

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20241223002

文章编号:1672-9331(2025)01-0131-11

引用格式:刘海鹏,杜鲁一,董金爽,等.阻尼器对仿古建筑节点力学性能影响研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2025,22(1):131-141.

Citation:LIU Haipeng, DU Luyi, DONG Jinshuang, et al. Influence of damper on mechanical properties of pseudo-classic architecture joint[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2025, 22(1): 131-141.

阻尼器对仿古建筑节点力学性能影响研究

刘海鹏¹,杜鲁一¹,董金爽²,谢朋²,李想³

(1. 海南省农垦建工集团有限公司, 海南海口 570206; 2. 海南大学 土木建筑工程学院, 海南海口 570228;
3. 海南大学 海洋科学与工程学院, 海南海口 570228)

摘要:【目的】为研究黏滞阻尼器对仿古建筑力学性能的影响,通过设置仿古建筑梁-柱节点来开展试件的对比试验研究。【方法】设计制作了6个仿古建筑梁-柱节点,即3个双梁-柱节点及3个单梁-柱节点,并对其施加正弦波往复荷载以研究其一系列力学性能,主要包括荷载-转角滞回曲线、骨架曲线、承载能力、变形性能、耗能能力等。【结果】在整体上,黏滞阻尼器对双梁-柱节点力学性能的改善程度比单梁-柱节点的更为显著,且改善程度随黏滞阻尼器型号不同而不同。在附设黏滞阻尼器后,梁-柱节点试件的滞回曲线更饱满,承载能力提升了16.4%~32.9%,位移延性系数增大了1.5%~12.6%,耗能能力提升了49.2%~112.3%。【结论】黏滞阻尼器可显著改善仿古建筑梁-柱节点的力学性能。

关键词:仿古建筑;双梁-柱节点;单梁-柱节点;黏滞阻尼器;力学性能

中图分类号:TU398

文献标志码:A

Influence of damper on mechanical properties of pseudo-classic architecture joint

LIU Haipeng¹, DU Luyi¹, DONG Jinshuang², XIE Peng², LI Xiang³

(1. Hainan State Farms Jiangong Construction Group Co., Ltd., Haikou 570206, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China;
3. School of Marine Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: [Purposes] In order to study the influence of viscous dampers on the mechanical properties of pseudo-classic architecture, a comparative experiment for lintel-column joint specimens of pseudo-classic architecture was carried out. [Methods] Six lintel-column joints of pseudo-classic architecture were designed and produced, including three dual-lintel-column joints and three single-lintel-column joints, and their mechanical properties were studied by applying reciprocating sinusoidal wave loads, such as the load-angle hysteresis curve, skeleton curve, load carrying capacity, deformation capacity, and energy dissipation capacity. [Findings] Overall, the improvement degree of viscous dampers on the mechanical properties of dual-lintel-column joints is more significant than that of single-lintel-column joints, and the improvement degree varies with

收稿日期:2024-12-18;修回日期:2025-01-11;接受日期:2025-01-13

基金项目:海南省自然科学基金项目(520RC544);国家重点研发计划项目(2019YFD1101003);企业委托横向课题(JZ-ZH-A-202411-003)

通信作者:董金爽(1989—)(ORCID:0000-0002-6323-7529),男,讲师,主要从事钢-混凝土组合结构及传统风格建筑抗震性能方面的研究。E-mail:mlcxll@163.com

the type of viscous dampers. After the viscous damper is installed, the hysteresis curve of the lintel-column joint specimens is fuller; the load bearing capacity is increased by 16.4%–32.9%; the ductility coefficient is increased by 1.5%–12.6%, and the energy dissipation capacity is increased by 49.2%–112.3%. [Conclusions] The mechanical properties of lintel-column joints of pseudo-classic architecture can be markedly improved by the viscous damper.

Key words: pseudo-classic architecture; dual-lintel-column joint; single-lintel-column joint; viscous damper; mechanical property

Foundation items: Project (520RC544) supported by National Natural Science Foundation of Hainan; Project (2019YFD1101003) supported by National Key Research and Development Program of China; Project (JZ-ZH-A-202411-003) supported by Crosswise Tasks of Enterprise Entrusted

Corresponding author: DONG Jinshuang (1989—) (ORCID: 0000-0002-6323-7529), male, lecture, research interest: seismic behavior of steel-concrete composite structure and Chinese traditional style architecture.

E-mail: mlcxll@163.com

0 引言

仿古建筑(又称传统风格建筑)是指采用现代建筑材料及施工工艺仿建古建筑形制的一类建筑类型。作为极具中国传统建筑文化特点的建筑形式,仿古建筑在城市探索新发展路径及传承古建筑文化的过程中得到了极大的推广与应用。典型的仿古建筑有西安紫云楼、丹凤门、长安塔等,如图1所示。仿古建筑虽然仿制古建筑木结构,但两者受力特点显著不同^[1]。现有研究表明:仿古建筑的抗震性能低于古木结构及现代建筑结构的^[2-4],这极大地限制了仿古建筑在高烈度地区的推广使用。

针对仿古建筑,国内外学者开展的一系列研究多集中于建筑造型^[5]及施工工艺^[6],而对其力学性能的研究相对滞后。1999年,中国台湾省集集大地震中仿古建筑武昌宫的梁柱节点发生压溃破坏^[7]。2022年,四川省泸定县6.8级地震导致部分仿古建筑发生了不同程度的破坏^[8]。XUE等^[9]、薛建阳等^[10]、吴占景等^[11]、公衍茹等^[12]、董金爽等^[13-14]等学者深入研究了仿古建筑关键受力部位的力学性能,通过试验加载、理论分析及数值模拟等方法,得出其力学性能受结构形制影响较大的结论。文献^[15]通过振动台试验给出了单层歇山仿古建筑的抗震设计建议。

上述研究均表明,仿古建筑节点因其形制要求,其力学性能与常规建筑节点的存在较大差异,

须采取一定措施增强其力学性能。黏滞阻尼器作为一种与活塞运动速度相关的阻尼器,因其良好的减震及耗能效果,在高层建筑、桥梁、结构抗震改造等领域得到广泛应用^[16-17]。在外界作用下,工程常用黏滞阻尼器的活塞与缸筒间发生相对运动,通过活塞的往复运动带动内部介质流动,产生阻尼效果,从而达到减震耗能的效果,如图2所示。缪志伟等^[18]、张皓等^[19]展开了附设黏滞阻尼器的建筑结构抗震性能研究,取得的成果显示黏滞阻尼器可显著改善结构的力学性能。文献^[20-22]对设置阻尼器的传统风格建筑节点进行了试验研究,得出阻尼器可有效改善节点力学性能的结论。



