

国外高层木结构研究综述

熊海贝, 欧阳禄, 吴颖

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 整理和分析了国外高层木结构研究现状, 重点介绍了适用于高层木结构的正交层板胶合木(CLT)的最新研究进展, 指出纵横交错的层板在承受平面外荷载时, 其横向层的滚动抗剪性能需重点关注. 针对高层木结构的关键问题, 即结构体系、结构抗震与抗风性能、节点连接和抗火性能的研究进展进行了综述, 指出结构体系中抗侧力性能、构件间的连接以及力的传递是今后研究的重点; 高层木结构抗火性能的研究可以借鉴低层和多层木结构, 但高度和人群密集的影响需特别关注. 最后, 对我国高层木结构的发展进行了展望, 对关键问题进行了分析和总结.

关键词: 高层木结构; 绿色建筑; 正交层板胶合木; 滚动抗剪性能; 抗震与抗风

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

State-of-the-art Research of Tall Wood Buildings

XIONG Haibei, OUYANG Lu, WU Ying

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: State-of-the-art research and application advance on tall wood buildings are summarized based on the current research situation abroad. Specially, an innovated engineering wood product, cross-laminated timber (CLT) is emphasized for its rolling shear property, which is the dominant factor of out-of-plane capacity. The key issues on tall wood buildings, such as structural systems, seismic and wind resistance, connection capacities, as well as fire resistance are expatiated. On account of reviews of the latest study, this paper indicates that the connection of members, load path and force distribution in structural systems are the key points of future research. Meanwhile, research on fire resistance of tall wood buildings can learn some experience from low-rise and multi-storey wood buildings, but the height of building and the quantity of residents should be especially concerned. Finally,

research prospects on development of Chinese tall wood buildings are proposed, and the key issues are analyzed and summarized.

Key words: tall wood buildings; green construction; cross laminated timber; rolling shear property; seismic and wind resistance

木结构绿色环保、低碳节能、建造快且轻质高强, 低层和多层木结构房屋抗震性能好、舒适宜居, 已成为绿色建筑的最佳选择. 相比于传统的钢材和混凝土, 木材具有以下优点: ①木材是可再生的绿色环保材料, 每立方米木材生命周期平均储存 0.8~0.9 t 的 CO₂, 用来替代混凝土的使用将额外减少 1.1 t 的 CO₂ 的排放. 因此, 每使用 1 t 木材相当于减少了 2 t CO₂ 的排放^[1]; ②木结构构件预制化程度高, 便于现场拼装吊装, 能大幅缩短工期、节省成本且无粉尘污染; ③木材是良好的保温材料, 较混凝土、砌体和钢结构, 可有效降低建筑物在使用阶段的能源消耗; ④木结构质轻高强、抗震性能好, 抗倒塌能力强; ⑤木质房屋舒适、宜居. 因此, 结构用木材具有显著的环境效益^[2].

2009年12月哥本哈根世界气候大会的召开让世界各国意识到了控制碳排放的重要性与使命感. 加拿大卑斯省于2009年率先提出了《木结构优先计划》^[3], 要求高校和研究机构积极开展高层木结构研究和试点工程建设, 取得了突破性的进展. 欧盟于2010年提出了《欧洲木结构可持续发展动员令: 优秀案例说明》^[4]. 加拿大林产创新研究院(FPInnovations)于2013年出版发行了《加拿大高层木结构设计建造技术指导》^[5], 给出了建造多高层轻型木结构和建造高层木结构的研究结果、设计方法以及细部构造要求. 以木结构为代表的绿色建筑

收稿日期: 2015-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(51378382), 住房城乡建设部2015年科技项目计划资助项目(2015-K2-030)

第一作者: 熊海贝(1964—), 女, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为混凝土结构、现代木结构及混合结构的抗震性能.

E-mail: xionghaibei@tongji.edu.cn

通讯作者: 欧阳禄(1992—), 男, 硕士, 主要研究方向为高层木结构. E-mail: 1432155@tongji.edu.cn

成为国外建筑发展的潮流。

高层木结构没有明确的定义,一般认为 8 层及以上即为高层木结构。随着对正交层板胶合木(cross laminated timber, CLT)研究和应用的深入,自 2008 年起,木结构开始突破层数和高度的限制,国外高层木结构接连拔地而起。超高层木混合结构也处于热点研究和概念设计阶段。部分国家相继颁布新规,2015 年 8 月,加拿大魁北克省政府宣布允许木结构住宅楼最高建到 12 层,并出版了名为《建造高达 12 层楼的大型木结构楼宇》的技术指南。

我国地少人多,高层建筑是城市发展的刚性需求,使用绿色环保的木材作为城市未来高层建筑的主要材料之一,可实现降低雾霾,提高人居环境,创建生态城市的目标。2015 年 9 月 1 日,住房城乡建设部与工业和信息化部共同出台了《促进绿色建材生产和应用行动方案》(工信部联原〔2015〕309 号),第 11 条中明确指出大力发展木结构建筑^[8]。为此,本文通过大量的文献整理和分析,介绍适用于高层木结构的新型工程木产品,以及人们高度关注的高层木结构体系、抗震与抗风性能、节点连接性能以及防火性能的最新研究进展,以期推动我国高层木结构研究和应用的发展。

1 高层木结构材料

原木是自然生长的天然材料,受到地区、产量、缺陷等影响,不适合作为现代高层木建筑和大跨木建筑的结构用材。规格材(dimension lumber)是对规定的树种或树种组合的木材按规定的标准尺寸系列锯切加工,并经应力分等定级的结构用材,广泛应用在低层和多层建筑中。为了充分利用木材,减少木材天然缺陷和尺寸受限的特点,自 70 年代起,采用现代化加工方法制造的工程木产品成为欧美大跨木结构用材的主角,包括层板胶合木(glued-laminated timber, Glulam)和结构复合木材(structural composite lumber, SCL)。近十年来,CLT 逐渐成为国外多高层木结构的主要用材。北美及欧洲均出版了用于多高层建筑设计 CLT 产品设计指南^[6-7]。

CLT 是以厚度为 15~45 mm 的板材相互叠层正交组坯后胶合而成的木制产品,通常为单数层,包括强轴方向的顺纹受力层,以及横纹受力的正交层(图 1)。CLT 在工厂预制,单片最大尺寸可以做到 16 m 长,3.2 m 宽,0.5 m 厚(尺寸受热压磨具运输和吊装控制)。CLT 板材可直接由计算机控制进行自动化

