中国科学: 技术科学 2011 年 第 41 卷 第 9 期: 1153 ~ 1160
www.scichina.com tech.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

中国南方传统木构建筑典型榫卯节点抗震性能试验研究

淳庆[①*], 乐志[①], 潘建伍[②]

① 东南大学城市与建筑遗产保护教育部重点实验室, 南京 210096;
② 南京航空航天大学土木系, 南京 210016
* E-mail: cqnj1979@163.com

收稿日期: 2010-10-02; 接受日期: 2011-04-01
国家自然科学基金(批准号: 51008059)和中国博士后特别基金(批准号: 201003543)资助项目

摘要 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. 其中包括: 燕尾榫(含下落式燕尾榫)、半榫、十字箍头榫以及馒头榫 4 种典型榫卯节点, 共进行了 13 个试件的低周反复荷载试验研究. 通过试验获取这 4 种典型榫卯节点在水平荷载作用下的破坏模式、滞回曲线、骨架曲线以及转角刚度. 研究结果可为中国南方传统木构建筑的抗震性能研究和修缮加固提供理论基础.

关键词
中国南方传统木构建筑
榫卯节点
抗震性能
转角刚度

1 前言

木结构是人类建筑史上应用时间最长的建筑材料之一, 已有数千年的应用历史, 在我国现存的古建筑中, 木结构和砖木混合结构占有相当大的比例. 作为中国历史文化的瑰宝, 由于长期的风雨侵蚀、战争、地震的破坏, 材料和结构性能不可避免的减弱和损伤, 大量传统木构建筑已出现险情, 对其维修保护的要求日益迫切. 例如, 在 2008 年汶川地震中, 传统木构建筑损毁较严重, 其中包括: 世界文化遗产——都江堰二王庙、青城山道教古建筑群、李白故居、杜甫草堂等. 因此, 综合考虑历史性、艺术性和科学性, 对这些传统木构建筑的抗震性能进行科学研究, 为维修和保护提供科学依据, 已是当务之急.

近年来, 国内一些学者陆续开始对中国传统木构建筑抗震性能进行研究. 俞茂宏等人[1, 2]通过定义和引入反映木结构古建筑榫卯节点特性的半刚性节点单元, 建立了有限元模型并进行了动力分析. 姚侃等人[3]展开了中国古代建筑木构体系的静力与动力研究, 通过宋营造法式等典型实物等比例模型的试验, 在传统木构建筑静力分析及抗震分析中进行数据积累与近似计算. 薛建阳等人[4]则通过殿堂型木构模型振动台试验研究了其动力特性和地震反应, 指出木构榫卯连接的柔性和挤压变形是结构耗能减震的主要原因. 高大峰等人[5~7]通过对木构架模型在水平反复荷载作用下的试验研究, 分析与探讨了中国古代木结构在相应状态下的变形及受力特征及其榫卯节点工作机制, 通过对榫卯节点的转动弯矩与相应转角试验数据的分析与研究, 确定了榫卯节点的转动刚度, 提出了该类型结构在水平地震荷载作用下的计算模型, 为中国古建木构架在水平地震作用下的抗震分析提供了一种可资借鉴的方法. 葛鸿鹏[8]

英文版发表信息: Chun Q, Yue Z, Pan J W. Experimental study on seismic characteristics of typical mortise-tenon joints of chinese southern traditional timber frame buildings. Sci China Tech Sci, 2011, 54: 2404–2411, doi: 10.1007/s11431-011-4448-3

从古建筑的结构体系、结构布局、造型和构造入手, 通过木构架模型在水平反复荷载作用下的试验研究, 对榫卯工作机制、破坏模式和抗震性能进行了分析. 谢启芳等人[9, 10]进行了未加固木构架和加固木构架在水平低周反复荷载作用下的试验研究, 得到了各个木构架的破坏特征、滞回曲线、骨架曲线、强度和刚度退化规律、变形及耗能等性能, 在此试验的基础上建立了木结构构架的恢复力模型.

