

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.035



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



穿斗式木结构中节点的抗弯性能试验研究

郭婷¹, 杨娜¹, 周海宾², 王双永²

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

摘要:以西南传统民居穿斗式木结构穿销中节点为研究对象,设计制作了2个足尺横向中节点和2个足尺纵向中节点模型试件,分别对两类节点进行单调加载和低周往复加载试验,得到两类节点的破坏模式、抗弯承载力、抗弯刚度、延性和耗能能力。结果表明:横向中节点主要在榫卯挤压区域发生嵌压塑性变形以及在木销受荷区域发生弯剪变形,纵向中节点易在榫颈位置发生折断破坏;横向中节点的初始刚度较纵向中节点高,横向中节点的抗弯承载力可达纵向中节点的2倍;横向中节点和纵向中节点的滞回曲线均表现出明显的捏拢和滑移现象,横向中节点的耗能能力较强;穿斗式木结构横向中节点和纵向中节点都具有良好的变形能力,横向中节点表现出较好的延性,但纵向中节点的延性很低;纵向中节点是穿斗式木结构中的薄弱节点,需要在穿斗式木结构的安全维护中重点关注。

关键词:穿斗式木结构;中节点;抗弯性能;抗震性能

中图分类号:TU366.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)02-0083-08

Experimental study on the moment-resisting performance of interior joints with wooden peg

GUO Ting¹, YANG Na¹, ZHOU Haibin², WANG Shuangyong²

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

Abstract: In order to study the moment-resisting performance and seismic behavior of the interior joints with wooden peg of Chuan-Dou type wooden frame, two full-scale interior beam-column joint specimens of transverse frame and two that of longitudinal frame were designed and fabricated. Monotonic loading and low cyclic loading tests were carried out on the two types of joints, respectively. The failure mode, moment-resisting capacity, flexural stiffness, ductility and energy dissipation of the two types of joints were obtained. The results showed that the failure mode of transverse interior joint was the embedment plastic deformation on the mortise and tenon contacting area as well as the bending-shear combined

收稿日期:2020-12-02

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2018YFD0600303);北京市自然科学基金(8151003)

作者简介:郭婷(1984-),女,博士生,主要从事古建筑木结构研究, E-mail:16115319@bjtu.edu.cn.

杨娜(通信作者),女,教授,博士生导师, E-mail:nyang@bjtu.edu.cn.

Received:2020-12-02

Foundation items:National Key Research and Development Project of China (No. 2018YFD0600303); Natural Science Foundation of Beijing (No. 8151003)

Author brief:GUO Ting (1984-), PhD Candidate, main research interest: traditional timber structure, E-mail: 16115319@bjtu.edu.cn.

YANG Na (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: nyang@bjtu.edu.cn.

deformation of wooden peg, while longitudinal interior joint was broken off at the neck of tenon. The initial stiffness of the transverse interior joint was higher than that of the longitudinal interior joint. The moment-resisting capacity of transverse interior joint could reach two times of that of longitudinal interior joint. The hysteretic loops of the two types of joint exhibited obvious squeezing and slip. The energy dissipation of the transverse interior joint was higher than that of the longitudinal interior joint. Both the two types of joint exhibited good deformation capacity, the transverse interior joint exhibited good ductility, while the longitudinal interior joint exhibited poor ductility. The longitudinal interior joint in the frame is the weakest part and need to be noted on the safety maintenance of the Chuan-Dou type wooden frame structure.

