

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020026

穿斗式木结构榫卯节点加固的抗震性能研究

王双永¹, 郭婷², 邓昊¹, 周海宾¹

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)



摘要: 选取西南民居常见穿斗式木结构典型的直榫型边节点, 采用穿木销和穿钢销加固方案, 通过单调和低周往复加载足尺试验, 对比加固方法对直榫边节点抗震性能的影响。结果表明: 相比未加固节点, 两种加固节点的破坏程度均有所降低, 且有效抑制拔榫现象; 穿木销和穿钢销加固节点的初始刚度分别提高了50%和75%, 屈服弯矩分别提高了45%和73%, 极限弯矩分别提高了27%和69%, 耗能能力分别提高了200%和69%。两种方法均有效提高了穿斗式木结构直榫边节点的抗震性能。

关键词: 穿斗式木结构; 直榫节点; 加固; 抗震性能

中图分类号: S784; TU366.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2021) 01-0036-06

Study on Seismic Performance of Mortise-tenon Reinforcement Joints in Chuan-dou Style Timber Structure

WANG Shuang-yong¹, GUO Ting², DENG Hao¹, ZHOU Hai-bin¹

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In this study, the straight tenon-type edge joint was selected, which was the common typical joint in chuan-dou style timber structure of southwestern residential buildings in China. The reinforcement schemes were adopted, which including wood-pin and steel-pin. And the influence of two reinforcement methods on the seismic resistance of straight joints was compared, through the monotonic loading and low-cycle reversed loading full-scale tests. The results showed that the damage degree of the two reinforced joints were reduced, and could effectively inhibit the tenon pulling occurrences, compared with the unreinforced joints. Using wood-pin and steel-pin reinforcement, the initial stiffness of the joints was increased by 50% and 75%, the yield bending moment was increased by 45% and 73%, the moment-resisting capacity was increased by 27% and 69%, and the dissipated energy was increased by 200% and 69%, respectively. In conclusion, both methods effectively improved the seismic performance of mortise-tenon joints in chuan-dou style timber structure.

Key words: Chuan-dou style timber structure; mortise-tenon joints; reinforcement; seismic performance

收稿日期: 2020-02-26; 修改日期: 2020-12-16

基金项目: “十三五”国家重点研发计划“结构用木质材料制造及其在传统民居中的应用示范”(2018YFD0600303); 山西省重点研发计划(社会发展)项目“晋系早期木构古建筑保护与修复关键技术研究”(201803D31048)。

作者简介: 王双永(1988—), 男, 助理研究员。Email: tzlswsy@163.com

通讯作者: 周海宾, 男, 副研究员。Email: dvchow@126.com

我国古代木结构建筑主要包括穿斗式和抬梁式两类, 其中穿斗式木结构因用料小、整体性强, 被广泛用于我国西南地区传统民居建筑中。穿斗式木结构榫卯连接形式主要有直榫连接、燕尾榫连接、互补对接等。节点性能对穿斗式木结构整体承载性、稳定性及抗震性能有直接影响^[1-2]。地震引起的穿斗

式木结构破坏型式主要有：立柱折断、拉榫、折榫、拔榫、屋架倾斜或倒塌等。大量学者开展了针对木结构榫卯节点的理论及试验研究^[3-5]，笔者以西南传统民居常用的直榫型边节点作为研究对象，模拟地震受力状态，通过足尺试验方法对比分析加固节点与未加固节点的破坏程度、初始刚度、屈服弯矩、极限弯矩和耗能能力等抗震性能参数^[1,4-5]，探讨不同加固方案对直榫节点抗震性能的影响，以期为该种类型节点的优化和增强提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 直榫节点试件设计

试验材料选用贵州当地杉木（*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook），自然气干，平均含水率为9.028%，基本材性参数见表1。根据实地调研，结合试验要求，确定穿斗式木结构连接节点型式及尺寸参数，设计制作了穿斗式木结构直榫节点试件。装配后试件如图1所示。

