

国产日本落叶松正交胶合木抗弯弹性模量评价方法

龚迎春¹, 田兆鹏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锯材制备正交胶合木 (CLT), 分别采用静力法和纵向振动法测定 CLT 抗弯弹性模量, 并采用剪力类比法预测等效抗弯刚度, 分析无损检测技术和理论计算的可行性与准确性。结果表明: 静力法测试时随着跨高比的增加, CLT 的抗弯弹性模量呈现递增趋势, 建议跨高比 ≥ 24 ; 动态抗弯弹性模量均高于静态抗弯弹性模量, 相对误差在 10%以内; 剪力类比法能够有效预测 CLT 等效抗弯刚度, 预测值和实测值相对误差在 $\pm 5\%$ 以内。

关键词: 正交胶合木; 抗弯弹性模量; 跨高比; 无损检测; 剪力类比法

中图分类号: S791.223; S781.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2018) 03-0001-04

Evaluation Methods of Bending MOE of Cross-Laminated Timber Made from Domestic Japanese Larch Lumber

GONG Ying-chun¹, TIAN Zhao-peng¹, 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: Domestic Japanese larch lumber was used to prepare cross-laminated timber (CLT) samples. Modulus of elasticity (MOE) was tested using a static method and longitudinal vibration. Shear analogy was also used to predict effective bending stiffness. Feasibility and accuracy of nondestructive testing technology and theoretical calculation were analyzed.

Testing results showed that: 1) MOE was improved by increasing the span/depth ratio and should be more than 24; 2) Dynamic MOE was higher than static MOE with less than 10% of relative error; 3) Effective bending stiffness of the CLT samples was predicted by shear analogy with less than 5% of relative error between predicted and measured values.

Key words: cross-laminated timber; MOE; span/depth ratio; nondestructive testing; shear analogy method

正交胶合木 (Cross-laminated timber, CLT) 是一种新型的工程木产品, 由 3 层及以上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、屋板、楼板等^[1-2]。抗弯弹性模量 (Modulus of elasticity, MOE) 是 CLT

强度等级分等的参考依据, 决定 CLT 在建筑体系中的可靠性、使用寿命和价值^[3]。

CLT 抗弯弹性模量的测试通常采用静力法和无损检测方法, 但国内尚未颁布相关的测试方法标准, 只能参考国外标准。采用静力法测试时, 跨高比的取值对 CLT 抗弯弹性模量的测试结果有显著影响。国外标准的规定各不相同, 如美国标准 ANSI/APA PRG 320-2017 “Standard for performance-rated cross-laminated timber”^[4], 要求跨高比至少为 30; 欧洲标

收稿日期: 2017-09-08; 修改日期: 2018-03-14

基金项目: 国家重点研发计划“绿色建筑及建筑工业化”(2017YFC0703501)。

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。

准 BS EN 16351: 2015 “Timber structures-Cross laminated timber-Requirements”^[5], 要求跨高比为 24~30, 而一般工程木产品的跨高比为 17~21。

振动法、应力波等无损检测法^[6-8], 虽然具有方便、快速、精确和低成本等优点, 广泛应用于原木、规格材及人造板等领域, 但用于足尺正交胶合木构件的无损检测研究较少。目前 UBC 大学采用振动法得到三阶弯曲频率, 通过频谱识别和 Matlab 软件, 计算 CLT 的抗弯弹性模量^[9]。

CLT 是一种新型工程木产品, 改变其组坯形式、树种、生产参数等, 则需要对其力学性能进行重新评价, 测试过程漫长且费用高昂^[10]。目前基于层板力学性能, 通过理论模型预测 CLT 等效抗弯刚度(材料的抗弯弹性模量与构件横截面绕其中心轴惯性矩的乘积, 表示材料抵抗弯曲变形的能力), 再采用静力法对预测值进行验证的方法, 在国外普遍使用。

鉴于此, 笔者采用国产日本落叶松制备 CLT 试板, 分别采用静力法和纵向振动法测定 CLT 的抗弯弹性模量(MOE), 研究不同跨高比对 CLT 的 MOE 的影响, 并采用剪力类比法预测有效抗弯刚度, 验证无损检测技术和理论计算的可行性与准确性, 为国内 CLT 产品的测试标准制定、质量评价提供基础数据。