开槽、切口,并可与墙面材料和防火材料等在工厂组合,形成组合预制墙体(楼板),极大提高了建造速度。CLT 层间正交双向胶合的特点,有效弥补了木材顺纹和横纹受力性能差异大的缺陷,形成良好的平面内抗压和抗剪强度^[8]。

随着 CLT 问世,一系列有关 CLT 板的受力性能得到广泛关注。近三届世界木结构工程会议上,CLT 的抗弯性能^[9]、横纹抗压性能^[10]、滚动剪切性能(rolling shear property)^[11]等成为讨论热点。

滚动剪切应力(rolling shear stress)为垂直于 CLT 强轴方向平面内剪应变的剪应力^[12]。由于木材的各向异性,木材的滚动抗剪强度和刚度远低于顺纹方向纵向抗剪强度和刚度。因此,CLT 板在平面外弯曲荷载作用下的承载力通常由中间横纹受力的正交层滚动剪切强度所控制^[13](图 2)。

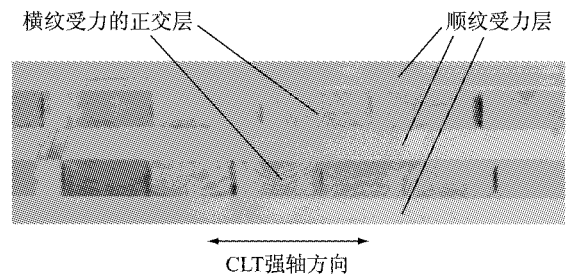


图 1 一个 5 层 CLT 板的横截面

Fig.1 Cross section of a 5-layer CLT panel

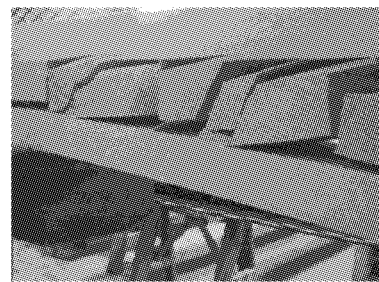


图 2 CLT 滚动剪切破坏^[13]

Fig.2 CLT rolling shear behavior^[13]

Frank Lam 团队的 Li Minghao^[11]通过扭剪试验和抗弯试验(图 3)研究表明,采用扭剪试验得到的滚动剪切强度比抗弯试验值高约 30%;同时指出 CLT 板在生产制作时的模压强度对滚动抗剪强度无明显影响。Schickhofer^[7]试验研究指出,CLT 中层与层的胶合,单层中板条与板条间侧面的胶合、木材的含水率、胶合时的模压强度对 CLT 的力学性能都有一定的影响。

Li Yuan^[14]基于 CLT 短期线性加载试验和长期梯形疲劳荷载试验(损伤累积试验)数据,得到了一

个修正的基于应力的损伤累积理论模型,可用于量化分析多种荷载工况下 CLT 层间滚动剪切强度的持荷效应。

Okabe^[15]通过抗弯试验和抗剪试验测试了不同层数、厚度与布置方式的日本雪松 CLT 板的抗弯刚度、抗弯承载力和抗剪承载力,与理论模型值对比误差控制在 12%。CLT 板抗剪承载力试验的破坏模式

(图 4)与 CLT 单根木条剪切强度试验的滚动剪切破坏模式(图 5)非常相似。

CLT 板选材方面,Wang^[16]通过对比试验,验证了使用白杨木作为 CLT 正交层的可行性,发现了 CLT 板的破坏模式主要包括节点破坏、剪切破坏和层离破坏。另外,Sigrist^[17]通过试验发现了使用澳大利亚非结构级辐射松制造 CLT 的潜力。

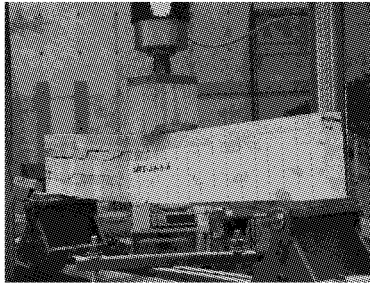


图 3 CLT 抗弯试验与滚动剪切破坏^[11]

Fig.3 Bending test and rolling shear failure mode of CLT^[10]

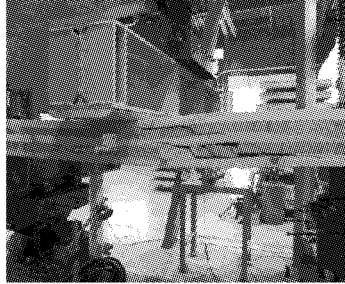


图 4 CLT 抗剪承载力试验^[15]

Fig.4 Shear capability test of CLT^[15]

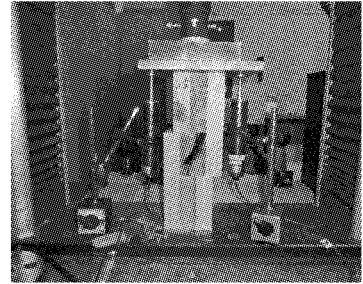


图 5 单根木条滚动剪切破坏^[15]

Fig.5 Typical failure of rolling shear test of the lumber^[15]

2 高层木结构关键问题研究

2.1 结构体系与性能

高层木结构体系包括 CLT 剪力墙结构、胶合木梁柱-支撑结构和木-混凝土混合结构,其中 CLT 剪力墙结构使用最为广泛。已建的高层木结构屈指可数,本文按照建成时间先后顺序对其进行了统计,见表 1。

2.1.1 CLT 剪力墙结构

CLT 剪力墙结构为剪力墙结构体系,采用 CLT 板作为墙板和楼板,承受竖向重力荷载以及水平向风荷载与地震作用。

2009 年,第一幢公认的高层纯木结构 Murray Grove(又称 Stadthaus)在伦敦落成。这栋 9 层的住宅楼(图 6)上部结构墙体、核心筒、楼板等均采用 CLT 板,提供结构的竖向承载力和抗侧承载力,是典型平台式施工的 CLT 剪力墙结构^[18]。2010 年,伦敦又建成了另一栋高层木结构-Birdport Housing^[19],同样采用 CLT 剪力墙结构体系。2012 年,澳大利亚墨尔本和意大利米兰也相继建成了 10 层高的 Forté^[5]和 9 层高的 Cenni di Cambiamento^[5],均采用 CLT 剪力墙结构。

