

文章编号:1674-2974(2016)01-0124-08

江南地区传统木构建筑半榫节点受力性能研究*

淳庆^{1,2†}, 潘建伍³, 韩宜丹¹

(1. 东南大学 建筑学院, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 城市与建筑遗产保护教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;
3. 南京航空航天大学 土木系, 江苏 南京 210016)

摘要:对江南地区传统木构建筑中常见的半榫节点受力性能进行了试验和理论研究. 通过试验获取该种榫卯节点在低周反复荷载作用下的破坏模式、滞回曲线、骨架曲线、转角刚度. 结果表明:该种榫卯节点的滞回曲线基本上都呈Z形, 具有明显的捏拢特性. 该种榫卯试件均经历了弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段. 此外, 综合考虑半榫节点的接触非线性和木材的材料非线性, 采用 ANSYS 非线性有限元方法对其受力性能进行分析, 有限元分析结果和试验结果较为吻合, 通过分析, 获取了半榫节点的平面内(竖向)转角刚度、平面外(水平)转角刚度和扭转刚度的相互关系, 可近似归纳为 1.4 : 1.0 : 1.1. 研究结果可为江南地区传统木构建筑的计算分析及保护修缮提供理论基础.

关键词:江南地区; 传统木构建筑; 半榫; 受力性能; 非线性有限元

中图分类号: TU 366.2

文献标识码: A

Research on Mechanical Properties of Ban Mortise-tenon Joint of the Traditional Timber Buildings in the South Yangtze River Regions

CHUN Qing^{1,2†}, PAN Jian-wu³, HAN Yi-dan¹

(1. School of Architecture, Southeast Univ, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. Key Lab of Urban & Architectural Heritage Conservation, Ministry of Education, Southeast Univ, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

3. Dept of Civil Engineering, Nanjing Univ of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: The mechanical properties of the Ban mortise-tenon joints of the ancient traditional timber buildings in the South Yangtze River Regions were studied with the experimental and theoretical methods. The tested mortise-tenon joints include three Ban mortise-tenon joints. The failure modes, the hysteretic curves, the skeleton curves, the rotation rigidities of this kind of mortise-tenon joint under low cyclic loading were obtained. The results show that the hysteretic curves of the Ban mortise-tenon joints appear to be the Z shape and have the obvious pinch effects. During the process of the test, these mortise-tenon joints orderly pass through the elastic stage, the yield stage and the failure stage. Furthermore, with the consideration of the nonlinear contact influence of the mortise-tenon joint and the nonlinear stress-strain behavior of the timber material, the mechanical properties of the Ban mortise-tenon joints were analyzed by ANSYS software. The theoretical results agree well with the experimental results. The relationship of in-plane rotational rigidity, the out-of-plane rotational rigidity and the torsional rigidity of the Ban mortise-tenon joint

* 收稿日期: 2014-12-20

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51138002); National Natural Science Foundation of China(51138002); 国家自然科学基金面上资助项目(51578127)

作者简介: 淳庆(1979—), 男, 江苏南京人, 东南大学副教授, 博士

† 通讯联系人, E-mail: cqnj1979@163.com

is achieved, the ratio of them was 1.4 : 1.0 : 1.1. The results can provide the theoretical basis for computing analysis and repair design of the traditional timber buildings in the South Yangtze River Regions.

Key words: South Yangtze River Regions; traditional timber building; ban mortise-tenon joint; mechanical property; non-linear finite element method

江南地区是我国古代文明的发祥地之一,这里先后孕育了河姆渡文化、马家浜文化、良渚文化、吴越文化和江南文化。江南地区传统木构建筑工艺更是历史悠久,底蕴丰厚,其主要的流派有:香山帮、东阳帮、宁绍帮等,因此,江南地区现存较多的传统木构建筑遗产。然而,由于长期的风雨侵蚀,加之地震、战争和人为使用不当的破坏,这些传统木构建筑的材料和结构性能不可避免的减弱和损伤,大量木构建筑已出现不同程度的损坏,对其维修保护的要求日益迫切。江南传统木构建筑与北方传统木构建筑具有明显的区别,表现在榫卯节点方面,主要体现在以下 4 点:1) 构架体系造成的差别:北方多受抬梁式构架的影响,而南方则穿斗较多,北方的榫卯衔接很少完全穿透构件,榫长较短。南方有专门穿透构件的榫卯类型,如半榫和透榫;2) 比例差异:北方木构件粗大,榫卯粗短。而南方构件纤细,榫卯细长;3) 习惯作法差异:北方早期阑额直榫入柱,而南方早期阑额与柱多用锪口鼓卯或燕尾榫相接等;4) 官式与民式差异:北方受官式影响大,作法较为成熟固定。而南方为适应实际需要,有较多的变化。

