

不同松动程度下古建筑透榫节点抗震性能试验研究

薛建阳, 夏海伦, 李义柱, 代武强

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 现存古建筑木结构中均存在不同程度的残损, 榫卯节点的松动属于其中典型的一种. 为研究不同程度的节点松动对透榫节点的抗震性能影响, 参照清《工程做法则例》以 1:3.2 缩尺比, 制作了 6 个透榫节点模型, 其中 1 个完好节点和 5 个不同松动程度节点. 通过低周往复加载试验, 得到了完好节点与不同松动程度节点的破坏形态、弯矩-转角滞回曲线与骨架曲线、强度与刚度退化曲线、变形及耗能能力等力学性能. 结果表明: 透榫节点榫颈截面处木材纤维拉断, 出现裂缝并斜向榫头端部延伸, 发生弯曲破坏; 各节点滞回曲线形状均由 S 形过渡到 Z 形, 且随着松动程度增大, 捏拢效应越明显; 松动节点的转动弯矩、刚度和耗能能力均比完好节点低, 且随着松动程度增大不断降低; 各个节点的变形能力均较好, 但松动节点的极限转角要大于完好节点, 并随节点松动程度的增大而增大.

关键词: 古建筑木结构; 透榫节点; 松动; 拟静力试验; 抗震性能

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)04-0463-07

Experimental study on seismic behavior of penetrated mortise-tenon joints under different degree of looseness in ancient buildings

XUE Jianyang, XIA Hailun, LI Yizhu, DAI Wuqiang

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Different degrees of damage exist in ancient wooden building, in which the looseness of mortise-tenon joints is typical. In order to study the influence of looseness with different degrees on the seismic performance of penetrated mortise-tenon joints, six 1:3.2 scale penetrated mortise-tenon joints models that are made complying with Engineering Fabrication Methods of Qing Dynasty were tested under low-cycle reversed loading. One of these joints is complete, while the other 5 have defects of different degrees of looseness. The behaviors of joints such as the failure characteristics, hysteretic loops and skeleton curve, degradation of rigidity and energy dissipation capacity were studied. The results indicate that the wood fiber at the bottom of the tenon is snapped and the crack extends to the other end. The shape of hysteretic loops of all joints transfers from S shape to Z shape and the gathering effect becomes more obvious with the increase of loose degree. The rotation capacity, stiffness and energy dissipation capacity of the loose joints are lower than the intact one significantly and reduce gradually as the loose degree increases. Each joint exhibits good deformation performance. The ultimate rotation of the loose joints are higher than the intact one and increase gradually as the loose degree increases.

Key words: ancient wooden building; penetrated mortise-tenon joint; looseness; quasi-static test; seismic behavior

木结构古建筑中的构件之间普遍采用榫卯连接^[1], 常见榫卯节点的形式主要分为燕尾榫和直榫, 后者又可分为透榫和半透榫^[2]. 由于形式不同, 其受力状况也存在差异, 从力学性能考虑, 榫卯具有半刚性连接特性, 不同于现代混凝土和钢结构等结构的连接方式. 对榫卯连接特性进行深入研究, 是木结构古建筑整体结构特性和抗震性能研究的基础.

目前, 一些学者对古建木结构榫卯节点的抗震性能做了大量的研究, 其中主要以试验研究为主. 姚侃等^[3]对透榫与燕尾榫节点的力学性能进行了分析, 并结合低周往复试验, 研究了节点的半刚性特点及其刚度退化规律; 隋葵等^[4]对采用透榫与燕尾榫节点连接的木构架进行了低周往复试验, 得到了两种节点的弯矩-转角滞回曲线及骨架曲线, 并由所得曲线拟合了节点的弯矩-转角关系方程,

收稿日期: 2016-09-14

修改稿日期: 2017-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(51678478); 国家“十二五”科技支撑计划(2013BAK01B03-02); 陕西省科学技术研究发展计划(2013KW23-01)

