

我国正交胶合木及竹木复合正交胶合木发展现状

李 昊^{1,2},王立彬^{1*},卫佩行³,王建和²,魏 洋¹

(1. 南京林业大学 土木工程学院,江苏 南京 210037;2. 宁波中加低碳新技术研究院,浙江 宁海 316600;
3 江苏农林职业技术学院 风景园林系,江苏 句容 212400)

摘 要:正交胶合木(CLT)作为一种新型绿色工程木产品,在欧美多层木结构建筑的应用日趋广泛,高层木结合建筑数量也日益增多。本研究在综述正交胶合木国内外发展情况的基础上,对竹木复合正交胶合木进行介绍,并对竹层积材-铁杉复合 CLT 短梁剪切试验破坏机理进行分析。

关键词:正交胶合木;竹木复合;国产化;破坏模式

中图分类号:TS652 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2019)05-0240-07

Development Status of Cross-Laminated Timber and Bamboo-Wood Composite Cross-Laminated Timber in China

LI Hao^{1,2},WANG Li-bin^{1*},WEI Pei-xing³,WANG Jian-he²,WEI Yang¹

(1. College of Civil Engineering ,Nanjing Forestry University ,Nanjing 210037,Jiangsu,China;

2. Ningbo China&Canada Carbon New Technology Research Institute,Ninghai 316600,Zhejiang,China;

3. Department of Landscape and Architecture ,Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry,Jurong 212400,Jiangsu,China)

Abstract:As a new type of green engineering wood products,cross-laminated timber (CLT) is becoming more and more widely used in European and American multi-layer wood structure buildings,and the number of high-rise wood-constructed buildings is also increasing. Based on the review of the development of CLT at home and abroad,this paper introduced the bamboo-wood composite CLT,and analyzed the failure mechanism of the bamboo PSL-hemlock composite CLT short beam shear test.

Key words:cross-laminated timber; bamboo-wood composite; localization; failure mechanism

1 正交胶合木简介

1.1 正交胶合木结构形式

正交胶合木是(cross-laminated timber,CLT)至少由 3 层实木锯材或结构复合板材以一定角度组坯(图 1a、1b),采用结构胶黏剂胶合而成的预制工程木产品^[1-2]。CLT 具有预制化程度高、运输安装快捷方便,对场地环境破坏小的特点,被认为是传统建筑材料最佳替代产品。

不同于胶合木(glue-laminated timber,GLT)每层的层板均沿着一个方向组坯,CLT 板纵横交错的组坯方式使其具有良好的双向力学性能以及卓越的

尺寸稳定性。此外,为满足工程上的特殊需要,可以沿相同纹理方向放置双层木板,从而在顺纹方向具有优越的力学性能^[3]。并且,为满足更加多样化、复杂的结构形式,加拿大学者提出盒形 CLT 板(图 1c),该体系在保证具有良好承载能力的基础上能有效降低 CLT 板重量,并具有良好的工程应用价值^[2,4]。

1.2 国内外 CLT 研究进展

1.2.1 国外 CLT 发展 CLT 于 20 世纪 70、80 年代起源于奥地利,80 年代后期第 1 个现代化生产 CLT 板的厂家在欧洲建立。1993 年,第 1 栋 CLT 木结构房屋在瑞士建成^[5]。近十多年,奥地利、德

收稿日期:2018-11-02 修回日期:2019-05-09

基金项目:江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD);江苏省省级现代建筑产业现代化示范基地项目(2018926)。