姚侃等^[1]根据宋《营造法式》的构造做法设计了直榫、燕尾榫和透榫 3 种榫卯节点的木构模型并进行了试验研究,获得了这 3 种榫卯节点的转角刚度等。高大峰等^[2-3]通过对依据宋《营造法式》构造做法设计的木构架模型在水平反复荷载作用下的试验研究,提出了该类型木构在水平地震作用下的计算模型。谢启芳等^[4]对燕尾榫节点的殿堂式木构架模型在水平低周反复荷载作用下的试验研究,得到了未加固构架、碳纤维布加固构架及扁钢加固构架的破坏特征、滞回曲线、骨架曲线、强度和刚度退化规律、变形及耗能等受力性能。周乾等^[5-6]以故宫太和殿为研究对象,采用有限元模拟分析了太和殿的抗震性能,并通过缩尺模型的试验,得到了相应的半刚性力学参数。李鹏^[7]引入空间弹簧单元,对藏式木构建筑典型梁柱节点进行了有限元分析,探讨了该类型木构建筑的抗震性能。肖旻等^[8]采用有限元方法对广府祠堂木构建筑的典型榫卯节点和木构架的受力性能和安全性进行了研究。杨艳华等^[9]通过对燕

尾榫榫卯连接模型的试验,结合理论分析,建立了燕尾榫的 4 参数幂函数的弯矩-转角相关曲线模型。Chun Qing 等^[10]对中国南方传统木构建筑典型榫卯节点的抗震性能进行了研究,得出了燕尾榫、半榫、十字箍头榫以及馒头榫 4 种典型榫卯节点的半刚性力学特性。Villar J R 等^[11]对木构件之间的节点进行有限元模拟,指出构件接触面间的摩擦作用对抗震很重要,同时构件间的角度对接触面上的应力分布有影响。Ayala Dina F D 等^[12]对台湾叠斗木构架进行了有限元模拟,对其抗震性能进行了研究,指出节点的刚度对结构整体在地震作用下的位移响应有很大影响。Pang Sung-jun 等^[13]对韩国传统木构建筑中是否有梁肩的燕尾榫节点抗弯承载能力进行了研究,指出有梁肩可以大幅提高燕尾榫的抗弯承载力。

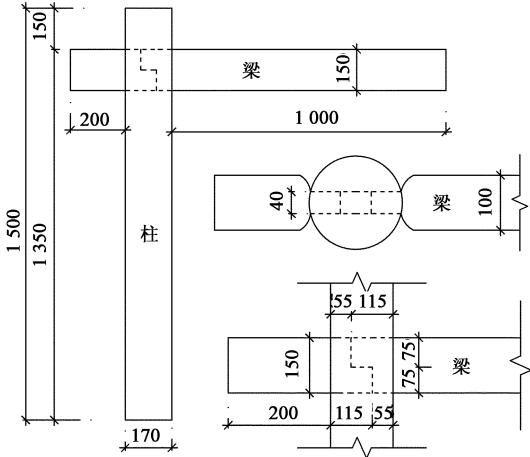
综上,国内研究主要针对中国北方传统木构建筑,偏重于宋《营造法式》和清工部《工程做法则例》做法的官式建筑,得出的节点转角刚度也仅为平面内(竖向)转角刚度。而国外研究主要针对当地传统的木构节点,与中国传统木构榫卯构造做法差别较大。本文将对偏重于《营造法原》做法的江南地区传统木构建筑中常见的半榫的受力性能展开试验和理论研究。

1 试验设计

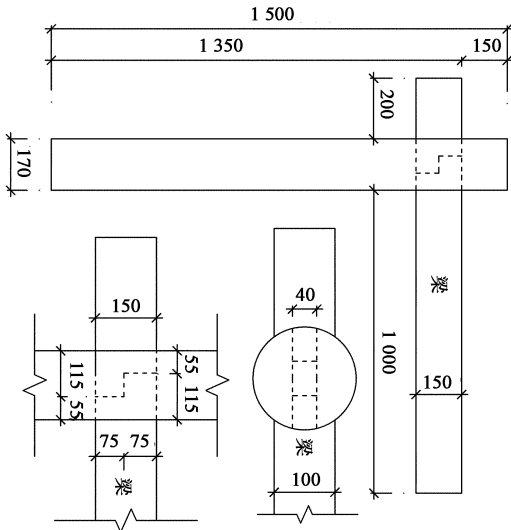
半榫主要用于传统木构建筑梁枋构件与中柱构件之间的连接,为了解江南地区传统木构建筑中半榫的的受力性能,通过低周反复试验对该种类型的 3 个榫卯节点的受力性能进行研究。本次试验参考江南地区实际案例的榫卯构造做法,按 1 : 1.76 的缩尺比例设计了该种类型的 3 个榫卯节点,一个回肩式加直面的试件(图 1(a)),一个抱肩式加直面的试件(图 1(b)),一个抱肩式加斜面的试件(图 1(c)),3 个试件的榫头厚度相同,试件材料均为江南地区传统木构建筑常用的杉木。