1 材料与方

1.1 试验材料

日本落叶松(*Larix kaempferi*)锯材, 规格为 2 800 mm×89 mm×25 mm, 含水率约 12%, 平均密度(0.58±0.074) g/cm³。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测试与分组, 见表 1。

表 1 国产日本落叶松的弹性模量
Tab.1 Modulus of elasticity of domestic Japanese larch lumber

编号	动态弹性模量/ GPa	静态弹性模量 平均值/GPa	分组	比例/ %
L-timber	8<MOE<12	10.33 (1.00)	低模量组	33.8
M-timber	12≤MOE≤16	13.86 (1.49)	中模量组	49.9
H-timber	MOE>16	16.21 (1.46)	高模量组	16.3

胶黏剂: 单组份聚氨酯, 主剂为米黄色黏稠液体, 固体含量 100%, 黏度 9 Pa·s。

1.2 仪器设备

美国 MTS 25 t 弯曲试验机, YHD-100 型位移引伸计、Fakopp 锯材应力波测定仪、FFT 分析仪, 等。

1.3 试样制备

制备 CLT 试板的尺寸为 2 700 mm×1 240 mm×75 mm, 3 层正交组坯, 上下表层分别采用低模量、中模量、高模量锯材, 中间层统一使用低模量锯材。施胶量 200 g/m², 压力 1.2 MPa, 保压 1.5 h。每组条件制备 3 块, 共 9 块 CLT 试板。

1.4 试验方法

1) 静力法。

参考美国 ANSI/APA PRG 320-2017 “Standard for performance-rated cross-laminated timber” 进行四点抗弯测试。跨高比分别选取 21、24、30、34, 加载速率 5 mm/min。抗弯弹性模量计算见公式 1。

$$E_{b,CLT} = \frac{23\Delta p l^3}{108\Delta y b h^3} \quad (1)$$

式中: $E_{b,CLT}$ —CLT 抗弯弹性模量, MPa; Δp —弹性范围内上限载荷和下限载荷之差, N; Δy —对应 Δp 跨距中心点的挠度, mm; l —跨距, mm; b —试件宽度, mm; h —试件厚度, mm。

2) 纵向振动法。

纵向振动方法是使试件呈自由振动状态, 在距离 CLT 两端部各 0.224 L 处简支, 用锤子敲击 CLT 一端, 沿纵向方向产生振动, 在试件另一端用麦克风拾取音频信号。

连接 FFT 分析仪进行瞬间频谱分析, 得到一阶振动频谱, 根据 Timoshenko 理论, 计算动态抗弯弹性模量(公式 2)。

$$E_{ff} = 4L^2 F^2 \rho \quad (2)$$

式中: E_{ff} —CLT 动态弹性模量, MPa; L —试件长度, cm; F —一阶振动频率, Hz; ρ —试件密度, g/cm³。

3) 剪力类比计算法。

将 CLT 简化成上下由支撑连接的两个梁, 计算时考虑横向剪切效应对抗弯性能的影响, 更符合实际工程应用中 CLT 的受力情况。

CLT 等效抗弯刚度计算见公式 3。

$$EI_{eff} = (EI_A) + (EI_B) = \sum_{i=1}^n E_i \times b_i \times \frac{h_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i \times A_i \times a_i^2 \quad (3)$$

式中： E_i —第*i*层弹性模量，MPa； A_i —第*i*层面积， mm^2 ； a_i —第*i*层中心到 CLT 中心轴的距离，mm； b_i —第*i*层宽度，mm； h_i —第*i*层厚度，mm。

2 结果与讨论

2.1 静态抗弯弹性模量

采用静力法，在不同跨高比条件下，测定 CLT 抗弯弹性模量 (MOE) 的平均值、最大值、最小值及变异系数，列于表 2。

表 2 不同跨高比 CLT 的抗弯弹性模量

Tab.2 MOE of CLT with different span/depth ratio

跨高比	样本数/个	MOE/GPa			变异系数/%
		平均值	最大值	最小值	
34	30	13.86	18.20	10.25	20.05
30	30	13.40	19.16	9.92	20.88
24	30	13.22	17.66	9.88	19.68
21	30	12.74	16.53	9.47	18.97

由表 2 可知，随着跨高比的增加，CLT 的 MOE 呈现递增趋势。跨高比从 21 增加到 34，MOE 平均值增幅为 8.79%；从 24 增加到 34，MOE 平均值增加 4.84%；从 30 增加到 34，MOE 平均值增加 3.43%，增幅渐小。

