

国内外新一代重型 CLT 木结构建筑技术研究进展

王韵璐^{1,2}, 曹瑜¹, 王正^{1*}, 王建和²

(1. 南京林业大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 宁波中加低碳新技术研究院, 浙江 宁波 315600)

摘要:正交胶合木(CLT)是新型的工程木制品,是新一代重型装配式木结构建筑体系的基本单元和预制构件,目前备受国内外关注。为推动中国建筑形式的多元化和 CLT 装配式建筑的发展,文中分析了 CLT 建筑预制构件的独特优势,重点介绍了欧美发达国家在 CLT 材料工艺与性能、CLT 构件的结构设计、CLT 建筑的结构设计、CLT 节点连接技术等方面的最新研究进展及其成果。在收获其启示和借鉴作用的基础上。通过学习国外新一代重型 CLT 木结构建筑的技术成果和成功经验,提出了加强高校教育与人才培养工作,造就一大批木结构建筑专业人才;行业部门要加快 CLT 的结构、材料、制造、安装等专业标准的制订与贯标工作;产学研有效合作;企业要重视信息化、标准化和集成化体系工作,强化人才团队建设;加大有效的宣传力度;高度重视建筑安全与耐久技术的攻关,尤其强化结构形式、结构用材、节点连接、耐久性和结构健康监测技术工作;充分利用当地木材和竹材资源来生产重型竹木复合预制板(或竹木复合 CLT)等八条符合我国国情的发展 CLT 装配式木结构建筑的主要措施,以期提升我国 CLT 预制构件及重型木结构建筑体系的基础研究和应用水平,促进中国木结构建筑事业健康、快速地发展。

关键词:正交胶合木(CLT);重型装配式建筑;结构设计;预制构件;研究进展

中图分类号:TS633 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)02-0286-08

Research Progress of the New Generation of Heavy CLT Wood Structure Building Technology

WANG Yun-lu¹, CAO Yu¹, WANG Zheng^{1*}, WANG Jian-he²

(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China;
2. Ningbo China&Canada Carbon New Technology Research Institute, Ningbo, Zhejiang 315600, China)

Abstract: AS a new type of wood products, Cross-laminated wood (CLT) has been received much attention at home and abroad. CLT is the basic unit and precast component in new generation of heavy prefabricated building system. To promote the development of Chinese architectural style diversification and CLT assembly building, this paper introduced the advances in the researches of CLT from the aspects of material technology and performance, structure design in components, structure design in buildings, and joint connection technology. The following suggestions were proposed: to learn the achievements and successful experience of this new technology; to train personnel majoring in wood structure the universities in China; to speed up the process of making the professional standards in CLT structure, materials, fabrication, and installation; to strengthen the effective cooperation between universities and enterprises; to pay attention to information technology, standardization and integration of the system work within the enterprise; to strengthen the talent team construction; to increase the effective propaganda; to pay attention to the safety and durability of building technology, the structure form, structure material, connection, durability and structural health monitoring technology to the production of heavy work, and structural health monitoring technology; to use local woody and bamboo resources to develop CLT assembly type wooden structure buildings, which are in

收稿日期:2016-08-31 修回日期:2016-11-22

作者简介:王韵璐,女,硕士,研究方向:木结构建筑与工程。E-mail:wyl_12@126.com

*通信作者:王正,男,高级工程师,博士,研究方向:木结构建筑与工程。E-mail:wangzheng63258@163.com

accordance with the national conditions of our country; to raise the level of application and the basic research about the heavy CLT prefabricated building system, and to promote the healthy and rapid development of the cause of China wood structure building.

Key words: cross-laminated timber (CLT); heavy prefabricated building; architectural design; prefabricated component; research progress

近年来,在欧美发达国家,以锯材为基本单元制成的新型建材——正交胶合木(cross laminated timber,简称 CLT)为代表的新一代重型木结构建筑体系,正在部分取代钢筋混凝土和砖混结构建筑,广泛应用于建造低、中层甚至高层的民用住宅和公共建筑等非民用建筑。由于 CLT 很容易实现工厂预制,现场组装,并解决了传统木结构建筑的层高限制,被誉为建筑业的“第二次文艺复兴”。

CLT 这种新型的工程木制品最早诞生于 20 世纪 90 年代,由奥地利和德国建造了全球第一栋使用 CLT 预制构件建造的新一代重型木结构建筑。近 10 a 来,CLT 及其重型木结构建筑体系在欧美地区得到迅猛发展,新的 8~10 层的 CLT 木质结构建筑,在意大利、英国、加拿大和澳大利亚等国纷纷兴建;世界主要的建筑工程公司奥雅纳公司(ARUP)和金茂大厦设计公司(SOM)等都致力于该领域发展,使得 CLT 重型木结构建筑的发展前景非常光明。

鉴于此,通过对国外新一代重型 CLT 木结构建筑技术的最新成果进行总结,介绍其研究进展,以期帮助尽快提升我国 CLT 的基础研究和应用技术水平,推动重型 CLT 木结构建筑的发展。

1 CLT 建筑简介

CLT 是一种新型的工程木产品由 3 层及以上实木锯材或结构复合板材垂直正交组坯或成一定角度组坯,采用结构胶黏剂压制而成,主要用于木结构房屋的墙板、屋板、楼板等(图 1)。