2.1.2 胶合木梁柱支撑结构

胶合木梁柱支撑结构为框架与支撑共同工作结构体系。由于胶合木梁、柱连接节点难以做到刚性连接,一般采用支撑进行加强,构成框架-支撑结构体

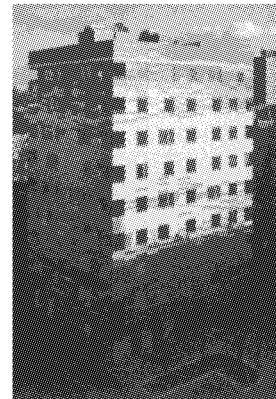


图 6 Murray Grove,伦敦^[5]

Fig.6 Murray Grove,London^[5]

系作为抗侧力结构体系。

2014 年 4 月动工建设的挪威卑尔根市 Treet 大楼是目前公认的世界最高木结构(图 7)^[20]。Treet 大楼高 14 层,主体结构采用胶合木梁柱支撑结构,胶合木构件间节点全部采用钢填板螺栓连接。为增加结构的整体性,该结构设置第 5 层和第 10 层为结构加强层,增加了环带桁架与混凝土楼板,分别作为上部 6~9 层与 11~14 层 CLT 整体预制式房间单元的支撑平台。隔墙、走廊、电梯井和阳台也采用 CLT。普通楼层(非加强层)采用 CLT 整体预制式房间单元,堆叠并连接于加强层之上,但不与胶合木主体结构连接,其竖向和水平荷载通过加强层传递到主体结构。

2.1.3 木-混凝土混合结构

高层木结构当中,电梯和楼梯井通常采用混凝

表 1 目前已建高层木结构(8层及以上)

Tab.1 Established tall wood buildings (eight-storey and higher)

编号	项目名称	地点	层数	结构体系	建筑用途	建成时间
1	Limnologen ^[5]	瑞典韦克舍	8	首层混凝土+上部 CLT 结构	住宅	2008
2	Murray Grove ^[18]	英国伦敦	9	CLT 剪力墙结构	住宅	2009
3	Birdport Housing ^[19]	英国伦敦	8	CLT 剪力墙结构	住宅	2010
4	Holz 8(H8) ^[21]	德国巴德艾比林	8	CLT 剪力墙+混凝土核心筒	商业/住宅	2011
5	Life Cycle Tower One (LCT ONE) ^[22]	奥地利多恩比恩	8	CLT 剪力墙+胶合木梁柱+混凝土核心筒	商业	2012
6	Forté ^[5]	澳大利亚墨尔本	10	CLT 剪力墙结构	住宅	2012
7	Cenni di Cambiamento ^[5]	意大利米兰	9	CLT 剪力墙结构	住宅	2012
8	Treet ^[20]	挪威卑尔根市	14	胶合木梁柱支撑+ CLT 剪力墙	住宅	2015

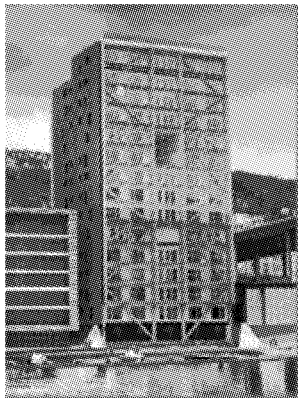


图 7 Treet 大厦, 卑尔根, 挪威^[19]
Fig.7 Treet, Bergen, Norway^[19]



图 8 UBC 学生宿舍楼^[22]
Fig.8 UBC Students' Dormitory^[22]

土核心筒,作为结构的抗侧力体系及消防逃生通道,如表 1 中的德国 H8 项目^[21]与奥地利 LCT ONE 大厦^[22];或者采用“底部混凝土结构+上部 CLT 剪力墙结构”的形式以满足底层大空间的使用和防潮,比如最早建成的瑞典 Limnologen 项目^[5].这类以木结构为主要结构体系,混凝土结构为辅助抗侧力体系或底部承台的高层木结构称为木-混凝土混合结构.

高层木结构呈现出高度快速增加的趋势,地域也开始向澳大利亚、美国、加拿大等地扩展.2015 年 10 月,加拿大 UBC 大学正式宣布计划建造一栋 18 层(53m 高)木结构宿舍楼(图 8),其同样采用混凝土核心筒作为电梯井和竖向消防通道,拟于 2017 年投入使用.其突破了英属哥伦比亚木结构不超过 6 层的限制^[23].

2.1.4 超高层木-混合结构

木材弹性模量较低,在竖向重力荷载的长期作用下,木材的长期蠕变影响大.随着高度的增加,结构抗侧刚度的要求也随之提高.另外,采用混凝土核心筒可同时解决消防竖向通道和提高抗侧性能的要求.因此,采用木材作为超高层结构的单一承重材料并不是最经济合理的选择.

2011 年, Van De Kuilen 等^[24]提出一个 43 层(150 m)的超高层木-混合结构概念(图 9).该结构

80%以上使用木材,每隔 10 层设置一个混凝土悬臂加强层,竖向荷载通过中间的 10 层 CLT 子结构传递到加强层,然后再通过中间的混凝土核心筒传递到基础.采用后张拉无粘结预应力筋连接伸臂梁和基础,分担风荷载作用下受拉侧 CLT 剪力墙的拉力.通过有限元模拟发现,使用该后张拉无粘结预应力筋作为补充的抗侧力体系能让顶点位移减少 30%^[25].但此想法仍为设计概念,尚无进一步研究论

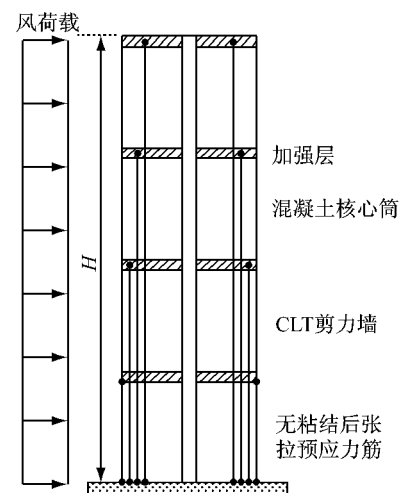


图 9 木-混凝土混合超高层结构概念^[23]
Fig.9 Concept of a wood-concrete hybrid super high-rise building^[23]