Keywords: Chuan-Dou type wooden frame; interior joint; moment-resisting performance; seismic behavior

穿斗式木结构是中国传统建筑木结构的重要结构形式之一,广泛分布于中国西南地区。穿斗式木结构在横向用一根穿枋贯通多根立柱形成一榀排架,在纵向用斗枋连接横向排架形成空间框架结构。其梁柱一般采用榫卯进行连接,横向梁柱节点多为直榫连接,纵向梁柱节点则形式多样,有透榫连接、燕尾榫连接、榫卯搭接等。

近年来,一些学者针对穿斗式木结构的部分典型节点进行了力学性能研究,李佩^[1]、郭涛^[2]针对穿斗式木结构的穿销直榫节点进行了理论分析及试验研究,得到了节点的弯矩-转角曲线模型。Chang等^[3-4]考虑直榫节点的榫卯初始缝隙,建立了考虑初始缝隙的直榫节点的弯矩-转角曲线模型,并通过试验进行了验证。陈春超等^[5-6]进行了透榫节点和直榫节点的单调加载试验,建立了节点的弯矩-转角简化模型。谢启芳等^[7-8]基于直榫节点理论公式,探讨了榫头长度、宽度和摩擦系数对节点抗弯性能的影响,并通过试验研究了不同形式直榫节点的抗震性能。薛建阳等^[9]以穿斗式木结构栓榫节点为研究对象,探讨了不同木栓截面形状及尺寸对节点变形能力及承载能力等力学性能的影响,结果表明,采用不同截面形式木销的半榫节点的破坏形态不同,且木销的存在能够提高榫卯节点的变形能力。

上述研究大多针对木结构直榫和透榫边节点展开,关于直榫中间节点的研究很少,目前尚无关于穿斗式木结构纵向中节点的研究报道。笔者基于贵州黔东南地区穿斗式木结构的构造形式,设计制作了4个中间节点足尺模型试件,包括2个横向中节点试件和2个纵向中节点试件,研究了两类节点的破坏形态、弯矩承载力、抗弯刚度、延性和耗能能力等,可为全面掌握穿斗式木结构的力学性能提供参考依据。

1 试验概况

1.1 模型设计与制作

穿斗式木结构横向中节点和纵向中节点的构造形式如图1所示,横向中节点为直榫节点,由一截面不变的穿枋(梁)贯穿柱上卯口,并辅以木销定位;纵向中节点为榫卯搭接节点,两侧斗枋的榫头分别穿透柱上卯口,并辅以木销定位。试验试件的具体构造及尺寸如图2所示,分别对两类节点试件进行单调加载试验和往复加载试验,试件名称和加载方式见表1。

