

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.028



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 木楔加固对松动透榫节点抗震性能的影响

贺俊筱<sup>1</sup>, 王娟<sup>2a,2b</sup>, 杨庆山<sup>2b,3</sup>, 韩淼<sup>1</sup>, 刘永波<sup>1</sup>

(1. 北京建筑大学 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044; 2. 北京交通大学 a. 土木建筑工程学院; b. 结构风工程与城市风环境北京市重点实验室, 北京 100044; 3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044)

**摘要:**为研究木楔加固对带缝隙透榫节点在反复荷载作用下受力性能的影响,制作了包括完好节点、松动节点及木楔加固节点的3组足尺透榫节点模型。通过试验室足尺试验对比分析了3组节点的变形特征和破坏特点,研究了节点的弯矩-转角滞回曲线、刚度变化特性、耗能和应力状态等受力特点。结果表明:完好和松动节点的破坏形式为变截面出现延伸至榫头根部的木材顺纹撕裂破坏。木楔加固节点的破坏特征为木楔挤压破坏;木楔加固后,节点的滑移现象和捏拢效应减弱;松动节点抵抗外荷载的能力和耗能能力等特性均显著降低,木楔加固后节点的各项性能明显提高,其弯矩较松动节点的弯矩提高约30%。

**关键词:**木楔加固;松动透榫节点;足尺试验;抗震性能;古建筑木结构

**中图分类号:**TU366.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)02-0091-07

## Effects of wedge strengthening on seismic performance of loose penetrated mortise-tenon joint

HE Junxiao<sup>1</sup>, WANG Juan<sup>2a,2b</sup>, YANG Qingshan<sup>2b,3</sup>, HAN Miao<sup>1</sup>, LIU Yongbo<sup>1</sup>

(1. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, P. R. China; 2a. School of Civil Engineering; 2b. Beijing's Key Laboratory of Structural Wind Engineering and Urban Wind Environment, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** In order to study the effects of wedge on the seismic performance of loose joints, three full-scale penetrated mortise-tenon joint models are made, including a standard joint, a loose joint and a loose joint with wedge respectively. The deformation characteristics and failure characteristics of three joints were compared and analyzed through laboratory full-scale tests. Hysteresis curves, skeleton curve, stiffness degradation law, energy dissipation and ductility of three joints were analyzed by full scale quasi static test as well. Results show that the failure mode of standard and loose joint is wood fiber torn along the grain at variable cross-section. The failure mode of the joint with wedge is the extrusion failure of wedge. The slipping phenomenon and pinch effect of hysteresis curve decrease after adding the wedge. External load

**收稿日期:**2020-10-28

**基金项目:**国家科技支撑计划(2019YFC1520804);国家自然科学基金(51978038);北京市博士后基金(2020-zz-083)

**作者简介:**贺俊筱(1990-),女,博士(后),主要从事古建筑木结构研究,E-mail:hejunxiao@bucea.edu.cn.

**Received:**2020-10-28

**Foundation items:** Natural Key R & D Program of China (No. 2019YFC1520804); National Natural Science Foundation of China (No. 51978038); Beijing Post-Doctoral Foundation (2020-zz-083)

**Author brief:** HE Junxiao (1990-), PhD, postdoctor, main research interest: traditional timber structure, E-mail: hejunxiao@bucea.edu.cn.

resistance capacity and energy dissipation capacity of loose joint are obviously lower than that of standard joint, and the above performances of joint have a rising trend after adding the wedge. The bending moment of the joint with wedge is about 30% higher than that of the loose joint.