本次试验用材选用同一批次的杉木,通过标准清样材性试验得到其力学参数:顺纹抗拉强度 91.4

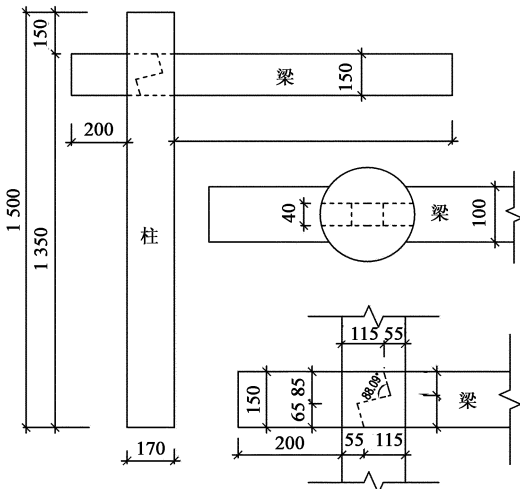
MPa,顺纹抗压强度 30.0 MPa,抗弯强度 50.0 MPa,顺纹抗剪强度 3.6 MPa,抗弯弹性模量 10 238.1 MPa. 试验时,木柱柱脚固定为铰接形式,利用机械螺旋加载器对梁枋施加竖向低周反复荷载,加载点距离柱内边 500 mm. 木柱柱顶竖向力采用千斤顶施加,施加竖向荷载 10 kN 并稳定不变. 低周反复加载制度为位移控制的方法,第 1 级加载位移为 10 mm,以后每级加载位移依次增加 10 mm. 试验的结束以节点模型完全破坏为标准,本次试验的加载装置如图 2 所示.



(a) 半榫 1 节点



(b) 半榫 2 节点



(c) 半榫 3 节点

图 1 半榫卯节点试件设计(单位:mm)

Fig.1 Design of the Ban mortise-tenon joints(Unit:mm)

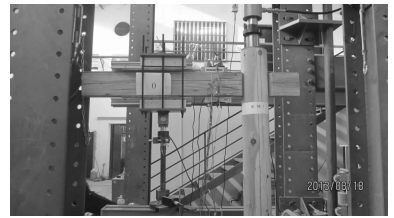


图 2 榫卯节点试验

Fig.2 Low-cycle reversed loading test of the mortise-tenon joint

2 试验现象

半榫有 3 个试件,分为 2 个抱肩式和 1 个回肩式,抱肩式的根据咬合形式又分为直面式和斜面式.从加载到破坏的过程大致为:加载至转角为 0.05~0.07 rad 时,开始发出清脆的吱吱声,接着榫头上出现裂缝,且榫头开始拔出,位移越大,拔出越多,当加载至转角为 0.16~0.20 rad 时,榫头完全拔出,最终破坏.半榫节点的最终破坏形态均为榫头拔出,如图 3 所示.



(a) 半榫 1



(b) 半榫 2



(c)半榫 3

图 3 半榫节点破坏形态

Fig. 3 Failure modes of the Ban mortise-tenon joints

3 试验结果

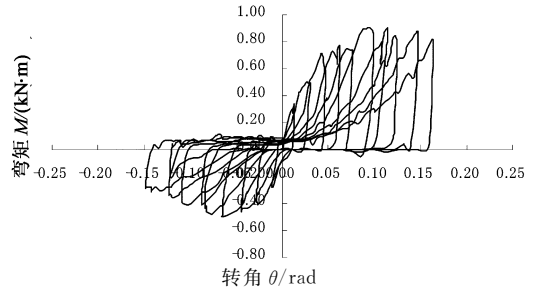
3.1 $M-\theta$ 滞回曲线及骨架曲线

通过对 $P-\Delta$ 滞回曲线和转角信息的处理,得出半榫节点的 $M-\theta$ 滞回曲线及骨架曲线,如图 4 所示.

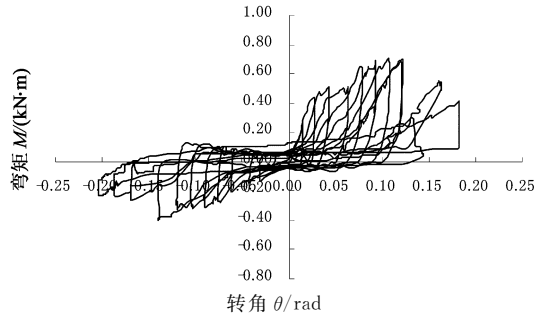
从图 4 可以总结出半榫节点滞回曲线的一些特点:

1) 该种半榫节点的 $M-\theta$ 滞回曲线基本上都呈 Z 形,在受力平衡位置其捏拢效应明显,榫卯的滑移量随着转角的增加而不断增加.对于该种榫卯节点:在弹性阶段,刚度值基本保持不变;随着转角加大,试件受力进入塑性阶段,滞回曲线出现捏拢滑移现象,开始出现残余变形,节点刚度也不断退化;转角继续加大,滞回曲线的捏拢滑移现象愈发突出;随后,节点的承载力开始下降,变形量继续增长,直至最终破坏.整个受力过程表现出一定的延性.