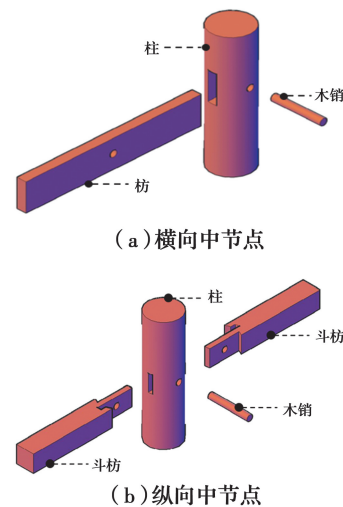


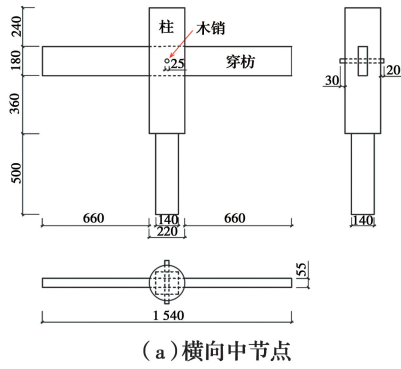
图1 穿斗式木结构中节点构造形式

Fig. 1 Construction of interior joints of Chuan-Dou type wooden frame

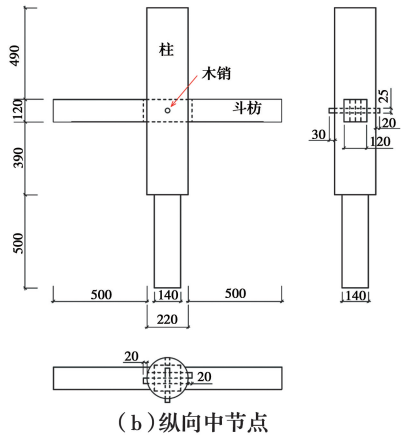
表1 试验工况

Table 1 Test conditions

节点形式	试件编号	加载方式
横向中节点	T1	单调加载
	T2	往复加载
纵向中节点	L1	单调加载
	L2	往复加载



(a) 横向中节点



(b) 纵向中节点

图 2 试件尺寸

Fig. 2 Dimension of specimens

试件由贵州当地杉木制作而成,根据《木材物理力学性质试验方法》^[10]进行材性试验,得到杉木的物理力学性能参数,如表 2 所示。

表 2 杉木物理力学性能参数

Table 2 Mechanical properties of fir MPa

数值	抗弯强度	抗弯弹性模量	顺纹抗拉强度	顺纹抗压强度	横纹局部径向抗压强度
平均值	71.46	10 192.50	76.54	48.68	2.38
变异系数	0.10	0.07	0.13	0.12	0.13

注:每个参数采用 20 个试件测得。

因加工制造误差及木材干缩导致节点试件榫卯之间存在初始缝隙,缝隙位置及具体数值如图 3 和表 3 所示。

表 3 试件初始缝隙

Table 3 Initial gaps of mortise-tenon specimens

试件编号	缝隙/mm			
	①	②	③	④
T1	6	2	4	0
T2	3	1	2	4
L1	1	5	3	2
L2	1	1	1	0

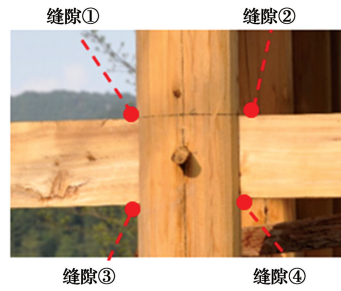
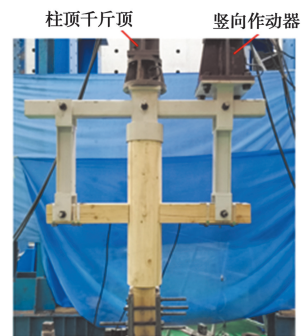


图 3 节点缝隙位置及编号

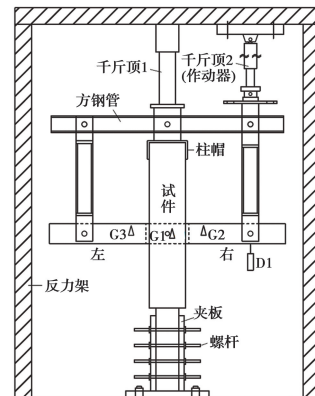
Fig. 3 Gap positions and numbers of joint

1.2 试验方案

1.2.1 加载方案 为实现中节点左右两侧位移的协同加载,设计了如图 4 所示的杠杆臂加载装置:柱顶搁置柱帽,柱帽顶部与 3 块钢板组成方形槽孔,方钢管贯通此槽孔,一根螺杆穿过两块竖向钢板和方钢管中间螺孔,方钢管两侧分别通过螺杆与左侧竖向钢杆顶部的 U 型头及右侧竖向钢杆顶部的方形槽孔铰接,竖向钢杆底部的 U 型头通过螺杆与穿枋或斗枋铰接,竖向钢杆和方钢管、枋之间预留足够空隙,以保证方钢管和枋在试验过程中的自由转动。



(a) 实景图



(b) 示意图

图 4 加载装置和测点布置

Fig. 4 Loading setup and layout of measuring points

单调加载时,加载系统由千斤顶、油泵控制台和反力架组成,反力架上安装两个千斤顶,千斤顶 1 施

加 10 kN 柱顶竖向荷载以模拟实际结构中柱顶的受力情况,千斤顶 2 施加梁上竖向荷载为节点提供弯矩;为保证柱在加载过程中不发生平面内转动,柱根部通过夹板以及螺杆与地梁固定刚接。往复加载测试中则将千斤顶 2 更换为竖向作动器,以施加竖向位移,其他设备与单调加载装置相同(图 4(a))。

