

国产日本落叶松正交胶合木的层间剪切性能

龚迎春¹, 徐俊华^{1, 2}, 武国芳¹, 任海青¹

(1. 中国林科院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 西南林业大学设计学院, 云南昆明 650000)

摘要: 采用国产日本落叶松制备 CLT, 分析层板锯材自身的弹性模量、层数、层板厚度、组坯方向对 CLT 板层间剪切性能的影响。结果表明: 层板模量增加、层数减少、层板厚度减少, 对 CLT 层间剪切强度影响为显著, 对层间剪切弹性模量影响不显著; 改变组坯纹理方向能够显著提高 CLT 的层间剪切性能; 采用剪力类比法, 能够有效预测 CLT 等效剪切刚度, 预测值和实测值相对误差在 7% 以内。

关键词: 国产日本落叶松; 正交胶合木; 层间剪切性能; 理论计算

中图分类号: TU366.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2018) 02-0006-04

Interlamination Shear Properties of Cross-laminated Timber Made from Domestic Japanese Larch in China

GONG Ying-chun¹, XU Jun-hua^{1, 2}, WU Guo-fang¹, REN Hai-qing¹

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China,

2. School of Design, Southwest Forestry University, Kunming 650000, Yunnan, China)

Abstract: Effects of the modulus of elasticity (MOE), layer numbers, thickness of timber and assembly directions on interlamination shear properties of cross-laminated timber (CLT) made from domestic Japanese larch in China were analyzed.

The results showed that there was no significant effect on interlamination shear modulus but significant effect on interlamination shear strength of the CLT with increased MOE as well as decreased layer numbers and thickness of timber. The interlamination shear properties were significantly improved by changing timber assembles directions. The effective shear stiffness could be used to predict by the shear analogy method with less than 7% relative error between predicted and measured values.

Key words: domestic Japanese larch; CLT; interlamination shear properties; theoretical calculation

2015 年起我国全面实行天然林禁伐政策, 人工林木材将是结构材及相关产品的主要资源。国产日本落叶松人工林在辽宁、湖北等地已经大量成熟, 仅在辽宁省的种植面积约为 56.1 万 hm^2 , 蓄积量约

为 5 175 万 m^3 。目前针对国产日本落叶松的研究, 主要集中在培育、物理力学性能、制浆造纸等方面, 而高附加值工程木产品的研发较少, 尤其采用国产日本落叶松制备正交胶合木 (Cross-laminated timber, CLT), 其力学性能的基础数据仍处于空白。

CLT 由 3 层及以上实木锯材或结构复合材垂直正交组坯, 采用结构胶黏剂压制而成, 主要用于木结构房屋的墙体、屋面板、楼板等^[1-2]。CLT 层间剪切是由中间层锯材径切面的剪切应力导致的剪切变

收稿日期: 2017-07-18; 修改日期: 2017-12-05

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“木材科学与技术重点学科建设推进专项”(CAFYBB2016ZX002)。

作者简介: 龚迎春 (1989—), 男, 中国林科院木材工业研究所助理研究员。

形, 由于 CLT 采用正交组坯, 层间剪切性能较低^[3], 因此层间剪切性能是设计和应用 CLT 产品的关键。

以往研究多集中在测试方法、跨高比等因素对 CLT 层间剪切性能的影响^[4-6]。CLT 是新型工程木产品, 如果改变其组坯形式、树种和生产工艺等参数, 则需要对其力学性能重新评价, 过程漫长且成本高。因此, 基于锯材或复合结构材的性能, 通过理论计算, 预测 CLT 刚度(等效剪切刚度是材料的剪切模量与构件横截面绕其中心轴惯性矩的乘积, 表示材料抵抗剪切变形的能力)的方法, 在国外已被普遍使用。

鉴于此, 笔者采用国产日本落叶松制备 CLT 板, 研究层板模量、层数、厚度、组坯方向对 CLT 层间剪切性能的影响, 为 CLT 在木结构建筑中的应用提供基础数据; 同时, 将小径级人工林木材用于结构工程木产品, 旨在拓宽其应用途径, 提高附加值。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

日本落叶松 (*Larix kaempferi*): 购自辽宁清原, 小头直径范围为 25~32 cm, 锯材的尺寸为 2 800(长)×89(宽)×25(厚) mm, 平均含水率为 12%, 平均密度为 $0.58 \pm 0.074 \text{ g/cm}^3$ 。

利用应力波法对 2 000 根日本落叶松锯材进行动态弹性模量 (DMOE) 测定, 并参照 GB/T 26899-2011《结构用集成材》进行锯材分等。不同等级锯材所占比例见表 1。

