

木桁架齿板连接性能及影响因子研究现状

郭伟¹, 费本华¹, 赵荣军², 周海宾²

(1. 国家林业局北京林业机械研究所, 北京 100029; 2. 中国林科院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 齿板连接性能的研究,对木桁架及整个轻型框架的木结构设计及性能优化具有重要意义。从齿板连接的前期基础、静态测试、动态测试、破坏模式及连接性能影响因子等方面,详细阐述了国内外齿板连接性能的研究现状,以期国内齿板连接性能的研究提供借鉴。

关键词: 齿板; 接合节点; 根节点; 节点破坏模式; 木桁架

中图分类号: TS6; TU366 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654(2008)06-0024-04

Review of Tests and Impact Factors of Metal-plate Connection

GUO Wei¹, FEI Ben-hua¹, ZHAO Rong-jun², ZHOU Hai-bin²

(1. Beijing Forestry Machinery Research Institute of State Forestry Administration, Beijing 100029, China;

2. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Metal-plate-connected (MPC) wood trusses for roofs and floors have been used in light-frame residential and commercial constructions for decades. Proper design and performance optimization of metal-plate connectors play an important role in manufacturing trusses and even throughout whole light frame structures. In this article, the basic principle of metal-plate connections, latest static and dynamic testing results, the failure mode and the impact factors on the connections were reviewed. Based on an extensive literature search, the authors provided some useful suggestions and guidance to develop and manufacture metal-plate connected wood truss in China.

Key words: metal-plate connector; splice joint; heel joint; failure modes; wood truss

随着经济的发展和生活品质的提高,人们越来越注重居住环境,其中对木结构房屋的需求也不断增加,成为国内轻型框架木结构房屋研究的强大动力,同时也推动了相关金属连接件的研究。

木结构中的金属连接有:齿连接、螺栓连接、齿板连接和斜键连接等多种方式。其中齿板连接由钉发展形成,具有经济、通用、环保、承载灵活、形式多样等优点,广泛用于轻型桁架节点的连接或受拉杆件的接长。在欧美及日本,住宅、小型建筑、商业建筑和农场

建筑中非腐蚀和非潮湿的环境,多数屋顶木桁架大规模使用齿板连接方式^[1-2]。在中国,随着木结构房屋数量的增长,齿板的需求量也逐年增加。因此,齿板连接性能的研究,对推动中国现代木结构的发展具有重要的意义和应用价值。

1 齿板的产生及应用

齿板(Truss plate 或 Metal-plate connector),是一种经镀锌或镀铝锌等处理、再用模具冲压而成的高强度钢板,是轻型木结构中的主要金属连接件。

根据传递荷载的需要,齿板有不同的尺寸和形状。常用规格有 16、18 和 20 三种型号,宽度为 25~250 mm,长度可达 600 mm,厚度因齿板规格不同而异。板齿垂直于板平面,齿长 6~25 mm。

收稿日期: 2008-3-10; 修改日期: 2008-10-12

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD18B07)。

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,国家林业局北京林业机械研究所研究员,博士生导师。

齿板于20世纪50年代首次被引入北美轻型框架屋屋顶桁架中,从而实现了各种跨度桁架的高效预制和工业化生产。与传统的木结构连接形式相比,齿板连接大大缩短了施工周期,具有效率高、节点性能稳定可靠、制作简单等优点,因而在北美等地得到快速发展,各种与齿板连接相关的协会或标准也纷纷建立和颁布。

1960年,由结构工程师、建筑规范制定人员、大学教授、专业设计人员以及木桁架制造商等组成的美国齿板协会(Truss Plate Institute, TPI)成立,该协会是美国国家标准编写组织的成员之一,相继颁布了许多行业标准。

加拿大于1972年成立了齿板协会(Truss Plate Institute of Canada, TPIC),协会宗旨是为加拿大木桁架设计、建造、质量标准建立及木桁架行业服务;1976年,加拿大标准协会(Canadian Standards Association, CSA)颁布了CSA S 347《加拿大齿板试验方法》;1989~1990年颁布CSA O 86-01《木材工程设计》和NBCC《加拿大国家建筑规范》,并推荐使用极限状态设计方法(Limit states design, LSD)。TPIC于1996年发布了齿板连接桁架的极限状态设计方法。

比较美、加两国的标准,可以发现:ASTM D1761《美国齿板连接性能测试方法》仅规定了标准节点连接形式的力学性质测试方法,而加拿大的CSA S347,则包括了4种不同受力方向齿板连接形式的测试方法。此外,加拿大和美国还分别设有木桁架协会(Wood Truss Council of Canada, WTCC和Wood Truss Council of America, WTCA)。齿板协会与木桁架协会共同协作,以确保木桁架满足设计标准和消费者对其使用性能的要求。