作者简介:李 昊,男,硕士,研究方向:竹木复合材料。E-mail:lihaolihao@njfu.edu.cn

* 通信作者:王立彬,男,教授,研究方向:桥梁工程与现代竹木结构。E-mail:jhwlb@163.com

国、意大利开展了大量的关于正交胶合木的研究,木材 CLT 产品在欧洲得到迅速发展的同时,加拿大、美国、新西兰、日本、韩国等国也开展了很多相关工

作,其研究成果大大推动了 CLT 产品的发展。CLT 板广泛应用于建筑的墙面板、楼面板和屋面板,同时还可作为桥梁的主体结构或者桥面板^[6]。

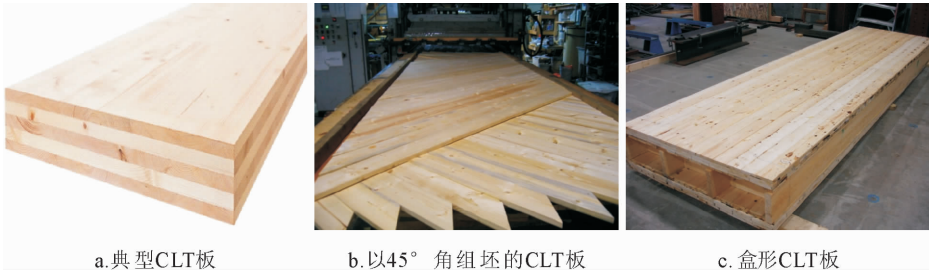


图 1 CLT 结构形式

Fig. 1 Configuration of CLT

国外发达国家除了对 CLT 性能和应用进行研究外,还不断推动产品标准化进程。加拿大版和美国版《CLT 手册》(CLT Handbook)^[3,7]的相继颁布,为 CLT 的生产、建筑设计以及施工提供了依据,也为标准修订奠定了基础。ANSI/APA CLT 标准委员会发布了北美 CLT 产品标准 ANSI/APA PRG 320-2012^[8]并进行了 2 次更新,即 ANSI/APA PRG 320-2017^[9]以及 ANSI/APA PRG 320-2018¹。AWC 的木材设计标准委员会于 2015 年重新修订的木材建筑国家设计规范 ANSI/AWC NDS-2015^[10]增加了关于 CLT 的内容。英国标准政策和战略委员会于 2015 年 10 月 31 日颁布 BS EN 16351-2015^[11],规范中对 CLT 的各项指标给出了完整、系统的规定。CLT 标准与规范的不断完善,

正有力地推动 CLT 的研究与应用。

近年来,CLT 在欧美的建筑应用上越来越多,其建筑高度不断突破,结构形式更加多样。图 2a 为 UBC 大学内的 18 层学生公寓 Brock Commons,采用的是框架-核心筒体系^[12],核心筒为钢筋混凝土现浇而成,第 1 层采用混凝土框架结构,2~18 层采用 CLT 作为水平受力构件,层间采用胶合木柱作为竖向受力构件,板构件与柱构件之间采用钢构件进行连接,建筑高度达到 54 m。世界高层建筑与都市人居学会(CTBUH)宣布,2019 年 3 月完工的挪威 Mjøstårnet 是世界最高木结构建筑(图 2b1、b2)。该建筑高度达到 85.4 m,共有 18 层,为避免在风荷载作用下水平位移过大的问题,该建筑上半部分的楼板采用预制混凝土楼板。

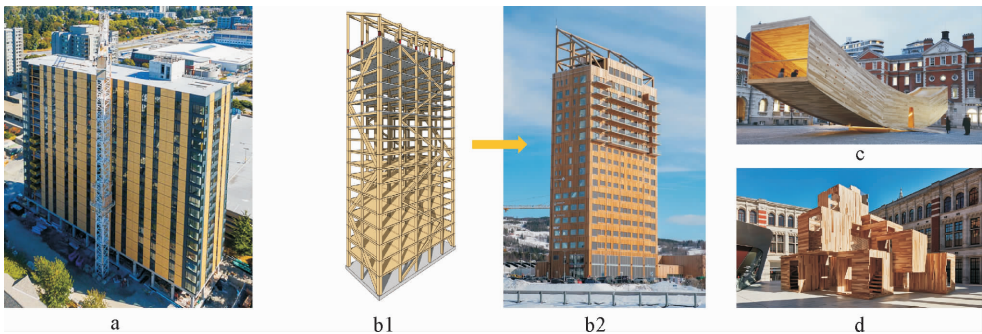


图 2 CLT 高层建筑以及 CLT 艺术品

Fig. 2 World famous CLT high-rise building and CLT artwork

在艺术领域中,CLT 同样展现出独有的魅力,2016 年 9 月的伦敦设计节,加拿大建筑设计师 Alison Brooks 在切尔西艺术学院的院子里展示了一件采用阔叶材 CLT 板制作的木结构艺术品 The Smile(图 2c),这是世界上第 1 个阔叶材 CLT 示范建筑^[13]。2018 年 9 月的伦敦设计节,在 V&A 博物馆新扩建的 Sacker 庭园上,英国建筑设计团队 Waugh Thistleton Architects 同样采用产自北美的

阔叶材制作而成的 CLT 板设计了一件名为 MultiPly 木结构艺术品(图 2d)。The Smile 和 MultiPly 采用的 CLT 板均为美国主要经济阔叶材树种北美鹅掌楸木(*Liriodendron tulipifera*)制作而成,上述 2 件 CLT 艺术品均由美国阔叶木出口委员会(AHEC)支持,旨在展示如何通过使用工程木材和装配式模块化建筑技术,在建筑的生命周期内对建筑物进行拆分、拼装和重新利用。

