

轻木结构正交主轴齿板连接承载力试验及分析

何敏娟¹, 何桂荣¹, 倪 骏², 杨春梅²

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 苏州皇家整体住宅系统有限公司, 江苏 苏州 215000)

摘要: 为确定轻型木结构正交主轴金属齿板连接节点的受力—变形性能及板齿极限承载力、齿抗滑移承载力, 对 40 个齿板节点试件进行了荷载平行于木纹方向的加载试验. 在试验基础上, 利用最小二乘原理对数据进行了 Foschi 公式的曲线拟合, 得到该种齿板的荷载—变形曲线; 利用概率统计方法对试验数据进行拟合检验, 得出该种齿板承载力的概率分布模型, 确定了该种齿板的板齿极限承载力标准值和齿抗滑移承载力标准值. 分析结果表明, 该类节点延性较好, 变异性较低.

关键词: 正交主轴齿板; 曲线拟合; 荷载—变形曲线; 承载力
中图分类号: TU 366.2; TU 759 **文献标识码:** A

Experimental and Statistical Analysis on Load Carrying Capacity of Metal Plate with Orthogonal Oriented Teeth in Light Wood Frame Construction

HE Minjuan¹, HE Guirong¹, NI Jun², YANG Chunmei²

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Suzhou Crownhomes Co. Ltd., Suzhou 215000, China)

Abstract: This paper presents an experimental study on mechanical properties of a new type of metal plate, in which its teeth are orthogonal oriented. Experiment was designed to investigate the load-deformation relationship, ultimate lateral capacity of teeth and ultimate lateral slip capacity of teeth for this type of metal plate connected joints. 40 specimens were tested under tension loading parallel-to-grain. Experimental data of load-deformation were fitted to Foschi model with the least-square method, the goodness of fit was verified by classic statistical method, and the Foschi model being adopted to represent the load-deformation relationship of wood-based connections had been widely accepted and extensively verified by experimental study. Then the probability distribution model for load carrying capacity was determined by goodness of fit

test. Based on reliability theory, characteristic values for ultimate lateral resistance and ultimate lateral slip resistance were determined on the basis of the probability distribution model. Analytical results indicate that this kind of joints exhibit high ductility and low variability.

Key words: metal plate with orthogonal oriented teeth; curve fitting; load-deformation curve; load-bearing capacity

轻型木结构因抗震性能好、建造方便、材料可再生、保温隔热性能好而成为现代木结构中广泛应用的一种形式. 齿板连接大量应用于轻型木结构建筑中木桁架的节点连接及受拉杆件的接长, 其承载能力往往决定着整个桁架的承载性能^[1]. 因此, 了解齿板连接节点的承载力十分重要.

目前国内市场上较多地使用进口齿板(如 M-20 齿板). 这些齿板一般有主轴方向, 平行主轴方向的承载能力明显要比垂直主轴方向的大, 适用于沿主轴受力的节点, 如受拉杆件的接长等. 为降低国内轻型木结构建设成本, 并方便施工, 国内生产了正交主轴的齿板. 正交主轴齿板的齿沿两正交方向垂直排列, 沿两方向具有相同的承载力, 在本文中称为正交主轴齿板. 这种齿板可用于不是沿一个主轴受力的节点, 如桁架腹杆与弦杆斜交时的连接.

本文对正交主轴齿板在荷载平行于木纹方向时的节点承载能力进行了大量试验, 在此试验基础上, 采用可靠度方法对试验数据进行概率统计分析, 确定其概率分布模型, 按照 GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》^[2] 确定了板齿极限承载力标准值及齿抗滑移承载力标准值; 并利用最小二乘原理, 采用 Foschi 公式^[3] 拟合了该齿板连接节点的受力—变形特征曲线.

收稿日期: 2008-09-12

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ04A02); 国际科技合作计划资助项目(2008DFA71990)

作者简介: 何敏娟(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢结构和木结构. E-mail: hemj@tongji.edu.cn

1 研究对象

1.1 试验材料

试验中所用的材料有木材规格材和钢齿板2种。

因为我国目前建造的轻型木结构中所用的规格材大多为二级北美云杉(SPF 2#),按我国规范其材料等级为Ⅲ_c,为此试件所用规格材也采用此等级。试件规格材截面尺寸为38 mm×89 mm,长度为310 mm。试验用规格材的平均质量密度为0.517 kg·m⁻³,平均含水率为17.3%。

试验中所用的钢齿板是中国苏州皇家整体住宅系统有限公司生产的正交主轴齿板,齿板采用镀锌薄钢板制成,钢板基本厚度为1 mm,每平方米有1.24个齿,齿长8.4 mm,齿宽3.2 mm(图1)。齿板所用钢材为Q235钢,其弹性模量 $E = 205 \text{ GPa}$,屈服强度 $f_y = 235 \text{ MPa}$ 。