单调加载试验采用力控制,每步增加 0.4 kN,当出现以下任一情况时,停止加载:1)荷载或位移达到加载设备量程;2)继续加载荷载值不变;3)荷载掉落至最大荷载的 80%或节点发生破坏。低周往复加载试验参考欧洲规范 EN12512-2001^[11]中的规定,采用变幅转角控制的加载方式,加载位移为 $0.25\theta_y$ 和 $0.5\theta_y$ 时,各加载 1 个循环;加载位移为 $0.75\theta_y$ 、 $1.0\theta_y$ 、 $2.0\theta_y$ 和 $4.0\theta_y$ 时,各加载 3 个循环,直至节点发生破坏或达到加载设备量程, θ_y 为节点屈服转角,由单调加载试验结果得到。纵向中节点的单调加载试验结果表明此类节点接近脆性破坏,因此,根据最大弯矩对应的转角 θ_{max} 确定节点往复加载的幅值,分别取 $0.1\theta_{max}$ 、 $0.2\theta_{max}$ 、 $0.4\theta_{max}$ 、 $0.6\theta_{max}$ 、 $0.8\theta_{max}$ 、 θ_{max} 作为加载幅值,其中,前两个幅值加载 1 个循环,其他幅值均加载 3 个循环。

1.2.2 量测内容 试验中所施加的荷载由千斤顶或作动器的测力元件测得。测点布置如图 4 所示。1)在节点中心、距柱边缘左右两端约 100 mm 的穿枋(斗枋)上各布置一个倾角计(G1、G2 和 G3),用于测量各构件的转角;2)在枋上施加荷载位置处布置 1 个位移计 D1,用于测量加载点的竖向位移,可计算得到枋的转角,并和倾角计计算得到的结果进行对比验证。试验中的位移和倾角通过 DHDAS 动态信号采集分析系统自动采集。

节点弯矩由式(1)计算得到,其中 F 为千斤顶或作动器施加的荷载, L 为加载点至节点转动中心的距离,试验中为 500 mm;节点转角由式(2)或式(3)计算得到。其中, θ_L 为左侧枋转角; θ_R 为右侧枋转角。

$$M = F \times L \quad (1)$$

$$\theta_L = G_3 - G_1; \theta_R = G_2 - G_1 \quad (2)$$

$$\theta = \left(\arctan \frac{D_1}{L} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (3)$$

2 试验现象和破坏模式

2.1 横向中节点

横向中节点试件 T1 的卯口和榫头顶面之间存

在 2~6 mm 的初始缝隙。在单调加载初期,随着弯矩增加,榫头发生转动,构件之间因相互摩擦挤压发出轻微“嗝嗝”声;当榫头表面与卯口接触后,榫头发生横纹挤压变形,且随着转角增大,变形加剧,嵌压区域附近木纤维因弯曲效应被不断拉断,节点的“嘎嘣”声愈加频繁,但节点能继续承载,直至节点转角达到 18.64° (1/3.08) 时,千斤顶达到量程,加载结束。此时节点转角已远远超过《古建筑木结构维护与加固技术规范》(GB 50165—92)中的古建筑木结构弹塑性层间位移角限值 $1/30$ (0.03 rad),且试件 T1 尚有继续承载的潜能。拆卸试件后可以看到,榫头在榫卯挤压区域发生严重塑性变形(图 5(a));木销因局部受荷发生了弯剪变形(图 5(b))。



图 5 试件 T1 破坏形态

Fig. 5 Failure mode of specimen T1

横向中节点试件 T2 在低周往复荷载作用下,也于榫卯接触位置发生嵌压变形,嵌压区域附近木纤维因受弯被拉断,如图 6 所示。拆卸试件后发现木销无明显变形。



图 6 试件 T2 破坏形态

Fig. 6 Failure mode of specimen T2

2.2 纵向中节点

纵向中节点试件 L1 存在 1~5 mm 的初始缝隙。在单调加载初期,节点因构件之间相互摩擦挤压发出轻微“嗝嗝”声;随着转角增大,榫卯接触发生挤压变形;当梁柱间相对转角达到 5.8° 时,节点发出

