

考虑木材嵌压的燕尾榫节点弯矩-转角模型研究

孙玉婷¹, 李 军^{1,*}, 魏志鹏², 胡 蓉¹, 王 燕¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 世源科技工程有限公司上海分公司, 上海 201399)

摘 要: 燕尾榫节点是一种半刚性连接, 研究其节点弯矩-转角关系对工程设计具有重要意义。考虑木材的局部嵌压变形影响, 建立反映局部材料性能变化的有限元模型, 并基于燕尾榫节点受力机理, 通过分析不同接触面的受力情况, 建立了燕尾榫节点转动力学模型。考虑木材局部受压效应及摩擦因素, 推导出燕尾榫节点弯矩-转角计算公式, 并将计算公式应用于多个既有试验中。结果表明: 榫头侧面对总弯矩产生贡献较大, 顶面、底面及端面产生贡献较小, 但合在一起的嵌压效应不能忽视; 理论公式计算合理、有效, 与试验吻合较好, 可为燕尾榫框架设计提供参考。

关键词: 燕尾榫节点; 弯矩-转角关系; 有限元分析; 局部受压; 摩擦

中图分类号: TU366.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)02-0058-11

Study on the moment-rotation model of dovetail mortise-tenon joints considering the embedded compression of timber

SUN Yuting¹, LI Jun^{1,*}, WEI Zhipeng², HU Rong¹, WANG Yan¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Shiyuan Technology Engineering Co., Ltd., Shanghai Branch, Shanghai 201399, China)

Abstract: The dovetail mortise-tenon joints are a type of semi-rigid connection, and it is of great significance to study the moment-rotation relationship of the joints for engineering design. Considering the influence of local compressive deformation of timber, a finite element model was established which reflects the local material property changes, and based on the force mechanism of dovetail mortise-tenon joints a rotation mechanical model of dovetail joints was proposed by analyzing the force conditions of different contact surfaces. Then, putting into consideration the local compression of timber and the friction factor, the moment-rotation formulas of the dovetail joints were derived, and the formulas were applied to the multiple existing experiments. The results show that the side of the tenon contributes more to the total moment, while the top, bottom and front contribute less, but the combined embedding effect cannot be ignored. The theoretical formula is reasonable, effective and in good agreement with experiments, and can provide reference for dovetail frame design.

Key words: dovetail mortise-tenon joints; moment-rotation relationship; finite element analysis; local compression; friction

收稿日期: 2023-11-14

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0703506); 日本学术振兴会基金资助项目(JSPS 科研费 19K01125)

作者简介: 孙玉婷(1999—), 女, 贵州贵阳人。硕士, 研究方向为木结构。E-mail: 15621042868@163.com。

* 通信作者: 李 军(1966—), 女, 山东淄博人。博士, 教授, 主要从事钢结构及木结构方面的研究。E-mail: kitjun76@qut.edu.cn。

榫卯连接是传统木结构建筑常用的连接方式,地震作用下具有较强的耗能能力^[1]。被称作“万榫之母”的燕尾榫因具有独特的构造方式,即榫头“内窄外宽”,卯口“内宽外窄”,故其整体性能好,抗拔能力强,可用于水平构件和竖向构件的连接,在外部荷载作用下燕尾榫节点呈现半刚性特征^[2-3],弯矩与转角关系受到广泛关注。

徐明刚等^[4]通过燕尾榫节点的拟静力试验,得到“Z”字形的弯矩-转角曲线,说明节点受力过程中产生了较大滑移。XUE 等^[5]采用缩尺燕尾榫节点试件进行了抗震性能分析,指出不同松动程度对节点弯矩-转角曲线有相应的影响。与弯矩-转角曲线相关的除了间隙外,还有木材接触面的摩擦系数和局部嵌压程度。TANAHASHI 等^[6]基于 Pasternak 模型研究了水平木构件转动时产生的上下嵌压,但研究对象与燕尾榫有所不同。高永林等^[7]通过试验研究发现燕尾榫节点的耗能能力和刚度变化受摩擦系数影响不大,受嵌压变形影响较明显。关于榫卯节点转动时的嵌压变形,可能是柱子卯口上下部位的顺纹受压,也可能是榫头上下部的横纹受压,两者均属于局部受压^[8]。这种局部受压可分为均匀受压和三角形嵌压。曹丽芳等^[9]通过试验研究发现木材局部受压强度远大于全截面受压强度。张伟等^[10]则通过试验研究了材料及几何因素对木材三角形嵌压的影响, HU 等^[11]考虑木材的嵌压,采用纤维梁柱单元对木框架结构的退化进行了研究。

理论分析方面,研究者考虑多种因素影响研究了燕尾榫节点抗弯性能。杨娜等^[12]考虑尺寸及摩擦因素对燕尾榫节点性能的影响,通过建立初始转动刚度-弯矩承载力回归模型,得出节点三参数幂函数模型。谢启芳等^[13]通过分析燕尾榫节点受力机理,提出简化的双折线弯矩-转角模型,但节点受力过程变形模型未涉及端面的嵌压。潘毅等^[14]引入木材横纹弹性模量,推导出燕尾榫节点弯矩-转角理论公式,并利用弹簧单元模拟节点半刚性性能。MA 等^[15]考虑不同损伤形式对燕尾榫节点抗震性能的影响,提出考虑榫头损伤的弯矩抗力理论方程。

综上所述,目前反映木材嵌压效应影响的燕尾榫节点抗弯性能研究较少,本文借助既有试验开展数值模拟研究,建立考虑木材嵌压的燕尾榫节点弯矩-转角力学模型,并提出相应的理论公式,旨在为燕尾榫节点理论分析提供参考。

1 燕尾榫节点的受力机理

燕尾榫节点由榫头与卯口拼接而成,当枋承受竖向荷载作用时,燕尾榫节点处于轴力 N 、剪力 V 和弯矩 M 共同作用的复合受力状态,如图 1 所示。此时榫头绕榫颈中心 O 点发生旋转(转角采用 θ 表示);卯口与榫头木材相互挤压,形成受压区;榫头顶面、端面及底面分别与卯口接触部位形成 3 个三角形嵌压区①、②、③,并产生相应的正压力 N_1 、 N_2 、 N_3 及摩擦力 f_1 、 f_2 、 f_3 ;同时,榫头端部与卯口端部呈脱离趋势,即榫头逐渐向外拔出,但由于燕尾榫榫头外宽内窄,拔出时会受到卯口侧壁的阻碍作用,侧面会形成全截面受压区,存在正压力 N_c ,并产生摩擦力 f_c 。