表1 杉木材性参数

Tab.1 Mechanical properties of fir

抗弯强度/MPa	抗弯弹性模量/MPa	顺纹抗拉强度/MPa	顺纹抗压强度/MPa	横纹径向抗压强度/MPa	
				(全部)	(局部)
71.46	10192.50	76.54	48.68	4.68	2.38

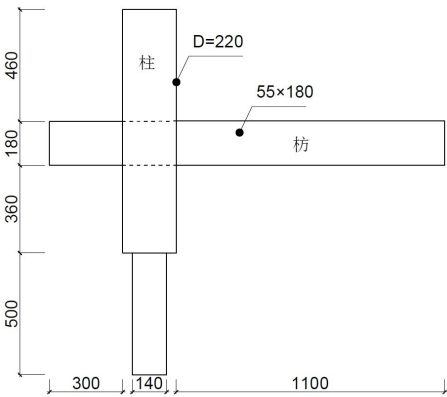


图1 穿斗式木结构直榫节点试件

Fig.1 The straight tenon-type joint in chuan-dou style timber structure

立柱长度为1 500 mm，直径为220 mm。为方便试验中对柱底施加约束，将立柱下端500 mm长度加工成140 mm×140 mm的方形截面，柱上卯口尺寸为180 mm×55 mm；穿枋长度为1 600 mm，横截面为180 mm×55 mm。

1.2 节点加固方案

西南民居中，在需要加固的直榫节点中心开圆通孔（直径24 mm）并穿木销。木销由传统木匠师傅手工砍削制作，横截面为近似圆形的多边形。根据实地调研，确定两种加固方案：

1) 穿木销法。为增大木销与孔的有效接触面积，在传统加固方法基础上，采用车削方式制作锥形圆木销，两端头直径分别为23 mm和26 mm，长度为280 mm，圆木销楔入销孔，如图2a。

2) 穿钢销法。以常用的M6×200钢制自攻螺钉为销件，考虑销直径尺寸近似等效原则，此处选用4根钢销，均布在直榫节点位置（图2b），相邻钢销间距60 mm。



a 穿木销



b 穿钢销

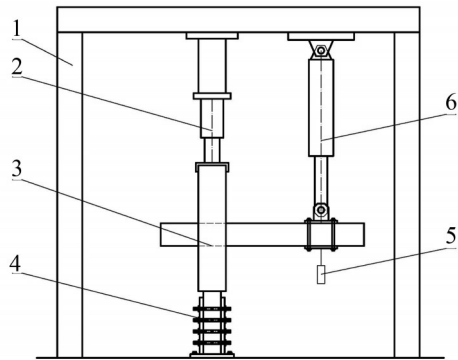
图2 节点加固方案

Fig.2 Reinforcement scheme of the joints

1.3 试验加载方案

为模拟实际地震中穿斗式木结构节点受力状况，试验采用单调加载和低周往复加载两种方式，以期获得直榫节点的单调加载弯矩-转角曲线和往复加载滞回曲线，间接评估节点加固前后的抗震性能。往复试验装置如图3所示：试件通过紧固夹具固定在施力架水平工作台上，使用千斤顶对试件立柱施加

10 kN的竖向荷载并保持不变,通过液压作动器与穿枋铰接并施加往复荷载。单调加载时,采用千斤顶搁置于穿枋上部往下施加竖向荷载。加载点处布置位移计以测得竖向位移,荷载通过测力元件测得。



1—施力架;2—千斤顶;3—木结构节点试件;4—紧固夹具;
5—位移计;6—液压作动器。

图3 直榫节点往复试验装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of cyclic test device for the straight tenon-type joints

加载方式参考欧洲标准 DIN EN 12512-2005 “Timber structures - Test methods - Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners”^[6]。单调加载时,采用力控制方式,以4 kN的增量逐级加载;低周往复加载参考单调加载得到的屈服转角 θ_y ,采用位移控制,前两级加载位移分别为 $0.25\theta_y$ 和 $0.5\theta_y$,各循环1次;然后分别以 $0.75\theta_y$ 、 $1.0\theta_y$ 、 $2.0\theta_y$ 、 $4.0\theta_y$ ……为位移幅值,各循环3次。加载过程中出现以下情况则停止加载:1)节点转角增加,荷载下降至峰值荷载的80%;2)施加荷载或位移接近加载设备的量程。

