

# 不同松动程度下古建筑木结构透榫节点 弯矩-转角关系分析

薛建阳, 董金爽, 夏海伦, 张锡成

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 对古建筑木结构透榫节点的受力机理进行分析, 推导了不同松动程度下透榫节点弯矩-转角理论计算公式。为验证理论计算公式的合理性, 以 6 个缩尺比为 1/3.2 的透榫节点模型试验为对象, 其中包括 1 个连接完好紧密无松动透榫节点和 5 个连接不紧密有不同松动程度的透榫节点, 获得了不同松动程度下透榫节点的弯矩-转角骨架曲线, 将理论计算结果与试验结果进行对比分析, 两者吻合较好。分析结果表明: 随着摩擦系数的增大, 透榫节点的转动弯矩和初始转动刚度逐渐增大; 增大透榫截面高度, 可有效提高透榫节点承载能力; 榫头埋置嵌入长度随着木材摩擦系数、榫头插入卯口长度的增大而增加, 随着榫头截面高度的增加而减小; 随着节点松动程度的增大, 透榫节点承载能力逐渐降低。

**关键词:** 古建筑; 木结构; 松动程度; 透榫节点; 弯矩-转角关系

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)05-0638-07

## Moment-rotation relationship of through-tenon joints under different degree of looseness in ancient wooden buildings

XUE Jianyang, DONG Jinshuang, XIA Hailun, ZHANG Xicheng

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

**Abstract:** The mechanical mechanism of through-tenon joints was analyzed, and the moment-rotation calculation formula under different degree of looseness was deduced. In order to validate the formula, six 1/3.2-scaled through-tenon joints were designed for low cyclic reversed loading test, including a closely joint without loose connection intact and 5 joints with different degree of looseness. The moment-rotation skeleton curves of the test mortise and tenon joints were obtained and compared with the theoretical ones, to show that the calculated results agree well with the test results. It also indicated that the rotational moment and initial rotational stiffness increase with the increase of friction coefficients. With the increment of the height of mortise and tenon joints, the load capacity is improved. The embedment length will increase with the increment of wood friction coefficient and insertion length of tenon in mortise, whereas it decreases with the increasing of section depth. The loading capacity of through-tenon joints will be reduced with the increase of looseness.

**Key words:** ancient building; timber structure; degree of looseness; through-tenon joints; moment-rotation relationship

中国古建筑木结构采用榫卯将梁柱等构件与柱相连接是其一个主要特点, 榫卯的作用在于将相互独立、分散的构件紧密地联系在一起, 组成一个能够满足使用要求和功能要求的结构整体, 并能承受一定的外界荷载。榫卯节点作为一种半刚性节点, 刚柔相济, 使中国古建筑木结构具有了较强的转动能力及良好的耗能性能<sup>[1-2]</sup>, 使其在强震及风荷载作用下而屹立不倒。榫卯节点在古建筑木结构中起到传力作用, 若发生破坏将会导致整个结构产生倾斜甚至倒塌, 严重危及建筑物

的安全及使用, 因此, 确保榫卯节点足够的强度及刚度对木结构的安全性至关重要; 同时, 对其受力性能的研究也是木结构古建筑修缮保护的基础。

谢启芳等<sup>[3]</sup>通过 7 个人工模拟不同残损类型的单向直榫榫卯节点的抗震性能试验研究, 得到了其破坏特征、滞回性能及耗能能力等力学性能。薛建阳等<sup>[4]</sup>建立了透榫节点的有限元分析模型, 研究了透榫榫头高度、滑动摩擦系数、弹性模量、顺纹抗拉强度以及轴压比等参数对古建筑木结构

收稿日期: 2017-09-08

修改稿日期: 2018-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678478, 51508454); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2013BAK01B03-02); 陕西省科学技术研究发展计划项目(2013KW23-01)

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

透榫节点受力性能的影响。通过低周往复加载试验,薛建阳等<sup>[5]</sup>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。采用人工模拟榫头真菌腐朽的形式,商博渊<sup>[6]</sup>对减榫的力学性能进行了试验研究,获得了其屈服弯矩及初始刚度。阎嘉义等<sup>[7]</sup>对楔体系和直榫的榫卯节点及人工模拟生物劣化的木结构构件进行了试验研究,并建立了其数值分析模型。CHANG<sup>[8]</sup>对台湾地区传统民居中穿斗式榫卯节点的转动性能进行了研究,获得了其转动刚度与转角之间的关系。陈志勇<sup>[9]</sup>对应县木塔中典型榫卯节点进行了拟静力试验研究,并建立了其精细化有限元模型。