**Keywords:** wedge strengthening; loose penetrated mortise-tenon joint; full-scale test; seismic performances; traditional timber structure

古建筑木结构中纵横向的梁-柱、枋-柱、檩-枋及其他构件之间通常都采用榫卯连接。榫卯节点的形式会根据其位置和使用功能的不同而变化,常见的榫卯节点做法为梁(枋)端截面做成榫头形式插入木柱预留的卯口中。梁、枋和柱等构件在榫头与卯口处存在的截面削弱现象使榫卯节点成为结构的薄弱环节。在全寿命周期范围内,古建筑木结构多次受到各种自然和人为侵害。木材在长期使用过程中伴随着氧化作用而产生表面碳化,构件的有效截面尺寸降低;木材还会受到风、雨和雪等自然荷载作用以及菌类的影响,出现干缩、腐朽或虫蛀;长期的荷载作用产生的持续荷载效应还会造成结构蠕变与损伤累计;这些作用和现象会相继发生并相互作用,使得节点松动,接触状态变弱,最终导致节点性能退化,造成木构架整体倾斜或结构局部歪闪等破坏。在现存古建筑木结构中,由于榫头与卯口处存在一定的缝隙,榫卯节点常处于不同程度的松动状态。目前普遍采用的修缮方式是在缝隙处添加木楔,木楔已成为节点的重要组成部分,并且松动节点处的木楔形状、位置及材料各不相同,木楔的插入形式较随意。因此,木楔作为一种常见且随意的加固方式,研究其对松动节点抗震性能的影响具有一定的价值。

学者们已经开展了大量关于古建筑木结构榫卯节点的受力特点及性能的分析研究。Chen 等<sup>[1]</sup>通过试验和理论研究了榫卯节点的弯矩-转角、刚度等受力性能,得到了节点的变形特点、破坏形态和应力分布等。潘毅等<sup>[2]</sup>研究了直榫节点的受力机理,建立了直榫节点的弯矩转角力学模型。Seo 等<sup>[3]</sup>研究了带榫卯节点木结构框架的静力性能和循环往复荷载作用下的受力性能。Feio 等<sup>[4]</sup>对古建筑木结构榫卯节点的摩擦、挤压和滑移等变形特点进行了试验研究和数值模拟。此外,夏海伦<sup>[5]</sup>还通过试验和数值模拟分析了不同松动程度清式透榫节点的抗震

性能;谢启芳等<sup>[6]</sup>对人工模拟残损直榫节点的性能进行了试验研究。Ogawa 等<sup>[7]</sup>对带缝隙节点的受力机理和抗弯能力进行了理论分析。Chang 等<sup>[8-9]</sup>和 Guan 等<sup>[10-11]</sup>研究了有缝隙的 Nuki 榫卯节点的破坏特点、弯矩-转角关系、刚度变化等转动性能。节点加固方面,周乾等<sup>[12]</sup>通过振动台试验对比分析了采用 3 种不同加固方式的榫卯节点位移和加速度响应等抗震参数的变化。潘毅等<sup>[13-14]</sup>通过试验研究了 BFRP 布加固圆截面木梁的受弯性能以及扁钢和阻尼器加固节点的受力性能。

上述研究成果基本揭示了不同节点形式完好、残损和加固后的榫卯节点在外荷载作用下的受力性能和抗震特性等。透榫节点对古建筑木结构的抗震性能具有重要影响<sup>[15]</sup>。木楔加固虽是一种常见的透榫节点加固方式,但现有研究成果鲜有涉及中国古建筑木结构松动节点处存在木楔加固的问题。此外,节点的工作机理及节点加固措施等方面的研究成果几乎都是基于缩尺模型试验得到的,然而,木结构节点具有复杂的材料非线性特性,缩尺模型的试验结果并不能直接应用到实际结构中。为此,笔者以完好、松动和木楔加固足尺透榫节点为研究对象,通过足尺试验研究其变形特点和破坏特征,对比分析完好、松动和木楔加固节点的滞回性能、刚度特性和耗能能力等受力性能。

## 1 透榫节点试验概况

### 1.1 试验材料模型加工与制作

参照宋《营造法式》<sup>[16]</sup>中七等材构件的构造要求,制作了完好节点、松动节点和木楔加固节点的足尺透榫节点模型,如图 1 所示。以完好节点的尺寸为基准,通过减小枋端大头截面高度来模拟节点的松动状态,节点的细部尺寸见图 1(d)和表 1。模型所用木材为东北红松,通过材性试验获得东北红松的材性参数见表 2。

