

扁钢加固半榫、透榫及燕尾榫抗震性能试验研究

郇君虹^{1,2}, 马东辉^{1,2}, 郭小东^{1,2}, 徐 帅³

(1. 北京工业大学抗震减灾研究所, 北京 100124; 2. 木结构古建筑安全评估与灾害风险控制国家文物局重点科研基地, 北京 100124; 3. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088)

摘 要: 为了解决木结构古建筑榫卯节点老化抗震能力下降的问题, 以木结构古建筑加固的无损性和可逆性为原则, 以保留榫卯节点半刚性特点为出发点, 以是否设置活动槽和加固件是否与柱螺钉连接为区分, 设计了4种不同形式的扁钢加固装置, 并将其应用在半榫、透榫和燕尾榫节点。以宋《营造法式》中大木作二等材为原型, 按照缩尺比例为1:3.52制作了3组试验模型, 其中半榫、透榫和燕尾榫节点各4个。进行试验的节点均为反复加载过的有损节点, 通过静力推复试验, 对比榫卯节点加固前后的破坏状态、荷载-位移滞回曲线、骨架曲线、刚度退化和耗能能力等抗震性能参数。试验结果表明: 榫卯节点加固前后滞回曲线都有明显的“捏缩效应”, 榫卯节点间存在摩擦滑移, 加固后的节点依然具有半刚性的特点; 加固前后的榫卯节点的阶段耗能和累积耗能随水平位移荷载的增大呈抛物线式增长; 4种加固装置对榫卯节点的刚度、峰值荷载和耗能能力都有提高作用, 带螺钉加固装置的加固效果最为明显, 提高加固件与木构件之间的有效连接可以提高榫卯节点的抗震性能; 提出改进和进一步提高4种加固装置加固效果的建议。

关键词: 扁钢加固; 半榫; 透榫; 燕尾榫; 抗震性能

中图分类号: TU 366.2

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2019)08-0763-09

doi: 10.11936/bjntxb2018010012

Experimental Study of Aseismic Behaviors of Flexural Tenon Joint, Through Tenon Joint and Dovetail Joint Reinforced With Flat Steel Devices

HUAN Junhong^{1,2}, MA Donghui^{1,2}, GUO Xiaodong^{1,2}, XU Shuai³

(1. Institute of Earthquake Engineering, Beijing University of technology, Beijing 100124, China;

2. Key Scientific Research Base of Safety Assessment and Disaster Mitigation for Traditional Timber Structure

(Beijing University of Technology), State Administration for Cultural Heritage, Beijing 100124, China;

3. Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: To solve the problem of anti-seismic capacity decline of aging mortise and tenon joints, four types of flat steel reinforcement devices were designed and manufactured based on the reversibility, nondestructive and intention of preserving the semi-rigid characteristics of mortise tenon joints. The devices were distinguished from each other in whether with a moveable slot and the reinforcement was fixed to the column or not. The flat steel reinforcement devices were applied to half tenon joints through tenon joints and dovetail joints. 12 tenons and mortise joints were designed and manufactured according to the Fabrication Methods of Song Dynasty, including 4 half tenon joints, 4 through tenon joints and 4 dovetail joints. The scale ratio was 1:3.52. All the joints were slightly damaged by cyclic loaded before the low-cycle reversed loading experiment was carried out. The seismic performance parameters of joints

收稿日期: 2018-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678005, 51478116); 北京市教育委员会科技计划资助项目(KM201610005029)

作者简介: 郇君虹(1989—), 女, 博士研究生, 主要从事古建筑抗震性能、文物抗震保护方面的研究, E-mail: junhong_love@

126.com

such as reinforcement load-displacement hysteresis loops, skeleton curves, degradation of rigidity and energy dissipation capacity were compared and studied before and after reinforcement. The results show that all the hysteresis loops of joints have obvious pinch effect which indicates slippage occurred between the mortise tenon joints and the semi-rigid characteristics of joints were reserved after reinforcement. The energy dissipation capacity of the joints grows in a parabolic way with the increase of displacement loads. The rigidity, peak load and energy dissipation capacity of the joints were improved after reinforcement. The reinforcement effect of the strengthening devices which was fixed to the column was better than others. The results show the seismic capacity of mortise tenon joints can be effectively improved by strengthening the connection between reinforcement and wood components. Finally, suggestions on how to further enhance the reinforcement effect of the four types strengthening devices were put forward.

Key words: flat steel reinforcement devices; half tenon joints; through tenon joints; dovetail joints; seismic behavior

木结构古建筑具有良好的抗震性能,榫卯节点是其中非常重要的一类减震耗能构造^[1]. 燕尾榫、半榫和透榫是古建筑木结构框架中常用的榫卯结构形式. 燕尾榫多用于枋与柱和檩条相交的部位;透榫多用于梁柱相交部位;半榫多用于雀替和柱的连接处,有时也用于梁、枋与柱的连接^[1]. 这三类榫卯结构类型常用于重要结构构件之间的连接,对于整体结构的安全稳定是十分重要的,该类节点一旦发生破坏很可能会造成建筑局部或者整体的歪闪、变形、倾斜甚至坍塌和损毁. 我国现存的木结构古建筑已有几百甚至上千年的历史,其榫卯均存在不同程度的老化、损伤和松动,因此对木结构古建筑榫卯节点进行合理加固是十分必要和迫切的.