我国轻型框架木结构产品市场亦发展迅速,但金属齿板连接件仍完全依赖进口。2004年,我国颁布了GB 50005-2003《木结构设计规范》,在参考CAS O 86-01的基础上,首次引入了齿板连接的相关概念、试验要点及承载力设计值确定方法,为我国开展齿板连接性能的研究提供了依据,填补了国标在该方面的空白。

对比其他国家或地区与齿板连接相关的标准可以发现,我国标准在该方面的研究和规定尚需完善,特别是齿板性能及连接性能测试的一些必要环节和细节,未做明确规定。如:1)规范仅限定试验所用规格材的含水率和密度,对从规格材上锯解得到用于

连接的木块的含水率和密度并未限定;2)未限定齿板压入木材的方式;3)未涉及测试试件两侧的变形挠度、2块木材晚材率的差异对齿板连接性能的影响等。国标中关于齿板连接性能测试方面的诸多欠缺和不完善,限制了国产齿板连接的设计和应用。

2 齿板连接性能的研究现状

2.1 静态测试研究

木桁架中齿板连接节点的类型主要包括:结合节点、根节点和腹杆节点3种。不同的桁架形式,其节点的称谓也不尽相同,如芬克式和剪刀式(如图1)。

针对不同类型的节点在木桁架中的受力情况,通常采用破坏性试验,测试其受力性能,由得出的载荷-滑移曲线,来确定节点的刚度和强度。

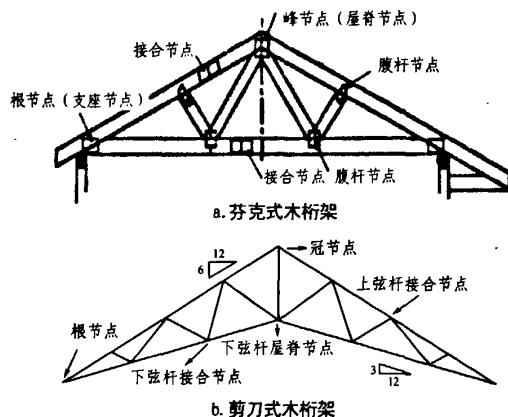


图1 木桁架齿板连接节点结构示意图

Fig. 1 Joints of typical Fink and Scissors trusses

此方面已进行的研究有:在轴向拉伸载荷作用下,测试接合节点试件的极限强度和刚度^[3-5];在受拉伸、纯剪、纯弯作用下,得到接合节点、根节点等的强度、刚度或载荷-位移关系^[4,6];或通过简单齿板连接试件的承载能力测试,可得到这些连接节点的载荷-滑移曲线^[6]。

除了单一的静态加载外,研究人员还对齿板不同的连接类型、在不同载荷组合作用下的连接性能进行了研究。如采用多组破坏性试验,评估在弯曲和轴向荷载共同作用下,以及纯轴向拉伸、纯弯曲和复合加载作用下,齿板连接的承载能力。研究发现:当拉伸中有弯曲作用时,节点的承载能力明显降低。还有学者考察了同时受轴向荷载和弯曲作用时节点的承载能力。结果表明,节点的拉伸承载能力随力矩的增加呈下降趋势^[7-8]。

一些学者针对具体的木桁架类型,研究不同齿板节点的连接性能,测试了中柱式桁架根节点、冠节点和屋脊节点的承载能力,以评估节点的弯曲和轴向刚度性能^[9];通过测试剪刀式木桁架上5种不同齿板连接节点的性能,得到各节点的刚度和强度数据,以及一些小比例桁架的承载能力^[8];通过节点载荷-位移曲线的斜率,得到桁架的刚度^[10]。

除了对节点轴向性能的研究,科研人员还对节点刚度进行了研究,包括半刚性节点轴向刚度的确定和转动刚度的确定,两种刚度值均可通过试验或分析方法得到^[5]。

由于木桁架在使用过程中的受力状况较为复杂,因此,有学者提出,对节点转动弹性进行全面研究,从而合理简化桁架的受力分析。笔者也赞同对木桁架的实际受力状况进行系统分析,在确定各个齿板连接节点的受力状态后,再确定齿板连接性能及设计的研究路线,这样可更准确地把握研究对象的受力状态,更贴近桁架的实际使用情况,研究结果亦更科学,更具有实际意义。