在国外, Villar 等人[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. Dina 等人[12]对台湾 Die-Dou 木构进行有限元模拟, 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, 通过节点试验指出, 竖向荷载对节点的转角刚度有影响.

综上所述, 国内研究主要针对北方传统木构体系而言, 研究对象均依据宋营造法式, 构件粗大, 榫卯节点主要选用燕尾榫和直榫 2 种, 较为单一. 国外研究主要针对当地特有的木构体系. 目前研究均未能反映出以穿斗体系和营造法原形式为主的中国南方传统木构建筑受力机理.

2 试验设计

为了解中国南方传统木构的抗震性能, 通过试验对典型榫卯节点的抗震性能进行研究. 针对南方传统木构榫卯的各种作法, 在参考《营造法原》和现场实际调查的基础上, 归纳为 4 种基本榫卯种类, 包括燕尾榫、十字箍头榫、半榫和馒头榫 4 类, 如图 1 所示. 燕尾榫为梁头插入柱顶卯口, 插入榫头按 1∶10 收溜; 下落式燕尾榫为燕尾榫不在柱头位置的变种, 即通过开大口, 插入燕尾榫和垫块的方式使得燕尾榫可以置于柱头以下的任意位置; 十字箍头榫为传统木结构角部常见榫卯, 2 个方向的梁头成 90°相交, 互相卡接; 半榫为南方穿斗式穿枋结构中常见榫卯, 两梁头各出约半柱径穿透柱子; 馒头榫为抬梁式专用, 从柱头出榫插入梁底.

为了体现榫卯的地域特征各种榫卯均有 2 种或以上的作法变化: 燕尾榫包括榫长加长, 榫宽加宽和下落式变异作法 3 种作法; 十字箍头榫包括榫宽加宽和加木销 2 种作法; 半榫包括榫宽加宽和榫高变小 2 种作法; 馒头榫包括榫截面加大和榫长加大 2 种作法. 这些作法差异可以帮助推导不同地域榫卯作法造成的节点刚度的差异, 具体榫卯尺寸详见表 1.

为了得到较真实的榫卯节点抗震性能, 试验方案均为构架化榫卯, 即不仅把榫卯作为实际梁柱交接的节点研究, 还同时研究构架的性能与结构行为, 所有构件按 1:2 缩尺后组成高 1.5 m, 跨度 1.5 m 的单榀框架. 其中柱径为 100~120 mm, 梁尺寸为 80 mm ×120 mm.

本次试验用材选用同一批次的杉木, 通过材性试验得到其力学参数: 顺纹抗拉强度 61.3 MPa, 顺纹抗压强度 38.3 MPa, 抗弯强度 103.3 MPa, 顺纹抗剪强度 3.6 MPa, 抗弯弹性模量 9482 MPa.

试验的方法为低周反复水平加载, 试验设计 4 组共计 13 个构件, 使用水平反力架加载模拟水平荷载, 使用千斤顶竖向加载模拟竖向荷载, 施加竖向力的千斤顶能随试件水平位移而移动, 从而使竖向力的作用线总是与地面垂直. 其中燕尾榫试件的编号为 KJ1, 其非下落式 3 种作法分别为 KJ1-1, KJ1-2, KJ1-3,