从榫卯节点结构形式来讲,我国目前对燕尾榫榫卯节点的研究较多. 吴洋等^[2]对不同拔榫状态下一榫燕尾榫构架进行竖向加载试验,提出静力作用下跨中荷载与挠度的变刚度线弹性力学模型. 杜彬^[3]对7个燕尾榫卯节点模型进行水平低周反复试验研究其抗震性能和缩尺效应的影响,通过人工模拟燕尾榫节点残损状态研究其抗震性能退化规律,提出燕尾榫弯矩-转角双折线模型. 徐明刚等^[4]对5个燕尾榫柱架进行低周反复加载试验,研究燕尾榫节点的破坏特点和耗能特性印证其半刚性的特点. 还有一些学者对直榫、管脚榫等结构形式的榫卯节点进行试验和理论研究,但相对来说较少. Han等^[5]对韩国传统木建筑的燕尾榫节点进行试验研究,发现榫卯节点的刚度和峰值荷载随着榫卯面积的增加而增加. 潘毅等^[6]分析直榫节点的受力机理,并提出考虑节点拔榫量影响的弯矩-转角简化公式. 淳庆等^[7]对馒头榫、透榫、半榫及瓜柱柱脚直榫4种榫卯节点的模型进行低周反复试

验,发现节点耗能能力从大到小依次为半榫、馒头榫、透榫、瓜柱直角榫. 陈春超^[8]对燕尾榫、透榫、半榫、瓜柱柱脚直榫节点进行单调加载试验,并结合有限元分析,进行力学分析和整体安全性评价. Bulleit等^[9]对4种带木钉的传统木结构的榫卯节点进行了力学性能试验,研究其在模拟重力作用下的力学性能,结果表明这4种榫卯节点承载力与节点相对转角之间基本呈线性关系. 通过总结发现,前人对燕尾榫的研究较多,而对透榫和半榫的研究较少. 透榫和半榫作为一种连接主要受力构件的结构形式,研究其力学性能是十分必要的.

从榫卯节点的加固材料来说,主要有2种,一种是碳纤维加固,另外一种为扁钢加固. 林华艺等^[10]对11根木梁进行静力受弯试验,研究发现经过碳纤维加固的燕尾榫卯接长木梁的抗弯性能与未加固相比显著提高. 闫维明等^[11]对马口铁和碳纤维加固的燕尾榫柱架进行低周反复试验,发现加固后的构架虽然仍有很好的变形性能但耗能能力不如原结构,碳纤维加固的榫卯节点效果优于马口铁加固. 薛建阳等^[12]通过振动台试验研究碳纤维布加固木结构模型抗震性能,分析其在地震作用的动力特性等. 周乾等^[13]研究钢构件加固燕尾榫节点的空间框架的抗震性能. 张富文等^[14]研究竹斜撑、钢箍和钢支撑加固的燕尾榫柱架的抗震性能. 陆伟东等^[15]对试验后的榫卯节点分别采用扒钉、碳纤维、钢销、U型铁箍、角钢、弧形钢板进行加固,发现弧形钢板的加固效果最好. 通过对前人研究进行总结发现钢、铁构件、铁钉加固可以有效提高榫卯节点的耗能能力和刚度,但加固件与木构件之间打孔连接方式会损坏构件,造成开裂等使其强度降低,而且加固件影响美观,不容易拆卸;碳纤维加固榫卯节点可以

提高节点的刚度和承载力,但使节点的耗能能力变差,而且该加固方法仅适用于破坏程度较小的榀卯节点,有一定的局限性。

基于此,以木结构古建筑榀卯节点加固的真实性、无损性和可逆性等为原则,同时保留榀卯节点的半刚性特征,允许其在小变形下滑移变形耗能,大变形下防止脱榀充分发挥出刚性的特点,本文提出 4 种不同的扁钢加固方式,分别应用于燕尾榀、透榀和半榀中,对比研究加固效果,为古建筑的修缮和加固提供参考。

1 试验概况

1.1 榀卯节点尺寸

根据宋《营造法式》^[16]中大木制度的规定,以宋代二等材为原型制作 12 个的缩尺比例为 1:3.52 的模型。其中燕尾榀、半榀、透榀模型各 4 个,除榀头尺寸外,其他尺寸均相同,具体尺寸如图 1 所示,其中柱头高出枋顶面 200 mm,以便于施加水平荷载,燕尾卯口处,用木块填实。材质选用俄罗斯樟子松,其材料力学性能见表 1。

表 1 木材材性参数

Table 1 Mechanical property index of material performance

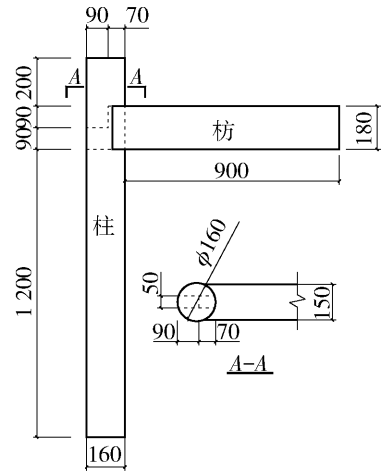
E_L	E_T	E_R	$f_{c,L}$	$f_{c,R}$	$f_{t,L}$
10 000	275	650	33.9	4.35	46