木材属于正交各向异性材料,顺纹与横纹方向材料属性差异大,顺纹弹性模量约为横纹弹性模量的 15 倍^[13],随着外部荷载的增加,榫头横纹方向变形会逐渐增大,卯口顺纹方向变形会较小,因此,相对于卯口而言,榫头的受力分析更有意义。

2 燕尾榫节点有限元分析

2.1 试验概况

本文参照文献^[5]中标准试件 DJ1 建立有限元模型,以验证建模方法的正确性,并对节点的受力性能做进一步探索。节点尺寸如图 2 所示,试验材料采用松木。试验装置如图 3 所示,柱水平放置,端部通过液压千斤顶施加 20 kN 轴力,枋竖向放置。循环往复加载制度采用位移控制方式,加载点距柱顶边缘 500 mm。

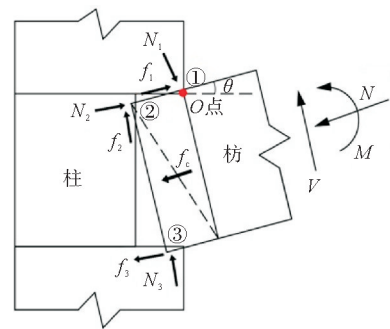


图 1 燕尾榫节点的受力机理

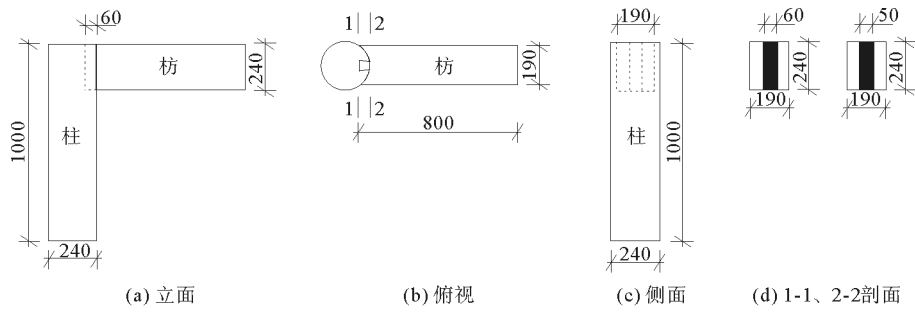


图2 燕尾榫节点尺寸(单位:mm)

2.2 考虑局部受压的数值模型

利用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟,模型尺寸和材料属性与试验保持一致,材料参数如表 1 所示,其中 E_L 、 E_R 、 E_T 为木材纵向、径向和弦向的弹性模量; ν_{12} 、 ν_{13} 、 ν_{23} 为横切面、径切面和弦切面的泊松比; G_{12} 、 G_{13} 、 G_{23} 为横切面、径切面和弦切面的剪切模量。

伴随燕尾榫节点部位的构件转动,榫头和卯口处的木材产生因相互挤压引起的局部变形,参照文献[16]可知:顺、横纹木材受压屈服后进入塑性流动阶段,受拉屈服后进入应变软化阶段,因此,模拟时将木材受压本构简化为双折线模型,受拉本构简化为单折线模型,如图 4 所示。采用 Hill 屈服准则,在 ABAQUS 的 Potential 函数中输入木材各个方向屈服应力比。为防止荷载施加过程中出现应力集中现象,柱顶及加载点处布置钢垫块,垫块与木材采用 Tie 约束,柱顶施加 20 kN 轴力,柱底完全固定。采用实体单元 C3D8R 进行单元网格划分,枋与柱接触部位进行网格加密处理。

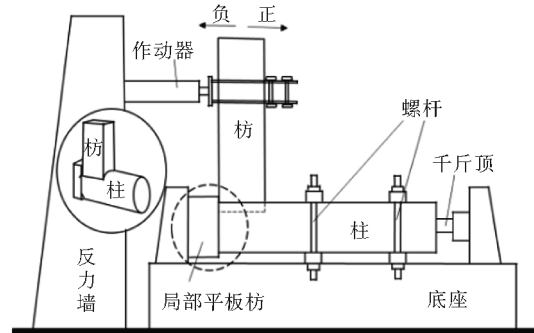


图3 加载装置示意

表 1 松木材料参数

E_L /MPa	E_R /MPa	E_T /MPa	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12} /MPa	G_{13} /MPa	G_{23} /MPa
3805	268	154	0.5	0.1	0.35	268	268	154

考虑木材局部嵌压效应,模型建立中将榫头分为嵌压区与全压区,如图 5 所示,参照文献[17]嵌压区深度取榫高 1/8。文献[9]与文献[18]试验数据表明:木材局部受压承载能力比全截面受压承载力高 20%~50%,取提升比例平均值,将嵌压区木材弹性模量放大 30%。一般来说,无润滑的木材间的静摩擦系数在 0.4~0.6,考虑不同纹理接触的影响,榫头顶、底面摩擦系数取 0.48,其余与卯口接触的位置取 0.4。

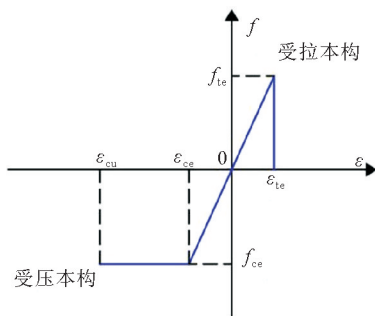


图4 应力-应变关系

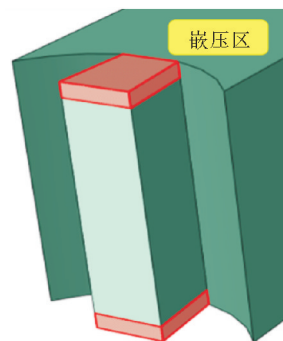


图5 考虑嵌压区的榫头模型

2.3 数值模型的验证与分析

2.3.1 骨架曲线分析

将试验骨架曲线与有限元模拟骨架曲线进行对比,如图 6 所示。可以看出,两者路径发展趋势一致,吻合良好。弯矩最大误差发生在转角为 -0.08 rad 时,此时模拟值与试验值分别为 -2.71 、 $-2.35 \text{ kN} \cdot \text{m}$,两者相差 13.3% ;正向最大抗弯承载力误差则为 5.6% 。相较于试验数据,模拟初始刚度偏小,应该是模拟过程中无法确定卯口侧壁对榫头侧面作用力大小所致。负方向的模拟值出现刚度退化现象,原因应该是:实际试验中随着节点的转动,榫头接触面特征参数产生变化,榫头局部嵌压导致塑性区产生,平均接触面变大,摩擦系数会随之改变^[19],而有限元模拟中摩擦系数取的是定值,加载后期榫头滑移量较大,以致于承载力降低。