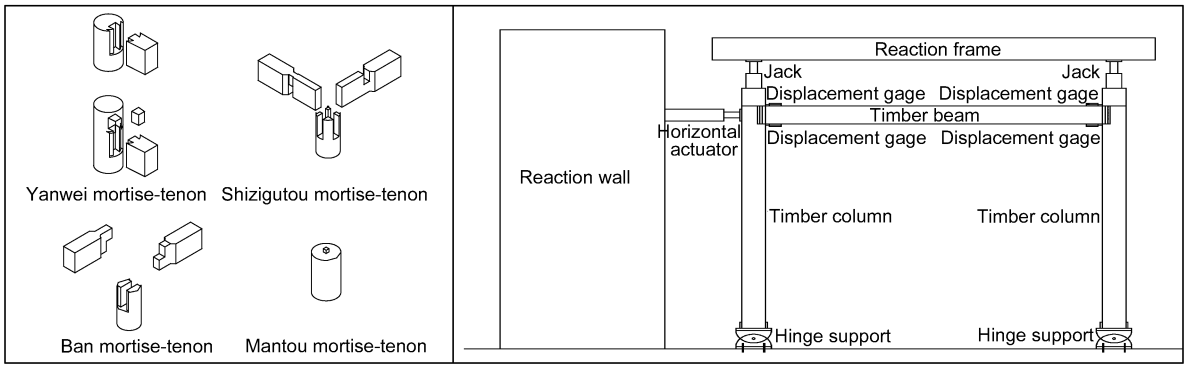
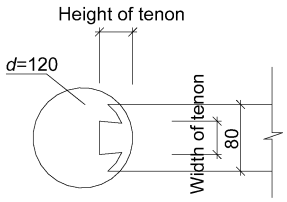
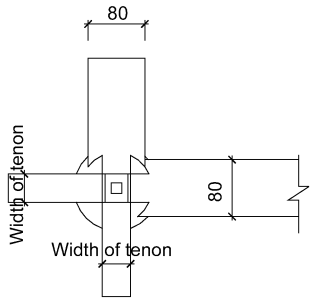
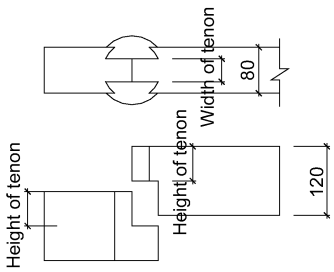
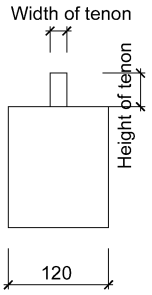


图 1 典型榫卯节点试验设计

表 1　榫卯实验尺寸表

Number of specimen	Cutline	Dimension (mm)		
		Width of tenon	Height of tenon	Remark
KJ1-1		40	40	
KJ1-2		40	55	
KJ1-3		30	40	
KJ5		40	40	Dropping
KJ2-1		40		Adding dowel
KJ2-2		25		Adding dowel
KJ2-3		40		No dowel
KJ3-1		40	60	
KJ3-2		60	60	
KJ3-3		40	40	
KJ4-1		30	30	
KJ4-2		50	50	
KJ4-3		30	30	

下落式燕尾榫编号 KJ5; 十字箍头榫编号分别为 KJ2-1, KJ2-2, KJ2-3; 半榫为 KJ3-1, KJ3-2, KJ3-3; 馒头榫为 KJ4-1, KJ4-2, KJ4-3. 构架所受竖向荷载按照真实结构荷重结合缩尺比例, 施加竖向荷载 20 kN. 同时确定以位移作为控制指标. 第一级加载位移为 20 mm, 以后每增加 20 mm 作为下一级位移, 循环加载直至到达构件破坏. 试验时, 通过水平加载装置测得水平力及水平位移, 竖向加载装置测得竖向力, 位移计测得左右榫头上下的拔榫量. 本次试验部分构件如图 2 所示.

3　试验现象

3.1　燕尾榫

KJ1 组和 KJ5 组为燕尾榫, 从试验现象看, 燕尾榫节点构架在水平荷载下的破坏过程先是榫头挤紧

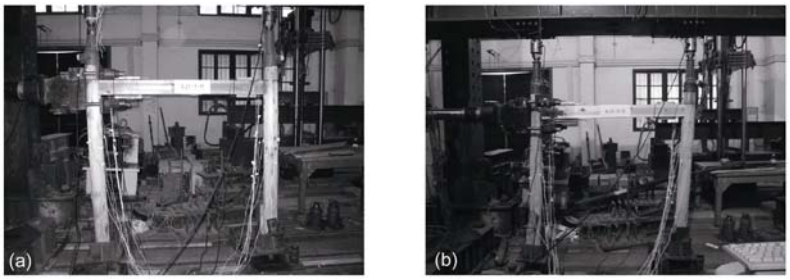


图 2　试验构件

(a) KJ1-1; (b) KJ1-2

发出吱吱声, 随后是榫的收溜破坏并伴随柱卯口出现垂直裂纹, 最后是拔榫破坏. 在各作法中, 加长型燕尾榫破坏最晚, 变窄型次之, 标准型最先破坏. 燕尾榫构架的极限水平位移为 160~220 mm. 图 3 为燕尾榫节点的最终破坏形态.