注: E_L 、 E_T 、 E_R 分别为纵向、径向、弦向抗压弹性模量;
 $f_{c,L}$ 、 $f_{c,R}$ 分别为纵向、径向抗压强度; $f_{t,L}$ 为纵向抗拉强度。

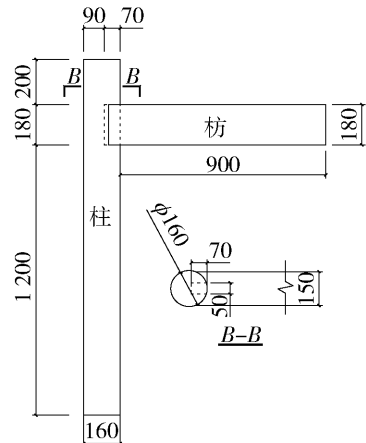
1.2 加固构件设计

针对目前榀卯节点普遍采用刚性加固的现状,以不改变榀卯节点特性为出发点,设计 4 类加固装置,如图 2 所示。

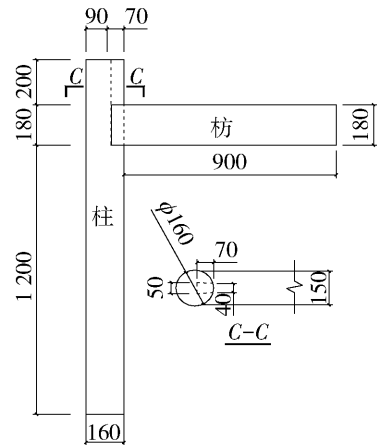
加固装置 1 柱箍和枋箍与木构件之间完全靠扁钢与木构件之间的摩擦力和机械咬合力来协同变形受力,活动槽的间隙允许卯口与榀头之间有相对滑动的空间,不改变榀卯节点的刚度和受力模式。加固装置 2 取消了活动槽,不允许榀头与卯口之间产生相对滑动,其他均与加固装置 1 相同。加固装置 3 与 1 相比增加了螺钉,将柱箍与柱钉住,不允许柱箍沿柱滑动。加固装置 4 与 3 相比取消了活动槽,其余均与加固装置 3 相同。对进行试验的榀卯节点进行编号,具体情况如表 2 所示,为更直观地对比加固效果,试验中采用的榀卯节点均为经过多次试验有损节点,其中 B0、T0、T0 为未加固的有损节点。



(a) 透榀构造及尺寸



(b) 半榀构造及尺寸



(c) 燕尾榀构造及尺寸

图 1 构件模型尺寸示意图(单位:mm)

Fig. 1 Sketch of the model (Unit:mm)

1.3 试验加载及测量

1.3.1 加载方案

为避免竖向加载引起的重力二阶效应^[17],试验将柱固定不动,运用千斤顶在柱端施加经过屋面荷载折算的柱端荷载 4 kN。用万能试验机对枋端施

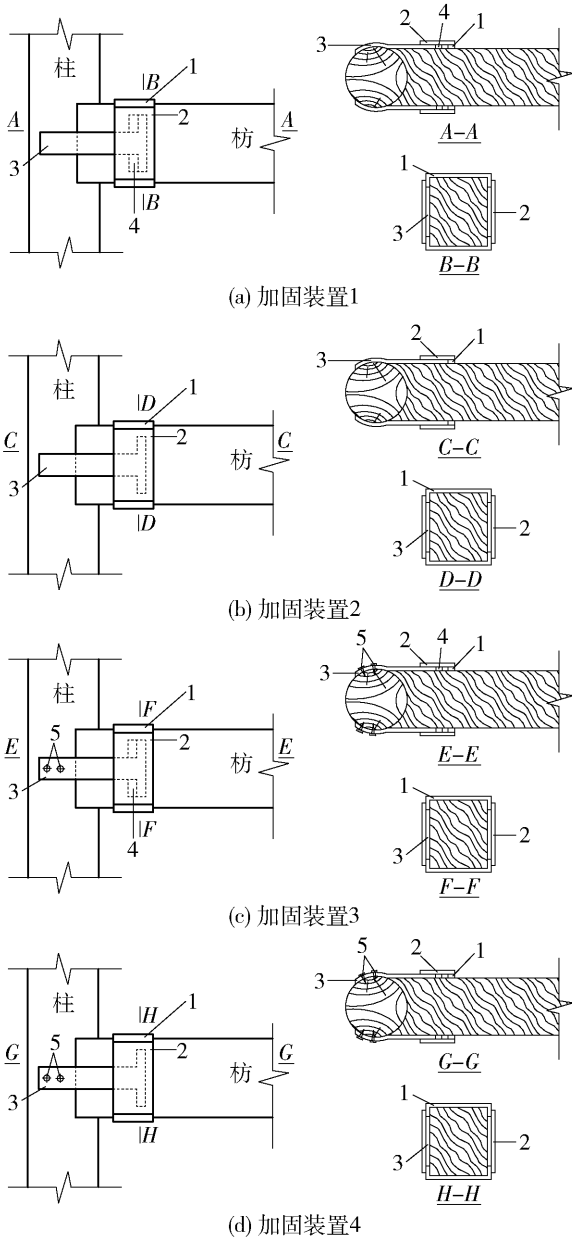


图2 加固装置示意图

Fig. 2 Strengthening method

表2 榫卯节点加固方案

Table 2 Strengthening scheme for the wooden joints

试件编号			加固装置	是否有活动槽	是否螺钉固定
半榫	透榫	燕尾榫			
B0	T0	Y0			
B1	T1	Y1	1	是	否
B2	T2	Y2	2	否	否
B3	T3	Y3	3	是	是
B4	T4	Y4	4	否	是

注:表中 B0 ~ B4, T0 ~ T4, Y0 ~ Y4 为试件编号.

