

讨论与建议

交叉层积材(CLT)的开发应用及发展前景

阙泽利¹, 李哲瑞¹, 姜桂超¹, 曾庆红¹, 姬宁²

(1. 南京林业大学材料科学与工程学院, 江苏南京 210037;

2. 贵州省林业科学研究院, 贵州贵阳 550000)

摘要: 介绍一种新型木质工程材料——交叉层积材(Cross-laminated Timber, CLT)的基本结构性能, 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。

关键词: 交叉层积材; 结构性能; 木结构建筑; 耐火; 抗震; 隔声

中图分类号: TU366.2

文献标识码: B

文章编号: 1001-8654(2015)06-0022-05

Review of Research and Development of Cross-laminated Timber

QUE Ze-li¹, LI Zhe-rui¹, JIANG Gui-chao¹, ZENG Qing-hong¹, JI Ning²

(1. College of Material Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;

2. Guizhou Academy of Forestry, Guiyang 550000, Guizhou, China)

Abstract: The authors reviewed literature regarding basic structural performance of Cross-laminated Timber (CLT), focusing on achievements in fire resistance, earthquake resistance and sound insulation performance fields. They also compared current situation of wood structure development between China and overseas as well as pointed out future prospects for a CLT system in China. Suggestions on development of CLT system in China were also presented.

Key words: Cross-laminated timber; structural performance; wood structure; fireproof; anti-seismic; sound insulation

交叉层积材(Cross-laminated Timber, CLT)是一种创新性的新型木质工程材料, 由至少3层板材组成, 每层结构由实木锯材或结构用木质复合材(Structural Composite Lumber, SCL)平行胶合构成, 且相邻层按木材纹理相互垂直排列胶合^[1-2]。

CLT 产品常见宽度为 0.6、1.2、2.4、3 m, 长度可达 18 m(60 英尺), 厚度可达 508 mm(20 英寸), 如图 1 所示。

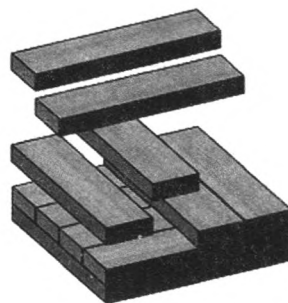


图1 交叉层积材

Fig. 1 Sketch of cross-laminated timber

因为 CLT 相邻层的正交结构, 使其在材料主次方向均具有相同的干缩湿胀性能, 整体的线干缩湿胀系数仅 0.02%, 其尺寸稳定性是实木和胶合木横纹

收稿日期: 2015-1-20; 修改日期: 2015-10-10

基金项目: “十二五”国家科技支撑资助项目“结构用木质复合材料构件制造关键技术与示范”(2015BAD14B05); 贵州省科技基础条件平台课题“贵州省林木标本数据库及网络共享平台建设”(2012-4002)。

作者简介: 阙泽利(1973--), 南京林业大学副教授, 博士。

方向的 12 倍^[3]。CLT 可在工厂预制,并根据建筑设计要求,加工成包含较大尺寸门窗洞口规格的楼面、墙面板和层面板。这些构件可直接运至现场快速安装,大大缩短建筑的安装周期。

CLT 体系在成本、环保、设计等方面也具有竞争优势,与其他建筑材料混合使用时的效果更佳^[4]。在欧洲、北美等地区,无论是单栋住宅还是公共建筑,广泛采用木结构体系。CLT 建筑属于木结构建筑家族的一员,具有木结构建筑的多数优势,并可应用于高层建筑中。

1 CLT 性能的研究

1.1 耐火性能

木材虽然是可燃材料,但木材燃烧时形成的炭化层能够充当绝缘体,有效阻止进一步燃烧,大大提高木材的耐火极限。在相同条件下,普通木结构的耐火阻燃值是钢结构的 1.3 倍,是水泥结构的 1.7 倍^[5]。CLT 结构属于重型木结构类型,其火灾抵抗力比普通木结构更强,且炭化扩展深度(即单位时间内木材颜色变黑程度)更低,仅 0.4~0.8 mm/min^[6]。

