

doi:10.11707/j.1001-7488.20201118

国产杉木不同层板厚度对正交胶合木力学性能的影响^{*}

王菲彬¹ 王昕萌² 杨树明³ 姜桂超² 阙泽利² 周海宾⁴

(1. 南京林业大学风景园林学院 南京 210037; 2. 南京林业大学材料科学与工程学院 南京 210037;
3. 江苏兄弟智能家居有限公司 宿迁 223800; 4. 中国林业科学研究院木材工业研究所 北京 100091)

摘 要: 【目的】研究国产杉木不同层板厚度对正交胶合木(CLT)力学性能的影响,以拓宽速生材杉木在木结构建筑领域的应用范围,促进 CLT 在国内的发展。【方法】在国产杉木 CLT 整体厚度不变的前提下,研究不同层板厚度对 CLT 抗弯和抗剪性能的影响,结合抗弯试验结果,运用 CLT 静力学分析理论对 CLT 试件进行抗弯性能计算并比较。【结果】在 CLT 整体厚度不变的前提下,3 层 CLT 试件的抗弯刚度最大,5 层和 7 层 CLT 试件的抗弯刚度分别降低 11%和 18%。5 层 CLT 试件的抗弯强度相比 3 层 CLT 试件提高 18%,相比 7 层 CLT 试件提高 36%,5 层和 7 层 CLT 试件的抗剪强度相比 3 层 CLT 试件分别提高 2.6%和 16%。抗弯刚度理论分析与试验结果趋势相同,而抗弯强度理论分析得出层数越多其值越高,试验结果显示 5 层优于 7 层;以 5 层 CLT 试件为例,保持整体厚度不变,增加奇、偶层厚比例,CLT 试件的力学性能均有一定比例上升,理论分析与试验结果具有相同趋势。【结论】在整体厚度不变的前提下,CLT 层板越厚,CLT 结构的抗弯刚度越佳,抗剪强度越差,破坏模式越单一,5 层 CLT 试件的抗弯强度最佳;在一定比例范围内,增加奇、偶层厚比例,可有效提高 CLT 试件的抗弯和抗剪性能。

关键词: 杉木; 正交胶合木; 层板厚度; 力学性能

中图分类号: TU366.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-7488(2020)11-0168-08

Effect of Different Laminate Thickness on Mechanical Properties of Cross-Laminated Timber Made from Chinese Fir

Wang Feibin¹ Wang Xinmeng² Yang Shuming³ Jiang Guichao² Que Zeli² Zhou Haibin⁴

(1. College of Landscape and Architecture, Nanjing Forestry University Nanjing 210037;
2. College of Material Science and Engineering, Nanjing Forestry University Nanjing 210037;
3. Jiangsu Brother Smart Home Co., Ltd. Suqian 223800; 4. Research Institute of Wood Industry, CAF Beijing 100091)

Abstract: 【Objective】This research was implemented to study the influences of different laminate thicknesses of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) on the mechanical properties of cross-laminated timber (CLT), and to expand the application range of Chinese fir in the field of wood structure construction and further promote the development of CLT in China. 【Method】Under the premise that the overall thickness of the domestic Chinese fir CLT remains unchanged, the effects of different layer thicknesses on the CLT bending and shearing properties were studied. Combined with the bending test results, the existing CLT statics analysis theory was used to perform the above tests on the CLT specimens. The bending performances under different conditions were also calculated and compared. 【Result】Under the premise of an unchanging total thickness, bending stiffness of the three-layer CLT specimens was the highest, and the five-layer and seven-layer specimens were reduced by 11% and 18%, respectively. The bending strength of the five-layer CLT specimens was increased by 18% compared with the three-layer specimens, which was 36% higher than that of the seven-layer specimens. The shear strength of the five-layer specimens and the seven-layer specimens was increased by 2.6% and 16%, respectively, over the three-layer specimens. The trend of the theoretical analysis of the bending stiffness was the same as the test results, however, the theoretical analysis of the bending strength showed that the higher the number of

收稿日期: 2018-07-26; 修回日期: 2018-10-25。
基金项目: 国家十三五科技支撑项目(2018YFD06003035)。
^{*} 阙泽利为通讯作者。

layers, the higher the value, the test results showed that the five layers were better than the seven layers. When the five-layer specimens were taken as an example, under the premise of overall thickness unchanged, increasing odd and even layer thickness ratio could effectively improve the bending and shear properties of CLT specimens in a certain percentage range. Theoretical analysis had the same trend as the experimental results. 【Conclusion】 The results showed that under the premise of overall thickness unchanged, the thicker the CLT laminated, the better the bending stiffness was, the worse the shear properties presented, and the single failure mode was. The 5-layer CLT specimen had the best bending strength; within a certain ratio range, increasing the ratio of odd and even layer thickness could effectively improve the bending and shear resistance of the CLT specimen.