图 1 典型的正交胶合木 CLT 结构

Fig.1 Typical structure of cross-laminated timber

CLT 的制造工艺通常是将厚度为 15~35 mm 针叶材规格锯材通过分等、铺层、涂胶、纵横交错层积和加压胶合等工序制成的新型工程木制品。CLT 是由至少 3 层的实木锯材或结构复合材材(struc-

tural composite lumber,简称 SCL)正交组坯采用结构胶黏剂压制而成的,其幅面大,规格可达 18 m (长)×3 m (宽)×300 mm(厚度)。

CLT 及其重型木结构建筑体系与传统钢筋混凝土、砖混结构和轻型木框架结构建筑体系相比,如图 2 所示,其优势明显:1)尺寸稳定性好。CLT 通过纵横正交铺装和控制单元的含水率可显著提高板材结构的尺寸稳定性;2)承载性能强。CLT 的物理力学性能在纵横 2 个方向上较均匀,同时通过在制造过程中去除层积单元的缺陷,可显著提高设计强度值。同时该板轻质高强,可充分发挥木材强重比高的特点;3)防火性能高。CLT 燃烧后形成的表面炭化层,可有效阻隔火焰的进一步传播,不加防火层也可达到耐火 1 h 的要求;4)隔音、保温性能好。由于木材的低热传导性和 CLT 的连续大幅面特征,可保证建筑良好的气密性和隔音保温隔热效果。CLT 建筑具有很高的保温节能综合效应,比用钢材和水泥分别降低至少 17% 和 16% 的能源消耗及减少 26% 和 31% 的温室气体效应;5)建造快和噪音低。与传统钢筋混凝土结构相比,由于 CLT 可在工厂实现模块化生产,预制成各类墙板、楼板及屋顶板。在现场进行组装与建造,用以取代现浇钢筋水泥制品和水泥预制板。因此其组装快,工期短,同时建筑现场噪音低,无污染,无建筑垃圾产生,拆卸后可重新回用;6)应用范围广。可用于低、中层甚至高层(20 层以上)的民用住宅和非民用建筑,可完全代替传统钢筋混凝土和砖混结构,也可部分代替,与钢筋混凝土等混合使用应用;7)低碳、固碳、环保。计算结果表明,生产 1 m³ CLT 材料只排放 110 kg CO₂,而原材料本身存储 825 kg CO₂,因此净储 715 kg CO₂ m⁻³。生产制造过程中,CLT 的温室气体排放仅为钢材的 1/20。显然上述这些优势将有力推动 CLT 建筑产业化发展。

近年来世界著名的新一代重型 CLT 木结构建筑比比皆是,口碑十足(图 3)。如 2009 年,伦敦对外开放了采用 CLT 作为承重墙和地板的 Stadthaus 公寓。同时,建成的 9 层高全木结构的默里格罗夫住宅大楼使用的建筑材料也是 CLT,整个施工时间只有 4 个月左右,远少于常规混凝土施工所花费的时间。2011 年,还在伦敦的 Stadthaus 公寓附近建

造了1栋7层公寓。2012年,墨尔本建成10层高的Forté CLT公寓,取代了Stadthaus,成为当时的“世界最高木楼”。2014年,中国台湾建成了亚洲第1栋CLT木建筑——森科总部大楼。值得一提的是,位于加拿大哥伦比亚省UBC大学校园内的Brock Commons公寓楼预计于2016年底完工。这座18层的公寓大楼高达53 m,占地面积15 115 m²(图4),比相同当量的建筑节能能效25%;此公寓楼大量使用CLT预制构件替代2 650 m³混凝土材

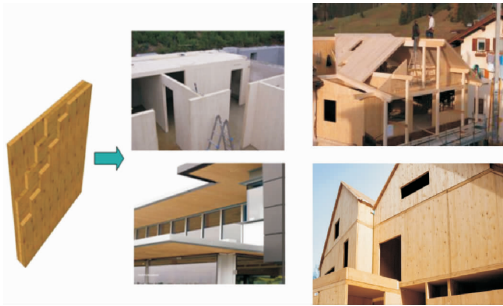


图2 新一代重型CLT木结构建筑

Fig. 2 A new generation of heavy type CLT wood structure building

料,相当于减少约5 000 t的CO₂排放。由此看来,CLT通过与其他材料合理搭配,可打破传统木结构建筑受层高限制及容积率低的问题,成为了建筑材料的新宠。目前北美《CLT手册》和CLT产品标准已正式制定,并正式颁布了重型木结构建筑设计规范,在多地建造了各类CLT建筑。这些标准、手册和设计规范的出台,为CLT建筑在低、中层甚至高层的民用住宅和非民用建筑中的推广应用打下坚实基础。