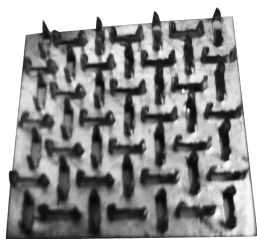


图1 正交主轴齿板

Fig.1 Metal plate without main axis

1.2 试件介绍

测试齿板的齿极限承载力及齿抗滑移承载力时,齿板应在保证齿破坏的情况下有足够长度。在正式试验前,进行一些准备试验,以确定达到特定破坏模式时的齿板尺寸为75 mm×75 mm(长×宽)。试件要求齿板在端距 $a = 12 \text{ mm}$ 范围内去齿^[4]。图2a为正交主轴齿板连接节点试件的示意图。

为了得到比较可靠的试验数据,运用下式估算试验所需的最少试件数量^[5]:

$$n_{\min} = \nu^2 t^2 / p^2 \quad (1)$$

式中: n_{\min} 为最少试件数量; ν 为变异系数; p 为准确指数; t 为结果可靠性指标。取 $\nu = 15\%$, $p = 5\%$, $t = 1.96$ ^[5]代入式(1),计算得试验最少需要35件试件。考虑到试验可能出现意外的破坏,将试件数量取为40件。

1.3 试验仪器及加载方法

试验所用加载机器是WA-200型的微机控制电

液伺服万能试验机。该试验机具备拉伸和压缩的功能,最大测试负荷为200 kN;与该试验机配套的是YYU-5050型应变片式电子引伸计,可测量的最大变形为25 mm。

本万能试验机加载方式为拉伸,用引伸计测量变形。试验控制方式为位移控制^[6],加载速度为1.0~1.5 mm·min⁻¹,试验过程中试验机自动加载,当试件破坏或者加载力下降到最大试验力的50%时停止试验。图2b为该试验的加载形式。

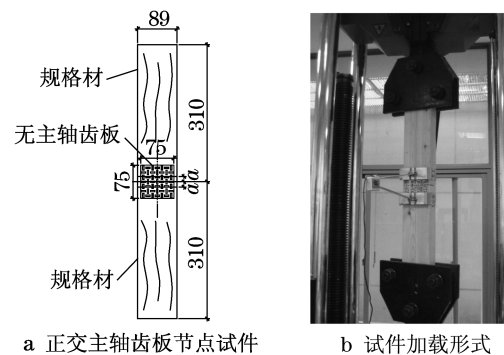


图2 正交主轴齿板节点试件及其加载形式(单位:mm)

Fig.2 Test specimen of metal plate without main axis connected joint and its set-up(unit:mm)

2 试验分析

2.1 试验过程

2.1.1 试验破坏过程

齿板连接节点加载到最后按试验计划发生板齿屈服,齿从木材中拔出,如图3a所示。其破坏过程结合荷载—变形关系可分析如下:

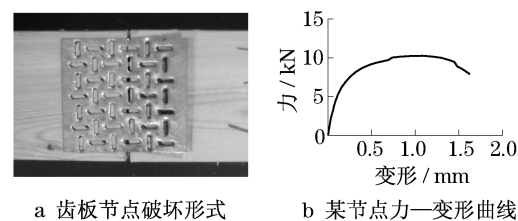


图3 节点破坏形式及力—变形曲线

Fig.3 Failure mode and load-deformation curve of some metal plate without main axis connected joint

从图3b的节点力—变形曲线可以看到,刚加载时节点刚度相对较大,拉力—变形的关系几乎成斜直线,变形量和承载力成比例增加,这一阶段的试验表明齿板和规格材都没有明显的破坏;随着曲线继续上升,斜率发生了变化,变形增量和承载力的增量

不再成比例,变形增量增加较快而承载力增量增加较慢,节点刚度显著下降;承载力在达到峰值点后开始降低,而节点区的变形继续增加,节点延性较好,变形较大后才出现明显的破坏现象,垂直压入木材的齿先在木材中沿拉力方向倾斜、滑移,最后逐渐从木材中脱离出来。

2.1.2 试验曲线拟合

在对木桁架进行非线性有限元分析时,往往将齿板连接节点进行简化模拟,引入节点的荷载一位移曲线进行分析.由于钢齿板几何形状的复杂性和木材材料性能的变异性,试验曲线的离散程度较大,须将试验曲线进行合理拟合得出齿板节点的力—变形特征曲线。