古建筑木结构的残损从结构体系来分有以下几种:斗拱歪闪、梁架整体倾斜、柱脚滑移等;从构件残损方面来分有木材材性劣化、榫卯松动。以上残损破坏中,榫卯松动是很重要的一种类型。国内外对其研究主要集中在试验研究和有限元分析方面,而对其弯矩-转角的理论分析尚未见报道,理论研究远滞后于工程实际需求极大制约了古建筑木结构榫卯节点的进一步发展。

鉴于此,文中对透榫节点受力机理进行分析,建立了不同松动程度下榫卯节点的弯矩-转角理论计算公式,对比试验结果表明两者吻合较好。

## 1 透榫节点受力机理分析

### 1.1 透榫节点构造形式

透榫主要用于大木结构,因使用时做成大进小出形状,故又称成为大进小出榫,如图1所示。

透榫主要用于需要拉结、但又无法用上起下落的方法进行安装的部位,如连接金柱与檐柱的穿插枋两端、抱头梁与金柱相交部位等处。竖向荷载作用下,透榫节点既能够承受一定弯矩,也能够产生一定转角。

### 1.2 透榫节点受力机理

对于有一定松动程度的透榫节点,榫卯之间存在空隙,在外荷载作用下,榫头首先产生滑移,在滑移的过程中榫卯接触面的摩擦力产生转动弯矩;随着加载的继续,当榫卯之间的空隙等于榫头的滑移量时,榫卯之间产生挤压力,此时榫头处于摩擦力及卯口对榫头挤压力的共同作用状态。

如图2所示,在外荷载作用下,透榫节点绕着卯口下侧外边缘产生转角 $\theta$ ,榫头端部上边缘(榫额)受到卯口上表面的压应力作用,下边缘(榫颈)受到卯口下表面的压应力作用,分别产生挤压力

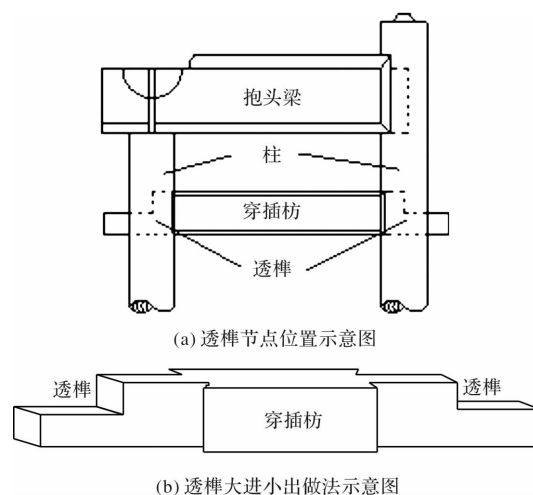
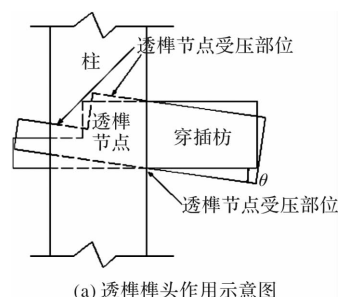
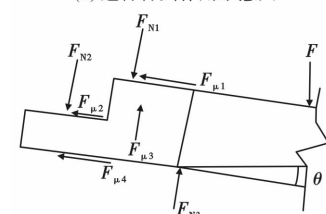


图1 透榫节点示意图

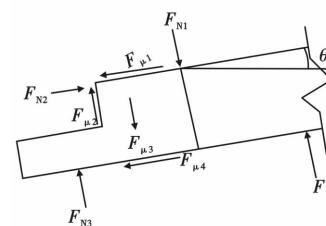
Fig. 1 The sketch of mortise and tenon joint



(a) 透榫榫头作用示意图



(b) 透榫榫头受力示意图(正向加载)



(c) 透榫榫头受力示意图(反向加载)