Key words: Chinese fir; cross-laminated timber (CLT); laminate thickness; mechanical properties

当前,国内木结构建筑形式主要有轻型木结构、胶合木结构和普通木结构,其中北美轻型木结构体系在现代木结构建筑中占据主导地位。最新《木结构设计标准》(GB 50005—2017)规定,国内轻型木结构房屋层数不得超过 3 层,在很大程度上限制了现代木结构建筑在国内的发展。正交胶合木(cross-laminated timber, CLT)的出现改变了这一局面。CLT 是一种新型建筑结构材料,采用相邻层板正交 90°交错层压的组坯方式,尺寸稳定性高,力学性能优异。在国外,CLT 建筑已达 18 层以上,我国也制定出《多高层木结构建筑技术标准》(GB/T 51226—2017),且国内第一例 6 层木结构建筑已在山东省内开始实施,如果 CLT 在国内得到推广,将极大程度推动现代木结构建筑在国内的发展。

国外对 CLT 的研究无论是广度还是深度均达到了很高水平(Park *et al.*, 2003; Frangi *et al.*, 2009; Zhou *et al.*, 2014; Schneider *et al.*, 2015; Cao *et al.*, 2016; Knorz *et al.*, 2016; Hashemi *et al.*, 2018),而我国仅有南京林业大学、中国林业科学研究院等对 CLT 的材料性能与截面设计、节点连接承载及其滚动剪切、抗弯等力学性能进行了研究,涉及层板模量、组坯方向和层板层数对 CLT 力学性能的影响等(阙泽利等, 2015; 2017; 董惟群等, 2016; 龚迎春, 2017)。CLT 属于多层复合材料,层板不宜太厚也不宜太薄,在整体厚度一定的前提下,层板太厚会造成构件整体不均匀,缺陷过于集中;层板太薄会对制造工艺提出更高要求,加大工作量,同时也会增加胶料和木材用量(郭飞燕, 2007)。因此,在满足力学性能的前提下,应充分考虑层板厚度的影响,但目前国内尚缺少此方面研究。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方重要的速生用材树种,生长快、产量高(王俊鸿等, 2014),但也存在强度差、易吸湿、尺寸不稳定等缺陷,从而使得杉木这种小径材在现阶段仅主要用于装饰、家具等方面。积极拓宽杉木的应用范围,不仅

能提升其利用价值,更能一定程度上促进我国木材工业的发展。

鉴于此,本研究选用国产杉木为试验材料,对其进行层板组坯、冷压成型,并通过对不同层板厚度的 CLT 进行静力学试验,探讨在整体厚度不变的前提下不同层板厚度对 CLT 力学性能的影响,以期拓宽速生材杉木在木结构建筑领域的应用范围,促进 CLT 在国内的发展。

1 材料与方法

1.1 试验材料

市场采购国产杉木,产地福建,平均密度 $0.394\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,平均含水率 13.5%,层板材质目测分等为 II_b。参考《木结构试验方法标准》(GB/T 50329—2002),结合生产加工实际,制备截面尺寸为 300 mm × 95 mm、长度为 2 200 mm 和 500 mm 的试件分别用于抗弯和抗剪试验。

HB S309 单组分液态聚氨酯胶黏剂,由普邦公司提供,主要化学成分为异氰酸酯预聚体,其与木材和空气中的水分或湿气反应生成坚固的胶层。HB S309 聚氨酯最大陈化时间约 30 min,固化时间约 120 min。

多层复合结构材的性能与组成结构单元的性能息息相关,在 CLT 力学试验前,对杉木板清材小试件的各项性能参数依据国家标准(GB/T 1935—2009; GB/T 1936.1—2009; GB/T 1936.2—2009; GB/T 1937—2009)进行测试,结果如表 1 所示。

试验方案分 2 种:方案一研究在试件整体厚度(95 mm)不变的前提下层板厚度对 CLT 力学性能的影响,其组坯方式如表 2 所示;方案二以 5 层 CLT 结构为例,研究在试件整体厚度(95 mm)不变的前提下奇、偶层厚比例对 CLT 力学性能的影响,其比例关系如表 3 所示。

表 1 杉木层板力学性能测试结果

Tab.1 The results of mechanical properties of Chinese fir

性能 Property	测试值 Measured value/MPa	标准差 Standard deviation(%)	变异系数 Coefficient of variation(%)
顺纹抗压强度 Compressive strength of parallel to grain	28.3	2.8	14.9
抗弯强度 Bending strength	50.8	3.2	16.9
顺纹弹性模量 Elastic modulus parallel to grain	7 600	3.1	18.1
横纹弹性模量 Elastic modulus perpendicular to grain	262	2.1	12.5
顺纹剪切强度 径面 Radial surface	4.9	3.4	14.7
Shear strength parallel to grain 弦面 Chord surface	5.4	2.7	15.6

