

编者按: 中国林科院木材工业研究所承担的“十二五”国家科技支撑计划“木质复合材料制造关键技术研究规范”课题“结构用木质复合材料构件制造技术研究”任务, 开展了轻型木结构木质复合材料制造技术、性能评价技术及安全设计技术等研究, 目前在国产规格材的强度设计指标、国产木桁架和结构用木质保温板的工艺优化等领域获多项成果。

本刊自2017年第1期起, 系列报道此项研究的成果, 为我国木质复合材料的应用研究提供参考, 为木质复合材料构件在轻型木结构建筑中的应用提供技术支撑。

轻型木桁架受力性能的有限元模拟

武国芳, 王滋, 王丽, 赵荣军, 任海青

(中国林科院木材工业研究所; 中国林科院林业新技术研究所, 北京 100091)

摘要: 轻型木桁架是轻型木结构中重要的承重构件, 为了研究其受力性能, 考虑齿板连接的构造特点及非线性特性, 建立了轻型木桁架的有限元模型。通过与其受力性能的试验结果对比, 验证了模型的准确性; 对不同荷载模式、不同高度、不同构造形式的轻型木桁架的分析表明, 轻型木桁架有限元模型的模拟方法操作简便、精度较好, 有助于轻型木桁架受力性能的模拟研究, 并推动轻型木桁架的国产化。

关键词: 轻型木结构; 轻型木桁架; 有限元; 齿板连接; 受力性能

中图分类号: TU531.1; TS6 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2017) 05-0005-04

Structural Behavior Evaluation of Light Wood Trusses by Finite Element Method Analysis

WU Guo-fang, WANG Zi, WANG Li, ZHAO Rong-jun, REN Hai-qing

(Research Institute of Wood Industry, Research Institute of Forestry New Technology, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Light wood trusses are important structural components in light wood frame construction. Formation and nonlinear behavior of truss plate joints were taken into consideration to develop a finite element (FE) model for the light wood trusses. The FE model was validated by comparing predicted results with testing results and then used to predict structural behavior of light wood frame trusses with other configurations such as load patterns, truss heights and truss formations. The FE model was easy to learn and showed good accuracy. The FE modeling method could contribute to further investigation of structural behavior of light wood trusses.

Key words: light wood frame construction; light wood trusses; finite element method; truss plate joint; structural behavior

收稿日期: 2017-05-15; 修改日期: 2017-08-15

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划课题“结构用木质复合材料构件制造技术研究”(2015BAD14B0502)。

作者简介: 武国芳(1986—), 男, 中国林科院木材工业研究所助理研究员。

轻型木桁架也称为齿板桁架, 是以规格材作为杆件, 在节点处通过齿板将各杆件连接而成, 用于轻型木结构中。轻型木桁架不仅承担并传递竖向荷载, 同时也是楼、屋盖的骨架构件, 与覆面板共同

作用抵抗侧向荷载,是重要的承重构件。

已有研究表明,轻型木桁架的受力性能取决于齿板连接的性能^[1],相比钢桁架等其他桁架,齿板连接的承载力较低,桁架的破坏往往发生在连接节点处;另外齿板连接处滑移对桁架的变形也有较大影响。“弱节点、强构件”是轻型木桁架的重要特点。

轻型木桁架足尺试验的成本较高,相关报道亦较少^[2-4]。采用有限单元法对轻型木桁架的受力性能进行分析,是一种可行、有效且经济的方法。但齿板连接的受力性能与木纹方向、齿板方向以及荷载作用方向等诸多因素相关,故对齿板连接的处理是轻型木桁架模拟的难点。目前轻型木桁架及齿板连接的模拟方法分为3类。