3.2　十字箍头榫

KJ2 组为十字箍头榫, 各分组作法不同, 从试验现象看, 其破坏过程先是榫头挤紧发出吱吱声, 随后很快出现明显且不可恢复的梁柱相对转动变形并快速增大, 柱卯和梁榫分离, 变形原因主要是柱端卯口变形, 最后为榫卯根部破坏. 通过减小梁榫的宽度或增设销钉可以延后破坏. 十字箍头榫构架的极限水平位移为 100~160 mm. 图 4 为十字箍头榫节点的最终破坏形态.

3.3　半榫

KJ3 组均为半榫, 各分组作法不同, 从试验现象看, 其破坏过程先是榫头挤紧发出吱吱声, 随后柱梁榫卯脱开, 并伴随着柱端出现竖向裂缝, 这一变化逐渐加剧, 最后为卯口折断破坏. 增加梁宽或减少梁榫头长度不会显著改变破坏阶段. 半榫构架的极限水平位移为 160~180 mm. 图 5 为半榫节点的最终破坏形态.

3.4　馒头榫

KJ4 组均为馒头榫, 各分组作法不同, 从试验现

图 3　燕尾榫节点破坏形态

(a) KJ1-1 破坏形态; (b) KJ1-2 破坏形态; (c) KJ1-3 破坏形态; (d) KJ5 破坏形态

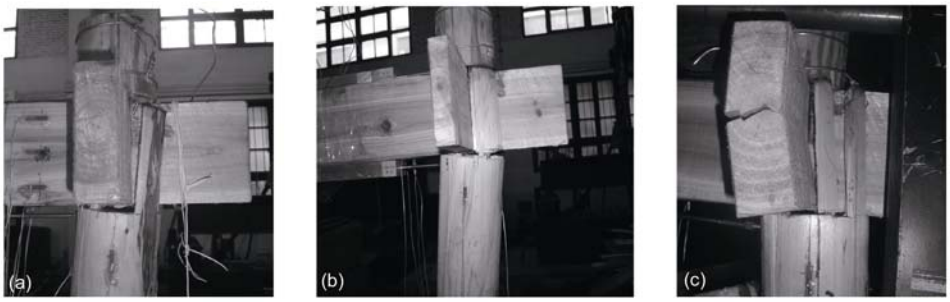


图 4　十字箍头榫节点破坏形态

(a) KJ2-1 破坏形态; (b) KJ2-2 破坏形态; (c) KJ2-3 破坏形态

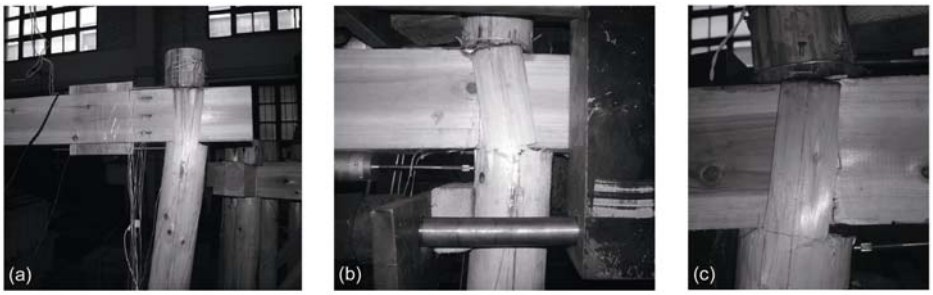


图 5　半榫节点破坏形态

(a) KJ3-1 破坏形态; (b) KJ3-2 破坏形态; (c) KJ3-3 破坏形态

象看, 其破坏过程先是榫头挤紧发出吱吱声, 由于上部压力, 馒头榫梁头无法变形, 只能呈 S 形扭曲, 梁柱交接处会出现局部承压破坏, 当荷载增加到一定程度后, 梁头可以变形, 并伴随馒头榫弯曲, 随后很快到达破坏阶段, 馒头榫折榫破坏. 增加榫的宽度可以延后破坏, 增加长度反而会提前破坏. 馒头榫构架的极限水平位移为 140~180 mm. 图 6 为馒头榫节点的最终破坏形态.