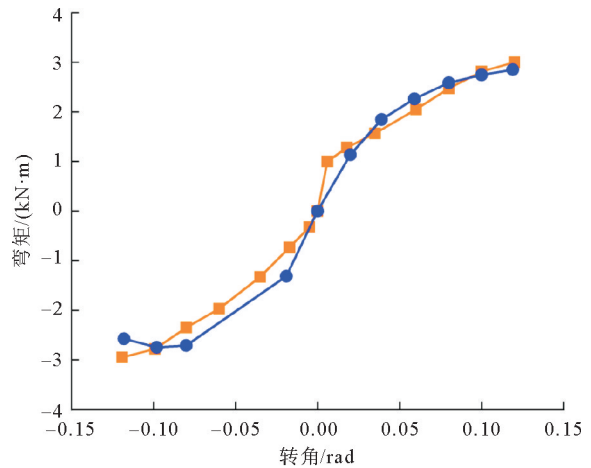


图 6 骨架曲线对比
— 试验; — 模拟

2.3.2 局部应力和应变分析

当燕尾榫节点转角至 0.02 rad 时,榫头顶面、底面应力及应变情况如图 7、图 8 所示(22 方向表示横纹径向)。可以看出,榫头最大压应力为 1.54 MPa ,因横纹抗压强度为 3.2 MPa ,所以木材尚未屈服。顶面与底面最大塑性应变分别为 0.0087 、 -0.0089 ,塑性变形很小。

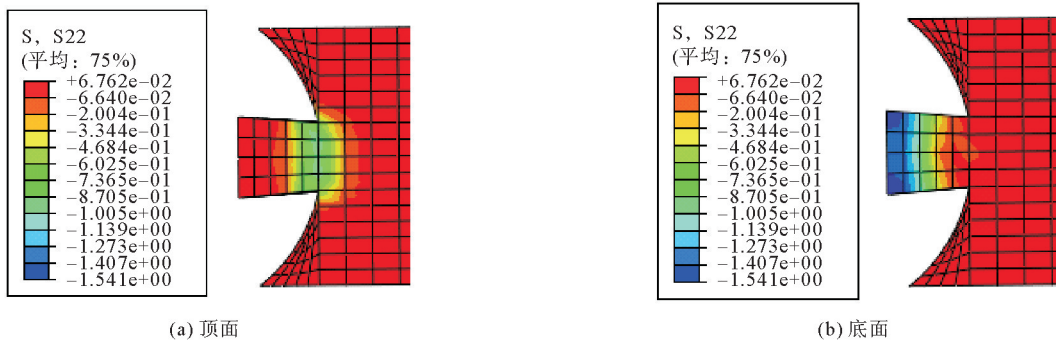


图 7 榫头应力分布

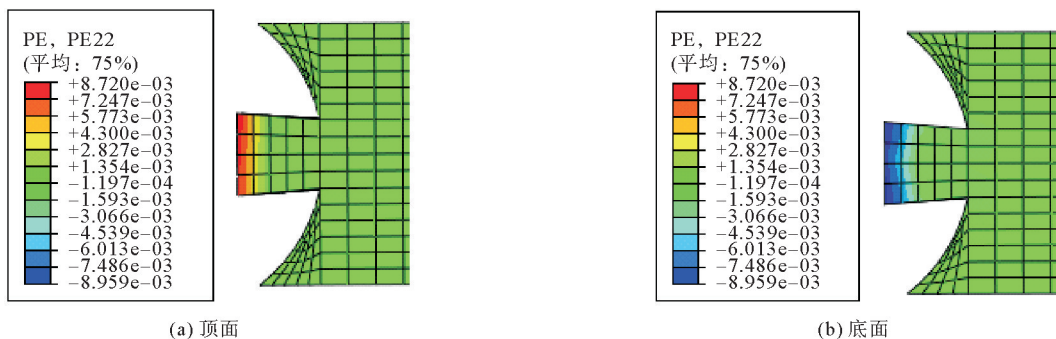


图 8 榫头塑性应变分布

2.3.3 榫头变形量分析

如图 9 所示,采用 δ_A 、 δ_B 表示榫高、榫长方向木材压缩量,提取榫头端面单元节点位移变化平均值可得 $\delta_A = 0.593 \text{ mm}$,提取榫头顶面单元节点位移变化平均值可得 $\delta_B = 0.193 \text{ mm}$,榫长方向的压缩量约为榫高的 $1/3$,榫头侧面压缩量约为榫高的 85% ,图中未对侧面压缩量进行标注。节点总弯矩包含侧面和非

侧面两部分,后者是榫头顶面、底面及端面弯矩的总和,图10为非侧面与侧面对节点弯矩的贡献情况,对比结果表明:在最大转角处非侧面弯矩贡献是侧面弯矩贡献的14.3%。通过图7—10可知,榫头侧面影响较大,榫头顶面、底面和端面处的接触与挤压对节点性能影响虽然较小,但合在一起的嵌压效应不能忽视。

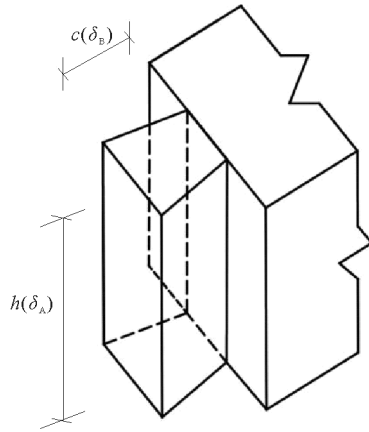


图9 榫头变形量
c—榫头长度; h—榫头高度

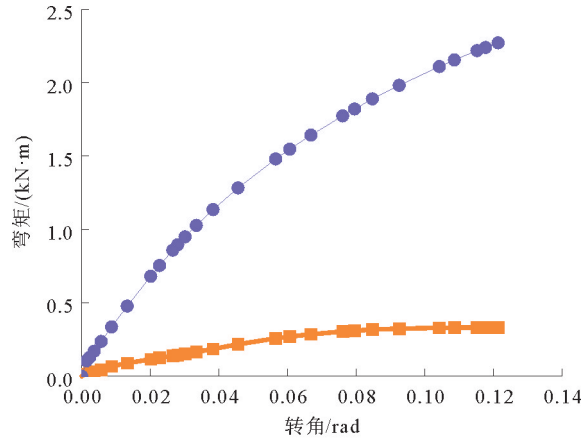


图10 弯矩大小对比
—非侧面; —侧面

3 燕尾榫节点弯矩-转角公式推导

3.1 转动模型的建立

为简化计算,采用以下假定:

- 1) 木材本构如图4所示,弹性阶段拉、压弹性模量相等。
- 2) 木材摩擦系数为定值,忽略不同纹路接触对摩擦系数取值的影响。
- 3) 假定卯口为刚性体,仅考虑榫头的受力与变形。

4) 外荷载合力作用点距旋转中心 O 点距离为定值;不考虑柱与枋变形对节点区域的影响,仅考虑榫头木材的局部破坏。

参照文献[20],因节点转动时榫头顶面和底面合力相同,因此结合燕尾榫节点受力机理及有限元模型分析结果,对基本假定做以下补充:

- 5) 榫头顶、底面先屈服,侧面后屈服,端面一直处于弹性状态。
- 6) 榫头顶、底面嵌入卯口深度相同,端面嵌入卯口深度约为顶面嵌入深度的 $1/3$ 。

根据上述基本假定,按图11所示步骤建立节点转动计算模型:第一步,以 O 点为旋转中心,通过式(1)计算榫头底面木材嵌入深度 δ_{\max} ;第二步,考虑 O 点的嵌压,榫头向上移动 δ_1 ,此时榫头底面嵌入深度由 δ_{\max} 变为 δ_3 ;第三步,考虑榫头水平嵌压,使榫头水平移动,端面嵌入深度值为 δ_2 。

$$\delta_{\max} = h \times [\tan\varphi - \tan(\varphi - \theta)] \times \tan\theta \quad (1)$$

式中: h 为榫头高度; φ 为榫头侧面对角线与榫高间夹角; θ 为榫头绕 O 点转角。

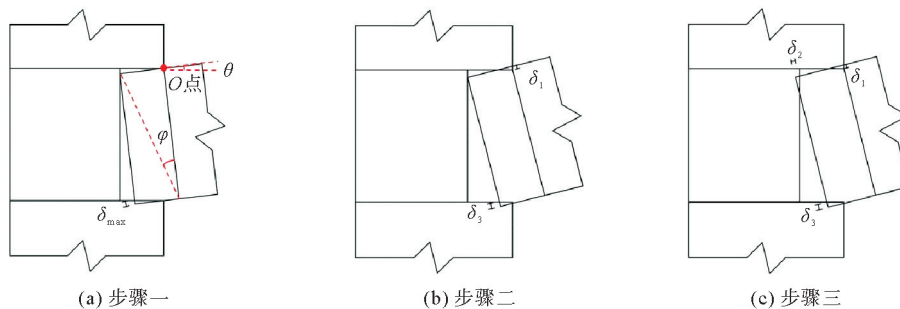


图11 燕尾榫节点转动计算模型

3.2 理论公式推导

榫头与卯口间的缝隙是木结构消耗地震能量的重要因素,在公式推导过程中,考虑榫头端面与卯口间空隙 δ_e 对节点受力性能的影响。根据上述基本假定及节点受力机理,节点产生的抗力由两部分组成:①榫头顶面、底面及端面木材的局部压应力和摩擦力;②榫头侧面木材挤压产生的摩擦力。将榫头顶面、底面木材屈服时节点产生的转角设为 θ_1 ,侧面木材屈服时产生转角设为 θ_2 。榫头尺寸及转动过程中侧面变形如图 12、图 13 所示。其中, a 、 b 、 c 分别为榫额宽度、榫颈宽度、榫头长度; h 为榫头高度; β 为收乍角度; δ_a 为榫头底部拔出宽度, $\delta_a = h \times \theta$; δ_f 为榫头侧面收缩量。

3.2.1 榫头顶面、底面及端面受力分析

弹性阶段和塑性阶段的榫头应力分布如图 14 所示,其中, l_1 、 l_2 、 l_3 分别为弹性阶段榫头受压区长度; l_{11} 、 l_{12} 、 l_{31} 、 l_{32} 分别为塑性阶段榫头顶面及底面弹性区域与塑性区域长度。对于弹性阶段,根据基本假定及几何关系,求出不同位置嵌压区的计算深度、长度、宽度及合力作用位置至旋转中心的距离,结果如表 2 所示。

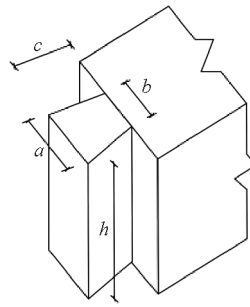


图 12 榫头尺寸

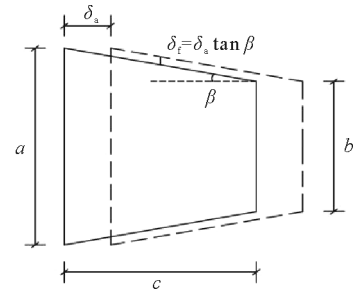


图 13 榫头侧面变形

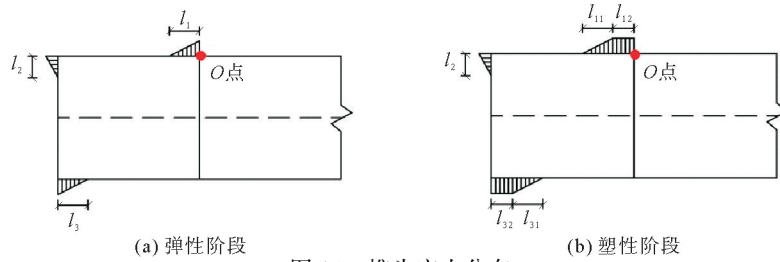


图 14 榫头应力分布

表 2 弹性阶段榫头受压区计算公式

阶段	位置	嵌入深度 δ /mm	受压长度 l /mm	受压宽度 d /mm	嵌压力至 O 点力臂长度/mm	摩擦力至 O 点力臂长度/mm
弹性	顶面	$\delta_1 \approx \frac{1}{2} \delta_{\max}$	$l_1 = \frac{\delta_1}{\tan \theta}$	$d_1 = b + \delta_e \tan \beta + \frac{l_1}{c^*} (a - b)$	$y_1 = \frac{l_1}{3}$	0
	端面	$\delta_2 = \frac{1}{6} \delta_{\max} - \delta_e$	$l_2 = \frac{\delta_2}{\tan \theta}$	$d_2 = a$	$y_2 = \frac{l_2}{3}$	c^*
	底面	$\delta_3 = \frac{1}{2} \delta_{\max}$	$l_3 = \frac{\delta_3}{\tan \theta}$	$d_3 = a - \frac{l_3}{c^*} (a - b)$	$y_3 = c^* - \frac{l_3}{3}$	h

