

“十一五”国家科技支撑计划专栏

木桁架齿板接合节点连接性能的影响因子

郭伟¹, 费本华², 赵荣军³, 周海宾³, 王晓欢¹, 顾亚丽⁴

(1. 国家林业局北京林业机械研究所, 北京 100029; 2. 国际竹藤网络中心, 北京 100102; 3. 中国林科院木材工业研究所; 国家林业局木材科学与技术重点实验室, 北京 100091; 4. 中国林科院国际合作处, 北京 100091)

摘要: 以38 mm×89 mm规格材为对象,研究齿板接合节点的连接性能,发现:AA构型承受拉伸载荷的能力最强;随着齿板长度、宽度的增加,齿板连接节点的拉伸载荷增大,并且,增加齿板宽度对增大载荷的效果更佳;齿板试件放置7~21天较为适宜进行力学测试;齿板连接节点的极限拉伸载荷和刚度,均随着木材-齿板间隙的增大而降低。

关键词: 齿板连接节点; 齿板连接节点构型; 齿板尺寸; 放置时间; 木材-齿板间隙; 极限拉伸载荷; 破坏类型
中图分类号: TS6 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654(2010)05-0001-04

Factors Affecting Metal-Plate Connected Wood Joint Tension Performance

GUO Wei¹, FEI Ben-hua², ZHAO Rong-jun³, ZHOU Hai-bin³, WANG Xiao-huan¹, GU Ya-li⁴

(1. Beijing Forestry Machinery Research Institute, State Forestry Administration, Beijing 100029, China; 2. International Bamboo and Rattan Network Center, Beijing 100102, China; 3. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry; Key Lab of Wood Science and Technology of State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 4. Division of International Cooperation, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Mechanical properties of metal plate connection(MPC) wood truss joint specimens with four different orientations(AA: parallel-grain/longitudinal-metal-plate, EA: perpendicular-grain/longitudinal-metal-plate, AE: parallel-grain/perpendicular-metal-plate and EE: perpendicular-grain/perpendicular-metal-plate) were evaluated. The results showed that for 38 mm×89 mm dimensional lumber: 1) AA connection specimens produced the best tension property; 2) the ultimate tension load increased as the metal plate width or length increased, but increasing the width was more effective; 3) the ultimate tension load and stiffness both decreased as the connection gap increased.

Key words: metal plate connected joint; MPC joint orientation; metal plate size; storage time; gap between wood and metal plate; ultimate tension load; failure mode

依据GB 50005-2003《木结构设计规范》,上海同济大学、南京林业大学主要针对美国进口SPF(Spruce-Pine-Fir)规格材的齿板连接性能进行了测试。中国林业科学研究院自2004年开始,对国产落叶松规格材的齿板连接性能进行测试研究,得到了多项

承载性能的数据,并发现:载荷平行于齿板主轴时,齿板的极限受拉承载力,高于载荷垂直齿板主轴时的极限受拉承载力;齿板的承载力和刚度随着齿板宽度的增加而增强,承载力随着齿板嵌入深度的减小而急速下降^[1-3]。结果为进一步研究齿板连接性能提供依据。

本研究着重分析齿板连接节点构型方式、齿板尺寸、节点制作后放置时间、木材-齿板间隙等因子,对齿板接合节点连接性能的影响,以期获得较佳的齿板连接节点研究对象和拉伸性能,为国产木结构建筑连接技术的发展提供依据。

收稿日期: 2010-07-19; 修改日期: 2010-08-03

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD18B07); 引进国际先进林业科学技术创新项目(948计划)(2006-4-C04)。