4　试验结果

4.1　*M*-θ滞回曲线

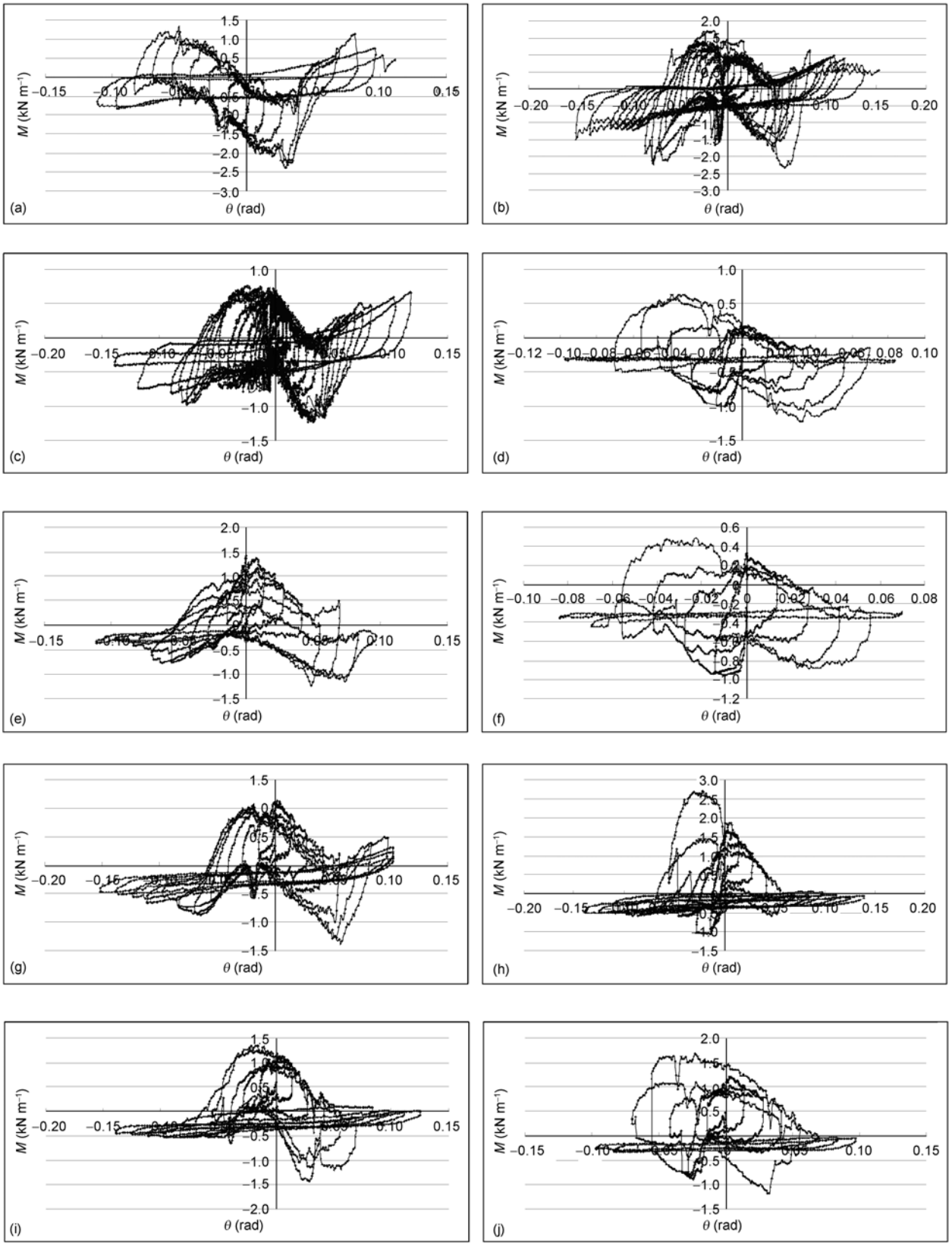
为了得到各典型榫卯节点的转角刚度特征, 必须首先了解各榫卯节点的 *M*-θ曲线. 本文结合 *P*-Δ滞回曲线和位移计所测得的转角信息, 得到各榫卯节点的 *M*-θ曲线, 如图 7 所示.

