

前 言

木材是一种天然有着温润质感的绿色、环保、可再生建筑材料，被广泛作为建筑、家具和工艺品用材使用。现代木结构建筑具有绿色生态、抗震性能好、工业化程度高、健康宜居等优势，大力发展现代木结构符合绿色、低碳、循环和可持续发展的战略目标。

胶合木结构作为现代木结构的代表，具有绿色环保、强重比高、装配化程度高、和谐美观等优点，是未来建筑结构的发展方向。但由于木材既不能像混凝土进行浇筑连接，也不能像钢材通过焊接连接，木结构需要采用多种连接方式来满足中大跨径桥梁和高层建筑结构的跨度需求。

为实现胶合木结构长度的跨越，作者团队提出了钢夹板螺栓连接胶合木结构这一绿色耐久新结构，实现中小跨径桥梁的建造模式真正符合国家绿色、低碳、循环和可持续发展的战略需求。研究成果对丰富桥梁结构形式和计算理论具有重要意义，对促进钢夹板螺栓连接胶合木梁桥的推广应用具有重大工程价值。

作者团队对胶合木结构开展了完整的试验研究，包括胶合木材料力学性能试验、纯胶合木梁力学性能试验、加筋增强胶合木梁试验、胶合木-钢夹板螺栓连接件抗剪和滞回性能试验、钢夹板螺栓连接胶合木梁抗弯和抗剪性能试验、钢夹板螺栓连接胶合木梁长期性能试验、钢夹板螺栓连接胶合木桁架力学性能试验，并在此基础上完成了一座胶合木桁梁桥的受力性能分析与结构验算、一座胶合木连续梁廊桥设计与计算和一座 1:2 的胶合木-混凝土组合梁桥模型试验研究。

本书凝练了作者团队近 10 年的研究成果，介绍了钢夹板螺栓连接结构的设计理论和试验情况，具体章节安排如下：第 1 章介绍胶合木结构力学性能研究概况以及本书主要研究内容；第 2 章介绍胶合木-钢夹板螺栓连接件抗剪性能试验研究，主要包括材性试验、模型试验、承载力理论计算方法、有限元数值模拟等；第 3 章介绍胶合木-钢夹板螺栓连接件滞回性能试验研究，包括模型试验、试验结果与分析及有限元宏观模型分析；第 4 章介绍钢夹板螺栓连接胶合木梁抗弯性能试验研究，包括模型试验、试验结果与分析、抗弯极限承载力计算、木材及钢材本构分析等；第 5 章介绍钢夹板螺栓连接胶合木梁抗剪性能试验研究，包括模型试验、试验结果与分析、抗剪承载力计算及有限元数值模拟；第 6 章介绍钢夹板螺栓连接胶合木梁疲劳性能试验研究，包括静力试验、疲劳试验及有限元数值模拟；第 7 章介绍钢夹板螺栓连接胶合木梁长期性能试验研究，包括蠕变性能、蠕变模型、

蠕变变形的研究及有限元计算分析；第 8 章介绍钢夹板螺栓连接胶合木桁架力学性能试验研究，包括静力试验、数值模拟、参数分析及理论计算。

本书涉及的研究工作得到了国家自然科学基金项目(52378211)、国家重点研发计划项目(2024YFD2201200)、湖南省自然科学基金项目(2021JJ31160)、湖南省教育厅科学研究重点项目(19A526)等的资助，特此致谢。

本书是作者团队成员长期共同的研究成果，其中第 1 章由陈爱军、李超越执笔，第 2 章由李新功、陈开新执笔，第 3 章由王达、唐锋执笔，第 4 章由彭锦程、关俊杰执笔，第 5 章由陈开新、何昆泽执笔，第 6 章由李龙、李强执笔，第 7 章由陈爱军、何金源执笔，第 8 章由李超越、刘聪裕执笔，全书由陈爱军审阅、修改、定稿。何朝红、蔡郭圣、牛东、彭润勃、唐波、周建华、周彦、白帆、陈义龙、王虎瑞、杨磊、王航、李世龙、李若宜、尹伊璐等在相关研究中做出了出色的成绩，为本书做出了重要的贡献，在此深表感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 胶合木结构力学性能研究概况	1
1.2 本书主要研究内容及意义	4
参考文献	5
第 2 章 胶合木-钢夹板螺栓连接件抗剪性能试验研究	9
2.1 材性试验	9
2.1.1 木材含水率及密度的测量	9
2.1.2 木材力学性能试验	11
2.1.3 钢板材性试验	15
2.1.4 螺栓力学性能	16
2.2 模型试验	17
2.2.1 试件制作	17
2.2.2 试验加载	20
2.2.3 试验结果与分析	22
2.3 承载力理论计算方法	33
2.3.1 木结构螺栓连接基本理论	33
2.3.2 胶合木-钢夹板螺栓连接件抗剪承载力计算	35
2.3.3 各国规范公式计算结果对比	39
2.4 有限元数值模拟	40
2.4.1 建立几何模型	40
2.4.2 材料本构模型	41
2.4.3 破坏形态	43
2.4.4 荷载-滑移曲线	46
2.5 基于宏观建模方法的数值模拟	49
2.5.1 有限元宏观模型	50
2.5.2 计算结果与分析	53
2.6 本章小结	58
参考文献	59

