

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.095



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 木结构榫卯节点抗震性能及加固对比试验研究

金昱成<sup>a,b</sup>, 苏何先<sup>a,b</sup>, 潘文<sup>a,b</sup>, 何颖成<sup>a</sup>, 杜杰伟<sup>c</sup>, 付高攀<sup>a,b</sup>

(昆明理工大学 a. 建筑工程学院; b. 云南省抗震工程技术研究中心; c. 公共安全与应急管理学院, 昆明 650500)

**摘要:**为研究不同加固措施对木结构榫卯节点抗震性能的影响,参照西南地区传统木结构典型榫卯节点做法,制作透榫、半榫和燕尾榫3类共5组榫卯节点试件开展节点拟静力试验,其中4组分别采用扒钉、钢板和木条(两组)加固。对比研究加固与非加固节点试件的破坏形态、滞回曲线、骨架曲线、节点拔榫量和耗能能力等抗震性能参数。结果表明:未加固榫卯节点的主要破坏形态是榫头卯口挤压开裂、榫头拔出,加固节点主要以扒钉断裂、钢板弯扭屈服和木条断裂形态而破坏;所有加固措施均能有效提升节点承载力和降低节点拔榫量,加固节点拔榫量降低比例均超过5%;与扒钉、钢板加固相比,采用木条加固对节点承载力提升效果最为显著,加固后,半榫和燕尾榫节点负向承载力提高超过10倍。同时,木条加固半榫节点的耗能能力提升超过2.6倍,扒钉、钢板加固节点也能明显提升其耗能能力。

**关键词:**木结构;榫卯节点;节点加固;拟静力试验;抗震性能

**中图分类号:**TU443 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)02-0138-10

## Experimental research on seismic performance and reinforcement comparison of mortise-tenon joints in timber structures

JIN Yucheng<sup>a,b</sup>, SU Hexian<sup>a,b</sup>, PAN Wen<sup>a,b</sup>, HE Yingcheng<sup>a</sup>, DU Jiewei<sup>c</sup>, FU Gaopan<sup>a,b</sup>

(a. Faculty of Civil Engineering and Mechanics; b. Earthquake Engineering Researching Center of Yunnan; c. Faculty of Public Security and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, P. R. China)

**Abstract:** In order to investigate the impact of different reinforcement measures on the seismic performance of the mortise-tenon joints in timber structures, five groups of mortise-tenon joint specimens of three types: Tou mortise-tenon joints, Ban mortise-tenon joints, and dovetail mortise-tenon joints were made to carry out the quasi-static tests referring to the typical mortise-tenon joint of traditional timber structure in the southwest region of China. The four groups were reinforced with iron hook, steel plate, and wood strip (two groups). The seismic performance parameters of reinforced and non-reinforced joint specimens, such as failure forms, hysteretic and skeleton curves, amount of tenon pullout, and energy dissipation, were comparatively studied. The test results show that the main failure modes of the unreinforced mortise-tenon

**收稿日期:**2021-02-08

**基金项目:**国家重点研发计划(2020YFD1100703-04);云南省教育厅科学研究基金(2021J0062)

**作者简介:**金昱成(1997-),男,主要从事木结构研究, E-mail: mori10969taka@163.com。

苏何先(通信作者),男,博士,高级实验师, E-mail: sxhh870@kust.edu.cn。

**Received:**2021-02-08

**Foundation items:** National Key Research and Development Project of China (No. 2020YFD1100703-04); Scientific Research Foundation of Yunnan Provincial Education Department (No. 2021J0062)

**Author brief:** JIN Yucheng (1997-), main research interest: timber structure, E-mail: mori10969taka@163.com.  
SU Hexian (corresponding author), PhD, senior experimentalist, E-mail: sxh870@kust.edu.cn.

joints are cracking in squeeze of the mortise-tenon and pullout of the tenon. The reinforced joints are mainly damaged by iron hook breakage, steel plate bending-torsion yielding, and wood strip breaking. All the reinforcement measures can effectively improve the bearing capacity of the joint and reduce the pullout of tenon. The reduction ratio of the pullout amount of the reinforced joint is more than 5%. By comparison, the bearing capacity of the joints reinforced with wood strip is improved significantly. The negative bearing capacity of the Ban mortise-tenon joints and dovetail joints is increased by more than 10 times after reinforcement. At the same time, the energy dissipation of the Ban mortise-tenon joint reinforced with wood strips is increased by more than 260%, and the energy dissipation of the reinforced joint with iron hook and steel plate can also be significantly improved.

**Keywords:** timber structure; mortise-tenon joints; joint reinforcement; quasi-static test; seismic performance

木结构榫卯节点具有半刚性特点,能在地震作用时产生较大滑动位移而减轻结构的地震损伤,但若没有良好的拉结措施,榫卯节点可能脱开而导致节点失稳、房屋倒塌,所以,榫卯节点是木结构抗震设防的关注重点<sup>[1]</sup>。中国西南地区由于受地区经济、自然条件、传统民族文化等因素影响,木结构仍是该地区村镇民居建筑的一种主要结构形式。虽然木结构整体抗震性能较好<sup>[2-3]</sup>,但村镇木结构往往没有经过严谨的抗震设计,大部分房屋由施工者按照经验进行施工,且多数使用年限较长,年久失修,一旦发生地震,未进行加固的木结构房屋榫卯节点极易出现断裂、拔榫等破坏,造成严重的经济损失和人员伤亡<sup>[4-6]</sup>。因此,针对村镇木结构的抗震加固研究逐渐受到关注。