将测得荷载、位移数据代入以下公式可计算节点转角和弯矩。

$$\theta = \frac{180}{\pi} \times \arctan \frac{l}{L} \quad (1)$$

$$M = \frac{F \times L \times \cos \theta}{1000} \quad (2)$$

式中: θ —穿枋转角,°; L —加载点至节点中心距离,取值550 mm; l —位移计测得位移,mm; M —直榫节点承受弯矩,kN·m; F —施加荷载,kN。

试件按照加固方式分组(A为对照组,B为木销组,C为钢销组),每组试件数量为4套,其中3套按单调方式加载(A-1、B-1、C-1),试验结果取

3套试件测试数据的平均值。另外1套按低周往复方式加载(A-2、B-2、C-2),列于表2。

表2 试验分组情况

Tab.2 Test group factors

分组	编号	加载方式	试件数量
A 对照组	A-1	单调加载	3
	A-2	低周往复加载	1
B 木销组	B-1	单调加载	3
	B-2	低周往复加载	1
C 钢销组	C-1	单调加载	3
	C-2	低周往复加载	1

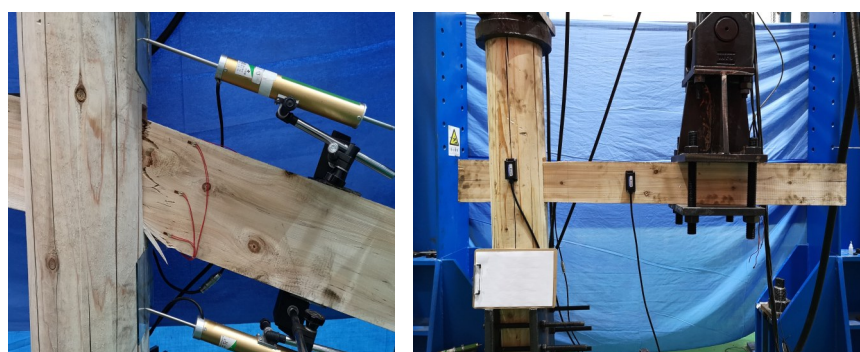
2 破坏现象与分析

2.1 破坏现象

图4a所示A组试件A-1在单调加载下的试验现象。穿枋和立柱卯口接触部位因相互挤压发生了明显的横纹压缩变形,穿枋右上侧受弯断裂,节点处未出现明显的拔榫现象。图4b所示试件A-2在低周往复加载下的试验现象。穿枋和立柱卯口上下两侧均因反复相互挤压发生了较明显的横纹压缩变形,但未发生断裂性破坏,节点处出现了明显的拔榫现象。

B组试件B-1在单调加载下的试验现象如图5a所示,穿枋和立柱卯口右下侧因相互挤压发生了明显的横纹压缩变形,穿枋左侧出现了顺纹劈裂现象,拆下的圆木销发生了轻微的压屈变形,节点处未出现拔榫现象。试件B-2在低周往复加载下的试验现象如图5b所示,穿枋与立柱卯口上下两侧发生了轻微的横纹压缩变形,未出现明显间隙及破坏,拆下的圆木销因受剪切力及扭转摩擦力而发生了扭裂,节点受圆木销约束未出现拔榫现象。

C组试件C-1在单调加载下的试验现象如图6a所示,穿枋和立柱卯口的左上及右下侧均受相互挤压而产生一定的横纹压缩变形,但没有其他明显破坏,拆下的自攻螺钉出现一定的弯曲变形,且左侧的1号和2号自攻螺钉变形量较大(右侧单调加载原因),节点处未出现拔榫现象。试件C-2在低周往复加载下的试验现象如图6b所示,穿枋和立柱卯口接触部位因相互挤压产生轻微的横纹压缩变形,因穿枋与立柱卯口接触的右下侧存在木节,节点提前发生破坏,自攻钉的加固作用并未完全发挥。