(a) 西安紫云楼 (b) 西安丹凤门

图1 仿古建筑工程实例

Fig. 1 Project case of pseudo-classic architecture

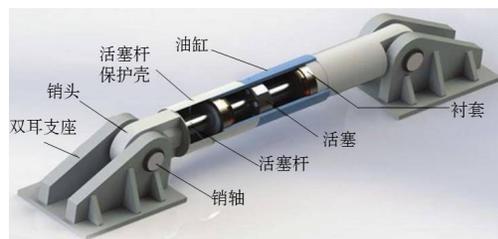


图2 工程用黏滞阻尼器示意图

Fig. 2 Viscous damper used in project

张文龙等^[23]开展了仿古建筑的隔震加固研究。因此,将黏滞阻尼器与仿古建筑相结合可有效提升其力学性能。

上述对于仿古建筑与黏滞阻尼器相结合的研究,多关注于阻尼器对仿古建筑力学性能的提升,而对于阻尼器对仿古建筑节点力学性能的影响规律研究较少。鉴于此,本文以中国佛学院普陀山学院为工程背景,依据清朝《工程做法则例》中对古木建筑形制的要求,设计制作仿古建筑典型梁-柱试件,将其与黏滞阻尼器相结合,重点研究不同型号黏滞阻尼器对仿古建筑梁-柱节点力学性能的影响规律,以为仿古建筑的抗震设计及设置黏滞阻尼器的仿古建筑节点优化设计提供有益参考。

1 试验概况

1.1 典型仿古建筑梁-柱节点

典型仿古建筑梁-柱节点包括双梁-柱节点及单梁-柱节点,如图 3 所示。仿古建筑多为仿制殿堂式一等材或二等材的大木作,其等级规格较高。与常规梁-柱节点相比,仿古建筑节点核心区域较大,受力复杂。

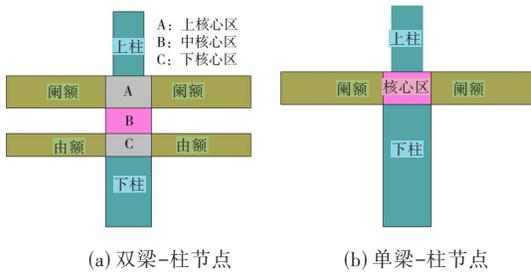
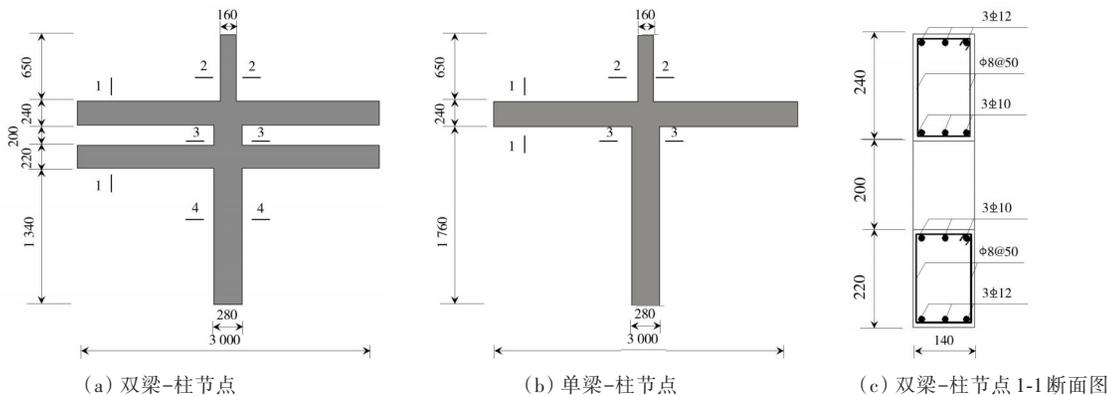


图 3 典型仿古建筑梁-柱节点构造形式

Fig. 3 Lintel-column joint structure of typical pseudo-classic architecture



1.2 试验设计

根据《工程做法则例》中古木结构材份等级要求及工程实例,设计制作了 6 个缩尺比 1.0:2.6 的仿古建筑梁-柱节点,包括 3 个双梁-柱节点及 3 个单梁-柱节点。双梁-柱节点中未设置阻尼器的对比试件编号为 DD-1,设置阻尼器的试件编号分别为 DD-2、DD-3;单梁-柱节点中未设置阻尼器的对比试件编号为 SS-1,设置阻尼器的试件编号分别为 SS-2、SS-3。

试验试件构造及配筋形式如图 4 所示。试件上柱采用方钢管-混凝土结构,方钢管伸入核心区和下柱的距离根据相应规范确定,试件的其他部分为普通钢筋混凝土结构;试件下柱采用圆形箍筋及方形箍筋,配置形式为 Φ8@50,轴压比 $n=0.25$ 。混凝土采用 C40 细石商砼,混凝土轴心抗压强度 f_{ck} 的实测标准值为 39.1 MPa。箍筋的型号为 HPB300,纵筋的型号为 HRB335。方钢管的型号为 Q235B,壁厚为 5.5 mm。所有钢材性能指标如表 1 所示。

表 1 钢材性能指标

Table 1 Performance indexes of steel

型号	f_y /MPa	$\epsilon_y/(10^{-6})$	f_u /MPa	$E_s/(10^5 \text{ MPa})$
Q235B	335.2	1 670.0	462.4	2.01
Φ8	322.4	1 580.2	401.2	2.04
Φ10	464.4	2 330.5	597.7	2.04
Φ12	451.3	2 278.2	587.6	1.98

注: f_y 为屈服强度; ϵ_y 为屈服应变; f_u 为极限强度; E_s 为弹性模量。

1.3 黏滞阻尼器选型及安装

综合考虑试验效果及加载方案,选用速度型黏滞阻尼器,其设计参数如表 2 所示。阻尼器与试件连接示意图如图 5 所示,阻尼器安装尺寸如图 6 所示。其中,试件 DD-2、SS-2 安装 NZ-1 型号阻尼器,DD-3、SS-3 安装 NZ-2 型号阻尼器。