① 杆系模型^[5],将木构件简化为杆单元或梁单元,用弹簧单元、连接单元或引入虚拟杆件的方法模拟齿板连接的性能;② 二维模型^[6],将齿板面板和木构件用平面单元模拟,将各齿连接用弹簧或其他方法模拟;③ 三维模型^[7],建立木构件及齿板的三维有限元模型,引入材料的弹塑性以及各向异性对齿板连接进行模拟。上述方法繁易程度不同,准确度也有较大差异。其中第一类杆系模型最为简单,易被工程设计人员接受,但模拟齿板连接的弹簧单元的性能参数取值,一般通过与桁架齿板连接节点构造一致的节点试验来确定,较为复杂。

鉴于此,笔者对国产轻型木桁架的受力性能进行试验研究,提出了一种受力性能模拟方法,并应用该方法分析、预测了国产轻型木桁架的受力性能,旨为轻型木桁架受力性能模拟研究提供新思路。

1 模型建立

1.1 桁架试验

采用日本落叶松 (*Larix kaempferi*) 人工林规格材 (6 000 mm × 89 mm × 38 mm) 制作了3榀平行弦桁架^[8],如图1所示。

桁架长度为4 886 mm,高度为489 mm。其中上下弦杆的轴线距离为451 mm。桁架共包含12个节间,每个节间的宽度为404 mm,斜腹杆与弦杆的角度为48°,杆件之间采用齿板连接。

试验时支座设置在下弦端节点处,一端为固定铰支座,另一端为滑动铰支座,跨距为4 848 mm。

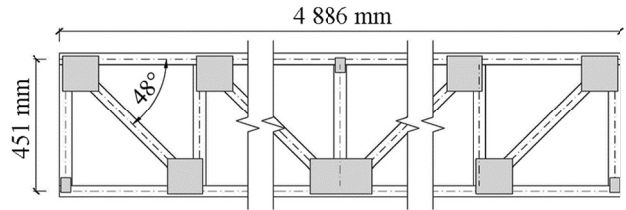


图1 试验桁架示意图

Fig.1 Sketch of light wood truss for testing

在桁架上弦杆的2个三分点处施加竖向荷载。采用分级加载制度,每级荷载大小为设计荷载(9.88 kN)的1/6,施加间隔为5 min,直至桁架破坏。

通过试验发现,桁架的主要破坏模式为斜腹杆与桁架上下弦杆连接处的齿板连接破坏,表现为斜腹杆端部齿板的齿完全被拔出,如图2所示。

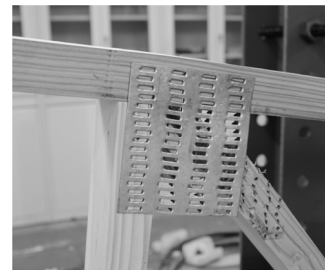


图2 试验桁架破坏形式

Fig.2 Failure mode of light wood trusses

1.2 有限元模型建立

1.2.1 单元选择及边界条件

采用通用有限元软件ABAQUS建立桁架的有限元模型。

轻型木桁架的上下弦杆是连续杆件,可传递弯矩和剪力,实际工作时,一般处于拉弯或压弯状态,故采用2节点梁单元B21对弦杆进行模拟;斜腹杆和竖腹杆可视为二力杆,故采用2节点桁架单元T2D2模拟;各个杆件的截面尺寸,即取实际杆件截面尺寸,弹性模量取实测的平均值12.27 GPa。

下承式平行弦桁架竖腹杆为受压杆,采用铰接模拟其与弦杆的连接;斜腹杆为受拉杆,引入2节点连接单元CONN2D2模拟腹杆与弦杆间齿板连接的非线性连接性能。

综上,分别采用梁单元和桁架单元,沿杆件轴线对各杆件建模,并采用相应的连接形式将各杆件连接在一起,约束模型中左下角节点的水平和竖向位移,以及右下角节点的竖向位移。在上弦三分之一跨度处的节点施加竖向荷载,如图3所示。