第 3 章 胶合木-钢夹板螺栓连接件滞回性能试验研究	62
3.1 模型试验	62
3.1.1 试件制作	62
3.1.2 试验加载	64
3.2 试验结果与分析	67
3.2.1 试验现象	67
3.2.2 滞回曲线	69
3.2.3 变形性能分析	72
3.2.4 刚度退化分析	73
3.3 基于宏观建模方法的数值模拟	74
3.3.1 宏观模型理论基础	74
3.3.2 宏观模型建立	75
3.3.3 宏观模型验证及分析	76
3.4 本章小结	82
参考文献	82
第 4 章 钢夹板螺栓连接胶合木梁抗弯性能试验研究	83
4.1 模型试验	83
4.1.1 试件制作	83
4.1.2 试验装置和测量内容	85
4.1.3 试验加载	86
4.2 试验结果与分析	86
4.2.1 试验现象	86
4.2.2 破坏判断标志与极限荷载	91
4.2.3 荷载-挠度曲线	93
4.2.4 荷载-应变曲线	94
4.2.5 截面应变曲线	95
4.3 钢夹板螺栓连接胶合木梁抗弯极限承载力计算	97
4.4 螺栓抗弯承载力计算	99
4.5 木材销槽承压强度研究	101
4.5.1 木材销槽承压强度的测定方法	101
4.5.2 木材销槽承压强度的判定方法	102
4.5.3 国内外木材销槽承压强度的理论计算公式及比较	103
4.6 有限元计算结果	105
4.6.1 荷载-挠度曲线	105
4.6.2 极限荷载	107

4.6.3 应力	108
4.7 螺栓影响参数分析	114
4.7.1 螺栓端距	114
4.7.2 螺栓边距和间距	116
4.7.3 螺栓数量与螺栓直径	117
4.8 钢夹板影响参数分析	121
4.8.1 钢夹板厚度	121
4.8.2 U 型钢夹板	124
4.9 胶合木影响参数分析	125
4.10 本章小结	127
参考文献	128
第 5 章 钢夹板螺栓连接胶合木梁抗剪性能试验研究	130
5.1 模型试验	130
5.1.1 试件制作	130
5.1.2 试验加载	133
5.2 试验结果与分析	135
5.2.1 试验现象与破坏模式	135
5.2.2 极限荷载与极限位移	138
5.2.3 荷载-跨中挠度曲线	139
5.2.4 荷载-应变曲线	141
5.3 抗剪承载力计算	144
5.3.1 破坏机理	144
5.3.2 影响胶合木梁抗剪性能的因素	144
5.3.3 胶合木梁抗剪强度设计理论研究	146
5.3.4 抗剪承载力计算公式	148
5.4 有限元数值模拟	150
5.4.1 有限元模型的建立	151
5.4.2 计算结果与分析	151
5.5 本章小结	153
参考文献	154
第 6 章 钢夹板螺栓连接胶合木梁疲劳性能试验研究	156
6.1 静力试验	156
6.1.1 试件制作	156
6.1.2 试验加载	158
6.1.3 试验结果与分析	160

6.2 疲劳试验	166
6.2.1 试验设计	166
6.2.2 试验结果与分析	168
6.2.3 疲劳寿命及损伤模型	175
6.3 有限元数值模拟	177
6.3.1 有限元模型的建立	177
6.3.2 有限元模拟结果与分析	179
6.4 本章小结	181
参考文献	182
第7章 钢夹板螺栓连接胶合木梁长期性能试验研究	184
7.1 钢夹板螺栓连接胶合木梁试验	184
7.1.1 试验设计	184
7.1.2 试验结果与分析	188
7.1.3 有限元计算分析	192
7.2 蠕变模型拟合与变形预测	193
7.2.1 蠕变模型拟合	193
7.2.2 蠕变变形预测	196
7.3 钢夹板螺栓连接胶合木梁长期变形原理分析	197
7.3.1 木材长期变形计算方法	197
7.3.2 长期抗弯刚度与刚度折减系数计算	199
7.3.3 胶合木与钢材在蠕变下的变形协同作用	200
7.4 本章小结	201
参考文献	202
第8章 钢夹板螺栓连接胶合木桁架力学性能试验研究	204
8.1 静力试验	204
8.1.1 试验设计	204
8.1.2 试验过程	210
8.1.3 试验结果与分析	213
8.2 数值模拟	222
8.2.1 网格敏感性分析	222
8.2.2 有限元模型的建立	223
8.2.3 计算结果与分析	226
8.3 钢夹板螺栓连接胶合木桁架参数分析	228
8.3.1 厚径比分析	228
8.3.2 高跨比分析	230