1.2.2 中国 CLT 发展 国外对 CLT 的性能研究无论从广度或深度都达到了较高水平,而中国对于 CLT 的研究尚处于初期阶段,现有宁波中加低碳新技术研究院有限公司、同济大学、北京科技大学、长安大学、南京林业大学、南京工业大学、北京林业大学、浙江大学、中国林业科学研究院等科研单位对 CLT 进行工艺参数研究、基本力学试验以及数值模拟研究。

1.2.3 CLT 工艺及其力学性能研究 浙江宁波依照北美标准^[14-15]建成了中国第 1 条 CLT 中试生产线。采用不同胶黏剂、不同压力参数,制备铁杉 CLT,对其进行胶层剪切测试和浸渍剥离测试。研究发现,胶黏剂种类和压力大小对 CLT 板的胶合性能、剪切破坏中木材破坏率和耐久性均有显著影响。谢文博等^[16]、卢尧等^[17]、李敏敏等^[18]、王韵璐等^[19]以加拿大西部铁杉 CLT 板为研究对象,加工制造足尺 CLT 板,对 CLT 板主强度方向的基本力学性能和耐久性进行测试评估与分析对比。此外,Y. Lu *et al*^[20]根据胡克定律以及梁弯矩与剪切应力的关系,计算出 3、5 层和 7 层 CLT 板的层间剪应力,发现 CLT 板的层间剪切应力和最大剪切应力与 CLT 层板数量以及平行层和垂直层的弹性模量比值有关。同时,M. He *et al*^[21]对铁杉 CLT 板面外弯曲性能和抗压能力展开研究,通过试验获得铁杉 CLT 板在主要强度和次要强度方向上的力学性能,为铁杉 CLT 的工程应用提供了基础数据。

中国林业科学研究院龚迎春等^[22-25]采用国产日本落叶松制备 CLT 板并进行了抗弯性能试验、层间剪切性能试验、滚动剪切性能试验、顺纹抗压性能试验,探究了生产工艺、层板弹性模量、组坯方向、层板厚度和层板层数对 CLT 板力学性能的影响,为国产日本落叶松 CLT 提供了一套完整的生产工艺数据和基本力学性能数据。有学者研究采用速生小径桉木制作 CLT 的可行性^[26-27],并得到了桉木 CLT 板的工艺优化参数。通过一系列弯曲和剪切试验发现,桉木 CLT 板力学性能良好。

南京林业大学王志强等^[29-30]通过一系列试验获得了松木、速生杨木、SPF 规格材和单板层积材等材料制作而成的混合 CLT 板滚动剪切性能、抗弯性能、抗剪性能,为后续 CLT 横向层板材料选择和滚动剪切性能改善提供基础数据,并为工程应用提供相应的参考数据。Z. Q. Wang *et al*^[31]通过加工不同横切面宏观构造的杨木锯材,测量不同针叶材树种的滚动剪切性能,分析比较密度、年轮走向、髓心距离、髓心及树种对 CLT 滚动剪切性能的影响。王志强等^[32]还对 CLT 板的热工性能展开过相关研

究。此外,南京林业大学姜桂超^[33]采用国产杉木制作不同层数 CLT 板研究其破坏模式以及基本力学性能。

南京工业大学王碧波^[34]以速生杨木和花旗松为原材料,制备均匀分层均质的 CLT 板以及均匀分层混合的 CLT 板,通过试验研究 3、5 层 CLT 板的破坏形态、承载力、刚度、挠度等结构性能,提出基于强度的优化设计方法。毛荣俊^[35]通过对 7 组 21 个墙体构件进行平面内力学性能试验,研究了构件的极限承载力,平面内等效刚度等性能,研究发现面内加载形式下的 CLT 板主要处于弹性阶段,破坏形式一般为脆性破坏,同时具有较好的平面内力学性能。

长安大学傅梅珍等^[36]通过试验研究对 CLT 桥面板抗弯性能和动力性能进行分析,对叠合层数和连接方式这两个参数对 CLT 桥面板受力性能的影响进行研究,同时采用各试件的组合系数评价 CLT 桥面板连接组合效果。

1.2.4 中国 CLT 的应用现状 2014 年 3 月国内首栋双层 CLT 轻型木结构混合示范建筑在河北省迁安市落成(图 3a)^[37]。同年,位于台湾省的森科 5 层 CLT 建筑竣工。建筑师充分利用了 CLT 良好的悬挑性能,在 2、3、4 层设置悬挑阳台,整栋建筑造型独特、美观(图 3b1、3b2),同时在室内将 CLT 暴露,体现天然特色,为亚洲首栋多层 CLT 建筑^[38]。