与传统的轻型框架构件相比,CLT 建筑构件的截面尺寸较大,燃烧时表面炭化形成绝热保护层,有效提高了其在火灾中的承载力,且层板之间几乎没有空隙,火势通过空气间隙传播的风险性显著降低^[7]。

瑞士苏黎世联邦高等工学院对比了使用耐高温胶黏剂(MUF)和非耐高温胶黏剂(PU)制造的 CLT 的耐火性能^[8],研究证明:使用 MUF 生产的 CLT 能保持结构的完整性,即使试验结束最后发生坍塌,也未发生层板脱落现象。其主要原因在于胶层耐高温,阻止了表层炭化层的脱落,而炭化层又充当绝缘层,隔绝了高温,避免了第二层木材直接与火焰的接触;而使用 PU 胶生产的 CLT,表层完全燃烧碳化后即发生脱落,失去了绝缘层的保护,而导致第二层的炭化速率明显加快。

此外,有研究选择总厚度 85 mm 的 5 层 CLT(单元厚度 17 mm)和 3 层 CLT(单元厚度 28 mm)试件,进行耐火极限和炭化深度对比(如图 2 所示)。结果显示,薄层板表层结构的炭化层更易脱落,无法对内部结构形成有效保护^[9]。即总厚度一定的 CLT,其层板单元厚度越大,耐火极限越高。提高 CLT 层板

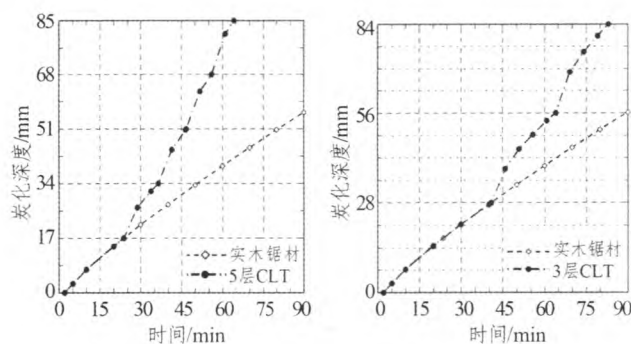


图 2 相同厚度不同层数 CLT 耐火性能比较^[9]

Fig. 2 Fire resistance of CLT with same thickness and different layers

单元厚度、增加层板数量,以及设置表层覆面(如石膏板),均可提高 CLT 结构的耐火性^[10]。

1.2 抗震性能

CLT 结构应用于多层木结构建筑时,墙体侧向承载力的高低,直接影响整栋建筑的抗震性能。CLT 建筑中构件与构件之间的连接,主要通过框架连接件配合紧固件来实现。除 CLT 层板本身刚度较高外,构件间的螺钉、铰链等连接件与紧固件系统,使整体结构获得良好的延性和耗能特性^[11]。

2007 年日本进行了一项 7 层 CLT 建筑的地震台抗震实验,CLT 建筑承受了 7.2 级地震,显示了良好的抗震性能^[12-13]。

意大利威尼斯建筑大学对 2.95 m×2.95 m 的整片墙体,在不同连接件数量和紧固件位置、开孔洞与否等条件下,分别进行了循环荷载对比试验,发现:CLT 墙体具有很高的刚性,强烈震动下仍然保持完整,主要破坏区域集中在墙体与基础连接处^[14-15]。而连接件和墙体紧固装置,大大增强了墙体整体的韧性和延展性,在吸收大量能量的同时,亦能较大程度地保持墙体与基础(或楼板)的整体性。