周乾等<sup>[7]</sup>开展的木结构缩尺模型振动台试验结果表明,采用钢构件加固节点的效果优于CFRP布和马口铁。熊海贝等<sup>[8]</sup>通过开展单层单跨梁柱式足尺木框架拟静力试验,验证了节点采用碳纤维布和自攻螺丝加固均能有效抑制裂缝开展,并能够恢复结构强度、刚度等力学性能,节点加固并增设隅撑可显著提高结构抗侧移性能。姚侃等<sup>[9]</sup>对采用Q235钢加固榫卯连接节点的缩尺木结构模型进行了振动台试验,结果表明,加固木结构的强度、刚度和整体性获得提升,Q235扁钢加固榫卯连接节点有效地阻止了结构节点的破坏。郇君虹等<sup>[10]</sup>对采用不同形式扁钢加固的有损节点进行了静力推复试验,结果表明,带螺钉加固装置的加固效果最为明显,加固件与构件之间的有效连接可以提高榫卯节点的抗震性能。Kramár等<sup>[11]</sup>对采用不同类型碳纤维布加固的木梁开展了试验,结果表明,有纹路的CFRP布具有更好的加固性能。聂雅雯等<sup>[12]</sup>对不同紧密程度的附加黏弹性阻尼器燕尾榫节点开展了拟静力试验,

结果表明:紧密节点耗能较强;安装阻尼器后,节点刚度、强度和耗能均得到提高,且负向加载时提高较显著。高永林等<sup>[13-14]</sup>对榫卯节点附加黏弹性阻尼器的两层足尺穿斗式木结构房屋模型进行了振动台试验,结果表明:榫卯节点附加黏弹性阻尼器后节点刚度增大,变形恢复能力显著提高,结构未出现明显倾斜破坏;结构模型具有明显扭转效应,未发生塑性破坏,底层层间耗能最高,屋脊最低。Xue等<sup>[15-16]</sup>对采用形状记忆合金钢丝和SMA阻尼器加固的榫卯节点进行了拟静力试验,结果表明:采用形状记忆合金钢丝加固节点能降低其拔榫量,提升极限承载力和初始刚度;增加SMA阻尼器中形状记忆合金钢丝的预应力可以有效降低拔榫量,提高节点极限承载力、耗能能力和恢复能力。

尽管学者们针对木结构榫卯节点提出了采用钢(铁)件加固、碳纤维增强复合材料(CFRP)加固以及附加阻尼器等一系列技术措施并验证了其有效性,但针对村镇木结构,特别是在役木结构房屋节点的加固方式需优先考虑其经济性、可操作性和实施便利性。为此,需要在已有研究基础上进一步开展榫卯节点加固研究,特选取西南地区典型透榫、半榫和燕尾榫榫卯节点为原型,制作15件榫卯节点试件,并对其中12件试件分别采用扒钉、钢板和木条进行加固,开展拟静力试验,对比研究加固与非加固节点试件的抗震性能,为村镇传统木结构节点加固提供建议与指导方法。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

选取中国西南地区常见铁杉设计制作了透榫、半榫和燕尾榫3类节点试件,每种类型的节点试件包括未加固、扒钉加固、钢板加固、木条 $\phi 10$ 螺栓加

固和木条  $\phi 12$  螺栓加固节点试件共 5 件<sup>[17]</sup>。试件均参照西南地区村镇木结构典型榫卯节点样式进行设计,由昆明理工大学抗震研究所的专业技术工人制作,具体流程为卯口、榫头制作和组装以及盖木、垫木安装,节点示意图如图 1 所示。试件模型尺寸见表 1。试件编号 JD-1a~JD-5a 为透榫节点,JD-1b~JD-5b 为半榫节点,JD-1c~JD-5c 为燕尾榫节点。节点编号如表 2 所示。

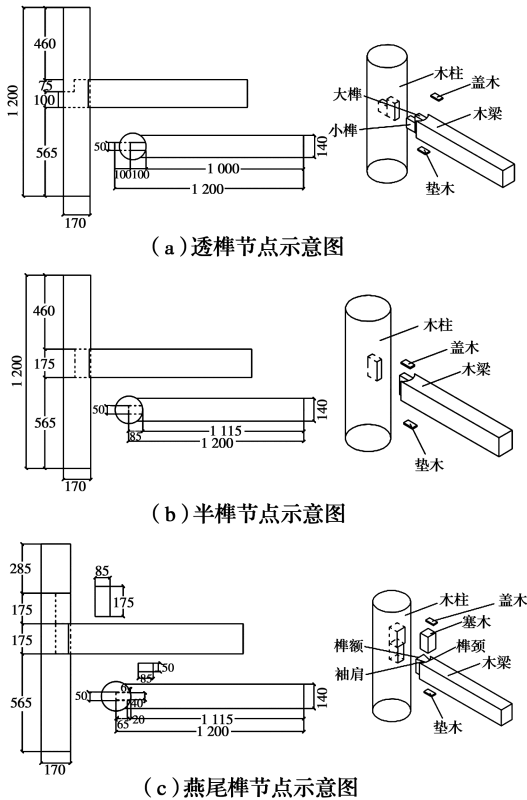


图 1 榫卯节点示意图(单位:mm)

Fig. 1 Diagram of mortise-tenon joints(unit :mm)

表 1 试件尺寸

Table 1 Sizes of specimens

构件名称	参数	尺寸/mm	构件名称	参数	尺寸/mm
梁	宽度	140	透榫	大榫高度	175
	高度	175		小榫高度	100
	长度	1 200		榫宽度	50
柱	直径	170	大榫长度	100	
	长度	1 200	小榫长度	100	
半榫	榫宽度	50	榫额宽度	50	
	榫高度	175	榫颈宽度	40	
	榫长度	85	榫高度	175	
			榫长度	85	
			袖肩长度	20	
			袖肩宽度	6	

表 2 节点编号

Table 2 Numbers of joints

加固形式	透榫	半榫	燕尾榫
未加固	JD-1a	JD-1b	JD-1c
扒钉加固	JD-2a	JD-2b	JD-2c
钢板加固	JD-3a	JD-3b	JD-3c
木条加固( $\phi 10$ 螺栓)	JD-4a	JD-4b	JD-4c
木条加固( $\phi 12$ 螺栓)	JD-5a	JD-5b	JD-5c