第一作者: 薛建阳(1970—), 男, 工学博士, 教授, 主要从事钢与混凝土组合结构及古建筑结构抗震研究. E-mail: jianyang_xue@163.com

建立了节点的恢复力模型,最终得出了两种榫卯节点连接刚度的非线性变化规律;徐明刚等^[5]对 2 榫未加固构架和 3 榫采用碳纤维布、2 榫采用植入钢筋加固的木构架模型进行了低周往复试验研究,得到了未加固构架和两种加固构架的破坏形式、滞回曲线、变形特点及刚度退化规律等性能;谢启芳^[6]等结合碳纤维布与扁钢加固榫卯节点的木构架的低周往复加载试验结果,分析了加固前后木构架的抗震性能;方东平^[7]等定义了反映木结构榫卯节点特性的半刚性单元,并结合这种单元建立了适合古建木结构特点的有限元计算模型和分析方法.通过以上研究可以看出,以往的研究大都是以燕尾榫作为研究对象,很少涉及透榫等其他类型.并且研究多是以完好木构架做试验及分析,没有考虑古建筑木结构因长期使用造成的残损因素.古建筑残损类型有很多种,榫卯节点松动是其中典型的一种,广泛存在于各类古建筑中^[8-9].

基于此,参照清《工程做法则例》的构造做法,以削弱榫头截面的方式人工模拟松动节点,制作了完好与不同松动程度的透榫节点,并对其进行低周往复加载试验,研究了各松动透榫节点的抗震性能.

1 试验设计

1.1 试件设计及制作

根据清《工程做法则例》,选用清式五等材(营造尺:4 寸,公制:12.80 cm)制作了 6 个大式建筑的透榫节点,缩尺比为 1:3.2,其中包含 1 个完好节点和 5 个具有不同松动程度的节点.节点模型尺寸见表 1,其构造见图 1.材质选用天然干燥期为一年的樟子松新材,其力学性能见表 2.

透榫节点在受力过程中,榫头主要表现为横纹受压,卯口为顺纹受压.木材的各向异性性质导致其横纹抗压强度约为顺纹抗压强度的(1/3~1/10),挤压变形主要发生在榫头.鉴于此,可假定试验过程中节点的变形主要为榫头的挤压变形,卯口基本不变形,通过削减大小榫头的截面高度来模拟松动.具体削减方法如下:TJ1 表示完好节点,不进行削减;TJ2、TJ3、TJ4、TJ5、TJ6 表示松动节点,对节点大小榫头截面高度同时进行削减,尺寸依次为 4 mm、8 mm、12 mm、16 mm、20 mm,削减尺寸占大榫头截面高度的比例依次为 2.5%、5.0%、7.5%、10.0%、12.5%,松动节点模型如图 2 所示.

表 1 节点模型尺寸

Tab. 1 Dimensions of models

构件	名称	原清尺/斗口	模型尺寸/mm
内柱	直径	6	240
	柱长	22.5	900
穿插枋	截面高	4	160
	截面宽	3.2	128
	枋长	27.5	1 100
	大榫头截面高	4	160
透榫	小榫头截面高	2	80
	榫宽	1.5	60
	大榫头长	3	120
	小榫头长	4.5	180

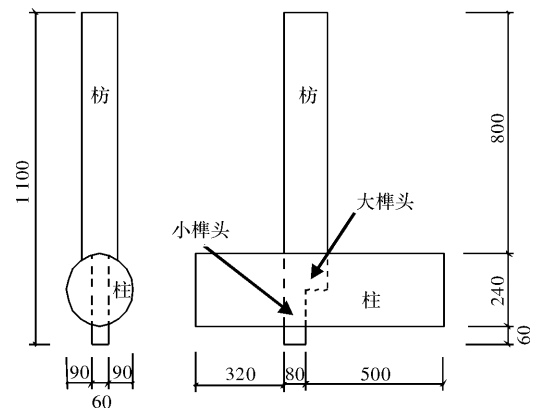


图 1 节点模型尺寸示意(单位: mm)

