文章编号:1005-1538(2018)04-0070-10

清式木建筑透榫节点加固方法的试验研究

许清风,张富文,陈 溪,陈玲珠,贡春成
(上海市建筑科学研究院 上海市工程结构安全重点实验室,上海 200032)

摘要: 我国传统木结构建筑的各构件间主要采用榫卯连接,这种节点形式在较大水平地震作用下容易出现局部拔榫、节点松脱现象,不利于结构的稳定和承载。为此针对榫卯节点的抗震性能及加固进行试验研究。依据清工部《工程做法则例》设计制作了4个足尺透榫节点试件,其中3个试件分别采用竹斜撑、角钢和碳纤维(简称CFRP)布进行加固。在改进榫卯节点拟静力试验装置的基础上完成了低周反复荷载试验,分析了对比节点和加固节点的破坏机理、承载力、延性、刚度退化、耗能和榫头拔出过程。试验结果表明,竹斜撑、角钢和CFRP布加固节点的正向峰值荷载较对比节点分别提高了92.4%、54.6%和63.0%,反向峰值荷载则分别提高了61.5%、75.7%和39.0%。对比节点和角钢加固节点初期刚度基本相同,且随转角增加出现先增大后减小的过程;竹斜撑加固和碳纤维布加固节点的初始刚度显著大于对比节点,随着转角的增加呈单调减少。此外,竹斜撑和角钢加固节点的榫头拔出长度明显小于相同转角下对比节点的榫头拔出长度,表明竹斜撑和角钢均起到了延缓榫头拔出的作用。

关键词: 清式木建筑;透榫节点;抗震加固;破坏机理;承载力
中图分类号: TU375.4 **文献标识码:** A

0 引 言

我国传统木结构建筑的各构件间主要采用榫卯连接,这种节点形式在较大水平地震作用下容易出现局部拔榫、节点松脱现象[1],不利于结构的稳定和承载。近年来,针对榫卯节点的抗震性能及加固已开展了相应的试验研究,主要包括振动台试验、木构架拟静力试验和榫卯节点拟静力试验三类。

在振动台试验方面,薛建阳等[2]、隋奚等[3]先后针对殿堂式古建筑木结构开展了1∶3.52的模型试验,最终破坏均表现为额枋的榫头随着输入台面加速度的增大逐渐从柱的卯口中拔出,并导致木构架整体倒塌;姚侃等[4]、薛建阳等[5]分别采用扁钢、碳纤维(Carbon Fiber Reinforced Polymer,简称CFRP)布对已破坏的木构架燕尾榫节点进行加固,振动台试验结果表明残损木构架采用扁钢或CFRP布加固后均具有良好的抗震能力和耗能性能。在木构架拟静力试验方面,周乾等[6]参考故宫太和殿实际尺寸设计了缩尺比为1∶8的4梁4柱木构架模型,低周反复荷载试验结果表明,燕尾榫卯节点具有一定的耗能能力和较好的变形能力,但承载力较低,刚度退化较严重;谢启芳等[7]开展了CFRP布和扁钢加固榫卯节点的木构架拟静力试验研究,试验结果表明CFRP布和扁钢加固后木构架强度和刚度增加,耗能能力有所降低;徐明刚等[8]针对2榀胶入钢筋和3榀CFRP布加固榫卯节点的木构架模型开展了试验研究,结果表明各试件均发生了榫卯节点的脱榫破坏,胶入钢筋加固和CFRP加固构架强度、刚度明显增加,但加载后期加固效果逐渐减小。在榫卯节点拟静力试验方面,谢启芳等[9]通过7个缩尺比例为1∶4.8的单向直榫榫卯节点模型试验,研究了真菌腐朽和虫蛀对节点抗震性能的影响;淳庆等[10]针对江浙地区抬梁和穿斗木构体系中的馒头榫、透榫、半榫及瓜柱柱脚直榫进行了低周反复荷载试验,研究了上述四种节点的破坏形式和抗震性能;陆伟东等[11]分别采用扒钉、CFRP、钢销、U型铁箍、角钢和弧形钢板对6个榫卯节点进行加固,拟静力试验结果表明加固后的震损节点可以达到破坏前的抗震性能,并给出了基于转角的震损榫卯节点加固设计方法。

比较上述三种试验方法,振动台试验和木构架

收稿日期:2017-05-16;修回日期:2018-05-04
基金项目:上海市科委青年科技启明星计划资助(15QB1403300),住房城乡建设部研究开发项目资助(2016-K5-017)
作者简介:许清风(1973—),男,2001年博士毕业于东南大学,教授级高级工程师,研究方向为工程结构抗火和竹木结构,E-mail:xuqingfeng73@163.com

拟静力试验主要关注整体结构的抗震性能和破坏模式,而节点拟静力试验则是研究榫卯节点受力性能最为直观和简便的手段。目前通常采用球铰连接件连接作动器和木梁端部进行节点加载,然而球铰连接件虽然能够允许梁发生转动,但当榫头不断拔出、梁不断外移时,球铰连接件将限制榫头拔出并提供反向作用力,这种情况下不仅弯矩 - 转角滞回曲线会有明显误差,节点的破坏模式也可能发生变化。因此,对于榫头拔出量较大的榫卯节点而言,这种加载方法有待改善。此外,上述研究中的试验模型大多按照宋代《营造法式》进行设计,对现存数量较多的清式木结构建筑研究相对较少。

基于此,本研究在对榫卯节点拟静力试验装置进行改进的基础上,针对清式透榫足尺节点开展了低周反复荷载试验,从破坏机理、承载力、刚度退化、耗能能力、榫头拔出过程等方面对不同加固方法下的榫卯节点抗震性能进行分析,以期为清式木建筑透榫节点的抗震加固提供可靠的试验依据。