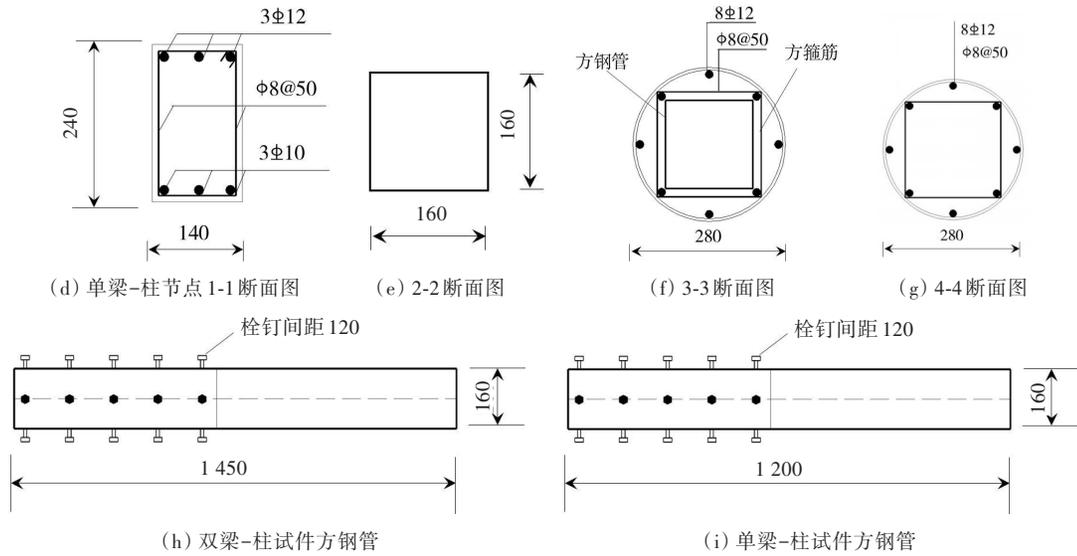


图4 试件构造及截面配筋(单位:mm)

Fig. 4 Specimen structure and section reinforcement (unit: mm)

表2 黏滞阻尼器设计参数

Table 2 Design parameters of viscous damper

阻尼器型号	G/kN	$C/(kN \cdot s \cdot m^{-1})$	λ	s/mm
NZ-1	80	88	0.36	± 30
NZ-2	50	60	0.30	± 30

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

载装置如图7所示。

整个加载过程包括预加载及正式加载。预加载阶段主要测试加载设备是否能正常工作。在正式加载阶段,首先在柱顶施加轴向荷载至预设值,并在正式加载过程中保持不变,然后由加载设备于柱端施加水平作用。

综合考虑阻尼器的动力性能及试验加载的可靠性,每工况设为循环5次,其加载制度如图8及表3所示。当轴向荷载不能继续保持定值或荷载下降至极限荷载的85%时,视为试验结束。

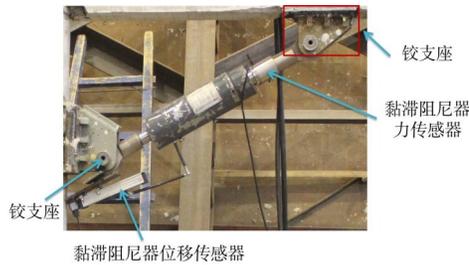


图5 黏滞阻尼器安装示意图

Fig. 5 Installation of viscous damper

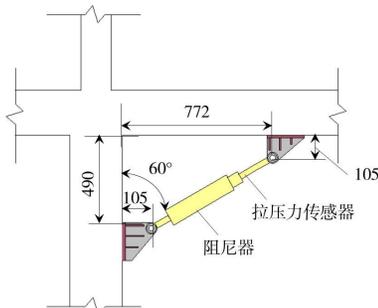
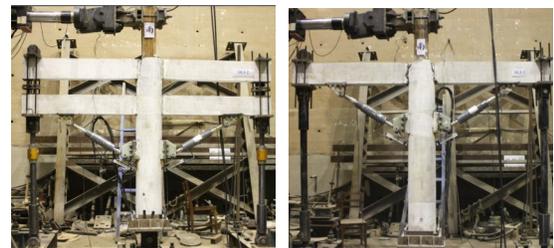


图6 黏滞阻尼器安装尺寸(单位:mm)

Fig. 6 Installation dimension of viscous damper (unit: mm)

1.4 加载制度

鉴于选用的速度型黏滞阻尼器,本研究采用了由位移与频率控制的正弦波荷载加载方式。加



(a) 双梁-柱节点 (b) 单梁-柱节点

图7 试验加载装置示意图

Fig. 7 Test loading device

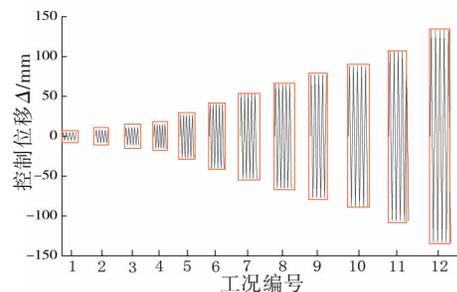


图8 加载工况示意图

Fig. 8 Loading modes

表 3 试验用加载制度

Table 3 Loading system of test

工况	$a/(cm \cdot s^2)$	δ/mm	f/Hz	工况	$a/(cm \cdot s^2)$	δ/mm	f/Hz
1	50	5	1.59	7	500	53	1.55
2	100	8	1.78	8	570	65	1.50
3	150	11	1.86	9	585	77	1.39
4	250	15	2.05	10	600	88	1.31
5	350	27	1.81	11	700	100	1.29
6	460	40	1.71	12	800	115	1.23

注: a 为加速度; δ 为控制位移; f 为频率。

2 主要试验结果

2.1 试件破坏形态及破坏机制

分析各试件破坏全过程可知,试件加载全过程分为未裂阶段、开裂后弹性阶段及破坏阶段。

1) 对比试件。

在未裂阶段,滞回曲线无显著残余变形;开裂后,梁柱连接处裂缝逐渐扩展,并向核心区延伸,残余变形显著;在破坏阶段,梁柱连接处混凝土被压碎,部分纵筋外露,试件因梁柱连接处破坏而变成可变体系,此时加载过程结束。试件破坏类型为弯剪型破坏。