文发表。

2012年,温哥华设计师 Michael Green 提出了一个可用于高地震烈度区域、高达30层的木-钢混合结构设计概念-FFTT^[5] (finding the forest through the tress), 用作住宅、办公楼(图10)。按 Michael Green 的理念,该结构体系以 CLT 为竖向承重结构,采用钢梁并通过螺栓与主体结构连接,作为弱连接构件,实现“强柱弱梁”的抗震理念,确保结构的延性。混凝土仅用于地下室和基础部分。

2013年,基于美国芝加哥的一栋42层混凝土结构原型,SOM(Skidmore, Owings and Merrill)设计公司给出了同样建筑功能和结构性能的超高层木-混凝土混合结构的设计方案^[26](图11)。主体承重结

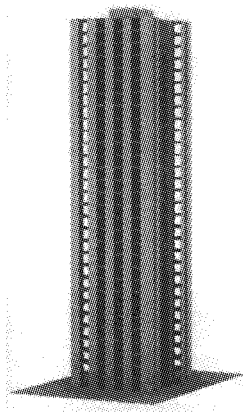


图10 FFTT^[5]
Fig.10 FFTT^[5]

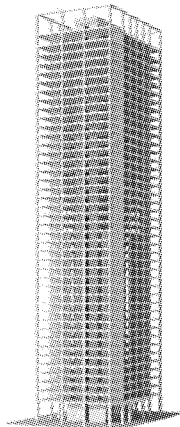


图11 超高层木结构之梦^[25]
Fig.11 Chicago, 42-storey^[25]

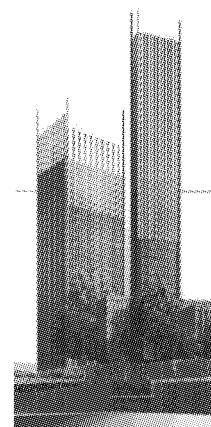


图12 Baobab^[26]
Fig.12 Baobab^[26]

总之,已建的高层木结构体系主要包括 CLT 剪力墙结构、胶合木梁柱-支撑结构和木-混凝土混合结构,或三者之间的合理组合;而超高层木-混凝土混合结构仍处于概念设计阶段。超高层木-混凝土混合结构或者高层木-钢混合结构是未来高层混合木结构发展的趋势。

2.2 节点连接体系与性能

CLT 结构体系采用平台法施工,即在一层完成面上进行上一层的施工,因此 CLT 剪力墙在竖向的连接是不连续的。而高层建筑中,水平抗侧力体系是结构的重点。风荷载或地震作用起控制作用。因此,CLT 墙体竖向连接、墙体与楼板连接,以及墙体与墙体水平向之间的连接是保证结构体系整体性和受力性能的关键。

2.2.1 抗剪连接件、抗拉锚固件

现代木结构常用销连接件。CLT 剪力墙结构中常采用抗拉锚固件(Hold-down)和抗剪连接件(图13)对墙体与基础、墙体与楼板以及水平墙体之间进行抗拉拔和抗剪连接^[28]。竖向 CLT 墙板之间通过槽

构是由旋切板胶合木(LVL)、平行木片胶合木(PSL)、Glulam 和 CLT 等工程木材料建造,而在节点处采用木-混凝土混合节点形式来提高节点的性能,减小因竖向荷载造成节点横纹受压的蠕变积累。考虑地下部分和基础,该结构30%为混凝土,70%为木材(材料体积比)。该混合结构比相应的混凝土结构和钢结构碳排放量分别减少60%和75%,目前正在等待合适的项目以实现此设计概念。

2014年,Michael Green 又使用“强柱弱梁”的延性设计理念^[27],采用钢梁和螺栓连接,计划在巴黎建一栋35层的木结构大楼 Baobab(图12)。Baobab 的主体结构由一系列的沿塔楼通长布置的 CLT 和 Glulam 组成墙体、木柱、木质核心筒等。

口和自攻螺钉进行连接,一个3层的 CLT 结构振动台试验表明该节点具有非常好的延性,在结构的耗能方面扮演着非常重要的角色^[29]。

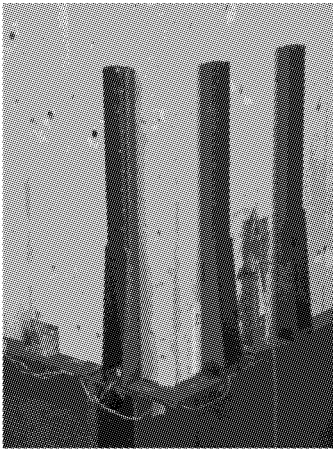
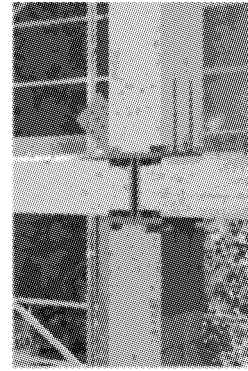
基于 Johansen 屈服理论,Blass 和 Uibel 团队通过大量试验研究,得到了 CLT 的销槽承压强度及 CLT 销连接的承载力计算方法^[30-31],和自攻螺钉抗拔强度与承载力计算方法^[32]。

2.2.2 避免横纹受压节点

针对高层木结构胶合木梁柱体系,由于底层累计重力荷载大,为解决柱与梁、板之间的横纹承压问题,《加拿大高层木结构设计建造技术指导》^[5]中推荐了一种节点连接方式(图14),其竖向荷载直接通过节点处的 H 型钢构件传递到下层柱,从而避免了梁、板的横纹受压破坏。而欧洲木业则推荐木-混凝土组合楼板,并通过混凝土柱传递竖向应力,避免木梁或楼板的横纹蠕变。

2.2.3 CLT 新型连接节点

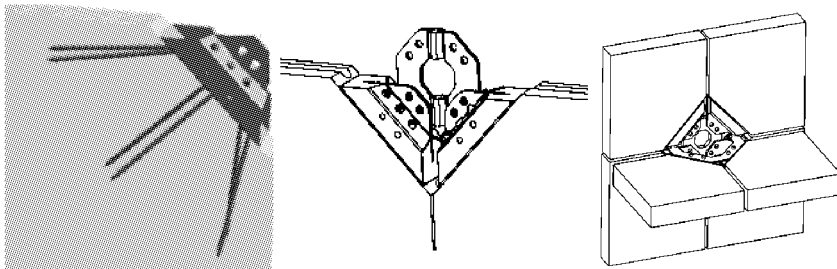
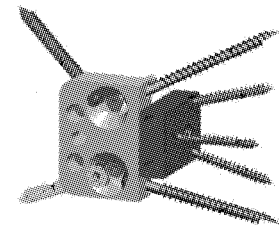
也有一些学者提出了新型的 CLT 连接体系。