1　试验概况

1.1　试件设计

本试验以清式建筑中常用的透榫节点为研究对象,选取最具代表性的檐柱和檐枋节点进行足尺透榫节点模型设计。

首先确定檐柱和檐枋尺寸。按照清工部《工程做法则例》[12]可将木构建筑分为大木大式建筑和大木小式建筑。清代建筑的模数,通常采用“斗口”和“檐柱径”两种,其中“斗口”适用于带斗拱的大木大式建筑,而“檐柱径”则适用于无斗拱的大木小式建筑。本试验模型按照清代大木小式建筑进行设计,由《中国古建筑木作营造技术》[13]可知,檐柱径为 D 时,其柱高为 $11D$,面阔(开间)为 $13.5D$,檐枋高度为 D,宽度为 $0.8D$。当选用最常规的 3.6m 面阔时,其檐柱径应为 260mm,檐枋高度和宽度分别为 260mm 和 210mm。考虑到本次试验主要研究节点的受力性能及加固效果,试件中檐柱和檐枋的长度可在不小于节点影响区的前提下结合试验装置尺寸确定。

其次需要确定透榫的形状及基本尺寸。透榫用于大木构件,常做成大进小出,所以又称大进小出榫。按文献[12]通常做法,当檐柱径为 260mm、檐枋高度和宽度分别为 260mm 和 210mm 时,对应于透榫大头长度为 130mm、榫高 260mm、榫厚 70mm,透榫小头长度为 260mm(其中柱外 130mm)、榫高 130mm、榫厚 70mm。

依上述分析结果设计了 4 个足尺透榫节点模型,编号分别为 CJ、JSB、JSS 和 JSF。其中 CJ 为未加固对比节点,设计图见图 1(a);其余试件则在对比试件基础上进行了加固:JSB 为竹支撑加固透榫节点,JSS 为角钢加固透榫节点,JSF 为 CFRP 布加固透榫节点,如图 1(b) ~ 1(d)所示。所有试件均由同一个木工加工制作以保证榫卯节点松紧度的一致性,榫头与卯口的空隙控制在 1mm 以内。

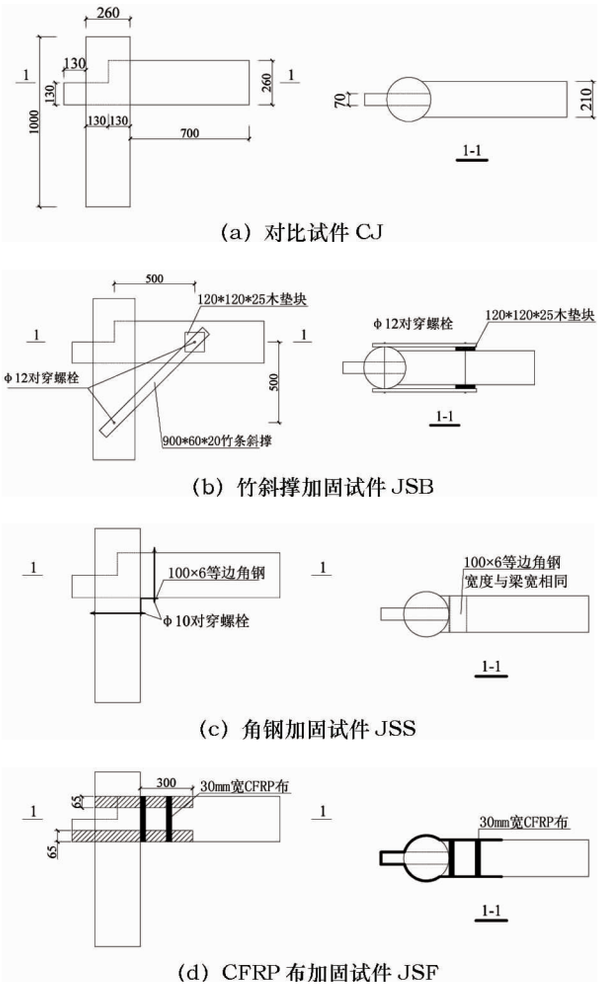


图 1　试件设计图(单位:mm)

Fig. 1　Details of specimens

1.2　试验材料

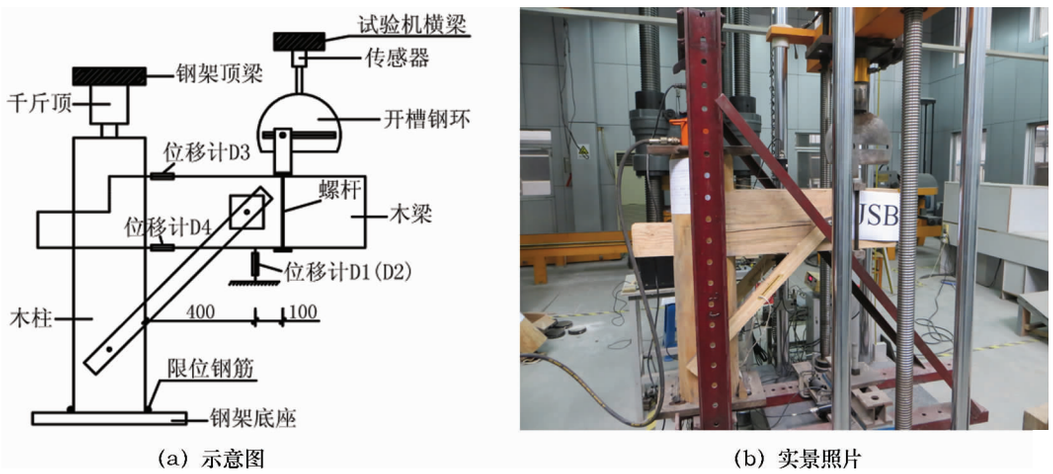
考虑到松木是清式木建筑常用的结构用材,本次试验选用市场上常见的南方松制作木梁和木柱,按照《木材物理力学性质试验方法》(GB 1927 ~ 1943—2009)进行材性测试,测试结果为:木梁顺纹抗弯强度为 85.0MPa,抗弯弹性模量为 7640MPa,密度为 596kg/m^3,含水率为 18.7%;木柱顺纹抗弯强度为 97.0MPa,抗弯弹性模量 8670MPa,密度为 641kg/m^3,含水率为 25.0%。