榫卯节点试件加固共使用了 4 种方案。方案一:利用 4 根直径 10 mm、长度 150 mm、钉长 50 mm 扒钉进行双侧加固,扒钉与梁呈  $30^\circ$  夹角;方案二:采用两条宽 40 mm、长 425 mm、厚 2 mm 钢板进行双侧加固,钢板与梁平行,连接方式采用  $\phi 12$  螺栓锚固;方案三:通过两条宽 60 mm、长 600 mm、厚 60 mm 木条进行双侧加固,木条与梁呈  $45^\circ$  夹角,连接方式采用  $\phi 10$  螺栓锚固;方案四与方案三的差异是将连接螺栓改为  $\phi 12$  螺栓。加固方案中的扒钉、钢板均采用 Q235 钢进行制作,螺栓选用普通螺栓,加固节点试件示意图如图 2 所示,节点加固材料尺寸参数见表 3。

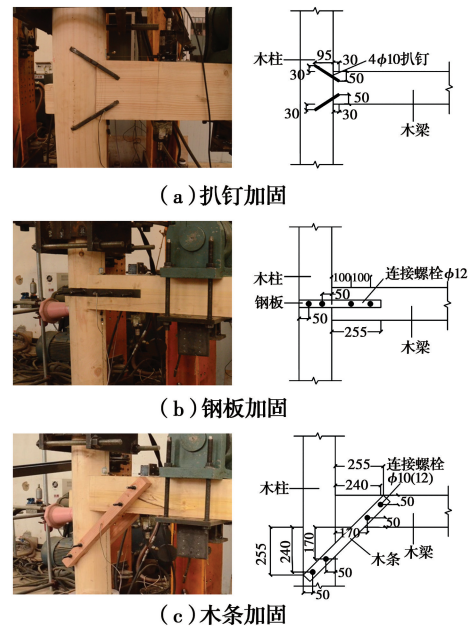


图 2 加固节点试件示意图

Fig. 2 Diagram of specimens of reinforcement joints

表 3 加固材料尺寸

Table 3 Sizes of reinforcement materials

加固方案	锚固方式	加固件尺寸/mm		
		宽度(扒钉直径)	长度	厚度(直钩深度)
扒钉加固	钉接	10	150	50
钢板加固	$\phi 12$ 螺栓	40	425	2
木条加固	$\phi 10$ 螺栓	60	600	60
木条加固	$\phi 12$ 螺栓	60	600	60

### 1.2 材料性能

按照木材物理性能与力学性能测定标准,选取 12 个试样进行木材密度、含水率、顺纹抗压强度、顺纹抗压弹性模量、横纹抗压强度、横纹抗压弹性模量和抗弯强度等指标的测量,取平均值作为测试结果,如表 4、表 5 所示。

表 4 木材物理性能指标

Table 4 Physical properties of wood

木材种类	气干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/%
杉木	0.452	13.02

表 5 木材力学性能指标

Table 5 Mechanical properties of wood

木材种类	$f_{c,L}/$ MPa	$f_{c,T}/$ MPa	$f_{c,R}/$ MPa	$f_b/$ MPa	$E_{c,L}/$ MPa	$E_{c,T}/$ MPa	$E_{c,R}/$ MPa
杉木	35.13	3.51	3.71	56.77	7410	510	830

注: $f_{c,L}$ 、 $f_{c,T}$ 、 $f_{c,R}$ 、 $f_b$  分别为木材顺纹、横纹弦向、横纹径向抗压强度和木材抗弯强度; $E_{c,L}$ 、 $E_{c,T}$ 、 $E_{c,R}$ 分别为木材顺纹、横纹弦向和横纹径向抗压弹性模量。

### 1.3 加载与测试

1.3.1 试验加载设备与措施 为防止节点试件在加载过程中侧移失稳,试件柱顶与柱底采用钢管套筒进行固定。利用液压千斤顶向柱顶施加 10 kN 的竖向恒荷载,采用电液伺服作动器在悬挑梁端施加循环荷载,作动器加载点距柱边缘 500 mm,加载示意如图 3 所示。

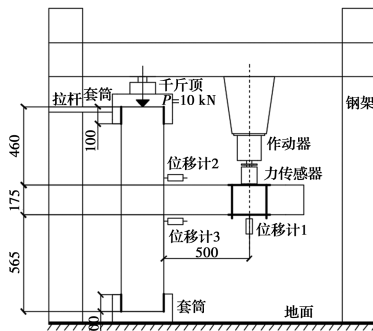


图 3 试验加载装置

Fig. 3 Experimental loading apparatus

1.3.2 加载制度 根据木结构榫卯节点特点,参照《建筑抗震试验方法规程》(JGJ/T 101—2015)中的 5.3.4 条<sup>[18]</sup>,梁端荷载采用位移控制分级加载,第 1 级控制位移幅值为 10 mm,每级位移增幅 10 mm,循环 3 次,直至试件破坏或控制位移达到试验设备最大行程±125 mm 时试验结束,加载制度如图 4 所示。

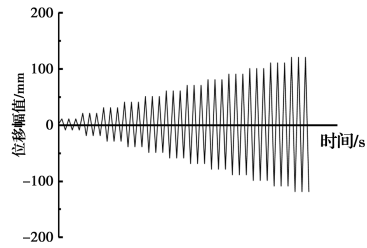


图 4 加载制度

Fig. 4 Loading program

1.3.3 测量内容与测点位置 节点试验的主要测量项目是力和位移,柱顶恒载由油压表测读,梁端荷载由电液伺服作动器配置的力传感器测量,位移测量重点关注梁端加载位移和节点的拔榫量,共布置 3 只位移传感器,在节点上方、下方各布置 1 只位移计测量节点拔榫量,为避免加载装置连接间隙的影响,在距柱内侧 500 mm 处安装位移计测量梁端位移,测点布置如图 3 所示。

## 2 试验现象及结果分析

### 2.1 试验现象

2.1.1 未加固试件 在 10 mm 位移工况下,透榫节点 JD-1a 榫卯间出现挤压声响,榫头被轻微拔出;至加载中期,卯口出现缝隙,拔榫量明显增大;加载至 90 mm,拔榫更显著,荷载开始下降,试验结束。半榫节点 JD-1b 试验现象与透榫节点 JD-1a 类似,加载至 110 mm 时拔榫严重,为避免榫头掉落,停止加载。燕尾榫节点 JD-1c 试验现象与透榫节点 JD-1a 类似,加载至作动器最大行程,试验结束。试件破坏状态如图 5 所示。