2.2 动态测试研究

齿板设计是建立在静态加载基础上的,但连接节点的实际受力情况很复杂,因此,有必要对木桁架在循环加载作用下的受力性能进行研究。而目前,关于动态测试方面的研究成果较少,循环加载下齿板的连接性能研究是一个崭新的领域。

Dolan^[11]对齿板连接动态测试进行了初步研究,并在砌体剪力墙准静态测试的基础上,提出了拟动态时序相位移(Sequential phased displacement, SPD)的加载测试方法。Kent^[4]等采用该方法进行研究,结果表明:接合节点及根节点在受到与木框架固有频率相同的一些地震主频律作用时,其强度并未降低,但在SPD载荷作用下,其刚度会降低;根节点在受较大的人造地震载荷作用时,刚度也会降低。

究其原因,可认为在SPD载荷作用下,节点的动态性能与节点位移大小有关,循环荷载的振幅对节点的强度有重要影响。随着SPD的增加,阻尼比及能量消散增加,循环载荷作用下节点刚度下降^[4]。动载模拟是动载荷节点性能研究的一个难点,而该研究为动载荷作用下,木桁架乃至整个木结构体系性能的研究奠定了基础。

此外,Gupta^[12]等通过测试芬克式接合节点和根节点的静态受力,及循环加载下110个试件的动态受力情况,评估木桁架受模拟地震周期荷载作用时,节

点的动态力学性能,并与静态节点强度进行对比。结果显示:在循环加载作用下,节点的强度未下降,但刚度明显下降;认为房屋设计现行的地震载荷系数1.6是适用的。

2.3 破坏模式研究

节点破坏是木材与齿板共同作用的结果,破坏形式主要有:齿板拔出、齿板断裂或折断、钢板屈服破坏和木材撕裂,其中齿板拔出和木材撕裂最为常见。研究节点的破坏形式,对节点受力分析及木桁架齿板设计,均具有非常重要的意义。

Gupta^[13]采用新的测试设备,进行节点的破坏性试验,以确定不同受力情况下,3种节点的强度、刚度及破坏模型。研究发现,根节点主要为韧性破坏,其他2种节点主要为脆性破坏。彦铭^[2]和Hayashi^[3]也在各自的研究中,观察到了齿板拔出和接合处齿板断裂。此外,Sheppard等^[14]也指出:大部分根节点的破坏为齿板拔出。对于结合节点破坏模式的研究,O'regan^[15]等证明,齿板拔出是结合节点最显著的破坏形式;Gupta^[12]在测试了10组共70个试件之后也得到了类似的结论:大部分接合节点会出现齿拔和木材破坏,只有一个是齿板破坏。与Vatovec等的结论基本一致^[8]。

2.4 影响因子研究

适当的强度和柔性平衡,可创造一个良好的连接系统。影响齿板连接性能的因子有:树种、木材密度、含水率、相对体积质量(Specific gravity, SG)、晚材率、齿板规格(包括齿板批次、板长、板宽、齿长、齿距、齿板净横截面积和接合处齿槽数量)、齿板摆放位置(角度、距木材边部距离、与木材纹理方向的夹角、与载荷作用方向的夹角)、齿板强度、齿板连接形式、齿板非支撑区域、嵌入间隙、嵌入方式、加载方式、加载历时等。其中最重要的4个因素为:SG、齿板摆放位置、节点类型和加载方式。

用于屋顶桁架的规格材,通常选用符合一定等级要求的目测分等锯材或机械应力分级锯材。常用树种有:花旗松、云杉、黑松、南方松和云杉-松木-冷杉(SPF)等。试验时试件的含水率一般 $<20\%$, $SG \leq 0.7$ 。此外,相连2块木材的晚材率应尽量一致,以避免因材性差异,干扰齿板连接性能的测试结果。

相关研究有:Sheppard^[14]比较了6种不同尺寸齿板的根节点受力情况;Lau^[6]分析了破坏形式、齿板角度、长度和宽度对受剪节点性能的影响,以及破坏形式、齿板连接形式与齿板长度对根节点性能的影响。

响。结果显示:短齿板多发生齿板屈服破坏,长齿板多为板齿拔出破坏;并提出:受剪平面的木材压溃,是节点刚度降低的主要原因;增加齿板的净横截面积可避免钢板撕裂;减少接合处齿槽数量,可以提高钢板强度等结论^[5]。O'regan^[15]等提出一种采用接合节点的齿板长度的设计方法,并得出结论:为避免板齿拔出破坏,齿板长度须大于其宽度。Riley^[5]将 SG、含水率作为验证其模型灵敏性的因子;还有学者将嵌入间隙表示为 SG 的函数,从而建立评估和预测嵌入间隙对节点强度影响的模型。