图 3c1、c2 为宁波中加低碳新技术研究院有限公司与同济大学合作建造的中国第一栋 CLT 示范公共建筑 OTTO Café^[39]。此外宁波中加低碳新技术研究院有限公司携手葡萄牙阿默林集团 ICB 公司,应用生态软木板(ICB)作为外墙的隔热节能和装饰材料以提升 CLT 民居(度假屋)的绿色品质(图 2d1~2d4)。在 OTTO Café 与全生态 CLT 示范民居(度假屋)建成 1 年多后,于 2018 年 12 月又进行了次成功和快速的拆建,整个过程仅花费 3 d,充分体现了装配式 CLT 建筑的灵活性和适应性,在中国旅游地产、城市化和农房工业化等领域的示范和推广有着巨大优势。

在 CLT 工程应方面,由于我国规范的不完备以及大众对于多、高层木结构建筑认知缺乏^[40-41],CLT 建筑在我国以低层为主,并且建成建筑以展示推广为目的。此外,全部采用 CLT 打造建筑,虽然具有良好的安全性以及舒适度,但成本较高。因此,在 CLT 实际应用中,除了高端住宅、特殊建筑外,CLT 会较多应用于混合建筑结构中,譬如在轻型木框架结构,钢木混合结构,木混结构中的水平受力构件和竖向受力构件中采用 CLT。

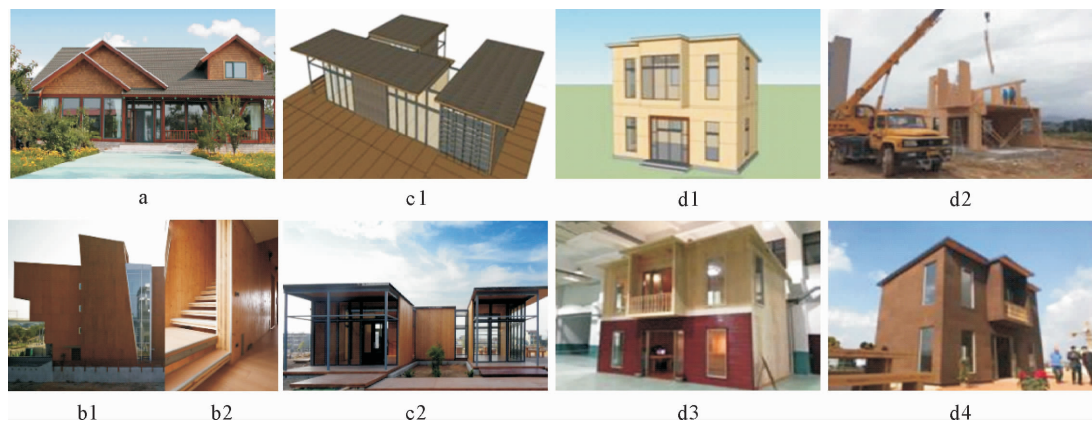


图 3 我国 CLT 示范建筑

Fig. 3 China's CLT demonstration building

2 竹木复合正交胶合木

2.1 竹木复合正交胶合木的潜力

木结构在国内具有广阔的发展前景,但是我国木材供需矛盾突出^[42-43]。虽然从 2001 年起,中国就对进口木材实行零关税政策,但中国生产 CLT 所用木材大部分是从国外进口,高运输成本成为限制 CLT 在中国推广的一个重要因素,并且与低碳环保的初衷相违背。从国际进口木材虽能缓解目前供需紧张的问题,但过分依赖进口木材,不利于中国木结构建筑产业发展。因此,CLT 生产原材料国产化是 CLT 在中国推广与发展的一种趋势。

“竹木复合结构”是科学、合理的开发利用竹材资源的有效途径^[48-50]。竹材和木材都是各向异性材料,相对来说竹材具有强度高、耐磨性好、韧性大的特点,木材具有刚度大、加工方便的特点。采用竹材和木材生产竹木复合 CLT 可以充分发挥二者的材料优势,改进生产工艺,提高生产效率以及原料利用率,帮助缓解国内木材供应紧张的现状,同时推动 CLT 国产化进程。

2.2 竹木复合 CLT 结构形式

在欧洲,CLT 生产商将 CLT 板分为 2 个等级,一种是用于建筑结构中水平受力构件和竖向受力构件的建筑等级(construction grade),另一种是最外层具有良好的艺术效果,给人带来视觉享受的装饰等级(Appearance Grade)。将竹质材料和木质材料共同加工成竹木复合 CLT(bamboo wood composite cross laminated timber,简称 CCLT),经合理设计,是一种具有中国特色,同时强度与美学并存的新型工程材料。我国盛产竹材,相关产业体系完整,采用竹质材料生产竹木复合 CLT,不仅进一步拓宽竹材的应用范围,同时也填补了 CLT 的种类的空白。

