



木结构金属连接件连接性能的研究现状

陈恩灵¹, 费本华²

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

摘要: 总结了国内外木结构的相关研究内容, 着重从五个方面详细地介绍了国外连接性能研究现状, 探讨了现代木结构建筑金属连接件中连接性能研究的发展趋势, 并提出现阶段我国在木结构金属连接件方面的研究方向。

关键词: 木结构; 金属连接件; 连接性能

中图分类号: TS6; TU759

文献标识码: A

文章编号: 1001-8654(2008)03-0009-04

Review on Performance of Metal Connectors in Wood Frame Structures

CHEN En-ling¹, FEI Ben-hua²

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Beijing Forestry Machinery Research Institute of State Forestry Administration, Beijing 100029, China)

Abstract: This paper reviewed worldwide research on the performance of metal connectors and fasteners in wood frame structures. It was found that most research studies of wood structure connections focused on decay resistance, fire retardants, connection reinforcement, effect of wood characteristics, and connection design. The current status of research on connectors used in wood frame structures was summarized and the future trend was also discussed. It is believed that this study would provide some insight and suggestions for a further research program on metal connectors in China.

Key words: wood structure; metal connector; connection performance

在木结构建筑中, 连接件的性能直接影响结构强度、使用寿命和可靠性, 同时, 木材具有抗拉强度低、易劈裂、强度随含水率变化等缺点, 因此, 木结构中连接技术的应用是否合理, 是设计成败的关键, 也是木结构建筑营造技术的重要环节。传统木结构的连接点一般采用榫卯连接方式, 而在现代木结构设计中, 取而代之的是标准化、规格化的金属连接件。

木结构中的金属连接件种类繁多, 随着近几年的发展, 更是层出不穷。根据实践中的使用情况和国外各类木结构中金属连接件设计规范, 大体可分为: 钉类、螺栓和销类连接件、木结构铆钉、剪盘和裂环连接件、齿板连接件、构架连接件以及梁托 7 大类^[1]。

1 我国木结构连接性能研究的现状

我国古建筑历史悠久, 尤其是传统的木结构建筑, 为中华传统建筑的主流。但到了近代, 由于种种原因, 木结构建筑并未在我国得到发展, 因而我国木结构连接性能研究, 主要集中在古代木结构建筑上。

我国古代木结构的特点是采用柱架体系, 在梁和柱之间采用斗拱, 各连接点采用榫卯结合。榫卯连接是介于刚性连接和铰接两者之间的变刚性连接; 而斗拱结构有较大的柔性, 对抗震非常有利。

进入 20 世纪 90 年代, 国际上开始了对古建筑木结构的力学性能的研究, 其科学性开始受到重视。90 年代初期, 在对西安唐代大小雁塔的抢险和维修过程中, 俞茂宏^[2]等对榫卯连接点的接触摩擦力学特性、斗拱的力学性能进行了系统研究; 赵均海^[3]等在对西安市东门城楼古代木结构建筑进行动力分析时, 将榫卯连接和斗拱连接简化为半刚性连接, 以变刚度单元

收稿日期: 2007-07-03; 修改日期: 2008-04-13

基金项目: 科技部成果转化资金(05EFN2167001387); “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD18B07)。

作者简介: 陈恩灵(1982—), 男, 中国林科院木材工业研究所硕士研究生。

的方式,引入分析计算中,并讨论了榫卯连接点刚度对固有频率的影响;方东平^[4]等使用3维半刚性连接点单元,来描述斗拱和榫卯连接点,第一次对古代木结构建筑的斗拱和榫卯连接点的力学性能作了定量研究。但是,这些研究都站在古建筑维护的角度上,没有涉及对现代木结构中金属连接性能的研究,在我国木构件的金属连接性能研究尚处于空白;当前经常使用的各种木结构金属连接件的设计方法相对落后,在内容上也不够完善;不管是金属连接件的产品开发,还是检测方法的制定,都尚未起步。

2 国外木结构连接性能研究的现状

国外对木结构建筑中金属连接性能的研究始于20世纪初,在经验积累的基础上,前期主要研究了连接性能的基本影响因素,而有关力学方法分析、计算模型的建立较少;进入80年代后期,由于屈服模型理论的应用,连接件断裂力学方法的兴起,有限元法对连接点受力情况的分析运用,连接件研究有了更加明确的相关理论指导。同时,由于前期大量相关研究及数据的积累,各种模型及设计方法被提出,并在实践中不断地加以改进、运用,目前国外木结构连接方面的研究,可归纳为如下几个方面:

2.1 耐腐蚀性能研究

在现代木结构建筑中,金属连接件直接与木材相接触,木结构连接点的金属件腐蚀是一个相互作用的过程:一方面木材的腐朽会加快金属件的腐蚀速度,另一方面金属件的腐蚀又使木材腐朽变得更严重,这种相互的影响,也使得金属件腐蚀性能的测试变得更加复杂。

木结构中金属连接件腐蚀的测试方法有很多:Samuel^[5]比较了各种方法的优缺点和有效性,试验证明,电化学法由于不受测试环境影响,能在各种温度、含水率下使用,具有明显的优越性。

经防腐、阻燃处理的木构件,由于处理剂特殊的化学成分,使连接处腐蚀现象加重,Andrew^[6]研究了ACA和CCA处理的防腐木材中,不同钢质钉的腐蚀现象,试验采用了11种不同钢质或涂层的钉,分别置于加速腐蚀的高湿环境中。经过14年的观测分析,结果显示,钉的腐蚀主要是由防腐剂中可电离铜离子引起的,在防腐木材中使用钉类连接件时,应充分考虑其钢质,以避免含铜化合物所引起的腐蚀作用。对于应用在经防腐、阻燃处理木构件的金属连接件,必须经过测试,以保证其在设计和应用中不出问题。

潮湿或与海水接触等恶劣的使用环境,也会使连接金属件的腐蚀现象更加明显,Ted^[7]针对不同的环境,研究了经过镀锌、镀镉等不同涂层处理的金属连接件抗腐蚀性能。结果表明,即使是经过处理的金属连接件,同样存在一定的腐蚀现象,也应对其耐腐蚀性进行评估。Washington State University^[8]运用电化学阻抗光谱法(EIS)测试木构件中金属连接件的腐蚀情况,着重论述了这种测试方法在运用中遇到的问题以及最新研究进展,并经过EIS试验,建立了木材导电率的相关模型。

2.2 耐火性能研究

金属连接件的耐火性较差,在温度 $>232\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,强度迅速下降。由于木材和钢材的热物理性能不同,在阻燃试验中的力学强度变化也不同。对连接处耐火性能研究,关键在于确定火灾中连接点各组成部分的温度传递、分布和力学性能变化状况,以提高整体的耐火极限。

针对测试木桁架耐火性能耗时、高成本的缺点,Robert^[9]通过大量的构件试验,建立了一个用于预测金属板连接桁架的耐火性能计算模型。研究结果表明,该模型计算结果与ASTM E119试验结果具有一致性,而其在研究中使用的木构件温度分布计算方法,成为后来建立各类耐火性能计算模型的重要基础。

在研究火灾中木结构销连接结构的热量与力学性能的关系时,运用三维有限元法,模拟火灾中销类连接件的力学性能变化,可推导出热量与销的力学性能相关模型,该模型是运用数字模拟方法,精确地计算出连接件周围的应力分布、木构件尺寸减少引起的内应力、以及组成构件性质变化等非线性因素的影响。根据试验结果分析,指出在以后相关试验中,应将温度曲线引入力学模型,以考虑由于温度作用而引起构件力学性能的降低情况^[10]。钢木多剪力结构连接,有着承载能力高、断裂破坏呈延性模式的特点,在木结构中使用较多,同时外层木构件的阻隔连接具有良好的阻燃性。但由于构件的几何形状种类繁多,钢材、木材和木材炭化后的热物理性能不同,使得阻燃性能分析变得非常复杂。

2.3 性能增强研究

与钢材和混凝土等结构材料相比,木材的横纹抗拉强度较低,当连接点周围的木材受到剪应力和横纹拉应力作用时,易产生开裂等破坏现象,改变金属连接件周围木构件的应力分布。增强连接点周围木材

的力学性能,是提高连接强度的基本指导思想,用自攻螺钉增强连接点强度,是一种简单实用的方法。Bejtka^[11]研究了有自攻螺钉增强木结构销类连接,试验发现垂直于销轴方向,在销前部钉入0.35至0.4倍销径的螺钉,可大大增强连接点的承载能力和刚度,同时又解决了由于销排列间距减少而引起的脆性劈裂问题。