意大利与日本学者合作,对 3 层和 7 层实体 CLT 建筑进行了震动试验(图 3)^[16]。3 层 CLT 建筑经历了 15 次地震模拟,仍然没有出现严重的损害;其墙体 A 两侧各有一个 2.25 m×2.25 m 的窗洞,墙体 B 两侧分别有一个 4.0 m×4.0 m、2.25 m×2.25 m 的窗洞,两者抗震表现相似,说明墙体两侧洞口对称与否对墙体抗震性能影响很小。7 层 CLT 建筑在 14 次地震模拟后,亦保持足够的结构强度和稳定性,X 轴方向偏移仅 1.3%,Y 轴方向偏移 1.0%。

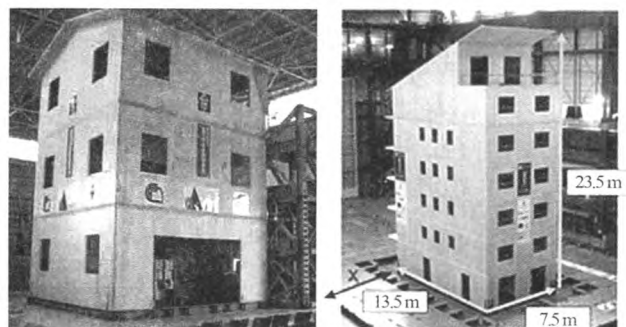


图3 CLT 实体模型建筑抗震试验

Fig. 3 Shaking table test on full-scale CLT building

CLT 建筑的抗震性能主要取决于连接件的性能。应用于低层建筑,CLT 是重型结构材料,刚度高且不会发生断裂现象;应用于高层建筑,框架连接件的使用,可增强结构的中高层韧性和延展性,使得建筑在承受地震荷载时能吸收大量能量,从而提高建筑的抗震性能。

连接件与紧固件(图4)的配置方式(位置、数量等),对墙体的抗震性能起决定性作用^[17]。通过低周期往复试验获得的 CLT 墙体破坏指数分析表明,螺钉与连接件的搭配使用,有助于增强整个墙体系统的延性(如图4所示)。

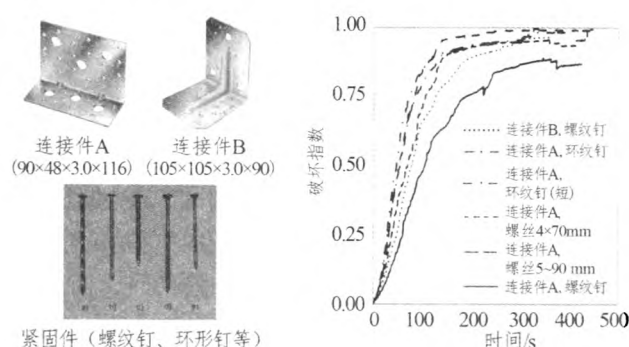


图4 CLT 建筑用连接件及低周期往复测试结果

Fig. 4 Connectors and cyclic test data of CLT wall

1.3 隔声性能

建筑的隔声性能越来越受到人们的重视。我国强制性标准 GB 20118-2010《民用建筑隔声设计规范》规定,住宅建筑分户墙和楼板的空气隔声单值评价量与频谱修正量之和,应大于 45 dB;分隔住宅与非居住用途空间的楼板的空气隔声单值评价量与频谱修正量之和,应大于 51 dB;分户楼板撞击声隔声单值评价量,应 ≤ 75 dB。

《国际建筑规范》(International Building Code, IBC)中也提供了相邻居住单元之间、居住单元与公共或服务空间之间,墙体、楼板或天花板的隔声要求(表1)。

其中:材料隔声等级通常用 STC (Sound Transmission Class)、IIC(Impact Insulation Class)、FSTC(Field Sound Transmission Class)、FIIC(Field Impact Insulation Class)来表示。STC、IIC 分别表示声音穿过材料的损耗量、材料防撞击噪音的能力,测试方法参照 ASTM E90 和 ASTM E 492;FSTC 与 FIIC 分别表示现场设定的空气传音与撞击隔音等级,测试方法参照 ASTM E336 和 ASTM E 413。