已有研究表明：当跨高比为 30 时，横向剪切效应使 CLT 的 MOE 减少 11%；跨高比为 20 时，剪切变形使 MOE 减少 22%^[11]。随着跨高比从 21 增加到 34，MOE 的变异系数变化范围为 18.97%~20.05%，这是由于 30 个测试样本中存在层板模量等级差异，造成变异系数偏大。

对不同跨高比 CLT 的 MOE 测试结果进行最小显著差异法分析，结果列于表 3。

表 3 不同跨高比 CLT 抗弯弹性模量方差分析

Tab.3 Analysis of variance for MOE with different span/depth ratios

差异源 (跨高比)	MOE/GPa		P 值	95%置信区间	
	均值差	标准误差		下限	上限
30 与 34	-0.46	0.69	0.50	-1.84	0.91
24 与 34	-0.63	0.69	0.36	-2.01	0.74
24 与 30	-0.17	0.69	0.80	-1.55	1.20
21 与 34	-1.12	0.69	0.01	-2.50	0.25
21 与 30	-0.66	0.69	0.03	-2.04	0.71
21 与 24	-0.48	0.69	0.48	-1.87	0.89

由表 3 可知：跨高比 21 与 30、34 之间，CLT 的 MOE 存在显著性差异，其余不同跨高比间不存在显著性差异 ($\alpha=0.05$)。这是由于跨高比过小，横向剪切效应对抗弯性能影响显著，造成 MOE 的测试结果偏小。参考美国标准 ANSI/APA PRG 320-2017 和欧洲标准 BS EN 16351-2015 标准要求，结合本研究结果，建议跨高比的取值应不小于 24。

2.2 动态抗弯弹性模量

采用纵向振动法和静力法，测试 CLT 抗弯弹性模量的平均值和变异系数，列于表 4。

表 4 纵向振动法和静力法测试 CLT 抗弯弹性模量

Tab.4 MOE by longitudinal vibration and static bending

编号	样本数/个	动态 MOE		静态 MOE	
		平均值/GPa	变异系数/%	平均值/GPa	变异系数/%
H-CLT	10	18.12	3.24	16.76	6.09
M-CLT	10	14.05	5.01	13.06	3.74
L-CLT	10	11.01	4.36	10.34	2.63

由表 4 可知，CLT 试板的动态 MOE 均高于静态 MOE。木材是黏弹性材料，弹性恢复能力与位移成比例，耗能与速度成比例；木材在振动过程中，表现出固体弹性行为；在静载荷下，表现为黏弹性流体力学特征^[12-13]，因此，动态 MOE 高于静态 MOE。H-CLT、M-CLT 和 L-CLT 三组试板动态、静态 MOE 的相对误差，分别为 8.06%、7.58%和 6.48%。

对动态和静态 MOE 进行回归拟合，结果见图 1。由回归结果可知：线性模型拟合的相关系数 R-square 为 0.95，可以采用纵向振动法对 CLT 的 MOE 进行预测。

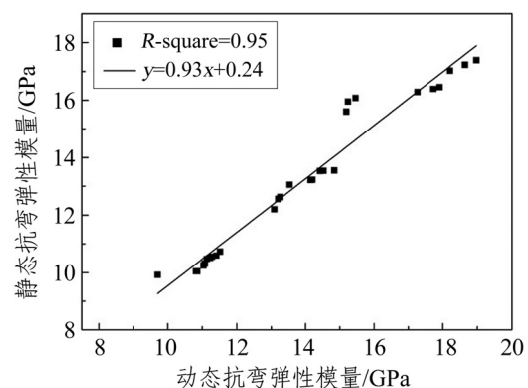


图 1 CLT 动态弹性模量与静态抗弯弹性模量拟合模型

Fig.1 Fitted curves between dynamic MOE and static MOE of CLT

2.3 等效抗弯刚度

利用剪力类比法，推算 CLT 的等效抗弯刚度，结果列于表 5。

表 5 CLT 等效抗弯刚度
Tab.5 Effective bending stiffness of CLT

CLT 编号	等效抗弯刚度/(10 ⁹ N×mm ² /m)		
	理论值	实测值	相对误差/%
L-CLT	350.16	363.52	-3.68
M-CLT	469.67	459.14	2.29
H-CLT	561.41	589.22	-4.72