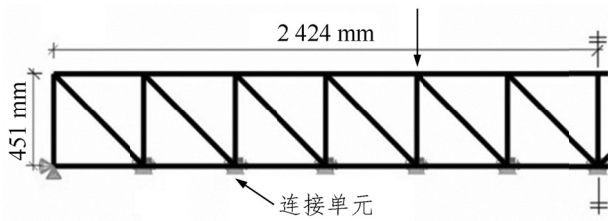


图3 平行弦桁架有限元模型

Fig.3 FE model of parallel chord light wood trusses

采用 ABAQUS/EXPLICIT 求解器求解，利用其后处理器提取桁架相关节点的位移、被约束节点的反力等，绘制相关曲线或图形。

1.2.2 齿板连接参数取值

在轻型木桁架中，齿板连接的形式各异，给桁架模拟带来了困难。已有研究表明：基于单齿极限承载性能对轻型木桁架进行模拟是可行的^[10-11]；另外，齿板连接的初始刚度与纹理方向、齿板方向以及荷载方向的关系较小，而承载力与上述三者的关系较大^[11]。因此，笔者在模拟轻型木桁架中齿板连接的性能时，做如下假设：

- 1) 忽略齿板连接在各个方向的刚度差异。
- 2) 齿板连接的承载力与齿板方向、纹理方向等相关。

3) 齿板连接的承载力与有效齿连接数正相关。

笔者课题组对齿板和日本落叶松齿板连接的齿极限承载力进行试验^[12]，得到了与文献^[11]相同的规律。其中 AA（荷载平行于木纹、平行于齿板主轴方向）和 AE（荷载平行于木纹、垂直于齿板主轴方向）工况的极限承载力平均值分别为：28.73、20.87 kN。

本试验桁架斜腹杆与弦杆的齿板连接工况介于 AA 和 AE 组之间，由于实测曲线具有一定的离散性，采用多项式函数（1）进行拟合。

$$f = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (1)$$

式中： f —荷载，kN； x —位移，mm； a_0 ~ a_3 —待拟合参数。

拟合采用了 AA 和 AE 组各 5 条实测曲线，共 64 732 个数据点，得到一条代表荷载平行于木纹方向的齿板性能曲线，如图 4 所示。

实际输入连接单元时，初期的连接性能按拟合曲线取值，而齿板的极限荷载，首先按照 Hankinson 公式^[9]进行推算，之后再根据齿板连接处有效齿的数量进行调整。

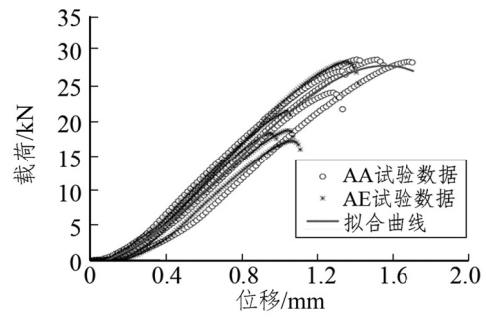


图4 齿板连接试验结果及拟合曲线

Fig.4 Testing and fitted curves of truss plate joints

对于试验桁架，荷载与齿板方向呈角 α 时的齿板极限承载力 f_α 按公式（2）计算：

$$f_\alpha = \frac{f_0 f_{90}}{f_0 \sin^2 \alpha + f_{90} \cos^2 \alpha} \quad (2)$$

式中： f_0 和 f_{90} —荷载平行和垂直于齿板方向的齿板承载力，即分别对应 AA 和 AE 工况下的极限承载力，kN。

根据荷载方向与齿板方向的夹角（48°），按式（2）计算得到齿板极限承载力为 23.78 kN。齿板连接试验时有效齿连接数量为 44 个，而桁架试验中有效齿连接数量为 33~37 个，按最少数量取值，将上述承载力乘以 33/44 后，得到齿板连接的极限承载力为 17.84 kN。