图3 南洋理工大学CLT多功能体育馆

Fig. 3 CLT multi-function Gymnasium in Nanyang Technology University

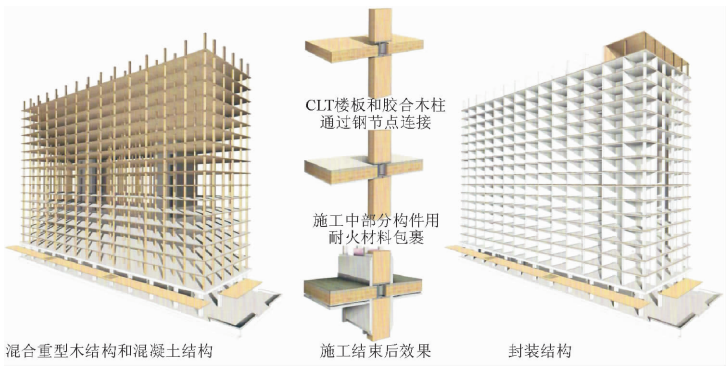


图4 温哥华UBC大学校园内18层的Brock Commons公寓楼

Fig. 4 The 18 floors' Brock Commons apartment building in Vancouver UBC University Campus

CLT轻质高强,可充分发挥木材强重比高的优势,很容易实现模块化生产,在工厂预制成各类墙板、楼板及屋面板,现场组装,建造周期短,抗震/隔音/保温,防火性能好,同时舒适美观,适合在中国城镇化和农房工业化项目中进行示范和推广。国外对木材CLT的研究无论从广度或深度都达到了很高的水平,而我国对于木材CLT的研究还处于起步阶段,至今仅有北京科技大学、长安大学、南京林业大学等科研院校针对木桥用CLT和建筑用CLT进行了初步的实验室研究。目前国内CLT的应用仅在桥梁上,且仅有铜川市耀州区绣房沟薛家寨景观的桥。但最近,宁波中加低碳新技术研究院已研发成功适合中国国情的第一条具有独立知识产权的木材CLT预制板中试生产线,填补了国内空白,并

实现了CLT高端装备的中国制造。目前我国针对木材CLT建筑的规范已经立项,《木结构设计规范》(GB50005)^[1]的最新修订版拟将补充木材CLT结构的相关内容。

2 CLT材料与构件

2.1 CLT材料工艺与性能

2008年,Steiger^[2]等对Gsell^[3]等的程序进行深入研究。为了能更好地应用于实践中,采用42块不同尺寸、不同形状和不同生产商的CLT试件进行测试与对比,验证了其程序的可行性,并将该程序应用于工厂生产。研究表明,一方面,其程序并不受生产工艺与机器的影响;另一方面,提出了减少激励点和用气流支撑代替悬挂这2种方法,并进行了验证,

使 Gsell 的程序更适合于工程实际。2013 年,陈玲^[4]介绍了日本与 CLT 的有关的标准草案以及政策;同年,还介绍了 Stora 公司的 CLT 的性能,及其多个 CLT 建筑的案例^[5]。2014 年,Kramer^[6]等提出了采用森林管理委员会认证的人工林杂交杨树制作 CLT 的研究,同时按照标准绩效法评价 CLT 板的刚度,如图 5 所示,并确定其结构设计的可行性。结果表明,低密度的人工林杂交杨木 CLT 将可达到或超过其剪切强度和弯曲强度要求;然而杂交杨树不符合其刚度要求(MOE)。这些强度和刚度的测试结果表明,杂交杨树 CLT 具有较高的比强度。同年 Zhou^[7]等用厚度 38~89 mm 的 3 层黑云杉 CLT 试件,通过使用双平面剪切试验测试其滚动剪切模量,得到试件的平均滚动剪切模量为 136 MPa。随后将其滚动剪切模量值作为输入,使用剪切类比法,预测此时 3 层 CLT 梁承受集中弯曲载荷时的挠度值。最后通过弯曲试验获得此时梁的挠度并对其进行验证,这为 CLT 研究提供了一个良好的数值估计与验证方法。此外,弯曲试验结果表明,该试件的宽度没有显著地影响其弹性模量和剪切模量。2016 年,Flores^[8]等研究了基于多尺度方法与内聚力模型研究了 CLT 板的滚剪破坏。一方面,为了预测其结构响应,在一个纯粹的运动学的多尺度模型框架中,采用四个空间尺度。文中的多尺度建模方法结合了材料的纳米级(木材细胞壁的尺度)、微米(木材细胞尺度)和毫米(年轮的尺度)信息。另一方面,试验采用智利的辐射松制作的单层木板与 CLT 板进行 3 点弯曲试验,与预测值进行比较,并分别研究侧边胶合、木材密度和跨厚比对其滚切剪力的影响。试验结果表明,数值预测和试验结果间的一致性很好。同年,龚迎春^[9]介绍了 CLT 的加工工艺、特性、工程应用及在我国的发展机遇,结合目前我国经济社会发展现状阐明了 CLT 在中国市场的发展方向。