加固材料所选用竹材为60mm宽、20mm厚竹板，实测竹材弹性模量为9400MPa，轴心抗拉强度为100MPa。CFRP布选用FF－CR120型，由单向碳纤维编织而成，公称厚度为0.167mm，材料试验测得的抗拉强度为4400MPa，弹性模量为250GPa。结构胶选用DL－JGN－D型双组份碳纤维粘合剂，抗压强度大于70MPa。角钢采用100×6号角钢（Q235钢），两翼缘长度100mm、厚度6mm；连接角钢的对穿螺栓所用材料为Q235钢，直径为10mm，强度等级为4.8级。

1.3 加载方案

本次试验的主要设备为100kN微机控制电子万能试验机。考虑到木梁、木柱均需施加竖向荷载，因而在万能试验机的基座上安装了钢架，木柱放置于该钢架内，木梁则位于试验机的加载端下方。柱顶采用千斤顶施加恒定的竖向荷载，经计算单根木柱竖向荷载取为30kN。为防止木柱发生滑移，柱底设置了限位钢筋。梁端利用万能试验机施加竖向力进行低周反复加载，试验加载装置如图2所示（以试件JSB为例）。

由于木梁在加载过程中，榫头将不断拔出，极限拔出量为130mm。为保证木梁在如此大的水平位移下受到的荷载始终为竖直方向，本次试验设计了如图2中的开槽钢环，经计算确定开槽长度为250mm，在木梁发生正、负转角和榫头拔出过程中均可保证木梁受力点恒定且力始终为竖向。



（a）示意图 （b）实景照片

图2 试验加载装置

Fig. 2 Test setup

试验开始前，首先在柱顶通过竖向千斤顶以0.5倍的预加竖向荷载加卸载一次，消除试验装置的初始缺陷，然后加载到恒定竖向荷载30kN。根据国际标准ISO－16670[14]，对木梁的低周反复加载采用位移控制。试验前预估透榫节点的极限转角为0.2rad（对应加载点处竖向位移为100mm），以此作为节点控制转角，加载速率为10mm/min。加载时先按照控制转角的2.5%、5%、7.5%、10%进行单次循环加载，再按照控制转角的12.5%、25%、37.5%、50%、62.5%、75%、87.5%、100%、112.5%……依次进行3次循环加载，直至试件发生破坏或荷载下降至峰值荷载的85%以下时，终止加载。

2 试验过程与结果分析

2.1 试验过程

对比试件CJ加载至节点转角为0.05rad时（转角以木梁向上为正、向下为负），节点内部挤紧并发出咯吱的摩擦声；节点转角为－0.075rad时，节点内部发出木材劈裂的咔嚓声；转角为－0.2rad时，因榫头折断导致负向承载力下降至峰值荷载的30%以下，试验结束。榫卯节点转角为－0.2rad时，试件整体变形和榫头上部拔出情况见图3所示。

加固试件JSB加载至节点转角为0.075rad时，节点内部挤紧并发出咯吱的摩擦声；节点转角为－0.1rad时，榫头内部发出响亮的木材折断的咔嚓声；节点转角为0.2rad时，梁内对穿螺栓的螺帽崩开，螺杆弯曲断裂；节点转角为±0.25rad时，正、负向承载力均下降到峰值承载力85%以下，试验结束。榫卯节点转角为－0.25rad时，试件整体变形和榫头上部拔出情况见图4所示。

加固试件JSS加载至节点转角为0.075rad时，伴随着咯吱的摩擦声，节点内部发出木材断裂的咔

(a) 整体变形　　(b) 榫头上部拔出情况

图 3　试件 CJ 破坏形态

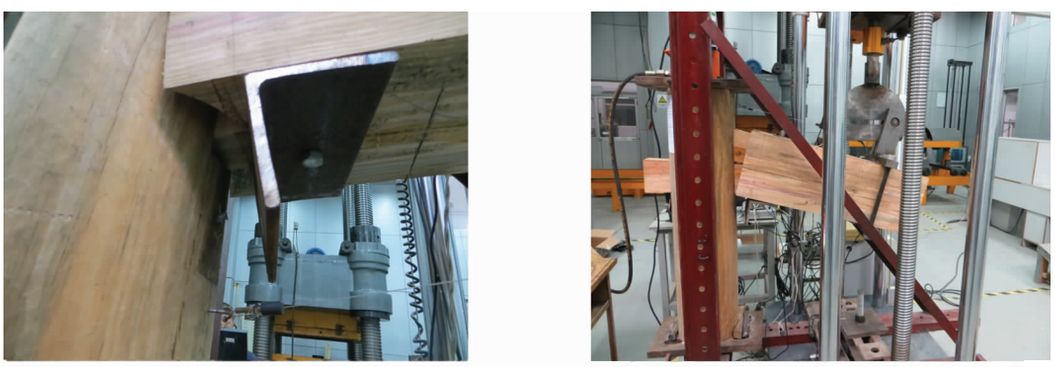
Fig. 3　Failure pattern of specimen CJ

(a) 整体变形　　(b) 榫头上部拔出情况

图 4　试件 JSB 破坏形态

Fig. 4　Failure pattern of specimen JSB

嚓声;节点转角为 0.1rad 时,节点内部再次发出咔嚓声;节点转角为 -0.1rad 时,角钢与木柱的连接螺栓在螺帽处发生严重变形;节点转角为 0.175rad 时,角钢与木柱的连接螺栓剪断(图 5(a)),角钢完全失去作用。节点转角为 ±0.25rad 时,正、负向承载力均下降到峰值承载力 85% 以下,试验结束。节点转角为 -0.25rad 时的整体变形见图 5(b)所示。