加竖向位移荷载,使榫卯节点发生转动,见图3. 根据《建筑抗震试验方法规程》^[18]规定,对枋端施加位移荷载,控制位移取1、3、5、10、20、30、40、50 mm,每级位移荷载循环3次. 其中枋端加载点距卯口的距离为700 mm.



图3 加载装置照片

Fig. 3 Photo of testing apparatus

1.3.2 测量方案

试件的水平荷载及位移通过程序系统自动采集. 此外,在枋的上下表面距柱头200 mm处布置拉线式位移计测量拔榫情况,在枋侧布置倾角仪测定枋转角.

2 试验现象

进行试验的节点为经过多次试验的有损榫卯节点,加固前的榫头局部有轻微裂缝,卯口松动,榫卯嵌合不紧密,有残余脱榫,榫头和卯口的木纤维被压曲磨平摩擦力降低. 试验过程中,所有试件的试验现象基本类似.

所有试件加载后,榫头与卯口木材表面的纤维被压曲磨平,粗糙度进一步下降. 对于未加固节点,当控制位移在1~10 mm时,榫卯节点并未出现明显变化,这是由于榫头和卯口之间存在空隙,榫卯节点为松弛状态,小位移荷载下基本不受力. 随着位移荷载的增大和循环次数的增多,榫卯节点逐渐挤紧,接触面摩擦力增大,发出“吱吱”声,并随着位移荷载的增大而增大. 当枋回到水平位置时,榫卯节点实现复位,榫头有一定程度的拔出现象. 加固后的榫卯节点的节点,在初始加载时并无明显变化,随着位移荷载的增大和循环次数的增多,榫卯节点挤紧密实,发出“吱吱”声的同时,扁钢加固装置参与受力加固装置与木构件之间发生相对错动,留下滑

移的痕迹. 加固装置 1 和加固装置 2 的柱箍参与受力, 发生塑性变形被拉大, 致使加固效果降低. 当位移荷载接近 50 mm 时, 枋箍盖板由于胶接力量不足以适应当前变形而脱开, 致使个别加固构件破坏丧失加固能力, 其破坏状态如图 4 所示.

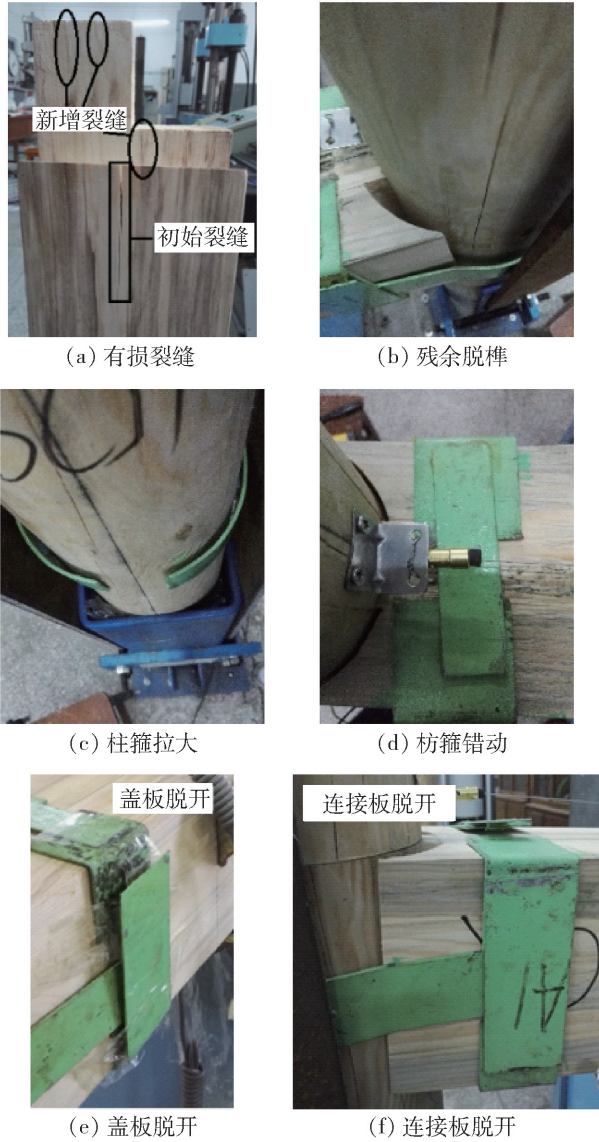


图 4 破坏形态
Fig. 4 Failure pattern

3 试验结果及分析

3.1 滞回曲线

半榫、透榫、燕尾榫加固前后的滞回曲线如图 5 所示. 通过滞回曲线可以看出:

1) 所有曲线呈 S 形, 有明显的“捏缩”效应. 这是由于榫卯节点之间有空隙, 加载过程中榫头和卯口之间产生滑动. 透榫节点的滞回曲线“捏缩”最为明显, 说明在加载过程中产生的滑动最大.