作者简介: 郭伟(1981—),女,国家林业局北京林业机械研究所博士研究生。

通讯作者: 费本华,男,国际竹藤网络中心研究员,博士生导师。

1 材料与方法

1.1 材料

1) 规格材: ① III c 等级兴安落叶松 (*Larix gmelinii*), 采自黑龙江省塔河, 含水率为 12%, 气干密度 0.65 g/cm^3 [4-6], 静态弹性模量 13.80 GPa [7]; ② V c 等级 SPF, 外购, 含水率 9.27%, 气干密度 0.43 g/cm^3 , 静态弹性模量 13.38 GPa 。两种规格材的横截面尺寸均为 $38 \text{ mm} \times 89 \text{ mm}$ 。

2) 齿板连接件: GN20 (一种常用进口齿板, 外购) 和美国 Alpine 公司的波形齿板, 两种齿板钢板的厚度为 $0.9 \sim 1.0 \text{ mm}$, 齿长均为 9.5 mm , 平均每 cm^2 有 1 个齿。

1.2 方法

1.2.1 试件制作

齿板连接节点的制作及测试参考, 美国 ANSI/TPI 1-1995《Design specifications for metal-plate-connected wood truss construction》、加拿大 CSA S 347-99《Method of test for evaluation of truss plates used in lumber joints》及 GB 50005-2003。考虑试验条件, 确定齿板连接节点试件由两块长度为 300 mm 的规格材, 经两片尺寸、摆放位置相同的齿板液压连接而成。

由于试验材料所限, 采用落叶松规格材和 GN20 齿板, 进行齿板连接节点构型、齿板尺寸的影响测试; SPF 规格材和 Alpine 波形齿板, 用于测试节点试件放置时间及木材-齿板间隙的影响。

1.2.2 参数设计

1) 齿板连接节点构型: 分 4 种, 即 AA (载荷平行木材纹理-平行齿板长度), EA (载荷平行木材纹理-垂直齿板长度), AE (载荷垂直木材纹理-平行齿板长度), EE (载荷垂直木材纹理-垂直齿板长度) [8-9]。EE 构型采用的齿板尺寸为 $75 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ (规格材宽度方向齿板的尺寸 $\times$ 规格材长度方向齿板的尺寸, 下同), 其他三个构型 (AA、EA、AE) 的齿板尺寸为 $75 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$, 试件重复数均为 10。

2) 齿板尺寸: 对 AA 和 EA 构型的齿板进行尺寸效应研究。AA 构型的齿板尺寸有 9 种: $40 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$, $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, $50 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$, $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, $50 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$, $50 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$, $75 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, $75 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ 和 $75 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$; EA 构型的齿板尺寸有 4 种: $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, $75 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, $75 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 和 $75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 。每种尺寸试件重复数为 3。

3) 齿板连接节点放置时间: 以 AA 构型齿板 ($75 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$) 为例, 参照 ANSI/TPI 1-1995 和 CSA S347-99, 及齿板连接节点的实际使用情况, 在节点制取后立刻 (0 天) 和放置 7、21、36 天, 分别测试其连接性能。每一测试单元节点重复数为 12。

4) 木材-齿板间隙: 选取 7 种间隙, 即 0、0.44、0.86、1.54、2.35、3.86 和 4.69 mm , 对 $75 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 、AA 构型齿板连接节点的拉伸性能进行测试。重复数为 4 次。

1.2.3 性能测试

参照 ANSI/TPI 1-1995 和 CSA S347-99 要求, 测试节点的拉伸性能。加载速度 1 mm/min , 采用固定在试件两侧的 2 个线性可变差分仪, 测量轴向加载节点的位移变化。轴向载荷由穿过齿板试件两端 2 根直径 20 mm 的钢棒, 传递给齿板试件, 钢棒穿过的孔洞中心距齿板试件端部 100 mm 。

载荷-位移曲线直线部分的斜率为初始刚度; 载荷-位移曲线上 0.38 mm 处的载荷值除以 0.38 mm , 即临界滑移刚度; 载荷-位移曲线上极限载荷 $1/3$ 处的斜率, 为设计载荷刚度。三种刚度均反应节点在不同受力过程中抵抗变形的能力。