注: δ_e 为榫头端面与卯口间空隙; c^* 为榫头计算长度, $c^* = c - \delta_e$ 。

弹性阶段不考虑侧面影响的榫头弯矩为

$$M = N_3 y_3 - N_1 y_1 - N_2 y_2 + f_3 h + f_2 c^* \tag{2}$$

式中: N_1 、 N_2 、 N_3 为三角形嵌压力,采用引入放大系数 γ 的式(3)计算;不同位置嵌压区摩擦力 f_1 、 f_2 、 f_3 取值采用式(4)计算:

$$\begin{cases} N_1 = \frac{1}{2} l_1 d_1 \epsilon_1 E_R \gamma \\ N_2 = \frac{1}{2} l_2 d_2 \epsilon_2 E_L \gamma \\ N_3 = \frac{1}{2} l_3 d_3 \epsilon_3 E_R \gamma \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} f_1 = \mu N_1 \\ f_2 = \mu N_2 \\ f_3 = \mu N_3 \end{cases} \quad (4)$$

式中： ϵ_i 为木材压应变， $i=1,2,3$ ， $\epsilon_1 = \delta_1/h$ ， $\epsilon_2 = \delta_2/(c - \delta_c)$ ， $\epsilon_3 = \delta_3/h$ ； E_L 、 E_R 分别为木材纵向及横纹径向弹性模量； μ 为滑动摩擦系数。

当加载转角到达 θ_1 时，榫头顶面及底面木材开始发生屈服，端面木材仍处于弹性状态，应力分布如图 14(b)所示。因此，塑性阶段不考虑侧面影响的榫头弯矩表示为

$$M = N_3^* y_3^* - N_1^* y_1^* - N_2^* y_2^* + f_3^* h + f_2^* c^* \quad (5)$$

式(5)中不同位置的嵌压力和摩擦力采用式(6)、式(7)计算。计算嵌压力时，为了简化，嵌压区计算宽度同弹性阶段，但力臂长度取值采用表 3 中公式计算。

$$\begin{cases} N_1^* = \frac{1}{2} l_{11} d_1^* E_R \epsilon_{\theta_1} \gamma + l_{12} d_1^* E_R \epsilon_{\theta_1} \gamma \\ N_2^* = \frac{1}{2} l_2 d_2^* E_L \epsilon_2 \gamma \\ N_3^* = \frac{1}{2} l_{31} d_3^* E_R \epsilon_{\theta_1} \gamma + l_{32} d_3^* E_R \epsilon_{\theta_1} \gamma \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} f_1^* = \mu N_1^* \\ f_2^* = \mu N_2^* \\ f_3^* = \mu N_3^* \end{cases} \quad (7)$$

表 3 塑性阶段榫头受压区计算公式

阶段	位置	屈服压应变 ($\theta = \theta_1$)	受压长度 l/mm	受压宽度 d/mm	嵌压力至 O 点力臂长度/mm	摩擦力至 O 点力臂长度/mm
	顶面	$\epsilon_{\theta_1} = \epsilon_1(\theta_1)$	$l_{11} = l_1 - l_{12}$ $l_{12} = \frac{\delta_1 - \epsilon_{\theta_1} h}{\tan \theta}$	$d_1^* = d_1$	$y_1^* = \frac{l_{11}^2 + 3l_{11}l_{12} + 3l_{12}^2}{3l_{11} + 6l_{12}}$	0
塑性	端面	0	$l_2 = \frac{\delta_2}{\tan \theta}$	$d_2^* = a$	$y_2^* = \frac{l_2}{3}$	c^*
	底面	$\epsilon_{\theta_1} = \epsilon_1(\theta_1)$	$l_{31} = l_3 - l_{32}$ $l_{32} = \frac{\delta_3 - \epsilon_{\theta_1} h}{\tan \theta}$	$d_3^* = d_3$	$y_3^* = c^* - \frac{l_{31}^2 + 3l_{31}l_{32} + 3l_{32}^2}{3l_{31} + 6l_{32}}$	h

注： ϵ_{θ_1} 为榫头底面与顶面木材屈服压应变。

3.2.2 榫头侧面受力分析

榫头转动时，底部拔出量为 δ_a ，弹性阶段 ($\theta < \theta_2$) 侧面实际应力分布如图 15(a)所示。据文献[21]，对最大应力进行调整，将实际应力分布简化为图 15(b)所示等效应力分布。此时，弹性阶段仅考虑侧面影响的榫头弯矩为 $M_c = 2f_c h/3$ ，其中榫头侧面摩擦力 $f_c = 2\mu\epsilon_{uv} E_T A_c$ ， A_c 为榫头侧面受压区面积； ϵ_{uv} 为平均应变(计算见表 4)， E_T 为木材弦向弹性模量。

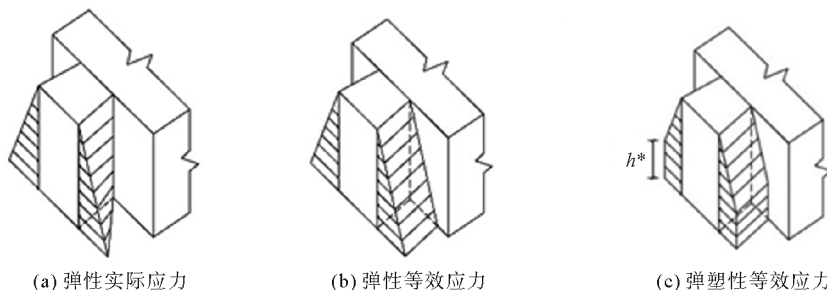


图 15 榫头侧面应力分布

加载转角到达 θ_2 时,榫头侧面木材开始屈服,侧面等效应力分布如图 15(c)所示,仅考虑侧面影响的榫头弯矩和摩擦力分别计算如下(表 5): $M_c^* = f_c^* y^*$, $f_c^* = 2\mu\epsilon_{uv}^* E_T A_c$ 。