图 13 CLT 剪力墙结构节点连接体系^[27]Fig. 13 CLT connection system^[27]图 14 避免横纹受压梁柱节点^[5]Fig. 14 Post to beam joint for avoiding compression perpendicular to grain^[5]

2014 年世界木结构工程会议上, Polastri 等^[33]提出了一种新型的 CLT 连接体系—“X-RAD”:由硬木包裹一个金属多向连接件,通过全螺纹螺杆将其固定于 CLT 板的边角,板与板之间可以通过该节点很便捷地进行连接(图 15)。这种节点大大减少了传统使用的螺栓等连接件的数量,加快了 CLT 板的预制和组装效率,并为 CLT 板节点提供了足够的强度和刚度。同时, Polastri 等^[34]对其进行了节点的前期优化

试验、抗拉拔试验和抗剪试验,建立了有限元模型。分析显示其荷载滑移曲线与实验结果对比吻合度较高,节点延性较好。

Kraler 等^[35]也提出了一种新型 CLT 连接件—“SHERPA”(图 16),指出该节点具备良好的结构性能和经济性,同时可以进行快速预制和装配,目前仍在进行深入研究。

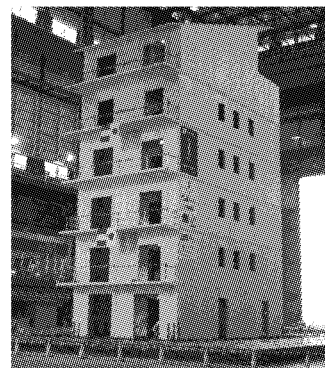
图 15 固定于 CLT 板边角的 X-RAD 连接示意图^[32]Fig. 15 X-RAD connection fixed at a corner of a CLT panel^[32]图 16 CLT 连接件 Sherpa^[34]Fig. 16 Sherpa-CLT-connector^[34]

2.3 抗震与抗风性能

CLT 结构整体抗震、抗风性能的试验研究目前主要针对多层建筑,最高达到 7 层。针对高层木结构整体抗震、抗风的抗侧力性能或动力特性分析目前主要通过有限元的方法。

2.3.1 抗震性能

2005~2007 年,由意大利林木研究院(CNR-IVALSA)牵头的 SOFIE 项目完成了 CLT 剪力墙结构若干抗震性能试验研究。前期对振动方向上的三种外墙开洞布置的单层 CLT 足尺房屋(7 m×7 m)进行了伪动力试验^[36]。2006 年对一个 3 层的 CLT 结构进行了足尺振动台试验^[37],最后于 2007 年完成了一个 7 层足尺 CLT 结构的振动台试验(图

图 17 七层 CLT 足尺振动台试验^[27]Fig. 17 Shaking table test of seven-storey CLT building^[27]

17)^[28]. 因整个剪力墙、楼板等全部采用 CLT 墙板, 结构抗侧刚度大, 且结构冗余度高、整体性强, 在模拟地震作用下该 7 层足尺结构模型的反应好于预期, 在灾难性大震作用下, 没有出现明显的破坏。

Popovski 等^[38]结合试验研究和理论分析, 提出了多高层木结构抗震抗风的荷载系数 R 和设计方法。

木材质轻, 高层木结构通常由风荷载起控制作用。因此, 风荷载作用下的动力特性逐渐得到高层木结构研究的重视。

2.3.2 抗风性能

加拿大林产创新研究院(FPInnovations)启动了一个研究项目, 拟研究木结构在风荷载作用下的动力特性。目前已对 6 层及以下木结构房屋进行了环境振动测试(ambient vibration test, AVT), 监测风速、风向和结构的加速度响应。通过 AVT 测到的 4~6 层的木结构固有频率和阻尼与加拿大国家建筑规范公式吻合良好。下一步计划是对更高层木结构进行 AVT 测试和风荷载下的动力响应监测^[39]。

Bjertnæs 等^[40]对目前最高木结构建筑, 14 层高的挪威 Treet 大楼进行了有限元分析, 其顶层楼板在重现期为一年的风荷载作用下的加速度响应稍大于 ISO 10137 标准的推荐值, 但处于可接受的范围之内, 满足舒适度要求。后续计划在建筑的关键楼层安装加速度传感器和风速计, 测量结构在不同风速作用下的真实加速度与阻尼。Utne^[41]对 Treet 大楼风荷载作用动力特性(频率、阻尼)进行了深入的有限元分析, 并对节点刚度、子单元模块对结构阻尼的影响进行了参数化分析。

Reynolds 等^[42]使用 Glulam 梁柱框架、CLT 楼板作为抗侧力体系, 建立了 1 个 20 层的高层木结构有限元模型, 研究风荷载作用下高层木结构的动力响应。指出了结构的阻尼对减少风荷载动力响应的重要性, 并通过试验分析了钢销连接节点的刚度与阻尼在动力荷载作用下的动态特性, 指出高层木结构的动力特性在全寿命周期中会不断变化, 因而值得关注。

瑞典 Folkhem 公司目前正在设计一栋 22 层 CLT 木结构大楼-Hallonbergen, 项目位于松德比贝里市。Tjernberg^[43]对 Hallonbergen 的风致动力响应进行了研究, 分析了 11 种不同结构体系的有限元模型在风荷载作用下的顶点位移和加速度响应, 推荐了 4 种可以满足动力性能要求的结构体系。

2.4 抗火性能

抗火性能是限制木结构高度的主要原因之一。

轻型木结构墙板通常采用外包防火石膏板和内部填充石棉等措施。公共建筑需要使用烟感装置和自动喷淋装置。与轻型木结构不同, 高层木结构使用大尺寸实木构件, 比如 CLT 板或 Glulam、SCL 梁柱, 其抗火性能由木材炭化形成的阻燃性能决定。