8.3.3 钢夹板厚度分析	231
8.4 钢夹板螺栓连接胶合木桁架理论计算	232
8.4.1 钢夹板螺栓连接屈服模式	233
8.4.2 销槽承压有效长度系数及连接承载力计算	234
8.4.3 复合受力钢夹板螺栓连接节点承载力分析	235
8.5 本章小结	237
参考文献	237

第1章 绪 论

目前,我国建筑业大多采用钢材、水泥等传统建筑材料,这些材料普遍存在能量消耗大、对环境污染较严重等问题。而木材是一种天然有着温润质感的绿色、环保、可再生建筑材料。木结构建筑具有绿色生态、抗震性能好、工业化程度高、健康宜居等优势,大力发展现代木结构完全符合国家提倡的绿色、低碳、循环和可持续发展的战略目标。胶合木结构作为现代木结构的一种形式,有着优异的表现,其结构性能和材料本身的自然属性有着超脱于混凝土结构和钢结构的独特优势。胶合木结构具有绿色环保、强重比高、装配化程度高、和谐美观等优点。基于胶合木材料的优异性能,探索与之相匹配且经济性良好的适用于中高层建筑及中大跨径桥梁并符合我国国情的新型结构形式,为充分体现国家绿色、低碳、循环和可持续发展的战略需求提供新思路及可行性。

然而,由于木材既不能像混凝土进行浇筑连接,也不能像钢材通过焊接连接,木结构需要采用多种连接方式(如销类连接、铆钉、剪盘和裂环连接、齿板连接、构架连接及梁托等)来满足建筑和桥梁结构的跨度需求。为实现胶合木结构长度的跨越,通常采用螺栓连接的方式。其中,钢夹板螺栓连接就是具有代表性的一种,其构件现场安装方便,外形也相对美观。螺栓连接部位的整体受力性能直接影响胶合木结构的安全性和可靠性。钢夹板螺栓连接胶合木建筑与桥梁在设计计算、构件加工制作和现场施工安装方面亟须理论支撑。

鉴于此,结合胶合木结构的优势,研究与我国国情相适宜的工艺简单、施工方便、力学性能优越的钢夹板螺栓连接胶合木结构形式势在必行,尤其是将其应用于中高层建筑、中大跨径桥梁等工程方面,将带来极大的环保、经济和社会效益。

1.1 胶合木结构力学性能研究概况

国外胶合木结构螺栓连接研究较早且内容全面,Trayer^[1]在研究中提及中距、端距和边距会直接影响木结构螺栓连接的破坏形式。Abendroth等^[2]研究了螺栓轴向压缩荷载和螺栓螺母连接滑移荷载、平均滑移和相对滑移的关系,以解释在循环荷载作用下的疲劳破坏。Soltis等^[3]运用胶合板木纹互相交错垂直的排列方式,利用玻璃纤维层增强木材双剪螺栓连接,大幅提高连接件的承载力。Quenneville等^[4]研究发现,螺栓木结构破坏时的纵向剪应力与试件厚度和端距或螺栓间距有