(a) 连接螺栓剪断　　(b) 整体变形

图 5　试件 JSS 破坏形态

Fig. 5　Failure pattern of specimen JSS

试件 JSF 加载至节点转角为 ±0.075rad 时,下方水平 CFRP 布从梁柱交界面向梁端逐渐剥离,上方水平 CFRP 布在梁柱交界处拉断;节点转角为 0.1rad 时,下方水平 CFRP 布在木梁内完全剥离,节点内部发出响亮的咔嚓声;节点转角为 0.125rad 时,节点内部再次发出咔嚓声,竖向 CFRP 条带发生

剥离；节点转角为 ±0.225rad 时，正、负向承载力均下降到峰值承载力85%以下，试验结束。节点转角为 −0.225rad 时，试件整体变形见图6(a)所示；此时榫头上部几乎完全拔出，详见图6(b)所示。

(a) 整体变形　　(b) 榫头上部拔出情况

图6 试件 JSF 破坏形态

Fig. 6 Failure pattern of specimen JSF

分析试件的受力过程和破坏形态可以看出各加固方法的加固机理有所差异，竹斜撑加固通过增设抗侧力构件来减少榫头与卯口受力，从而提高节点整体刚度和承载力；角钢和 CFRP 布加固均通过增强节点抗弯刚度和减少榫头拔出的方式提升节点的承载力，不同之处在于角钢与构件存在初始缝隙，前期刚度提升小、后期压实后刚度大幅提升，而 CFRP 布与构件紧密粘贴，前期刚度大，后期随着 CFRP 的剥离和拉断，节点刚度逐渐减小。试验结束后将各试件的榫头从木柱中拔出，其裂缝分布对比见图7所示。试件 CJ、JSB 和 JSF 的主要裂缝包括大、小榫头交界面的水平裂缝和榫头下半部锯齿状的斜向裂缝，试件 JSS 则主要为前一种裂缝。

(a) 试件 CJ　(b) 试件 JSB　(c) 试件 JSS　(d) 试件 JSF

图7 各试件榫头的裂缝分布

Fig. 7 Crack distributions of all specimens

2.2 滞回曲线

各节点弯矩－转角($M-\theta$)滞回曲线对比见图8所示，其中弯矩 M 由施加在梁上的竖向荷载与其至柱内表面距离相乘得到，转角 θ 则由梁的竖向位移与距柱内表面距离相除得到。

从图8中可以看出：

1）各试件的滞回曲线均有明显的捏缩效应，呈现典型的“Z型”，表明透榫节点在受力过程中发生了较大的滑移，且滑移量随位移幅值的增加而加大。这主要是由节点本身的构造决定的。随着加载位移的增大，卯孔越来越大，榫卯连接松动，因每次加载要经过一段滑移之后直到榫卯之间发生挤压时，荷载才能有较大的增加，而卸载时则很快下降至零。

2）从对比试件的滞回环看，加载初期曲线斜率较小，说明榫头和卯口之间存在缝隙，直至节点逐步压紧后曲线斜率才开始增大。加固试件 JSS 与对比试件相似，这是由于角钢在节点转角较小时难以发挥作用所致；加固试件 JSB 和 JSF 则并不存在明显初始滑移阶段，表明竹斜撑和 CFRP 布在受力初