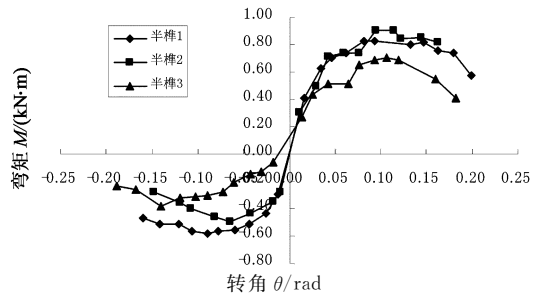
2) 从该种榫卯节点的骨架曲线来看:试件均经历了弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段.对于半榫节点,当转角在极限转角的 $0\sim 24\%$ 左右时,试件受力为弹性阶段;当转角在极限转角的 $24\%\sim 70\%$ 左右时,试件受力为屈服阶段;当转角在极限转角的 $70\%\sim 100\%$ 时,试件受力为破坏阶段.



(b)半榫 2 滞回曲线



(c)半榫 3 滞回曲线

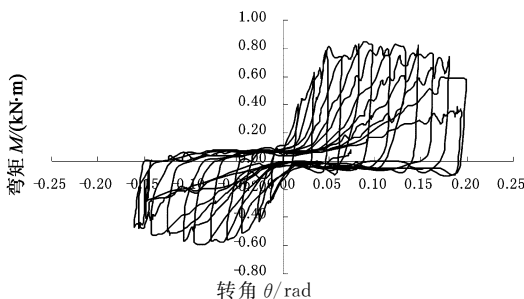


(d)骨架曲线

图 4 半榫的 $M-\theta$ 滞回曲线和骨架曲线
Fig. 4 $M-\theta$ hysteretic curves and skeleton curves of the Ban mortise-tenon joints

3.2 $M-\theta$ 骨架曲线特征值

对该种榫卯节点的 $M-\theta$ 骨架曲线进行分析,可将其近似简化为图 5 所示的三折线模型,各阶段刚度值见表 1,表中 θ 值取自图 4 的骨架曲线.



(a)半榫 1 滞回曲线

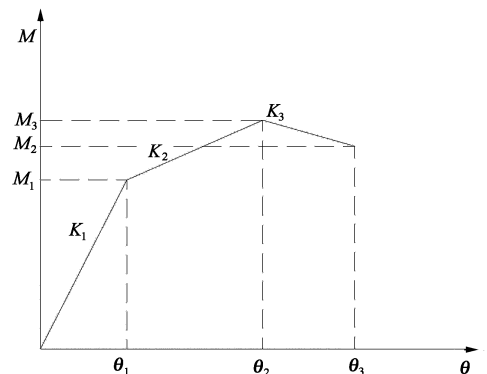


图 5 榫卯节点 $M-\theta$ 骨架曲线(三折线模型)
Fig. 5 Simplified $M-\theta$ skeleton curve

表 1 该种榫卯节点三折线模型特征值计算结果

Tab. 1 Computing eigenvalue results of simplified M-θ skeleton curves of the mortise-tenon joints

榫卯类型	特征刚度/(kN·m·rad ⁻¹)		
	弹性阶段 θ ₁ /rad	屈服阶段 θ ₂ /rad	破坏阶段 θ ₃ /rad
半榫 1	0.06	0.15	0.20
半榫 2	0.04	0.11	0.16
半榫 3	0.04	0.12	0.18

注:表中刚度和转角均为 1:1.76 缩尺模型数据.

这种榫卯节点的半刚性计算模型可以写成:

$$M = \begin{cases} K_1\theta & \theta \leq \theta_1 \\ K_1\theta_1 + K_2(\theta - \theta_1) & \theta_1 < \theta \leq \theta_2 \\ K_1\theta_1 + K_2(\theta_2 - \theta_1) + K_3(\theta - \theta_2) & \theta_2 < \theta \leq \theta_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中各阶段的特征值 $K_1, K_2, K_3, \theta_1, \theta_2$ 和 θ_3 根据表 1 取值.

表 1 数据表明,对于半榫节点而言,相同榫卯尺寸下,抱肩式试件的弹性刚度略大于回肩式试件.同为抱肩式时,斜面榫头的弹性刚度显著小于直面榫头的试件.