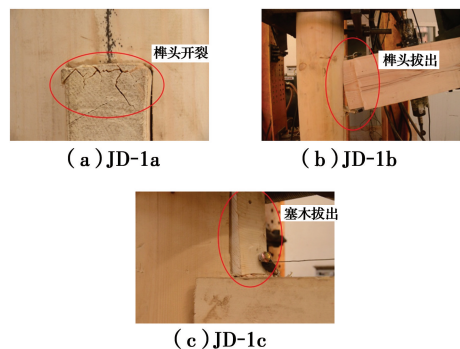


图 5 未加固试件破坏状态

Fig. 5 Failure patterns of specimens before reinforcement

2.1.2 扒钉加固试件 透榫节点 JD-2a 在加载前期就出现榫卯间的连续挤压声,上侧扒钉孔扩展;后续加载过程中,扒钉孔持续扩展;至加载后期,榫头

开始拔出,荷载降低,出现榫头断裂声,试验结束。半榫节点 JD-2b 试验现象与透榫节点 JD-2a 类似,加载过程中伴有木材断裂声;加载至 100 mm 时,扒钉断裂,退出工作,试验结束。燕尾榫节点 JD-2c 试验现象与半榫节点 JD-2b 类似,但未出现明显裂缝且后期荷载趋于平稳,加载至作动器最大行程,试验结束。节点试件破坏状态如图 6 所示。

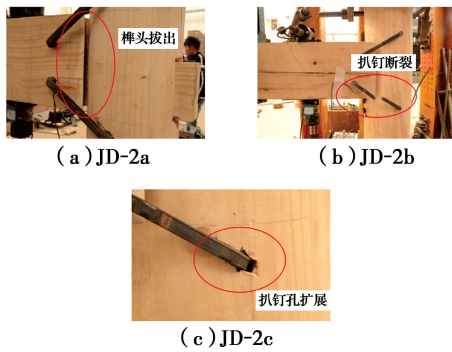


图 6 扒钉加固试件破坏状态

Fig. 6 Failure patterns of specimens after reinforcement with iron hook

2.1.3 钢板加固试件 透榫节点 JD-3a 在试验加载前期有轻微间断响声,卯口变大;至加载中期,榫头断裂,钢板出现弯曲扭转;加载至作动器最大行程,试验结束。半榫节点 JD-3b 试验现象与透榫节点 JD-3a 类似,加载后期梁底部垫木脱落,加载至作动器最大行程,试验结束。燕尾榫节点 JD-3c 试验现象与透榫节点 JD-3a 类似,往复荷载作用下,钢板产生显著塑性变形,加载至作动器最大行程,试验结束。试件破坏状态如图 7 所示。

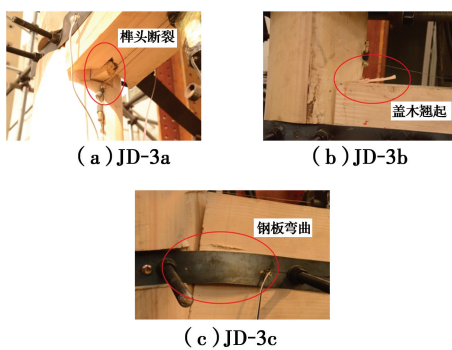


图 7 钢板加固试件破坏状态

Fig. 7 Failure patterns of specimens after reinforcement with steel plate

2.1.4 木条加固试件 在试验加载前期,透榫节点 JD-4a、JD-5a 木条、梁柱之间均出现挤压声,但未产生明显裂纹;至加载中期,出现大量裂缝;加载至

100 mm 时,荷载明显下降,试验结束。半榫节点 JD-4b、JD-5b 在 10 mm 位移工况下出现轻微声响;加载后期,试验现象与透榫节点 JD-4a、JD-5a 类似,为防止榫头脱落,停止加载。燕尾榫节点 JD-4c、JD-5c 试验现象与半榫节点 JD-4b、JD-5b 类似,加载至作动器最大行程,试验结束。破坏状态如图 8 所示,采用不同直径螺栓进行加固的节点试件破坏形态类似。

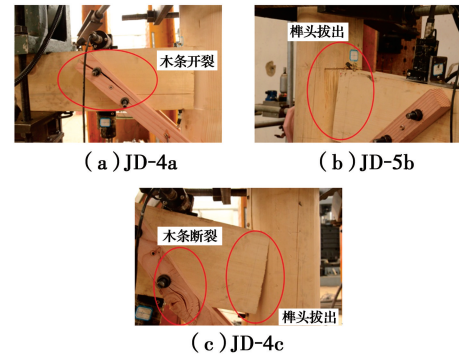


图 8 木条加固试件破坏状态

Fig. 8 Failure patterns of specimens after reinforcement with bolt wood strip

## 2.2 结果分析

2.2.1 滞回曲线 15 件榫卯节点试件在反复荷载下的滞回曲线如图 9~图 13 所示。节点试件的滞回曲线形状整体均呈反“Z”型,捏缩效应明显,说明加载过程中榫卯间存在大量滑移。在每一级加载位移工况下,第 1 循环圈的滞回曲线面积均大于第 2、第 3 圈,说明榫卯节点在循环荷载作用下产生了不可逆的变形,出现了强度退化。除加固件破坏的节点外,其余节点试件的滞回曲线面积与加载控制位移呈正相关。

由图 9 可见,未加固节点试件滞回曲线均呈反“Z”型。图 9(a)中透榫节点 JD-1a 的滞回曲线较为平滑,滑移较大,在加载控制位移转角达到 0.260 rad 时,弯矩达到 4.46 kN·m,且仍呈增长趋势。图 9(b)中半榫节点 JD-1b 和图 9(c)中燕尾榫节点 JD-1c 拔榫滑移均低于透榫节点 JD-1a。