Fig. 1 Sketch of model(unit: mm)

表 2 木材力学性能

Tab. 2 Mechanical performances of timber

MPa

木材种类	顺纹抗拉强度	顺纹抗压强度	横纹抗压强度	顺纹弹性模量	横纹弹性模量
樟子松	69	23	3.16	3 805	268



图 2 制作完成的松动榫卯节点(单位: mm)

Fig. 2 Loose mortise-tenon joints(unit: mm)

为了定量描述透榫节点的松动情况,用削减的榫头截面尺寸与大榫头截面原尺寸的比值,来定义节点的松动程度 D . 具体削减尺寸及松动程度如表 3 所示.

由于节点存在松动,在榫头与卯口挤紧之前,节点只会发生自由转动,这时没有约束弯矩产生.当榫头与卯口挤紧之后,两者之间产生明显的相

低周往复荷载增大,榫卯之间出现缝隙并逐渐加大,榫头有少量拔出;继续加载,榫头与卯口之间的挤压变形增大,伴随木纤维的断裂声,拔榫量增大;反向加载至 50 mm,出现刺耳的断裂声,荷载大幅跌落;在后期加载中,反向荷载基本不再增加,而正向荷载继续增加,直到加载位移为 +60 mm 时,出现刺耳的断裂声,榫颈发生断裂,试验结束。



图5 部分试件破坏示意图

Fig. 5 Failure patterns of specimens

(2)观察试验结束后的试件 TJ1 发现:枋和柱基本未发生损坏,榫头挤压变形明显,卯口基本不发生变形;由于往复荷载的作用,榫头横纹方向出现大量塑性变形,榫颈变细;正向加载时节点发生弯曲破坏,榫颈截面木材纤维拉断形成裂缝,并斜向榫头变截面处延伸;反向加载时,榫头木纤维由于横纹受拉,沿变截面处撕裂,并延伸至榫头根部。

(3)对于松动节点(TJ2~TJ6),加载初期,由于不同程度的松动导致节点发生自由转动,在位

移较小时,榫卯之间未能挤紧,荷载接近零。当节点转动角度增大且大于自由转角时,榫头与卯口逐渐挤紧,发出“吱吱”声,之后的现象与完好节点类似,但随着节点松动程度的增大,加载过程中的拔榫量会增大,最后发生破坏时所加载的转角也随之增大。

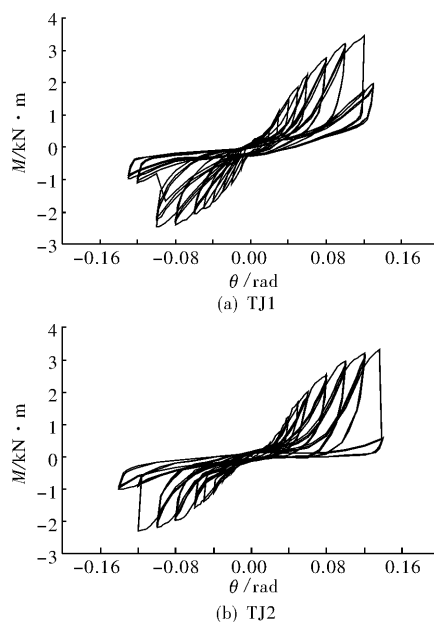
(4)正向加载时,各松动节点均为折榫破坏,与完好节点基本类似,但随着松动程度的增加,榫头折断的位置逐渐由榫颈向榫头下移;反向加载时,榫头变截面处发生顺纹撕裂,最终延伸至榫头根部,松动节点的破坏形态与完好节点基本相同。

3 试验结果及分析

3.1 节点的 $M-\theta$ 滞回曲线

由低周往复加载试验结果可得到结构的滞回耗能特性,从而反映结构的抗震性能:承载力、刚度、延性、耗能能力等。图6为各节点的 $M-\theta$ 滞回曲线, M 由荷载与加载点到柱上边缘距离的乘积计算求得, θ 由作动器的加载位移与加载点到柱上边缘的距离的比值求得。对各节点的滞回曲线分析,可得到如下特点:

(1)对于完好节点 TJ1,曲线形状开始为反 S 形,之后逐渐过渡为倒 Z 形,捏拢效应较明显,说明榫头和卯口之间发生了大量滑移。正向加载破坏时,从 $M-\theta$ 滞回曲线可看出,节点的转动弯矩发生大幅跌落;随着节点转角增大,滞回环面积不断变大,表明节点耗能增多,同级加载位移下,第 2、3 圈滞回环面积小于第 1 圈,是因为第一次加载循环后,节点产生的不可恢复变形导致后两次循环的耗能显著降低。



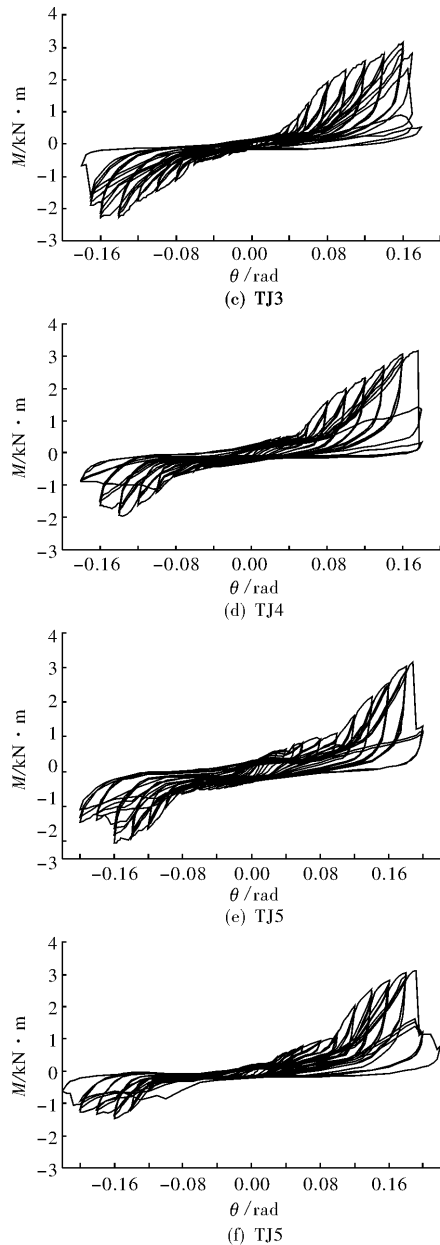
图6 各试件的 $M-\theta$ 滞回曲线

Fig. 6 Moment-rotation hysteretic curves of the specimens

(2)随着松动程度增大,松动节点(TJ2~TJ6)的捏拢效应逐渐显著,相比完好节点更加明显,是因为松动程度增大导致榫头和卯口间发生了更大的滑移;完好节点的滞回环面积要大于松动节点,当松动程度增大时,滞回环饱满度变差,说明松动导致了透榫节点的耗能能力降低;节点破坏时,弯矩均有大幅跌落,但松动节点的极限荷载要不同程度地低于完好节点。

(3)透榫节点在构造上的不对称,导致了正反向的滞回曲线不对称。正向加载时,节点的承载力、变形能力均高于反向,且滞回环较反向更丰满。

3.2 节点的 $M-\theta$ 骨架曲线

将透榫节点的 $M-\theta$ 滞回曲线上所有第一循环的峰值点连接起来,可得到其骨架曲线。图7为各节点的 $M-\theta$ 骨架曲线,从曲线上可以反映出节点的极限承载力及加载过程中弯矩-转角关系的相对变化规律等特征。各节点骨架曲线特征总结如下:

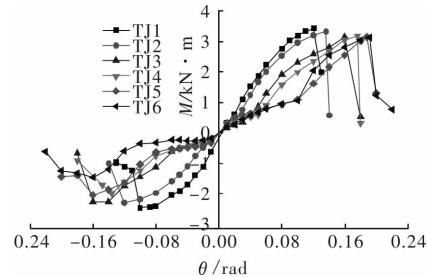
图7 各试件的 $M-\theta$ 骨架曲线

Fig. 7 Moment-rotation skeleton curves of the specimens

(1)从图7可看出完好节点 TJ1 的 $M-\theta$ 骨架曲线大致可分为四个阶段:在节点转角达到 0.06 rad 之前,曲线大致呈直线,视为弹性阶段;节点转角超过 0.06 rad 后,曲线斜率开始下降,视为屈服阶段;之后随着节点转角继续增大,节点弯矩不断增大,曲线较屈服段平缓,进入强化阶段;当节点转角达到 0.12 rad 时,曲线开始下降,视为破坏阶段。

(2)在加载初期,由于榫头与卯口没有挤紧,松动节点 TJ2~TJ6 的弯矩随转角的增大不明显,曲线出现滑移段,且随着节点松动程度的增大而不断增大;当节点转角超过自由转角后,榫头与卯口逐渐挤紧,曲线出现明显的上升段,节点进入弹性阶段;之后依次经历屈服、强化、破坏等阶段,受力过程与完好节点类似,但滑移导致松动节点各受力阶段相比完好节点滞后。

(3)比较而言,不同松动程度节点的极限转角大于完好节点,但其极限弯矩低于完好节点;节点的极限转角随松动程度增大而不断增大,但其极限弯矩不断降低。

(4)各透榫节点的骨架曲线表现出不对称,正向加载时,节点的极限转角和极限承载力均大于反向,破坏阶段的弯矩降低比反向明显。

3.3 节点的强度退化规律

同级加载条件下,构件进入塑性状态后,其承载力随加载次数的增加而不断降低的特性,称为强度退化^[10]。可用同级加载条件下,各次循环中承载力降低系数 λ_i 来表示构件的强度退化,计算公式见式(2):

$$\lambda_i = \frac{P_{ji, \max}}{P_{j1, \max}} \quad (2)$$

式(2)中: λ_i 表示第 i 圈循环时的强度退化系数; $P_{ji, \max}$ 为第 j 级位移加载下第 i 圈循环的峰值荷载; $P_{j1, \max}$ 为第 j 级位移加载下第 1 圈循环的峰值荷载.

试验中 λ_i 采用同级加载条件下, 第 3 圈循环与第 1 圈循环的峰值荷载的比值. 不同加载转角下各试件的强度退化曲线见图 8. 由图可知:

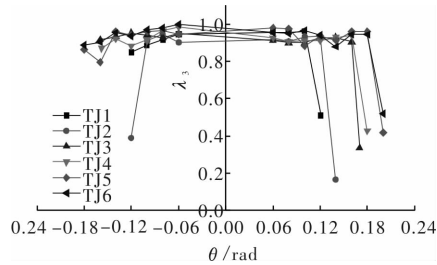


图 8 各试件的强度退化曲线

Fig. 8 Curves of strength degradation

(1)在各加载阶段, 节点的强度退化系数基本都小于 1, 强度退化较明显, 且随着加载转角的增大, 强度退化系数不断降低; 节点破坏之前, 强度退化系数大致在 0.85~1 之间, 说明此时节点的强度退化较缓; 节点破坏之后, 其强度退化系数大幅降低, 平均值为 0.64, 退化较明显.

(2)破坏阶段, 正向加载条件下的强度退化现象比反向加载明显. 这是因为正向加载时, 榫颈发生顺纹拉断破坏, 反向加载时榫头变截面处发生顺纹撕裂, 正向加载表现出更明显的脆性破坏特征.