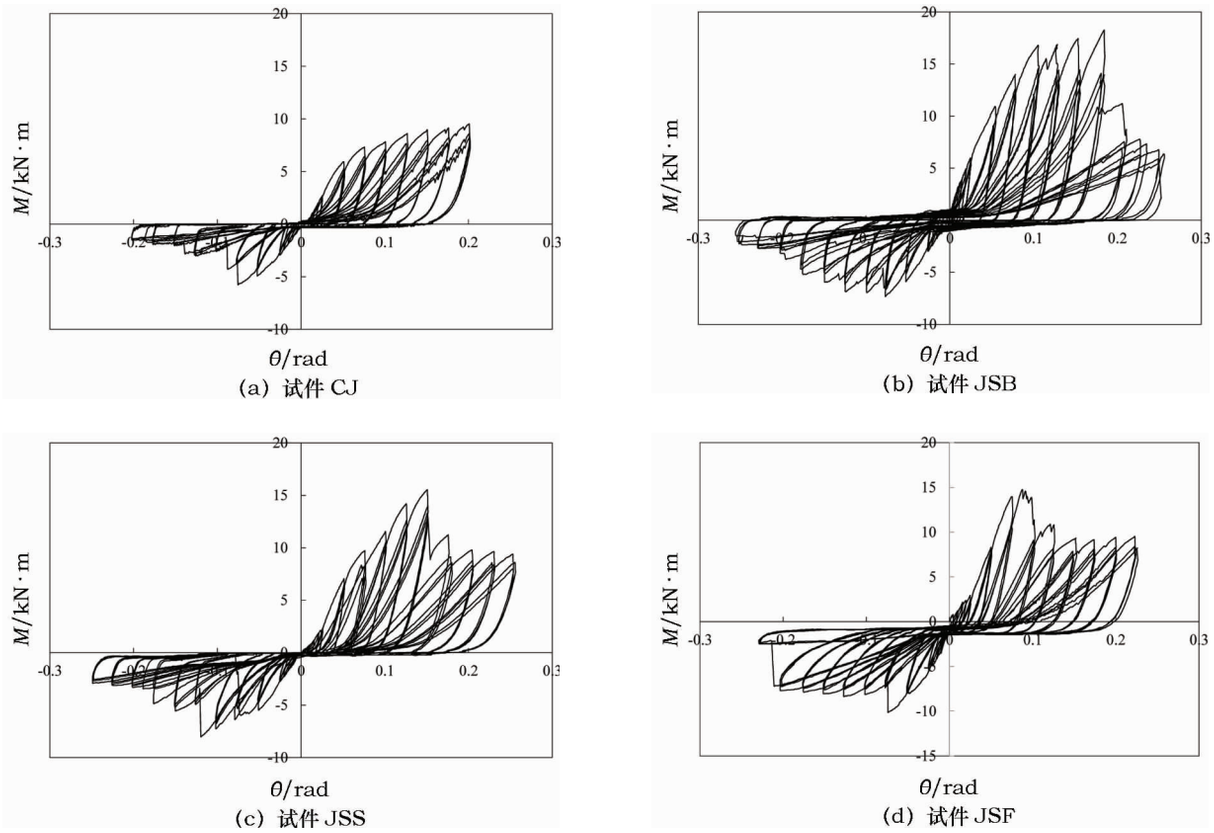


图 8　各试件弯矩 – 转角滞回曲线

Fig. 8　Moment – rotation hysteresis loops of specimens

期即参与受力。

3）各透榫节点在正、反两个方向的滞回曲线对称性差,且正向的承载力显著高于反向承载力,其主要原因在于反向加载时随着荷载增加,大、小榫头交界面处由于木材横纹受拉强度较小,将率先出现水平裂缝,导致透榫节点反向承载力峰值小于正向承载力。此外,在反向加载时,随着大、小榫头交界面水平裂缝的不断延伸,小榫头的有效长度在增加(大榫头有效长度则相应减小),小榫头根部的弯矩也在不断增加,当根部界面的弯矩大于根部截面抗弯承载力时,水平裂缝停止延伸,竖向弯曲裂缝开始不断向下发展,并最终导致榫头破坏。这也较好地解释了图 7 中各榫头的裂缝开展状态。

2.3　骨架曲线

各试件弯矩 – 转角骨架曲线见图 9，骨架曲线特征点见表 1。其中,屈服点按照能量等值法确定,极限点取基底剪力下降至峰值荷载 85% 时对应的曲线点,延性系数为极限位移与屈服位移的比值。

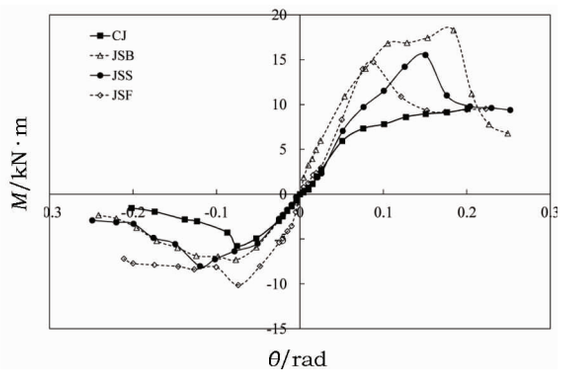


图 9　各试件的弯矩 – 转角骨架曲线

Fig. 9　The moment – rotation skeleton curves of specimens

表 1　各试件骨架曲线特征点

Table 1　Feature points on skeleton curves of specimens

试件编号		屈服点		峰值点		极限点		延性系数 μ
		M_y/kN	θ_y/rad	M_{max}/kN	θ_{max}/rad	M_u/kN	θ_u/rad	
CJ	正向	7.60	0.090	9.52	0.200	9.52	0.200	2.22
	反向	–3.99	–0.035	–5.77	–0.075	–4.90	–0.082	2.34

（续表1）

试件编号		屈服点		峰值点		极限点		延性系数 μ
		M_y/kN	θ_y/rad	M_{max}/kN	θ_{max}/rad	M_u/kN	θ_u/rad	
JSB	正向	14.21	0.080	18.26	0.175	15.52	0.193	2.41
	反向	−5.90	−0.052	−7.32	−0.078	−6.23	−0.140	2.69
JSS	正向	11.21	0.096	15.52	0.150	13.19	0.163	1.70
	反向	−6.00	−0.067	−8.02	−0.120	−6.82	−0.134	2.00
JSF	正向	14.72	0.088	14.72	0.088	12.51	0.107	1.22
	反向	−6.66	−0.036	−10.14	−0.074	−8.62	−0.094	2.61

由图9和表1可以看出：

1）由于受力模式不同，透榫节点正、反向承载力存在较大差异，以对比试件CJ为例，正向峰值弯矩比反向大65.0%，正向峰值转角比反向大166.7%；

2）采用竹斜撑加固后，试件JSB正、反向峰值承载力较对比试件CJ分别提高了92.4%和61.5%，延性系数分别提高了8.6%和15.0%；

3）采用角钢加固后，试件JSS正、反向峰值承载力较对比试件CJ分别提高了54.6%和75.7%，而延性系数则分别降低了23.4%和14.5%；

4）采用CFRP加固后，试件JSF正、反向峰值承载力较对比试件CJ分别提高了63.0%和39.0%，正向延性系数降低了45.0%、反向则提高了11.5%。

综合分析可知，竹斜撑加固试件JSB的承载力和延性均有较大提高；角钢加固试件JSS的骨架曲线在受力初期与对比节点CJ基本重合，后期承载力有所提高，但延性有所降低；CFRP布加固试件JSF初期刚度较大，承载力有明显提高，但也很快进入破坏，延性较差。在上述三种加固方法中，增设竹斜撑的抗震加固效果最好。