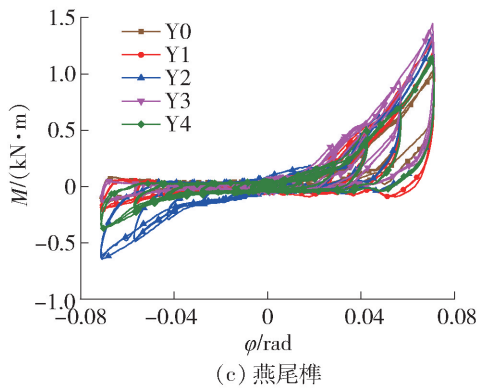
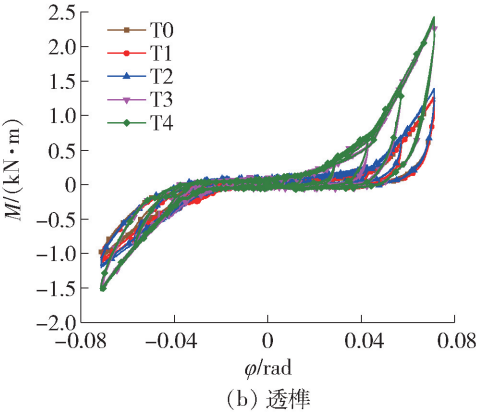
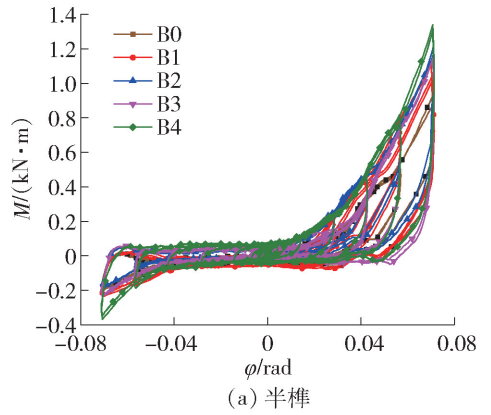


图 5 荷载-位移滞回曲线

Fig. 5 Load-displacement hysteresis loops

2) 对比发现, 透榫节点的峰值荷载最大, 半榫的最小. 3 种节点的刚度从大到小依次为透榫、半榫、燕尾榫.

3) 加固装置 1 与榫卯节点仅靠扁钢与木材之间的摩擦力和机械咬合力连接, 力量薄弱, 且活动槽允许柱箍和枋箍之间相互滑动, 随位移荷载加大, 柱箍与柱之间会发生滑动的同时也会被拉大而失效, 故滞回曲线面积和峰值点略有增加, 但不明显. 加固装置 4 柱箍和柱之间用螺钉连接不能错动, 并且取消活动槽, 其滞回曲线面积和峰值点明显增加.

4) 相同位移荷载作用下, 第 2、3 次荷载滞回曲线

基本相同,但峰值点较第1次荷载略有下降.这是因为第1次加载之后,节点已经发生了塑性变形或者是不可逆的损伤,故而会有下降趋势.

3.2 骨架曲线

半榫、透榫和燕尾榫加固前后的骨架曲线如图6所示,对骨架曲线进行分析总结发现:

1) 各节点的骨架曲线正反方向不对称.这是由于榫卯节点松动,榫头与卯口之间有空隙所致.榫卯节点竖直放置,在重力作用下,节点下方空隙小,而上方空隙大,正向加载时榫头与卯口之间滑移小,随位移荷载的增加,水平荷载上升较快.在反向加载时,榫头与卯口之间的空隙较大,加载过程中榫

头与卯口之间会产生较大滑移,致使水平荷载随位移荷载的增加而增长缓慢,最终导致正向加载时的刚度和水平力均大于反向加载.

2) 对于半榫和透榫来说,加固装置4加固后节点的峰值荷载提高的最明显,加固装置3次之,其次是加固装置2和1.对于燕尾榫来说,正向加载时加固装置对峰值荷载的提高效果排序为3、2、1、4,反向加载排序为2、4、1、3.峰值荷载具体提高情况见表3.

表3 各试件骨架曲线峰值点

Table 3 Peak points on skeleton curves of specimens

试件编号	峰值弯矩			
	正向/ (kN·m)	提高率/ %	反向/ (kN·m)	提高率/ %
B1	1.25	67.68	-0.29	19.40
B2	1.69	126.71	-0.28	14.74
B3	1.66	122.34	-0.35	41.35
B4	1.90	154.02	-0.51	106.62
T1	1.82	0.82	-1.60	6.28
T2	1.99	10.08	-1.68	11.89
T3	3.37	86.77	-2.15	42.90
T4	3.42	89.43	-2.19	45.57
Y1	1.73	16.30	-0.31	61.45
Y2	1.84	23.97	-0.88	366.35
Y3	1.94	30.36	-0.21	9.00
Y4	1.61	8.14	-0.54	185.71