图2 透榫节点受力分析

Fig. 2 The force analysis of mortise and tenon joint

$F_{N1}$ ,  $F_{N2}$ ,  $F_{N3}$ ; 当外荷载  $F$  逐渐增大时, 转角  $\theta$  随之增大, 受挤压部分的木材进入塑性状态, 产生埋置嵌入作用, 即挤压部位的木材因应力集中被压缩形成一个凹陷区域, 使得榫卯节点咬合更加紧密, 从而在榫卯节点处产生了一定的力和弯矩。榫头在转动过程中, 产生的滑移使得榫头端部边缘与卯口表面产生摩擦力  $F_{\mu1}$ ,  $F_{\mu2}$ ,  $F_{\mu4}$ 。随着加载的继续, 榫卯节点的埋置嵌入效应愈加明显, 被压缩的榫卯部分受到高应力的局部挤压作用, 且由于埋置嵌入效应, 该部分木材刚度增大,

同时由试验观察到的现象可知,榫卯节点一般不会对这些部位发生断裂。

当榫卯之间产生转角时,榫头与卯口必然产生一定的滑移,转动产生的拉力使得榫头出现拔榫现象,这种拔榫程度一般较低。但是由于埋置嵌入效应,可在一定程度上抑制拔榫的继续发展,同时榫头在与挤压力平行的平面亦会受到卯口两侧的挤压,在节点转动过程中,挤压力会在榫卯接触面上产生沿着与挤压力方向平行的摩擦力 $F_{\mu 3}$ 。如此,榫卯节点处在榫头挤压发生塑性变形部位产生的埋置嵌入作用、榫卯接触面产生的摩擦力及榫卯挤压力共同作用下,这些作用力以产生埋置嵌入部位为作用点与外荷载产生的弯矩相平衡。

## 2 透榫节点弯矩-转角关系分析

### 2.1 基本假定

古建筑木柱、穿插枋取材工艺决定了沿其构件纵向为顺纹方向。木材是一种具有一定柔性的非均质正交各项异性材料,其力学性能具有各向异性,木材的本构关系也十分复杂,进行分析时需进行一定简化。

榫卯节点转角主要为榫头产生的转动,节点域几乎不产生剪切变形,因此在公式推导过程中,不考虑节点域产生的转角。

文献[12]对榫头转动过程的动摩擦系数进行了研究,认为榫头发生滑移后,动摩擦系数等于滑移前的静摩擦系数。

榫头转动的过程中,拉力分量使得榫头产生一定的拔榫,外荷载力矩作用点会发生一定的变化,但由于拔榫量一般较小,因此可认为外荷载的力矩作用点固定不变。

根据上述分析,可作以下基本假定:

(1)木材沿柱、穿插枋纵向为顺纹方向,木材简化为正交各向异性材料,受拉本构关系采用单折线本构模型,受压本构关系采用双折线强化本构模型,且抗拉弹性模量等于抗压弹性模量,应力-应变关系符合胡克定律;

(2)榫头转角不考虑节点域产生的剪切变形,只考虑榫头沿着外荷载力矩作用点产生的转角;

(3)榫头在滑移前后,认为动静摩擦系数相等,且为定值;

(4)榫头转动过程中,外荷载力臂长度为定值。

### 2.2 透榫节点弯矩-转角关系

如图2、图3所示,当榫卯节点产生转角 $\theta$ (包含由于节点松动导致自由转动产生的转角)时,透榫榫额与榫颈为受压区,榫头发生转动时,使得榫头产生一定程度的拔榫,导致榫头上下表面与卯口产生一定的挤压和摩擦,从而产生埋置嵌入效应,榫头拔榫挤压变形如图3所示。