根据竹质材料位于竹木复合 CLT 板的位置进

行分类,以 3 层竹木复合 CLT 为例(图 4a),竹质材料作为垂直层,平行层为木质材料,其结构形式见图 4b,该种竹木复合 CLT 层为加拿大西部铁杉,垂直层为竹编胶合板;图 4c 中竹质材料作为表层,芯层为木质材料,具体结构形式见图 4d,该种竹木复合 CLT 平行层为竹展平材,垂直层为加拿大西部铁杉。

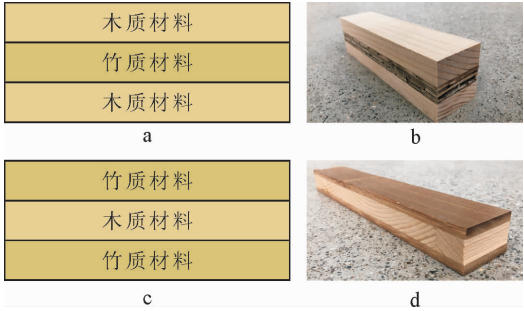


图 4 竹木复合 CLT 结构形式

Fig. 4 Bamboo-wood composite CLT structure

此外,也可根据竹质材料的结构形式进行分类,譬如将竹编胶合板、竹木复合编帘板、竹展平材作为竹木复合 CLT 层板的竹质材料,也可以采用竹集成材、竹层积材、竹重组材、竹木复合工程材等作为竹木复合 CLT 层板的竹质材料。

竹木复合 CLT 板具有良好的可设计性,通过合理设计使得竹木复合 CLT 不仅具有竹材的强度高、韧性好等特点,还具有木材易加工、弹性高等特点。上述 2 种竹木复合 CLT 形式仅仅是最基本的 3 层 CLT 结构形式,除了简单的竹质材料层板所处位置以及竹木复合 CLT 层数进行变化外,竹木复合 CLT 的类型十分丰富,譬如还有钉合竹木复合 CLT、以不同角度组坯的竹木复合 CLT、盒形竹木复合 CLT 等。

2.3 竹木复合 CLT 的研究现状

宁波中加低碳新技术研究院有限公司致力于竹

木复合 CLT 产品的研发,是国内首家进行竹木复合 CLT 研发的单位。进行了多种结构形式的竹木复合 CLT 产品研发,相关产品已由南京林业大学和宁波中加低碳新技术研究院有限公司等单位共同申请并获得了中国专利^[48-49]。此外,肖岩^[50]提出一种可作为墙体和楼板的交错胶合竹木组合 CLB T 厚板结构,并已开始相关研究。

2.4 竹木复合 CLT 短梁剪切破坏分析

基于竹层积材-铁杉复合 CLT 短梁剪切试验研究^[48]以及实际观察,提出竹木复合 CLT 短梁剪切试验的破坏机理,图 5 为短梁剪切试验的荷载位移曲线,图 6 为短梁剪切试验的破坏模式。竹层积材-铁杉复合 CLT 短梁芯层在荷载作用下首次发生滚动剪切破坏后,在某种程度上可以将破坏的芯层视作 2 个小梁,小梁起到连接两侧表板以及抵抗剪切应力的作用。在受力变形的过程中,位于芯层的铁杉和表层的竹层积材处于共同变形的状态,并且当芯层的铁杉所承受的滚动剪切应力达到承受极限后又会分成更小的梁。随着小梁的增多,芯层与表层的界面所承受的水平剪切应力达到极限并开裂,整个铁杉 CLT 短梁丧失承载力,由于位于表层的竹层积材具有良好韧性,竹层积材-铁杉复合 CLT 短梁的底部未发生破坏。在加载过程中竹层积材-铁杉复合 CLT 短梁的荷载-挠度曲线呈现阶梯式的变化是由于小梁的分化所形成,在荷载-挠度曲线完全丧失承载力前,有一段较长且略为平缓的上升曲线,这

是竹层积材的复合所致。一般 CLT 的短梁剪切试验有 3 种破坏模式^[49],分别为滚动剪切破坏、层间剪切破坏以及底部受拉破坏,竹木复合 CLT 改善了其破坏模式。

3 结论

CLT 国产化是 CLT 在我国发展的趋势,我国东北林区的落叶松,西南林区的云南松,南方林区的桉木均可作为生产 CLT 的材料,由于政策以及树种所在林区的产业化程度有限,距离大规模生产仍有一段距离,仅停留在研究阶段。竹材作为一种在我国广泛分布的具有中国特色的生物质材料,其生长周期短、力学性能良好,将竹质材料和木质材料复合生产竹木复合 CLT,在一定程度上减轻了国产 CLT 对木材的需求。