2 模拟结果

2.1 模型验证

对前述桁架的有限元模型，进行受力性能预测。通过分析得到荷载与跨中位移的关系，将其与实测曲线同时绘制于图 5 中。

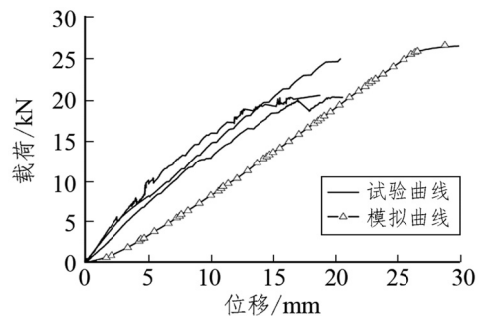


图5 有限元模拟曲线与试验结果对比

Fig.5 Predicted curve from FE modeling vs. testing results

由图 5 可见，模拟曲线与实测曲线趋势基本一致，加载初期均是线性增长，试验桁架达到极限荷载后迅速失去承载力，而桁架模型在达到极限荷载

后, 位移迅速增大, 这是由于连接单元无下降段造成的, 曲线出现拐点时桁架已经破坏, 以此时的荷载为模型的极限荷载。

由图 4 可知, 齿板连接在接近破坏时, 刚度有下降的趋势, 图 5 实测曲线末端亦如此, 故在相同荷载作用下, 试验位移与模拟位移的差异有减小趋势。计算结果显示, 桁架在加载初期的位移较大, 原因是齿板连接初始缝隙逐渐被挤紧, 变形较大, 输入模型的齿板连接性能曲线中考虑了这部分初始变形; 而试验桁架在预加载过程中, 齿板连接的初始缝隙已被挤紧, 故桁架初始位移小于模型预测值。

模拟得到的桁架的极限承载力为 25.98 kN, 3 榀试验桁架的实测平均值为 22.45 kN, 二者的误差为 15.7%, 而与其中承载力较大一榀的误差为 4.0%。

取荷载 10~18 kN 段的斜率表征桁架刚度, 模拟得到的刚度为 1.10 kN/m, 而实测试验得到的平均刚度为 1.19 kN/m, 误差为 7.8%。表明有限元模型能较好地预测桁架的力学行为。

由于桁架左右对称, 以左半部分桁架达到极限承载力时的变形模式 (图 6, 位移放大系数为 5) 为例, 可以看到桁架斜腹杆连接处的局部变形。另外, 通过读取各个杆件的轴向应力, 可以发现, 桁架上下弦杆的应力最大, 达到 17.6 MPa, 但尚未达到破坏强度, 故桁架的破坏是由齿板连接的受力性能决定的, 与试验观察结果一致。

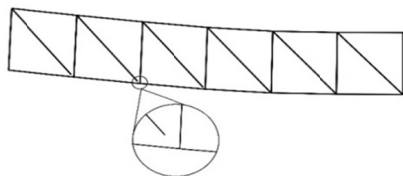


图 6 桁架的变形 (左半部分)

Fig.6 Deformation pattern on left half of light wood trusses

2.2 参数分析

采用与 2.1 节相同的方法对轻型木桁架进行参数分析。将试验桁架的荷载变为均布荷载, 发现桁架承受的总竖向荷载为 29.17 kN, 较集中荷载有所增加, 这是由于轻型木桁架的承载力, 一般是由桁架受拉斜腹杆与弦杆的齿板连接的承载力决定的, 均布荷载下, 桁架中的剪力低于集中荷载加载。

调整轻型木桁架的高度, 分别建立了弦杆轴线间距为 600、451 和 300 mm 的 3 种轻型木桁架模型,

齿板的规格不变, 齿板连接性能按角度和有效齿板数进行调整。

桁架高度为 600 mm 时, 斜腹杆角度为 57°, 有效齿数为 37 个; 桁架高度为 300 mm 时, 斜腹杆角度为 36°, 有效齿数为 29 个。通过计算得到了 3 种桁架的荷载-位移曲线 (图 7), 可以发现, 随着桁架高度的增加, 桁架的承载力和刚度均会增加。