4 有限元分析结果

由于试验数量有限,为了对半榫榫卯节点进行参数分析和其余方向的刚度进行研究,本文采用商用有限元软件 ANSYS(13.0 版本)对半榫节点受力性能进行了非线性有限元模拟,其中,考虑了半榫节点的接触非线性和木材的材料非线性(正交各向异性理想弹塑性).

4.1 接触参数的定义

经过试算发现,法向接触刚度 FKN 显著影响计算结果.对于此类问题,FKN 取 0.05~0.10 之间比较合适,本文 FKN 取 0.05.接触张开弹簧刚度 FKOP 对结果的影响很小,软弹簧(近似于分离)模型更符合榫卯受力状态,FKOP 建议取值 1×10^{-5} .

4.2 材料特性

木材的弹塑性模型采用通用各向异性屈服选项,其参数需要满足两个条件:1)协调方程,即公式(2),其中各参数为各个方向的屈服应力;2)封闭的屈服面,即公式(3).

$$\frac{\sigma_{+x} - \sigma_{-x}}{\sigma_{+x}\sigma_{-x}} + \frac{\sigma_{+y} - \sigma_{-y}}{\sigma_{+y}\sigma_{-y}} + \frac{\sigma_{+z} - \sigma_{-z}}{\sigma_{+z}\sigma_{-z}} = 0 \quad (2)$$

$$M_{11}^2 + M_{22}^2 + M_{33}^2 - 2(M_{11}M_{22} + M_{22}M_{33} + M_{11}M_{33}) < 0 \quad (3)$$

式中 $M_{ii} = \frac{K}{\sigma_{+i}\sigma_{-i}}$, 其中, $i = 1, 2, 3, K = \sigma_{+x}\sigma_{-x}, \sigma_{+y}$

和 σ_{-i} 分别为 i 方向上的抗拉和抗压屈服强度且 $i = x, y, z$, 即 $\sigma_{+x}, \sigma_{+y}, \sigma_{+z}$ 分别为 x (纵向)、 y (径向)、 z (弦向)方向的抗拉屈服强度, $\sigma_{-x}, \sigma_{-y}, \sigma_{-z}$ 分别为 x (纵向)、 y (径向)、 z (弦向)方向的抗压屈服强度.

考虑到木材材性试件是规范要求的标准清样模型,没有天然缺陷且尺寸较小,而半榫试件是缩尺比例模型,相比材性试件,尺寸较大且易受天然缺陷因素影响,且杉木材性为正交各向异性材料,参考文献[14]中杉木的弹性属性取值以及文献[15]中的几何尺寸影响系数和天然缺陷影响系数,本文对半榫节点进行非线性有限元模拟时采用的木材材性如表 2 所示.

表 2 有限元模型所取的木材材性数据

Tab. 2 Wood properties used in the finite element models

类型	强度	类型	强度
顺纹抗拉屈服强度	43.1 MPa	弦向抗压屈服强度	1.52 MPa
弦向抗拉屈服强度	1.5 MPa	径向抗压屈服强度	1.52 MPa
径向抗拉屈服强度	1.5 MPa	弹性模量折减系数	0.8
顺纹抗压屈服强度	24 MPa	摩擦系数	0.1

4.3 有限元分析

建立三个半榫试件的实体模型,并划分单元,半榫 1 试件的有限元网格如图 6 所示.半榫 1 有 34 314 个 solid45 单元、5 698 个 target170 单元、2 854 个 contact174 单元,半榫 2 有 35 194 个 solid45 单元、5 850 个 target170 单元、3 318 个 contact174 单元,半榫 3 有 34 139 个 solid45 单元、5 958 个 target170 单元、3 430 个 contact174 单元.单元边长约为 0.03 m,节点核心区加密为 0.015 m.图 7 为半榫 1 施加竖向、横向和扭矩荷载时的等效塑性应变.

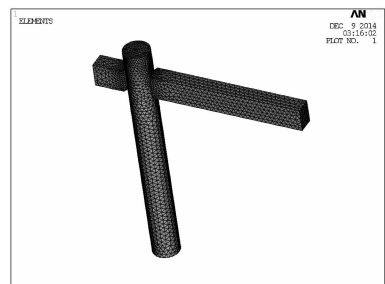
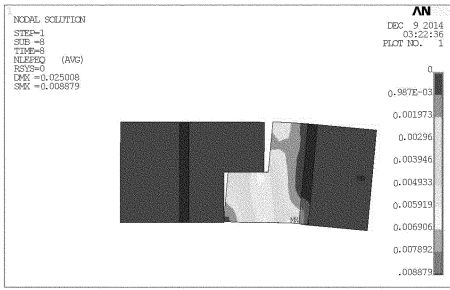