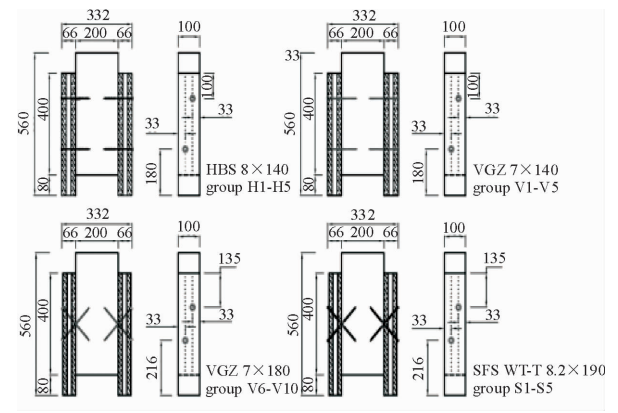
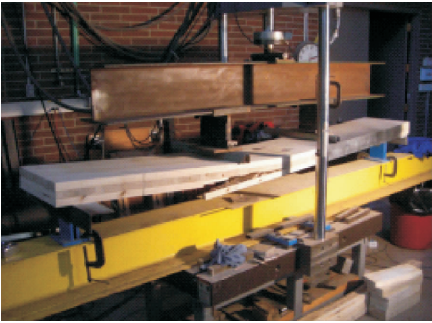


图 5 推覆试验试件(mm)

Fig. 5 Push-over testing specimen (mm)

2.2 CLT 构件的结构设计

为了满足 CLT 构件的尺寸稳定性和力学性能,如整体性和双向力学性能要求,该材料的结构设计应满足对称原则和奇数层原则。在对 CLT 构件的多年结构设计中,国外专家学者成果斐然。2007 年,Gsell^[8]等利用自主研发的全自动化程序来确定 CLT 的整体弹性常数。该程序先采用模态分析确定 CLT 的共振频率和振型;然后依据基于 Reddy 分析模型的高阶板壳理论建立其正交线性模型;最后通过非线性优化算法计算 CLT 的固有频率及其振型。该研究还对挪威云杉制作的厚 50 mm 的 3 层 CLT 试件进行了试验,其结果表明:计算得到的 CLT 的面内的 2 个弹性模量与 3 个剪切模量值,与其静态弯曲试验结果基本吻合,说明了 CLT 可用一个正交的均质线弹性模型来描述其试件的弹性特性。2010 年,Stürzenbecher^[10]等为了支持 CLT 这种高性能工程木制品的良好发展,加强其竞争力,对其进行结构设计优化的研究工作。从力学角度来看,CLT 是多层的、各向异性和剪切柔性的复合材料。由于复合材料层板和心板结构设计不同,CLT 存有实际的变形,因此该文作者利用经典的板壳理论,其计算的结果与精度得到了证明。结果表明,CLT 板的各层单元的铺层、各向异性材料的行为和横截面翘曲特性可使设计者更好地了解其力学性能,这将有助于 CLT 可靠的结构设计。2012 年,Zhou^[11]等通过三点弯曲法的变跨度的缩尺试验进行 CLT 的滚动剪切模量的测量研究,并研究了纵跨比以及锯截方向对 CLT 滚动剪切模量的影响。文中分别采用了 2 种夹心试件:钢-木-钢(SWS)和木-木-木(WWW)。研究结果发现,剪切类比法可预测真实的剪切模量,并得到试验验证。2014 年,王志强^[12]用花旗松、辐射松和杨木,即将杨木置于芯层,花旗松或者辐射松置于表层,压制单一树种和混合树种 CLT,对材料进行顺纹抗弯、顺纹抗剪和横纹抗剪性能测试,试验表明,花旗松与杨木混合 CLT 的抗弯弹性模量高于纯杨木 CLT;包含杨木和不包含杨木的不同树种 CLT 顺纹抗弯强度及抗剪强度差别不大,试件破坏形式与 CLT 材料和结构形式有很大联系,主要包含指接处破坏、胶层分层和垂直层滚动剪切破坏等。2015 年,Sebera^[13]等为了研究 CLT 面板受扭转时的力学性能,在试验基础上,同时采用光学测量中数字图像相关关系(DIC)与有限元法(FEM)的数值模拟如图 6 所示。结果表明,进行 CLT 面板的扭转试验时应首先计算与分析其表面产生的位移;由于将 DIC 测量与 FEM 分析相结合能提供一个完整的区域模型验证,因此有利于



$$MOR=\frac{P_{max}L}{bh^2}$$

$$MOE=\frac{23PL^2}{108bh^2\Delta}$$

图 6 测试装置、计算公式与试件破坏

Fig. 6 Testing device, calculation formula and test broken

CLT 产品的结构设计。同年, Branco^[14] 等对 5 种木地板进行了测试研究, 以分析这些结构系统的面内行为, 如图 7 所示, 其主要目的是利用 CLT 板来加强结构系统中的面内刚度。结论表明, 木地板中内使用 CLT 板是增加木材在楼层平面内刚度的一种有效方法; 通过采取对复合材料的结构性能优化等手段可显著改善其力学性能。还有陈玲^[15] 介绍了日本关于 CLT 的推广规划, 以及 CLT 一些性能研究的介绍。

3 CLT 建筑的结构设计

CLT 的一大显著特点为可以模块化预制, 通过

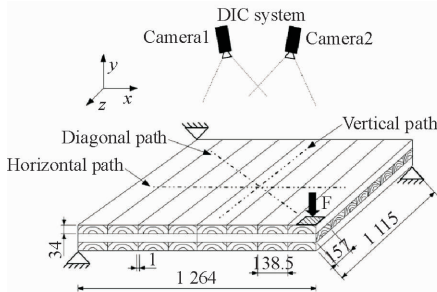
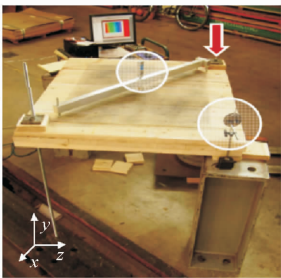