表 1 国产日本落叶松动态弹性模量
Tab.1 DMOE of domestic Japanese larch

编号	实测值/GPa	比例/%	标准值/GPa	锯材分等
L-timber	10.71	33.8	$8 < \text{MOE} < 12$	低模量
M-timber	13.85	49.9	$12 \leq \text{MOE} \leq 16$	中模量
H-timber	18.21	16.3	$16 < \text{MOE}$	高模量

胶黏剂: 单组份聚氨酯胶, 主剂为黄色黏稠液体, 固体含量 100%, 黏度 9 Pa·s; 购自哈尔滨城丰胶黏剂有限公司。

1.2 仪器设备

Fakopp 锯材应力波测定仪、网格型淋胶机、自主研发的热压机、Instron 5582 万能力学试验机、YHD-100 型位移引伸计等。

1.3 制备工艺

CLT 试样在宁波中加低碳新技术研究院有限公司完成制备。具体工艺流程如下:

选材→表面加工→锯割→施胶→组坯→加压→后期处理。

单面施胶量 200 g/m^2 , 热压压力 1.2 MPa, 保压时间 1.5 h。试板的尺寸为 $2\,700 \text{ mm} \times 1\,240 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$, 每组重复 3 次。

CLT 组坯方式: 欧洲标准 BS EN 16351-2015 “Timber structures Cross laminated timber Requirements” 规定, 典型 CLT 的组坯方式为正交组坯, 但对于特殊要求的 CLT, 如作为结构梁避免横向层受压发生剪切破坏, CLT 组坯时横向层可采用斜向组坯。6 组 CLT 的具体组坯方式见表 2。

表 2 CLT 组坯方式
Tab.2 CLT assemble

编号	锯材模量		组坯方式	锯材厚度/mm	层数/层
	上下表层	中间层			
L-CLT	低	低	//-⊥-//	25	3
M-CLT	中	低	//-⊥-//	25	3
H-CLT	高	低	//-⊥-//	25	3
B-CLT	中	低	//-⊥-//	15	3
Z-CLT	中	低	//-⊥-//-⊥-//	15	5
X-CLT	中	低	//-45°-//45°-//	15	5

1.4 理论计算

国内对于 CLT 的力学性能计算尚处于初步探索阶段, 主要是通过足尺静态力学试验来评估 CLT 的力学性能。国外普遍使用基于锯材自身的力学性能, 通过理论计算预测 CLT 刚度, 再通过足尺静态力学试验对预测值进行验证的方法。以往研究表明^[7]: 木材的滚动剪切模量 (G_R) 普遍较小, 被估算为顺纹剪切模量 (G_0) 的 1/10, 即 $G_R = G_0/10$; 针叶材的顺纹剪切模量被估算为弹性模量 (E) 的 1/16, 即 $G_0 = E/16$ 。采用剪力类比理论, 计算等效剪切刚度 (GA)_{eff}, 计算方法见公式 1。

$$(GA)_{eff} = \frac{a^2}{\left[\left(\frac{h_1}{2 \cdot G_1 \cdot b}\right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i \cdot b}\right) + \left(\frac{h_n}{2 \cdot G_n \cdot b}\right)\right]} \quad (1)$$

式中: a —上下表层中心轴之间的距离, mm; h_i —第 i 层锯材的厚度, mm; G_i —第 i 层锯材的滚动剪切模量, MPa; b —试件宽度, mm。

1.5 性能测试

参考美国 ANSI/APA PRG 320-2012 “Standard for performance-rated cross-laminated timber” 采用三点进行层间剪切性能测试，跨高比为6，加载速率3 mm/min。每组试验重复12次，结果取平均值。

2 结果与讨论

2.1 层间剪切性能

CLT 层间剪切性能的平均值和变异系数，见表3。对 CLT 层间剪切性能进行最小显著差异法分析，结果列于表4。

表3 CLT 层间剪切弹性模量和层间剪切强度

Tab.3 Interlamination shear modulus and strength of CLT

编号	层间剪切弹性模量		层间剪切强度	
	平均值/MPa	变异系数%	平均值/MPa	变异系数%
L-CLT	145.72	15.85	2.28	8.68
M-CLT	146.69	18.35	2.54	8.53
H-CLT	147.35	13.25	2.84	12.00
B-CLT	143.28	17.58	3.16	4.42
Z-CLT	137.67	12.61	2.33	7.99
X-CLT	172.01	14.32	3.37	8.78