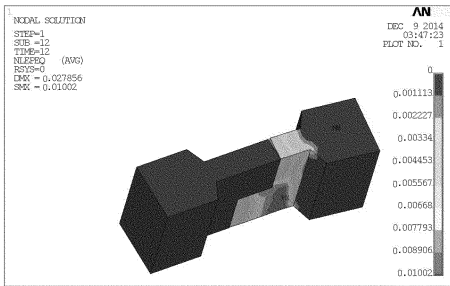
图 6 半榫 1 节点有限元模型

Fig. 6 Finite element model of the No. 1

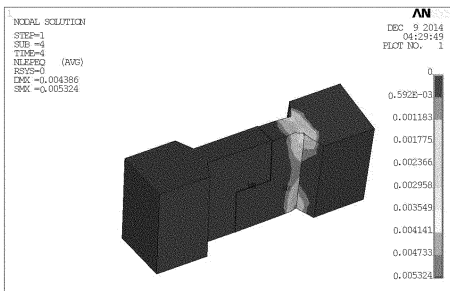
Ban mortise-tenon joint



(a) 平面内方向(K_1 向)



(b) 平面外方向(K_2 向)



(c) 扭转方向(K_3 向)

图 7 半榫 1 施加竖向、横向和扭矩荷载时的等效塑性应变

Fig. 7 Plastic equivalent strain of the No. 1 Ban mortise-tenon joint under vertical load, horizontal load and torque load

对比分析结果表明:

1) 图 8 为施加竖向荷载时的半榫 1、半榫 2 和半榫 3 的有限元分析结果和试验结果的对比, 分析结果与试验结果存在一定的定量误差, 但误差不大, 基本在 10% 以内, 且基本定性规律一致, 表明对该类型节点采用同时考虑半榫节点的接触非线性和木材的材料非线性(采用正交各向异性理想弹塑性模型)的分析方法是可行的。

2) 从图 9~图 10 可见, 施加平面内竖向荷载时, 半榫 1(回肩)和半榫 2(抱肩)的节点结构性能差别不大, 而半榫 3 的节点结构性能则有明显降低, 究其原因, 主要是由于半榫 3 的榫头交接面为斜面, 相对于直面, 其受力时较易出现相对滑移。半榫 1, 2, 3 的刚度退化规律和速率基本一致; 从图 11~图 12

可见, 施加平面外水平荷载时, 在节点结构性能上, 按从优到劣排序为: 半榫 2、半榫 1、半榫 3。三者的刚度退化规律和速率基本一致; 从图 13 和图 14 可见, 施加扭矩荷载时, 在节点结构性能上, 按从优到劣排序为: 半榫 2、半榫 1、半榫 3。三者的刚度退化规律和速率基本一致。

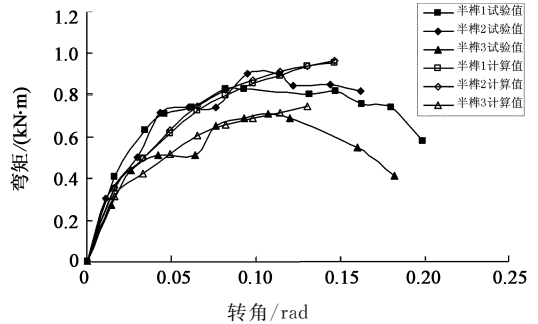


图 8 半榫节点弯矩-转角关系试验值与计算值比较
Fig. 8 Comparison between test value and computational value of $M-\theta$ relationship of the ban mortise-tenon joints

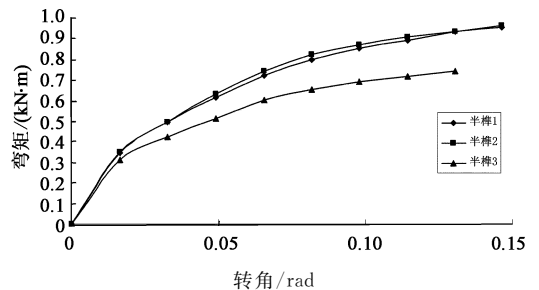


图 9 半榫在施加竖向荷载时的弯矩转角关系
Fig. 9 $M-\theta$ relationship of the joints under vertical load

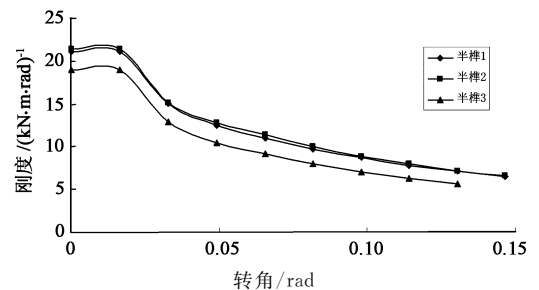


图 10 半榫在施加竖向荷载时的刚度退化的对比
Fig. 10 Stiffness degradation of the joints under vertical load