图 7 试验装置

Fig. 7 Testing device diagram



直接锯切和门窗等铣削加工后作为建筑的外墙、楼板等使用, 并通过合理的结构设计达到很好的连结, 抗震, 隔音, 保温, 防火和耐久等使用性能。因此, CLT 建筑的结构设计工作非常重要, 不仅可为重型木结构建筑提供灵活的设计方案, 而且还能获得高性价比和强有力的竞争力。

3.1 CLT 建筑的结构设计

2010 年, 高诣民^[16] 总结概括了木结构桥面板的类型、特点及应用情况, 提出一种基于 CLT-木板与钢梁组合的新型桥面系, 研究 CLT 钢木组合的连接方式, 采用 ANSYS 对 CLT 木桥面板进行了有限元模拟, 并对不同叠合层数、不同边界条件、不同长宽比下的 CLT 板与未叠合的单向顺纹木板进行了比较, 同时比较了不同规格材对 CLT 板静力性能的影响, 对 CLT 钢木组合体系进行了工程试应用研究。结果表明, 钢木组合体系具有良好的双向力学性能, 降低桥面板的自重, 提高桥梁的跨越能力, 综合考虑桥面板全寿命过程—施工、运营维护及后期的维修加固, 钢木组合体系将具有很大的优势。2011 年 Kuilen^[17] 等发现, 尽管 CLT 板在市场上发展迅速, 但其未能完全展现出应有的结构性能。该文提出利用混凝土与 CLT 相结合来建造一个高层建筑, 期望设计一个木材与混凝土结合的摩天大厦。文中分析了如何利用混凝土和 CLT 墙来组合设计高达 150

m 范围内的非常高的框架型建筑物, 其中 CLT 使用比例超过 80%。该优化设计利用了轻质建筑构件的优点, 具有可靠的结构性能; 与传统的混凝土构件相比, 可大大节省建造时间和成本, 节能和环保方面表现也非常突出。文章还根据中国风的荷载规范, 对上海的位置等进行了分析, 期望在上海建造一个 CLT 与混凝土结合的摩天大楼。2012 年, Ash-tari^[18] 等探讨了 CLT 模块的平面刚度和建筑物所在地的横向荷载分布, 并研究了其测试板的连接性能。此研究用 ANSYS 软件数值模拟平面 CLT 的刚度参数、剪力墙抗侧力以及横向荷载分布, 由地板模型扩展到建筑模型, 通过添加抗剪力墙和横向荷载分布满足对每个建筑模型的研究。此数值模型的一个主要优点是简单, 且不影响计算精度。

3.2 CLT 节点连接技术

2009 年, Vessby^[19] 等研究了 5 层 CLT 的结构性能。其 5 层 19 mm 厚的板, 采用正交组坯, 利用聚氨酯胶粘剂胶合。文中对 CLT 面内弯曲刚度和强度, 以及 2 种连接方式进行了研究。测试结果表明, CLT 具有很高的刚度和强度; 2 种连接方法中, 瑞典常用的一种连接方法结构性能表现较差; 而另一种替代方式更安全, 应用表现良好。2010 年 Follesa^[20] 等考虑到在 CLT 房屋施工过程中的时间和成本, 还有房屋高度对复合墙和地板面板的影响,

研究了 CLT 面板之间的机械连接点在同一平面时的力学性能,如图 8 所示,并分别对其胶接强度、节点刚度进行了分析,使得 CLT 房屋建造周期缩短,并节约包括紧固件和人力成本在内的总成本。2014 年,张志伟^[21]介绍了 CLT 板材料及结构特性和 CLT 板设计方法,并以 CLT 板为研究对象,研究了其工作性能及应用,通过对 CLT 板力学性能的研究,CLT 板采用交错叠合技术减小了各向异性对结构受力性能的影响,整体性能提高,减小材料缺陷对板性能的影响,对国外 CLT 板设计方法作了归纳总结,探讨了 CLT 板在随着木材加工技术的进步,在其工作性能方面相应的提高,并以国外一座旧桥桥面板替换修复为工程实例,对 CLT 板进行环保性能的分析。该年,尹婷婷^[22]通过对 CLT 板的制造与特点以及 CLT 结构体系的结构形式、结构组成、研究现状进行总结,阐述了以 CLT 楼板、墙板、屋面板为主要承重构件的新型木质结构系统的优越性以及在中国的发展前景,具有高预制率、建造速度快、施工方便、抗震性能好、节能环保等优势,适合中高层木结构建筑。2012 年,Nakashima^[23]等采用日本柳杉压制 5 层 CLT 试件,研究单个钢制、销接的 CLT 试件的拉伸性能试验并进行对比分析。在拉伸试验后,还对圆形截面钢筋的埋置试验和板长方向的板块剪切测试进行了评估,如图 9 所示。同年,傅梅珍^[24]通过试验研究对 CLT 桥面板抗弯性能和动力性能进行分析,并讨论叠合层数和连接方式 2 个参数对 CLT 桥面板受力性能的影响,同时反算各试件的组合系数,评价 CLT 桥面板连接组合效果。2014 年,Jacquier^[25]对一种新的房屋抗剪连接的系统进行了测试,以用于由胶合木梁和 CLT 板制作的盒状楼板模块,这种板单元可以从重量、结构和装配角度来呈现其多层建筑结构的优点。文中通过其剪切试验结果,并与一个简单的计算模型结果相对应,用于估计连接节点的平均承载能力和刚度。研究发现,双面穿孔金属板紧固件可以有效地用来作为单元连接件,并通过对比测试研究其破坏形式。2015 年,Gavric^[26]介绍了典型的 CLT 螺钉连接件的大量试验研究工作。在面内单调、循环剪切和抗拔试验中,对墙之间、楼板之间和墙与楼板的 CLT 连接件进行了试验研究,并对强度、刚度、能量耗散、延性比和强度等机械性能的减值进行了评价。试验结果表明,当其延性行为发生时,CLT 螺钉连接能在循环荷载作用下具有良好的性能;只有在端部和边缘距离的要求不满足规定的情况下会发生脆性响应;使用分析设计方程得到的数值能与其试验特性的剪切强度和连接的平均滑移模量作比较;欧洲规范 5(EC5)公