关,并提出了一种预测钢-木-钢螺栓连接节点失效模式和极限强度的交替设计方法。Panta-Maunus 等^[5]通过不同防腐处理的单板层积材(laminated veneer lumber, LVL)、胶合木、云杉、工字梁等构件在自然环境和低应力水平下开展长达 8 年的弯曲蠕变试验发现,在应力水平较低的情况下,随着应力的增加,蠕变增大,且蠕变与时间呈幂函数关系。Mohammad 等^[6]对木材钢螺栓连接试件进行研究得到其基本脆性和延性破坏模式,并总结出相应的设计公式。Popovski 等^[7]通过连接件的单调静载试验和准静载循环试验,研究了两种紧固件(钢螺栓和胶合木铆钉)在重型木结构中的使用效果。Moses 等^[8]提出了一种预测单、多螺栓连接件的荷载-位移特性、应力分布、极限强度和破坏模式的有限元模型。Kharouf 等^[9]建立了一个非线性数值模型,研究了构件厚径比较低的单螺栓和双螺栓木节点的受力性能。Salenikovitch 等^[10]研究了含水率对木结构中螺栓连接件承载力的影响。Wataru 等^[11]研究了端距和螺栓直径对承载力的影响及对应的破坏形态。Enam 等^[12]对美国现有的木结构公路桥典型 T 型梁的疲劳性能进行评估,结果表明,木梁能够承受重复荷载而不受到较大的物理损伤。Pulngern 等^[13]研究了用高碳钢(high carbon steel, HCS)增强的木塑复合材料(wood plastic composite, WPC)的弯曲性能和蠕变性能。Pulngern 等^[14]还研究了温度对 WPC 力学性能和蠕变性能的影响,指出 WPC 的抗拉强度与弹性模量均随着温度的升高而降低,且力学性能对温度变化尤为敏感。Fu 等^[15]为解决 LVL 蠕变性能不稳定的问题,提出以单层 LVL 为核心层、WPC 为壳层,制造出一种新的共塑复合材料(coextruded composite, CEC)。Asyraf 等^[16]通过对纤维增强塑料(fiber reinforced plastic, FRP)增强木梁进行长期荷载试验得到木材在较高温度和湿度下具有较高的蠕变率,四元伯格(Burger)模型可有效预测木梁的蠕变特性,芬德利幂律模型(Findley power law model)可以利用应变-时间曲线进行蠕变预测。Ashraf 等^[17]的研究结果表明,半刚性节点的假设模型可以更好地预测桁架的力学行为,它不仅适用于钢桁架节点,也适用于木桁架节点。Dai 等^[18]为提高木塑复合梁的承载力,降低其弯曲蠕变特性,分别对玻璃纤维增强塑料(glass fiber reinforced plastic, GFRP)板和 GFRP 钢筋增强试验梁进行静态试验与长期弯曲蠕变试验,结果表明,GFRP 板和 GFRP 钢筋增强试验梁的极限荷载和变形分别提高了 257%和 165%,有效地降低了蠕变变形,避免了剪切破坏。Guo 等^[19]对预应力胶合木梁进行长期加载弯曲性能试验,发现预应力胶合木连续梁在长期荷载作用下的失效模式可分为拉伸失效、压缩失效、整体不稳定失效和钢丝断裂四种类型,预应力调节可以增加力矩,从而提高梁的承载力。Dubois 等^[20]对五根木柱进行为期一年的压缩蠕变试验,通过理论模型来预测 50 年的蠕变性能,与永久负荷的长期影响相对应。Lovrić Vranković 等^[21]的研究指出,胶合木在较低荷载时主要经历初始蠕变和稳定蠕变两个阶段,并未出现明显的加速蠕变;相反,更高荷载水平会使蠕变变形显著增大。Zheng 等^[22]评价了中国和加拿大的

城市中不同气候条件下对后张力木材连接件长期性能的影响。Liu 等^[23]对胶合层积竹材(glued laminated timber, GLB)在恒温恒湿条件下进行了长期测试,并利用Burger模型与五参量模型进行预测对比,结果显示,五参量模型因可引入修正因子,更能准确反映材料的非线性黏性变形过程。因此,国外早已针对胶合木结构中销连接的破坏模式、承载力计算和加强措施及蠕变性能开展了研究,并通过数值模拟对现有胶合木结构进行评估和修护。

我国对胶合木结构研究较晚,樊承谋^[24]于1982年在柯契诺夫研究的基础上对木结构螺栓连接弹塑性工作原理开展了理论研究,推导了最大弯矩计算公式并进行了简化分析,并在随后的几年中陆续开展了多项关于木结构螺栓连接方面的研究。2007年前后,杨会峰等^[25]和刘伟庆等^[26]对FRP增强胶合木梁的抗弯性能进行研究,对比分析了其与未加强梁的破坏形式和抗弯承载力;针对使用国产层板胶合木和旋切板胶合木的工程木梁,从层板组合方式、荷载方向、单板厚度和构件尺寸等方面分析其抗弯性能。2010年之后,我国研究人员展开了大量的研究工作。徐德良等^[27]对美国花旗松胶合木-胶合木单螺栓连接和群螺栓连接构件在顺纹受拉时的承载力性能进行研究,得到其极限承载力和刚度、延性系数,并分析其破坏模式和破坏机理。许清风等^[28-32]通过受火试验和数值模拟研究了胶合木梁和胶合木柱受火后的力学性能及其耐火性能的影响因素。熊海贝等^[33]研究了矩形截面梁、T型组合梁和工字型木质组合梁的抗弯性能。凌志彬等^[34-36]研究了胶合木植入螺纹钢的黏结锚固性能和影响因素,以及植筋-胶合木的黏结应力和黏结面相对滑移沿锚固长度的分布规律,并探究考虑位置函数的胶合木植筋黏结-滑移关系。王明谦等^[37,38]研究了钢填板螺栓连接梁柱节点在单调和低周反复加载下的转动性能,以及在纯弯和弯剪复合作用下的破坏机理和承载力变化。周华樟等^[39]针对胶合木网壳半刚性螺栓-钢夹板节点,分析了胶合木杆件轴压应力大小对节点域破坏模式、节点承载力、节点初始刚度和转动性能的影响,还研究了胶合木曲梁的横纹应力及开裂形态。He等^[40]研究了钢填板螺栓连接胶合木梁柱节点的转动性能,并提出了采用双头光圆螺杆和自攻螺钉增强的方式来延缓节点域木材的劈裂破坏。Xu等^[41]通过数值模拟改进了已有的木材本构模型,结合木材的弹性、塑性及脆性破坏阶段的力学行为,探究了钢填板螺栓连接胶合木销节点的延性压缩、剪切拉伸脆性行为以及钢填板螺栓连接胶合木梁柱节点的抗弯力学性能,还研究了木材生长环(年轮环)在正交各向异性中层间界面纵、径、切向造成的六种不同裂缝方向和法平面断裂系统的影响。杨会峰等^[42,43]研究了混合式植筋胶合木梁柱节点的抗震性能,以及CFRP筋预应力加固对胶合木梁抗弯性能的提升作用;此外,针对销连接木结构,研究结果表明采用预压应力螺栓和硫化橡胶钢板可以使剪应力分布均匀,从而提高承载力。赵艺等^[44]研究了在钢填板梁柱螺栓节点中引入预应力套管对抗弯承载力的增强效果。祝恩淳等^[45-48]针对现代胶合木,研究了