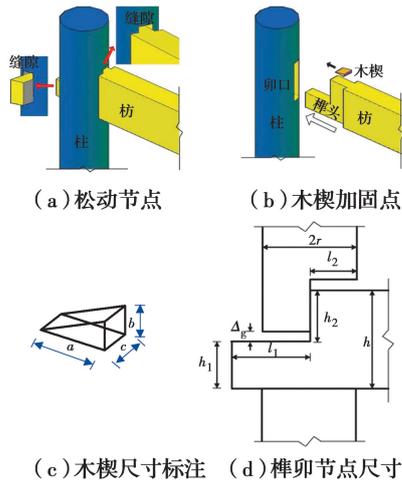


图 1 透榫节点

Fig. 1 Penetrated mortise-tenon

表 1 构件尺寸

Table 1 Dimensions of components

构件名称	构件尺寸	宋尺/份	模型尺寸/mm
柱	直径	36	390
	柱高	255	1 750
枋	截面高 $h$	30	320
	截面宽 $b$	20	210
	总长	250	2 625
完好节点 (SJ)	截面宽 $b$		95
	大头长 $l_2$	18	195
	大头截面高 $h$	30	320
	小头长 $l_1$	25	270
松动节点 (LJ)	大头截面高 $h$		310
	榫卯缝隙 $\Delta_g$		10
木楔加固 节点(WJ)	大头截面高 $h$		310
	长 $a$		40
木楔尺寸	宽 $c$		20
	高 $b$		95

表 2 木材材性参数

Table 2 Material parameters of timber

$E_t$ /GPa	$\sigma_{pc}$ /MPa	$E_h$ /MPa	$\sigma_{tc}$ /MPa
8.856	34.76	1 024	4.18

注: $E_t$ 为顺纹弹性模量; $\sigma_{pc}$ 为顺纹抗压强度; $E_h$ 为横纹弹性模量; $\sigma_{tc}$ 为横纹抗压强度。

### 1.2 试验方案

木柱和枋的安装方式如图 2 所示。根据木柱尺寸自主设计了类似于抱箍的固定支座,通过支座将

水平放置的柱两端固定。将枋端榫头竖向放入木柱的卯口中,通过 MTS 液压伺服加载系统在枋端施加水平荷载。枋端的水平位移和水平力可直接由 MTS 作动器测得。试验过程中的位移计布置如图 3 所示,其中, D1、D2、D3 和 D4 为水平位移计, R1 为转角计。在转动过程中,节点变形主要集中在榫头和卯口处;为测得榫头的横纹受压变形,在榫头两侧布置应变片。为测得卯口的顺纹受压,在卯口两侧布置应变片。为了直观地观察榫头的横纹受压变形,在榫头各截面画  $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  的网格。



图 2 试验装置

Fig. 2 Loading setup

根据试验标准 ISO-16670<sup>[17]</sup>,试验采用如图 3 所示的位移控制加载,第 1 级加载位移为 10 mm,按照级差 10 mm 逐级递增依次进行循环加载,直到透榫节点破坏,结束加载。位移向右加载为正向,向左加载定为负向。

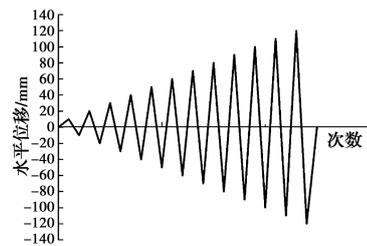


图 3 加载制度

Fig. 3 Loading system

## 2 试验现象与讨论

1)完好节点:加载初期,榫头未出现明显转动。随后,榫端和卯口边缘逐渐挤紧。继续加载,榫头出现拔榫现象(图 4)。加载末期,伴随着采集仪上监测的水平力出现明显跌落,榫头破坏。观察试验现象发现,榫头先经历少量滑移而后与卯口相互挤压,且横纹受压变形随位移的增加而增加。