Lawrence^[12]运用类似于胶合板木纹互相垂直的排列方式,用玻璃纤维层增强木材螺栓连接点,双剪连接试验结果表明,顺纹承载时,玻璃纤维层不但能使承载力增加1/3,而且连接点的破坏模式也由脆性转向韧性;横纹承载时,虽然不能转变连接点脆性破坏模式,但也能大大地增加承载力和延性比。采用竹胶合板局部增强和竹胶管(bamboo GIR)内部增强2种方法,发现竹胶合板局部增强能提高连接点的承载力,而采用竹胶管增强则可以提高其刚度,增加其抵抗变形的能力,但这2种增强方式也引起木材压溃的问题^[8]。对传统木结构中金属齿接加固的单项加载和循环加载测试结果表明,用于加固的金属件并不参与承力作用,但却能明显的提高连接点的耗能性能,从而使结构整体的抗震性增强^[8]。

2.4 强度影响因素研究

木结构中连接点的强度主要与连接件类型、连接方式和被连接木构件力学性能有关。木构件用钉连接时,木材的钉接承压强度是连接点侧向承载设计值的基本参数之一。Douglas^[13]对南方松、SPF(云杉、冷杉、松)和枫树的钉承压强度进行了测试,分析了木材含水率、密度、纹理与钉直径的影响作用。结果显示,除含水率,另外三者对钉承压强度影响明显,钉的承压强度和刚度与木材密度成正比;受纹理方向影响显著,与密度的斜率关系可以表示成相应木材含水率函数值,钉直径的影响作用虽然没有得出明确的结论,但随着直径的增加,钉承压强度有减少的趋势。

对胶合板和OSB这2种结构用板材,进行握钉力和钉穿透试验(Pull-through),从钉类型、板材厚度、使用环境,分析了这2种材料的钉连接性能。钉穿透试验模拟了用钉连接的屋面板、外墙面板在受到垂直于板面的风力时,板材穿过钉帽被垂直拉出的破坏情况,为板材在木结构外部使用提供了依据^[8]。

对木框架与基础的地脚螺栓连接,试验分别选用3种不同直径的螺栓,并对应不同孔径的导向孔,分析导向孔对强度的影响作用,结果显示,导向孔对于

直径 <6 mm的螺栓影响较小,但随着直径的增加,导向孔对强度的影响增强。孔径与螺栓直径不符的导向孔,将明显削弱连接点的强度,其主要原因是横纹拉应力的集中,导致木材的开裂^[10]。

胶合板-木材和OSB-木材连接的剪力墙中,对钉连接点进行的测试结果表明,两者的侧向剪切强度变化不明显,但刚度却降低了将近一半,说明剪力墙最终状态和循环过程中的水分变化都可对其性能产生影响^[10]。

2.5 连接点的设计

连接点设计包括刚度和柔度2种基本设计方法,涉及到结构的承载力与整体变形问题。木结构连接点设计研究主要是连接性能的精确计算,包括各类连接点的刚度、强度计算,极限状态的确定及连接点二次刚度的预测等问题。在极限状态设计方法中,连接点屈服荷载的计算是确定其承载设计值的基础。Mohd^[14]为简化计算,研究了钉连接点的屈服荷载与最大荷载的关系,推导出了一个以木构件的木材密度和钉直径为因变参数的屈服极限计算公式,由于参数明确且测试简单,在工程使用过程中该计算方式显得简捷实用。

对木销连接点的研究,主要分析了刚度与销长宽比之间的关系,及销与销孔间磨擦对刚度的影响因素,分别得出了长销和短销连接时的连接点刚度计算公式^[8]。McLain^[15]回顾了自1933年以来近60年中各种握钉力研究的试验,对其中572个木螺钉、372个方头螺钉、1914个普通圆钢钉试验数据进行回归分析,建立了基于材料密度和钉直径的木螺钉、方头螺钉和圆钢钉的3个计算公式。与传统经验公式相比,在计算低密度木材中的小径钉握钉力极限强度时,该公式在具有更好的相关性。

3 木结构连接性能研究的发展趋势

伴随着木结构的发展逐步走向工业化、多样化和集成化,木结构金属连接件从制造到安装,传统技术的使用越来越少;从单一的钉、螺栓,到现在标准的、非标准的各种专用连接件;从原来的靠工人逐个安装,到现在连接板制造商和桁架制造商联合设计、制造、机械自动安装,连接件的发展既提高了其工艺的准确性,又使构件材料得到了最优化利用。

目前木结构连接性能的研究呈现如下趋势:

1) 从单一性走向整体性。早期研究主要针对单个连接点的承载特性上,例如钉、螺栓、齿板等一个或

多个连接件组成的连接点,经过几十年的发展和试验数据积累,各方面参数基本得到完善,研究也向整体结构方向发展;

2) 模型研究的普遍开展。随着计算机的使用,以及各种数学模型的建立,开发出的专门设计软件,大大地加快了木结构的连接设计。不断改进传统的经验方法,建立精确的新理论模型,是当前连接性能研究的主要趋势之一;