由图 10 可见,扒钉加固节点试件滞回曲线在前 3 级加载位移工况下均呈反“S”型,与未加固节点试件相比,滑移量降低,在相同加载控制位移工况下,其节点承载力得到提高。所有节点在位移控制加载前期承载力增长较快,加载后期,由于加固件破坏或

试件破损,节点承载力增长变缓后开始降低,但试验全程节点未出现显著破坏。

由图 11 可见,钢板加固节点试件的滞回曲线前期呈反“S”型,形状较为饱满,榫卯间的滑移较小,说明加固节点的钢板参与耗能效果较好。图 11(a)中

透榫节点 JD-3a 在转角位移加至  $-0.112 \text{ rad}$  时榫头断裂,但节点承载力未出现明显下降。在试验加载全程,半榫节点 JD-3b 与燕尾榫节点 JD-3c 弯矩值均逐渐增长而未出现下降。

由图 12、图 13 可见,木条加固节点试件的滞回

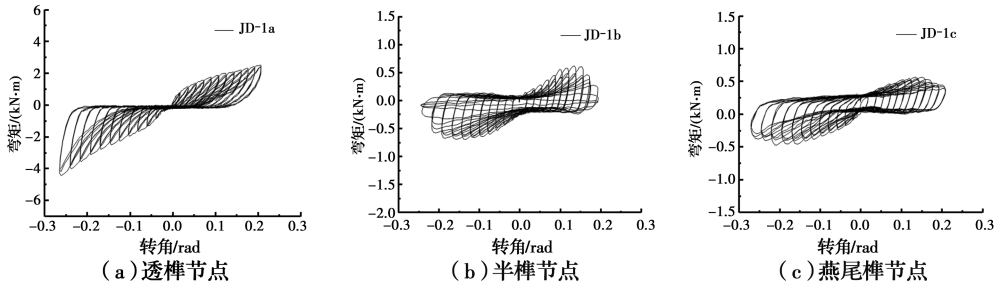


图 9 未加固节点滞回曲线

Fig. 9 Hysteresis curves of joints before reinforcement

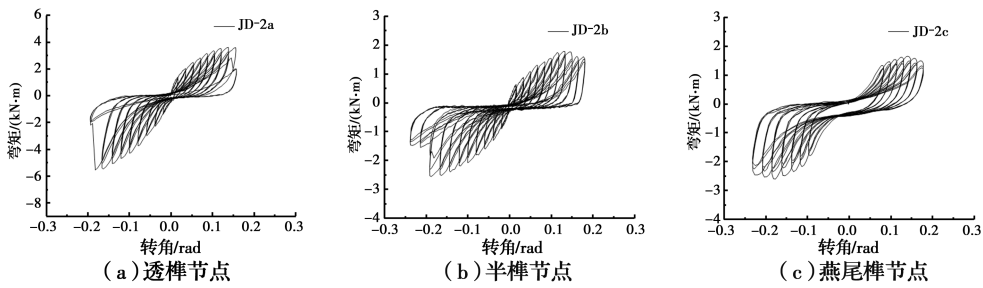


图 10 扒钉加固节点滞回曲线

Fig. 10 Hysteresis curves of joints after reinforcement with iron hook

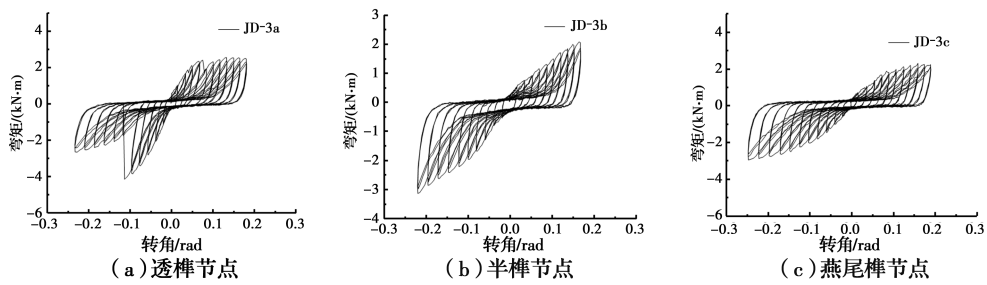


图 11 钢板加固节点滞回曲线

Fig. 11 Hysteresis curves of joints after reinforcement with steel plate

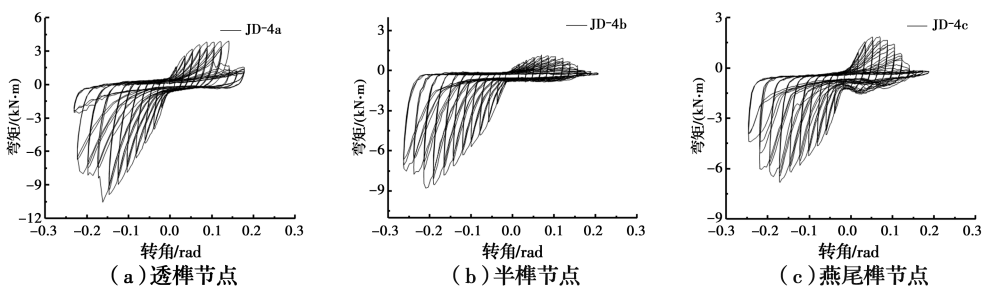
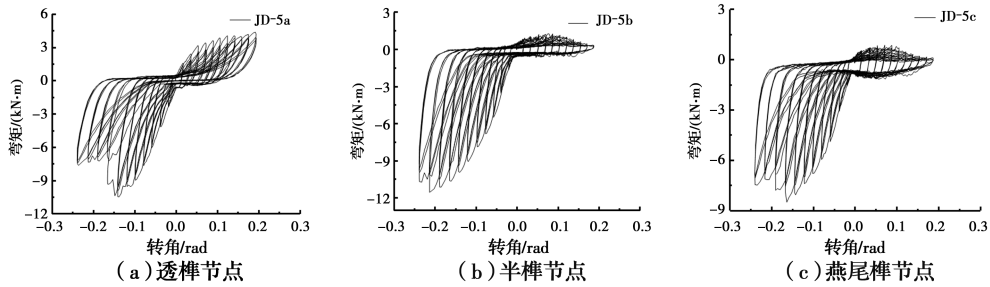