2) 设置阻尼器的试件。

开裂前,滞回曲线无显著残余变形,阻尼器基本对试件无影响;试件开裂后,梁柱连接处裂缝逐渐延伸,卸载后残余变形显著,阻尼器可与试件协

同工作;在破坏阶段,梁柱连接处形成贯通裂缝,混凝土被压碎,钢筋外露,阻尼器既可提供一定的刚度,又可与试件协同受力,此时设置阻尼器的试件在破坏时仍为几何不变体系,试件破坏类型均为弯剪型破坏。

2.2 荷载-转角滞回曲线

本研究将各工况的第一圈荷载-转角曲线($F-\theta$)绘制于同一张图上,得到各试件荷载-转角滞回曲线,如图 9 所示。从图 9 可以看出,未设置阻尼器试件在加载工况 10 时发生破坏,设置阻尼器试件在加载工况 12 时发生破坏。为便于分析,将同工况下设置阻尼器试件与对比试件的荷载-转角滞回曲线合并绘制,如图 10~11 所示(仅以工况 8~10 为例),其中纵坐标表示整个加载过程中的荷载变化。由图 9~11 分析可知:

1) 设置黏滞阻尼器的试件均能加载至工况 12;而对比试件在加载至工况 10 时,因发生破坏而停止加载。这表明黏滞阻尼器可显著提升仿古建筑节点的承载能力。

2) 在设置黏滞阻尼器后,在相同控制位移下,仿古建筑梁-柱节点滞回环包围的面积显著增大,且极限荷载明显提升。这表明黏滞阻尼器可显著改善仿古建筑节点的耗能能力和增强抵御外界作用的性能。