轴心受压木构件稳定系数的统一算法、不同强度等级木材组合结构的承载力统一算法、钢填板螺栓连接胶合木梁柱抗弯承载力的计算式等,对我国现行规范进行补充和改进。宋晓滨等^[49]基于断裂力学提出了一种计算木结构螺栓节点横纹抗拉承载力的计算方法。戈禧芸等^[50]制作了一种节点采用自攻螺钉连接的平行弦木桁架,以不同角度钉入螺钉,探究螺钉钉入角度对平行弦木桁架受拉节点力学性能的影响。曹正罡等^[51]通过大断面胶合木张弦曲梁及拼接节点进行足尺试验,研究了张弦曲梁的受力机理、承载能力以及宏观、微观结构响应,结果表明拼接节点受力合理、连接可靠,跨度为 30m 的张弦曲梁施加预应力后,其竖向刚度显著提高,变形减小,受力性能良好。左宏亮等^[52]通过试验对比不同置换率和荷载的重组竹板增强胶合木梁长期抗弯性能,发现置换率一定时,随着荷载的增加,胶合木梁的初始挠度和蠕变均增大,变形速率也增大。加载比例一定时,提高置换率可以减小胶合木梁的挠度。强明礼等^[53]研究了腹杆角度对平行弦木桁架承载性能的影响,分析了平行弦木桁架在不同腹杆角度下的极限荷载、受力分布规律和主要破坏形式。刘燕燕等^[54]通过对集成竹进行恒温恒湿条件下 500h 拉伸蠕变试验,研究了不同应力水平下集成竹顺纹拉伸蠕变行为及变化规律,并采用 Findley 蠕变模型对蠕变曲线进行模拟,构建了跨度 50 年的蠕变主曲线。

综上所述,国内的研究集中在钢填板螺栓连接胶合木构件以及纯胶合木梁的增强上,对钢板、螺栓与胶合木节点的研究已比较全面,但对大跨度胶合木结构的研究相对较少,如木桁架和木拱等,故需要胶合木在连接接长方面实现跨越,才能进一步推动我国从中低层建筑及中小跨径桥梁向大跨度现代胶合木结构转变。

1.2 本书主要研究内容及意义

为实现胶合木结构在长度上的进一步跨越,需借助金属连接件予以接长。本书以钢夹板螺栓连接这一性能可靠、施工方便、外形美观的连接件为代表,研究胶合木接长后的各项力学性能是否满足中大跨径结构的要求。考虑到钢夹板、螺栓与胶合木之间的材料性能差异以及内力、应力分布受到多种因素的耦合作用,开展胶合木-钢夹板螺栓连接件的抗弯、抗剪性能试验研究。对胶合木梁来讲,采用钢夹板螺栓连接实现了长度的跨越,但结构的力学性能因此发生了相应的改变,故在连接件研究的基础上,制作钢夹板螺栓连接胶合木梁,对钢夹板螺栓连接胶合木梁的抗弯、抗剪性能进行试验研究,结合试验结果建立多尺度精细化有限元模型,探讨各种参数对钢夹板螺栓连接胶合木梁力学性能的影响,得出最优设计参数。经过以上试验与分析,得出钢夹板螺栓连接胶合木梁性能优越,但同时也存在跨度受限、整体变形较大等问题,无法应用于对承载力需求更高和更大跨径