2 结果与讨论

2.1 齿板连接节点构型的影响

由表 1 可见: 兴安落叶松规格材 EA、AE、EE 构型节点的极限拉伸强度, 较 AA 构型的分别降低 18.9%、34.2% 和 36.8%。从 AA 到 EA、AE 构型, 节点的临界滑移刚度和初始刚度均呈现递减的趋势。结果说明: AA 构型承受拉伸载荷的能力较强, 是研究齿板节点拉伸性能的理想构型。

表 1 4 种构型齿板连接节点的拉伸性能

Tab. 1 Tension properties of different MPC wood joints

齿板 构型	尺寸/ $\text{mm} \times \text{mm}$	极限拉伸载荷/ kN	初始刚度/ $(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	临界滑移刚度/ $(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$
AA	75×125	32.73	149.86	27.61
EA	75×125	26.55	142.38	22.79
AE	75×125	21.52	81.20	16.01
EE	75×100	20.68	104.08	15.90

各构型齿板节点极限抗拉性能的差异, 主要与板齿和木纤维间的相互作用有关。AA 构型的节点, 板齿与木材间的相互作用主要表现为板齿与被切断纤维束端面的相互挤压, 节点呈现出较强的拉伸性能。EA 构型的节点, 木材承受板齿所施加的横纹拉伸作

用,木纤维易被板齿撕裂。AE 构型的节点,一部分木纤维与板齿间是压缩作用,另一部分为横纹压缩和剪切的共同作用。EE 构型的节点,木纤维与板齿相互承受剪切作用力。综上所述,当板齿与木纤维之间压缩作用占主导时,节点具有较高的极限拉伸承载力;当板齿与木纤维之间以撕裂、剪切作用占主导时,节点的极限拉伸承载能力较低。

2.2 齿板尺寸的影响

1) AA 构型:表现齿板拔出、齿板断裂和木材破坏三种主要破坏类型,其极限拉伸载荷在 8.41~43.97 kN,随齿板尺寸的变化趋势如图 1 所示。

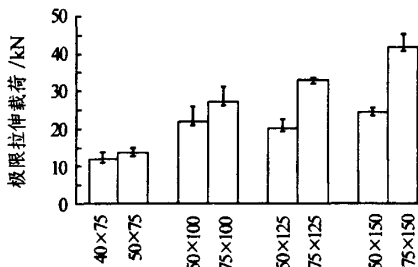


图 1 AA 构型齿板连接节点的极限拉伸载荷
Fig. 1 Ultimate tension stresses of specimens with AA connection

对宽度为 50 mm 的齿板,长度为 100 mm 时的极限拉伸载荷,较长度为 75、125 mm 的齿板略高,主要是因为长度为 100 mm 的齿板,在规格材对接处无齿槽,不易发生齿板断裂;而长度为 125 mm 的齿板,在规格材对接处有齿槽。对宽度为 75 mm 的齿板,随着长度从 100 mm 增至 150 mm,节点的拉伸载荷增强。当齿板长度一定时,齿板越宽,连接而成的试件的拉伸强度越高。当齿板宽度从 50 mm 增加到 75 mm,节点的极限拉伸载荷平均增加 53%;同样,齿板长度增加 25 mm 时,两种宽度节点的极限拉伸载荷平均增幅为 35.51%。可见,增加齿板宽度较增加长度,对提高节点承受拉伸载荷的能力更佳。

2) EA 构型:极限拉伸载荷在 7.40~25.40 kN,齿板拔出为主要破坏类型。

规格材宽度方向尺寸为 75 mm 的 EA 构型节点,其极限载荷随长度方向尺寸的变化,如图 2 所示。规格材长度方向尺寸为 50、75 mm 的齿板,其连接节点的极限拉伸载

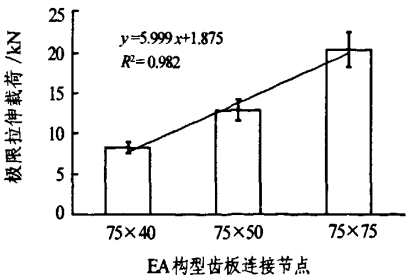


图 2 EA 构型齿板连接节点的极限拉伸载荷
Fig. 2 Ultimate tension stresses of specimens with EA connection