式在某些情况下能高估其强度值;当采用 Uibel 和 BLAβ 公式可以提供 CLT 的连接的更准确和保守的预测等。2015 年,阙泽利^[27]介绍 CLT 的基本结构性能,并着重分析 CLT 耐火、抗震和隔声等功能性的研究成果,以及在国内外现代木结构中的开发应用和 CLT 体系在我国的发展前景,并提出发展建议。2016 年,A. Hassanieh^[28]等采用机械连接件(如螺钉、螺栓)连接交叉层压木材(CLT)板与钢梁是一个有吸引力的和新颖的方法来开发一个完全预制的和可持续的混合钢木复合(STC)楼板,也可以方便以后拆除及结构部分的回收,由于复合楼板(包括 STC 系统)的结构性能是明显受板梁组合节点的强度和刚度的影响,本研究通过对 3 种类型(高强度螺栓、木螺钉或胶与木螺钉的结合形式)的 STC 连接的推覆试验将研究负载滑移性能和破坏形式钢-CLT 木材复合连接,以及关于使用齿板加强 STC 连接强度和刚度对将强 CLT 板的影响,捕捉采用销钉(如螺钉)连接件的钢-CLT 复合节点的经验模型来源于试验数据的非线性试验分析,并给出关于销钉连接件的钢-CLT 复合连接的刚度和强度的简单公式,此外,对在无弹性地基上采用销 STC 连接件的一维梁有限元(FE)的模型进行研究并在试验结果中得到验证。同年,王瑞峰^[29]介绍了 CLT 木材加工技术在使木材的力学性能得到明显提升的同时,又提高了木材的利用效率,是木材改性的优选方案,随后对国内外 CLT 技术研究情况进行了介绍,并对优秀案例进行分析,最后展望 CLT 技术在中国未来木结构建筑发展中的美好前景。

