

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020019

国产落叶松正交胶合木顺纹抗压强度尺寸效应

龚迎春¹, 叶琦², 武国芳³, 任海青¹, 管成²

(1. 中国林科院林业新技术研究所, 北京 100091; 2. 北京林业大学工学院, 北京 100083;

3. 中国林科院木材工业研究所, 北京 100091)



摘要: 基于GB/T 50329—2012《木结构试验方法标准》, 测试国产落叶松正交胶合木 (CLT) 顺纹抗压强度, 运用最弱链理论分析试件尺寸对CLT顺纹抗压强度的影响, 并采用非参数统计法估计尺寸效应系数。研究结果表明: 随着CLT试件长度或宽度的增加, 其顺纹抗压强度下降。其中长度尺寸效应系数 S_L 与百分位数呈线性关系; 宽度尺寸效应系数 S_W 为常数0.349; 试件厚度变化对其顺纹抗压强度无显著影响。

关键词: 正交胶合木; 顺纹抗压强度; 尺寸效应

中图分类号: S781; S791.25; TS653; TU531.2 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2021) 01-0042-05

Effect of Size on Compressive Strength Parallel to the Grain of Cross-Laminated Timber Made with Domestic Larch

GONG Ying-chun¹, YE Qi², WU Guo-fang³, REN Hai-qing¹, GUAN Cheng²

(1. Research Institute of Forestry New Technology, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. The School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The compressive strength of cross-laminated timber made by Chinese larch was tested based on the standard of GB/T 50329—2012 on testing methods for timber structures. The weakest-link theory was used to analyze size effects of CLT's compression strength parallel to the grain. The nonparametric statistics method was used to estimate the coefficient of the size effect. The result showed that the compression strength decreases with the increase of either the length or the width. And there is a significant linear relation between the coefficient of the length effect S_L and different percentiles; the coefficient of the width effect S_W was 0.349; there is no significant relation between the thickness and the compression strength parallel to the grain.

Key words: cross-laminated timber; compression strength parallel to grain; size effect

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, 在工程中广泛应用于木结构建筑墙体、楼板、屋面板等^[1]。在木结构中承受轴向荷载的CLT墙体, 其安全设计主要由CLT的顺纹抗压强度决定, 由于木材的各向异性, 不同截面尺寸的CLT的力学性能存在差异, 抗弯强度、抗拉强度以及抗压强度随着尺寸变化而变化, 即尺寸效应^[2]。尺寸效应的研究可

收稿日期: 2020-02-22; 修改日期: 2020-12-27

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“正交胶合木墙体稳定性能研究”(CAFYBB2018SY032); 国家自然科学基金“正交胶合木构件受压失稳机理及计算方法研究”(51808546)。

作者简介: 龚迎春 (1989—), 男, 助理研究员。Email: gongyingchun@caf.ac.cn

以为木结构建筑构件的安全设计提供依据，对强度设计值的确定提供参考。

目前关于木材力学强度的尺寸效应主要集中在规格材，国内学者通过研究获得了不同等级落叶松顺纹抗压强度的宽度尺寸效应系数^[3]；国外学者应用 Weibull 最弱链理论（weakest-link theory）研究尺寸对规格材抗弯强度的影响，发现规格材的抗弯强度随着长度和宽度增加而降低，但几乎不受厚度的影响^[4]。目前国内外关于 CLT 顺纹抗压强度尺寸效应的研究较少，尚未确定 CLT 顺纹抗压强度的尺寸调整方法。鉴于此，笔者以国产落叶松正交胶合木为研究对象，采用最弱链理论，分析 CLT 顺纹抗压强度的尺寸效应系数，为建立我国 CLT 顺纹抗压强度的尺寸效应调整方法提供参考，为 CLT 在木结构设计中的安全应用提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

国产落叶松（*Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.）采购自清原县英额门林场，锯材的目标尺寸为 2 800 mm×89 mm×25 mm 和 2 800 mm×89 mm×15 mm，平均含水率为 12 % ± 0.96 %，平均密度为 0.58±0.074 g/cm³。