2)松动节点:加载初期,榫头出现滑移现象。随



图 4 拔榫

Fig. 4 Pulling-out of the tenon

位移增加,节点逐渐挤紧,榫头出现明显木材挤压变形、拔榫和榫头破坏现象。如图 5 所示,在整个加载过程中,榫头与卯口具有一侧相互挤压,另一侧二者分离的现象。



图 5 松动节点榫头与卯口分离

Fig. 5 Separate of mortise and tenon of loose joint

3)木楔加固节点:加载初期,木楔无明显受压变形。随转角增加,木楔与卯口逐渐挤紧,木楔出现横纹受压变形。正向加载时,卯口一侧木柱横纹受压痕迹明显,榫头也出现明显受压变形,另一侧木楔被挤扁(图 6),木楔最终发生挤压破坏。此外,加载末期,榫头出现延伸到榫头根部的顺纹撕裂破坏。



(a) 木楔被挤压



(b) 木楔被挤扁

图 6 木楔加固节点试验现象

Fig. 6 Test phenomenon of the joint with wedge

加载结束后,榫头的木材挤压变形如图 7 所示,3 个节点模型均在榫头变截面处出现延伸到榫头根部的木纤维顺纹撕裂破坏(图 8)。



(a) 榫头木材挤压正立面 (b) 榫头木材挤压侧面视角

图 7 榫头横纹受压

Fig. 7 Compression deformation of tenon



图 8 木纤维顺纹撕裂破坏

Fig. 8 Wood fiber torn along the grain

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 滞回曲线

完好节点、松动节点和木楔加固节点的滞回曲线如图 9 所示,弯矩由水平力与加载点到榫头的距离乘积得到,转角由转角计测得。为满足节点安装的要求,完好节点具有初始缝隙,因此,其具有较短的滑移段,如图 9(a)所示。松动节点的滑移段较长,正反向的初始挤压转角均大于完好节点,如图 9(b)所示。木楔加固节点无明显滑移段,初始挤压转角较松动节点提前,如图 9(c)所示。初始加载时,节点木材变形较小,节点耗能较少。随着加载位移的增加,榫端与卯侧的相互作用增加,榫头的摩擦滑移量变大。此时曲线包络面积增加,表明节点耗能增加。在反向加载到 0.050 rad 时,3 组节点弯矩出现迅速下降,榫头均发生破坏。

图 10 为 3 组节点的滞回曲线对比图,节点的滞回曲线均呈“反 Z 形”。其中,完好节点的滞回曲线最饱满。松动节点具有明显滑移段和捏拢效应,木楔加固后,节点的滑移现象减弱,滞回环比松动节点的更饱满,表明木楔提高了松动节点的耗能能力,且节点提供的恢复弯矩明显增加,虽然仍小于完好节点的恢复弯矩,滞回曲线的饱和程度也略低于完好节点,但木楔能有效改善松动节点的耗能能力和抵抗外荷载的能力。