表4 CLT 层间剪切性能最小显著差异法分析

Tab.4 Analysis of least significant difference of interlamination shear properties of CLT

差异源	均值差	标准误差	P 值	95%置信区间		
				下限	上限	
层间剪切弹性模量	M-CLT 与 H-CLT	-0.65	12.01	0.95	-25.71	24.39
	L-CLT 与 H-CLT	-1.62	12.01	0.89	-26.67	23.43
	L-CLT 与 M-CLT	-0.97	11.60	0.93	-25.17	23.23
	B-CLT 与 M-CLT	-3.42	10.50	0.75	-24.87	18.03
	Z-CLT 与 B-CLT	-9.02	11.07	0.42	-31.63	13.59
X-CLT 与 Z-CLT	34.33	11.07	0.0042	11.72	56.94	
层间剪切强度	M-CLT 与 H-CLT	-0.23	0.14	0.11	-0.52	0.058
	L-CLT 与 H-CLT	-0.56	0.14	6.23×10 ⁻⁴	-0.85	-0.27
	L-CLT 与 M-CLT	-0.33	0.14	0.028	-0.62	-0.038
	B-CLT 与 M-CLT	0.56	0.10	7.20×10 ⁻⁶	0.35	0.77
	Z-CLT 与 B-CLT	-0.83	0.10	6.19×10 ⁻⁹	0.69	1.10
X-CLT 与 Z-CLT	1.17	0.10	3.88×10 ⁻¹²	0.96	1.38	

注：在 $\alpha=0.05$ 水平显著。

1) 层板模量

表3、4显示，CLT 表层锯材模量由低到高后，层间剪切弹性模量呈小幅增加，但无显著差异。主

要是由于 CLT 中间层锯材的抗弯弹性模量为同一个等级。北美云杉制备的 CLT 层间剪切模量为 40~80 MPa^[8]；而国产日本落叶松制备 CLT 的层间剪切模量在 146 MPa 左右波动，表明采用日本落叶松材作为横向层锯材代替北美云杉，可以显著提高 CLT 层间剪切弹性模量。

与 L-CLT 组相比，M-CLT、H-CLT 组的层间剪切强度分别提高了 11.40%和 24.56%，差异显著。原因是 CLT 层间剪切的破坏形式包含底层锯材沿顺纹方向的拉伸断裂，是底层锯材的等级不同，造成 CLT 层间剪切强度存在显著差异。采用不同胶黏剂制备的南方松 CLT^[9]，其层间剪切强度为 1.69~2.43 MPa，与本研究结果近似。

2) 层板厚度

当 CLT 的层数相同时，锯材厚度从 25 mm 减少到 15 mm，其层间剪切强度增加了 24.41%，显著提高；但层间剪切弹性模量差异不大。

3) CLT 层数

当锯材厚度相同时，CLT 层数从 3 层增加到 5 层，其层间剪切弹性模量和剪切强度分别减小了 3.92%和 26.26%，层间剪切强度差异显著。主要原因是层间剪切为足尺试验，随着锯材厚度和 CLT 层数增加，包含的锯材自身缺陷亦增多，造成其力学性能降低。

4) 层板组坯方式

斜 45° 组坯的 CLT 与正交组坯的 CLT 相比，层间剪切弹性模量和剪切强度分别增加了 24.94%和 44.64%。这是由于斜 45° 组坯，中间层受力介于横纹受力和顺纹受力之间，相比正交组坯的横纹层，该层抵抗剪应力的能力增加，因而层间剪切弹性模量和剪切强度大幅增加。说明可以通过组坯时锯材的纹理方向来调整 CLT 的层间剪切性能。

2.2 试件破坏形式

国产日本落叶松 CLT 的破坏形式见图1。

木材为各向异性材料，其径切面 (RT) 方向的层间剪切模量明显低于纵切面 (LT) 和弦切面 (LR)^[10]，CLT 在短跨距的三点弯测试下，主要的破坏形式是横向层锯材的剪切破坏 (图1左)。另外，随着载荷增加，破坏形式还包含底层锯材的拉伸断裂及表层和横向层的胶层破坏 (图1右)。

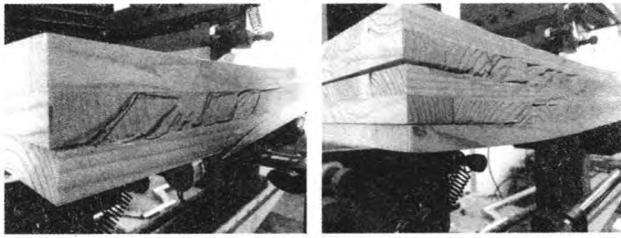


图 1 CLT 层间剪切强度的破坏模式

Fig.1 Failure modes of CLT specimens in interlamination shear test

图 1 所示的破坏形式,表明采用国产日本落叶松 CLT 的破坏形式为层间剪切破坏。当 CLT 用作短梁、集中荷载的楼板时,设计过程中应考虑 CLT 的层间剪切破坏,需要提高横向层锯材的性能。