2.4.1 炭化层

火灾作用下, 木材最外层在 300℃左右开始转化为炭化层, 隔离了明火与木的直接作用, 形成类似保护层的作用^[44]。木材的炭化速率可通过试验直接测量, 不同的树种的炭化速率不同。欧洲木结构设计规范(EN 1995-1-2;2004)给出 LVL、Glulam 等实木构件炭化速率通常在 $0.65 \sim 0.80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 之间^[45]。用炭化速率乘以燃烧时间, 可估算炭化层的厚度。除去炭化层, 木截面内部未被燃烧的部分仍具有承载力, 因此, 根据耐火极限要求以及炭化速率, 可以对木构件进行抗火设计(图 18)^[46]。例如, 如图 18 所示, 要达到 1 h 的耐火极限, 即对实际受力所需的木构件截面($b \times d$)的四周, 增加约 60 mm 的厚度(厚度由该树种的炭化速率决定)得到构件的实际截面尺寸 B 和 D 。

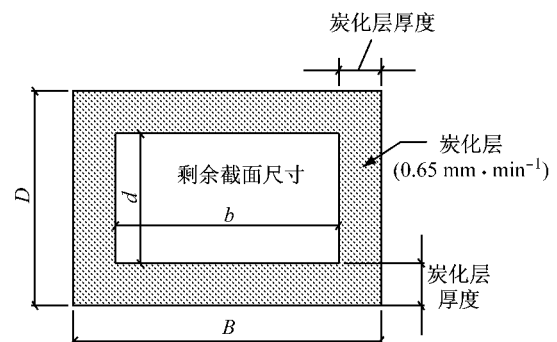


图 18 四面曝火实木构件剩余截面计算

Fig. 18 Calculation of reduced dimension of solid wood member under four-sided fire exposure

2.4.2 CLT 抗火

CLT 虽属实木构件, 但却是用粘结剂将较薄的奇数层规格材双向正交胶合而成, 最外层完全炭化后可能会产生脱落, 因此, CLT 的抗火性能需要进行深入的研究。Frangi 等^[47]通过试验和有限元模型研究了 CLT 板的抗火性能, 发现了 CLT 在火灾作用下会产生脱层现象, 而且脱落的未完全燃尽的炭化层会加强火势, 同时, 裸露的芯材重新被燃烧。原有用于实木大尺寸构件的防火设计方法不能简单用于 CLT 结构中。

McGregor 等^[48]做了 5 个木结构室内火灾对比试验, 研究 CLT 墙板对室内火灾的影响。试验发现

石膏板能对 CLT 墙板起到非常好的防火作用,同时也关注到了未安装石膏板的 CLT 脱层现象,以及其对房间火势造成的不利影响:CLT 脱层会导致房间能量释放增加 160%,同时外露的新木层助长了新一轮火势,使得衰退阶段曲线高于 ISO 834 标准升温曲线。

Frangi^[49]进一步对 CLT 的脱层现象进行了试验研究,发现 CLT 板的脱层问题与所使用的粘结剂有关,热敏性粘结剂(如聚氨酯粘结剂)胶合而成的 CLT 板最外层完全炭化后会脱落,而非热敏性粘结剂胶合而成的 CLT 板不会产生脱层现象,炭化速率和均匀实木构件相似(约为 $0.65 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)。另外,CLT 板每层的厚度越厚,其脱层频率越低,防火性能相对更好。

加拿大国家研究委员会(NRC)和加拿大林产创新中心(FPInnovation)对 3 种不同厚度的墙板和 5 种不同厚度的楼板采用裸露和石膏板封装两种方式,进行了抗火试验后得出结论:即使裸露(没有采取石膏板保护)的 CLT 楼板也有良好的防火性能;考虑竖向荷载作用的 CLT 楼板(7 层,厚 245 mm)炭化速度是 $0.65 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,持荷时间 178 min^[50]。但已建高层中,为安全起见,CLT 墙板和天花板仍采用石膏板覆盖。

针对整体结构防火性能,基于 SOFIE 项目,Frangi 等^[51]对一个三层足尺 CLT 结构房屋进行了火灾试验,验证了木结构房屋具有良好的整体防火性能。加拿大国家研究委员会(NRC)和加拿大林产创新中心等研究机构拟对 CLT 建筑和轻钢建筑进行相同的火灾试验,以证明可燃性的木结构与不可燃的轻钢结构具有相同的或更好的防火性能^[52]。

3 我国发展高层木结构的展望与关键问题

目前,在国家政策的大力支持和推动下,一批木结构设计和施工规范相应出台,多高层木结构设计规范也在起草之中;越来越多的高等院校和科研机构开展了对不同木材及复合材的材料特性、结构体系和连接方式、受力特性、耐久性、防火性等研究;一批具有资质的木结构建造商正在逐步实现标准化、规模化生产。高层木结构及木混合结构将成为我国生态城市发展的必然趋势。

结合国内研究现状和国外研究进展,发展我国

高层木结构尚需关注以下关键技术问题:

(1)结构用材。我国尚未建成批量生产 CLT 的流水线,目前主要依靠进口原材料。进口材是近期发展我国木结构产业的有效方式,零关税的木材成本较国产材便宜,但发展我国具有知识产权的现代化结构用木材是实现生态化城镇建设战略提升的必然要求。

(2)材料力学性能。CLT 是目前高层木结构的主要结构用材,CLT 板材的合理构成、在平面内荷载作用下的抗剪性能、竖向受压对抗剪性能的影响、平面外荷载作用下的抗弯和滚动剪切性能,和长期荷载作用下的蠕变性能等是今后所需研究的关键技术问题。

(3)结构体系与性能。纯木结构的建造高度会受到材料特性的限制,可以利用混凝土、钢材等材料的力学性能优势,同木材互补,提出创新的高层甚至超高层木混合结构体系。另外,高层木结构抗震、抗风性能的设计理论尚不完善,应加强整体结构的地震模拟振动台试验、混合模拟试验、环境振动测试和风洞试验,以及相应的理论分析与数值模拟。

(4)连接方式与性能。木构件之间主要通过销类抗剪件连接,结构的抗侧刚度较低,且节点处可能发生木材的横纹劈裂破坏。因此,高层木结构中 CLT 等木构件的连接方式、高层木混合结构中木材与混凝土或钢材之间的连接形式与协同工作机理也是高层木结构研究的关键。