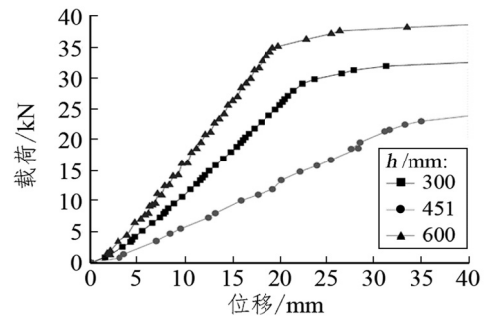


图 7 不同高度平行弦桁架的荷载-位移曲线

Fig.7 Load-disp. curves of parallel chord light wood trusses at different heights

采用 2.1 节方法, 建立了一种桁架高度为 451 mm 的人字形腹杆木桁架的有限元模型, 如图 8 所示。

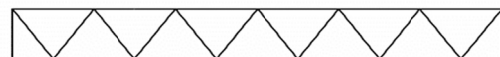


图 8 人字形腹杆平行弦桁架

Fig.8 Parallel chord light wood trusses with warren-style webs

通过分析发现, 其承载力为 31.7 kN, 比试验桁架稍高, 且刚度亦有明显提高。其原因是该桁架部分斜腹杆为受压杆, 此时部分节间的剪力可通过压杆传递, 减少了桁架的剪切变形。

3 结论

1) 基于齿板连接标准试验结果及齿板连接构造, 建立齿板桁架杆系有限元模型的方法是可行的, 不仅操作简便, 而且精度良好。

2) 平行弦轻型木桁架的承载性能与桁架杆件布置情况、节点构造及荷载形式均有关: 相同构造时, 均布荷载作用下桁架的承载力高于集中荷载作用; 随着桁架高度的增加, 桁架的承载力和刚度均增加; 人字形腹杆桁架的承载力和刚度, 均高于斜腹杆对称布置的桁架。

(下转第26页)

由表4可知,与欧洲相比,我国OSB生产过程对环境的酸化效应(AP)、富营养化(EP)和光化学臭氧创造潜力(POCP)的数值偏高,而全球气候变暖(GWP100)、臭氧层损耗(ODP)值较低。原因在于我国企业能源结构中煤电消耗比重大;但产品的密度高,抵扣之后,GWP100仍达-717.64 kg CO₂, ODP也低于欧洲OSB企业。

3 结语

1) 能耗:在原木采伐和运输阶段中,欧洲OSB企业因原料远洋运输问题,消耗不可再生能源更高;生产制备阶段,欧洲企业使用更多清洁能源,消耗的不可再生能源资源更少。

2) 固碳:在原木生长阶段,欧洲OSB生产原材料吸收了更多的CO₂;在原木采伐及运输阶段,中国OSB排放的CO₂更少;在生产阶段,中欧OSB的CO₂排放值非常接近。OSB生命周期内,中国和欧洲OSB企业生产1 m³组合等级OSB,CO₂固碳量分别为794和679 kg。

3) 环境影响特征值:中国OSB生产的酸化效应、富营养化、光化学烟雾指标,相对于欧洲OSB偏高,但全球气候变暖和臭氧层损耗的影响值较低。

参考文献:

[1] Kline D E. Gate-to-gate life cycle inventory of oriented strand board production[J]. Wood and Fiber Science, 2005, 37(12): 74-84.

[2] 李慧媛,黄思维,周定国. 生命周期评价体系在我国木材加工领域的应用[J]. 世界林业研究, 2013, 26(2): 54-59.

[3] 张方文,陈水龙,张海孝,等. 定向刨花板生产过程的生命周期评价[J]. 木材工业, 2017, 31(3): 31-34.