3.4 节点的刚度退化规律

节点刚度随加载循环周数与控制位移的增大而逐渐变小的现象, 称为刚度退化^[10]. 低周往复荷载作用下, 节点的刚度可用割线刚度 K 表示. 榫头和卯口间的松动导致节点在初始阶段发生自由转动, 其初始刚度很小, 因此仅分析节点在达到最大自由转角后的刚度变化. 节点的刚度退化曲线见图 9, 从图中可看出:

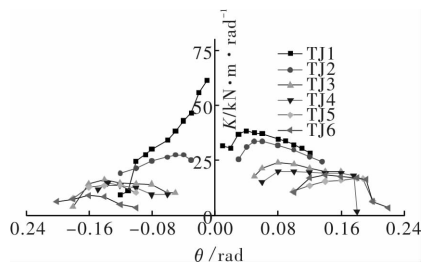


图 9 试件刚度与转角的关系

Fig. 9 Rigidity-rotation relationships of the specimens

(1)节点刚度退化曲线大致可分 3 个阶段: 第一阶段为上升段, 当榫头与卯口挤紧后, 节点刚度明显上升; 第二个阶段为下降段, 榫头和卯

口间由于挤压出现塑性变形, 此后随着转角增大, 挤压变形不断减小, 节点刚度逐渐减小并趋于平缓; 第三阶段为急速下降段, 节点由于发生破坏而丧失承载能力, 刚度出现明显下降.

(2)相比完好节点, 松动节点的初始刚度要小于完好节点, 且随着松动程度增大, 节点刚度越来越小; 不同松动程度节点的刚度退化幅度相比完好节点要小, 松动程度越大, 刚度退化幅度越小, 最终趋于平缓.

3.5 耗能性能

等效黏滞阻尼系数 h_e 可用来衡量节点的耗能能力^[11-12]. 由于不同程度松动导致节点存在自由转动, 在超过最大自由转角前, 榫头与卯口基本无挤压变形, 节点耗能很小. 因此, 主要研究节点在超过最大自由转角之后的耗能情况, 图 10 为试件等效黏滞阻尼系数与转角的关系. 由图分析可知:

(1)完好节点与松动节点的等效黏滞阻尼系数均随转角的增大而逐渐减小, 直到破坏阶段, 节点的等效黏滞阻尼系数又开始回升. 原因是在加载初期, 随着转角增大, 节点间的塑性变形逐渐减小, 导致节点耗能能力降低; 在破坏阶段木材纤维被拉断, 导致节点释放较大的能量, 节点的耗能能力有一定程度的上升.

(2)不同松动程度节点的等效黏滞阻尼系数均比完好节点小, 且随节点松动程度的增大而减小, 是因为松动使得节点间产生了初始滑移, 且随着松动程度的增加, 节点的滑移效应越来越大, 所以节点的耗能越来越小.

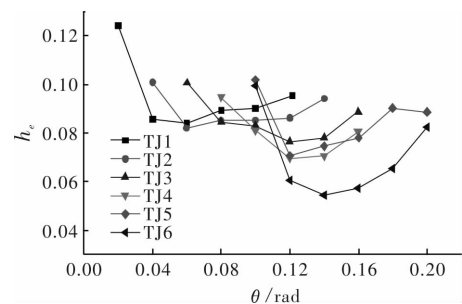


图 10 试件等效黏滞阻尼系数与转角的关系

Fig. 10 Viscous damping ratio-rotation relationships of the specimens

3.6 变形能力

延性是结构抗震性能的一个重要特性, 它能反映结构变形的能力^[13-14]. 目前对榫卯节点屈服点的确定尚无统一的准则, 对于木结构榫卯节点,

可用破坏时节点的最大转动角度来衡量其变形能力。节点的极限转角 θ_u 与松动程度 D 的关系见图 11。由图可知:

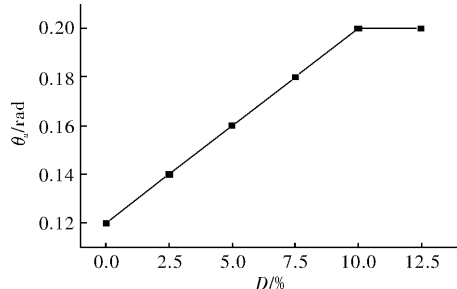


图 11 破坏时转角与松动程度的关系

Fig. 11 Ultimate rotation-looseness degree relationships of the specimens

(1) 各个节点的极限转角均大于 0.12 rad, 数值较大, 说明各节点均有较好的变形能力。

(2) 节点破坏时的转角随着节点松动程度的增大而增大, 且在一定松动程度范围内, 二者呈线性关系, 表明松动使得节点变形能力增强。

4 结论

根据试验结果分析, 可得如下结论:

(1) 透榫节点的破坏主要发生在榫卯连接处, 柱枋整体基本完好。正向加载时, 榫颈截面木材纤维拉断形成裂缝, 并斜向榫头端部延伸折断; 反向加载时, 大小榫头变截面处木纤维发生顺纹撕裂, 最终延伸至大榫头根部。松动节点与完好节点的破坏形态相似, 不同的是松动节点破坏时拔榫量更大, 极限转角更大。

(2) 各节点的 $M-\theta$ 滞回曲线正、反向不对称, 但变化规律基本一致, 形状均由 S 形过渡到 Z 形, 捏拢效应明显; 相比完好节点, 松动节点捏拢效应更显著, 且随节点松动程度增大而愈发明显。

(3) 节点在正向加载时的极限弯矩均大于反向; 不同松动程度节点的极限弯矩比完好节点小, 且随着松动程度增大, 其极限弯矩逐渐降低。

(4) 加载初期, 松动节点的转动刚度较小, 在榫头与卯口挤紧后刚度增大, 之后又随节点转角增大而逐渐减小; 松动节点的刚度均小于完好节点, 且随着松动的增大而不断减小。

(5) 节点的耗能随其转动角度的增大而逐渐减小, 至破坏阶段又开始上升, 节点的耗能能力随节点松动的增加而不断减小。

(6) 完好节点和不同松动程度节点均有较好的变形能力, 随着松动程度增加, 节点转角不断增大, 二者基本呈线性变化, 松动使得节点的变形

能力增强。

参考文献 References

- [1] 李诫. 营造法式[M]. 上海: 商务印书馆, 1950.
LI Jie. Fabrication Methodology [M]. Shanghai: Business Press, 1950.
- [2] 赵鸿铁, 薛建阳, 隋葵, 等. 中国古建筑木结构及其抗震: 试验、理论及加固方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
ZHAO Hongtie, XUE Jianyang, SUI Yan, et al. Chinese ancient timber building structure and its seismic behaviors: Test, theory and strengthening method [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [3] 姚侃, 赵鸿铁, 葛鸿鹏. 古建木结构榫卯连接特性的试验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(10): 168-173.
YAO Kan, ZHAO Hongtie, GE Hongpeng, et al. Experimental studies on the characteristic of mortise-tenon joint in historic timber buildings [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(10): 168-173.
- [4] 隋葵, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 古建筑木结构直榫和燕尾榫节点试验研究[J]. 世界地震工程. 2010, 26(2): 88-92.
SUI Yan, ZHAO Hongtie, XUE Jianyang, et al. Experimental study on characteristics of mortise-tenon joints in historic timber buildings [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(2): 88-92.
- [5] 徐明刚, 邱洪兴. 古建筑木结构榫卯节点抗震试验研究[J]. 建筑科学, 2011, 27(7): 56-58.
XU Minggang, QIU Hongxing. Experimental study on seismic behavior of mortise-tenon joints of ancient architectures [J]. Building Science, 2011, 27(7): 56-58.
- [6] 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 Qifang, ZHAO Hongtie, XUE Jianyang, 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.
- [7] 方东平, 俞茂宏, 宫本裕, 等. 木结构古建筑结构特性的计算研究[J]. 工程力学, 2001, 18(1): 137-144.
FANG Dongping, YU Maohong, MIYAMOTO Y, et al. Numerical analysis on structural characteristics of ancient timber architecture [J]. Engineering Mechanics, 2001, 18(1): 137-144.
- [8] 赵均海, 俞茂宏, 杨松岩, 等. 中国古代木结构有限元动力分析[J]. 土木工程学报, 2000, 33(1): 32-35.
ZHAO Junhai, YU Maohao, YANG Songyan, et al. Dynamic analysis for the ancient superstructure of the east city of Xi'an by FEM. [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(1): 32-35.