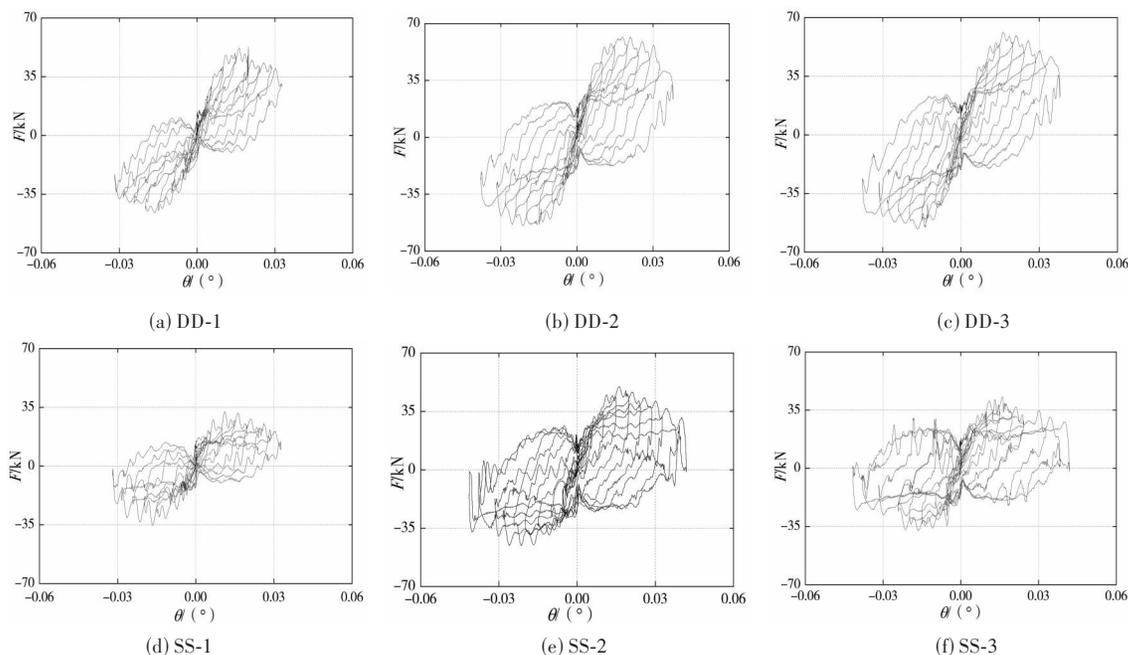


图 9 荷载-转角滞回曲线

Fig. 9 Load-angle hysteresis curve

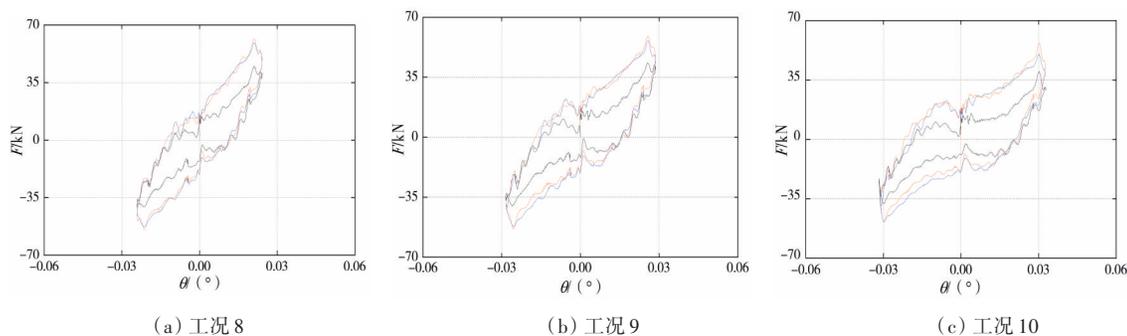


图10 双梁-柱节点的荷载-转角曲线

Fig. 10 Load-angle curve of dual-lintel-column joint

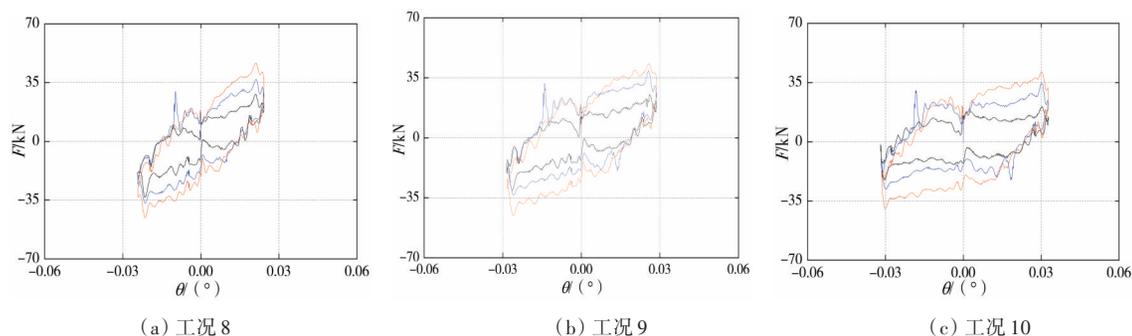


图11 单梁-柱节点的荷载-转角曲线

Fig. 11 Load-angle curve of single-lintel-column joint

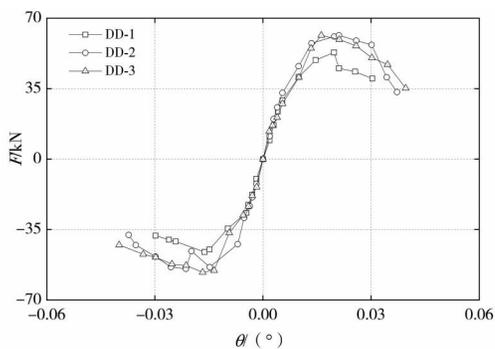
3) 设置阻尼器的试件加载至最后3个工况时,其滞回环的荷载基本保持不变,而位移显著增大,这类“塑性铰”。此时,试件能承受基本不变的荷载,且具有良好的变形性能。这表明设置黏滞阻尼器可显著改善仿古建筑节点的变形性能。

2.3 荷载-转角骨架曲线

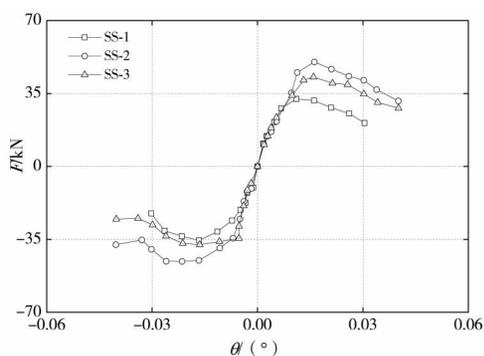
各试件荷载-转角滞回曲线外包线形成的骨架曲线如图12所示。由图12分析可知:

1) 设置黏滞阻尼器的仿古建筑节点试件的承载力明显高于对比试件的,且骨架曲线的下降段较为平缓。这表明设置黏滞阻尼器可显著提升试件的承载力及变形性能。

2) 在加载初期小变形阶段,设置阻尼器试



(a) 双梁-柱节点



(b) 单梁-柱节点

图12 荷载-转角骨架曲线

Fig. 12 Load-angle skeleton curve

件与对比试件的骨架曲线基本重合,且设置阻尼器试件与对比试件的刚度差异性较小;随着控制位移逐渐增大,设置阻尼器试件的骨架曲线逐渐高于对比试件的。这表明黏滞阻尼器对仿古建筑在发生小变形时的力学性能影响程度较低,而对发生大变形时的力学性能提升程度较显著。这为高烈度地区仿古建筑节点的黏滞阻尼器设置奠定了理论基础。

2.4 承载能力及变形性能

变形性能是反映建筑结构耗能能力的重要指标,常用式(1)中的位移延性系数 μ 来表征。

$$\mu = \Delta_m / \Delta_y \quad (1)$$

式中: Δ_m 为破坏位移; Δ_y 为屈服位移。

业内通常采用 Park 法^[24]来确定屈服位移 Δ_y ,如图 13 所示。Park 法的具体过程如下:①在纵坐标上取 $0.6F_m$,过此点作横坐标的平行线,并交曲线于点 A;②点 O、A 的连接延长线交过极限点 C 的水平线于点 B;③过点 B 作横坐标的垂线,并交曲线于点 D;④点 D 对应的荷载 F_y 和位移 Δ_y 分别为屈服荷载和屈服位移。

加载推动方向、加载拉升方向分别被定义为正向、负向。各试件特征点荷载、位移及位移延性

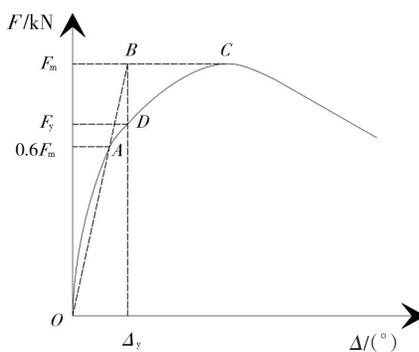


图 13 Park 法示意图

Fig. 13 Park method

系数如表 4 所示。由表 4 分析可知:

表 4 试件特征点荷载、位移及位移延性系数

Table 4 Characteristic point load, displacement, and ductility coefficient of specimens

试件编号	加载方向	开裂点		屈服点		极限点		破坏点		位移延性系数 μ
		开裂荷载 F_{cr}/kN	开裂位移 Δ_{cr}/mm	屈服荷载 F_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	极限荷载 F_u/kN	极限位移 Δ_u/mm	破坏荷载 F_m/kN	破坏位移 Δ_m/mm	
DD-1	正向	16.9	7.9	42.2	23.8	53.0	52.2	45.1	64.9	2.73
	负向	17.6	7.8	33.5	24.2	46.7	43.1	39.7	65.7	2.71
DD-2	正向	19.9	7.8	50.6	29.8	61.5	55.9	52.3	82.4	2.77
	负向	18.9	7.8	45.9	25.2	54.5	56.7	46.3	84.4	3.35
DD-3	正向	18.7	7.0	57.6	26.3	61.5	52.8	52.3	75.7	2.88
	负向	18.2	7.9	55.0	26.8	56.2	52.3	47.8	84.8	3.16
SS-1	正向	14.3	7.6	28.3	19.0	32.3	29.2	27.5	58.8	3.09
	负向	14.8	7.9	27.5	22.4	35.5	44.7	30.1	70.9	3.17
SS-2	正向	15.2	7.7	47.2	25.5	48.1	42.9	42.6	73.1	2.87
	负向	16.3	7.9	36.8	23.4	41.5	69.7	38.7	81.7	3.49
SS-3	正向	16.2	7.6	35.8	28.2	42.9	42.3	36.5	81.2	2.88
	负向	16.4	7.8	35.1	19.5	38.5	43.7	31.9	71.9	3.69