表 2 CLT 试件的组坯方式

Tab.2 Lay-up type of the CLT specimens

试件结构 Structure	层板厚度 Thickness of the laminates/mm
3 层 Three layers	31.7
5 层 Five layers	19.0
7 层 Seven layers	13.6

表 3 CLT 试件奇、偶层层板厚度变化

Tab.3 Thickness variation of the odd and even layers of the CLT specimens

奇数层层板厚度 Odd layer thickness/mm	偶数层层板厚度 Even layer thickness/mm	奇偶层层板厚度比 Odd to even layer thickness ratio
19	19	1.0
21	14	1.5
23	12	1.9

CLT 采用相邻层板正交 90° 交错层压组坯方式,其中奇数层为主要方向层(顺纹方向),偶数层

为次要方向层(横纹方向)。顺纹方向层起主要力学承载作用。

1.2 试件压制

CLT 试件制作主要包括铺板、施胶和冷压 3 个环节。先将聚乙烯薄膜平铺在地上,接着将第 1 层层板平铺于薄膜上面(所有层板在组坯前须清理干净,不能附着木屑等杂物而降低胶合质量),进行涂胶(图 1a),涂胶尽量保持均匀,涂胶量为 120~160 g·m⁻²。涂胶后立刻铺放第 2 层层板(图 1b),并进行第 2 层层板的涂胶,之后铺设第 3 层层板,以此类推,直到达到试验设定层数。试件涂胶完成后,用木块固定试件四周,并用薄膜将整张 CLT 试件严密包裹(图 1c)。层板涂胶拼装完成后进行 CLT 试件冷压(图 1d),设定压力 1.5 MPa 左右,保压时间约 2.5 h。

试件冷压 2.5 h 后卸压,并在常温环境中放置 1 周,以使层板间的胶合性能达到最稳定状态。



图 1 CLT 试件的制作

Fig.1 Production of the CLT specimens

a. 施胶 Sizing; b. 铺板 Placement of the second layer; c. 试件包裹 Film-wrapped specimen; d. 冷压 Cold pressing.

1.3 试验装置和加载方式

采用 UTM5105 型微机控制材料万能试验机,按照美国标准《Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes》(ASTMD198)和日本标准《直交集成板の日本農林規格》(JAS 3079—2019)中的相关规定进行静力学试验,测定抗弯刚度、抗弯强度和抗剪强度。每个项目测试 5 个试件,结果取平均值。

抗弯性能试验依据日本标准进行,采用四点弯曲(三分点)测试法,跨度为 2 000 mm。试验中,以 15 mm·min⁻¹的速度匀速加载,并用位移计测量在竖向荷载作用下 CLT 试件跨中点的竖向位移。抗剪性能试验采用三点弯曲测试法,跨度为 240 mm,加载速度为 5 mm·min⁻¹。

1.4 相关静力学理论

为了研究 CLT 静力学分析理论是否具有现实

可行性,选用抗弯性能(抗弯刚度、抗弯强度)模型理论(γ 理论、 κ 理论)进行计算分析。

1.4.1 等效抗弯刚度 在 γ 理论中,通过计算试件的等效抗弯刚度(EI_{eff})确定试件的弯曲性能。等效抗弯刚度主要与梁的截面特性和有效系数(γ)有关,而 γ 与连接件的滑移特性相关。木构件之间使用胶黏剂连接时, γ 取值一般在 0.85~0.99 之间。以 5 层 CLT 结构为例(图 2),计算公式如下:

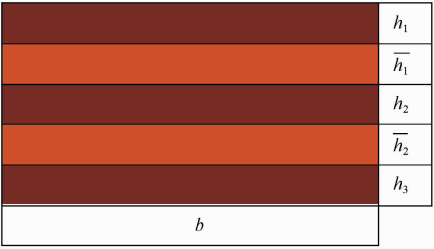


图 2 5 层 CLT 结构断面分析
Fig.2 Sectional analysis of the five-layer CLT structure

$$EI_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2)。(1)$$

式中: EI_{eff} 为等效抗弯刚度($\text{N}\cdot\text{mm}^2$); γ_i 为等效滑移系数, $\gamma_1 = \frac{1}{1 + \left(\pi^2 \cdot \frac{E_1 \cdot A_1}{l^2} \cdot \frac{\bar{h}_1}{G_R \cdot b} \right)}$, $\gamma_2 = 1$, $\gamma_3 = \frac{1}{1 + \left(\pi^2 \cdot \frac{E_3 \cdot A_3}{l^2} \cdot \frac{\bar{h}_2}{G_R \cdot b} \right)}$; l 为简支梁跨距(mm); G_R 为滚动剪切模量(MPa); A 为层板截面积(mm^2); b 为试件宽度(mm); $\bar{h}_1$ 、 $\bar{h}_2$ 为次要方向层层板厚度(mm); E 为层板弹性模量(MPa), $E_1 = E_2 = E_3$; I 为惯性矩(mm^4); a 为层板中心距试件的距离(mm)。