荷,分别比长度方向为 40 mm 齿板连接节点的增大 55.28% 和 143.76%。齿板尺寸同为 50 mm×50 mm 时,AA 构型节点的极限拉伸载荷为 8.48 kN,高于 EA 节点的极限拉伸载荷(7.58 kN)。EA 构型节点的极限拉伸载荷,随着齿板长度和宽度的增加而增大,与 AA 构型的变化趋势相同。

当齿板长度≤100 mm 时,节点主要破坏类型为齿板拔出;当长度>100 mm、宽度<75 mm 时,节点承载能力较低,多发生断裂破坏;当宽度>75 mm 时,破坏形式既有齿板断裂,又有木材破坏(主要是由于木纤维之间无法有效传递应力,导致纤维撕裂),此时齿板试件往往具有较高的极限拉伸载荷。

2.3 齿板连接节点放置时间的影响

从表 2 可知,随着齿板连接节点试件放置时间的延长,节点的极限载荷不断减小,且在放置 36 天时降到 18.73 kN。齿板连接节点的平移刚度值在放置 7 天时最高,说明此时节点具有较好的抵抗变形的能力;设计载荷刚度和临界滑移刚度,均为放置 36 天时最低。因此,从齿板连接节点极限拉伸载荷及刚度的角度考虑,齿板连接节点试件放置 7~21 天,较为适宜进行力学测试。

2.4 木材-齿板间隙的影响

木材与齿板的间隙越大,齿板嵌入木材的深度越小。与 0 mm 间隙比较,其他 6 种间隙条件下,节点

表 2 放置时间对齿板连接节点力学性能的影响

Tab. 2 Effects of laying time on performance of MPC joints

放置时间 / d	含水率 / %	极限载荷 / kN	位移 / mm	平移刚度 / (kN · mm ⁻¹)		破坏形式
				设计载荷刚度	临界滑移刚度	
0	10.84	24.70 (6.91)	1.80 (23.40)	55.67 (20.96)	38.08 (11.99)	齿板拔出
7	10.81	23.10 (13.32)	1.36 (35.81)	70.49 (38.81)	40.13 (13.68)	齿板拔出
21	7.42	23.13 (13.31)	1.48 (33.24)	61.26 (25.17)	38.09 (11.70)	齿板拔出
36	8.01	18.73 (18.57)	0.88 (19.31)	54.93 (23.37)	35.88 (17.58)	齿板拔出

注:括弧内为变异系数, %。

的极限拉伸载荷分别下降了 9.00%、21.52%、43.45%、67.04%、87.57%和 94.69%。单因素方差分析结果(表 3)表明,木材-齿板间隙对节点的极限拉伸载荷具有显著的影响;回归分析表明,节点的极限拉伸载荷与木材-齿板间隙之间,存在较紧密的二次多项式关系,决定系数 0.99,如图 3a。

表 3 木材-齿板间隙对节点极限拉伸强度影响的方差分析(0.05 水平)

Tab. 3 Analysis of variance of ultimate tension load with different gaps(0.05 level)

差异源	平方和	自由度	均方	F 值	p-value	F _{0.05}
组内	1 802.13	6	300.36	24.31	0.00	2.57
组间	259.51	21	12.36			
总计	2 061.64	27				