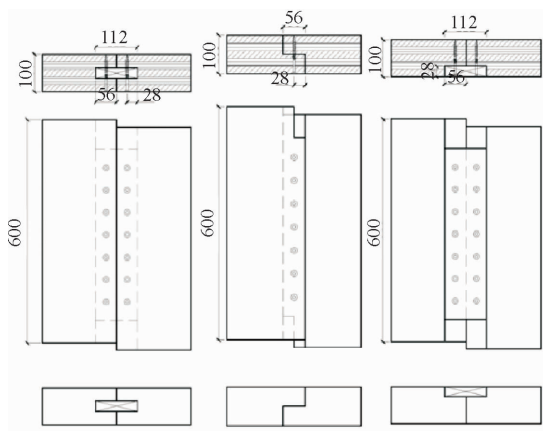


图 8 试件的连接类型 A,B 和 C

Fig. 8 Connection types A,B and C

4 结论

节能减排是中国的一项基本国策。木结构建筑具有较高的历史文化和艺术价值^[30],在绿色环保、保温节能、安全、抗震、耐久、舒适、节约成本等方面

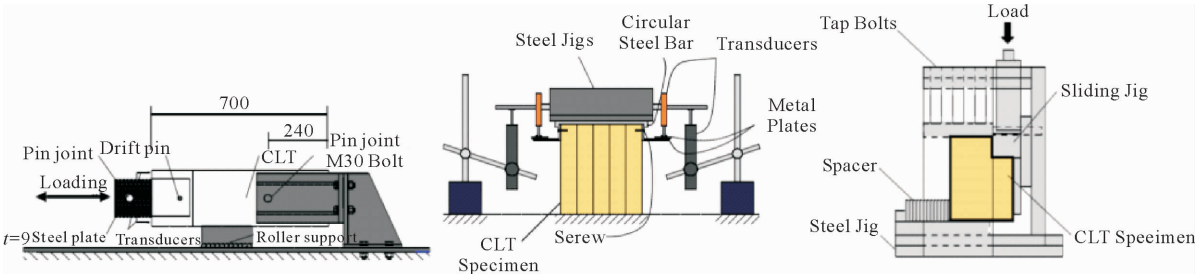


图9 节点拉伸测试装置、埋置试验、块剪切试验

Fig. 9 Tnsile testing device, embedded test, and block shear test

所具有的优势不但经过了历史的检验,而且国内外现代木结构建筑的实践也充分证明了这些优点,成为业界公认的实现建筑节能的一种选择。随着中国经济的发展和对环境、人居等条件的客观需要,近些年来我国政府和企业都在不遗余力地促进木结构建筑行业的发展,并取得了一定的实效。我国有许多木结构古建筑,近年来木结构房屋也逐渐增多^[31]。由于我国在新一代重型 CLT 木结构建筑发展尚处于起步阶段,未来欲做实、做强 CLT 住宅或公用建筑在建造和研究工作上将存在一些问题,主要体现在:1)专业教师和学生人数偏少。目前南京林业大学在 2007 年设立了木结构建筑专业,迄今已有 400 多名本科毕业生投身于我国木结构行业中。值得可喜的是,北京林业大学也在今年开始招生木结构建筑专业的本科生。2)企业经营活动中一方面缺乏与国际化接轨的团队;另一方面,专业人才培养不到位,优秀的管理者、设计师、工艺师、建造师、生产技师和安装技师严重匮乏。3)专业规范与标准滞后。4)国内产学研团队尽管科研资金较为不足,但是合作的有机结合度及其研究成果的适用性、技术含量和附加值等方面的水平偏低。5)缺乏有效的政策支持与实质性的专业宣传等。

鉴于此,笔者认为,一是通过学习国外新一代重型 CLT 木结构建筑的技术成果和成功经验,必将为推动和提升国产 CLT 建筑的发展带来很好的启示和借鉴。二是加强高校教育与人才培养工作,造就一大批木结构建筑专业的本科生和研究生。三是行业部门要加快 CLT 的结构、材料、制造、安装等专业标准的制订与贯标工作。四是对企业而言,要重视信息化、标准化和集成化体系工作;强化人才团队建设。不仅具有高水平的 CLT 木建筑管理者和设计师,不断增加研发力量的投入,而且还应拥有一批生产、建造 CLT 木建筑方面的技师人才。五是产学研有效合作。六是加大有效的宣传力度,提高人们对 CLT 等木结构建筑的感知度和认识度。七是高度重视建筑安全与耐久技术的攻关,尤其强化结构形

式、结构用材、节点连接、耐久性和结构健康监测技术等方面工作。八是鉴于我国的木材和土地资源严重不足,但速生材(杨木,松木和桉木等)和竹材资源相当丰富的实际状况,倘若能充分利用当地的木材和竹材资源来生产重型竹木复合预制板(或竹木复合 CLT),则产品强重比更高,在性价比上可能比国外的木材 CLT 更具优势和竞争力。

总之,新一代重型 CLT 木结构建筑可广泛用于我国城镇化建设、农房工业化和度假村等旅游景观工程,此装配式建筑系统的推广应用将有利于我国建筑业的结构调整和多元化,最大限度降低碳排放量,提高能源有效利用。其经济效益、社会效益和环境效益显著。2016 年 6 月,我国宁波中加低碳新技术研究院在宁波生产了世界上首批用加拿大铁杉(Western Hemlock)锯材制作的大幅面正交胶合木(CLT)建筑预制板,并已建成我国第一座 CLT 示范房,为新一代重型 CLT 木结构建筑在中国的广泛推广开了个好头。因此,通过珍惜和抓住我国政府目前与将来对木结构建筑行业的重视与政策支持这一良好契机,尤其是通过产学研共同坚持不懈的努力,中国的木结构建筑,尤其是 CLT 建筑事业将有光明的发展前景。

参考文献:

[1] 中华人民共和国建设部. GB50005-2003 木结构设计规范[S]. 中国建筑工业出版社,2003.

[2] RENÉ S, ARNE G, DANIEL G. Non destructive evaluation of elastic material properties of cross-laminated timber (CLT) [C]. Delft, The Netherlands: Conference COST E53, 2008: 171-182.

[3] DANIEL G, GLAUCO F, SANDY S, et al. Cross-laminated timber plates: evaluation and verification of homogenized elastic properties[J]. Journal of structural engineering, 2007, 133: 132-138.

[4] 陈玲. 日本农业标准中(JAS)批准交叉层压木材(CLT)[J]. 国际木业, 2013, 11: 14.

CHEN L. Japanese agricultural standards (JAS) approved cross laminated timber (CLT) [J]. International Wood, 2013,

11;14. (in Chinese)

[5] 陈玲. Stora 公司的交叉层积材 (CLT) 建筑遍布全球[J]. 国际木业, 2014(8): 12-13.

CHEN L. Stora cross ply laminated timber (CLT) architecture all over the world [J]. International Wood, 2014(8): 12-13. (in Chinese)

[6] ANTHONIE K, ANDRE R B, ARIJIT S. Viability of hybrid poplar in ANSI approved cross-laminated timber applications [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26 (7): 06014009.

[7] ZHOU Q Y, GONG M, YING H C, *et al.* Measurement of rolling shear modulus and strength of cross laminated timber fabricated with black spruce[J]. Construction and Building Materials, 2014, 64(14): 379-386.