7 层 CLT 试件的等效抗弯刚度(EI_{eff})₇ 计算中,将 7 层 CLT 分解成 5 层结构和 3 层结构 2 部分,中间 3 层 CLT 看成一个整体,如图 3 所示,则 $(EI)_7 = (EI)_5 - (EI)_3' + (EI)_3$,其中 $(EI)_3'$ 为假设的 5 层 CLT 中间层层板的抗弯刚度, $(EI)_5$ 为假设的 5 层 CLT 的抗弯刚度。

1.4.2 抗弯强度 先采用 κ 理论计算试件的等效弹性模量,即根据竖向荷载的加载方向计算出复合系数 κ ,再利用系数 κ 得出试件的抗弯强度:

$$k = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0} \right) \cdot \frac{a_{m-2}^3 a_{m-4}^3 + \cdots + a_1^3}{a_m^3}; (2)$$

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \kappa。(3)$$

式中: a_m 为试件厚度(mm); E_0 为层板的顺纹弹性模量,7 600 MPa; E_{90} 为层板的横纹弹性模量,

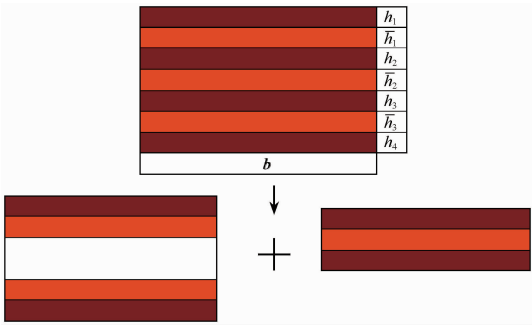


图 3 7 层 CLT 结构断面分析
Fig.3 Sectional analysis of the seven-layer CLT structure

316 MPa。

2 结果与分析

2.1 不同层板厚度对 CLT 力学性能的影响

2.1.1 荷载-位移曲线分析 在荷载作用下,不同层板厚度 CLT 有效试件(取均值)跨中点的荷载-位移曲线如图 4 示。

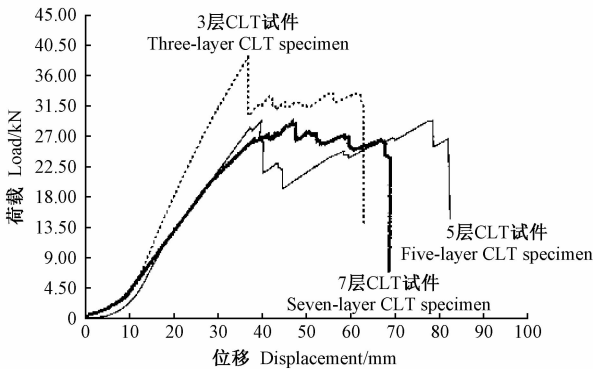


图 4 CLT 试件荷载-位移曲线
Fig.4 Load-displacement response curves for the specimens

从图 4 可以看出,在荷载作用下,各 CLT 试件荷载-位移曲线整体变化规律类似:CLT 弯曲过程中,前期荷载-位移曲线基本保持为直线;弹性阶段加载初期,曲线较平缓,主要是因为试件在受力弯曲时存在不可避免的非弹性变形;随着加载继续,试件跨中点挠度变化速度较大,荷载增加,挠度递增逐渐缓慢。3 层 CLT,试件荷载-位移曲线较稳定,而 5 层和 7 层 CLT,随着层数增加,试件刚度逐渐降低,延性变大,破坏模式也较为复杂。

2.1.2 数值分析 如表 4 所示,对于抗弯刚度,在整体厚度不变的前提下,3 层 CLT 试件的抗弯刚度最大,5 层和 7 层 CLT 试件次之,相比 3 层 CLT 试件,5 层和 7 层 CLT 试件的抗弯刚度分别降低 11% 和 18%。3 层 CLT 的结构性能较为稳定,刚度较高,破坏模式单一,基本为底层板拉断破坏。因此,当设计使用 3 层 CLT 结构时,应将材质等级较高且缺陷

较少的层板置于 CLT 结构的外层。

对于抗弯强度,5 层 CLT 试件的抗弯强度相比 3 层 CLT 试件提高 18%,相比 7 层 CLT 试件提高 36%,3 层 CLT 试件的抗弯强度相比 7 层 CLT 试件提高 16%;在整体厚度不变的前提下,5 层 CLT 试件的抗弯强度最大,3 层和 7 层 CLT 试件次之。

对于抗剪强度,5 层和 7 层 CLT 试件的抗剪强

度相比 3 层 CLT 试件分别提高 2.6%和 16%。在整体厚度不变的前提下,7 层 CLT 试件的抗剪强度最大,5 层和 3 层 CLT 试件次之。

试验数据表明,在整体厚度不变的前提下,层板越厚,试件的抗弯刚度越大;而抗弯强度,则 5 层结构最大,其次为 3 层结构,最后为 7 层结构;抗剪强度随层板厚度增加呈下降趋势。