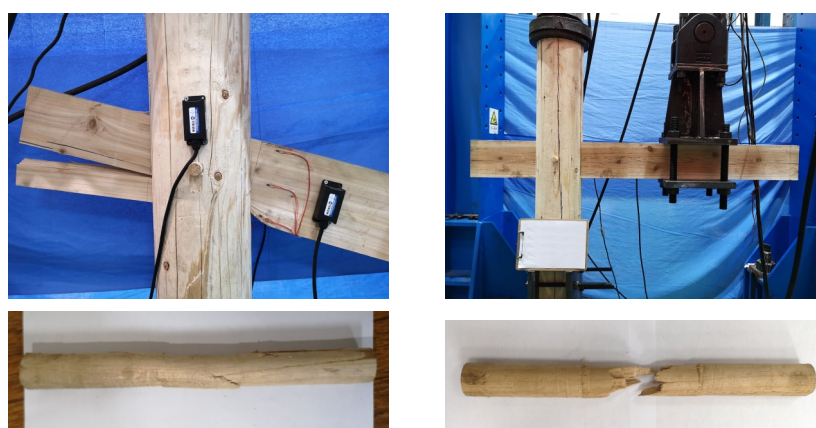


a A-1 单调加载

b A-2 低周往复加载

图4 A组试件的试验现象

Fig.4 Tests of group A



a B-1 单调加载

b B-2 低周往复加载

图5 B组试件的试验现象

Fig.5 Tests of group B



a C-1 单调加载

b C-2 往复加载

图6 C组试件的试验现象

Fig.6 Tests of group C

2.2 结果分析

2.2.1 单调加载

三组直榫节点试件的弯矩—转角关系曲线,如图7所示。在单调加载初期,节点所受弯矩与转角基本呈线性关系,即木材尚未发生塑性变形;随后弯矩增幅逐渐减缓,木材已发生塑性变形直至断裂破坏。B-1中1套试件节点在转角为 10° 附近对应的弯矩发生突降,是由于穿枋发生顺纹劈裂所致。C-1中初期的曲线斜率相对小一些,说明立柱与穿枋发生了相对滑移。

2.2.2 往复荷载

在加载—卸载—再反向加载—卸载的低周往复荷载作用下,往复荷载与试件相应产生的转角之间的关系曲线形成一个环,成为滞回环,在多次循环加载后,所形成的系列滞回环便构成了试件的滞回曲线。低周往复荷载作用中,每次加载循环弯矩—

转角曲线达到最大峰值点的连线所得到的包络线成为骨架曲线。他和滞回曲线合称恢复力曲线,是研究非弹性地震反应的重要参数^[7]。

低周往复加载下的试件A-2、B-2及C-2恢复力曲线分别如图8a、8b和8c所示,包括滞回曲线和骨架曲线。

由图8可知,三组试件在低周往复加载作用下,其滞回曲线呈现明显的捏拢现象,这是由于节点存在初始缝隙所致,此阶段木结构直榫节点主要依靠榫卯摩擦力抵御荷载,随荷载增加出现滑移;滞回环较为饱满,说明木结构直榫节点表现出了较好的耗能能力;比较每次的循环加载曲线,后一次的曲线斜率比前一次逐渐减小,反映了木结构直榫节点刚度不断地退化。极限荷载下对应的节点转角范围体现了木结构直榫节点较好的变形能力,对比可知,两种加固方法均提高了节点的变形能力。