[8] SAAVEDRA F, KARIN S, JORGE H, *et al.* Multi-scale modelling of rolling shear failure in cross-laminated timber structures by homogenisation and cohesive zonemodels[J]. International Journal of Solids and Structures, 2016, 39(9): 1-14.

[9] 龚迎春, 任海青. 正交胶合木的特性及发展前景[J]. 世界林业研究, 2016(3): 71-74.

GONG Y C, REN H Q. Characteristics and development prospects of orthogonal plywood [J]. World Forestry Research, 2016(3): 71-74. (in Chinese)

[10] REINHARD S, KARIN D B, JOSEF E. Structural design of cross laminated timber (CLT) by advanced plate theories[J]. Composites Science and Technology, 2010, 70(9): 1368-179.

[11] ZHOU Q Y, GONG M, YING H C. Measurement of rolling shear modulus of cross laminated timber exploratory study using downscaled specimens under variable span bending tests [C]. International Conference on Biobase Material Science and Engineering (BMSE), 2012: 36-40.

[12] 王志强, 付红梅, 戴晓汉, 等. 不同树种木材复合交错层压胶合木的力学性能[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(12): 141-145.

WANG Z Q, FU H M, DAI X H, *et al.* Mechanical properties of different kinds of wood composite staggered laminated wood[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2014, 34 (12): 141-145. (in Chinese)

[13] VÁCLAV S, LECH M S, JAN T, *et al.* FE analysis of CLT panel subjected to torsion and verified by DIC[J]. Materials and Structures, 2015, 48(1-2): 451-459.

[14] BRANCO J M, MILOŠ K, PAULO B L. In-plane stiffness of timber floors strengthened with CLT[J]. European Journal of Wood & Wood Products, 2015, 73(3): 313-323.

[15] 陈玲. 交叉层压木材 (CLT) 推广规划[J]. 国际木业, 2015(2): 25.

CHEN L. Cross laminated timber (CLT) promotion planning [J]. International Wood, 2015(2): 25. (in Chinese)

[16] 高诣民. CLT 钢木组合桥面系研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.

[17] JAN-WILLEM V D K, A CECCOTTI, Z XIA, *et al.* Very tall wooden buildings with cross laminated timber[J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 1621-1628.

[18] SEPIDEH A. In-plane stiffness of cross-laminated timber floors[D]. British: The university of British Columbia, 2012: 110-111.

[19] JOHAN V, BERTIL E, HANS P, *et al.* Experimental study of cross-laminated timber wall panels[J]. European Journal of Wood & Wood Products. 2009, 67(2): 211-218.

[20] MAURIZIO F, MICHELE B, RITA C, *et al.* Mechanical in-plane joints between cross laminated timber panels[C]. World Conference on timber Engineering, 2010.

[21] 张志伟. CLT 板工作性能与应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.

[22] 尹婷婷. CLT 板及 CLT 木结构体系的研究[J]. 建筑施工, 2015, 37(6): 758-760.

YIN T T. Research on CLT board and CLT wood structure system [J]. Building Construction, 2015, 37(6): 758-760. (in Chinese)

[23] SHOICHI N, AKIHISA K, TAKURO M, *et al.* Evaluation of tensile performance of drift pin joint of cross laminated timber with steel inserted plate[J]. World Conference on Timber Engineering, 2012.

[24] 傅梅珍. CLT 桥面板受力性能试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.

[25] NICOLAS J, ULF A G. Tests on glulam-CLT shear connections with double-sided punched metal plate fasteners and inclined screws[J]. Construction and Building Materials, 2014, 72: 444-457.

[26] IGOR G, MASSIMO F, ARIO C. Cyclic behavior of typical screwed connections for cross-laminated (CLT) structures [J]. European Journal of Wood & Wood Products. 2015, 73: 179-191.

[27] 阙泽利, 李哲瑞, 姜桂超, 等. 交叉层积材 (CLT) 的开发应用及发展前景[J]. 木材工业, 2015, 29(6): 22-26.

QUE Z L, LI Z R, JIANG G C, *et al.* Cross laminated timber (CLT) development and application and development prospect of [J]. Wood Industry, 2015, 29(6): 22-26. (in Chinese)

[28] HASSANIEH A, VALIPOUR H R, BRADFORD M A. Load-slip behaviour of steel-cross laminated timber (CLT) composite connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 122: 110-121.

[29] 王瑞峰, 贾东. 交错层压木材 (CLT) 在建筑上的应用研究[J]. 华中建筑, 2016(6): 65-69.

WANG R F, JIA D. Study on the application of staggered laminated wood (CLT) in architecture [J]. Central China Architecture, 2016(6): 65-69. (in Chinese)

[30] 朱晓冬, 何鑫巍, 刘玉. GFRP 加固木结构规格材抗弯力学性能及可靠性研究[J]. 西北林学院学报, 2014, 30(5): 181-185.

ZHU X D, HE X W, LIU Y. Study on flexural mechanical properties and reliability of reinforced timber structure with GFRP [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 30(5): 181-185. (in Chinese)

[31] 孙燕良, 张厚江, 朱磊, 等. 木构件材料力学性能快速检测研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(2): 245-248, 260.

SUN Y L, ZHANG H J, ZHU L, *et al.* Rapid detection of material mechanical properties of wood[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(2): 245-248, 260. (in Chinese)