表 4 不同层板厚度对 CLT 力学性能的影响^①

Tab.4 Effect of different CLT laminate thicknesses on the mechanical performance

试件 编号 No.	层板厚度 Laminate thickness/mm	抗弯刚度 Bending stiffness/ ($10^{11}\text{ N}\cdot\text{mm}^2$)	平均值 Mean/ ($10^{11}\text{ N}\cdot\text{mm}^2$)	抗弯强度 Bending strength/ MPa	平均值 Mean/MPa	抗剪强度 Shear strength/MPa	平均值 Mean/MPa
A-3-1	31.7	1.10	1.14 (1.20)	33	29.7 (48.96)	5.10	5.48
A-3-2		1.14		29		5.24	
A-3-3		1.19		27		6.11	
A-5-1	19.0	1.17	1.08 (1.05)	35	35.0 (40.03)	5.51	5.62
A-5-2		1.05		33		5.24	
A-5-3		1.02		37		6.11	
A-7-1	13.6	0.94	1.00 (1.04)	29	25.7 (36.73)	6.71	6.39
A-7-2		0.96		26		6.34	
A-7-3		1.10		22		6.11	

①括号中为理论计算值。The theoretical calculation value is in brackets.

2.1.3 试验结果与理论计算结果对比 不同层板厚度对 CLT 力学性能的影响试验结果与由理论计

算结果对比,如图 5 所示。

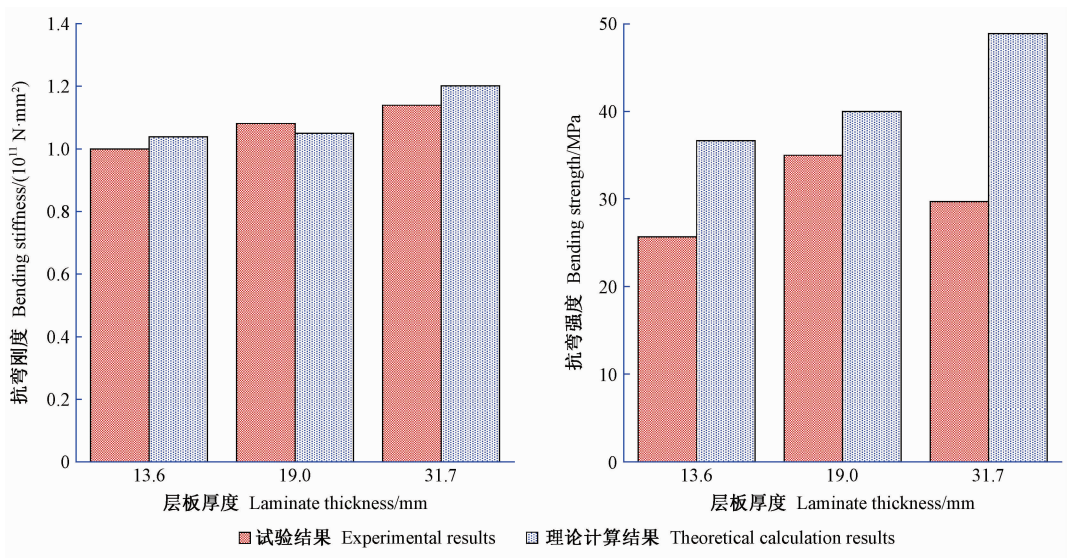


图 5 理论计算结果与试验结果对比

Fig.5 Comparison of the experimental results and the theoretical calculation results

由图 5 可知,总体而言理论计算结果比试验结果要高,分析其原因:在力学试验中,试件变形受很多因素(如板材的缺陷分布、板材力学强度的随机性以及外部环境等)影响,这些因素是理论计算中无法考虑的。层板厚度对抗弯刚度的影响理论计算结果与试验结果总体趋势一致,即在整体厚度不变的前提下,随着层板厚度增加,抗弯刚度逐渐增加。

抗弯强度与层板厚度之间关系的试验结果和理论计算结果存在差异,试验结果显示,5 层 CLT 试件的抗弯强度最大,其次是 3 层和 7 层 CLT 试件;而理论计算结果显示,层板厚度越大,抗弯强度越大,即 3 层 CLT 试件的抗弯强度最大,其次是 5 层和 7 层 CLT 试件。这说明 CLT 层板的应用应根据情况而定,不能只由理论计算所得结论应用于实践生产。