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

1.2 主要设备

网格型淋胶机、自主研发的热压机、微机控制电液伺服压力试验机（YAW-3000A），最大压力 3 000 kN。

1.3 试验方法

1.3.1 CLT 制备

制备 CLT 试板的目标尺寸为 2 700 mm×1 240 mm×75 mm 和 2 700 mm×1 240 mm×45 mm，每组尺寸样本数 3 块。

1) 上下表层选用弹性模量（MOE）为 12~16 GPa 的锯材试件组，中间层选用 MOE 为 8~12 GPa 的锯材试件组。2) 单面施胶（侧面不涂胶），施胶量 200 g/m²。3) 压制压力为 1.2 MPa，保压时间 1.5 h。

1.3.2 性能测试

利用应力波法对锯材进行动态弹性模量（MOE）测定。

根据 GB/T 50329—2012《木结构试验方法标准》进行顺纹抗压试验，加载速度为 2 mm/min。从 CLT 板上随机截取顺纹抗压试件，试件尺寸见表 1。其中 M-A，M-B，M-C 组代表不同长度试件，M-B 与 MT 组代表不同厚度的试件，M-B 与 MW 组代表不同宽度的试件。

表 1 试件尺寸及重复次数
Tab.1 Size and number of specimens

组别	长×宽×厚/mm	试件数量
M-A	130×180×75	10
M-B	260×180×75	12
M-C	390×180×75	12
MT	260×180×45	18
MW	260×90×75	18

顺纹抗压强度计算见式 1。

$$f_c = \frac{F_{cmax}}{bh} \quad (1)$$

式中： f_c —顺纹抗压强度，MPa； F_{cmax} 为最大破坏载荷，N； b 和 h 分别为试件的宽度和厚度，mm。

1.4 数据分析

20 世纪 50 年代 Weibull 提出最弱链理论认为，材料由若干小单元组成，当材料中任一单元失效即认为破坏^[5]，由此可以提出在任意体积 V 下结构的失效概率 $F(\sigma)$ ：

$$F(\sigma) = 1 - \exp \left[\left(- \frac{V}{V_r} \right) \left(\frac{\sigma}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (2)$$

式中： V_r —单位体积； σ —均匀分布应力； α —尺寸参数， β —形状参数。

如果符合威布尔分布，则对于破坏概率相同、应力均匀分布的 2 个试件存在，

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\frac{1}{\beta}} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{S_v} = \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^{S_L} \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^{S_w} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{S_T} \quad (3)$$

式中： S_v —尺寸效应系数； S_L —长度尺寸效应系数； S_w —宽度尺寸效应系数； S_T —厚度尺寸效应系数。

对公式 2 取两次对数，可得：

$$\ln \{ - \ln [1 - F(\sigma)] \} = \ln V - \ln V_r + \beta \ln \sigma - \beta \ln \alpha \quad (4)$$

由公式 4 失效概率 $F(\sigma)$ 和单位体积 V_r 为常数，可以发现，材料强度的对数与材料体积的对数呈线

性关系, 可以通过对 CLT 试件的顺纹抗压强度与体积的对数值进行拟合, 求出尺寸效应系数。

通过非参数统计法, 估计百分位数对应的顺纹抗压强度。将百分位数记为 P_x , 可将一组观测值分为两部分, 理论上 $x\%$ 的观测值比 P_x 小, $(100 - x)\%$ 的观测值比 P_x 大, 如中位数即可看作 P_{50} 的百分位数^[6]。非参数累积分布的点估计过程如下^[2]:

1) 将总体的数据样本按照从小到大的顺序排列并标记, $X_1 \leq X_2 \leq X_3 \leq \cdots \leq X_{n-1} \leq X_n$, n 为总样本数。

2) 计算 i , 使下式成立。

$$x/100 \geq i/(n+1)$$

(5)