较大嘎嘣声,右侧斗枋枋端下部嵌压进柱中;继续加载过程中,嘎嘣声愈加频繁,随着一声很大的“嘎嘣”声,荷载掉落,卸载超过最大荷载的20%,认为节点发生破坏,停止加载。拆卸试件后,观察到节点除了在榫卯接触处发生嵌压塑性变形外,榫头销孔附近木材发生开裂(图7(a)、(b)),木销发生弯剪变形(图7(c))。

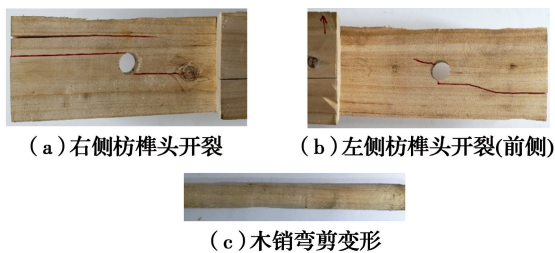


图7 试件L1破坏形态

Fig. 7 Failure mode of specimen L1

纵向中节点试件L2在往复加载初期,节点无明显现象,当榫卯接触处挤紧后,榫头发生轻微嵌压;当试件向上加载至转角位移 2.3° 的第3个循环时,左侧斗枋榫头上部压屈劈裂;继续加载,卯口处构件的压屈变形愈加严重,节点因木纤维断裂发出“嘎嘣”声;当试件向上加载至转角位移 3.5° 的第1个循环时,左侧斗枋榫头底部压屈断裂;继续加载过程中,节点因木纤维开裂不断发出的“噼啪”声越来越大且愈加频繁;当试件向上加载至转角位移 4.6° 的第1个循环过程中,木纤维进一步断裂,掉荷严重,表明节点失效。试件拆卸后,观察到节点在榫颈位置发生折断,销孔附近发生斜纹开裂,木销发生弯剪变形(图8(a)~(c))。

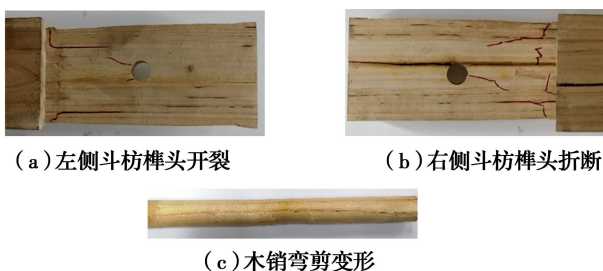


图8 试件L2破坏形态

Fig. 8 Failure mode of specimen L2

3 单调加载试验结果

试件T1和L1的单调加载试验结果如图9所示。从图9(a)中可以看出,试件T1在加载初始阶段,其弯矩-转角基本呈线性关系;榫卯接触发生横

纹压屈变形后,节点试件进入塑性阶段。从图9(b)中可以看出,试件L1自加载开始的较长时间段内,其弯矩-转角基本呈线性关系,转角达到 4.8° 后,试件进入塑性阶段,转角为 5.8° 时,达到最大弯矩,之后弯矩迅速降低,直至节点试件失效;弯矩-转角曲线表现出塑性段很短的特征,说明纵向中节点的延性较弱。