表 4 弹性阶段榫头侧面受压区计算公式

阶段	侧面底部应变($\theta < \theta_2$)	平均应变	受压面积/ mm^2	侧面摩擦力至 O 点力臂长度/mm
弹性	$\epsilon_f = \frac{h \times \theta \times \tan\beta}{0.5 \times (a+b)}$	$\epsilon_{uv} = \frac{1}{4} \epsilon_f$	$A_c = \frac{c^* h}{\cos\beta}$	$\frac{2}{3} h$

注: ϵ_f 为榫头侧面底部应变。

表 5 塑性阶段榫头侧面受压区计算公式

阶段	屈服应变($\theta = \theta_2$)	平均应变	受压面积/ mm^2	侧面摩擦力至 O 点力臂长度/mm
塑性	$\epsilon_{\theta_2} = \frac{h \times \theta_2 \times \tan\beta}{0.5 \times (a+b)}$	$\epsilon_{uv}^* = \frac{1}{4} \times \frac{\epsilon_{\theta_2} (h+h^*)}{h}$	$A_c = \frac{c^* h}{\cos\beta}$	$y^* = h - \frac{(h^*)^2 + h^2 + h^* h}{3(h^* + h)}$

注: ϵ_{θ_2} 为侧面木材屈服应变; ϵ_{uv}^* 为榫头侧面弹塑性阶段平均应变; h^* 为塑性区域高度, $h^* = h - (\epsilon_{\theta_2} h) / \epsilon_f$ 。

3.2.3 弯矩-转角公式

综上所述,燕尾榫节点弯矩-转角三折线力学模型如图 16 所示。

式(8)~(10)分别为节点转角 $0 \sim \theta_1$ 、 $\theta_1 \sim \theta_2$ 、 $\theta_2 \sim \theta_u$ 三阶段的弯矩-转角理论公式:

$$M_1 = N_3 y_3 - N_1 y_1 - N_2 y_2 + f_3 h + f_2 c^* + M_c \quad (8)$$

$$M_2 = N_3^* y_3^* - N_1^* y_1^* - N_2^* y_2^* + f_3^* h + f_2^* c^* + M_c \quad (9)$$

$$M_u = N_3^* y_3^* - N_1^* y_1^* - N_2^* y_2^* + f_3^* h + f_2^* c^* + M_c^* \quad (10)$$

式中: M_u 为极限荷载, θ_u 为极限荷载下对应的转角。

本文所提出的三折线力学模型兼顾了理论性和实用性。模型的建立紧密联系燕尾榫节点受力机理,着眼于榫头顶面和底面的横纹嵌压、端面的顺纹嵌压以及侧面的全截面受压弹性阶段与塑性阶段的影响,相较于文献[13]、文献[14]的二折线理论模型,增加了端面嵌压的考虑与顺纹弹性模量的引入。

4 燕尾榫节点弯矩-转角公式验证

为了进一步验证 2.3.3 节提到的榫头侧面与非侧面对总弯矩的贡献程度,同时验证弯矩-转角公式的准确性,利用 ABAQUS 建立文献[5]燕尾榫节点三维模型,建模方法同本文第 2 节;结合文献[20]建立的二维模型,分别对榫头侧面弯矩及非侧面弯矩进行分析,如图 17 所示。

由图 17 可知,弯矩值榫头侧面较大、非侧面较小。理论计算非侧面弯矩较二维模型、三维模型偏小,前期加载所得弯矩与三维模型贴合较好,后期加载出现一定误差,最大误差值为 11.7%。侧面抗力曲线三者走势接近,理论计算结果前期刚度较小,后期弯矩大小处于二维模型及三维模型之间。

燕尾榫节点拟静力试验较多,针对有些类似试验,通过对比试验的材料参数、构件尺寸及骨架曲线结果选出更具有代表性试验模型。本文共选取了 6 个具有代表性的试验模型,即 JD2^[4]、DJ3^[5]、SJ-18^[17]、S-J2^[22]、YS1-2^[23]、S-2^[24],在 ABAQUS 中建立多个节点转动模型,并根据材料属性及屈服转角进行理论计算。材料种类及参数如表 6 所示,理论计算的屈服转角 θ_1 、 θ_2 根据文献中试验现象的描述及骨架曲线的转折点进行选取,杉木摩擦系数按平均值考虑取 0.3^[25],考虑到松木比杉木硬度小,摩擦系数较大,故取为 0.4。三者骨架曲线对比如图 18 所示。