(5)防火性能。CLT 或胶合木在受力状态下构件和节点的防火性能,以及高层木结构火灾作用下的整体抗倒塌性能需深入的研究;高层建筑居住密度高,且受到水喉喷水压力的限制,在火灾发生时所需的消防通道,楼层之间、户与户之间等的消防要求需有不同于低层木结构的专门规定。

为推广和发展木结构,还应加强高层木结构相应设计方法、规范和法规的建设;加强对木结构和高层木(木混合)结构的研究和推广,给予相应的政策和经费支持;加强现代木结构和高层木(木混合)结构的教育与宣传,以提高社会认知度;加强人工林的科学培育以实现原材料自给自足。

4 总结

本文介绍和分析了国外高层木结构的研究与应用现状,重点介绍了 CLT 的最新研究进展,指出其正交层的滚动剪切性能是研究重点。对高层木结构

的关键问题,即结构体系、结构抗震与抗风性能、节点连接和抗火性能的研究进展和研究成果进行了综述,指出:CLT剪力墙结构是目前使用最广泛的高层木结构体系,而高层木混合结构是高层木结构向更高层发展的趋势;结构体系中抗侧力性能、节点连接是今后研究的重点;高层木结构抗火性能的研究可以借鉴低层和多层木结构,但高度和人群密集的影响需特别关注,同时需要重视火灾作用下CLT的脱层问题。最后,对我国高层木结构的发展进行了展望,对关键问题进行了分析和归纳,以期推动我国多高层木(木混合)结构研究和应用的发展。

参考文献:

- [1] Van de Kuilen J W G, Ceccotti A, Xia Z, *et al.* Very tall wooden buildings with cross laminated timber[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 14:1621.
- [2] Xiong H B, Zhang C, Yao J T, *et al.* Environmental impact comparison of different structure systems based on life cycle assessment methodology[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 374: 405.
- [3] British Columbia of Canada. Wood frist act [Z]. British Columbia:[s. n.], 2009.
- [4] Forest Europe, European Commission, UNECE/FAO. Good practice guidance on the sustainable mobilisation of wood in Europe [EB/OL]. [2010-03-01]. http://www.unece.org/fileadmin/DAM/publications/oes/Timber_wood-mobilization-good_practice-guidance.pdf, 2010.
- [5] Karacabeyli E, Lum C. Technical guide for the design and construction of tall wood buildings in Canada. 1st ed.[M]. [S. l.]:FPInnovations, 2014.
- [6] Erol Karacabeyli, Brad Douglas. CLThandbook: cross-laminated timber[M]. [S.l.]: FPInnovations, 2013.
- [7] Schickhofer G, Bogensperger T, Moosbrugger T. CLThandbook: solid timber construction technique with cross laminated timber—verification based on the new European standardization concept[M]. [S. l.]: Verlag der TU Graz, 2010.
- [8] Brandner R, Flatscher G, Ringhofer A, *et al.* Cross laminated timber (CLT): overview and development [J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2016, 74(3): 331.
- [9] Okabe M, Yasumura M, Kobayashi K, *et al.* Prediction of bending stiffness and moment carrying capacity of sugi cross-laminated timber[J]. *Journal of Wood Science*, 2014, 60(1): 49.
- [10] Serrano E, Enquist B. Compression strength perpendicular to grain in cross-laminated timber (CLT)[C]//Proceedings of the 11st World Conference on Timber Engineering (WCTE). Trentino: WCTE, 2010, 1:441-448.
- [11] Li Minhao, Lam F, Li Yuan. Evaluating rolling shear properties of cross laminated timber torsional shear tests and bending tests[C]//Proceedings of the 13st World Conference on Timber Engineering(WCTE). Quebec: WCTE, 2014:1-7.
- [12] Fellmoser P, Blaß H J. Influence of rolling shear modulus on strength and stiffness of structural bonded timber elements [C]//CIB-W18 Meeting. Vancouver:[s. n.], 2004:1-8.
- [13] Jöbstl R A, Schickhofer G. Comparative examination of creep of GTL and CLT-slabs in bending[C]//Proceedings of the 40th meeting of CIB-W18. Bled; Slovenia. 2007:1-8.
- [14] Li Yuan, Lam F, Li Minhao, *et al.* Duration-of-load effect on the rolling shear strength of cross laminated timber: Duration-of-load tests and damage accumulation model[C]// Proceedings of the 13st World Conference on Timber Engineering(WCTE). Quebec: WCTE, 2014:1-6.
- [15] Okabe M, Yasumura M, Kobayashi K. Estimation of bending stiffness, moment carrying capacity and internal shear force of sugi CLT panel[C]//Proceedings of the 13st World Conference on Timber Engineering(WCTE). Quebec: WCTE, 2014:1-9.
- [16] Wang Z, Fu H, Chui Y, *et al.* Feasibility of using poplar as cross layer to fabricate cross-laminated timber [C]// Proceedings of the 13st World Conference on Timber Engineering(WCTE). Quebec: WCTE, 2014:1-8.
- [17] Sigrst C, Lehmann M. Potential of CLT produced from non-structural grade australian pinus radiata[C]// Proceedings of the 13st World Conference on Timber Engineering (WCTE). Quebec: WCTE, 2014:1-8.
- [18] Waugh Thistleton Architects. Murray Grove—The world’s tallest modern residential timber building [EB/OL]. [2012-05-29]. <http://www.archilovers.com/projects/58211/murraygrove.html#post.2012>.
- [19] Holt R, Wardle K. LESSONS FROM TALL Wood Buildings: what we learned from ten international examples [EB/OL]. [2014-06-02]. http://ca.perkinswill.com/sites/default/files/ID%20_PWRJ_Vol0602_01_Lessons%20from%20Tall%20Wood%20Buildings.pdf, 2014.
- [20] Abrahamsen R B, Malo K A. Structural design and assembly of “treet”—A 14-storey timber residential building in norway[C]// Proceedings of the 13st World Conference on Timber Engineering(WCTE). Quebec: WCTE, 2014:1-8.
- [21] Winter S. ‘nearly’ high-rise timber buildings in Germany—projects, experiences and further development [C]// Proceedings of the 13st World Conference on Timber Engineering(WCTE). Quebec: WCTE, 2014:1-8.
- [22] Professner H, Mathis C. LifeCycle Tower—High-Rise Buildings in Timber[C]//Structures Congress 2012. Chicago: ASCE, 2012:1980-1990.
- [23] Chan K. 18-storey UBC wooden tower to be one of the tallest of its kind in the world [EB/OL]. [2015-10-01]. <http://www.vancitybuzz.com/2015/10/ubc-tall-wood-building/>, 2015.
- [24] Van de Kuilen J W G, Ceccotti A, Xia Z, *et al.* Very tall wooden buildings with cross laminated timber[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 14: 1621.
- [25] Van de Kuilen J W G, Xia Z. Lateral behavior of post-tensioned cross laminated timber walls using finite element analysis[C]// Proceedings of the 13st World Conference on Timber Engineering(WCTE). Quebec: WCTE, 2014:1-8.
- [26] Archinect. SOM releases timber tower research project [EB/OL]. [2013-06-03]. <http://archinect.com/news/article/>