表1 《国际建筑规范》IBC 标准住宅隔音等级

Tab. 1 International Building Code
for residential insulation

结构部件	空气传音等级/dB	撞击隔音等级/dB
墙体	STC 50	不适用
	FSTC 45	
楼板	STC 50	IIC 50
	FSTC 45	FIIC 45

加拿大 FPIInnovations 研究机构与美国木材协会,对不同结构 CLT 墙体与楼板的隔音性能做了大量试验^[10,18]。表2列出几种常见 CLT 墙体与楼板结构,其隔音性能均达到 IBC 规范要求。

2 CLT 结构建筑的发展

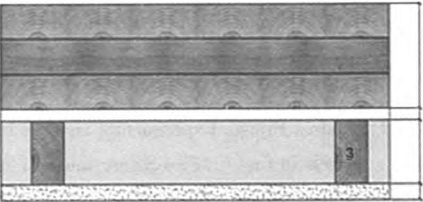
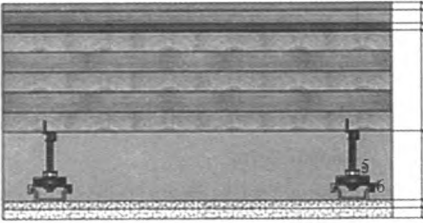
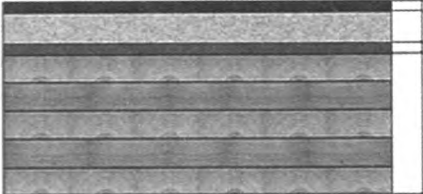
2.1 国外 CLT 结构建筑的发展

近十年来 CLT 在国外迅速发展,突破了木结构层数的限制,应用范围越来越广,CLT 高层建筑甚至已经成为国外城市的象征。CLT 被 FPIInnovation 研究机构誉为革命性的工程木产品,在未来甚至可以代替混凝土成为主要的建筑用材。

CLT 应用范围广泛,可以作为建筑中的楼板、墙体、梁和柱,甚至整栋建筑都可全部采用 CLT 材料。1993 年世界上第一栋单层 CLT 结构住宅在瑞士建成,1995 年第一栋 5 层 CLT 建筑建成,1998 年奥地利国家建筑规范中首次认可了多层建筑可以采用 CLT 材料建造。之后,CLT 越来越广泛地应用到中层(6~8 层)及高层(8 层以上)的建筑中^[19]。2009 年英国伦敦 Hackney 区建成了一栋 9 层 Murray Grove CLT 大楼。

表 2 CLT 墙体和楼板的隔音测试^[10]

Tab. 2 Sound insulation test of walls and floors made of CLT

结构	示意图	单元构成	隔音等级/dB
墙体		(从外到内) 1. 三层CLT墙体, 单层厚度105 mm 2. 空气间隙12 mm 3. 木柱, 截面38 mm×64 mm, 间距400 mm 4. 纤维材料(保温棉), 厚64 mm 5. 石膏板, 厚16 mm	FSTC 47
楼板结构1		(从上到下) 1. 阔叶木地板 2. 胶合板, 厚18 mm 3. 垫层, 厚10 mm, 如橡胶垫 4. 五层CLT楼板, 单层厚度175 mm 5. 隔音夹与长螺栓(总高500 mm) 6. 玻璃纤维隔音材料, 厚100 mm 7. 石膏板, 厚12\15 mm	FSTC 53 FIIC 53
楼板结构2		(从上到下) 1. 地毯, 厚10 mm; 浮式地板, 厚3 mm 2. 干权面, 如20 mm厚石膏板或水泥纤维板 3. 弹性垫层, 如橡胶垫(厚10 mm); 或低密度纤维板(厚12 mm)等 4. 五层CLT楼板, 单层厚度175 mm	FSTC 45 FIIC 45

CLT 也可以与其他建筑体系混合使用, 以建造更高层的建筑, 并具有更佳的使用效果。如 CLT 结构和混凝土结构相结合, 设计高层摩天大楼^[20]; 加拿大、瑞士等国家正在研发设计 30 层及以上的 CLT 高层建筑。