3) 连接强度计算的精确化。随着有限元等现代理论和现代工具的应用,连接点应力分布、结合区域木材性能等研究计算越来越精确,使得性能的设计和评价更加接近实际情况,同时也为连接点性能增强、结构修复等工作提供了必需数据;

4) 由经验方法转向力学理论方法。随着研究的深入,断裂力学、土体力学理论的引入,都为木构件连接力学理论的建立,提供了数据支持和理论依据,木结构连接点设计也逐步走向更加科学、更加精确的力学理论设计。

4 建议

针对我国木结构连接件研究空白的现况,笔者认为,应充分利用国外已有的设计规范和研究成果,进行相应的连接性能测试,明确我国结构用材的连接特性,建立相关设计规范和强度计算方法、计算模型,并在此基础上,设计研制国产木结构建筑专用的连接件,在注重木材与基本连接件连接性能的研究同时,展开对当前实际使用常见的成型连接件(如齿板)的性能测试,建立相应的评价标准和测试体系。具体为:

1) 开展钉、螺栓金属连接件和其他销类与国产木材连接性能的研究,掌握这些基础连接件的连接特性,既能为我国制定木结构连接设计规范提供基本的数据,又能为我国进一步开展木结构连接性能研究奠定基础。

2) 针对我国大量使用人工林木材作结构用材的特点,明确其连接性能,并在此基础上,设计研制具有自主知识产权的专用连接件,建立国产木结构建筑的连接设计体系,为我国人工林木材在木结构方面应用提供依据。

3) 针对国内外现有的各种木结构建筑连接件,建立与国际有关规范相接轨,又符合我国实际发展状况的分类标准、性能评价和测试体系,在质量上进行把关。

4) 发扬我国传统木结构的优势,探讨榫卯等传统连接方式,部分代替现代木结构中金属件连接的可行性。一方面,我国在古建保护方面所做的研究工作为传统榫卯连接性能研究积累了大量的经验,另一方面,与金属连接件相比,榫卯连接不存在易腐蚀、耐火性能差等缺点,可借鉴古建保护的经验和将其运用到现代木结构连接的设计中。

参考文献:

- [1] Canadian Wood Council. Wood design manual[M]. 1990; 213-303.
- [2] 俞茂宏, Oda Y, 方东平, 等. 中国古建筑结构力学研究进展[J]. 力学进展, 2006, 36(1): 43-63.
- [3] 赵均海, 俞茂宏, 杨松岩. 中国古代木结构有限元动力分析[J]. 土木工程学报. 2000, 33(1): 32-35.
- [4] 方东平, 俞茂宏, 宫本裕. 木结构古建筑结构特性的计算研究[J]. 工程力学. 2001, 18(1): 137-144.
- [5] Samuel L Z, Douglas R R. Review of test methods used to determine the corrosion rate of metals in contact with treated wood[J]. FPL-GTR-156. U S Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, 2005.
- [6] Andrew J B. Corrosion of nails in CCA-and ACA-treated wood in two environments[J]. Forest Products Journal, 1992, 42 (9): 39-41.
- [7] Ted Mooney. Electroplated coatings[M]. ASM handbook volume 13A corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection. 2003
- [8] Washington State University, American Forest and paper Association. Proceeding of the 9th world conference on timber engineering[C]. USA: 2006.
- [9] Robert H W, Steven M C, Deepak K S. Fire endurance model for a metal-plate-connected wood truss[R]. FPL-RP-522. U S Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1993
- [10] Finnish Association of Civil Engineers RIL. Proceeding of the 8th world conference on timber engineering V[C]. Finland: 2004.
- [11] Bejtka L. Self-tapping screws as reinforcements in connections with dowel-type fasteners[C]. 2005, CIB-W18/38-7-4.
- [12] Lawrence A S, Robert J R, Daniel F Windorski. Fiberglass-reinforced bolted wood connections [J]. Forest Products Journal, 1998, 48(9): 63-67.
- [13] Douglas R R. Effect of moisture content on nail bearing strength[R]. FPL-RP-591. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2001.
- [14] Mohd Z J, Bona M. Yield load prediction of nailed timber joints using nail diameter and timber specific gravity[J]. Wood Science and Technology, 2004, 38(8): 599-615.
- [15] Mclain T E. Design axial withdrawal strength from wood; I. Wood screws and lag screws[J]. Forest Products Journal, 1997, 47(5): 77-84.

(责任编辑 鲍加芬)