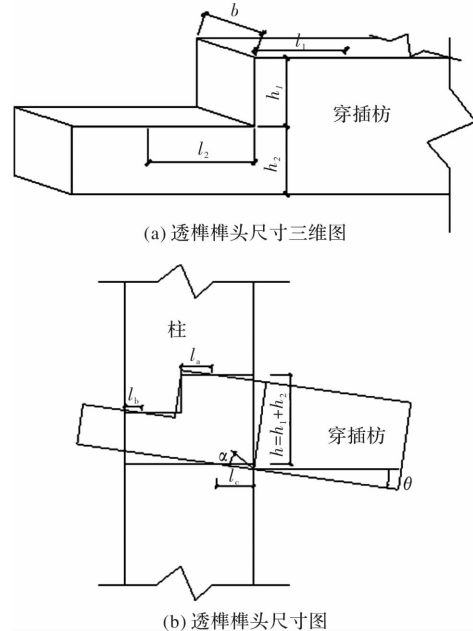


图3 透榫节点尺寸图

Fig. 3 Dimensions of the mortise and tenon joint

根据榫头的受力分析及基本假定可知,透榫节点的转动弯矩主要是由榫头上下表面因埋置嵌入作用而产生的弯矩、摩擦弯矩、榫头侧面与卯口因挤压而形成的摩擦弯矩等组成。如图8中 $F_{N1}$ 、 $F_{N2}$ 、 $F_{N3}$ 分别为透榫榫头受挤压区域合压力, $F_{\mu 1}$ 、 $F_{\mu 2}$ 、 $F_{\mu 3}$ 、 $F_{\mu 4}$ 分别为在榫头转动过程中,榫头与卯口接触面产生的摩擦力。由图2(a)的受力分析及平衡条件,可得透榫榫头力平衡方程。

$$\begin{cases} F_{N1} + F_{N2} + F \cos \theta = F_{N3} + F_{\mu 3} \\ F_{\mu 1} + F_{\mu 2} + F_{\mu 4} = F \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

根据图3的几何关系,可知

$$h_1 + h_2 + l_a \tan \theta + l_c \sin \theta \cos \theta = L \sin(\alpha + \theta) \quad (2)$$

式中: $h_1$ 、 $h_2$ 分别为透榫榫头中大头和小头的截面高度; $l_a$ 、 $l_c$ 分别为榫头对应的嵌入埋置区的长度; $L = \sqrt{h^2 + l^2}$ , $\alpha = \arctan(h/l)$ ,其中: $h = h_1 + h_2$ , $l = l_1 + l_2$ , $l_1$ 、 $l_2$ 分别为透榫榫头大头、小头插入卯口中的长度。同时 $\alpha$ 也可以用来表征透榫节点的松动程度。

对于榫额与榫颈处的埋置嵌入区域, 沿埋置方向的最大应变可表示为

$$\begin{cases} \epsilon_{\max,a} = \frac{l_a \sin \theta \cos \theta}{h / \cos \theta} = \frac{l_a \sin \theta \cos^2 \theta}{h} \\ \epsilon_{\max,b} = \frac{l_b \sin \theta \cos \theta}{h / \cos \theta} = \frac{l_b \sin \theta \cos^2 \theta}{h} \\ \epsilon_{\max,c} = \frac{l_c \sin \theta}{h} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\epsilon_{\max,a}$ ,  $\epsilon_{\max,b}$ ,  $\epsilon_{\max,c}$  分别为榫额、榫颈埋置嵌入区域内木材的最大应变值。

根据假定(1), 榫额、榫颈埋置嵌入区域木材的最大应力值可以表示为

$$\begin{cases} \sigma_{\max,a} = \epsilon_{\max,a} \cdot E_{\perp} \cdot \beta(\varphi) \\ \sigma_{\max,b} = \epsilon_{\max,b} \cdot E_{\perp} \cdot \beta(\varphi) \\ \sigma_{\max,c} = \epsilon_{\max,c} \cdot E_{\perp} \cdot \beta(\varphi) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_{\max,a}$ ,  $\sigma_{\max,b}$ ,  $\sigma_{\max,c}$  分别为榫额、榫颈埋置嵌入区域木材的最大应力值;  $E_{\perp}$  为木材横纹径向受压弹性模量(当木材进入受压塑性阶段, 强化段的弹性模量折减系数为 0.3<sup>[10]</sup>), 木材横纹径向受压本构曲线如图 4 示;  $\beta(\varphi)$  为木材弹性模量的增大系数, 由 Hankinson 公式计算, 得

$$\beta(\varphi) = \frac{E_{//}}{E_{//} \cos^n \theta + E_{\perp} \sin^n \theta} \quad (5)$$

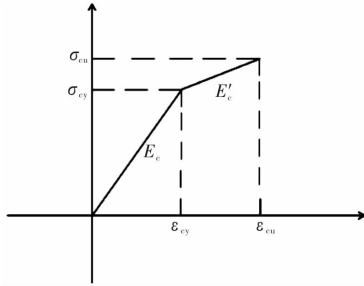


图 4 木材横纹径向本构关系曲线

Fig. 4 The curve of relationship of cross grain wood at radial direction

式中:  $E_{//}$  为木材顺纹弹性模量;  $n$  为不同木材种类影响系数, 介于 1.5~2.0, 由文献[11]知,  $n=2.0$ .  $\varphi$  为木材纹理方向与受力方向的夹角. 定义公式(4)中  $E_{\perp}(\varphi) = E_{\perp} \cdot \beta(\varphi)$  表示木材在不同受力角度时的弹性模量, 并根据假定(1)中木材受压本构采用双折线强化本构模型, 如式(6)所示.