对试验曲线的拟合,有很多方法,应用较多的有 Foschi 拟合^[3,7]、多项式拟合及平均值拟合等.取所有试件发生相等变形时所受拉力的平均值作为曲线上点的纵坐标,对应的变形为横坐标,将得到的点连成线即为平均值拟合曲线,该方法得到的是一系列的点,要得到曲线的数学表达式还需要进一步拟合;而多项式拟合是运用最小二乘原理计算得出多项式的系数,进而得出节点力关于变形的函数关系式;该方法虽然能得到较好的拟合精度,但存在系数物理意义不明确的缺点,实际应用不方便.本文主要采用 Foschi 拟合,该方法多用于木结构连接节点的荷载一位移曲线拟合。

1977年,Foschi首次提出了具有3个参数的方程来拟合木结构节点力与变形的非线性关系,简称 Foschi 公式

$$F(\Delta) = (m_0 + m_1 \Delta)[1 - \exp(-k\Delta/m_0)] \quad (2)$$

式中: $F(\Delta)$ 为节点拉力,kN; Δ 为节点相对变形,mm; k 为初始刚度,即拟合曲线在原点处切线的斜率; m_1 为大滑移刚度,即节点发生较大滑移变形时拟合曲线的切线斜率; m_0 为曲线上斜率为 m_1 的切线截距.可以从图4直观地看出各个参数的物理意义。

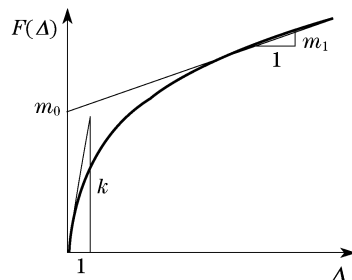


图4 Foschi 曲线各参数含义
Fig.4 Parameters in Foschi curve

根据最小二乘原理,利用 Matlab 软件拟合得出式(2)中的各项系数: $k = 83.61$, $m_1 = 0.24$, $m_0 = 10.69$.将试验测得的数据 (Δ_i, f_i) ($i = 1, \dots, n_0$)和根据 Foschi 公式拟合得到数据 (Δ_i, F_i) 代入下式:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_0} \left((F_i - f_i) - \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} (F_i - f_i) \right)^2}{n_0 - 1}} \quad (3)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} \left(F_i - \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} F_i \right) \left(f_i - \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} f_i \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_0} \left(F_i - \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} F_i \right)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n_0} \left(f_i - \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} f_i \right)^2}} \quad (4)$$

式中: Δ_i 为试验测得第*i*组数据的相对变形值; f_i 为 Δ_i 对应的试验力; F_i 为拟合曲线上与 Δ_i 对应的节点力; n_0 为测试数据的总数; σ_{Δ} 为拟合数据与试验数据的剩余标准差; R 为相关系数.计算出拟合曲线与试验曲线的剩余标准差 $\sigma_{\Delta} = 1.15$,相关系数 $R = 0.875$.相关系数大于0.85,说明 Foschi 拟合曲线满足 GB/T 50329—2002《木结构试验标准》^[8]中对试验数据回归分析的要求,拟合效果较好。

通过 Foschi 拟合得出试验所用齿板连接节点的初始刚度为 $83.61 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$,板齿与规格材发生较大滑移后的节点刚度为 $0.24 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$.可见,发生大滑移后的节点刚度大大减小,几乎为零,此时节点虽然尚未达到其承载能力极限状态,但是由于变形过大,刚度过小,已不能正常使用.图5为各试验曲线和拟合曲线图。

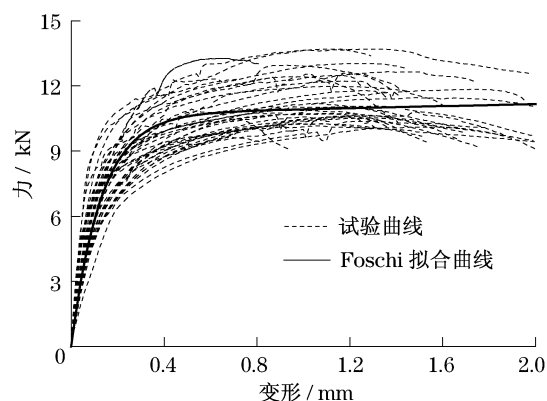


图5 节点力—变形曲线
Fig.5 Load-deformation curves

2.2 试验数据分析

从试验曲线可以得到最大荷载值,此谓板齿极限荷载;按规范^[1]节点变形为0.8 mm时所受的拉力

值为齿抗滑移荷载. 试验时, 有几根试件由于安装过程中没有完全对中, 致使节点偏心受力, 出现了意料外的破坏形式. 这是由于操作失误引起, 而非节点承载力问题. 为此剔除这几根试件的测试数据, 余下共有 36 根试件满足本试验要求, 以此作为试验分析的基本数据.