2.3 理论计算

根据剪力类比法计算 CLT 等效剪切刚度,结果列于表 5。

表 5 CLT 等效剪切刚度
Tab.5 Effective shear stiffness of CLT

编号	等效剪切刚度/(10 ⁶ N·m ⁻¹)		误差/%
	理论值	测试值	
L-CLT	5.87	5.79	+1.38
M-CLT	6.01	6.10	-1.48
H-CLT	6.08	6.36	-4.40
B-CLT	3.80	3.61	+5.26
Z-CLT	7.21	6.78	+6.34

由表 5 可知,理论计算 CLT 的等效剪切刚度值和测试值之间的相对误差在 7%以内,说明理论计算值能较好的预测 CLT 的等效剪切刚度,可以采用层板剪切性能推算 CLT 整板的剪切性能。

3 结论

1) 在本试验范围内,层板模量增加、层数减少、

层板厚度减少,对 CLT 的层间剪切弹性模量无显著影响,但对层间剪切强度影响显著;改变组坯纹理方向,能够显著提高 CLT 的层间剪切性能。

2) 层间剪切的破坏模式主要为中横向层剪切破坏、底层锯材的拉伸断裂以及表层和横向层的胶层破坏。采用剪力类比法预测 CLT 等效剪切刚度,预测值和实测值相对误差在 7%以内,可用于预测 CLT 的剪切性能。

3) 提高横向层锯材的强度等级、改变横向层的组坯方向,均可提高 CLT 的层间剪切性能,为后续 CLT 产品标准和测试标准的制定,提供了基础数据。

参考文献:

- [1] 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, 29(3): 71-74.
- [2] 王志强,罗冬,郑维,等. 混合结构对正交胶合木剪力墙抗侧性能的影响[J]. 林业工程学报, 2017, 2(2): 145-151.
- [3] Minpark H, Masami F, Sato K, et al. Static bending strength performances of cross laminated woods made with five species[J]. Journal of Wood Science, 2003, 49(5): 411-417.
- [4] Zhou Q, Gong M, Ying HC, et al. Measurement of rolling shear modulus and strength of cross laminated timber fabricated with black spruce[J]. Construction and Building Materials, 2014, 64(30): 379-386.
- [5] Gong Y C, Wu G F, Ren H Q. Block shear strength and delamination of cross-laminated timber fabricated with Japanese larch[J]. Bioresources, 2016, 11(4): 10240-10250.
- [6] Gong M, Tu D Y, Li L, et al. Planar shear properties of hardwood cross layer in hybrid cross laminated timber[C]. 5th International Scientific Conference on Hardwood processing, 2015: 85-90.
- [7] Karacabeyli E, Douglas B. CLT handbook: cross-laminated timber[M]. FPInnovations and American Wood Council, USA Edition, 2013.
- [8] Simon A, Zachary C, Maren H. Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations[J]. Holzforchung, 2016(70): 1-9.
- [9] Gu M Z, Pang W C. Rolling shear strengths of Southern Pine cross laminated timber[J]. Wood Design Focus, 2014(26): 25-33.
- [10] 熊海贝,欧阳禄,吴颖. 国外高层木结构研究综述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 1297-1305.

(责任编辑 孟凡丹、向琴)

(上接第 5 页)

- [10] Que Z, Furuno T. Effects of urea: formaldehyde resin mole ratio oil the properties of particleboard [J]. Building and Environment, 2007, 42 (3): 1257-1263.
- [11] 史福宝,孙成忠. E₀级刨花板甲醛捕捉剂的研制与应用[J]. 中国人造板, 2010 (6): 18-21.
- [12] 张换换,刘浪浪,刘军海. 甲醛捕捉剂的研究热点和发展方向[J]. 中国环保产业, 2010 (1): 51-54.
- [13] Abdullah Z A, Park B. Influence of acrylamide copolymerization of

urea-formaldehyde resin adhesives to their chemical structure and performance [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 117(6): 3181-3186.

- [14] Abdullah Z A, Park B D. Hydrolytic stability of cured urea-formaldehyde resins modified by additives [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 114(2): 1011-1017.

(责任编辑 向琴、劳万里)