2.4 刚度退化

在位移幅值不变的条件下，结构刚度随反复加载次数增加而降低的特性为刚度退化。本节采用割线刚度来评价构件的刚度退化，按(1)式计算：

$$K_i = \frac{|+M_i| + |-M_i|}{|+\theta_i| + |-\theta_i|} \tag{1}$$

式中，K_i 为割线刚度；M_i 为第 i 级荷载第1次循环的峰值弯矩；θ_i 为 M_i 对应的转角。

按上式计算得到的各试件刚度退化曲线如图10所示。

由图10可知：

1）对比试件CJ在加载初期刚度有小幅增长，这是由于榫头和卯口之间的缝隙不断压实所致，随后由于节点受损刚度不断下降；

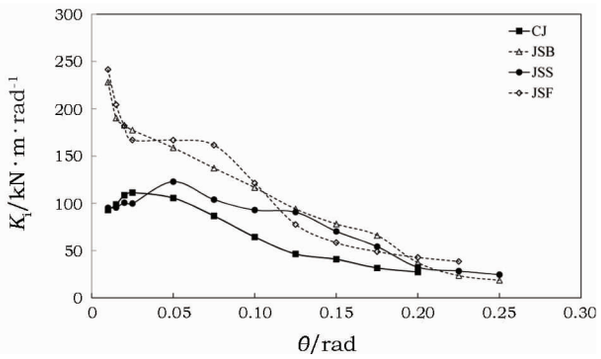


图10 各试件刚度退化曲线

Fig. 10 Stiffness degradation curves of specimens

2）加固试件JSS由于在加载初期角钢基本不参与受力，因此初期刚度也有一定增加，随着转角增加角钢逐渐参与工作，节点刚度大于对比试件且下降缓慢；

3）加固试件JSB和JSF的初始刚度显著大于对比试件，随着转角增加呈单调减少，不存在加载初期的刚度增加；

4）在转角为0.2rad时，加固试件的加固件均已失效，加固试件此时蜕化为与对比试件类似，因此所有试件的割线刚度基本相同。

2.5 耗能性能

榫卯节点的耗能能力是结构抗震性能的重要指标，较强的耗能能力可以保证结构在地震作用下振幅迅速衰减。本研究分别采用绝对耗能 E 和等效粘滞阻尼系数 h_e 来衡量透榫节点的耗能能力[15]。其中，绝对耗能 E 为某循环滞回环所包围的面积（即图11中阴影部分的面积），等效粘滞阻尼系数 h_e 按照(2)式计算：

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E}{S_{\Delta OBE} + S_{\Delta ODF}} \tag{2}$$

式中，E 为绝对耗能，$S_{\Delta ABC}$、$S_{\Delta CDA}$ 为图11中对应的三角形面积。各试件在各级荷载下首个循环的绝对耗能和等效粘滞阻尼系数分别见图12、图13。

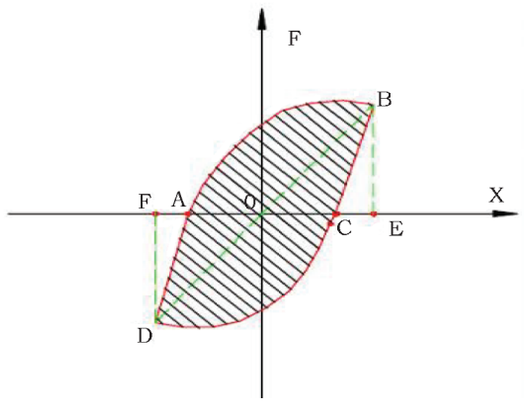


图 11　等效粘滞阻尼系数示意图

Fig. 11　Schematic diagram of viscous damping ratio

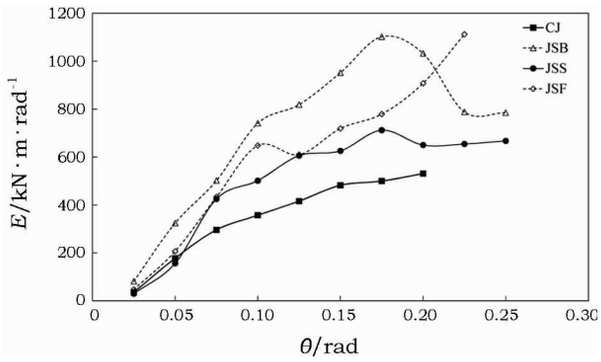


图 12　各试件绝对耗能与转角的关系

Fig. 12　Energy dissipation – rotation relationships of specimens

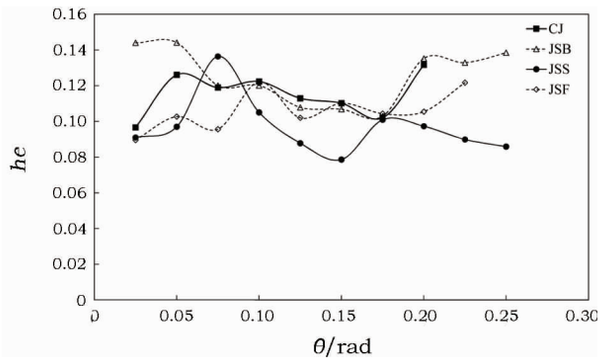


图 13　各试件等效粘滞阻尼系数与转角的关系

Fig. 13　Viscous damping ratio – rotation relationships of specimens

从图 12 和 13 可知,各加固试件的等效粘滞阻尼系数与对比试件没有显著差异,基本均在 0.08 ~ 0.14 之间;而加固试件在各级荷载下的绝对耗能均显著大于对比试件,表明耗能能力有所增强。综合来看,竹斜撑加固对于节点耗能能力的提升最为明显。