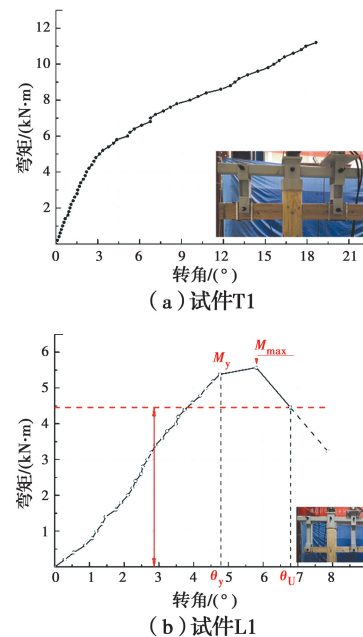


图9 单调加载作用下的弯矩-转角曲线

Fig. 9 Moment-rotation curves under monotonic loading

试件T1和L1的初始转动刚度、抗弯承载力及延性参数列于表4。其中,抗弯承载力为弯矩-转角曲线中的弯矩最大值,即最大弯矩 M_{max} ;屈服弯矩 M_y 和屈服转角 θ_y 根据规范BS EN 12512-2001^[11]中的规定,采用两拟合直线的交点确定;初始刚度 K_{ini} 由第1段直线斜率确定;延性 $\mu = \theta_u / \theta_y$, θ_u 为极限转角。从表4中可以看出:横向中节点试件T1和纵向中节点试件L1的初始刚度分别为 1.70 、 $1.29 \text{ kN} \cdot \text{m}/(\text{^\circ})$,横向中节点的初始刚度是纵向中节点初始刚度的1.3倍;试件T1和L1的最大弯矩分别为 11.20 、 $5.57 \text{ kN} \cdot \text{m}$,前者为后者的2.0倍;试件T1和L1的延性分别为5.62和1.43,说明横向中节点的延性远高于纵向中节点,纵向中节点因榫头宽度较小,在弯矩荷载作用下易在榫颈位置发生突然断裂,接近脆性破坏。前述试件T1的试验结果表明,其尚有继续承载的能力,因此,试件T1的实际抗弯承载力及延性高于表4中的数值。这进一步说明纵

向中节点的初始刚度、抗弯承载能力及延性均较横向中节点弱,是穿斗式木结构中的薄弱节点。

表 4 节点力学性能参数

Table 4 Mechanical properties of joints

试件 编号	初始刚度 $K_{ini}/(kN \cdot m \cdot (^{\circ})^{-1})$	屈服转角 $\theta_y/(^{\circ})$	屈服弯矩 $M_y/(kN \cdot m)$	极限转角 $\theta_u/(^{\circ})$	最大弯矩 $M_{max}/(kN \cdot m)$	延性 系数 μ
T1	1.70	3.32	5.82	18.65	11.20	5.62
L1	1.29	4.76	5.38	6.78	5.57	1.43

4 低周往复加载试验结果

4.1 滞回曲线

图 10 为试件 T2 和 L2 的弯矩-转角滞回曲线。可以看出:1)试件在加载初期存在明显的“捏拢”现象和滑移现象,这是由于节点榫头和卯口之间存在初始缝隙所致,且随着加载位移的增大,“捏拢”和滑移现象愈加明显,这是由于累积塑性变形所致;2)两类节点的滞回曲线在正反方向均有轻微不对称,这是由于节点 4 个榫卯接触区域之间的初始缝隙大小不同所致;3)加载过程中,节点在某些时刻发生了掉荷现象,这是由于榫头横纹承压及弯曲效应导致的木纤维断裂所致;4)在卸载过程中试件 T2,荷载很快降低,卸载段曲线几乎和纵坐标平行,当荷载完全卸载后,节点存在大量残余变形;5)试件 T2 的滞回环较 L2 饱满很多,说明横向中节点的耗能能力较纵向中节点强。

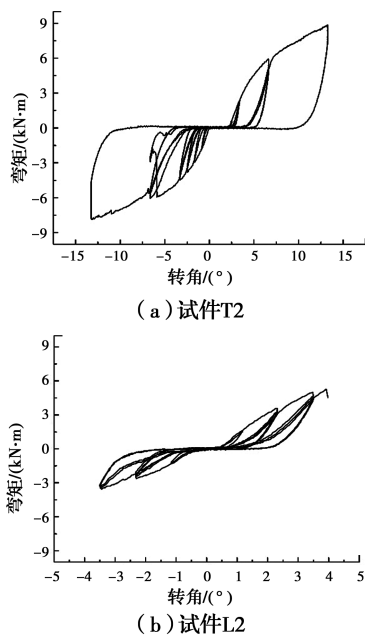


图 10 弯矩-转角滞回曲线
Fig. 10 Moment-rotation hysteretic loops

4.2 骨架曲线

两类节点试件的骨架曲线如图 11 所示,可以看出:1)试件 T2 和 L2 的弯矩值都随转角的增大而增大,弯矩-转角骨架曲线无下降段;2)试件在加载初期的转动刚度较小,这是由于试件存在初始缝隙,之后刚度迅速增大,榫卯接触后产生横纹嵌压变形、节点抗弯能力增加较快所致;3)对比试件 T2 和 L2 骨架曲线可知,试件 T2 的变形能力和抗弯承载力均较试件 L2 高出很多。