1) 设置黏滞阻尼器后,双梁-柱试件 DD-1、DD-2 节点的承载能力(即极限荷载)分别为 53.0、61.5 kN(正向)和 46.7、54.5 kN(负向)。由计算可知双梁-柱试件 DD-2 节点的正向、负向承载能力比 DD-1 的分别提升 16.0%、16.7%,故双梁-柱试件 DD-2 节点的承载能力比 DD-1 的提升 16.4%。同理可知,双梁-柱试件 DD-3 节点的承载能力比 DD-1 的提升 18.2%,单梁-柱试件 SS-2、SS-3 节点的承载能力分别比 SS-1 的提升 32.9%、20.6%。这表明设置黏滞阻尼器可显著提升仿古建筑节点承载力和改善结构抵抗外界作用的能力。

2) 设置黏滞阻尼器后,双梁-柱试件 DD-2、DD-3 节点的开裂荷载分别比 DD-1 的提升 12.6%、7.0%,单梁-柱试件 SS-2、SS-3 节点的开裂荷载分别比 SS-1 的提升 8.2%、12.0%。显然,在设置黏滞

阻尼器后,仿古建筑的开裂荷载提升幅度显著低于承载能力的提升幅度。这表明附设黏滞阻尼器对改善试件抗裂性能影响不显著。其原因在于:黏滞阻尼器在发生小变形时尚未发挥其效应,而在发生大变形时可有效改善结构的力学性能。

3) 对双梁-柱节点,各试件按照极限荷载由大到小排列为 DD-3、DD-2、DD-1,按照位移延性系数由大到小排列为 DD-2、DD-3、DD-1;对于单梁-柱节点,各试件按极限荷载由大到小排列为 SS-2、SS-3、SS-1,按照位移延性系数由大到小排列为 SS-2、SS-3、SS-1。这表明黏滞阻尼器对仿古建筑双梁-柱节点和单梁-柱节点的力学性能指标的提升规律不一致。故在实际工程中,应综合考虑黏滞阻尼器对结构力学性能的影响。

4) 设置黏滞阻尼器后,双梁-柱试件 DD-2、

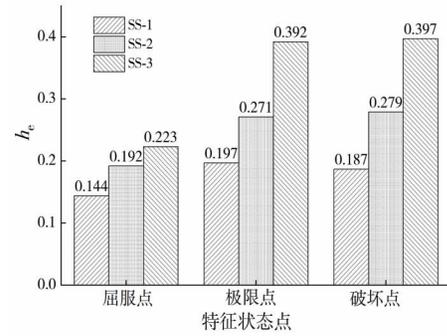
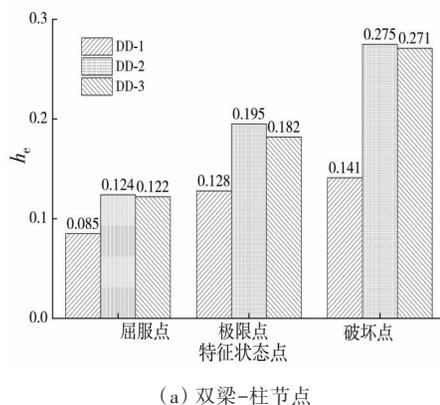
DD-3节点的位移延性系数分别比DD-1的提升12.6%、11.0%,单梁-柱试件SS-2、SS-3节点的位移延性系数分别比SS-1的提升1.5%、4.8%。这表明:设置黏滞阻尼器可在一定程度上提升仿古建筑节点的变形性能;同时,双梁-柱节点的位移延性系数提升幅度比单梁-柱节点的大。这是由于:①双梁-柱节点同时存在阡额及由额;②阡额与由额在受力发生变形时的变形不协调,导致双梁-柱节点变形性能低于单梁-柱节点的;③设置黏滞阻尼器可显著提升双梁-柱节点由额的变形性能,从而整体提升双梁-柱节点的位移延性性能。

2.5 耗能能力

耗能能力是表征结构(构件)抗震性能的重要指标之一。耗能能力包含一系列指标,如等效黏滞阻尼系数 h_e 、功比系数 I_w 、能量耗散系数 E_d 等^[25],其中 h_e 、 I_w 为常用评价指标。试验各试件耗能能力如图14~15所示。由图14~15可知:

1) 设置黏滞阻尼器后,仿古建筑梁-柱节点的耗能能力均得到显著改善,结构可实现“中震不坏,大震可修”的抗震设防目标。当试件达到屈服状态时,试件DD-2、DD-3节点的 h_e 分别比DD-1的提升45.9%、43.5%,试件SS-2、SS-3节点的 h_e 比SS-1的分别提升33.3%、54.9%;当试件达到破坏状态时,试件DD-2、DD-3节点的 h_e 分别比DD-1的提升95.0%、92.2%,试件SS-2、SS-3节点的 h_e 分别比SS-1的提升49.2%、112.3%。双梁-柱节点DD-2、DD-3的功比系数 I_w 比DD-1的分别提升20.2%、23.6%;单梁-柱节点SS-2、SS-3的 I_w 比SS-1的分别提升6.3%、28.3%。

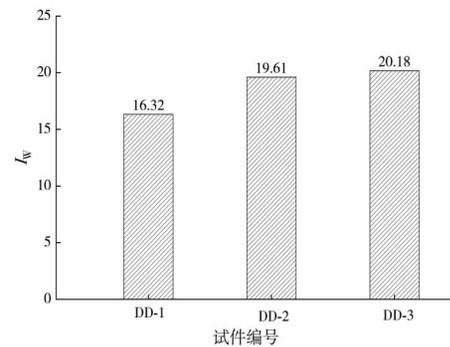
2) 与单梁-柱相比,设置黏滞阻尼器后的双梁-柱节点耗能能力提升幅度较高,这是由于设置黏滞阻尼器后的阡额及由额变形协同能力得到提