图 12 木条  $\phi 10$  螺栓加固节点滞回曲线

Fig. 12 Hysteresis curves of joints after reinforcement with  $\phi 10$  bolt wood strip

图 13 木条  $\phi 12$  螺栓加固节点滞回曲线Fig. 13 Hysteresis curves of joints after reinforcement with  $\phi 12$  bolt wood strip

曲线呈非对称的反“Z”型,转角位移负值方向滞回曲线面积较大且饱满,这与加固木条仅在梁柱下侧布置直接相关。与未加固节点对比,采用木条加固后榫卯间的滑移降低。试验加载前期节点试件承载力增长较快,随着加载控制位移的增大,节点承载力增长变缓,位移控制加载后期节点承载力陡降是木条断裂所致。

**2.2.2 骨架曲线** 骨架曲线是弯矩-转角曲线中各级循环荷载下弯矩极值点的包络线,节点试件的试验骨架曲线如图 14 所示。节点负向极限承载力从大到小依次为:木条  $\phi 12$  螺栓加固节点(JD-5a、JD-5b、JD-5c) > 木条  $\phi 10$  螺栓加固节点(JD-4a、JD-4b、JD-4c) > 钢板加固节点(JD-3a、JD-3b、JD-3c) > 扒钉加固节点(JD-2a、JD-2b、JD-2c) > 未加固节点(JD-1a、JD-1b、JD-1c)。除钢板加固半榫节点 JD-3b、钢板加固燕尾榫节点 JD-3c 外,其余节点的工作状态均可近似划分为弹性、屈服和破坏 3 个阶段,骨架曲线呈“S”型。采用木条加固后,节点试件骨架曲线斜率变大,较快到达极限承载力,在加固件破坏之前,受力均未出现下降。对比未加固节点试件,透榫节点 JD-5a 在 0.140 rad 转角位移下负向弯矩由  $-2.37 \text{ kN} \cdot \text{m}$  增长到  $-10.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,半榫节点 JD-5b 在 0.180 rad 转角位移下负向弯矩由  $-0.72 \text{ kN} \cdot \text{m}$  增长到  $-10.585 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,燕尾榫节点 JD-5c 在 0.140 rad 转角位移下负向弯矩由  $-0.43 \text{ kN} \cdot \text{m}$  增长到  $-7.96 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,节点承载力显著提高,提升比例大于 3.4 倍,负向加载时表现出更大的承载力。采用扒钉加固和钢板加固效果类似,节点承载力得到提高,骨架曲线较为平缓,屈服较慢。由于加固件破坏或试件破损,部分节点骨架曲线发生突变,但所有加固节点试件的承载力等力学性能均获得提高。

**2.2.3 节点拔榫** 节点拔榫量为枋边中心线与柱边的相对位移<sup>[19]</sup>,计算公式见式(1)。

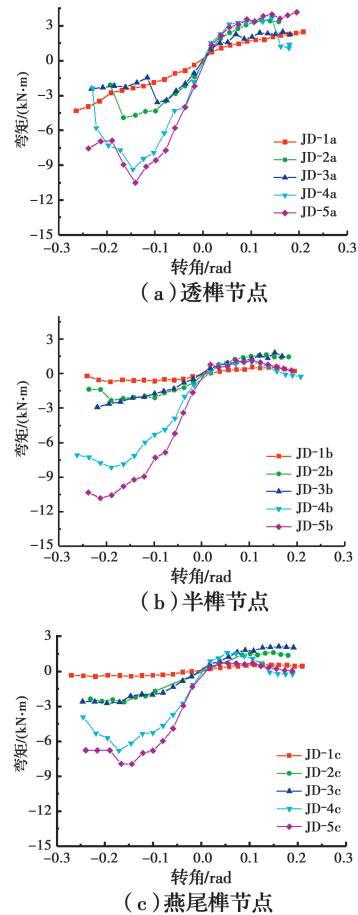


图 14 骨架曲线

Fig. 14 Skeleton curves

$$\delta_0 = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \quad (1)$$

式中: $\delta_1$ 、 $\delta_2$  为梁端位移计所测位移量,拉伸为正,压缩为负。

试验节点试件的拔榫情况如图 15 所示。由图 15 可见,所有加固方式都能有效降低节点拔榫,拔榫量与加载控制位移呈正比关系。与未加固节点相比,扒钉、钢板、木条  $\phi 10$  螺栓和木条  $\phi 12$  螺栓加固透榫节点 JD-2a、JD-3a、JD-4a 和 JD-5a 在 90 mm 位移工况下节点拔榫量分别降低了 3.43、5.04、6.04、

6.31 mm,榫卯节点抗拔性能得到明显提升。在 110 mm 控制位移下,未加固节点试件透榫、半榫和燕尾榫节点 JD-1a、JD-2a 和 JD-3a 拔榫量分别为 28.33、34.52、23.32 mm,说明燕尾榫节点抗拔性能较好。图 15(a)、(c)中木条加固透榫 JD-4a 和燕尾榫节点 JD-4c 拔榫量出现突变,原因是加固木条断裂,造成螺栓脱离。木条加固节点试件中,采用不同直径的螺栓对拔榫量无显著影响。