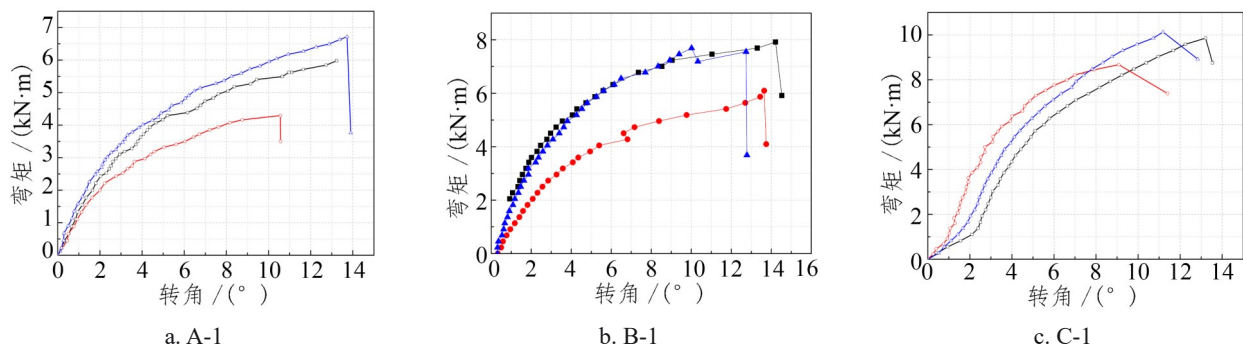


图7 单调荷载作用下三组试件的弯矩-转角曲线

Fig.7 Moment-rotation average curves of the three group specimens under the monotonic load

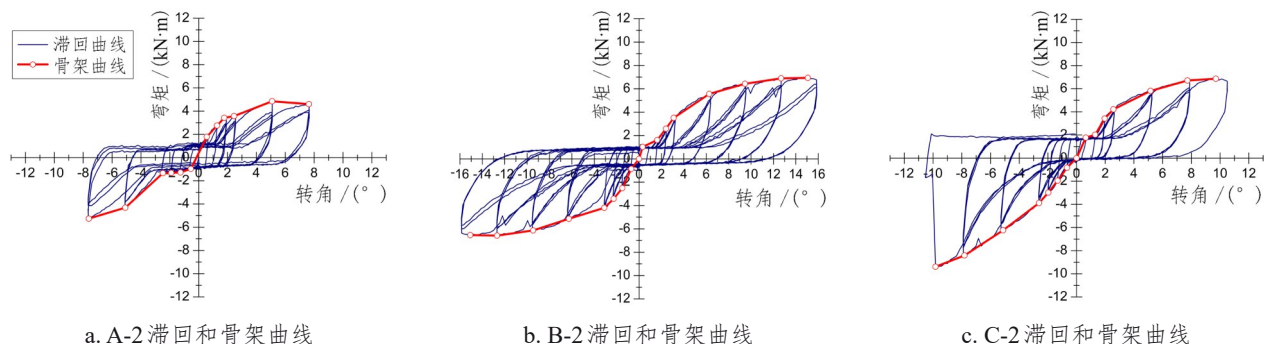


图8 低周往复加载下三组试件的恢复力曲线

Fig.8 Recovery force curves of the three group specimens under the low-cycle reversed load

综合对比三组曲线,试件B-2恢复力曲线最佳,C-2次之,A-2最差,说明加固试件B-2和C-2各项性能较未加固对照组A均有所提高。

节点的抗弯力学性能参数根据EN12512-2005^[6]中规定求得,如图9所示。初始刚度 K_0 为初始线性段的斜率;弯矩-转角曲线中两近似线性段的交点分

别对应节点的屈服转角 θ_y 和屈服弯矩 M_y ；曲线峰值对应节点的最大弯矩，表征其抗弯承载能力；曲线的加载结束点对应节点的极限转角 θ_u 和极限弯矩 M_u ；延性系数 $\mu=\theta_u/\theta_y$ 。根据《建筑抗震试验规程》^[8]，节点的耗能能力为滞回环所包围的面积。

单调加载和低周往复加载下的各试件力学性能参数统计如表3所示。从表中数据可以看出，与A-2相比，B-2的节点初始刚度提高了50%，屈服弯矩提高45%，极限弯矩提高27%，耗能能力提高200%；C-2的节点初始刚度提高了75%，屈服弯矩提高73%，极限弯矩提高69%，耗能能力提高69%；受穿斗式木结构直榫节点结构类型限制，三类试件的屈服转角相差无几，极限转角也基本一致；B-2与A-2的延性大致相同，而C-2的延性略有降低，主要原因是木节的存在导致了节点的提前破坏。