$$\begin{cases} E_{\perp}(\varphi) = E_{\perp} \cdot \beta(\varphi) \epsilon \leq \epsilon_y \\ E_{\perp}(\varphi) = E_{\perp, \tan} \cdot \beta(\varphi) \epsilon_y \leq \epsilon \leq \epsilon_u \end{cases} \quad (6)$$

则木材榫额与榫颈埋置嵌入区域的应力值  $\sigma(\varphi)$  可由公式(7)表示.

$$\sigma(\varphi) = \begin{cases} E_{\perp}(\varphi) \cdot \epsilon & \epsilon \leq \epsilon_y \\ E_{\perp}(\varphi) \cdot \epsilon_y + E_{\perp, \tan} \cdot (\epsilon - \epsilon_y) & \epsilon_y \leq \epsilon \leq \epsilon_u \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $E_{\perp, \tan}$  为木材进入到强化阶段的弹性模量,  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_u$  为分别为木材的屈服应变值、极限应变值.

根据基本假定(1)、(3), 结合公式(4)、(7), 可得榫额及榫颈埋置嵌入受压区合压力, 如式(8)所示.

$$\begin{cases} F_{N1} = \frac{l_a \cdot b \cdot \epsilon_{\max,a} \cdot E_{\perp}(\varphi)}{2} \\ F_{N2} = \frac{l_b \cdot b \cdot \epsilon_{\max,a} \cdot E_{\perp}(\varphi)}{2} \\ F_{N3} = \frac{l_c \cdot b \cdot \epsilon_{\max,a} \cdot E_{\perp}(\varphi)}{2} \end{cases} \quad (8)$$

将式(3)代入式(8)可得

$$\begin{cases} F_{N1} = \frac{l_a^2 \cdot b \cdot \sin \theta \cos^2 \theta \cdot E_{\perp}(\varphi)}{2h} \\ F_{N2} = \frac{l_b^2 \cdot b \cdot \sin \theta \cos^2 \theta \cdot E_{\perp}(\varphi)}{2h} \\ F_{N3} = \frac{l_c^2 \cdot b \cdot \sin \theta \cdot E_{\perp}(\varphi)}{2h} \end{cases} \quad (9)$$

根据式(9), 可得透榫榫头榫额部位埋置嵌入区域榫卯接触挤压产生的摩擦力如式(10)所示.

$$\begin{cases} F_{\mu 1} = \mu \cdot F_{N1} \\ F_{\mu 2} = \mu \cdot F_{N2} \\ F_{\mu 4} = \mu \cdot F_{N3} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\mu$  为木材摩擦系数, 根据已有试验研究<sup>[12]</sup>, 取  $\mu=0.45$ .

榫头在转动过程中, 卯口两侧对榫额部位有挤压作用, 由于透榫不像燕尾榫有“乍”和“溜”的做法, 透榫榫额不存在上窄下宽和根部窄、端部宽的做法, 所以卯口对透榫榫额挤压力较小, 由此产生的摩擦力亦较小, 即图 2 中透榫榫额因卯口挤压产生的摩擦力  $F_{\mu 3}$  可忽略不计.

根据透榫大进小出做法及相关试验现象可知, 榫头插入卯口部分受到卯口挤压作用的埋置嵌入区域中榫头上端部的  $l_a$ 、 $l_b$  大致相等, 即可假定  $l_a = l_b$ .

联立上述公式, 并结合基本假定, 解得榫头埋置嵌入长度分别为

$$\begin{cases} l_a = l_b = \frac{\kappa(l \sin(\alpha + \theta) - h)}{\cos^2 \theta + \kappa} \\ l_c = \frac{l \sin(\alpha + \theta) - h - l_a^2}{\cos^2 \theta} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\kappa = \sqrt{\frac{(1-\mu)}{2\mu}}$ . 由式(11)知, 榫头埋置嵌入长度与木材摩擦系数  $\mu$ 、榫头截面高度  $h$  及榫头插入卯口深度  $l$  有关, 随着透榫节点松动程度的增大, 榫头埋置嵌入长度随之减小.

