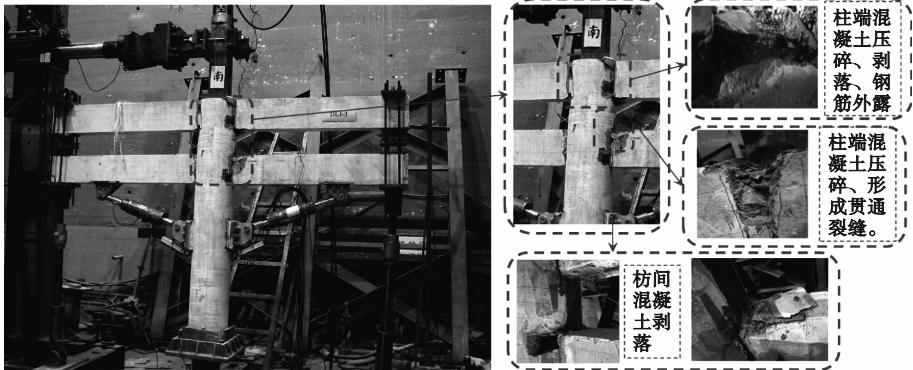


图9 试件 BD-2 破坏形态

Fig. 9 Failure pattern of BD-2 specimen

3 试验结果与分析

3.1 荷载-位移滞回曲线

将各试件每工况下第一圈循环的荷载-位移曲线绘制图中,得到各试件荷载-位移

($P-\Delta$)滞回曲线(见图10)。该曲线呈现锯齿状的主要原因是由于在快速加载过程中,加载设备不能稳定输出,但整体上不影响后续分析。

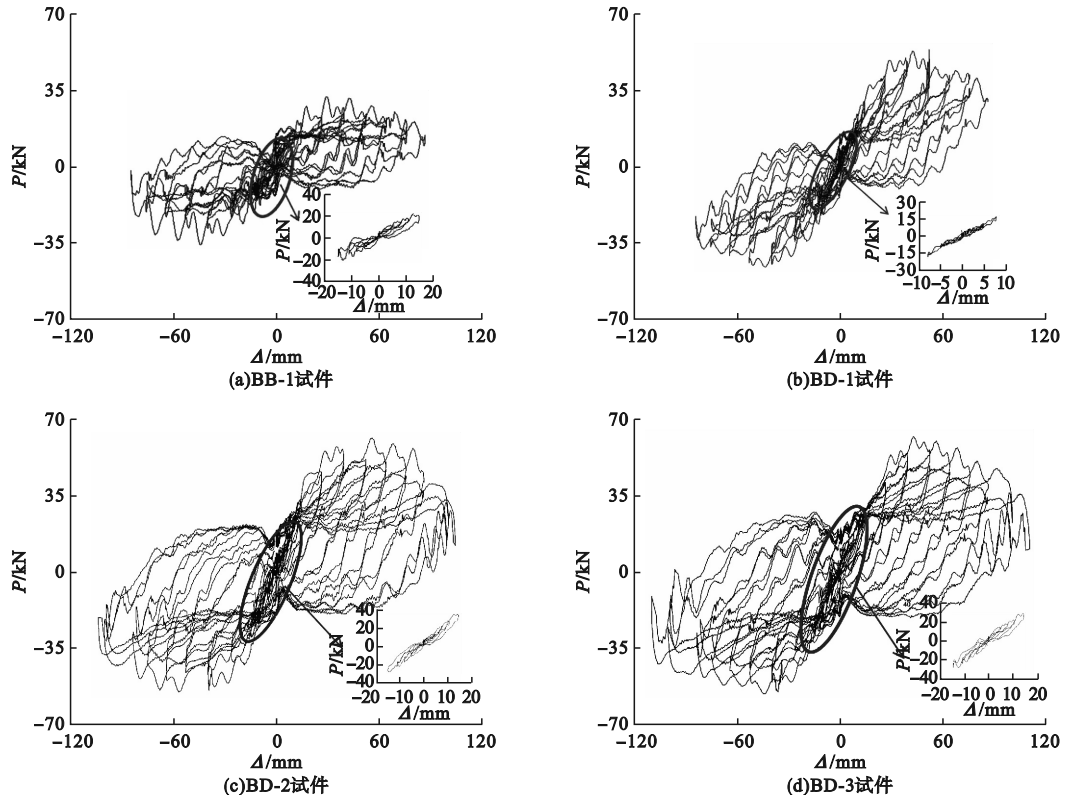


图10 双枋-柱节点试件恢复力特征曲线

Fig. 10 Restoring force characteristic curves of specimen

对比分析各滞回曲线可知:

- (1)加载初期($L \leq 15\text{ mm}$),各滞回曲线包络的面积均较小,且恢复力与位移基本表现为直线特性,刚度及强度无明显衰减,试件基本处于无损伤累积工作阶段。
- (2)随着控制位移逐渐增大($15\text{ mm} < L \leq 65\text{ mm}$),试件的受力及变形呈现较为显著的非线性性质,滞回曲线包围面积增大。试件由于弹塑性变形及塑性变形导致试件损伤累积,试件强度及刚度呈现不同程度衰减。由图 10(b)、(c)、(d)对比分析可知,双枋-柱节点试件滞回曲线包围的面积及承载能力在设置阻尼器后均有不同程度的提升,且阻尼器设计参数不同,试件力学特性提升程度不同。
- (3)加载后期($65\text{ mm} < L \leq 115\text{ mm}$),各试件恢复力特征曲线包络的面积继续增加,试件强度及刚度显著衰减,卸载后残余变形较明显,试件累积损伤严重。

上述分析表明,双枋节点的承载能力高

于单枋-柱节点,设置阻尼器的双枋试件优于未设置阻尼器的试件。在双枋-柱节点试件设置黏滞阻尼器后,该类型节点的力学性能得到了有效提升。

3.2 阻尼力-位移滞回曲线

笔者以试件 BD-2 阻尼力-位移($F-\Delta$)曲线为例(见图 11),选取工况 10、工况 12 等大控制位移下阻尼力-位移曲线进行对比分析:

- (1)随着加载速率的变化,黏滞阻尼器的阻尼力也随之改变,由此反映了速度型阻尼器的力学特点。
- (2)整体上,控制位移较大时,阻尼力-位移滞回曲线更为饱满。每种工况下,黏滞阻尼器 5 次循环加载形成滞回曲线并非是一条重合的曲线,而是有一定的“滑移距离”,且随着控制位移不断增大,该“滑移距离”也呈现逐渐增大的趋势。分析原因是随着加载的继续,试件损伤不断累积,从而导致试件的刚度及强度产生不同程度的衰减。

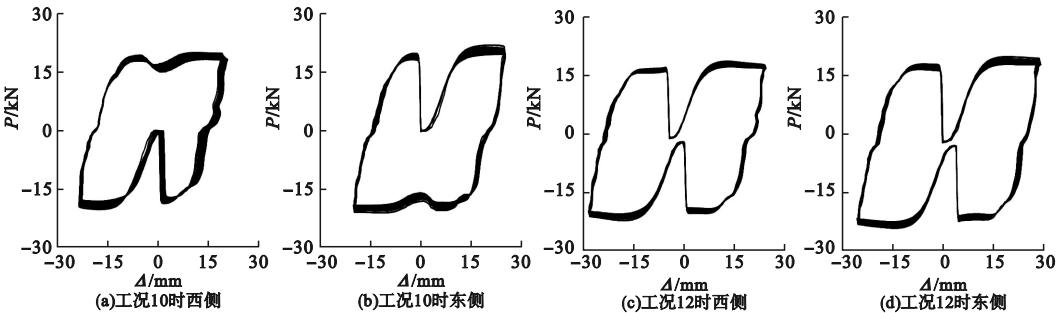


图 11 试件 BD-2 黏滞阻尼器 $F-\Delta$ 曲线
Fig. 11 $F-\Delta$ loops of viscous damper

3.3 骨架曲线

取各试件恢复力特征曲线每种工况滞回

环峰值荷载及其对应的位移,形成试件的骨架曲线(见图 12)。

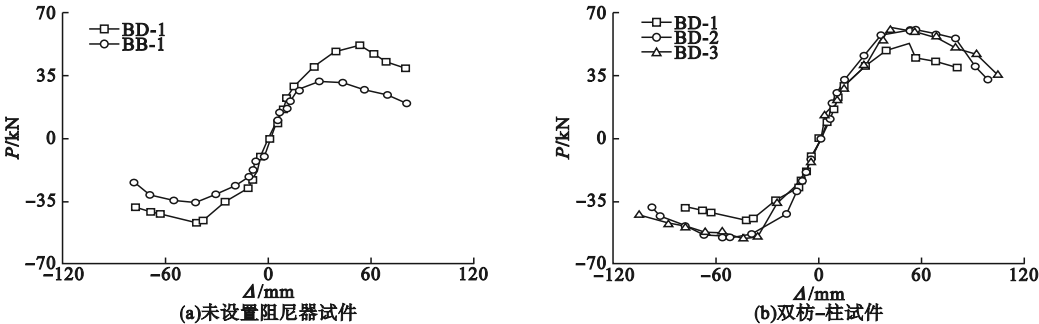


图 12 骨架曲线

Fig. 12 skeleton curves of $P-\Delta$

对比分析可知:

(1)双枋-柱节点具有明显优于单枋-柱节点的承载能力及变形性能,表明将具有较高承载力的双枋节点设置于传统风格建筑外围檐柱,可确保结构具有良好的抗震性能。

(2)试件 BD-2、BD-3 与试件 BD-1 相比,前者承载能力要显著高于后者,且前者骨架曲线超过峰值点后的下降段较后者更为平缓。表明设置黏滞阻尼器后,既能提高结构承载能力,又可有效改善结构的延性性能。

(3)双枋-柱节点各试件加载初期的骨架曲线基本重合,表明试件开裂前刚度受阻尼器影响较小。这是由于加载初期控制位移较小,黏滞阻尼器尚未发挥其功效;当控制位移增大,试件变形较大时,黏滞阻尼器发挥了良好的协同工作效应,由此体现了黏滞阻尼器与传统风格建筑相结合的新型结构形式,更适合在抗震设防烈度较高地区使用。

3.4 承载能力及延性分析

位移延性系数 μ 为荷载下降至峰值荷载85%时对应的破坏位移与结构屈服时位移的比值,即 $\mu = \Delta_m / \Delta_y$,屈服位移 Δ_y 由文献[17]中的方法确定。各试件特征点对应的荷载和位移见表4,位移延性系数计算结果见表5。各试件特征点对应的荷载与位移直方图如图13所示。

表4 试件特征点对应的荷载和位移及位移延性系数

Table 4 Load and displacement corresponding to characteristic point and displacement ductility factor								
试件 编号	开裂荷载 P_{cr}/kN	开裂位移 Δ_{cr}/mm	屈服荷载 P_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	峰值荷载 P_u/kN	峰值位移 Δ_u/mm	破坏荷载 P_m/kN	破坏位移 Δ_m/mm
BD-1	16.5	7.9	42.2	28.3	53.0	52.2	45.1	68.1
	17.4	7.8	33.5	24.2	46.7	43.1	39.7	70.7
BD-2	19.3	7.8	50.6	29.8	61.5	55.9	52.3	82.4
	18.5	7.8	45.9	25.2	54.5	56.7	46.3	80.4
BD-3	18.7	7.0	57.6	26.3	61.5	52.8	52.3	78.7
	18.2	7.9	55.0	26.8	56.2	52.3	47.8	84.8
BB-1	14.3	7.6	28.3	19.0	32.3	29.2	27.5	58.8
	14.8	7.9	27.5	22.4	35.5	44.7	30.1	70.9

表5 试件变形能力

Table 5 Ductility coefficients of specimen							
试件编号	Δ_y	Δ_m	θ_{cr}	θ_y	θ_m	μ	$\bar{\mu}$
BD-1	28.3	68.1P	1/340	1/94	1/39	2.41	2.66
	24.2	70.7	1/340	1/110	1/37	2.92	
BD-2	29.8	82.4	1/379	1/89	1/32	2.77	2.98
	25.2	80.4	1/335	1/105	1/31	3.19	
BD-3	26.3	78.7	1/344	1/101	1/35	2.88	3.02
	26.8	84.8	1/335	1/99	1/31	3.16	
BB-1	19.0	58.8	1/349	1/139	1/45	3.09	3.13
	22.4	70.9	1/340	1/118	1/37	3.17	