由表 5 可知：L-CLT、M-CLT 和 H-CLT 组等效抗弯刚度理论值与实测值的相对误差均在 5%以内。由于剪力类比法在计算时考虑到了横向剪切效应对抗弯性能的影响，因而更符合 CLT 在实际工程应用中的受力情况，相对误差较小。

美国标准 ANSI/APA PRG 320-2017 规定层板厚度为 35 mm，3 层 CLT 板 E1 和 E2 等级等效抗弯刚度分别为 1 088×10⁹ 和 958×10⁹ N×mm²/m。等效抗弯刚度与截面惯性矩有关，将本研究 3 层 75 mm 厚 CLT 板转换成 3 层 105 mm 厚 CLT 板，根据剪力类比法计算 L-CLT、M-CLT 和 H-CLT 三组试板的等效抗弯刚度理论值，分别为：961×10⁹、1 288×10⁹、1 540×10⁹ N×mm²/m。除 L-CLT 组外，M-CLT 和 H-CLT 组达到 ANSI/APA PRG 320-2017 规定 E1 等级要求。

3 结论

1) 随着跨高比的增加，CLT 的 MOE 测试结果呈现递增趋势。由于跨高比过小，横向剪切效应对 CLT 抗弯性能影响显著，造成抗弯弹性模量偏小。建议国内制定 CLT 抗弯性能的测试方法标准时，应规定跨高比的取值≥24。

2) CLT 的动态 MOE 均高于静态 MOE，相对误差在 10%以内，两者线性拟合的相关系数 R-square 为 0.95，纵向振动法可预测 CLT 的抗弯弹性模量。

3) 采用剪力类比法预测 CLT 等效抗弯刚度，预测值和实测值相对误差在±5%以内，且中模量组和高模量组 CLT 的等效抗弯刚度，可达到 ANSI/APA PRG 320-2017 规定的 E1 等级要求。

4) 通过测试与分析证明，采用纵向振动法与剪力类比法模型预测 CLT 的抗弯性能，具有一定的准确性和可行性，可用于 CLT 产品的质量控制和性能预测。

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] Zhou Q, Gong M, Ying H C, 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.
- [3] 王正, 饶鑫, 杨小军, 等. 轻型木结构规格材弹性模量的两种无损法检测与评级[J]. 林产工业, 2013, 40(5): 30-33.
- [4] ANSI/APA PRG 320-2017, Standard for performance-rated cross-laminated timber[S].
- [5] BS EN 16351-2015, Timber structures-Cross laminated timber-Requirements[S].
- [6] 江京辉, 吕建雄, 任海青, 等. 3 种无损检测技术评估足尺规格材的静态弹性模量[J]. 浙江林学院学报, 2008, 25(3): 277-281.
- [7] 殷亚方, 吕建雄, 倪春, 等. 横向振动方法评估大尺寸规格材静态抗弯弹性性质[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(5): 107-110.
- [8] 王正, 王智恒, 饶鑫, 等. SPF 规格材弹性模量的频率法测试及其评价[J]. 实验力学, 2013, 28(5): 642-647.
- [9] Zhou J H, Chui Y H, Gong M, et al. Simultaneous measurement of elastic constants of full-size engineered wood-based panels by modal testing [J]. Holzforshung, 2016, 70(7): 673-682.
- [10] Karacabeyli E, Douglas B. CLT handbook: cross-laminated timber[M]. FPI Innovations and American Wood Council, USA Edition, 2013.
- [11] Daniel P H, John C B. Mechanical properties of Southern Pine cross-laminated timber[J]. J Mater Civ Eng, 2014, 27(9): 1-6.
- [12] 曹磊, 周先雁, 曾丹. 基于无损检测的胶合木梁弹性模量评价[J]. 公路工程, 2015, 40(6): 207-209.
- [13] Yang T H, Wang S Y, Lin C J, et al. Evaluation of the mechanical properties of Douglas-fir and Japanese cedar lumber and its structural glulam by nondestructive techniques[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(4): 487-493.

(责任编辑 向琴)

关注本刊微信公众号: mucaigongye 投稿请认准本刊唯一官网: mcgy.criwi.org.cn

全国各地邮局订阅均可办理订阅(邮发代号: 2-311) 微信扫码(封面) 订阅更便捷、更优惠