2.2.1 数据可靠性分析

将试验得到的试件极限荷载和齿抗滑移荷载分别除以对应齿板表面净面积 A_e ^[1], 即可得到齿极限承载力试验值和齿抗滑移承载力试验值. 本文对试验得到的承载能力数据进行统计分析^[5], 结果见表 1.

表 1 齿极限承载力和齿抗滑移承载力试验数据统计分析

Tab.1 Statistical analysis of experimental data for teeth ultimate bearing capacity and ultimate lateral slip capacity

测试项目	数据个数 n	平均值 μ_x	标准差 σ_x	标准误差 S_t	变异系数 $\nu/\%$	准确指数 $p/\%$
齿极限承载力	36	2.98	0.29	0.05	9.73	3.36
齿抗滑移承载力	34	2.87	0.30	0.05	10.45	3.48

表 1 给出了节点试验数据的各项统计参数. 在试验过程中有 2 根试件的变形未达到 0.8 mm 就发生了破坏, 所以试验测得的齿抗滑移承载力数据只有 34 个. 从表 1 可以看出, 2 组数据的准确指数均小于 5%, 数据离散程度在允许的范围^[5]内, 表明试验数据比较可靠. 在确定试件最少个数时, 假定变异系数为 15%, 准确指数为 5%, 实际得出的离散程度低于假定值, 所以所取试件个数足够.

2.2.2 试验数据的概率分布检验

本文采用 Kolmogorov-Smirnov 检验 (简称 K-S 检验法, 又称分布优度拟合检验法) 对试验数据的概率分布进行检验^[9]. 其具体步骤是: 将得到的试验数

据 x_1, x_2, \dots, x_n 由小到大排列, 并以频率反映概率, 得到 x_i 的经验分布函数 $F_n(x)$. 计算出假设分布 $F_0(x)$ 与经验分布 $F_n(x)$ 之间的偏差 $D_n = |F_0(x_i) - F_n(x_i)|$, 将其最大值作为 K-S 检验系数 $D_{n,0}$; 检验的显著性水平统一取 0.05, 查 K-S 分布临界值表得 K-S 检验临界值 $D_{n,\alpha}$. 如果 $D_{n,0} < D_{n,\alpha}$, 表明拟合得比较好, 所假设的分布类型通过检验.

本齿板连接节点的齿极限承载力频数直方图如图 6 所示, 可以直观地看出其总体的密度函数与正态分布或对数正态分布密度函数曲线相似. 假设测得的 36 个齿极限承载力试验值数据服从正态分布或对数正态分布, 进行 K-S 检验, 检验结果见表 2.

表 2 齿极限承载力概率分布 K-S 检验

Tab.2 K-S test on probabilistic distribution of teeth ultimate bearing capacity

概率分布类型	参数估计	K-S 检验系数 $D_{n,0}$	显著性水平 α	K-S 检验临界值 $D_{n,\alpha}$	检验结果
正态分布	$\mu_x = 2.980$ $\sigma_x = 0.294$	0.142	0.05	0.148	通过
对数正态	$\mu_{\ln x} = 0.472$ $\sigma_{\ln x} = 0.042$	0.128	0.05	0.148	通过

注: μ_x 和 σ_x 分别为齿极限承载力试验数据 x 的平均值和标准差; $\mu_{\ln x}$ 和 $\sigma_{\ln x}$ 分别为 $\ln x$ 的平均值和标准差.

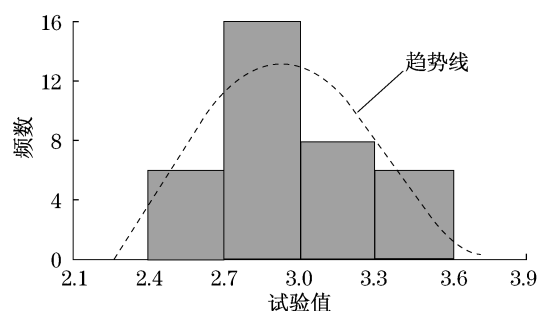


图 6 频数直方图

Fig.6 Experimental data frequency histogram

检验结果表明, 在相同的显著性水平 0.05^[2]下, 2 种分布类型都通过了检验. 运用似然比检验法确定

齿板连接节点齿极限承载力试验值的概率分布模型为对数正态分布, 其概率分布函数如下式:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln x}} \int \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln x}}{\sigma_{\ln x}}\right)^2\right] dx \quad (5)$$

式中: x 为齿极限承载力; 参数 $\mu_{\ln x}$ 和 $\sigma_{\ln x}$ 从表 2 中选用.