注: θ_{cr} 、 θ_y 、 θ_m 分别为试件开裂、屈服、破坏时的层间位移角; $\bar{\mu}$ 为试件平均延性系数。

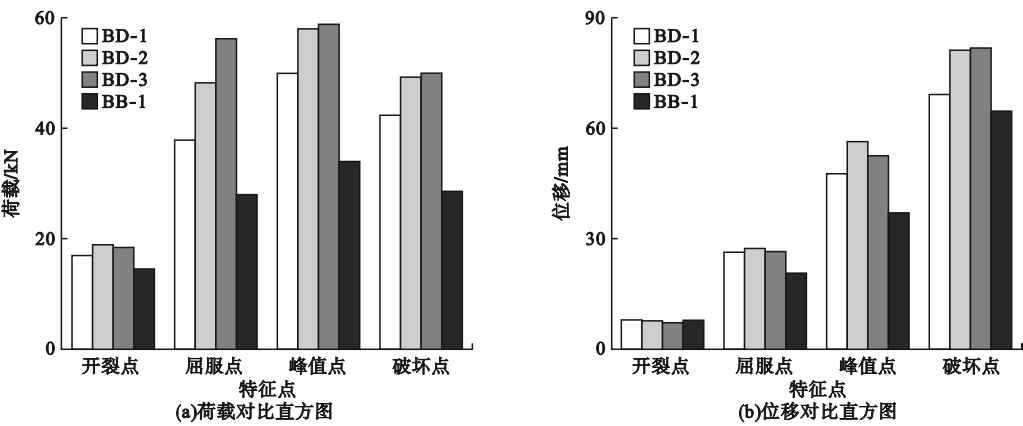


图 13 试件特征点直方图对比

Fig. 13 Comparison of histogram of feature points of specimens

由表 4、表 5 及图 13 对比分析可知：

(1)对于开裂荷载,相比于双枋 - 柱节点 BD-1,试件 BD-2、BD-3 提升幅度分别为 12.3%、6.9%;对于屈服荷载,提升幅度分别为 27.5%、48.7%;对于极限荷载,提升幅度分别为 16.4%、15.0%。由此表明,可通过设置黏滞阻尼器改善双枋节点的力学性能,且对于屈服荷载及极限荷载提升幅度更为显著,由此弥补了传统风格建筑不满足现行规范要求的缺点。

(2)相比于单枋 - 柱节点试件 BB-1,双枋 - 柱节点 BD-1 的开裂荷载、屈服荷载及极限荷载增幅分别为 18.5%、35.7%、47.1%,表明双枋 - 柱节点由于由额的存在,可较大幅度提升结构承载能力及刚度。实际工程中,为求美观,阑额与由额的截面宽度相等,而阑额截面高度大于由额,致使两者的刚度不同。通过在由额与柱的位置附设黏滞阻尼器,既可以从一定程度上提升由额的刚度,又可提升结构整体力学性能。

(3)对于双枋 - 柱节点,附设黏滞阻尼器试件 BD-2、BD-3 的延性性能较 BD-1 分别提高了 12.0%、13.5%,表明设置黏滞阻尼器可提升结构的延性性能。实际工程中,对于高烈度地区,在外围檐柱节点处设置黏滞阻尼器可有效提升传统风格建筑抗震性能。

(4)附设黏滞阻尼器的传统风格双枋 - 柱节点弹性阶段层间位移角平均值 $\theta_{er} = (1.54 \sim 1.62) \theta_e$, 塑性层间位移角 $\theta_m = (1.47 \sim 1.56) \theta_p$ 。表明通过设置黏滞阻尼器可有效改善传统风格建筑混凝土双枋 - 柱节点的抗倒塌能力,试件在荷载下降时仍具有一定的变形能力。

4 结 论

- (1)附设黏滞阻尼器可显著提升传统风格双枋 - 柱组合件的力学性能,采用钢 - 混凝土组合结构可有效降低上柱的轴压比,防止高轴压比下柱发生压溃破坏。
- (2)设置黏滞阻尼器的双枋 - 柱节点的恢复力特征曲线包围面积更大,耗能能力较强,布置外围檐柱的双枋 - 柱构造形式具有比单枋 - 柱较高的承载能力及抗倒塌能力。
- (3)快速循环荷载作用下,附设黏滞阻尼器后传统风格建筑双枋 - 柱节点试件的抗倒塌能力及承载性能有显著提升,延性性能提升 12.7%,承载能力提升 15.7%。
- (4)双枋 - 柱节点构造具有较大的刚度及整体性,实际工程中可将阻尼器布置在由额与柱连接处,外部以雀替装饰,从而提升双枋节点抗倒塌能力。