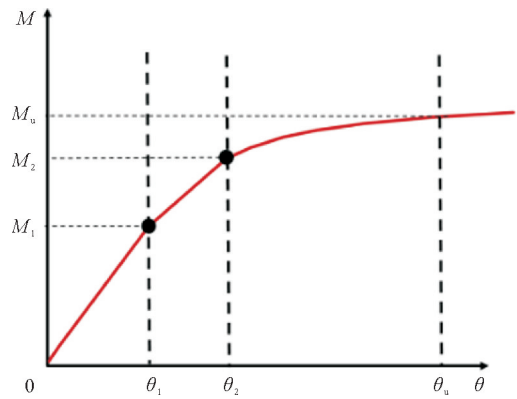


图 16 燕尾榫节点弯矩-转角曲线

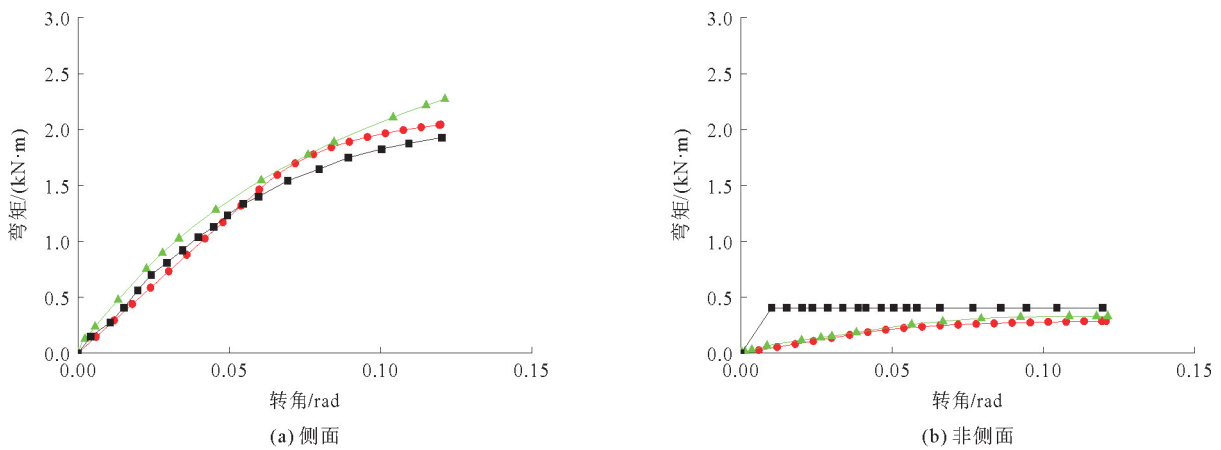


图 17 理论结果与模拟结果对比

—●— 理论公式；—▲— 三维模拟；—■— 二维模拟

表 6 木材参数属性与屈服转角

试件编号	木材种类	弹性模量/MPa			摩擦系数 μ	屈服转角/rad	
		E_L	E_R	E_T		θ_1	θ_2
JD2	杉木	8 111	872	400	0.3	0.05	0.08
DJ3	樟子松	3 805	268	154	0.4	0.04	0.06
SJ-18	杉木	7 410	830	510	0.3	0.04	0.06
S-J2	落叶松	5 480	750	450	0.4	0.05	0.08
YS1-2	杉木	7 410	830	510	0.3	0.04	0.07
S-2	东北红松	10 110	650	275	0.4	0.05	0.07

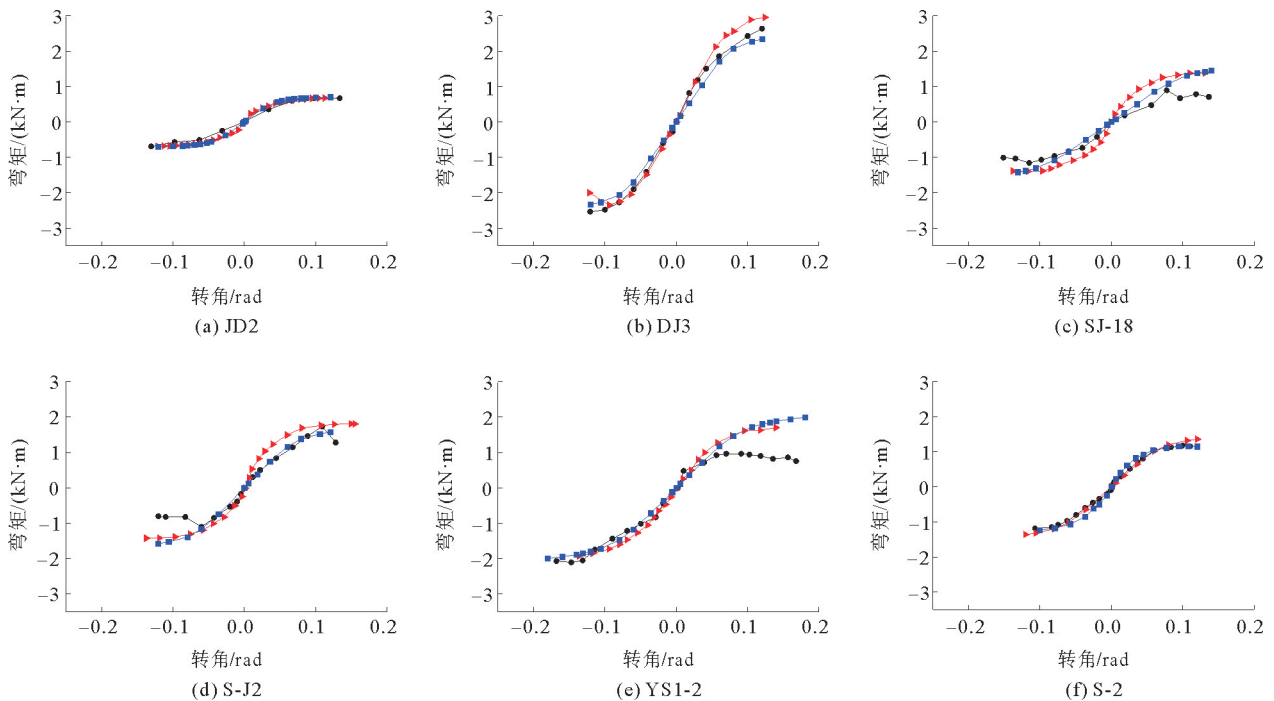


图 18 骨架曲线对比

—●— 实体试验；—■— 理论分析；—▲— 数值模拟

从图 18(a)(b)(f)中可以看出,3 条曲线走势基本一致,吻合度较高。图 18(c)(d)中,试验骨架曲线到

达极限荷载后出现明显下降段,数值模拟曲线及理论分析曲线的符合程度未很好表现出来。图 18(e)中负向曲线三者吻合度较高,但正向试验曲线与其余两者曲线出现较大偏差,且试验曲线正负向出现明显不对称情况,参照文献[23]判断可能诱因是材料腐蚀,因此后续研究中去除特殊因素影响,不再把该模型数据列为参考数据进行讨论。

将试验最大抗弯承载力与相同转角下理论公式、数值模拟对应的承载力进行比较可知:公式计算结果与试验结果相比最大误差为 12.6%,最小误差为 1.85%,平均误差为 7.77%,理论公式的适用性和有效性得以验证;模拟结果与试验结果相比最大误差为 14.2%,最小误差为 0.93%,平均误差为 7.18%,说明有限元建模方法合理可靠。

5 结束语

本文借助既有试验,考虑嵌压效应影响建立燕尾榫节点有限元模型,根据分析结果和节点受力机理,推导并检验燕尾榫节点弯矩-转角理论公式的有效性和适用性,主要结论如下:

1) 燕尾榫节点转动过程中,侧面产生的弯矩贡献较大;榫头顶面、底面和端面处的接触与挤压对节点性能影响虽然较小,但合在一起的嵌压效应不能忽视。

2) 本文所建立的节点弯矩-转角理论公式考虑了木材嵌压效应及摩擦因素影响,呈三折线曲线特征。第一阶段榫头木材为弹性,节点具有一定初始刚度,弯矩与转角呈线性相关;第二阶段因榫头顶面及底面木材先屈服,节点刚度开始略有下降;第三阶段受榫头侧面木材屈服影响,节点刚度大幅降低。

3) 既有节点试验与理论公式计算结果、数值模拟结果对比分析后可知,三者骨架曲线吻合较好,且最大抗弯承载能力相差不大,误差均在 15%以内。所提出的理论公式可为燕尾榫框架设计提供参考。