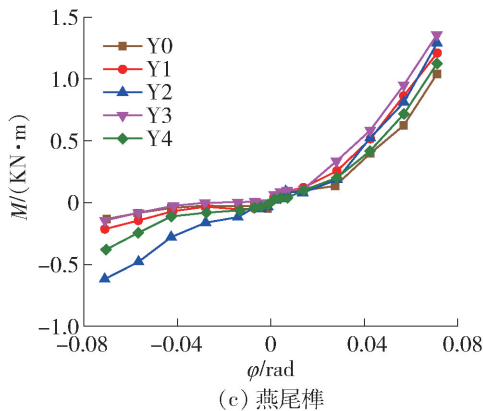
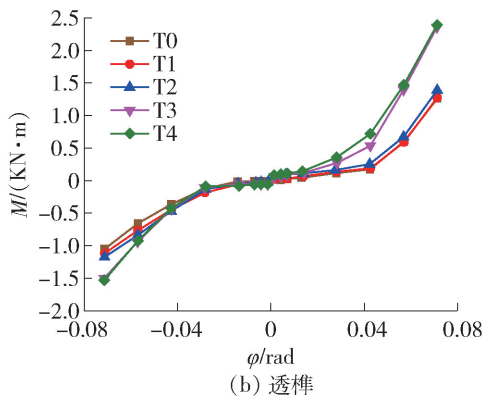
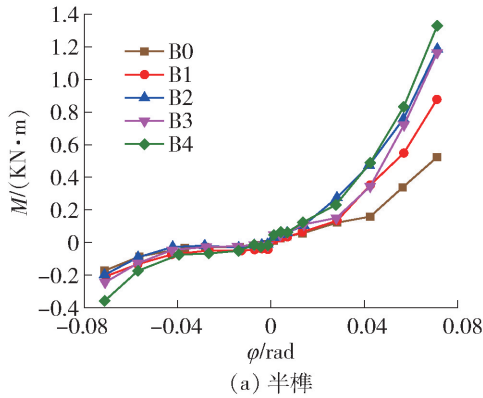


图6 各节点荷载-位移骨架曲线

Fig. 6 Load-deformation skeleton curves of the joints

3.3 刚度退化曲线

随着位移荷载的增大和荷载循环次数的增加会造成榫卯节点的刚度降低,本文采用割线刚度 $K_i^{[19-20]}$ 来反映各个试件的损伤累积情况,计算公式为

$$K_i = \frac{|+M_i| + |-M_i|}{|+\varphi_i| + |-\varphi_i|} \quad (1)$$

式中: M_i 为第 i 级荷载第1次循环的峰值弯矩; φ_i 为 M_i 对应的转角. 各节点的刚度退化曲线如图7所示. 从图7可以看出:

1) 各节点加固前后刚度退化曲线的变化规律相似. 加固后,节点的刚度均有不同程度的提高,其中以加固装置3和4最为明显.

2) 各节点加固前后的转动刚度在初始位移荷载为1 mm时较大,随后迅速降低,在位移荷载5~20 mm时达到最低,当位移荷载大于20 mm时刚度略有上升趋势,加固后节点刚度的这种变化趋势更为明显. 随着损伤的累积,榫卯节点的刚度会出现退化现象,故而刚度降低. 随后随着变形的增大,扁钢加固装置参与到受力中,且变形越大其贡献越为明显,故而后期刚度会出现上升趋势.

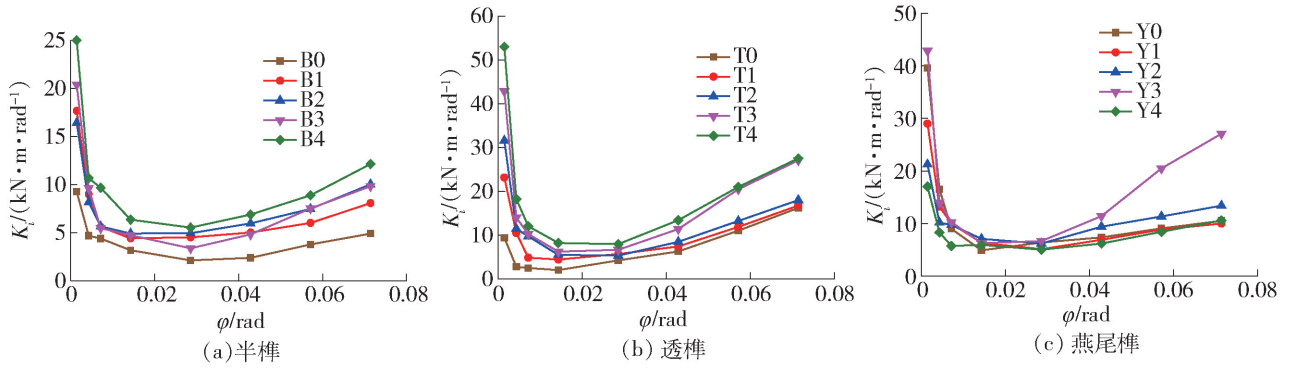


图 7 节点刚度退化曲线

Fig. 7 Rigidity degradation curves of joints

3.4 耗能能力

榫卯节点的耗能能力指节点对地震能量耗散的能力即抗震能力. 本文采用阶段耗能和累积耗能作为榫卯节点耗能能力的评价指标. 其中阶段耗能为各级位移荷载下 3 次完整循环后滞回曲线面积总和的平均值, 累计耗能为各级位移荷载下 3 次完整循

环滞回曲线面积的总和. 各榫卯节点试件的耗能对比曲线如图 8 所示.