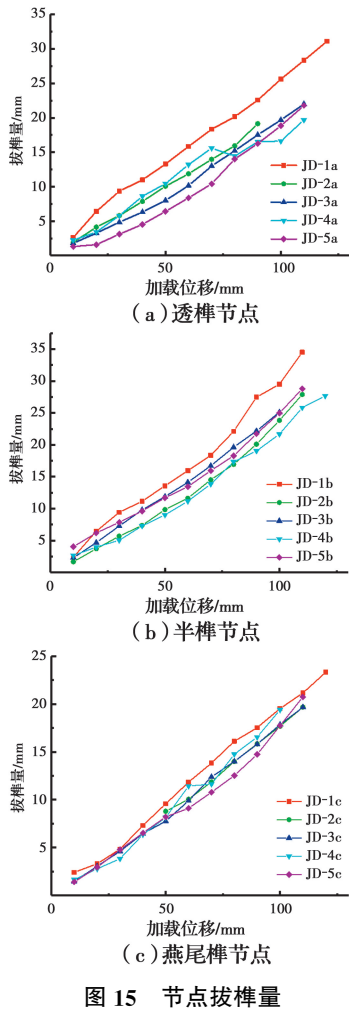


图 15 节点拔榫量

Fig. 15 Pullout amount of mortise-tenon joints

2.2.4 刚度退化曲线 刚度与加载控制位移、位移循环圈数成反比的现象称为刚度退化,节点刚度可用割线刚度  $K$  值表示,计算公式见式(2)、式(3)。

$$K_i^+ = \frac{M_i^+}{\theta_i^+} \quad (2)$$

$$K_i^- = \frac{M_i^-}{\theta_i^-} \quad (3)$$

式中: $M_i^+$  为第  $i$  级控制位移下的正向弯矩最值; $M_i^-$  为第  $i$  级控制位移下负向弯矩最值的绝对值; $\theta_i^+$  为  $M_i^+$  对应转角; $\theta_i^-$  为  $M_i^-$  对应转角的绝对值。

计算得出节点试件的刚度退化曲线如图 16 所示。加固节点试件的初始刚度与加载结束时的刚度总体均有提高,节点负向刚度从大到小依次为:木条  $\phi 12$  螺栓加固节点(JD-5a、JD-5b、JD-5c) > 木条  $\phi 10$  螺栓加固节点(JD-4a、JD-4b、JD-4c) > 扒钉加固节点(JD-2a、JD-2b、JD-2c) > 钢板加固节点(JD-3a、JD-3b、JD-3c) > 未加固节点(JD-1a、JD-1b、JD-1c)。刚度退化曲线总体呈下降趋势,其中,木条加固节点试件初始刚度提高较为显著,节点负向初始刚度提升超过 4.9 倍。在加载前期,木条加固节点试件刚度退化斜率最大,退化较快。木条加固节点的非对称布置导致节点正、负向加载受力不一致,负向加载刚度明显高于正向加载刚度。扒钉、钢板加固节点试件的刚度退化相对较平缓。图 16(a)中扒钉、钢板加固透榫节点 JD-2a、JD-3a 在负向加载时发生刚度退化突变,原因是上侧扒钉和单侧钢板发生破坏,退出工作。

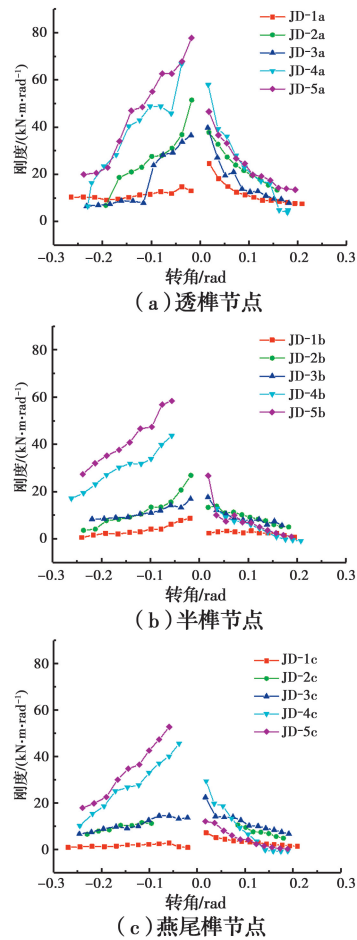


图 16 刚度退化曲线

Fig. 16 Rigidity degradation curves

2.2.5 耗能能力 节点试件荷载-变形滞回曲线所包围的面积可以用来衡量节点非弹性变形阶段的能



量吸收耗散能力,统一选取加固前后节点位移为30 mm倍数的荷载-变形曲线滞回面积进行对比分析,试件在各加载控制位移下的耗能能力如表6所示。木条加固节点试件耗能能力最佳,透榫节点JD-4a、半榫节点JD-5b和燕尾榫节点JD-5c在90 mm控制位移下耗能分别达到491、448、378 kN·mm,对比非加固节点,耗能分别提升1.6、2.6和2.4倍,扒钉加固节点试件和钢板加固节点试件耗能能力增长较为稳定。所有加固方式均提升了节点耗能,除因加固件或试件在加载后期发生破损的透榫节点JD-2a和燕尾榫节点JD-4c出现耗能能力降低外,其余节点试件的耗能能力与加载控制位移呈正比关系。

表6 耗能能力  
Table 6 Energy consumption capacity

榫卯形式	节点编号	耗能能力/(kN·mm)		
		30 mm	60 mm	90 mm
透榫	JD-1a	39	96	187
	JD-2a	76	202	196
	JD-3a	84	133	210
	JD-4a	185	429	491
	JD-5a	169	414	430
半榫	JD-1b	36	86	126
	JD-2b	39	91	175
	JD-3b	59	132	217
	JD-4b	111	250	359
	JD-5b	147	301	448
燕尾榫	JD-1c	30	70	111
	JD-2c		116	222
	JD-3c	68	157	245
	JD-4c	156	272	264
	JD-5c	138	295	378

### 3 结论

通过对未加固与采用扒钉、钢板和木条加固的透榫、半榫以及燕尾榫节点试件进行拟静力试验,得出以下主要结论:

1) 榫卯节点试件采用相应加固措施后仍具有“半刚性”特点,其试验滞回曲线呈反“Z”型。

2) 未加固榫卯节点的主要破坏形式是榫头卯口挤压开裂、榫头拔出、垫木盖木脱落,加固后榫卯节点以加固件破坏形态而破坏,主要表现为扒钉断裂、钢板弯扭屈服和木条断裂。

3) 各节点试件的拔榫量与加载控制位移呈正比

关系,所有加固措施均能有效降低节点的拔榫量,其中木条加固措施对降低节点拔榫效果最为显著。

4) 所有加固措施均能有效提高节点的承载力、刚度和耗能能力,采用木条加固提升效果最佳,加固后的半榫和燕尾榫节点负向加载时承载力提升超过10倍,刚度提升超过8倍,加固后的半榫节点耗能能力提升超过2.6倍。