- viron 2010,45:691-703.
- [9] ABUKU M, BLOCKEN B, NORE K. On the validity of numerical wind-driven rain simulation on a rectangular low-rise building under various oblique winds[J]. Build Environ 2009,44(3):621-632.
- [10] BRIGGEN P M, BLOCKEN B, SCHELLEN H L. Wind-driven rain on the facade of a monumental tower: numerical simulation, full-scale validation and sensitivity analysis [J]. Build Environ 2009; 44 (8): 1675-1690.
- [11] HUANG S H, LI Q S. Numerical simulations of wind-driven rain on building envelopes based on Eulerian multiphase model[J]. J Wind Eng Ind Aerodyn, 2010,98:843-857.
- [12] SANKARAN R, PATERSON DA. Computation of rain falling on a tall rectangular building [J]. Wind Eng. Ind. Aerodyn,1997,72:127-136.
- [13] 吴小平. 低层房屋风雨作用效应的数值研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
WU Xiaoping. Numerical study of wind-rain Interaction effect on low-rise buildings [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008
- [14] 张丽. 土楼夯土墙风雨撞击荷载研究[D]. 厦门:华侨大学,2012.
ZHANG Li. The research of the impact load of rain induced wind on rammed earth wall of earth building [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2012.
- [15] 郑永鑫. 低矮建筑风驱雨作用的数值模拟与实测方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
ZHENG Yongxin. Numerical and site experimental study for wind-driven rain on low-rise buildings [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [16] KUBILAY A, DEROME D, BLOCKEN B. CFD simulation and validation of wind-driven rain on a building facade with an Eulerian multiphase model[J]. Building and Environment,2013, 61: 69-81.
- [17] 王辉,李新俊,潘竹. 建筑(群)立面风驱雨压荷载的数值模拟研究[J]. 土木工程学报,2014,47(9):94-100.
WANG Hui, LI Xinjun, PAN Zhu. Numerical and site experimental study for wind and rain effects on low-rise buildings[J]. China Civil Engineering Journal,2014,47(9):94-100.
- [18] 韩涵. 建筑(群)立面风驱雨分布特性的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2013.
HAN Han. Research on Distribution Characteristics of Wind-driven Rain on Building Envelopes [D]. Hefei: Hefei University of Technology,2013.

(编辑 桂智刚)

(上接第 469 页)

- [9] 赵鸿铁,董春盈,薛建阳,等. 古建筑木结构透榫节点特性试验分析[J]. 西安建筑科技大学(自然科学版), 2010,42(3):315-318.
ZHAO Hongtie, DONG Chunying, XUE Jianyang, et al. The experimental study on the characteristic of mortise-tenon joint historic timber buildings [J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2010, 42(3):315-318.
- [10] 李忠献. 工程结构试验理论与技术[M]. 天津:天津大学出版社,2004.
LI Zhongxian. Test theory and technology of engineering structures [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2004.
- [11] NAKAGAWA T, OHTA M. Collapsing process simulations of timber structures under dynamic loading I: simulations of two-story frame models [J]. Journal of Wood Science, 2003, 49:392-397.
- [12] CHANG W S. Research on rotational performance of traditional Chuan-Dou timber joints in Taiwan [D]. Taiwan: National Chen Kung University, 2006.
- [13] 周乾,闫维明. 古建筑榫卯节点抗震加固数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报,2010,8(3):23-27.
ZHOU Qian, YAN Weiming. Numerical simulation on strengthening for earthquake resistance of tenon-mortise joints of ancient building [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(3): 23-27.
- [14] KING W S, YEN J Y, YEN Y N. Joint characteristics of traditional Chinese wooden frames [J]. Engineering Structure, 1996, 18(8):635-644.

(编辑 桂智刚)