2.1.4 破坏模式与分析 试件压弯破坏时的变形普遍较大,主要破坏模式有 3 种,即底层板拉断破坏(图 6a)、抗拉区域胶层断裂破坏(图 6b)和滚动剪

切破坏(图 6c),但在试件缺陷集中处(腐朽、木节等)更容易发生破坏(图 6d)。在试件受拉区域,亦会出现胶层脱落和层板间滑移现象。

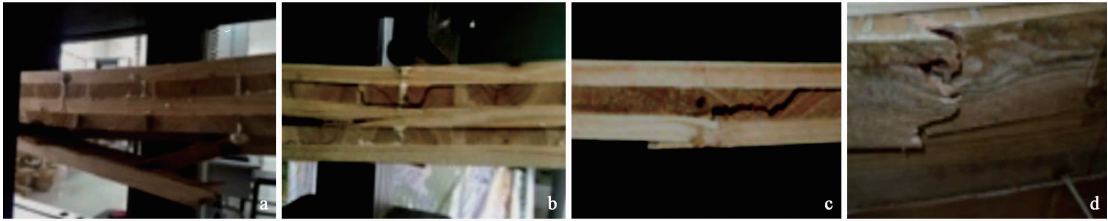


图 6 CLT 试件受力弯曲的主要破坏模式

Fig.6 Main failure modes of the CLT specimens in the bending test

a.底层板拉断破坏 Failure of bottom plate;b.抗拉区域胶层断裂 Fracture of adhesive layer in tensile zone;
c.滚动剪切破坏 Rolling shear failure;d.缺陷集中处破坏 Failure at a defect concentration.

1) 抗弯性能破坏模式 3 层 CLT 试件在压弯破坏过程中整体表现稳定,主要破坏模式为底层板拉断破坏(图 6a),伴有少量内层板的滚动剪切破坏(图 6c),没有出现胶层开裂和端头层板滑移现象。5 层 CLT 试件在压弯破坏过程中发生滚动剪切的情况开始增多,因为层板较薄,层板滚动剪切强度较低,最终破坏模式主要包括底层板拉断、端头层板层板滑移和少许胶层开裂,底层板拉断破坏程度较轻。7 层 CLT 试件在压弯破坏过程中滚动剪切和胶层开裂现象出现较多,层板厚度过低,胶层稳定性和层板抗剪能力下降明显,且由于 7 层 CLT 结构的胶层多达 6 层,容易发生胶层脱落现象(图 6b),最终破坏模式主要包括底层板拉断、端头层板错位、滚动剪切和胶层脱落等,其中以胶层脱落和滚动剪切破坏为主。

从试件抗弯性能破坏模式可以看出,3 层 CLT 结构底层板受拉区域破坏相比 5 层和 7 层 CLT 结构明显,5 层和 7 层 CLT 试件在压弯破坏过程中出现的胶层脱落和底层板拉断现象比 3 层严重。以 5 层 CLT 为例,受拉区域由 2 层层板组成,分别为主要方向层和次要方向层,在受拉过程中,主、次方向层板相互抑制,造成次要方向层层板滚动剪切破坏和主要方向层层板断裂。而相同情况下的 3 层 CLT,其受拉区域仅为 1 层主要方向层,相比而言较容易发生断裂,而 7 层 CLT 层板厚度较薄,底层板较 5 层 CLT 层板也易断裂,这也解释了 5 层 CLT 抗弯强度最高的原因。在整体厚度不变的前提下,组坯层数越多,层板越薄,越容易发生断裂和变形,这一定程度上也说明了 7 层 CLT 试件抗弯刚度和抗弯强度最低的原因,而 3 层和 5 层 CLT 试件的力学

性能表现较为优异。

2) 抗剪性能破坏模式 在剪切破坏过程中,各试件破坏模式大同小异,每个破坏试件均大量存在滚动剪切、层板拉断和端头层板滑移等现象,仅从外观上并不能看出抗剪性能的差异。

2.2 奇、偶层厚比例对 CLT 力学性能的影响

2.2.1 数值分析 奇、偶层厚比例对 CLT 力学性能的影响如表 5 所示。可以看出,随着奇数层层板厚度增加和偶数层层板厚度降低,CLT 试件的抗弯刚度、抗弯强度和抗剪强度均有一定比例提高。这是因为两端简支的 CLT 试件受竖向荷载时,试件主要受力方向为顺纹方向(奇数层层板),而偶数层层板在承载力方面作用相对较小,且木材顺纹方向的抗弯刚度、抗弯强度和抗剪强度均大于横纹方向,为随着奇、偶层厚比例不断增加,抗弯刚度、抗弯强度和抗剪强度均不断增加提供了理论依据。

2.2.2 试验结果与理论计算结果对比 对奇、偶层厚比例为 1.0、1.5、1.9 的试件进行试验得出的结果与理论计算奇、偶层厚比例为 1.0、1.2、1.4、1.7、2.1、2.7(取多组与试验比例相近的值)的 CLT 结构取得的结果进行对比,结果如表 5 所示,二者对比关系如图 7 所示。