5) 实测木条加固榫卯节点采用非对称形式时受力性能明显不对称,实际应用中宜考虑通过调整木条安装角度和连接螺栓数量等以实现对称加固。

### 参考文献:

- [1] 郭婷,杨娜,周海宾,等.穿斗式木结构中节点的抗弯性能试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(2):83-90.  
GUO T, YANG N, ZHOU H B, et al. Experimental study on the moment-resisting performance of interior joints with wooden peg [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(2): 83-90. (in Chinese)
- [2] 高大峰,赵鸿铁,薛建阳.木结构古建筑中斗拱与榫卯节点的抗震性能:试验研究[J].自然灾害学报,2008,17(2):58-64.  
GAO D F, ZHAO H T, XUE J Y. Aseismic characteristics of bucket arch and mortise-tenon joint of ancient Chinese timber buildings: Experimental research [J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(2): 58-64. (in Chinese)
- [3] 李书进,铃木祥之.足尺木结构房屋振动台试验及数值模拟研究[J].土木工程学报,2010,43(12):69-77.  
LIS J, SUZUKI Y. Full size shaking table test and numerical simulations of traditional wooden houses [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(12): 69-77. (in Chinese)
- [4] 何玲,潘文,杨正海,等.村镇木结构房屋震害及抗震技术措施[J].工程抗震与加固改造,2006,28(6):94-101.  
HE L, PAN W, YANG Z H, et al. Seismic damage and seismic countermeasures of timber houses in villages and towns [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2006, 28(6): 94-101. (in Chinese)
- [5] 高永武,金波,戴君武,等.芦山7级地震村镇木结构震害调查及加固建议[J].地震工程与工程振动,2013,33(3):48-52.  
GAO Y W, JIN B, DAI J W, et al. Damage to rural wooden structures in M 7.0 Lushan earthquake and reinforcement suggestions [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(3):

- 48-52. (in Chinese)
- [6] 陆伟东, 邓大利, 居兴鹏, 等. 中国木结构建筑分布及其震害[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2011, 43(4): 464-469.  
LU W D, DENG D L, JU X P, et al. Distribution of timber structures in China and seismic damages analysis [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2011, 43(4): 464-469. (in Chinese)
- [7] 周乾, 闫维明, 李振宝, 等. 古建筑榫卯节点加固方法振动台试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(6): 70-78.  
ZHOU Q, YAN W M, LI Z B, et al. Aseismic strengthening methods on Chinese ancient tenon-mortise joint by shaking table tests [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, 43(6): 70-78. (in Chinese)
- [8] 熊海贝, 刘应扬, 姚亚, 等. 梁柱式木结构加固方法及抗侧力性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 695-702.  
XIONG H B, LIU Y Y, YAO Y, et al. Experimental study of reinforcement methods and lateral resistance of glued-laminated timber post and beam structures [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(5): 695-702. (in Chinese)
- [9] 姚侃, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 古建木结构榫卯连接的扁钢加固试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(10): 220-224.  
YAO K, ZHAO H T, XUE J Y, et al. Experimental studies on seismic characteristic of strengthened mortise-tenon joint in historical timber buildings [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(10): 220-224. (in Chinese)
- [10] 郇君虹, 马东辉, 郭小东, 等. 扁钢加固半榫、透榫及燕尾榫抗震性能试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(8): 763-771.  
HUAN J H, MA D H, GUO X D, et al. Experimental study of aseismic behaviors of flexural tenon joint, through tenon joint and dovetail joint reinforced with flat steel devices [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 45(8): 763-771. (in Chinese)
- [11] KRAMÁR S, BRABEC M, PAŘIL P, et al. Constraining delamination of CFRP by beam corrugation [J]. Engineering Structures, 2020, 207: 110237.
- [12] 聂雅雯, 陶忠, 高永林. 黏弹性阻尼器增强传统木结构燕尾榫节点试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(1): 125-133.  
NIE Y W, TAO Z, GAO Y L. Experimental study on dovetail mortise-tenon joints with viscoelastic dampers in traditional timber structures [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(1): 125-133. (in Chinese)
- [13] 高永林, 陶忠, 叶燎原, 等. 传统穿斗木结构榫卯节点附加黏弹性阻尼器振动台试验[J]. 土木工程学报, 2016, 49(2): 59-68.  
GAO Y L, TAO Z, YE L Y, et al. Shaking table tests of mortise-tenon joints of a traditional Chuan-Dou wood structure attached with viscoelastic dampers [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(2): 59-68. (in Chinese)
- [14] 高永林, 陶忠, 叶燎原, 等. 带有黏弹性阻尼器穿斗木结构振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(1): 240-247, 260.  
GAO Y L, TAO Z, YE L Y, et al. Shaking table tests for a Chuan-Dou timber building with viscoelastic dampers [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(1): 240-247, 260. (in Chinese)
- [15] XUE J Y, WU C W, ZHANG X C, et al. Experimental study on seismic behavior of mortise-tenon joints reinforced with shape memory alloy [J]. Engineering Structures, 2020, 218: 110839.
- [16] XUE J Y, WU C W, ZHANG X C, et al. Effect of pre-tension in superelastic shape memory alloy on cyclic behavior of reinforced mortise-tenon joints [J]. Construction and Building Materials, 2020, 241: 118136.
- [17] 付高攀. 传统民居木构架加固改造技术研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.  
FU G P. Study on reinforcement and transformation method for timber frame of traditional folk houses [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [18] 建筑抗震试验方法规程: JGJ/T 101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
Specificating of testing methods for earthquake resistant building: JGJ/T 101-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [19] 王文波. 古建木结构榫卯节点加固后力学性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.  
WANG W B. Study on mechanical properties of reinforced mortise-tenon joints in ancient timber structures [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)

(编辑 黄廷)