的结构中。据此,设计制作出多种类型的钢夹板螺栓连接胶合木桁架,对其力学性能进行试验研究,分析其破坏机理,并根据试验结果进行有限元模拟参数分析,充分证明钢夹板螺栓连接胶合木桁架结构在跨度与整体变形等方面的提升。由于钢夹板螺栓连接胶合木梁会受到后期蠕变和荷载循环往复作用的影响,本书进行了疲劳和长期蠕变力学性能试验研究,基于累积损伤理论分析疲劳寿命衰减规律及刚度退化特性,并开展三年期蠕变试验,结合实时监测数据建立钢夹板螺栓连接胶合木梁的应变时程曲线,探明蠕变作用下其应力及挠度变化规律。

本书全面揭示了钢夹板螺栓连接胶合木结构的力学性能,旨在为胶合木结构在中高层建筑和中大跨径桥梁方面的应用与推广提供科学依据,助力我国绿色建筑及交通基础设施建设的可持续发展。

参 考 文 献

- [1] Trayer G W. The bearing strength of wood under bolts. Washington D.C.: US Department of Agriculture, 1932.
- [2] Abendroth R E, Wipf T J. Cyclic load behavior of bolted timber joint. *Journal of Structural Engineering*, 1989, 115 (10): 2496-2510.
- [3] Soltis L A, Ross R J, Windorski D F. Fiberglass-reinforced bolted wood connections. *Forest Products Journal*, 1998, 48 (9): 63.
- [4] Quenneville J H, Mohammad M. On the failure modes and strength of steel-wood-steel bolted timber connections loaded parallel-to-grain. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2000, 27 (4): 761-773.
- [5] Panta-Maunus A, Kortessmaa M. Creep of timber during eight years in natural environments// *Proceedings of the 6th World Conference on Timber Engineering*, Vancouver, 2000.
- [6] Mohammad M, Quenneville J H. Bolted wood steel and wood steel wood connections: Verification of a new design approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2001, 28 (2): 254-263.
- [7] Popovski M, Prion H G L, Karacabeyli E. Seismic performance of connections in heavy timber construction. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2002, 29 (3): 389-399.
- [8] Moses D M, Prion H G L. A three-dimensional model for bolted connections in wood. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2003, 30 (3): 555-567.
- [9] Kharouf N, McClure G, Smith I. Postelastic behavior of single and double-bolt timber connections. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131 (1): 188-196.
- [10] Salenikovitch A, Legras B, Mohammad M, et al. Effect of moisture on the performance of bolted connections in timber structure//*Proceedings of the 11th World Conference on Timber Engineering*, Trentino, 2010.

-
- [11] Wataru K, Naoyuki I, Yasuo I. A study of bearing strength with different end-distance, bolt-diameter and wood species//Proceedings of the 11th World Conference on Timber Engineering, Trentino, 2010.
- [12] Enam M, Mtenga P, Tawfiq K, et al. Behavior of structural composite lumber T-beam bridge girders after fatigue loading. *Journal of Bridge Engineering*, 2011, 16 (3) : 471-478.
- [13] Pulngern T, Padyenchuan C, Rosarpitak V, et al. Flexural and creep strengthening for wood/PVC composite members using flat bar strips. *Materials & Design*, 2011, 32 (6) : 3431-3439.
- [14] Pulngern T, Chitsamran T, Chucheeesakul S, et al. Effect of temperature on mechanical properties and creep responses for wood/PVC composites. *Construction and Building Materials*, 2016, 111: 191-198.
- [15] Fu H T, Dun M Y, Wang H G, et al. Creep response of wood flour-high-density polyethylene/laminated veneer lumber coextruded composites. *Construction and Building Materials*, 2020, 237: 117499.
- [16] Asyraf M R M, Ishak M R, Sapuan S M, et al. Woods and composites cantilever beam: A comprehensive review of experimental and numerical creep methodologies. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9 (3) : 6759-6776.
- [17] Ashraf M, Jobaer Hasan M, Al-Deen S. Semi-rigid behaviour of stainless steel beam-to-column bolted connections. *Sustainable Structures*, 2021, 1 (1) : 000002.
- [18] Dai B B, Huo R L, Wang K, et al. Study on bending creep performance of GFRP-reinforced PVC-based wood-plastic composite panels. *Polymers*, 2022, 14 (22) : 4789.
- [19] Guo N, Zhang Y N, Mei L D, et al. Experimental study on flexural performance of the prestressed glulam continuous beam after long-term loading. *Buildings*, 2022, 12 (7) : 895.
- [20] Dubois F, Dopeux J, Pop O, et al. Long-term creep behavior of timber columns: Experimental and numerical protocols. *Engineering Structures*, 2023, 275: 115283.
- [21] Lovrić Vranković J, Boko I, Uzelac Glavinić I, et al. The time-dependent behavior of glulam beams from European hornbeam. *Buildings*, 2023, 13 (7) : 1864.
- [22] Zheng X Z, Lam F, Li Z, et al. Long-term performance assessment of post-tensioned timber connections under different climates. *Construction and Building Materials*, 2023, 368: 130360.
- [23] Liu Y Y, Wang W D, Xu S, et al. Characterization and modeling of creep behavior of glued laminated bamboo. *Polymer Composites*, 2024, 45 (4) : 2954-2964.
- [24] 樊承谋. 木结构螺栓联结的工作原理及计算公式: 关于国际木结构设计规范第五稿螺栓联结计算公式. *哈尔滨建筑工程学院学报*, 1982, 15 (1) : 18-36.
- [25] 杨会峰, 刘伟庆. FRP 增强胶合木梁的受弯性能研究. *建筑结构学报*, 2007, 28 (1) : 64-71.
- [26] 刘伟庆, 杨会峰. 工程木梁的受弯性能试验研究. *建筑结构学报*, 2008, 29 (1) : 90-95.
- [27] 徐德良, 刘伟庆, 周叮, 等. 胶合木与胶合木螺栓连接力学性能试验研究. *建筑结构学报*,