参考文献(References):

- [1] HUANG H,SUN Z W,GUO T,et al. Experimental study on the seismic performance of traditional chuan-dou style wood frames in southern China[J]. *Structural Engineering International*,2017,27(2):246-254.
- [2] CHEN C C, QIU H X, LU Y. Flexural behaviour of timber dovetail mortise-tenon joints[J]. *Construction and Building Material*,2016,112:366-377.
- [3] LI X W,ZHAO J H,MA G W,et al. Experimental study on the traditional timber mortise-tenon joints[J]. *Advances in Structural Engineering*,2015,18(12):2089-2102.
- [4] 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.
- [5] XUE J Y, GUO R, QI L J, et al. Experimental study on the seismic performance of traditional timber mortise-tenon joints with different looseness under low-cyclic reversed loading[J]. *Advances in Structural Engineering*,2019,22(6):1312-1328.
- [6] TANAHASHI H, OKAMURA M, SUZUKI Y. Simple formulation of elasto-plastic embedment behavior of orthotropic wood considering densification[J]. *WCTE*,2008,3:1250-1257.
- [7] 高永林,陶忠,叶燎原,等. 传统木结构典型榫卯节点基于摩擦机理特性的低周反复加载试验研究[J]. *建筑结构学报*,2015,36(10):139-145.
GAO Yonglin,TAO Zhong, YE Liaoyuan, et al. Low-cycle reversed loading tests study on typical mortise-tenon joints of traditional timber building based on friction mechanism[J]. *Journal of Building Structures*,2015,36(10):139-145.
- [8] 聂雅雯. 基于木材嵌压机理与摩擦理论的传统木结构数值模拟研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2020.
NIE Yawen. Numerical simulation of traditional timber structure modelling based on the wood embedded pressure characteristics and friction mechanism[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2020.
- [9] 曹丽芳,陈金永,牛庆芳,等. 5种木材横纹局部承压性能试验研究[J]. *中国科技论文*,2016,11(13):1452-1456.
CAO Lifang,CHEN Jinyong, NIU Qingfang, et al. Experimental study on local compression performance perpendicular to the grain for five different woods[J]. *China Sciencepaper*,2016,11(13):1452-1456.
- [10] 张伟,陶忠,徐红杰. 木节点三角形嵌压试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*,2010,32(S2):620-623.
ZHANG Wei,TAO Zhong, XU Hongjie. Experimental study on triangular embedding of wood joints[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*,2010,32(S2):620-623.
- [11] HU R, MURAMOTO M, LI J. A fiber beam-column model for damage assessment of traditional Chinese timber structures[J]. *Jour-*

- nal of Asian Architecture and Building Engineering, 2023, 23(1): 245-263.
- [12] 杨娜, 钟凯, 秦泰杰. 基于分式析因设计的燕尾榫节点抗弯性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(5): 32-38.
YANG Na, ZHONG Kai, QIN Shujie. Research on flexural behavior of dovetail mortise-tenon joint based on fractional factorial design[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(5): 32-38.
- [13] 谢启芳, 杜彬, 张凤亮, 等. 古建筑木结构燕尾榫节点弯矩-转角关系理论分析[J]. 工程力学, 2014, 31(12): 140-146.
XIE Qifang, DU Bin, ZHANG Fengliang, et al. Theoretical analysis on moment-rotation relationship of dovetail joints for Chinese ancient timber structure buildings[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(12): 140-146.
- [14] 潘毅, 张启, 王晓玥, 等. 古建筑木结构燕尾榫节点力学模型研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(8): 151-159.
PAN Yi, ZHANG Qi, WANG Xiaoyue, et al. Research on mechanical model of dovetail joint for Chinese ancient timber structures[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(8): 151-159.
- [15] MA H, LUAN X Y, LI Z B, et al. Seismic performance of damaged dovetail joints with different damaged degrees in timber frames[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019(1): 1-17.
- [16] 陈志勇, 祝恩淳, 潘景龙. 复杂应力状态下木材力学性能的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2011, 28(4): 629-634.
CHEN Zhiyong, ZHU Enchun, PAN Jinglong. Numerical simulation of mechanical behavior of wood under complex stress[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, 28(4): 629-634.
- [17] 高永林. 基于木材摩擦机理和嵌压特性的传统木结构典型榫卯节点试验研究及理论分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
GAO Yonglin. Experimental study and theoretical analysis of traditional timber typical mortise-tenon joints based on the wood friction mechanism and embedded pressure characteristics[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [18] 陆伟东, 许奉妍, 刘开封, 等. 考虑局压效应的榫卯节点力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(9): 37-44.
LU Weidong, XU Fengyan, LIU Kaifeng, et al. Mechanical properties of mortise-tenon joints considering local compression effect[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(9): 37-44.
- [19] XIE Q, ZHANG L, LI S, et al. Cyclic behavior of Chinese ancient wooden frame with mortise-tenon joints: Friction constitutive model and finite element modelling[J]. Journal of Wood Science, 2018, 64(1): 40-51.
- [20] 胡蓉, 村本真, 李军. 梁-柱有限要素法のファイバーモデルを並列化して接合部の履歴特性を考慮した解析法[J]. 構造工学論文集, 2021, 67: 403-412.
HU Rong, MURAMOTO Makoto, LI Jun, et al. Parallelized fiber model of beam-column finite element method considering hysteresis characteristics of joints[J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 67: 403-412.
- [21] LI S, JIANG Z, LUO H, et al. Seismic behaviour of straight-tenon wood frames with column foot damage[J]. Advances in Civil Engineering, 2019(1): 1-10.
- [22] 谢启芳, 杜彬, 向伟, 等. 古建筑木结构燕尾榫节点抗震性能及尺寸效应试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(3): 112-120.
XIE Qifang, DU Bin, XIANG Wei, et al. Experimental study on seismic behavior and size effect of dovetail mortise-tenon joints of ancient timber buildings[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(3): 112-120.
- [23] 聂雅雯, 陶忠, 高永林. 黏弹性阻尼器增强传统木结构燕尾榫节点试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(1): 125-133.
NIE Yawen, TAO Zhong, GAO Yonglin. Experimental study on dovetail mortise-tenon joints with viscoelastic dampers in traditional timber structures[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(1): 125-133.
- [24] 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.
- [25] 王丹. 传统木结构节点区摩擦耗能机理及力学模型化试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
WANG Dan. Friction energy dissipation mechanism and mechanics model test on tradition wooden structure joint region[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)