图 7 为试验数据的经验分布函数、正态分布和对数正态分布函数曲线. 可见, 正态分布和对数正态分布都能够很好地拟合试验数据的分布情况. 运用似然比检验法对两者进行检验发现, 对数正态分布的拟合效果更佳, 所以认为齿极限承载力服从对数正态分布.

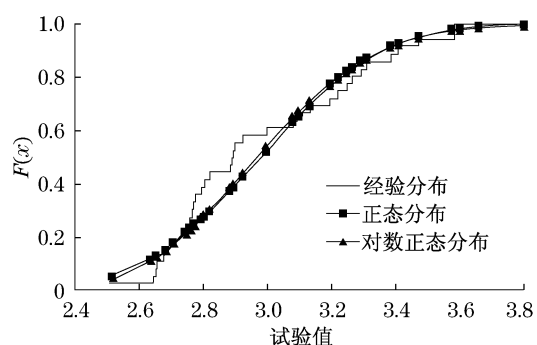


图7 概率分布函数拟合

Fig.7 Curve fitting of probabilistic distribution functions

采用同样的方法检验齿抗滑移承载力的概率分布,确定其概率分布模型为对数正态分布.分布函数同式(5),其中参数 $\mu_{\ln x} = 0.456$, $\sigma_{\ln x} = 0.044$.

2.2.3 承载力标准值的确定

以上计算表明,齿极限承载力和齿抗滑移承载力试验数据的概率分布模型均为对数正态分布,取其概率分布的0.05分位值作为强度标准值^[2],得正交主轴齿板承载力标准值的计算公式为

$$f_k = \mu_x e^{-1.645\sigma} \quad (6)$$

由表1可得齿板连接节点的齿极限承载力和齿抗滑移承载力的平均值 μ_x 和变异系数 σ ,将其代入式(6)计算得正交主轴齿板的齿极限承载力和齿抗滑移承载力标准值分别为2.54 MPa和2.42 MPa.

3 结论

齿板连接节点的试验曲线采用Foschi曲线拟合方式能较好地描述节点的力—变形关系,公式简便、精度较高.

齿板连接节点变异性相对较低,变异系数在10%左右,准确指数小于5%.普遍认为木材材料性能的离散性较大,其各项参数的变异性较大.而对于金属齿板连接节点,根据要求节点处应选择性能较好的木材,如材质均匀、无木节等;施工要求较高,齿板需全部压入木材、齿板与木材间无空隙;齿板所用钢材的匀质性好.为此,齿板节点的承载力性能相对稳定.

齿板连接节点的齿极限承载力和抗滑移承载力试验值的概率分布满足对数正态分布规律,取其概率分布的0.05分位值得到该齿板的齿极限承载力和齿抗滑移承载能力标准值分别为2.54 MPa和2.42 MPa.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国建设部. GB 50005—2003 木结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
Ministry of Construction of People's Republic of China. GB 50005—2003 Code for design of timber structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [2] 中华人民共和国建设部. GB 50068—2001 建筑结构可靠性设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
Ministry of Construction of People's Republic of China. GB50068—2001 Unified standard for reliability design of building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [3] Foschi R O. Analysis of wood diaphragms and trusses [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1977, 4(3):353.
- [4] Canada Standards Association. S347 - 99 Method of test for evaluation of truss plates used in lumber joints[S]. Rexdale: CSA, 1999.
- [5] 中国国家技术监督局. GB 1927—1943—91 木材物理力学性质试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
Chinese State Bureau of Technical Supervision. GB 1927—1943—91 Testing methods for physical and mechanical properties of wood[S]. Beijing: China Standard Press, 1991.
- [6] 何敏娟, 孙永良. 齿板连接节点试验及承载能力分析[J]. 特种结构, 2008, 25(1):1.
HE Minjuan, SUN Yongliang. Test and load-bearing capacity of metal plate connected joint [J]. Special Structures, 2008, 25 (1):1.
- [7] Riley G J, Gebremedhin K G. Axial and rotational stiffness model of metal-plate-connected wood truss joints[J]. Transactions of the ASAE, 1999, 42(3):761.
- [8] 中华人民共和国建设部. GB/T 50329—2002 木结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Ministry of Construction of People's Republic of China. GB/T 50329—2002 Standard for methods testing of timber structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [9] 同济大学概率统计教研组. 概率统计[M]. 上海: 同济大学出版社, 2000.
Probability Statistics Research Group of Tongji University. Probability statistics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002.