综上所述,在静态测试基础上,建立适用于各种节点受力情况的统一模型;研究循环加载作用下齿板连接性能;采用接触单元方法,模拟木材与板齿界面处滑移力学行为;系统研究齿板连接性能影响因素;完善对齿板连接单元的假设,设计合理的受力模型等,均为今后齿板连接性能研究的重点。

3 建议

我国目前每年虽然仅约 1 500 多栋木结构建筑的需求量,但是木结构连接构件关键技术的研究具有重要的实际应用意义。对于木桁架工业而言,齿板连接应用非常广泛,节点性能的每一点改进,都对节约成本产生重要影响。

我国在齿板连接性能方面的研究刚刚起步,合理借鉴欧美等国的研究经验和成果,对我国开展相关的研究大有裨益。为此,建议我国未来几年的研究应侧重于如下方面:

1) 齿板连接性能的测试。主要包括静态测试和动态测试,动态测试更能反映齿板连接木桁架的实际受力性能,应该加大研究力度。

2) 试件破坏形式的研究。是齿板与木材接合能力最直观的切入点,通过对破坏形式的总结与分析,初步得到齿板与木材试件相匹配的尺寸规格,为后续试验的展开提供依据,并为预测齿板与木材的连接能力提供参考。

3) 齿板连接性能影响因子的研究。对改善连接件连接性能和开发新型连接件的意义重大。齿板连接的载体——木材的性质,直接关系到连接性能和房屋桁架的使用性能。因此,结合木材的材质特性,研究齿板的连接性能,是发展齿板连接理论、优化齿板连接性能最为重要的研究方向之一。

可以预见,随着木结构研究及应用的快速发展,还将带动金属连接件、木材加工等与之相关产业的发

展,促使传统金属连接件工业产生二次飞跃,提升加工水平,合理配置资源,从而加快我国木结构建筑国产化的步伐。

参考文献:

- [1] GB 50005-2003, 木结构设计规范[S].
- [2] 彦铭. 轻型木结构齿板连接的结构性能研究[D]. 南京:南京林业大学, 2006: 3-13.
- [3] Hayashi T, H Sasaki. Static tensile strength of wood butt joints with metal plate connectors[R]. Wood Research, Bulletin of the Wood Research Institute, Kyoto University, 1982.
- [4] Kent S M, R Gupta, T H Miller. Dynamic behavior of metal-plate-connected wood truss joints[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(8):1037-1045.
- [5] Riley G J, K G Gebremedhin. Axial and rotational stiffness model of metal-plate-connected wood truss joints[J]. Transactions of the ASAE, 1999, 42(3):761-770.
- [6] Peter W C. Factors affecting the behavior and modeling of toothed metal-plate joints[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1987, 14(2): 183-195.
- [7] Wolfe R W. Metal-plate connections loaded in combined bending and tension[J]. Forest Products Journal, 1990, 40(9): 17-23.
- [8] Vatrovec M, R Gupta, T Miller. Testing and evaluation of metal-plate-connected wood truss joints[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1996, 24(2): 63-72.
- [9] Suddarth S K, D H Percival. Increasing the application efficiency of performance tests with analytic procedures[J]. National Bureau of Standards. Special Publication, 1972(1): 98-104.
- [10] Gupta R, T H Miller, M R Kittel. Small-scale modeling of metal-plate-connected wood truss joints[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2005, 33(3): 139-149.
- [11] Dona J D. Proposed test method for dynamic properties of connections assembled with mechanical fasteners[J]. Journal Testing and Evaluation, 1994, 22(6):542-547.
- [12] Gupta R, T H Miller, Shawn M, et al. Short-term cyclic performance of metal-plate-connected wood truss joints[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2004, 17(5): 627-639.
- [13] Gupta R, K G Gebremedhin. Destructive testing of metal-plate-connected wood truss joints[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(7): 1971-1982.
- [14] Sheppard I. An analytical and experimental investigation of contact area stress distribution and buckling strength of light gage punched metal heel plates for timber trusses[D]. Ph. D. thesis, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, 1969.
- [15] O'Regan P J, F E Woeste, S L Lewis. Design procedure for the steel net-section of tension splice joints in MPC wood trusses[J]. Forest Products Journal, 1998, 48(5): 35-42.

(责任编辑 姜征)