联立式(1)、式(8)、式(10)、式(11)解得外荷载  $F$  的具体表达式如式(12)所示。

$$F = \{l \sin(\alpha + \theta) - h - \frac{\kappa^2 [l \sin(\alpha + \theta) - h]^2}{(\cos^2 \theta + \kappa)}\} \cdot 2 \left[ \frac{b \mu \sin \theta (\cos \theta + \sin \theta) E_{\perp}(\varphi)}{(1 + \mu) h \cos^4 \theta} \right] \quad (12)$$

综合上述,得抵抗弯矩  $M$  和转角  $\theta$  间关系式为

$$M = F s = \{l \sin(\alpha + \theta) - h - \frac{\kappa^2 [l \sin(\alpha + \theta) - h]^2}{(\cos^2 \theta + \kappa)}\} \cdot 2 \frac{b \mu s \sin \theta (\cos \theta + \sin \theta) E_{\perp}(\varphi)}{(1 + \mu) h \cos^4 \theta} \quad (13)$$

式中,  $s$  为外荷载作用力臂。

结合已有研究成果<sup>[13-14]</sup>,透榫节点考虑不同松动程度影响的修正系数可按式(14)取值

$$k = 1.189 - 2.977\theta \quad (14)$$

综上,考虑不同松动程度下透榫节点的抵抗弯矩  $M$  和转角  $\theta$  之间的关系表达式为

$$M = k F s = \{l \sin(\alpha + \theta) - h - \frac{\kappa^2 [l \sin(\alpha + \theta) - h]^2}{(\cos^2 \theta + \kappa)}\} \cdot 2 \left[ \frac{b \mu s k \sin \theta (\cos \theta + \sin \theta) E_{\perp}(\varphi)}{(1 + \mu) h \cos^4 \theta} \right] \quad (15)$$

### 3 透榫节点弯矩-转角公式验证

为验证公式(15)的合理性,以课题组进行的不同松动程度下透榫节点拟静力试验<sup>[15]</sup>为对象,将理论计算结果与试验结果进行对比。

#### 3.1 模型设计与制作

按照清工部《工程做法则例》缩尺比为 1:3.2,设计制作了 6 个透榫节点模型, TJ1 未削减大小榫头, TJ2-TJ6 为榫头大小削减模型,反应不同程度的松动情况。模型构造如图 5 示。

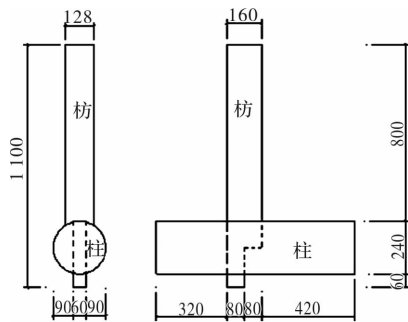


图 5 透榫节点模型尺寸

Fig. 5 Dimensions of the mortise and tenon joint

由于实际节点松动情况较为复杂,进行如下简化:假设透榫榫头卯口宽度不变,降低榫头截

面高度,反映榫卯节点松动。定义松动程度  $D$  为榫头削减尺寸与未削减的榫头截面高度的比值。榫头削减尺寸及松动程度如表 1 所示。

表 1 榫卯节点松动程度

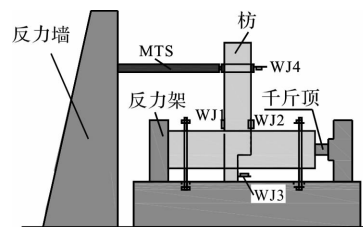
Tab. 1 The rate of looseness of mortise and tenon joint

试件	榫大头 削减尺寸/mm	榫小头 削减尺寸/mm	削减后 榫大头 尺寸/mm	削减后 榫小头 尺寸/mm	松动程度 $D/\%$
TJ1	0	0	160	80	—
TJ2	4	4	156	76	2.5
TJ3	8	8	152	72	5.0
TJ4	12	12	148	68	7.5
TJ5	16	16	144	64	10.0
TJ6	20	20	140	60	12.5