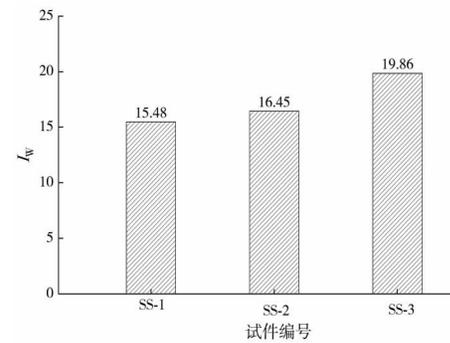
(b) 单梁-柱节点

图14 试件等效黏滞阻尼系数

Fig. 14 Equivalent viscous damping coefficient of specimens



(a) 双梁-柱节点



(b) 单梁-柱节点

图15 各试件功比系数

Fig. 15 Energy ratio of specimens

升,从整体上改善了双梁-柱节点因变形产生的不协调,避免了节点区域破坏程度加重,有利于阡额和由额在节点承载力超过极限点后能够协同有效地抵抗外界作用。

3 主要结论

本文通过试验研究及理论分析,研究了设置不同型号黏滞阻尼器对仿古建筑典型双梁-柱节点及单梁-柱节点力学性能的影响规律。主要研

究结论如下:

1) 设置黏滞阻尼器后,仿古建筑梁-柱节点的力学性能,包括承载能力、变形性能及耗能能力等,得到了显著提升。因此在高烈度地区,可在仿古建筑梁-柱节点处设置黏滞阻尼器,以提升其抗震性能。

2) 黏滞阻尼器对仿古建筑双梁-柱节点力学性能的改善比对单梁-柱节点的更为显著。在实际工程中,殿堂式仿古建筑的外围檐柱常用双梁-柱形式。因此,可在节点处设置黏滞阻尼器以改善节点力学性能,从而增强结构的整体性能。

3) 设置黏滞阻尼器后,仿古建筑双梁-柱节点、单梁-柱节点的承载能力分别提升16.4%~18.2%、20.6%~32.9%,双梁-柱节点、单梁-柱节点的位移延性系数分别提升11.0%~12.6%、1.5%~4.8%。不同的黏滞阻尼器型号对仿古建筑节点力学性能的提升规律不同,在实际工程中应根据节点的形式选择适合的阻尼器参数。

4) 整体上,阻尼器对仿古建筑结构在弹塑性及塑性阶段的提升较为显著,而在小变形时的提升较小。因此,在选用阻尼器时,应综合考虑阻尼器对结构本身整体力学性能的影响。

[参考文献]

[1] 王建省,康怡扬,白雪悦.殿堂木结构与仿古结构对比研究[J].建筑结构,2016,46(增刊1):253-257. DOI: 10.19701/j.jzjg.2016.s1.055.
WANG Jianxing, KANG Yiyang, BAI Xueyue. Comparison study on wood structure and archaize structure [J]. Building Structure, 2016, 46 (Sup. 1): 253-257. DOI: 10.19701/j.jzjg.2016.s1.055.

[2] 谢启芳,李朋,王龙,等.传统风格钢筋混凝土梁-柱节点抗剪机理分析与抗剪承载力计算[J].建筑结构,2014,44(19):81-86,33. DOI: 10.19701/j.jzjg.2014.19.016.
XIE Qifang, LI Peng, WANG Long, et al. Shear mechanism analysis and shear capacity calculation of the RC column-beam joint built in traditional style [J]. Building Structure, 2014, 44 (19): 81-86, 33. DOI: 10.19701/j.jzjg.2014.19.016.

[3] 董金爽,公衍茹,姜宝石,等.传统风格建筑钢-混凝土双枋-柱节点力学性能分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(4):679-688. DOI: 10.11717/j.issn:2095-1922.2023.04.12.
DONG Jinshuang, GONG Yanru, JIANG Baoshi, et al. Mechanical properties analysis on Chinese traditional

style architecture for di-lintel-column joint [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2023, 39 (4): 679-688. DOI: 10.11717/j.issn:2095-1922.2023.04.12.

- [4] 薛建阳,马林林,隋葵,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. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.01.005.
XUE Jianyang, MA Linlin, SUI Yan, et al. Experimental research on the seismic performance of dual-lintel column joints in traditional style buildings under dynamic loading [J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34 (1): 38-47. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.01.005.
- [5] 葛荣,葛文宏,寿晓鸣.仿古街区设计中的文脉传承:以盐城盐镇水街为例[J].中国园林,2022,38(增刊1):108-112. DOI: 10.19775/j.cla.2022.S1.0108.
GE Rong, GE Wenhong, SHOU Xiaoming. Cultural heritage in the design of Antique blocks: taking the water street in Yanzhen, Yancheng as an example [J]. Chinese Landscape Architecture, 2022, 38 (Sup. 1): 108-112. DOI: 10.19775/j.cla.2022.S1.0108.
- [6] 张锦秋,徐嵘.高塔览胜赋大运,滨河筑馆谱新章:扬州中国大运河博物馆设计[J].建筑学报,2022(3):74-77. DOI: 10.19819/j.cnki.ISSN0529-1399.202203012.
ZHANG Jinqiu, XU Rong. A soaring tower overlooking the grand canal and the new riverside edifice: designing the Yangzhou grand canal museum of China [J]. Architectural Journal, 2022(3): 74-77. DOI: 10.19819/j.cnki.ISSN0529-1399.202203012.
- [7] 郝敏,谢礼立,王家全.921台湾集集地震灾害最严重地区的烈度评定[J].世界地震工程,2006,22(4):22-26. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6069.2006.04.005.
HAO Min, XIE Lili, WANG Jiaquan. Preliminary assessment of seismic intensity for main regions of heavy disaster in Chi-Chi Earthquake [J]. World Earthquake Engineering, 2006, 22 (4): 22-26. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6069.2006.04.005.
- [8] 陈云,董金爽,张奉超.泸定县6.8级地震村镇建筑震害调查与分析[J].振动与冲击,2024,43(6):121-131,140. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2024.06.013.
CHEN Yun, DONG Jinshuang, ZHANG Fengchao. Seismic damage investigation and analysis on rural buildings in the M_s 6.8 Luding Earthquake [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43 (6): 121-131, 140. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2024.06.013.
- [9] XUE J Y, DONG J S, SUI Y, et al. Dynamic experimental study of viscous damper on Chinese