从图 7 可以总结出各典型榫卯节点滞回曲线的一些特点.

(ⅰ) 当施加的水平荷载较小时, 节点刚度也较小, 系统接近于机构, 其 *M*-θ滞回曲线位于第二、四象限, 为沿 *y* 轴镜像的反 S 形, 这部分图形为“虚”滞回曲线; 当施加的水平荷载较大时, 节点通过充分接触、摩擦、咬合等作用, 系统开始耗能, *M*-θ滞回曲线基本呈 *Z* 形. 对于燕尾榫木构, 水平位移约 120 mm 左右时, 榫卯节点半刚性特征明显; 对于十字箍头榫木构, 水平位移约 120 mm 左右时, 榫卯节点半

图 6　馒头榫节点破坏形态

(a) KJ4-1 破坏形态; (b) KJ4-2 破坏形态; (c) KJ4-3 破坏形态


M (kN m⁻¹)
θ (rad)
(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
(g)
(h)
(i)
(j)

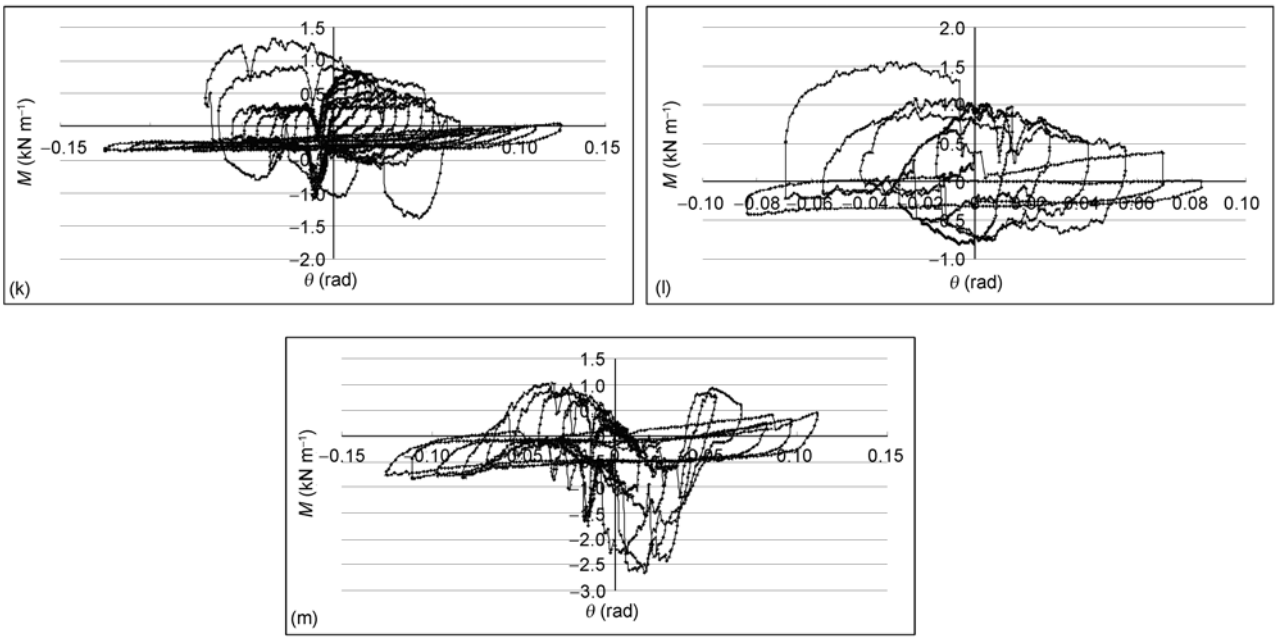


图 7　各典型榫卯节点的 *M*-*θ*滞回曲线

(a) KJ1-1; (b) KJ1-2; (c) KJ1-3; (d) KJ2-1; (e) KJ2-2; (f) KJ2-3; (g) KJ3-1; (h) KJ3-2; (i) KJ3-3; (j) KJ4-1; (k) KJ4-2; (l) KJ4-3; (m) KJ5