参考文献

- [1] 卞克俭,谭骞,叶永毅,等.山地建筑宜兴大觉寺藏经楼结构设计分析[J].建筑结构,2022,52(7):100-104.
(BIAN Kejian, TAN Qian, YE Yongyi, et al. Design and analysis of structure on slopes for buddhist scripture library of Dajue temple [J]. Building structure, 2022, 52(7): 100-104.)
- [2] 彭洁.地域文化特色的仿古建筑设计:云南茶文化大观园[J].建筑结构,2021,51(6):145-146.
(PENG Jie. Archaize architectural design with regional cultural characteristics: Yunnan tea culture grand view garden [J]. Building structure, 2021, 51(6): 145-146.)
- [3] 梁思成.为什么研究中国建筑[J].建筑学报,1986,33(9):3-7.
(LIANG Sicheng. Significance of research on Chinese architecture [J]. Architectural journal, 1986, 33(9): 3-7.)
- [4] 谢启芳,李朋,葛鸿鹏,等.传统风格钢筋混凝土梁-柱节点抗震性能试验研究[J].世界地震工程,2015,31(4):150-158.
(XIE Qifang, LI Peng, GE Hongpeng, et al. Experimental study on seismic behavior of RC column-beam joint built in traditional style [J]. World earthquake engineering, 2015, 31(4): 150-158.)
- [5] 王金平,郭贵春.中国传统建筑的经验理性分析[J].科学技术哲学研究,2013,30(2):94-99.
(WANG Jinping, GUO Guichun. Analysis of the empirical rationality of traditional Chinese architecture [J]. Studies in philosophy of science and technology, 2013, 30(2): 94-99.)
- [6] 赵侃.传统风格建筑兴起的文化因素[J].艺术评论,2009,7(3):72-75.
(ZHAO Kan. Cultural factors of the rise of archaize architecture [J]. Arts criticism, 2009, 7(3): 72-75.)
- [7] 丁亮进,董欢涛,李妍,等.天人长安塔钢结构综合施工技术[J].施工技术,2010,39(8):158-160.
(DING Liangjin, DONG Huantao, LI Yan, et al. Comprehensive construction technology of steel structures in tianren Chang'an pagoda [J]. Construction technology, 2010, 39(8): 158-160.)
- [8] 王昌兴,徐珂,田立强.洛阳隋唐城天堂遗址保护建筑设计[J].钢结构,2011,26(8):32-36.
(WANG Changxing, XU Ke, TIAN Liqiang. Structure design of Tiantang for the protection of the ruins of ancient buildings built in the Sui and Tang dynasty in Luoyang city [J]. Steel construction, 2011, 26(8): 32-36.)
- [9] 刘彦彬.中华麒麟阁主楼仿古建筑设计[J].建筑结构,2022,52(增刊1):247-250.
(LIU Yanbin. Structural design of the main building of China Kylin Pavilion [J]. Building structure, 2022, 52(S1): 247-250.)
- [10] XUE J Y, DONG J S, SUI Y, et al. Dynamic experimental study of viscous damper on Chinese traditional style structure with di-lintel-column joint of steel and composite structures [J]. Structural design of tall and special buildings, 2017, 26(10): 325-339.
- [11] XUE J Y, DONG J S, SUI Y, et al. Dynamic behaviors of viscous damper on concrete arcaized building with lintel-column joint [J]. Earthquake and structures, 2017, 13(4): 409-419.
- [12] 薛建阳,马林林,隋龔,等.动力荷载下传统风格建筑双梁-柱节点抗震性能试验研究[J].振动工程学报,2021,34(1):38-47.
(XUE Jianyang, MA Linlin, SUI Yan, et al. Experimental research on the seismic performance of di-lintel column joints in traditional style buildings under dynamic loading [J]. Journal of vibration engineering, 2021, 34(1): 38-47.)
- [13] 薛建阳,马林林,隋龔,等.动力荷载下传统风格建筑双梁-柱节点抗震性能试验研究[J].振动工程学报,2021,34(1):38-47.
(XUE Jianyang, MA Linlin, SUI Yan, et al. Experimental research on the seismic performance of di-lintel column joints in traditional style buildings under dynamic loading [J]. Journal of vibration engineering, 2021, 34(1): 38-47.)
- [14] 隋龔,薛建阳,吴占景,等.钢结构仿古建筑阻尼节点动力加载试验及有限元分析[J].建筑结构学报,2018,33(6):110-118.
(SUI Yan, XUE Jianyang, WU Zhanjing, et al. Dynamic loading test and numerical analysis of steel beam-column joint in traditional style buildings [J]. Journal of building structures, 2018, 33(6): 110-118.)
- [15] 赵鸿铁,张凤亮,薛建阳,等.古建筑木结构的结构性能研究综述[J].建筑结构学报,2012,33(8):1-10.
(ZHAO Hongtie, ZHANG Fengliang, XUE Jianyang, et al. Research review on structural performance of ancient timber structure [J]. Journal of building structures, 2012, 33(8): 1-10.)
- [16] 薛建阳,董金爽,隋龔,等.一种仿古建筑节点试验中阑额由额连接装置[P].中国专利:CN205719584U,2016-11-23.
(XUE Jianyang, DONG Jinshuang, SUI Yan. The connection device of lan'e and you'e for Chinese antique buildings [P]. Chinese patent: CN205719584U, 2016-11-23.)
- [17] ELNASHAI A S, BRODERICK B M, DOWLING P J. Earthquake-resistant composite steel/concrete structure [J]. The structural engineer, 1995, 73(8): 121-132.
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)