CLT 建筑的快速发展, 使得 CLT 产品的产量迅速提高。2010 年, 全球 95% 的 CLT 产量集中在欧洲, 其中奥地利约占 63%, 德国约占 26%, 瑞典约占 6%; 2012 年, 全球大约有 20 家 CLT 生产企业。预计到 2015 年, 全球 CLT 产量将达到 100 万 m³^[21]。

2.2 我国 CLT 结构建筑的发展

从最初的引进到消化吸收和创新, 欧美木结构建造技术对我国现代木结构技术发展有很大促进作用。特别是在过去的十年里, 以北美轻型木结构为代表的现代木结构在我国已经取得一定的发展, 但是市场份额还远远落后于其他体系建筑, 建造技术与标准亦不够完善, 再加上政策方面的一些限制, 木结构建筑在我国还有很长的一段路要走。

目前, 针对 CLT 建筑的规范已经立项正在修订中, 《木结构设计规范》(GB 50005) 的最新修订版也拟将补充 CLT 结构的相关内容。2014 年 3 月, 我国首栋双层 CLT-轻型木结构混合展示建筑在河北省

迁安市落成; 同年 8 月, 我国首条 CLT 重型木结构生产线在迁安投产, 但目前我国尚无 CLT 独立建筑工程的案例。

发展绿色节能建筑已成为世界主流, 目前我国高耗能建筑近 400 亿 m³, 单位建筑面积能耗是发达国家的 2~3 倍。相比之下, CLT 建筑优良的固碳特性更符合可持续发展的需要。据统计, 2009 年伦敦完工的 9 层 CLT 建筑 (Stadthaus), 仅墙体就储存了 310 t CO₂; 另一栋 2011 年完工的公寓建筑 (Bridport House) 比钢筋混凝土建筑减少 CO₂ 排放 2 113 t, 且工期缩短 6 周^[22]。

近年来, 国务院及国家相关部委陆续颁布了《节能减排“十二五”规划》等重要法规文件和多项政策措施, 鼓励绿色建筑和建筑节能产业发展, 给节能、环保的木结构建筑, 提供更广阔的发展空间。在我国发展 CLT 木结构体系, 其可行性体现在:

1) 突破木结构建筑高度限制。GB 50005-2003 《木结构设计规范》规定, 我国木结构建筑层高不能超过 3 层。而 CLT 采用纵横交错的组坯方式, 赋予了木结构建筑优良的力学性能和结构稳定性, 使其在中高层建筑领域的发展成为可能, 也更适合我国土地资源紧张的现状。

2) CLT 建筑绝大多数部件可实现工厂预置,建造周期短,施工效率高、污染小。

3) 高效利用本土速生木材资源。速生林木材的材性较差,不能直接作为结构用材。但通过木材的层积、组坯,可实现速生材劣材优用,促进本土速生林造林及木材加工业的良性发展。

4) CLT 材料性能与结构研究已快速跟进。CLT 建筑的设计规范正在修订中,南京林业大学木结构建筑系目前已系统地展开 CLT 材料的组坯方式、节点连接承载、墙体滚动剪切承载与抗弯性能的加强等相关领域研究。

但是,CLT 作为新型材料,其性能研究仍处在起步阶段,缺乏生产经验和工程实例的基础数据,产品认知度还有待提高等。为了推动 CLT 产品的开发与发展,建议:

1) 在产品研发方面,国内高校和相关研究所紧跟国际动向,重视 CLT 产品性能测试的基础数据积累,推动 CLT 材料的本土化研究,为中高端木结构建筑的发展提供技术支持;

2) 在产品生产方面,优化 CLT 产品截面设计,减少木材资源的消耗,同时重视配套机械设备与加工技术的改良;

3) 在标准建设方面,尽快建立健全 CLT 相关的材料、设计、生产、连接性能、耐火性能等规范体系与检测标准,为 CLT 营造规范化市场;