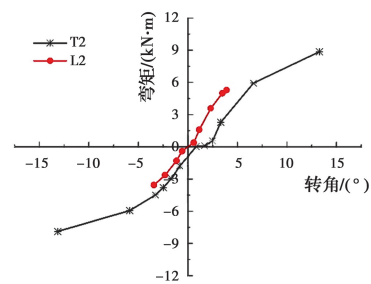


图 11 弯矩-转角骨架曲线

Fig. 11 Moment-rotation skeleton curves

4.3 刚度退化

在加载过程中,节点刚度发生退化,采用割线刚度表征节点的刚度退化特征,由式(4)计算得到。

$$K = \frac{|+M_i| + |-M_i|}{|+\theta_i| + |-\theta_i|} \quad (4)$$

式中: $\pm M_i$ 为第 i 级位移循环正、负向加载的峰值弯矩, $\pm \theta_i$ 为 $\pm M_i$ 对应的转角。

按式(4)计算得到试件 T2 和 L2 的刚度退化曲线如图 12 所示,从中可以看出,试件 T2 的初始刚度在加载前期随转角的增加而减小,这是由于试件榫卯处初始缝隙较大,在加载前期主要依靠摩擦力抵抗弯矩,随着转动次数增加,节点表面粗糙度降低,摩擦力减小,节点刚度随之减小,当转角达到 3.32° 后,节点之间的榫卯接触挤紧,刚度突然增加,之后榫卯之间产生累积嵌压塑性变形,刚度随转角的增加而减小;由于初始缝隙较小,在加载初期,试件 L2

节点的榫卯处接触挤紧,节点刚度随转角增大而增加,当榫卯接触处发生塑性变形后,节点刚度则降低;对比试件 T2 和 L2 的刚度退化曲线可见,T2 的初始刚度较 L2 大。

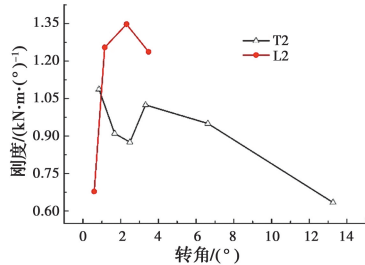


图 12 刚度退化曲线

Fig. 12 Stiffness degradation curves

4.4 耗能能力

根据《建筑抗震试验规程》^[12] 的规定,结构的耗能能力以荷载-位移滞回曲线所包围的面积来衡量,如图 13 所示。将弯矩-转角曲线转换为荷载-位移曲线后,可计算得到节点在每个转角下的耗能能力,将之前加载角度的耗能能力相加即可得到节点的累积耗能。

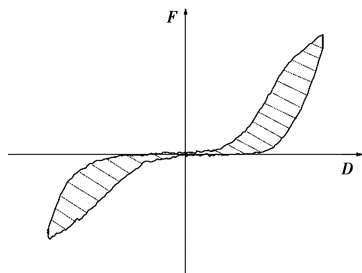


图 13 耗能能力计算示意图

Fig. 13 Schematic diagram of energy dissipation capacity calculation

试件 T2 和 L2 的累积耗能如图 14 所示,可以看出:当转角小于 2.5° 时,两个试件的耗能能力接近,节点在此阶段主要由构件之间的摩擦耗能;当转角约为 3.5° 时,试件 L2 的累计耗能值较大,这是由于试件 L2 在此阶段因榫颈折断发生破坏,消耗了更多能量,之后试件失效;试件 T2 的累积耗能随转角增大而不断增加。