- 2011, 32(7): 93-100.
- [28] 许清风, 李向民, 穆保岗, 等. 石灰膏抹面木梁受火后受力性能静力试验研究. 建筑结构学报, 2011, 32(7): 73-79.
- [29] 许清风, 李向民, 张晋, 等. 木梁三面受火后力学性能的试验研究. 土木工程学报, 2011, 44(7): 64-70.
- [30] 许清风, 李向民, 张晋, 等. 木柱四面受火后力学性能的试验研究. 土木工程学报, 2012, 45(3): 79-85, 173.
- [31] 张晋, 许清风, 李维滨, 等. 木梁四面受火炭化速度及剩余受弯承载力试验研究. 土木工程学报, 2013, 46(2): 24-33.
- [32] 陈玲珠, 许清风, 胡小锋. 四面受火胶合木中长柱耐火极限试验研究. 建筑结构学报, 2020, 41(1): 95-103.
- [33] 熊海贝, 康加华, 吕西林. 木质组合梁抗弯性能试验研究. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 522-528.
- [34] 凌志彬, 杨会峰, 刘伟庆, 等. 胶合木植筋黏结锚固性能试验研究. 建筑结构学报, 2013, 34(9): 132-141.
- [35] 凌志彬, 刘伟庆, 杨会峰, 等. 考虑位置函数的胶合木植筋粘结-滑移关系研究. 工程力学, 2016, 33(3): 95-103.
- [36] Ling Z B, Liu W Q, Lam F, et al. Bond behavior between softwood glulam and epoxy bonded-in threaded steel rod. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(3): 06015011.
- [37] 王明谦, 顾祥林, 宋晓滨, 等. 胶合木梁柱嵌入钢板-螺栓拼接节点纯弯与弯剪性能试验研究. 建筑结构学报, 2016, 37(4): 64-72.
- [38] Wang M Q, Song X B, Gu X L, et al. Rotational behavior of bolted beam-to-column connections with locally cross-laminated glulam. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(4): 04014121.
- [39] 周华樟, 祝恩淳, 刘志周. 胶合木网壳半刚性节点受力性能试验研究. 建筑结构学报, 2015, 36(3): 106-111.
- [40] He M J, Liu H F. Comparison of glulam post-to-beam connections reinforced by two different dowel-type fasteners. Construction and Building Materials, 2015, 99: 99-108.
- [41] Xu B H, Wang Y X, Zhao Y H, et al. Influence of growth ring orientation on the interlaminar fracture toughness in glued-laminated timber. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(5): 04016001.
- [42] 杨会峰, 凌志彬, 刘伟庆, 等. 单调与低周反复荷载作用下胶合木梁柱延性抗弯节点试验研究. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 131-138.
- [43] Yang H F, Liu W Q, Lu W D, et al. Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams Experimental and theoretical evaluation. Construction and Building Materials, 2016, 106:

550-563.