刚性特征明显; 对于半榫木构, 水平位移约 100 mm 左右时, 榫卯节点半刚性特征明显; 对于馒头榫木构, 水平位移约 120 mm 左右时, 榫卯节点半刚性特征明显.

(ⅱ) 对于抗侧刚度而言, 燕尾榫>半榫>十字箍头榫>馒头榫; 对于地震耗能能力而言, 燕尾榫>半榫>馒头榫>十字箍头榫.

4.2　*M*-*θ*骨架曲线

通过对各典型榫卯节点的 *M*-*θ*滞回曲线处理后可得到 *M*-*θ*骨架曲线, 进行总结分析后可以将典型榫卯节点 *M*-*θ*骨架曲线近似简化为图 8 所示的三折线模型, 各阶段刚度值见表 2, 表中*θ*值取自图 8 的骨架曲线, *K* 按以下 3 式计算:

表 2　各典型榫卯节点三折线模型特征值计算结果

Type of specimen		$K_{\theta 1}$	$K_{\theta 2}$	$K_{\theta 3}$	θ_y	θ_0	θ_u
Yanwei mortise-tenon	KJ1-1	8.471	26.763	−11.976	0.054	0.078	0.111
	KJ1-2	2.400	25.262	−10.741	0.050	0.083	0.141
	KJ1-3	3.936	14.484	−7.972	0.048	0.076	0.118
Shizigutou mortise-tenon	KJ2-1	0.647	3.597	−6.260	0.045	0.059	0.082
	KJ2-2	7.350	1.115	−3.359	0.020	0.040	0.090
	KJ2-3	0.969	2.121	−3.168	0.036	0.046	0.070
Ban mortise-tenon	KJ3-1	3.396	7.491	−6.607	0.054	0.100	0.139
	KJ3-2	1.083	2.830	−3.968	0.038	0.077	0.138
	KJ3-3	2.004	3.034	−0.800	0.024	0.100	0.125
Mantou mortise-tenon	KJ4-1	1.078	2.259	−1.518	0.021	0.064	0.097
	KJ4-2	1.505	2.288	−3.800	0.043	0.123	0.125
	KJ4-3	5.847	1.564	−1.457	0.027	0.075	0.084
Dropping Yanwei mortise-tenon	KJ5	6.095	12.718	−5.079	0.057	0.087	0.111

Note: The unit of rotational stiffness is kN·m and the unit of rotation angle is rad. In the table, the stiffness and the angles were obtained according to 1/2 scale models

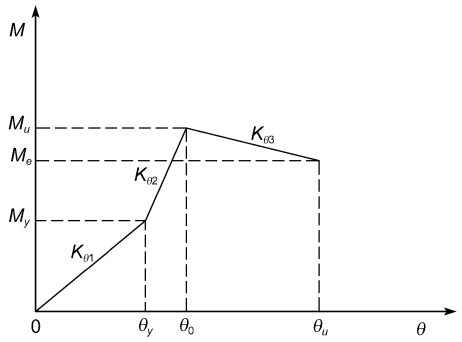


图 8　榫卯节点 *M*-*θ*骨架曲线(三折线模型)

$$K_{\theta1}=\frac{M_{y+}-M_{y-}}{\theta_{y+}-\theta_{y-}}, \tag{1}$$

$$K_{\theta2}=\left(\frac{M_{u+}-M_{y+}}{\theta_{0+}-\theta_{y+}}+\frac{M_{y-}-M_{u-}}{\theta_{y-}-\theta_{0-}}\right)/2, \tag{2}$$

$$K_{\theta3}=\left(\frac{M_{u+}-M_{0+}}{\theta_{u+}-\theta_{0+}}+\frac{M_{e-}-M_{0-}}{\theta_{0-}-\theta_{u-}}\right)/2. \tag{3}$$