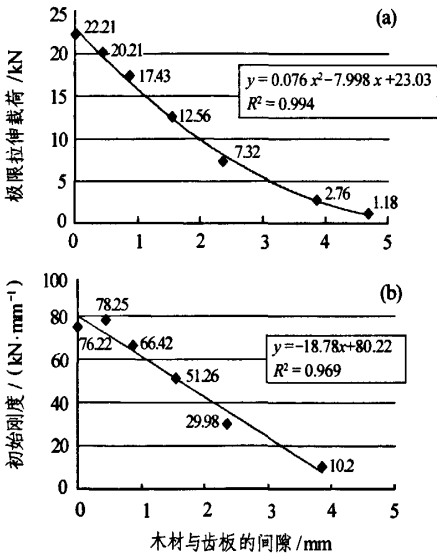


图 3 木材-齿板间隙对节点极限拉伸载荷和初始刚度的影响

Fig. 3 Effect of the connection gap on ultimate tension load and initial stiffness

采用 Groom 确定初始刚度的方法(即载荷为 3~5 kN 范围内的载荷-位移曲线的斜率),计算齿板连接节点的初始刚度^[10]。经过回归分析发现,齿板连接节点的初始刚度与木材-齿板间隙之间存在较明显的线性相关性,决定系数为 0.96(图 3b)。

由于 4.69 mm 间隙较大,导致测试时节点很快破坏,极限拉伸载荷极低,无分析意义。0 mm 间隙节点的初始刚度为 75.22 kN/mm,0.44~3.86 mm 间隙各节点的初始刚度,较 0 mm 间隙的初始刚度分别下降了 86.45%、60.14%、31.85%、11.81%和

—4.03%。初始刚度的降幅略低于极限拉伸载荷。节点受轴向拉伸载荷作用后,均发生齿板拔出破坏。

3 结论

1) 对横截面为 38 mm×89 mm 的规格材,AA 构型与 EA 构型齿板连接节点的极限拉伸载荷,均随着齿板长度和宽度的增加而增大;相同的尺寸时,AA 构型齿板连接节点承受拉伸载荷的能力最强。

2) 增加齿板宽度较增加齿板长度,对提高节点承受拉伸载荷的能力更佳。对 38 mm×89 mm 的规格材,75 mm×100 mm 和 75 mm×125 mm 的齿板,比较适合研究节点拉伸性能。

3) 齿板连接节点试件放置 7~21 天内,力学性能较为稳定,适宜进行力学测试。

4) 齿板连接节点的极限拉伸载荷和刚度,均随着木材-齿板间隙的增大而降低,其中极限拉伸载荷呈二次多项式下降趋势,刚度呈线性下降趋势。

5) 齿板拔出、齿板断裂和木材破坏,是齿板连接节点常见的三种破坏类型。

参考文献:

[1] 席佳,赵荣军,费本华,等.兴安落叶松规格材齿板连接节点的拉伸性能[J].木材工业,2009,23(5):1-4.
[2] 叶虹,谢宝元,赵荣军,等.齿板尺寸对齿板节点拉伸性能的影响[C].全国木材标准化技术委员会第三次年会暨第三次木材标准研讨会论文集:2009,187-193.
[3] 郭伟,费本华,赵荣军,等.木桁架齿板连接性能及影响因子研究[J].木材工业,2008,22(6):24-27.
[4] Gupta Rakesh, Gebremedhin G Kifle. Destructive testing of metal-plate-connected wood truss joints [J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 116(7):1971-1982.
[5] McCarthy M, Little J K. Sensitivity of truss plate model parameters to parameter determination methods [J]. Forest Products Journal, 1988, 38(5): 63-67.
[6] Groom L, Polensek A. Nonlinear modeling of truss-plate joints [J]. Journal Structural Engineering, 1992, 118(9):2514-2531.
[7] Gupta R, Vatovec M. Evaluation of Dahurian Larch in mechanical connections [J]. Forest Products Journal, 1996, 46 (9):89-93.
[8] ANSI/TPI 1-1995, Design specifications for metal-plate-connected wood truss construction [S].
[9] CSA S347-99, Method of test for evaluation of truss plates used in lumber joints [S].
[10] Groom L. Effect of adhesive applied to the tooth-wood interface on metal-plate-connections loaded in tension[J]. Forest Products Journal, 1991, 41(4):33-35.

(责任编辑 向 琴)