- 74511379/som-releases-timber-tower-research-project, 2013.
- [27] Oldfield P. Tree houses; are wooden skyscrapers the future of tall buildings? [EB/OL]. [2015-07-07]. <http://www.theguardian.com/artanddesign/2015/jul/07/tree-houses-are-wooden-skyscrapers-the-future-of-tall-buildings>, 2015.
- [28] Ceccotti A, Sandhaas C, Okabe M, *et al.* SOFIE project - 3D shaking table test on a seven-storey full-scale cross-laminated timber building [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, 42(13):2003.
- [29] Sandhaas C, Boukes J, Van de Kuilen J W G, *et al.* Analysis of X-lam panel-to-panel connections under monotonic and cyclic loading [C]//Proceedings of 42nd CIB-W18 Meeting, Vancouver:[s. n.], 2009; 2-12.
- [30] Uibel T, Blaß H J. Load carrying capacity of joints with dowel type fasteners in solid wood panels[C]//Proceedings. CIB-W18 Meeting, Vancouver:[s. n.], 2006;1-10.
- [31] Uibel T, Blaß H J. Edge joints with dowel type fasteners in cross laminated timber[C]//Proceedings. CIB-W18 Meeting, Vancouver:[s. n.], 2007;1-11.
- [32] Frese M, Fellmoser P, Blass H J. Models for the calculation of the withdrawal capacity of self-tapping screws[J]. *European Journal of Wood & Wood Products*, 2010, 67(2):373.
- [33] Polastri A, Angeli A, Gianni D R. A New Construction System for CLT Structures [C] //Proceedings of the 13st World Conference on Timber Engineering(WCTE). Quebec: WCTE, 2014;1-8.
- [34] Polastri A, Angeli A. An Innovative connection System for CLT Structures; Experimental-Numerical Analysis [C]//Proceedings of the 13st World Conference on Timber Engineering(WCTE). Quebec: WCTE, 2014;1-8.
- [35] Kraler A, Kögl J, Maderebner R, *et al.* Sherpa-CLT-Connector for Cross Lamunated Timber (CLT) Elements[C]//Proceedings of the 13st World Conference on Timber Engineering(WCTE). Quebec: WCTE, 2014;1-8.
- [36] Lauriola M P, Sandhaas C. Quasi-static and pseudo-dynamic tests on XLAM walls and buildings [C]//COST E29 International Workshop on Earthquake Engineering on Timber Structures. Coimbra:University of Coimbra, 2006;463-467.
- [37] Ceccotti A. New Technologies for Construction of Medium-Rise Buildings in Seismic Regions; The XLAM Case[J]. *Structural Engineering International*, 2008, 18(18):156.
- [38] Popovski M, Moammad M, Ni Chun, *et al.* Design and construction of tall wood buildings; Input data, testing and advanced analysis [C]//Proceedings of the 13st World Conference on Timber Engineering(WCTE). Quebec: WCTE, 2014;1-11.
- [39] Hu L, Omeranovic A, Gagnon S, *et al.* Wind-induced vibration of tall wood buildings; Is it an issue? [C]//Proceedings of the 13st World Conference on Timber Engineering(WCTE). Quebec: WCTE, 2014;1-8.
- [40] Bjertnæs M, Malo K. Wind-induced motions of "Treet"-A 14-storey timber residential building in Norway[C]// Proceedings of the 13st World Conference on Timber Engineering(WCTE). Quebec: WCTE, 2014;1-8.
- [41] Utne I. Numerical Models for Dynamic Properties of a 14 Storey Timber Building [D]. Trondheim; Norwegian University of Science and Technology. Department of Structural Engineering, 2012.
- [42] Reynolds T, Chang W, Harris R. Wind-induced vibration of tall timber buildings [C]//2011 IASS Annual Symposium: IABSE-IASS 2011: Taller, Longer, Lighter. [S. l.]: University of Bath, 2011;1-8.
- [43] Tjernberg F. Wind-induced dynamic response of a 22-storey timber building; Options for structural design of the Hallonbergen project[D]. Stockholm; KTH Royal Institute of Technology, 2015.
- [44] White R H. Fire resistance of exposed wood members[C]//5th International Scientific Conference. Athens: [s. n.], 2004; 337- 344.
- [45] EN 1995-1-2;2004. Eurocode 5; Design of Timber Structure-Part 1-2; General-Structural fire design[M]. London; British Standards Institution, 2004.
- [46] Barber D, Gerard R. Summary of the fire protection foundation report - fire safety challenges of tall wood buildings[J]. *Fire Science Reviews*, 2015, 4(1):1.
- [47] Frangi A, Fontana M, Knobloch M, *et al.* Fire behaviour of cross-laminated solid timber panels[J]. *Fire Safety Science*, 2009, 9(9):1279.
- [48] McGregor C J. Contribution of cross laminated timber panels to room fires[D]. Ottawa; Carleton University, 2013.
- [49] Frangi A, Fontana M, Hugi E, *et al.* Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire[J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(8):1078.
- [50] Full-scale fire resistance tests on cross-laminated timber[EB/OL]. [2013-02-20]. <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/ci-ic/article/v17n4-4>, NRC Publication online, 2013.
- [51] Frangi A, Bochicchio G, Ceccotti A, *et al.* Natural full-scale fire test on a 3 storey XLam timber building[C]// Proceedings of the 10st World Conference on Timber Engineering(WCTE). Miyazaki; WCTE, 2008; 2-5.
- [52] NRC fire researchers making strides in mid-rise wood research project[EB/OL]. [2013-02-20]. <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/ci-ic/article/v17n4-2>, NRC Publication online, 2013.