各典型榫卯节点半刚性计算模型可以写成:

$$M=\begin{cases} K_{\theta1}\theta, & \theta\leqslant\theta_y, \\ K_{\theta1}\theta_y+K_{\theta2}\left(\theta-\theta_y\right), & \theta_y\leqslant\theta\leqslant\theta_0, \\ K_{\theta1}\theta_y+K_{\theta2}\left(\theta_0-\theta_y\right)+K_{\theta3}\left(\theta-\theta_0\right), & \theta_0<\theta\leqslant\theta_u, \end{cases} \tag{4}$$

式中, 各阶段特征值 $K_{\theta1}$, $K_{\theta2}$, $K_{\theta3}$, θ_y, θ_0 根据表 2 取值.

5　结语

本文通过对中国南方传统木构建筑中典型榫卯节点的模型试验, 研究了典型榫卯节点的破坏特征、滞回曲线、骨架曲线、转角刚度和抗震性能, 得到以下主要结论.

(i)各典型榫卯构架在水平荷载作用下的最终破坏均发生在榫卯节点部位. 燕尾榫(包括下落式燕尾榫)最终破坏形态为拔榫破坏, 在各作法中, 加长型燕尾榫破坏最晚, 变窄型次之, 标准型最先破坏. 燕尾榫构架的极限水平位移为 160~220 mm; 十字箍头榫最终破坏形态为榫卯根部破坏, 减小梁榫的宽度或增设销钉可以延后破坏, 十字箍头榫构架的极限水平位移为 100~160 mm; 半榫最终破坏形态为卯口折断, 增加梁宽或减少梁榫头长度不会显著改变破坏阶段, 半榫构架的极限水平位移为 160~180 mm; 馒头榫最终破坏形态为榫头折断破坏, 增加榫的宽度可以延后破坏, 增加长度反而会提前破坏, 馒头榫的极限水平位移为 140~180 mm.

(ii)对于抗侧刚度而言, 燕尾榫>半榫>十字箍头榫>馒头榫; 对于地震耗能能力而言, 燕尾榫>半榫>馒头榫>十字箍头榫.

(iii)将各典型榫卯节点(燕尾榫、十字箍头榫、半榫、馒头榫)的 *M*-*θ*骨架曲线简化为三折线模型, 并计算了各阶段特征刚度, 试验结果可供分析南方传统木构建筑的弹塑性抗震性能和构架节点破坏先后顺序时参考使用, 但还需通过更多的试验研究来验证和完善.

参考文献

1　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. 工程力学, 2001, 18: 137–144
2　方东平, 俞茂宏, 宫本裕, 等. 木结构古建筑结构特性的实验研究. 工程力学, 2000, 17: 75–83
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. 工程力学, 2006, 23: 168–173
4　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. 土木工程学报, 2004, 37: 6–11
5　高大峰. 中国木结构古建筑的结构及其抗震性能研究. 博士学位论文. 西安: 西安建筑科技大学, 2007
6　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. 世界地震工程, 2003, 19: 9–14
7　高大峰, 赵鸿铁, 薛建阳. 木结构古建筑中斗栱与榫卯节点的抗震性能试验研究. 自然灾害学报, 2008, 17: 58–64
8　葛鸿鹏. 中国古代木结构建筑榫卯加固抗震试验研究. 硕士学位论文. 西安: 西安建筑科技大学, 2005
9　谢启芳. 中国木结构古建筑加固的试验研究及理论分析. 博士学位论文. 西安: 西安建筑科技大学, 2007
10　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. 土木工程学报, 2008, 41: 28–34
11　Villar J R, Guaita M, Vidal P, et al. Analysis of the stress state at the cogging joint in timber structures. Biosyst Eng, 2007, (1): 79–90
12　Ayala D F, Tsai P H. Seismic vulnerability of historic Dieh–Dou timber structures in Taiwan. Eng Struct, 2008, (30): 2101–2113