- [44] 赵艺, 何敏娟, 马人乐. 胶合木预应力套管螺栓群连接梁柱节点受弯承载力及参数分析. 建筑结构学报, 2016, 37(10): 18-26.
- [45] 祝恩淳, 武国芳, 张笛, 等. 轴心受压木构件稳定系数的统一算法. 建筑结构学报, 2016, 37(10): 10-17.
- [46] 祝恩淳, 潘景龙, 周晓强, 等. 木结构螺栓连接试验研究及承载力设计值确定. 建筑结构学报, 2016, 37(4): 54-63.
- [47] 祝恩淳, 牛爽, 乔梁, 等. 木结构可靠度分析及木材强度设计值的确定方法. 建筑结构学报, 2017, 38(2): 28-36.
- [48] 祝恩淳, 王笑婷, 牛爽, 等. 木结构钢板螺栓连接节点承载力计算分析及试验研究. 建筑结构学报, 2020, 41(1): 113-121.
- [49] 宋晓滨, 唐践扬, 罗烈. 基于断裂力学的木结构螺栓节点横纹受拉承载力算法研究. 建筑结构学报, 2018, 39(S2): 228-232.
- [50] 戈禧芸, 蔡雨, 陈志坚, 等. 斜螺钉连接的平行弦木桁架节点抗拔性能. 林业科学, 2020, 56(12): 136-144.
- [51] 曹正罡, 万宗帅, 杨寒, 等. 大断面胶合木张弦曲梁及拼接节点静载受弯试验研究. 土木工程学报, 2020, 53(7): 43-51.
- [52] 左宏亮, 胡斌, 刘翰然. 蠕变对重组竹板增强胶合木梁长期受弯性能的影响. 东北林业大学学报, 2021, 49(12): 115-119.
- [53] 强明礼, 韩善宇, 赵子宇, 等. 腹杆角度对平行弦木桁架受力性能的影响. 建筑结构学报, 2022, 43(3): 188-196.
- [54] 刘燕燕, 盛宝璐, 黄东升, 等. 集成竹拉伸蠕变性能加速试验[J]. 复合材料学报, 2024, 41(2): 990-1000.

第2章 胶合木-钢夹板螺栓连接件抗剪性能 试验研究

为实现现代木结构构件长度的跨越,解决现代木结构构件接长问题,推广国产胶合木在工程领域的应用^[1-6],本章以国产东北落叶松胶合木-钢夹板螺栓连接件为研究对象,采用试验研究、理论分析和数值模拟相结合的方法对胶合木-钢夹板螺栓连接件的抗剪性能进行探讨。主要研究工作包含以下几个方面:

(1) 针对木结构中胶合木-钢夹板螺栓连接件的构造特点,考虑胶合木厚度与螺栓直径之比(厚径比)、螺栓顺纹间距及螺栓排列方式三个因素的影响,设计 3 类 17 组试件。

(2) 结合现有木结构研究与规范,针对胶合木-钢夹板螺栓连接件的双剪螺栓连接结构破坏模式,对单螺栓连接的承载力进行计算,推导出抗剪承载力计算公式。

(3) 通过对比试验构件有限元计算结果与试验结果,验证试验方案的合理性,同时也验证有限元计算结果的可靠性。

(4) 针对现有木结构螺栓连接三维有限元模型计算效率低、收敛性差等问题,提出一种有限元宏观建模方法。

2.1 材性试验

2.1.1 木材含水率及密度的测量

木材强度受木材密度的影响很大,对同一树种而言,其强度与密度之间的关系更加紧密。当木材的含水率小于其纤维饱和点(约 30%^[7])时,含水率越低,木材的强度和弹性模量越高,并且它对抗拉强度、抗弯强度和抗压强度的影响程度均不同。当木材含水率大于纤维饱和点时,木材强度基本不受含水率的影响。

对东北落叶松而言,其顺纹抗压强度 f_c 的计算公式为

$$f_c = 1191.75\rho_{\text{气}} - 209 \quad (2.1)$$

式中, $\rho_{\text{气}}$ 为木材的气干密度, g/mm^3 。

为了得到木材的密度和含水率,从木材中分别提取并制作 10 个尺寸均为 $20\text{mm}\times 20\text{mm}\times 20\text{mm}$ 的试件,按照《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第 4 部分:含水率测定》(GB/T 1927.4—2021)^[8]和《无疵小试样木材物理力学性质试

验方法 第 5 部分：密度测定》(GB/T 1927.5—2021)^[9]的规定进行试验测试。

将试件在温度为 103℃±2℃下烘干 8h 后，测定其质量(表 2.1)，再按式 (2.2) 计算木材的含水率(表 2.2)。

$$W = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \tag{2.2}$$

式中， W 为试件含水率，%； m_1 为试件烘干前质量，g； m_0 为试件烘干后质量，g。

表 2.1 试件质量

试件编号	m_1/g	m_0/g
1	4.61	4.14
2	4.62	4.24
3	4.71	4.18
4	4.85	4.40
5	5.09	4.50
6	4.45	4.02
7	4.54	4.01
8	3.92	3.54
9	4.50	4.02
10	4.71	4.24

表 2.2 试件含水率

试件编号	含水率/%	平均含水率/%	标准差	变异系数/%
1	11.35	11.40	1.35	11.89
2	8.96			
3	12.68			
4	10.23			
5	13.11			
6	10.70			
7	13.22			
8	10.73			
9	11.94			
10	11.08			

试件气干密度的计算公式为

$$\rho_{\text{气}} = \frac{m_1}{V} \tag{2.3}$$