3) 对半榫 1、半榫 2 和半榫 3 的竖向(平面内)、水平(平面外)、扭转的弹性转角刚度进行了比较分析, 如表 3 所示, 结果表明半榫类型的竖向、水平、扭转的弹性转角刚度可近似归纳为 1.4 : 1.0 : 1.1。

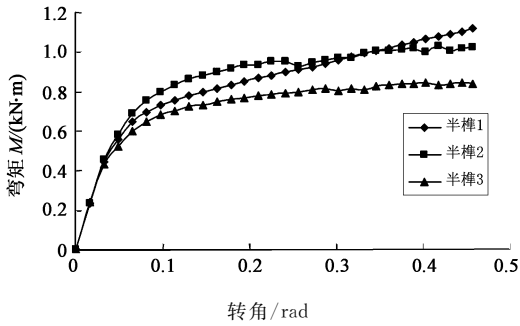


图 11 半榫在施加水平荷载时的弯矩转角关系

Fig. 11 $M-\theta$ relationship of the joints under horizontal load

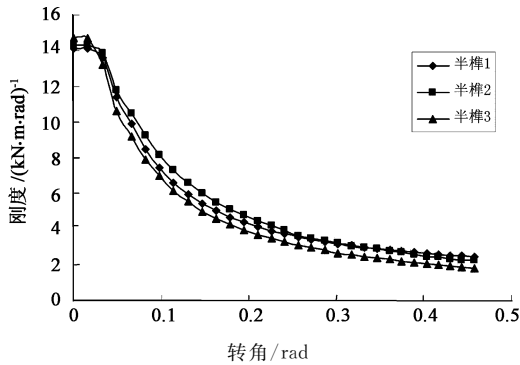


图 12 半榫在施加水平荷载时的刚度退化的对比

Fig. 12 Stiffness degradation of the joints under horizontal load

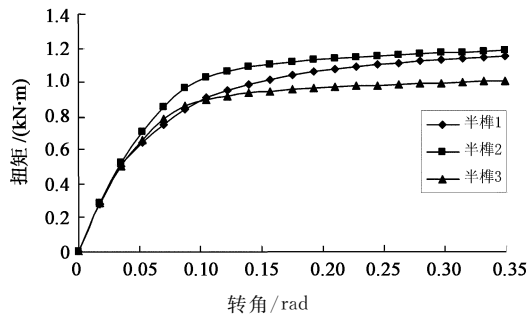


图 13 半榫在施加扭矩荷载时的弯矩转角关系

Fig. 13 $M-\theta$ relationship of the joints under torque load

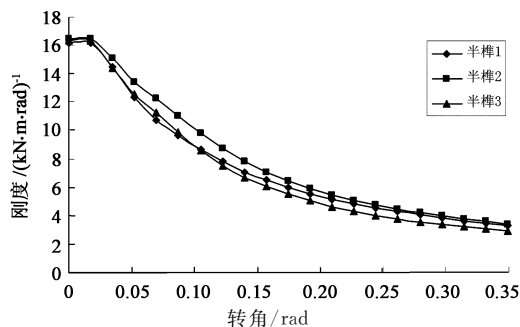


图 14 半榫在施加扭矩荷载时的刚度退化的对比

Fig. 14 Stiffness degradation of the joints under torque load

表 3 半榫节点竖向、水平和扭转的弹性转角刚度之比
Tab. 3 Ratio of elastic rotation rigidities of the Ban mortise-tenon joints under vertical load, horizontal load and torque load

试件	K_V/K_H	K_V/K_R
半榫 1	1.50	1.31
半榫 2	1.50	1.31
半榫 3	1.30	1.17

注: K_V, K_H, K_R 分别为竖向(平面内)、水平(平面外)、扭转弹性转角刚度。

4) 综合图 9~图 14 和表 3, 当榫头形状同为直面时, 半榫 2(抱肩)的结构性能略优于半榫 1(回肩), 但差别很小; 当榫头形状改为斜面时, 由于增大了左侧榫头的滑出趋势, 使得左侧榫头对右侧榫头起的约束作用更小, 因而半榫 3 的结构性能显著低于半榫 1 和半榫 2。

5 结 语

本文对江南地区传统木构建筑中常见的半榫节点进行了低周反复荷载试验和有限元模拟分析, 研究了这种榫卯节点的破坏模式、滞回曲线、骨架曲线、转角刚度等受力性能, 得到以下主要结论:

1) 江南地区半榫节点在低周反复荷载作用下的最终破坏形态为榫头拔出破坏, 极限转角约为 0.16~0.20 rad。

2) 江南地区半榫节点的 $M-\theta$ 滞回曲线基本上都呈 Z 形, 在受力平衡位置其捏拢效应明显, 榫卯的滑移量随着转角的增加而不断增加。3 个榫卯试件均经历了弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段。