#### 3.2 加载方案

透榫节点加载装置如图 6 示,试验对象为透榫节点,采用卧式加载方法,枋竖向放置,柱子横置,并由水平液压千斤顶施加柱端轴力。MTS 作动器在枋端水平反复加载,规定水平作动器向右运动为正向加载方向,向左则为负向加载。为模拟实际梁端荷载,作动器前端设置球铰与枋连接。

试验加载采用位移控制,控制位移取透榫节点数值模拟分析的峰值位移  $\Delta_u = 50$  mm。试验加载以控制位移为基准,首先以 10% 为增量,依次加载至控制位移的 50%,每级循环一次;而后以 20% 为增量,进行加载,每级循环三次,直至榫头折断,透榫节点发生破坏,试验终止。



(a) 加载装置示意图



(b) 加载现场

图 6 试验加载装置

Fig. 6 Test loading device

#### 3.3 木材材性指标

根据木材材性试验测定方法所测结果见表 2。

表 2 木材材性指标

Tab. 2 Mechanical properties of the experimental wood

木材 种类	顺纹抗 拉强度 /MPa	顺纹抗 压强度 /MPa	横纹抗 压强度 /MPa	抗弯强 度/MPa	顺纹弹 性模量 /MPa	径向弹 性模量 /MPa	弦向弹 性模量 /MPa	含水率 /%
樟子松	54.3	23.2	3.2	35.9	10 020	1 150	530	13.3

3.4 M-θ 骨架曲线

TJ1-TJ6 透榫节点骨架曲线如图 7 所示。由图 7 可知:

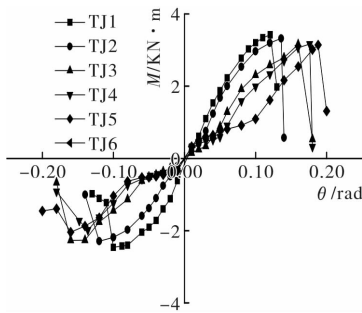


图 7 透榫节点 M-θ 骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curves of mortise and tenon joint

(1)对于松动节点,榫头与卯口存在空隙,随转角的增大,弯矩增加并不明显,出现滑移段,滑移段随节点松动程度增大而增大,随转角增大,榫卯节点挤紧,之后受力过程与完好节点类似。

(2)松动节点的极限弯矩小于完好节点,极限转角大于完好节点;随松动程度的增大,极限弯矩降低,极限转角增大。

(3)透榫节点的不对称导致各节点骨架曲线不对称,出现反向加载得到的极限承载力和极限转角均小于正向加载的情况。

3.5 公式验证

根据公式(15)计算的残损透榫节点的理论计算结果与试验结果见表 3。

表 3 透榫节点试验值与理论值的对比

Tab. 3 Comparison between experimental and theoretical value

试件	$M_{ye}/\text{kN}\cdot\text{m}$	$M_{yt}/\text{kN}\cdot\text{m}$	$M_{yt}/M_{ye}$	$M_{ue}/\text{kN}\cdot\text{m}$	$M_{ut}/\text{kN}\cdot\text{m}$	$M_{ut}/M_{ue}$
TJ1	2.41	2.54	1.05	2.94	3.02	1.03
TJ2	2.28	2.35	1.03	2.81	2.87	1.02
TJ3	1.72	1.62	0.94	2.71	2.65	0.98
TJ4	1.79	1.85	1.03	2.56	2.65	1.04
TJ5	1.91	1.84	0.96	2.60	2.45	0.94
TJ6	1.88	1.96	1.04	2.23	2.39	1.07

注:平均  $M_{yt}/M_{ye}=1.011$ , 标准差=0.104, 变异系数=0.103; 平均  $M_{ut}/M_{ue}=1.012$ , 标准差=0.099, 变异系数=0.098。

表 3 中  $M_y$ 、 $M_u$  分别为屈服弯矩、极限弯矩。角标“e”、“t”分别表示试验值、计算值。表中所得特征点数值为正、反向加载的平均值。由表 3 可见,虽然透榫节点弯矩的计算值与试验结果存在一定的偏差,但总体吻合较好,较全面地反映了透榫节点在转动过程中弯矩与转角的变化规律。

4 结 论

(1)不同松动程度下透榫节点 M-θ 骨架曲线表明松动节点的极限弯矩小于完好节点,极限转角大于完好节点,随节点松动程度的增大,极限弯矩降低,极限转角增大;