- traditional style structure with dual-lintel-column joint of steel and composite structures [J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2017, 26(10): e1366. DOI: 10.1002/tal.1366.
- [10] 薛建阳, 翟磊, 马林林, 等. 钢结构仿古建筑带斗拱檐柱抗震性能试验研究及有限元分析[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(7): 57-67. DOI: 10.15951/j.tmgcx.2016.07.005.
- XUE Jianyang, ZHAI Lei, MA Linlin, et al. Experimental study and numerical analysis on seismic behavior of steel eave columns with Dougong in imitated ancient building [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(7): 57-67. DOI: 10.15951/j.tmgcx.2016.07.005.
- [11] 吴占景, 薛建阳, 隋葵. 附设黏滞阻尼器的传统风格建筑钢结构双梁-柱节点动力试验研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(4): 199-206, 214. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.04.026.
- WU Zhanjing, XUE Jianyang, SUI Yan. A dynamic loading test for steel double-beam column joints in traditional style buildings with viscous damper [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(4): 199-206, 214. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.04.026.
- [12] 公衍茹, 董金爽, 隋葵, 等. 仿古建筑钢-混凝土组合结构枋-柱节点力学性能研究[J]. *地震工程学报*, 2023, 45(6): 1377-1385. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20211219001.
- GONG Yanru, DONG Jinshuang, SUI Yan, et al. Mechanical behavior of lintel-column joints in antique buildings with a steel-concrete composite structure [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2023, 45(6): 1377-1385. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20211219001.
- [13] 董金爽, 公衍茹, 隋葵, 等. 传统风格建筑双枋-柱节点快速循环加载试验[J]. *沈阳工业大学学报*, 2024, 46(4): 471-480. DOI: 10.7688/j.issn.1000-1646.2024.04.17.
- DONG Jinshuang, GONG Yanru, SUI Yan, et al. Experiments on dual-lintel-column joint of traditional style architecture under fast cyclic loading [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2024, 46(4): 471-480. DOI: 10.7688/j.issn.1000-1646.2024.04.17.
- [14] 董金爽, 公衍茹, 隋葵, 等. 快速谐波荷载作用下仿古建筑双枋-柱组合件力学性能研究[J]. *振动工程学报*, 2023, 36(4): 1073-1082. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.04.021.
- DONG Jinshuang, GONG Yanru, SUI Yan, et al. Mechanical properties on antique buildings dual-lintel-column subassemblages under fast harmonic load [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2023, 36(4): 1073-1082. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.04.021.
- [15] 周乾, 闫维明, 纪金豹, 等. 单檐歇山式古建筑抗震性能振动台试验[J]. *文物保护与考古科学*, 2018, 30(2): 37-53. DOI: 10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.2018.02.006.
- ZHOU Qian, YAN Weiming, JI Jinbao, et al. Shaking table tests of an ancient Chinese building with a single layer gable and a hip roof [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2018, 30(2): 37-53. DOI: 10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.2018.02.006.
- [16] 兰香, 张兴仙, 邵一凡, 等. 黏滞阻尼器参数对框架结构减震效率的影响研究[J]. *自然灾害学报*, 2024, 33(5): 176-187. DOI: 10.13577/j.jnd.2024.0517.
- LAN Xiang, ZHANG Xingxian, SHAO Yifan, et al. Study on the influence of viscous damper parameters on the damping efficiency of frame structure [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2024, 33(5): 176-187. DOI: 10.13577/j.jnd.2024.0517.
- [17] 马祖桥, 马长飞, 苏锐涵, 等. 基于地震易损性的斜拉桥斜置式黏滞阻尼器参数优化[J]. *桥梁建设*, 2023, 53(1): 48-54. DOI: 10.20051/j.issn.1003-4722.2023.01.007.
- MA Zuqiao, MA Changfei, SU Ruihan, et al. Parametric optimization of inclined viscous dampers for cable-stayed bridge based on seismic vulnerability [J]. *Bridge Construction*, 2023, 53(1): 48-54. DOI: 10.20051/j.issn.1003-4722.2023.01.007.
- [18] 缪志伟, 杨祎环, 丛戎. 基于黏滞阻尼器的RC框架抗震性能提升设计[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2023, 53(2): 210-217. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2023.02.004.
- MIAO Zhiwei, YANG Yihuan, CONG Rong. Seismic performance improvement design for RC frame structures based on viscous dampers [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2023, 53(2): 210-217. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2023.02.004.
- [19] 张皓, 阮鹏飞, 李宏男, 等. 附设黏滞阻尼器的RC框架结构抗震韧性评估[J]. *振动与冲击*, 2024, 43(14): 172-179, 210. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2024.14.020.
- ZHANG Hao, RUAN Pengfei, LI Hongnan, et al. Evaluation of the seismic resilience of RC frame structures with viscous dampers [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(14): 172-179, 210. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2024.14.020.
- [20] 薛建阳, 董金爽, 隋葵, 等. 附设黏滞阻尼器的传统风格建筑混凝土梁-柱节点动力循环加载性能分析[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(12): 18-27. DOI: 10.15951/j.tmgcx.2017.12.003.
- XUE Jianyang, DONG Jinshuang, SUI Yan, et al.

- Performance analysis of beam-column joint in traditional-style buildings with viscous damper under dynamic cyclic loading [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50 (12) : 18-27. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2017.12.003.
- [21] 薛建阳,董金爽,隋葵,等. 附设黏滞阻尼器的仿古建筑混凝土枋-柱节点动力性能试验研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(17) : 211-219. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.17.032.
- XUE Jianyang, DONG Jinshuang, SUI Yan, et al. Tests for dynamic performance of a concrete lintel-column joint with a viscous damper in archaized buildings[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36 (17): 211-219. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.17.032.
- [22] 董金爽,公衍茹,黄斌,等. 快速荷载交替作用下传统风格建筑双枋-柱节点试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2024, 56(6): 161-173. DOI:10.12454/j.jsuese.202300155.
- DONG Jinshuang, GONG Yanru, HUANG Bin, et al. Experimental research on Chinese traditional style architecture dual-lintel-column joint under alternating rapid loads [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56 (6) : 161-173. DOI: 10.12454/j.jsuese.202300155.
- [23] 张文龙,任文杰,付素娟,等. 仿古建筑隔震加固研究[J]. *地震工程学报*, 2021, 43(6) : 1444-1451. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1444.
- ZHANG Wenlong, REN Wenjie, FU Sujuan, et al. Seismic isolation and reinforcement technique of imitated ancient buildings [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2021, 43 (6) : 1444-1451. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1444.
- [24] PARK R. Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing [J]. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 1989, 22 (3) : 155-166. DOI: 10.5459/bnzsee.22.3.155-166.
- [25] ELNASHAI A S, BRODERICK B M, DOWLING P J. Earthquake-resistant composite steel/concrete structures [J]. *The Structural Engineer*, 2023, 73(8) : 121-132.

(责任编辑:彭三军;校对:刘平)