[4] Richter K, Gugerli H. Wood and wood products in comparative life cycle assessment[J]. Holz als Roh-und Werkstoff, 1996, 54(4): 225-231.

[5] 李兴福,徐鹤. 基于GaBi软件的钢材生命周期评价[J]. 环境保护与循环经济, 2009, 29(6): 15-18.

[6] Athena Sustainable Materials Institute. A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Oriented Strand Board: An Update[R]. Ottawa: Athena Sustainable Materials Institute, 2012.

[7] 张玲,袁增伟,毕军. 物流分析方法及其研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6189-6198.

[8] Fritz EGGGER GmbH & Co. OG. Environmental product declaration according to ISO 14025 [R]. Berlin: Institut Bauen und Umwelt. V., 2012.

[9] Kronoply GmbH, Kronopol Sp z o o, Kronofrance SAS. Environmental product declaration in according to ISO 14025 [R]. Berlin: Institut Bauen und Umwelt.V., 2011.

[10] Kronospan Luxembourg S A. New and environmentally friendly OSB panels[R/OL]. [2008-03-15]. http://ec.europa.eu/environment/life/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE05_NV_L_000047_LAYMAN.pdf.

[11] 张方文,于文吉. 欧洲定向刨花板发展现状及最新市场情况[J]. 国际木业, 2014, 44(9): 16-19.

[12] 张浩,王洪涛,侯萍. 基于生命周期评价的中国浮法玻璃燃料对比分析[J]. 化学工程与装备, 2011(5): 141-143.

[13] 姜睿,王洪涛,张浩,等. 中国水泥生产工艺的生命周期对比分析及建议[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2361-2368.

[14] 聂祥仁,高峰,陈文娟,等. 材料生命周期的评价研究[J]. 材料导报, 2009, 23(13): 1-6.

[15] Puettmann M, Oneil E, Kline E, et al. Cradle to gate life cycle assessment of oriented strand board production from the Southeast[R/OL]. [2013-04]. http://www.corrim.org/pubs/reports/2013/phase1_updates/SE%20OSB%20LCA%20May%202013%20final.pdf.

(责任编辑 向琴、劳万里)

(上接第8页)

参考文献:

[1] Ellegaard P. Finite-Element Modeling of Timber Joints with Punched Metal Plate Fasteners[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(3): 409-417.

[2] 许晓梁,马人乐,何敏娟. 轻型木桁架静力试验及承载能力分析[J]. 特种结构, 2006, 23(1): 1-4.

[3] 况宜. 轻型木桁架齿板连接节点受力性能的试验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.

[4] 车雨珂. 金属齿板连接轻型木桁架试验方法及加载程序研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.

[5] TPIC. Truss Design Procedures and Specifications for Light Metal Plate Connected Wood Trusses[S]. Truss Plate Institute of Canada, 2014.

[6] Amanuel S, Gebremedhin K G, Boedo S, et al. Modeling the Interface of Metal-Plate-Connected Tension-Splice Joint by Finite Element Method[J]. Transactions of the ASCE, 2000, 43(5):1269-1277.

[7] Liu X. Three-Dimensional Modeling of Metal Plate Connected Wood Truss Joints [D]. Vancouver: University of British Columbia, 2013.

[8] 王滋. 国产日本落叶松平行弦木桁架承载性能研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2017.

[9] Hankinson R L. Investigation of Crushing Strength of Spruce at Varying Angles of Grain[J]. Air Force Information Circular, 1921, 3(259).

[10] Foschi R O. Analysis of Wood Diaphragms and Trusses. Part II: Truss-Plate Connections [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1977, 4(3): 353-362.

[11] Nielsen J. Stiffness Analysis of Nail-Plate Joints Subjected to Short-Term Loads[D]. Aalborg: Aalborg University, 1996.

[12] 王丽. 国产齿板与落叶松规格材节点连接性能研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2016.

(责任编辑 孟凡丹、向琴)