(2)透榫节点的转动弯矩和初始转动刚度随着

摩擦系数的增大而增大;增大透榫截面高度,可有效提高透榫节点承载能力;

(3)推导了不同松动程度下透榫节点弯矩-转角关系,理论计算结果与试验结果吻合较好;

(4)榫头埋置嵌入长度随着木材摩擦系数、榫头插入卯口长度的增大而增加,随着榫头截面高度的增加而减小。所推导理论公式可为古建筑木结构的受力分析提供理论依据。

参考文献 References

[1] 徐明刚,邱洪兴. 中国古代木结构建筑榫卯节点抗震试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010(S2): 345-349.  
XU Minggang, QIU Hongxing. Expermental study on seismic behavior of mortise-tenon joints in Chinese

- ancient timber buildings[J]. Journal of Building Structures, 2010(S2): 345-349.
- [2] 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, 808.
- ZHOU Qian, YAN Weiming, ZHOU Xiyuan, et al. Aseismic behavior of Chinese ancient tenon-mortise joint[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(6): 679-684, 808.
- [3] 谢启芳, 郑培君, 向伟, 等. 残损古建筑木结构单向直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 Qifang, ZHENG Peijun, XIANG Wei, 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.
- [4] 商博渊. 台湾传统木构造「减榫」力学行为与模拟生物劣化之研究[D]. 台湾: 国立成功大学, 2010.
- SHANG Boyuan. Mechanical performance of Taiwanese traditional "right-angled-notch-tenon" timber connections by reviewing the effects of simulated termite infestation[D]. Taiwan: National Cheng Kung University, 2010.
- [5] 薛建阳, 路鹏, 夏海伦. 古建筑木结构透榫节点受力性能的影响因素分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(3): 324-330.
- XUE Jianyang, LU Peng, XIA Hailun. Influencing factors analysis on mechanical behavior of through-tenon joints in ancient timber buildings[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2018, 50(3): 324-330.
- [6] 薛建阳, 夏海伦, 李义柱, 等. 不同松动程度下古建筑透榫节点抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(4): 463-469.
- XUE Jianyang, XIA Hailun, LI Yizhu, et al. Experimental study on seismic behavior of penetrated mortise-tenon joints under different degree of looseness in ancient buildings[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(4): 463-469.
- [7] 阎嘉义, 金文森. 中国传统木构造榫卯系统之结构行为[J]. 中国土木水利学刊(台湾), 1995, 7(2): 151-161.
- YAN Jiayi, JIN Wensen. The structural behavior of mortise-tenon joints in ancient Chinese wooden buildings[J]. Journal of civil and hydraulic engineering, 1995, 7(2): 151-161.
- [8] CHANG W S. Research on rotational performance of traditional Chuan-Dou timber joints in Taiwan[D]. Taiwan: Chen Kung University, 2006.
- [9] 陈志勇. 应县木塔典型节点及结构受力性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- CHEN Zhiyong. Behavior of typical joints and the structure of Ying-Xian wood pagoda[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [10] 谢启芳, 崔雅珍, 赵鸿铁, 等. 古建筑木结构修缮加固时木材材料强度取值探讨[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 483-486.
- XIE Qifang, CUI Yazhen, ZHAO Hongtie, et al. Study on calculation method of wood strength for ancient timber structure buildings[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2013, 41(4): 483-486.
- [11] Forest Products Laboratory. Wood handbook: wood as an engineering material[M]. Washington DC: University Press of the Pacific, 2010.
- [12] 张锡成. 地震作用下木结构古建筑的动力分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- ZHANG Xicheng. Dynamic analysis of ancient timber-frame buildings under seismic excitations[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2013.
- [13] 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.
- [14] 张凤亮, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 基于摇摆柱原理的古建筑木结构柱架抗侧分析及试验验证[J]. 工业建筑, 2013, 43(10): 55-60.
- ZHANG Fengliang, ZHAO Hongtie, XUE Jianyang, et al. Lateral load resisting analysis and experimental verification of ancient timber column-frame based on swing-columns principle[J]. Industrial Construction, 2013, 43(10): 55-60.
- [15] 夏海伦. 不同松动程度下古建筑不对称榫卯节点抗震性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- XIA Hailun. Experimental study on seismic behavior of through-tenon joints under different degree of looseness in ancient wooden buildings[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2015.

(编辑 沈波)