3) 通过试验得到了江南地区传统木构建筑中常见的半榫节点的 $M-\theta$ 滞回曲线和骨架曲线, 在得到的骨架曲线基础上, 将其简化为三折线模型, 并计算了各阶段的特征刚度, 试验结果可供分析江南地区传统木构建筑的受力性能参考使用。

4) 考虑榫卯节点的接触非线性和木材材料的非线性(正交各向异性理想弹塑性模型)对半榫节点进行非线性有限元分析的方法是可行的。通过有限元分析得出半榫节点的平面内(竖向)转角刚度 K_1 、平面外(水平)转角刚度 K_2 和扭转刚度 K_3 的关系可近似归纳为 1.4 : 1.0 : 1.1, 分析结果可以用于木构建筑的整体分析计算。

参考文献

[1] 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 Hong-tie, GE Hong-peng. Experimental studies on the characteristic of Mortise-tenon joint in historic timber buildings[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(10): 168-173. (In Chinese)
- [2] 高大峰. 中国木结构古建筑的结构及其抗震性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学土木工程学院, 2007: 22-43.
- GAO Da-feng. Research on the structure and their aseismic characteristics of ancient chinese timber buildings[D]. Xi'an; School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, 2007: 22-43. (In Chinese)
- [3] 高大峰, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 中国古建木构架在水平反复荷载作用下变形及内力分析[J]. 世界地震工程, 2003, 19(1): 9-14.
- GAO Da-feng, ZHAO Hong-tie, XUE Jian-yang, *et al.* The deformational and stress behavior of wooden frame of Chinese ancient buildings under horizontally reverse load[J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(1): 9-14. (In Chinese)
- [4] 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. (In Chinese)
- [5] 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.
- ZHOU Qian, YAN Wei-ming, ZHOU Xi-yuan, *et al.* Aseismic behavior of Chinese ancient tenon-mortise joint[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(6): 679-684. (In Chinese)
- [6] 周乾, 闫维明, 关宏志, 等. 故宫太和殿减震构造分析[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2013, 41(4): 652-657.
- ZHOU Qian, YAN Wei-ming, GUAN Hong-zhi, *et al.* Analysis of aseismic constitutions of Tai-he Palace in the Forbidden City[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2013, 41(4): 652-657. (In Chinese)
- [7] 李鹏. 藏式古建筑木构架梁柱节点力学机理研究[D]. 北京: 北京交通大学土木建筑工程学院, 2009: 7-72.
- LI Peng. Mechanical performance of beam-column joints of Tibetan ancient timber buildings[D]. Beijing; School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2009: 7-72. (In Chinese)
- [8] 肖旻, 陈庆军, 张增球, 等. 考虑节点刚度影响的典型广府木祠堂安全性分析[J]. 昆明理工大学学报: 自然科学版, 2014, 39(1): 40-47.
- XIAO Min, CHEN Qing-jun, ZHANG Zeng-qiu, *et al.* Safety analysis of typical wood ancestral hall in Canton considering joint stiffness[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2014, 39(1): 40-47. (In Chinese)
- [9] 杨艳华, 王俊鑫, 徐彬. 古木建筑榫卯连接 $M-\theta$ 相关曲线模型研究[J]. 昆明理工大学学报: 自然科学版, 2009, 34(1): 72-76.
- YANG Yan-hua, WANG Jun-xin, XU Bin. Research of interaction curves model of mortise-tenon joint in historic timber buildings[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2009, 34(1): 72-76. (In Chinese)
- [10] CHUN Qing, YUE Zhi, PAN Jian-wu. Experimental study on seismic characteristics of typical mortise-tenon joints of Chinese southern traditional timber frame buildings[J]. Science in China, 2011, 7(54): 1-8.
- [11] VILLAR J R, GUAITA M, VIDAL P, *et al.* Analysis of the stress state at the cogging joint in timber structures[J]. Bio-systems Engineering, 2007(1): 79-90.
- [12] Ayala Dina F D, Tsai Pin Hui. Seismic vulnerability of historic Dieh-Dou timber structures in Taiwan[J]. Engineering Structures, 2008(30): 2101-2113.
- [13] PANG Sung-jun, OH Jung-kwon, PARK Joo-saeng, *et al.* Moment-carrying capacity of dovetailed mortise and tenon joints with or without beam shoulder[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137: 785-789.
- [14] 汪兴毅, 王建国. 徽州木结构古民居营造合理性的理论分析[J]. 合肥工业大学学报, 2011, 34(9): 1375-1380.
- WANG Xing-yi, WANG Jian-guo. Analysis of the rationality of Huizhou vernacular dwellings construction[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2011, 34(9): 1375-1380. (In Chinese)
- [15] 谢启芳. 中国木结构古建筑加固的试验研究及理论分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学土木工程学院, 2007: 30-38.
- XIE Qi-fang. Experimental study and theoretical analysis on strengthening for Chinese ancient timber buildings[D]. Xi'an; School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, 2007: 30-38. (In Chinese)