由图 8 可以看出, 各试件加固前后耗能能力随位移荷载的增大大概呈抛物线式增长, 变化规律是一致的. 整体来说, 加固装置 1、2、3、4 在不同程度上对榫卯节点的耗能能力都有提高作用, 对于半榫

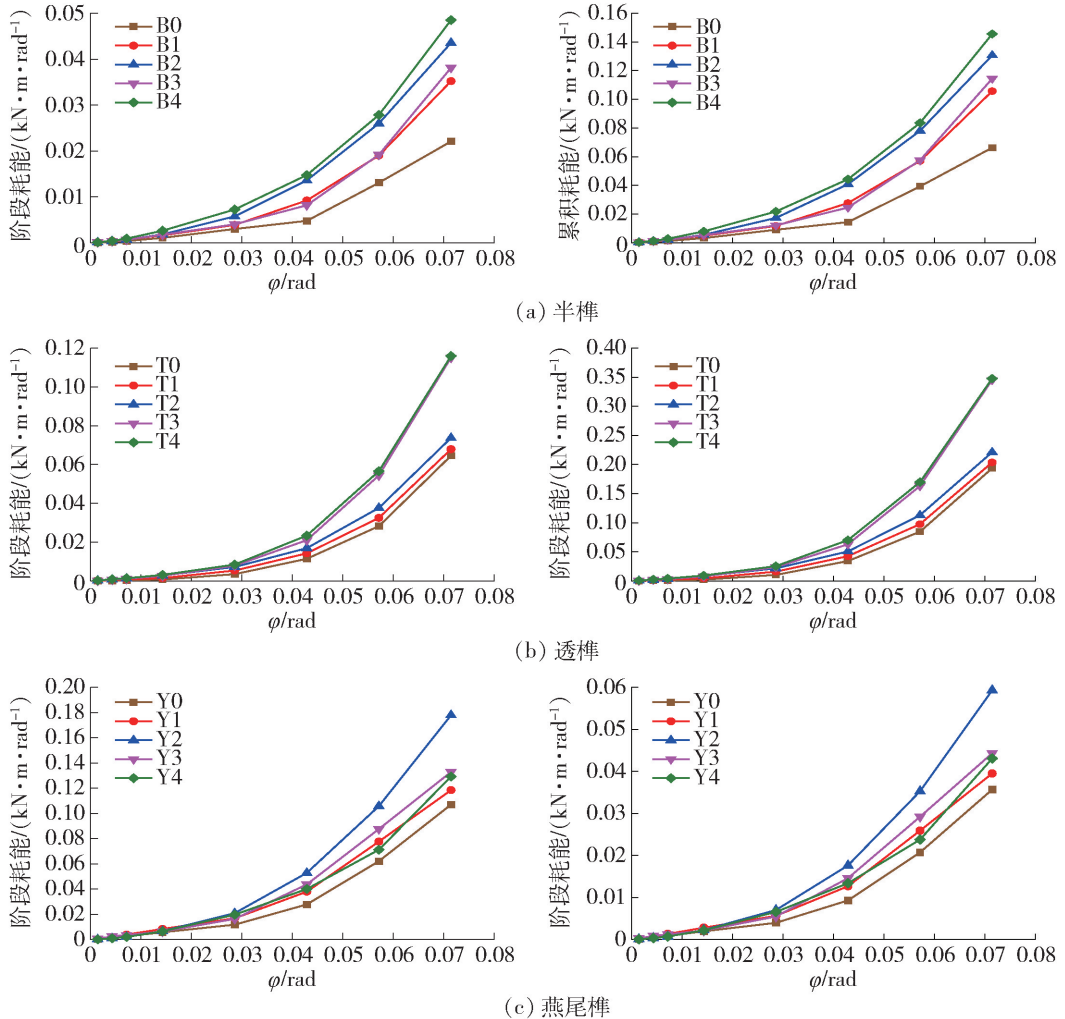


图 8 试件耗能对比曲线

Fig. 8 Energy dissipation curves of specimens

来说加固后节点耗能能力提高百分比分别为 59.47%、97.20%、72.68%、119.71%。透榫最大耗能能力分别提高了 5.22%、14.27%、78.32%、79.62%。燕尾榫最大耗能能力分别提高了 10.68%、66.19%、24.17%、20.70%。

4 结论

1) 榫卯节点加固前后的滞回曲线“捏缩效应”明显,且正反明显不对称,说明榫卯节点在加载过程中有滑移现象,加固后的节点依然保留半刚性特点。

2) 榫卯节点加固前后刚度随位移荷载变化的趋势类似。当位移荷载为 1 mm 时刚度较大,随后迅速降低,位移荷载增加到 20 mm 以后刚度又有上升趋势,但不明显。

3) 4 种加固装置对榫卯节点的抗震能力均有提高作用,其中柱箍加螺钉的加固装置 3 和 4 的效果最明显,可见增强加固件与木材之间的有效连接可以提高其峰值荷载、刚度和耗能能力。榫卯节点的阶段耗能和累积耗能随水平位移荷载的增大呈抛物线式增长。

4) 总体来说 4 种加固装置都有一定效果,但效果有限,主要原因有:加固件有加工误差,加固件的柱箍和枋箍与木材不贴合,导致加固件与试件之间摩擦力过小,没有达到预期效果;加固件盖板与枋箍之间采用胶接,连接效果不理想,易脱开变形失效;由于加工条件的限制,加固件采用的扁钢厚度较薄,在实验过程中容易被拉大变形失效。

5) 试验后的榫卯节点除榫头与卯口木材表面纤维进一步被压曲磨平粗糙度降低、榫头有轻微裂缝、卯口松动之外,其他部位均完好,无明显破坏,说明榫卯节点具有良好的变形能力。该类装置加固前后的榫卯节点在更大位移荷载下的力学性能和抗震机理还需进一步试验研究。

参考文献:

[1] 马炳坚. 中国古建筑木作营造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 121-122.