2.6　榫头拔出

随着转角的增大,对比及加固透榫节点的榫头都将不断拔出,本次试验在榫头上、下两端安装了位移计(图 2)。试验记录的各试件榫头拔出全过程具有相同的特征:正向加载时,各试件下榫头随着转角的增加拔出长度不断增加,上榫头先被压缩后逐渐拔出;而反向加载时,各试件上榫头随着转角的增加拔出长度不断增加,下榫头则先被压缩后逐渐拔出。由于受力模型的差异,正、反向的榫头拔出并不对称,反向加载时上榫头的拔出速度和长度明显大于正向加载时下榫头的拔出速度和长度。以试件 JSF 为例,其在不同转角水平下的榫头拔出长度 L 如图 14 所示。

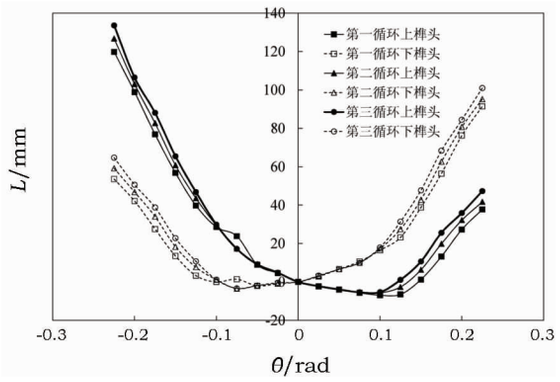


图 14　不同转角水平下试件 JSF 榫头拔出长度

Fig. 14　Extracting length of tenons of spemcimen JSF under different rotation levels

各试件上榫头在第一次循环时不同转角水平下的榫头拔出长度 L 对比如图 15 所示。

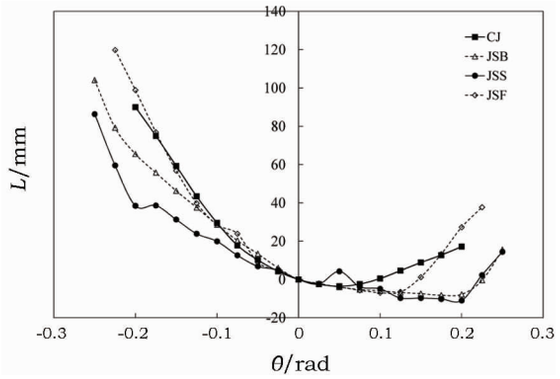


图 15　各试件上榫头在第一次循环时不同转角水平下的榫头拔出长度

Fig. 15　Extracting length of tenons of specimens in the first cyclic loading under different rotation levels

由图 15 可知,竹斜撑加固试件 JSB 和角钢加固试件 JSS 的榫头拔出长度明显小于相同转角水平下对比试件 CJ 的榫头拔出长度,表明竹斜撑和角钢起到了延缓透榫节点榫头拔出的作用;而 CFRP 布加

固试件 JSF 与对比试件 CJ 总体差异不大,主要是由于 CFRP 布较早发生了剥离与断裂造成的。

3 结 论

本研究制作了 4 个足尺清式透榫木节点试件,设计了竹斜撑、角钢和 CFRP 布 3 种加固方法,在改进榫卯节点拟静力试验装置的基础上完成了低周反复荷载试验,得到了如下结论:

1) 对比及加固透榫节点的滞回曲线均呈典型的"Z 型",且正、反向对称性差,主要表现为正向承载力显著高于反向承载力,其原因在于木材横纹抗拉强度远小于横纹抗压强度和顺纹抗弯强度。

2) 与对比节点相比,竹斜撑加固节点的承载力和延性均有较大提高;角钢加固节点的骨架曲线在受力初期与对比节点基本重合,后期承载力有所提高,但延性有所降低;CFRP 布加固节点初期刚度较大,承载力有明显提高,但很快破坏,延性较差。

3) 对于透榫节点而言,反向加载时上榫头的拔出速度和长度明显大于正向加载时下榫头的拔出速度和长度;竹斜撑加固和角钢加固节点的榫头拔出长度明显小于相同转角水平下对比节点的榫头拔出长度,表明竹斜撑和角钢均起到了延缓榫头拔出的作用。

4) 总体而言,竹斜撑加固方式简单易行,对榫卯节点的承载力和耗能能力均有明显提高,且具有施工简便、材料可再生、具有与木材相似的外观等优点,但对建筑形貌有一定影响,可在一般建筑加固或官式建筑的临时加固中选用;角钢加固施工方便、对节点外观影响较小,可有效阻止榫头拔出、显著提高节点承载力,但初始刚度无明显提升,适用于木构件本身没有较大损伤的木构架加固;CFRP 布加固可显著提高节点的初始刚度和承载力,但在木构件不做油饰时对节点外观有一定影响,且加固后节点延性也明显降低,因此建议在古建筑应急处理或临时加固中采用。

参考文献:

[1] 杨亚弟,杜景林,李桂荣. 古建筑震害特性分析[J]. 世界地震工程,2000,**16**(3):12-16.
YANG Ya-di, DU Jin-lin, LI Gui-rong. Analysis of the earthquake disaster characteristic of ancient building structures[J]. World Information of Earthquake Engineering,2010,**16**(3):12-16.

[2] 薛建阳,赵鸿铁,张鹏程. 中国古建筑木结构模型的振动台试验研究[J]. 土木工程学报,2004,**37**(6):6-11.
XUE Jian-yang, ZHAO Hong-tie, ZHANG Peng-cheng. Study on the seismic behaviors of Chinese ancient wooden building by shaking table test[J]. China Civil Engineering Journal,2004,**37**(6):6-11.