由表 5 和图 7 可知,总体而言理论计算结果比试验结果要高,二者抗弯刚度和抗弯强度与层板厚度之间的关系参数变化规律相同, R (相关系数)接近 1,说明均呈线性相关关系,且二者相关性很高,即在整体厚度不变的前提下,在一定比例范围内,随着奇数层层板厚度增加和偶数层层板厚度降低,试件的抗弯刚度和抗弯强度呈上升趋势。

表 5 奇、偶层板厚比例对 CLT 力学性能的影响^①

Tab.5 Effect of the CLT odd to even layer thickness ratio on the mechanical performance

试件编号 No.	比例 Ratio	抗弯刚度 Bending stiffness/ (10 ¹¹ N·mm ²)	平均值 Mean/ (10 ¹¹ N·mm ²)	抗弯强度 Bending strength/MPa	平均值 Mean/MPa	抗剪强度 Shear strength/MPa	平均值 Mean/MPa
B-1-1	(1.0)	1.16	(1.30)	35	(40.7)	5.31	
B-1-2	1.0	1.22	1.19	33	32	5.28	5.30
B-1-3	(1.2)	1.19	(1.35)	29	(42)	5.32	
B-2-1	(1.4)	1.25	(1.39)	35	(43.4)	5.53	
B-2-2	1.5	1.22	1.23	34	35	5.75	5.62
B-2-3	(1.7)	1.23	(1.43)	37	(44.6)	5.57	
B-3-1	(2.1)	1.27	(1.47)	33	(45.7)	5.91	
B-3-2	19.0	1.22	1.24	38	36	5.78	5.94
B-3-3	(2.7)	1.24	(1.50)	37	(46.7)	6.12	

①括号中为理论计算值。The theoretical calculation value is in brackets.

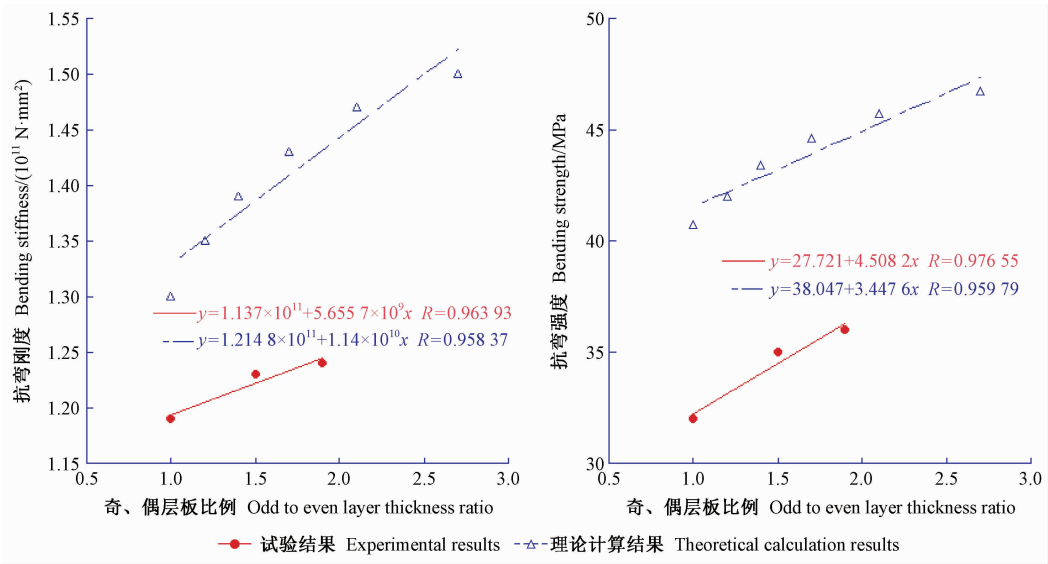


图 7 理论计算结果与试验结果对比

Fig.7 Comparison of the experimental results and the theoretical calculation results

2.2.3 破坏模式与分析 抗弯试验中,试件在 1 min 30 s 开始出现异响,此时外观无变化,试件稍微弯曲;压弯过程持续 2 min 后试件异响频率增大,包括胶层断裂声和木材纤维断裂声,同时试件端头层板之间开始出现细微滑移;约 3 min 后开始出现试件第一次破坏,包括滚动剪切破坏和底层板断裂;之后荷载上升继而出现第二次和第三次破坏。此外,在试件缺陷处,如腐朽、木节点,会较早出现破坏。奇、偶层厚比例为 1.0 的试件破坏模式主要为 2 层次要方向层均发生滚动剪切破坏,并伴有底层板断裂、胶层断裂现象(图 8a)。奇、偶层厚比例为 1.5 的试件破坏模式主要为最下面 2 层受拉区的破坏,表现为底层板断裂及次要方向层的滚动剪切破坏和胶层断裂(图 8b)。而奇、偶层厚比例为 1.9 的试件最终破坏模式为次要方向层发生轻微滚动剪切破坏和胶层断裂(图 8c)。通过破坏模式分析可以