#### 3.2 骨架曲线

图 11 为 3 组节点的转角-弯矩骨架曲线。在加载初期,3 组节点的榫头先滑移,曲线的斜率较小。

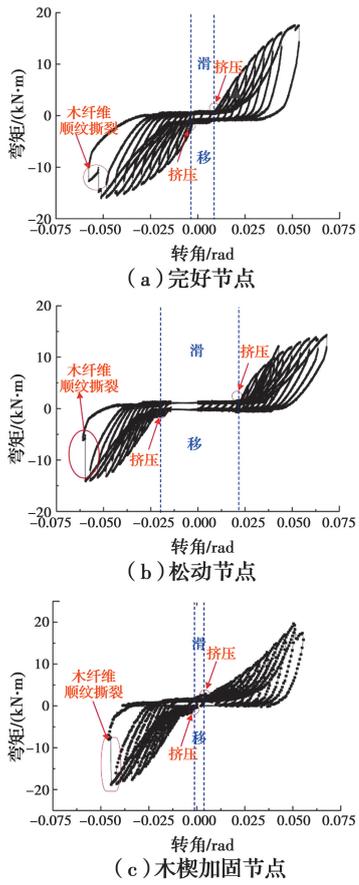


图 9 滞回曲线

Fig. 9 Hysteretic curves

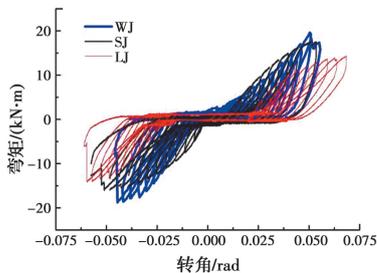


图 10 完好、松动和木楔加固节点的滞回曲线

Fig. 10 Hysteretic curves of SJ, LJ and WJ

其中,松动节点的滑移段最长,木楔加固节点次之,完好节点几乎没有滑移段。随后,曲线斜率变大,弯矩随转角增加而增加,表明榫头与卯口逐渐挤紧,该段为弹性段;当达到一定转角时,榫头出现明显受压变形,榫头木材屈服,曲线斜率降低,榫头进入横纹受压弹塑性阶段,该段为木材受压变形强化段;当转角达到 0.050 rad 时,榫头出现木材撕裂破坏,3 组节点的弯矩均出现迅速下降,该段为榫头破坏段。在反复荷载作用下,榫卯节点的工作状态可划分为滑移段、弹性段、变形强化段和破坏段。

如图 11 所示,完好节点滑移段较短,节点的转

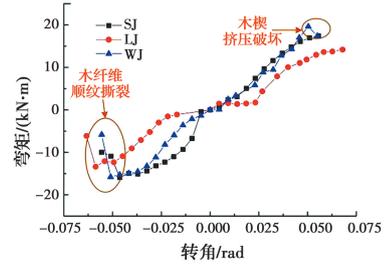


图 11 骨架曲线

Fig. 11 Skeleton curves

动弯矩最大。松动节点滑移段较长,其转动弯矩最小。木楔加固节点通过木楔与卯口的反复挤压使节点恢复弯矩明显提高,有效减小了榫卯节点的滑移段;如图 11 所示,木楔对正向加载段弯矩的提高程度高于反向加载段,这是因为正向加载时,木楔与卯口挤压程度增加(图 6(a))。在加载后期,木楔加固节点的弯矩与完好节点几乎接近,较松动节点的弯矩提高约 30%。正向加载到 0.050 rad 时,由于木楔发生挤压破坏,刚度曲线出现明显下降段,表明榫卯节点主要依靠木材的挤压力抵抗外荷载。

### 3.3 刚度退化曲线

根据每级控制转角下刚度的计算方法<sup>[15]</sup>,得到图 12 所示的刚度退化曲线。由图 12 可知,榫头先滑移,刚度较小。榫端与卯侧相互挤压时,节点抗弯刚度逐渐增加。当榫头木材屈服后,刚度降低,曲线下降。当超过 0.050 rad 后,榫头出现材料破坏,刚度迅速下降;木楔加固节点和完好节点的正向加载段刚度变化基本一致,表现为初始加载段刚度较低,随后榫头与卯口的挤压变形和木楔与卯口的挤压变形使二者的刚度增加。继续加载,二者刚度降低。另一侧加载时,由于木楔加固节点的滑移量相对较大,其刚度较小,随后榫端与卯侧互相挤压,刚度增加。到 0.037 5 rad 时,木楔加固节点的刚度与完好节点接近;到 0.050 rad 时,木楔发生挤压破坏,刚度下降。由图 12 可知,在转动过程中,榫卯节点一般会首先滑移,具有接触非线性特征,表现为初始