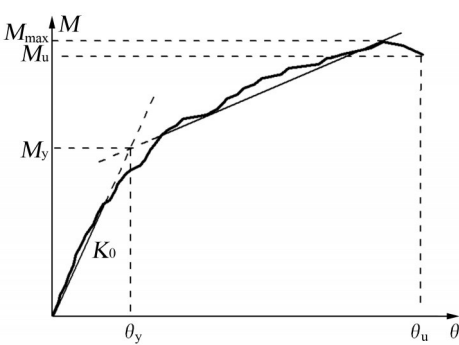


图9 试件抗弯性能参数
Fig.9 Moment-resisting performance parameters of specimens

综上，穿木销和穿钢销两种方法均能有效提高穿斗式木结构直榫边节点的承载抗震性能。穿钢销加固导致节点延性有所降低，耗能能力不如穿木销加固优势明显，但其他性能均优于穿木销加固。

表3 各组试件抗弯与抗震性能参数

Tab.3 Moment-resisting performance and seismic resistance of the specimens

试件编号	初始刚度 K_0 (kN·m/°)	屈服转角 θ_y (°)	屈服弯矩 M_y (kN·m)	最大弯矩 M_{max} (kN·m)	极限转角 θ_u (°)	延性系数 μ	试件编号	耗能能力/ J
A-1	1.200	2.700	3.340	5.660	12.510	4.620	A-2	235
B-1	1.802	3.002	4.846	7.190	13.655	4.721	B-2	713
C-1	2.099	3.866	5.774	9.555	12.594	3.376	C-2	397

3 结论

- 1) 穿斗式木结构直榫边节点本身具有一定的抗震性能，因而被广泛应用于我国传统民居木结构建筑中，但其抗震能力有限，容易出现拔榫，无法抵御强震荷载，仍需进一步加固。
- 2) 未加固节点在单调加载下穿枋发生断裂破坏，在往复加载下发生明显的拔榫现象；穿木销和穿钢销加固节点较未加固节点破坏程度均有所降低，且均能有效抑制拔榫现象。
- 3) 穿木销和穿钢销加固的节点，其初始刚度分别提高了50%和75%，屈服弯矩分别提高了45%和73%，极限弯矩分别提高了27%和69%，耗能能力分别提高了200%和69%。两种方法均能有效提高穿斗式木结构直榫边节点的抗震性能。穿木销和穿钢销加固方案在实际应用时，应综合考虑建造地不同建筑类型抗震设计要求和穿斗式木构架整体抗震性能。

参考文献：

[1] 李佩. 穿斗式木结构榫卯连接抗震性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.

[2] 胡旭. 黔东南地区传统民居穿斗式木结构力学性能与评估方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.

[3] 谢启芳, 王龙, 郑培君, 等. 传统木结构单向直榫节点转动弯矩-转角关系理论分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(7): 111-117. XIE Q F, WANG L, ZHENG P J, et al. Theoretical analysis on moment-rotation relationship of straightmortise-tenon joints for Chinese traditional wooden buildings[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2017, 44(7): 111-117.

[4] 薛建阳, 任国旗, 许丹, 等. 传统民居穿斗式木结构榫卯节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(10): 158-167. XUE J Y, REN G Q, XU D, et al. Experimental study on seismic performance of dowel joints in traditional Chuan-Dou style timber structures[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(10): 158-167.

[5] 谢启芳, 郑培君, 向伟, 等. 古建筑木结构直榫节点抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(3): 232-240. XIE Q F, ZHENG P J, XIANG W, et al. Experimental study on seismic behavior of straight mortise-tenon joints of ancient timber buildings[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 35(3): 232-240.

[6] DIN EN 12512-2005 Timber structures - Test methods - Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners[S].

[7] 范鹏. 钢筋混凝土十字截面柱抗震性能试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.

[8] 建筑抗震试验规程, JGJ/T 101-2015[S].