竹层积材-铁杉复合 CLT 的层间剪切强度取决于芯层层板的水平剪切强度,丧失承载力时的状态取决于芯层层板的小梁与表层层板之间的界面强度,并且竹层积材-铁杉复合 CLT 简化了铁杉 CLT 的复杂破坏模式。

竹质材料和木质材料属于 2 种不同的材料,二者受力共同工作时,竹质材料和木质材料的胶合界面问题尤为关键,将竹质材料放置于芯层时,如何使竹质材料的力学性能充分发挥,将竹质材料放置于表层时,如何确保竹木复合 CLT 的弹性模量满足使用要求,这些问题需要进一步的研究。

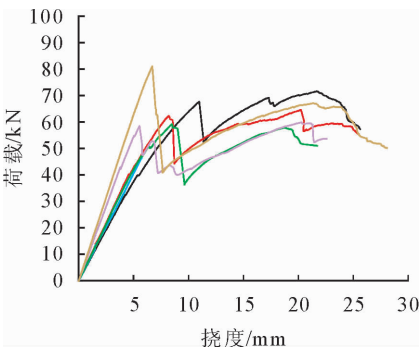


图 5 CCLT 荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load-deflection curve of CCLT

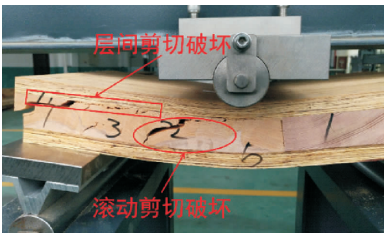


图 6 CCLT 破坏模式

Fig. 6 CCLT failure mode

参考文献:

[1] ANSI/APA PRG 320-2018:Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber [S]. 2018.

[2] CHEN Y. Structural performance of box based cross laminated timber system used in floor applications [D]. University of British Columbia, 2011.

[3] CLT handbook: cross-laminated timber [M]. FPIInnovations, 2011.

[4] CHEN Y, LAM F. Bending performance of box-based cross-laminated timber systems [J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 139(12): 4013006.

[5] 阙泽利,李哲瑞,王菲彬,等. 中高层木结构用正交胶合木 (CLT) 在欧洲的研究与发展现状 [J]. 建筑结构, 2017, 47(2): 75-80.

QUE Z L, LI Z R, WANG F B, et al. Review of research and development status of cross-laminated timber used by medium high-rise structural [J]. Building Structure, 2017, 47(2): 75-80. (in Chinese)

[6] SCHUBERT S, GSELL D, STEIGER R, et al. Influence of asphalt pavement on damping ratio and resonance frequencies of timber bridges [J]. Engineering Structures, 2010, 32(10): 3122-3129.

[7] CLT handbook: cross-laminated timber [M]. US Edition, FPIIn-

novations and Binational Softwood Lumber Council,2013.

[8] ANSI/APA PRG 320-2012. Standard for performance-rated cross-laminated timber[S]. 2012.

[9] ANSI/APA PRG 320-2017. Standard for performance-rated cross-laminated timber[S]. 2017.

[10] ANSI / AWC NDS-2015 National Design Specification (NDS) for Wood Construction 2015 Edition [S]. 2015.

[11] British Standards Institution. BS EN 16351-2015 timber structures-cross laminated timber-requirements [S]. BSI, 2015.

[12] FAST P,GAFNER B,JACKSON R,*et al.* Case study:an 18 storey tall mass timber hybrid student residence at the University of British Columbia, Vancouver [C]//WCTE 2016-World Conference on Timber Engineering, Vienna, Austria. 2016.

[13] 郑琳,高子震,龚蒙.欧美 CLT 建筑案例介绍:“微笑”景观木结构项目[J]. 国际木业,2019,49(1):10-13.

[14] 加拿大木业协会.世界上首条大幅面铁杉正交胶合木(CLT)建筑预制板生产线在中国宁波建成投产[EB/OL]. (2017-03-13) [2018-7-6]. <http://diyitni.nnm/control-1467045811.46914284.html>.

[15] WANG J B,WEI P,GAO Z,*et al.* The evaluation of panel bond quality and durability of hem-fir cross-laminated timber (CLT)[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2018,76(3):833-841.