[3] 隋 龑,赵鸿铁,薛建阳,等. 古代殿堂式木结构建筑模型振动台试验研究[J]. 建筑结构学报,2010,**31**(2):35-40.
SUI Yan, ZHAO Hong-tie, XUE Jian-yang, *et al*. A study on Chinese ancient timber structures by shaking table test[J]. Joumal of Building Structures,2010,**31**(2):35-40.

[4] 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 Kan, ZHAO Hong-tie, XUE Jian-yang, *et al*. Experimental studies on seismic characteristic of strengthened mortise-tenon joint in historical timber buildings[J]. Joumal of Harbin Institute of Technology,2009,**41**(10):220-224.

[5] 薛建阳,隋 龑,葛鸿鹏,等. 古建筑木结构榫卯节点采用碳纤维布加固模型振动台试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,**33**(8):143-148.
XUE Jian-yang, SUI Yan, GE Hong-peng, *et al*. Shaking table test of joints strengthened with CFRP sheet in Chinese ancient timber structure[J]. Joumal of Building Structures,2012,**33**(8):143-148.

[6] 周 乾,闫维明,周锡元,等. 古建筑榫卯节点抗震性能试验[J]. 振动、测试与诊断,2011,**31**(6):679-684,808.
ZHOU Qian, YAN Wei-ming, ZHOU Xi-yuan, *et al*. Aseismic behavior of Chinese ancient mortise-tenon joint[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis,2011,**31**(6):679-684,808.

[7] 谢启芳,赵鸿铁,薛建阳,等. 中国古建筑木结构榫卯节点加固的试验研究[J]. 土木工程学报,2008,**41**(1):28-34.
XIE Qi-fang, ZHAO Hong-tie, XUE Jian-yang, *et al*. An experimental study on the strengthening of mortise-tenon joints in ancient Chinese wooden buildings[J]. China Civil Engineering Journal,2008,**41**(1):28-34.

[8] 徐明刚,邱洪兴. 中国古代木结构建筑卯榫节点抗震试验研究[J]. 建筑结构学报,2010,**31**(S2):345-349.
XU Ming-gang, QIU Hong-xing. Experimental study on seismic behavior of mortise-tenon joints in Chinese ancient timber buildings[J]. Journal of Building Structures,2010,**31**(S2):345-349.

[9] 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 Qi-fang, ZHENG Pei-jun, XIANG Wei, *et al*. Experimental study on seismic behavior of damaged straight mortise-tenon joints of ancient timber buildings[J]. Joumal of Building Structures,2014,**35**(11):143-150.

[10] 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 Qing, LYU Wei, WANG Jian-guo, *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]. Joumal of Southeast Universtiy (Natural Science Edition),2015,**45**(1):151 – 158.

[11] 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 Wei – dong, DENG Da – li. Experimental research on seismic performance of wooden mortise – tenon joints before and after reinforcment[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012,**32**(3):109 – 116.

[12] 梁思成. 清工部《工程做法则例》图解[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
LIANG Si – cheng. Illustration of "Engineering Practice Regulations" by the Qing Ministry of Industry[M]. Beijng:Tsinghua Universsity Press,2006.

[13] 马炳坚. 中国古建筑木作营造技术[M]. 北京:科学出版社,2003.
MA Bing – jian. Wooden building technology of ancient Chinese architecture[M]. Beijng:Science Press,2003.

[14] ISO – 16670 Timber structures: joints made with mechanical fasteners: quasi – static reversed – cyclic test method [S]. Geneva:International Organization for Standardization, 2003.

[15] 李忠献. 工程结构试验理论与技术[M]. 天津:天津大学出版社, 2003.
LI Zhong – xian. Theory and technology of engineering test[M]. Tianjin: Tianjin University Press,2003.

Experimental research on strengthening methods for through – mortise and tenon joints of Qing – style timber buildings

XU Qing – feng, ZHANG Fu – wen, CHEN Xi, CHEN Ling – zhu, GONG Chun – cheng
(*Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety*, *Shanghai Research Institute of Building Sciences*, *Shanghai* 200032, *China*)

Abstract: In our study, four full – scale through – mortise and tenon joints were designed and manufactured according to the engineering practice regulations by the Qing Ministry of Works. Three of them were strengthened with various materials:bamboo bracing, angle steel and carbon fiber reinforced plastic (CFRP) sheet. We carried out low cyclic reversed loading tests by improving the quasi – static test setup for mortise and tenon joints to analyze the failure mechanism, load bearing capacity, ductility, energy dissipation capacity and process of separation between mortise and tenon. The results show that in comparison with the reference joint, the peak loads in the positive direction of the joints strengthened with bamboo bracing, angle steel and CFRP sheet increased by 92.4%, 54.6% and 63.0% respectively, while the peak loads in the negative direction increased by 61.5%,75.7% and 39.0% respectively. The stiffness of the reference joint and the joint strengthened with angle steel were almost the same initially, and both increased at first and decreased then as the angle of rotation increased. Meanwhile, stiffness of joints strengthened with bamboo bracing and CFRP sheet were dramatically greater than that of the reference joint initially and showed a monotone decrease with an increase of the angle of rotation. In addition, the extracting length of tenons of joints strengthened with bamboo bracing and angle steel were obviously smaller than that of the reference joint at the same rotation levels, indicating that bamboo bracing and angle steel both had contributions to delaying the extraction of tenon.

Key words: Qing – style timber building; Through – mortise and tenon joint; Seismic strengthening; Failure mechanism; Load bearing capacity

(责任编辑　潘小伦)