得出,在一定比例范围内,随着奇、偶层厚比例增加,抗弯性能不断增加(破坏模式范围和破坏力度减小)。

3 结论

1) 滚动剪切、层板断裂、胶层断裂和层板滑移是 CLT 结构在竖向荷载作用下的主要破坏模式,试件的破坏模式与层板厚度有较大相关性。

2) CLT 试件在压弯破坏时,3 层 CLT 容易出现底层板断裂现象,5 层和 7 层结构容易出现胶层开裂和端头层板滑移现象。

3) 在木材用料一定的前提下,CLT 层板厚度越大,CLT 结构的抗弯性能越佳,且尺寸稳定性高,破坏模式单一,基本为底层板断裂破坏;CLT 层板厚度越薄,CLT 结构的抗剪性能越好,破坏模式较为复杂。



图 8 奇、偶层厚比例不同的破坏模式

Fig.8 Failure modes of the different odd to even layer thickness ratios
a. 1.0; b. 1.5; c. 1.9.

4) 在一定比例范围内,应尽量增加奇、偶层厚比例,即增加奇数层层板厚度、降低偶数层层板厚度,这样可在不提高木材用量的条件下有效提高 CLT 试件的抗弯、抗剪性能。

参 考 文 献

董惟群, 王志强. 2016. 正交胶合木及其滚动剪切性能研究现状. 山东林业科技, 46(4):99-103,93.
(Dong W Q, Wang Z Q. 2016. Development and research of cross-laminated timber and rolling shear properties. Shandong Forestry Science and Technology, 46(4): 99-103,93. [in Chinese])
龚迎春. 2017. 国产日本落叶松正交胶合木制备工艺及力学性能评价. 北京: 中国林业科学研究院博士学位论文.
(Gong Y C. 2017. Preparation and mechanical performance of cross-laminated timber made from *Larix kaempferi* domestically. Beijing: PhD thesis of Chinese Academy of Forestry.[in Chinese])
郭飞燕. 2007. 速生杉木改性及其结构胶合板的设计与制造. 南京: 南京林业大学硕士学位论文.

(Guo F Y. 2017. Modification of fast-growing Chinese fir and design and fabrication of structural plywood. Nanjing: MS thesis of Nanjing Forestry University.[in Chinese])
阙泽利, 李哲瑞, 姜桂超, 等. 2015. 交叉层积材 (CLT) 的开发应用及发展前景. 木材工业, 29(6):22-26.
(Que Z L, Li Z R, Jiang G C, et al. 2015. Review of research and development of cross-laminated timber. China Wood Industry, 29(6): 22-26. [in Chinese])
阙泽利, 李哲瑞, 王菲彬, 等. 2017. 中高层木结构用正交胶合木 (CLT) 在欧洲的研究与发展现状. 建筑结构, 47(2):75-80,27.
(Que Z L, Li Z R, Wang F B, et al. 2017. Review of research and development status of cross-laminated timber used by medium high-rise structure in Europe. Building Structure,47(2): 75-80,27.[in Chinese])
王俊鸿, 吴鹏飞, 周丽丽, 等. 2014. 杉木人工林生物量和生产力研究进展. 河北北方学院学报, 30(3):36-40.
(Wang J H, Wu P F, Zhou L L, et al. 2014. Research progress on biomass and productivity of Chinese fir plantation. Journal of Hebei North University, 30(3): 36-40. [in Chinese])
Cao Y, Wang Y L, Wang Z, et al. 2016. Application and research progress of overseas cross-laminated timber (CLT) construction. China Forest Products Industry, 43(12): 3-7.
Frangi A, Fontana M, Hugi E, et al. 2009. Experimental analysis of cross- laminated timber panels in fire. Fire Safety, 44 (8) : 1078-1087.
Hashemi A, Zarnani P, Mashoudnia R, et al. 2018. Experimental testing of rocking cross-laminated timber walls with resilient slip friction joints. Journal of Structural Engineering,144(1): 04017180-1-16.
Knorz M, Torno S, Kuilen J W. 2017. Bonding quality of industrially produced cross-laminated timber (CLT) as determined in delamination tests. Construction and Building Materials, 133: 219-225.
Park H M, Fushitani M, Sato K, et al. 2003. Static bending strength performances of cross-laminated woods made with five species. Journal of Wood Science, 49(5): 411-417.
Schneider J, Shen Y, Stierner S F, et al. 2015. Assessment and comparison of experimental and numerical model studies of cross-laminated timber mechanical connections under cyclic loading. Construction and Building Materials, 77: 197-212.
Zhou Q, Gong M, Chui Y H, et al. 2014. Measurement of rolling shear modulus and strength of cross laminated timber fabricated with black spruce. Construction and Building Materials, 64: 379-386.

(责任编辑 石红青)