4.5 变形能力

变形能力是衡量结构或构件抗震性能的一个重要指标^[9]。在低周往复荷载作用下,试件 T2 的转动变形很大,达到了 13° (0.23 rad),远远超过《古建筑木结构维护与加固技术规范》(GB 50165—92)中

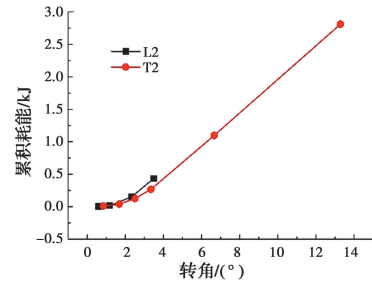


图 14 耗能

Fig. 14 Energy dissipation

的古建筑木结构弹塑性层间位移角限值 $1/30$ (0.03 rad),说明穿斗式横向中节点具有良好的变形能力;试件 L2 在转角达到 4.6° (0.08 rad) 时发生破坏(图 15),也超过规范中的限值,说明穿斗式纵向中节点也具有较好的变形能力。



图 15 试件 L2 变形图

Fig. 15 Deformation of specimen L2

5 结论

基于传统西南民居穿斗式木结构横向中节点和纵向中节点的单调加载和往复加载试验,得到以下结论:

- 1) 横向中节点主要在榫卯挤压区域发生嵌压塑性变形以及在木销受荷区域发生弯剪变形,纵向中节点易在榫颈位置发生折断破坏。
- 2) 横向中节点的初始刚度和抗弯承载力均较纵向中节点高,横向中节点的抗弯承载力为纵向中节点的 2 倍。
- 3) 横向中节点和纵向中节点的滞回曲线均表现出明显的捏拢和滑移现象,且滑移量随转角的增大而增大,横向中节点的耗能能力较纵向中节点强。
- 4) 横向中节点和纵向中节点都具有较好的变形能力,横向中节点表现出较好的延性,但纵向中节点的延性很低。

纵向中节点是穿斗式木结构中的薄弱节点,需要在穿斗式木结构的安全维护中重点关注。

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.
LI P. Seismic behavior experimental study on mortise-tenon joints of column and tie timber construction [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [2] 郭涛. 穿斗式木构架抗震性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
GUO T. Experimental study on the seismic behavior of traditional Chuan-Dou style wood frame [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [3] CHANG W S, HSU M F, KOMATSU K. Rotational performance of traditional Nuki joints with gap I: Theory and verification [J]. Journal of Wood Science, 2006, 52(1): 58-62.
- [4] CHANG W S, HSU M F. Rotational performance of traditional Nuki joints with gap II: The behavior of butted Nuki joint and its comparison with continuous Nuki joint [J]. Journal of Wood Science, 2007, 53(5): 401-407.
- [5] 陈春超, 邱洪兴. 透榫节点的受弯性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(2): 326-334.
CHEN C C, QIU H X. Flexural behavior of penetrated mortise-tenon joints [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(2): 326-334. (in Chinese)
- [6] 陈春超, 邱洪兴. 直榫节点受弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(Sup1): 292-298.
CHEN C C, QIU H X. Study on flexural behavior of straight mortise-tenon joints [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(Sup1): 292-298. (in Chinese)
- [7] 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 straight mortise-tenon joints for Chinese traditional wooden buildings [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(7): 111-117. (in Chinese)
- [8] 谢启芳, 郑培君, 崔雅珍, 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): 232-241.
XIE Q F, ZHENG P J, CUI Y Z, et al. Experimental study on seismic behavior of straight mortise-tenon joints of ancient timber buildings [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(3): 232-241. (in Chinese)
- [9] 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. (in Chinese)
- [10] 木材物理力学性质试验方法: GB 1927~1943—2009 [S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2009.
Method of testing in physical and mechanical properties of wood; GB 1927~1943-2009[S]. Beijing: Standardization Administration of China, 2009. (in Chinese)
- [11] Timber structures-test methods: Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners: EN 12512[S]. Belgium: European Committee for Standardization, 2005.
- [12] 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)

(编辑 胡玲)