[16] 谢文博,王正,高子震,王建和.正交胶合木(CLT)性能测试及其分析[J]. 林产工业,2018,45(10):40-45,49. XIE W B,WANG Z,GAO Z Z,*et al.* Performance test and analysis of cross-laminated timber (CLT) [J]. China Forest Products Industry,2018,45(10):40-45,49. (in Chinese)

[17] 卢尧,李敏敏,王正,等.3层铁杉正交胶合木板结构的力学性能计算与分析[J]. 西北林学院学报,2018,33(6):231-235. LU X,LI MM,WANG Z,*et al.* Calculation and analysis of mechanical properties of three layers cross-laminated timber of full-size hemlock[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(6):231-235. (in Chinese)

[18] 李敏敏,谢文博,王正,等.正交胶合木铁杉规格材弹性模量的动态测试及应力分等[J]. 林产工业,2018,45(7):28-32. LI MM,XIE W B,WANG Z,*et al.* Dynamic test and stress grading of elastic modulus for hemlock dimension lumber used for cross-laminated timber [J]. China Forest Products Industry,2018,45(7):28-32. (in Chinese)

[19] 王韵璐,曹瑜,王正,等.加拿大铁杉正交胶合木弯曲性能预测与评估[J]. 林产工业,2017,44(7):15-20. WANG Y L,CAO Y,WANG Z. Prediction and assessment of canadian hemlock CLT bending performance[J]. China Forest Products Industry,2017,44(7):15-20. (in Chinese)

[20] LU Y,XIE W,WANG Z,*et al.* Shear stress and interlaminar shear strength tests of cross-laminated timber beams[J]. Bio Resources,2018,13(3):5343-5359.

[21] HE M,SUN X,LI Z. Bending and compressive properties of cross-laminated timber (CLT) panels made from Canadian hemlock[J]. Construction and Building Materials,2018,185:175-183.

[22] 龚迎春,田兆鹏,徐俊华,等.国产日本落叶松正交胶合木抗弯弹性模量评价方法[J]. 木材工业,2018,32(3):1-4. GONG Y C,TIAN Z P,XU J H,*et al.* Evaluation methods of bending MOE of cross-laminated timber made from domestic Japanese larch lumber[J]. China Wood Industry,2018,32(3):1-4. (in Chinese)

[23] 龚迎春,武国芳,任海青.国产日本落叶松正交胶合木抗压性能研究[J]. 林产工业,2018,32(5):7-22. GONG Y C,WU G F,REN H Q,*et al.* Compressive properties of cross-laminated timber fabricated with domestic Japanese larch[J]. China Forest Products Industry,2018,32(5):7-22. (in Chinese)

[24] 龚迎春,武国芳,徐俊华,等.日本落叶松正交胶合木抗弯性能的研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2018,46(11):25-30,38. GONG Y C,WU G F,XU J H,*et al.* Bending properties of cross-laminated timber fabricated with larix kaempferi [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed.,2018,46(11):25-30,38. (in Chinese)

[25] 龚迎春,徐俊华,武国芳,等.国产日本落叶松正交胶合木的层间剪切性能[J]. 木材工业,2018,32(2):6-9. GONG Y C,XU J H,WU G F,*et al.* Interlamination shear properties of cross-laminated timber made from domestic Japanese larch in China[J]. China Wood Industry,2018,32(2):6-9. (in Chinese)

[26] LIAO Y,TU D,ZHOU J,*et al.* Feasibility of manufacturing cross-laminated timber using fast-grown small diameter eucalyptus lumbers [J]. Construction and Building Materials, 2017,132:508-515.

[27] LU Z,ZHOU H,LIAO Y,*et al.* Effects of surface treatment and adhesives on bond performance and mechanical properties of cross-laminated timber (CLT) made from small diameter Eucalyptus timber[J]. Construction and Building Materials, 2018,161:9-15.

[28] WANG Z,FU H,GONG M,*et al.* Planar shear and bending properties of hybrid CLT fabricated with lumber and LVL [J]. Construction and Building Materials,2017,151:172-177.

[29] 王志强,付红梅,陈银慧.锯材/单板层积材混合正交胶合木力学性能研究[J]. 中南林业科技大学学报,2016,36(8):121-124. WANG Z Q,FU H M,CHEN Y H. Mechanical performances of hybrid cross laminated timber fabricated by lumber/laminated veneer lumber[J]. Journal of Central South University of Forestry& Technology,2016,36(8):121-124. (in Chinese)

[30] 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.* Experimental study on mechanical properties of cross-laminated timberwith different tree species wood[J]. Journal of Central South University of Forestry& Technology,2014,34(12):141-145. (in Chinese)

[31] WANG Z Q,DONG W Q,WANG Z Z,*et al.* Effect of macro characteristics on rolling shear properties of fast-growing poplar wood laminations[J]. Wood Research,2018,63(2):227-238.