[2] 吴洋, 郭小东, 宋晓胜, 等. 拔榫状态下古建筑燕尾榫节点性能试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2014, 39(1): 43-47.

WU Y, GUO X D, SONG X S, et al. Experimental study on mechanical behavior of dovetail joint in historic buildings out of mortise[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2014, 39(1): 43-47. (in Chinese)

[3] 杜彬. 古建筑木结构燕尾榫节点抗震性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.

DU B. Experimental study on seismic behaviors of dovetail mortise-tenon joints of ancient timber buildings [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015. (in Chinese)

[4] 徐明刚, 邱洪兴. 中国古代木结构建筑榫卯节点抗震试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增刊2): 345-349.

XU M G, QIU H X. Experimental study on seismic behavior of mortise-tenon joints in Chinese ancient timber buildings [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31 (Suppl 2): 345-349. (in Chinese)

[5] HAN S R, LEE J J. Mechanical performance of Korean traditional wooden building of the column-girder tenon-joint by joint type [C] // 9th World Conference on Timber Engineering. Portland Oregon: Oregon State University Conference Services, 2006: 1965-1969.

[6] 潘毅, 王超, 唐丽娜, 等. 古建筑木结构直榫节点力学模型的研究[J]. 工程力学, 2015, 32(2): 82-89.

PAN Y, WANG C, TANG L N, et al. Study on mechanical model of straight-tenon joints in ancient timber structures [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(2): 82-89. (in Chinese)

[7] 淳庆, 吕伟, 王建国, 等. 江浙地区抬梁和穿斗木构体系典型榫卯节点受力性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(1): 151-158.

CHUN Q, LÜ W, WANG J G, et al. Mechanical properties of typical mortise-tenon joints of post and lintel construction and column and tie construction of timber buildings in Jiangsu province and Zhejiang province [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2015, 45(1): 151-158. (in Chinese)

[8] 陈春超. 古建筑木结构整体力学性能分析和安全性评价[D]. 南京: 东南大学, 2016.

CHEN C C. Integral mechanics property analysis and safety evaluation of ancient timber [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)

[9] BULLEIT W M, SANDBERG L. Behavior and modeling of wood-pegged timber frames [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(1): 3-9.

[10] 林华艺, 季韬, 代庭苇, 等. 燕尾榫样式对CFRP加固榫卯接长木梁抗弯性能影响试验[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 524-530.

LIN H Y, JI T, DAI T W, et al. Experimental study for the effect of dovetail style on the flexural behavior of timber beams extend by a mortise-tenon joint and strengthened by CFRP sheets [J]. Journal of Fuzhou

- University (Natural Science Edition), 2016, 44(4): 524-530. (in Chinese)
- [11] 闫维明,张博,周乾,等. 古建筑榫卯节点抗震加固试验[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(2): 89-95.
YAN W M, ZHANG B, ZHOU Q, et al. Aseismic strengthening experiments on Chinese ancient tenon-mortise joints [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(2): 89-95. (in Chinese)
- [12] 薛建阳,张凤亮,赵鸿铁,等. 碳纤维布加固古建筑木结构模型振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(11): 95-104.
XUE J Y, ZHANG F L, ZHAO H T, et al. Shaking table test of an ancient timber structure strengthened with CFRP [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(11): 95-104. (in Chinese)
- [13] 周乾,闫维明,周宏宇,等. 钢构件加固古建筑榫卯节点抗震试验[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(6): 1063-1071.
ZHOU Q, YAN W M, ZHOU H Y, et al. Experimental study on aseismic behaviors of Chinese ancient tenon-mortise joint strengthened by steel components [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(6): 1063-1071. (in Chinese)
- [14] 张富文,许清风,张晋,等. 不同方式加固的榫卯节点木框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(增刊1): 307-313.
ZHANG F W, XU Q F, ZHANG J, et al. Experimental study on seismic behavior of timber frames with mortise-tenon joints under different strengthening methods [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(Suppl 1): 307-313. (in Chinese)
- [15] 陆伟东,邓大利. 木结构榫卯节点抗震性能及其加固试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(3): 109-116.
LU W D, DENG D L. Experimental research on seismic performance of wooden mortise-tenon joints before and after reinforcement [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(3): 109-116. (in Chinese)
- [16] 李诚(宋). 营造法式[M]. 上海:商务印书馆, 1950: 73-75.
- [17] 谢启芳,郑培君,向伟,等. 残损古建筑木结构单向直榫榫卯节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(11): 143-150.
XIE Q F, ZHENG P J, XIANG W, et al. Experimental study on seismic behavior of damaged straight mortise-tenon joints of ancient timber buildings [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(11): 143-150. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国建设部. 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.
- [19] 薛建阳,李义柱,夏海伦,等. 不同松动程度的古建筑燕尾榫节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(4): 73-79.
XUE J Y, LI Y Z, XIA H L, et al. Experimental study on seismic performance of dovetail joints with different loose degrees in ancient buildings [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(4): 73-79. (in Chinese)
- [20] CHUN Q, YUE Z, PAN J. Experimental study on seismic characteristics of typical mortise-tenon joints of Chinese southern traditional timber frame buildings[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(9): 2404-2411.

(责任编辑 郑筱梅)