4) 建造示范性建筑,展示 CLT 材料的优异性能,并注重媒体宣传,引导消费者对现代木结构建筑的正确认知。

在发展初期,可考虑推广混合体系,将钢筋混凝土结构框架与 CLT 墙体、楼面板等产品相结合,充分发挥工程木质产品轻质高强、环保固碳等特性,推动 CLT 产业的发展。

参考文献:

- [1] LY/T 2381-2014, 结构用木质材料基本要求[S].
- [2] ANSI/APA PRG 320-2012, Standard for performance-rated cross-laminated timber[S].
- [3] I Bejtka. Cross (CLT) and diagonal (DTL) laminated timber as innovative material for beam elements [C]. KIT Scientific Publishing, 2011.
- [4] Pablo Crespell. Cross laminated timber: a primer[R]. Special Publication 52, 2011.
- [5] Gilham. An over view of resistive design of exposed timber structures[J]. World Architecture, 2002(9): 76-77.
- [6] 姚利宏,王喜明. 木结构建筑防火的研究现状[J]. 木材工业, 2007,21(5):29-31.
- [7] AHBuchanan. Fire performance of timber construction [J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2000 (2): 278-289.
- [8] Andrea Frangi. Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire[J]. Fire Safety Journal, 2009,44(8): 1078-1087.
- [9] Andrea Frangi, Mario Fontana, Markus Knobloch, et al. Fire behaviour of cross-laminated solid timber panels[J]. Fire Safety Science, 2009, 01(9): 1279-1290.
- [10] E Karacabeyli, B Douglas. CLT handbook: cross-laminated timber [M]. FPIInnovations and American Wood Council, USA Edition, 2013.
- [11] Roberto Tomasi. Seismic behavior of connections for buildings in CLT[C]. Focus Solid Timber Solution- European Conference on Cross Laminated Timber (CLT), Theme III, 2013: 138-151.
- [12] CeccottiA, Yasumura M, MinowaC, et al. Which seismic behavior factor for multi-storey buildings made of cross-laminated wooden panels [C]. Proceeding CIB W18 Meeting, 2006.
- [13] Ying-Hei Chui. Cross laminated timber [R]. Nanjing, 2012.
- [14] Ceccotti. Cyclic tests on cross-laminated wooden panels [R]. WCTE, 2006:805-812.
- [15] Ceccotti. SOFIE project-3D shaking table test on a seven-storey full-scale cross-laminated timber building [J]. Earthquake Engineering&Structure Dynamics, 2013, 42(13): 2003-2021.
- [16] Ario Ceccotti, Maurizio Follesa, Marco PioLauriola, et al. Which seismic behaviour factor for multi-storey buildings made of cross-laminated wooden panels[C]. Meeting Thirty-nine of the Working Commission W18-Timber Structures, CIB, International Council for Research and Innovation, 2006.
- [17] Johannes. Damage assessment of cross laminated timber connections subjected to simulated earthquake loads [R]. WCTE, 2012.
- [18] Lin Hu. CLT Buildingssound insulation[R]. WCTE, 2012.
- [19] Yates Megan, Fistructe, Matt Linegar, et al. Design of an 8-storey residential tower from KLH cross laminated timber panels [R]. 10th World Conference on Timber Engineering, 2008: 2086-2196.
- [20] J W G Van DeKuilen, A Ceccottic, Zhouyan Xia, et al. Very tall wooden buildings with cross laminated timber [J]. Procedia Engineering, 2011,(14): 1621-1628.
- [21] Peinhard Brandner. Production and technology of cross laminated timber (CLT): State-of-the-Art Report [C]. Focus Solid Timber Solution-European Conference on Cross Laminated Timber (CLT), Theme I, 2013: 3-36.
- [22] Steffen Lehmann. Sustainable construction for urban infill development using engineered massive wood panel systems [J]. Sustainability, 2012(4): 2707-2742.

(责任编辑 向 琴)