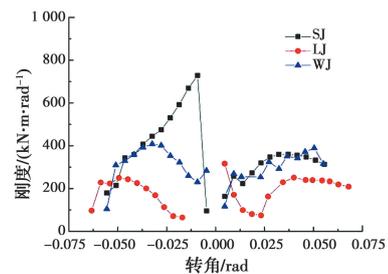


图 12 刚度退化曲线

Fig. 12 The degradation curves of stiffness

刚度较小而滑移较大;随变形的发展,榫头与卯口相互接触挤紧,节点刚度逐渐增大并出现弹性、弹塑性变形,且正反向刚度表现出差异性。

### 3.4 耗能

透榫节点的耗能能力来源于节点的摩擦、木材的塑性变形耗能以及节点破坏时的材料断裂耗能,用等效粘滞阻尼系数  $h_c$  来衡量<sup>[6]</sup>。

3组节点的  $h_c-\theta$  曲线如图 13 所示,初始加载时节点的等效黏滞阻尼系数较大,表明透榫节点主要依靠摩擦耗能,此时木材挤压变形消耗的能量较少。当榫头与卯口互相接触后,  $h_c$  随转角增加而逐渐减小,随后经历一段平稳段后又有所回升。这是因为在滑移段时,节点摩擦耗能增加,随着节点弹性变形的出现,节点耗能减小;当节点破坏时,3个节点榫头变截面处木纤维撕裂破坏以及木楔挤压破坏,消耗能量较大,节点耗能能力增加。

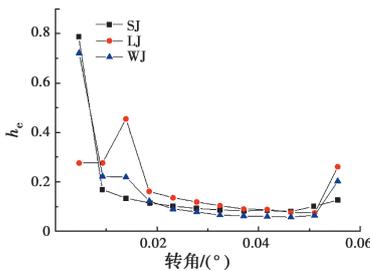


图 13 等效黏滞阻尼系数与转角曲线  
Fig. 13 Curves of equivalent viscous damping coefficient and rotational angle

### 3.5 应力状态

为研究木楔加固后榫卯的应力状态,直观地明晰节点区域内部应力、应变等微观受力性能的变化,建立了 ABAQUS 有限元模型(图 14)。材料本构关系选用双线性简化模型,材性参数见表 2;模型网格

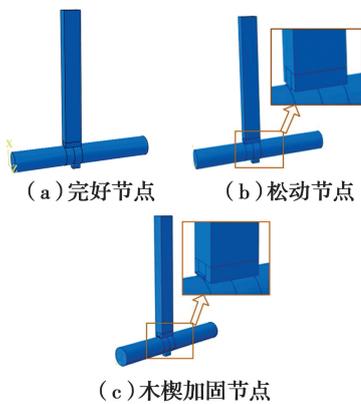


图 14 节点有限元模型  
Fig. 14 Finite element models of joints

单元选用 C3D8R 实体单元。FEM 的边界条件与试验一致。榫头与卯口之间的法向作用选用“硬接触”,切向作用采用静动摩擦来处理。

图 15 为完好节点、松动节点和木楔加固节点在加载中间状态(对应转角为 0.028 rad)时的变形和应力云图。当转角为 0.028 rad 时,完好节点榫头右侧挤压处最大应力为 1.802 MPa,松动节点榫头右侧挤压处的最大应力为 1.42 MPa,木楔加固节点榫头右侧挤压处最大应力为 0.83 MPa,木楔的最大应力为 1.8 MPa。根据榫头的应力变化可知,木楔加固后,由于木楔直接与卯口接触,榫头的变形量进一步减小,应力也随之减小,而木楔的变形和应力增加。因此,木楔能显著减小榫头的变形和应力,使榫头不易出现横纹压缩破坏。

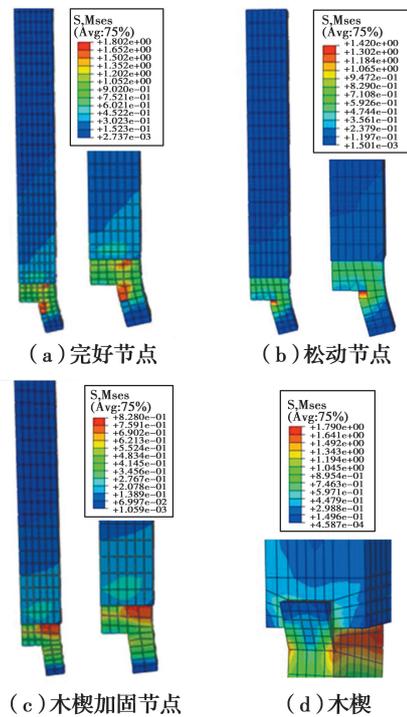


图 15 节点应力状态  
Fig. 15 Stress states of joints

## 4 结论

1)在反复荷载作用下,榫头的主要破坏形式为变截面出现延伸至榫头根部的木材顺纹撕裂破坏,木楔加固节点的滑移现象减弱;破坏特征为正向加载时木楔挤压破坏,反向加载时榫头撕裂破坏。