[32] 王志强,张浩,俞骏城,等.正交胶合木墙体热工性能测试与分

析[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(6): 69-71.

WANG Z Q, ZHANG H, YU J C, *et al.* A testing and analysis on thermal performance of cross-laminated timber[J]. *New Building Materials*, 2016, 43(6): 69-71. (in Chinese)

[33] 姜桂超. 杉木不同厚度层板制作 CLT 性能的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2016.

[34] 王碧波. 基于速生杨木的正交胶合木板抗弯性能试验研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2014.

[35] 毛荣骏. 正交胶合木板平面内力学性能试验研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2015.

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

[37] CLT 木结构展示房[J]. *国际木业*, 2015, 45(9): 6-7.

[38] 毛荣骏. 正交胶合板受力性能试验研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2015.

[39] 熊海贝, 宋依洁, 戴颂华, 等. 装配式 CLT 建筑从模型到建造[J]. *建筑结构*, 2018, 48(10): 7-12.

XIONG H B, SONG Y J, DAI S H, *et al.* Tate-of-the-art Research of Tall Wood Buildings[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2016, 44(9): 1297-1306. (in Chinese)

[40] 李征, 罗晶, 何敏娟. 我国装配式木结构标准体系现状及完善建议[J]. *工程建设标准化*, 2018(10): 67-72.

LI Z, LUO J, HE M J. The current situation of the standard system for assembled wooden structures in China and relevant suggestions for its improvement[J]. *Standardization of Engineering Constructio*, 2018(10): 67-72. (in Chinese)

[41] 刘伟庆, 杨会峰. 现代木结构研究进展[J]. *建筑结构学报*, 2019(2): 16-43.

LIU W Q, YANG H F. Research progress on modern timber structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2019(2): 16-43. (in Chinese)

[42] 于文吉, 余养伦. 我国木、竹重组材产业发展的现状与前景[J]. *木材工业*, 2013, 27(1): 5-8.

YU W J, YU Y L. Development and prospect of wood and bamboo scrimber industry in China[J]. *China Wood Industry*, 2013, 27(1): 5-8. (in Chinese)

[43] 张言海. 单板层积材的生产工艺介绍[J]. *木材加工机械*, 2001(3): 25-27.

[44] 葛玉猛, 李玉顺, 童科挺, 等. 薄壁型钢-重组竹组合工字形梁受剪性能研究[J]. *森林工程*, 2018, 34(6): 72-79.

GE Y M, LI Y S, TONG K T, *et al.* Study on Shear Behavior of Thin-Wall Steel-Recombinant Bamboo Composite Beams [J]. *Forest Engineering*, 2018, 34(6): 72-79.

[45] 孙丰文, 张齐生. 竹木复合结构是科学合理利用竹材资源的有效途径[J]. *林产工业*, 1995, 22(6): 4-6.

[46] 刘玉, 陈广胜, 朱晓冬, 等. 脲醛树脂浸渍工艺对杨木单板尺寸稳定性影响[J]. *森林工程*, 2017, 33(6): 36-40.

LIU Y, CHENG S, ZHU X D, *et al.* Effect of Urea Formaldehyde Resin Impregnation on the Dimensional Stability of Poplar Veneer [J]. *Forest Engineering*, 2017, 33(6): 36-40.

[47] 任一萍, 刘红征, 郭文静, 等. 两种树脂胶合重组竹结构材的性能比较[J]. *森林工程*, 2019, 35(2): 45-49.

REN Y P, LIU H Z, GUO W J, *et al.* Adhesion Performance Comparison of Structural Bamboo Scrimber with Two Kinds of Resin[J]. *Forest Engineering*, 2019, 35(2): 45-49.

[48] 卫佩行, 王建和. 一种竹木正交复合板材的制备方法: 201910012294. 2[P]. 2019-01-07.

[49] 王建和, 李昊, 卫佩行等. 一种采用竹篾制作的竹木复合正交胶合木: 201822150274. 6[P]. 2018-12-21.

[50] 肖岩. 一种可作为墙体和楼板的交错胶合竹木组合 CLBT 厚板结构: 201720561674. 8[P]. 2017-05-19

[51] WEI P, WANG B J, WANG L, *et al.* An exploratory study of composite cross-laminated timber (CCLT) made from bamboo and hemlock-fir mix [J]. *Bio. Resources*, 2019, 14(1): 2160-2170.

[52] LU Y, XIE W, WANG Z, *et al.* Shear stress and interlaminar shear strength tests of cross-laminated timber beams[J]. *Bio. Resources*, 2018, 13(3): 5343-5359.