2)完好节点和松动节点在受力过程中会首先出现滑移,具有接触非线性特征,表现为初始刚度较小而滑移较大;随着变形的发展,榫头与卯口相互接触挤紧,节点刚度会逐渐增大并产生弹性、塑性变形。木楔加固节点滑移现象较弱,主要表现为木楔与卯口互相挤压,节点刚度逐渐增加。

3)木楔加固节点通过木楔与卯口的反复挤压使节点恢复弯矩明显提高。在加载后期,木楔加固节点的弯矩与完好节点几乎接近,较松动节点的弯矩提高约30%。木楔能有效提高松动节点的耗能能力、刚度和延性等抗震性能。

### 参考文献:

- [1] CHEN C C, QIU H X, LU Y. Flexural behaviour of timber dovetail mortise-tenon joints [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 112: 366-377.
- [2] 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)
- [3] SEO J M, CHOI I K, LEE J R. Static and cyclic behavior of wooden frames with tenon joints under lateral load [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1999, 125(3): 344-349.
- [4] FEIO A O, LOURENÇO P B, MACHADO J S. Testing and modeling of a traditional timber mortise and tenon joint [J]. *Materials and Structures*, 2014, 47(1/2): 213-225.
- [5] 夏海伦. 不同松动程度下古建筑透榫节点抗震性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.  
XIA H L. Experimental study on seismic behavior of through-tenon joints under different degree of looseness in ancient wooden buildings [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] OGAWA K, SASAKI Y, YAMASAKI M. Theoretical estimation of the mechanical performance of traditional mortise-tenon joint involving a gap [J]. *Journal of Wood Science*, 2016, 62(3): 242-250.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] GUAN Z W, KITAMORI A, KOMATSU K. Experimental study and finite element modelling of Japanese "Nuki" joints—Part one: Initial stress states subjected to different wedge configurations [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(7): 2032-2040.
- [11] GUAN Z W, KITAMORI A, KOMATSU K. Experimental study and finite element modelling of Japanese "Nuki" joints—Part two: Racking resistance subjected to different wedge configurations [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(7): 2041-2049.
- [12] 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)
- [13] 潘毅,安仁兵,张春涛,等. BFRP布加固圆截面木梁受弯性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(10): 197-206.  
PAN Y, AN R B, ZHANG C T, et al. Experimental study on flexural behavior of BFRP reinforced circular timber beams [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(10): 197-206. (in Chinese)
- [14] 潘毅,王超,唐丽娜,等. 古建筑直榫节点扁钢与阻尼器加固比较研究[J]. *西南交通大学学报*, 2014, 49(6): 981-986, 1031.  
PAN Y, WANG C, TANG L N, et al. Comparative research on flat steel and damper strengthening of straight type of tenon-mortise joints [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2014, 49(6): 981-986, 1031. (in Chinese)
- [15] 潘毅,安仁兵,王晓玥,等. 古建筑木结构透榫节点力学模型研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(4): 61-70, 82.  
PAN Y, AN R B, WANG X Y, et al. Study on mechanical model of through-tenon joints in ancient timber structures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(4): 61-70, 82. (in Chinese)
- [16] 李诚. 营造法式[M]. 北京: 商务印书馆, 2010.  
LI J. *Ying zao fa shi* [M]. Beijing: Commercial Press, 2006.
- [17] Timber structures: Joints made with mechanical fasteners: Qusai-static reversed-cyclic test method: ISO-16670 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2003.