3) 定义 j 为大于或等于 i 的最小正整数, 采用线性插值法计算百分位数 P_x 。

$$P_x = X_{j-1} + (X_j - X_{j-1}) \cdot [(n+1) \cdot x/100 - (j-1)]$$

(6)

估计 19 个百分位数, (5%、10%、15%、...、80%、85%、90%、95%) 对应的 CLT 顺纹抗压强度值, 每个分位数对应 3 个强度值。以抗压强度百分位值的对数为纵坐标, 试件长度、宽度和厚度的对数为横坐标, 进行线性回归分析, 直线的斜率为该百分位点的尺寸效应系数 S_v 。

2 结果与讨论

2.1 不同尺寸 CLT 顺纹抗压强度

不同尺寸试件的顺纹抗压强度测试结果, 列于表 2。

表 2 不同尺寸 CLT 顺纹抗压强度

Tab.2 Compressive strength of CLT in different sizes

组别	试件尺寸(长×宽×厚) / mm	顺纹抗压强度 / MPa			标准差/MPa	变异系数/%
		平均值	最大值	最小值		
M-A	130×180×75	32.36 ^a	34.09	29.10	1.72	5.32
M-B	260×180×75	30.87 ^a	35.37	24.69	3.02	9.79
M-C	390×180×75	29.07 ^b	34.81	21.02	4.51	15.50
MT	260×180×45	31.41 ^a	38.71	25.41	3.37	10.73
MW	260×90×75	39.83 ^c	46.00	32.00	4.26	10.70

注: 相同小写字母表明在检验水平 0.05 上不存在显著性差异; 不同小写字母则表明存在显著性差异。

由表 2 可知, 随着试件长度的增加, CLT 顺纹抗压强度呈递减趋势, M-A 组相比 M-C 组 CLT 的顺纹抗压强度降低了 10.17%。此结果与单板层积材 (LVL) 长度与顺纹抗压强度的研究结果的变化规律

类似^[7]。M-C 组与 MT 组 CLT 相比, 不同厚度 CLT 的顺纹抗压强度差异不大, 但不同宽度 CLT 顺纹抗压强度存在不同, 随着宽度从 90 mm 增加到 180 mm, M-W 组相比 M-B 组 CLT 的顺纹抗压强度减少 22.49%。这是由于木材存在自然缺陷, 试件在受压过程中通常在缺陷最大、受力最薄弱的地方发生破坏, 因此随着试件长度和宽度的增加, 试件内部包含缺陷的概率增大, 导致强度减少。

对长、宽、厚三个方向不同尺寸 CLT 的抗压强度测试数据方差分析表明: 顺纹抗压强度在长度 130 mm (M-A 组) 和 390 mm (M-C 组) 试件之间差异显著, 在宽度 90 mm (M-W 组) 和 180 mm (M-B 组) 试件之间差异显著, 但厚度变化对 CLT 抗压强度无显著性差异。

2.2 尺寸效应

2.2.1 长度尺寸效应

不同长度的 19 个百分位数与长度尺寸效应系数 S_L 的关系见图 1。

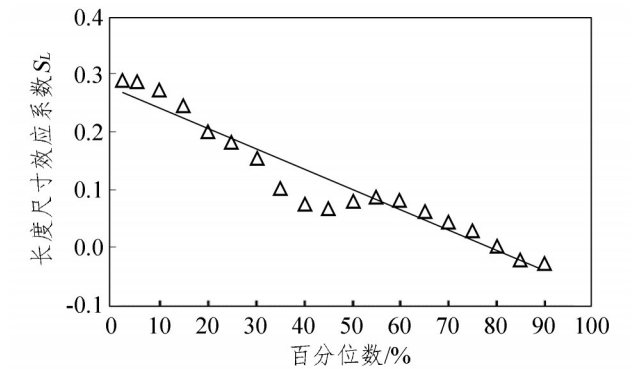


图 1 百分位数与长度尺寸效应系数 S_L 关系
Fig. 1 Relation between percentiles and length effect coefficient S_L

由图 1 可知, CLT 长度尺寸效应系数 S_L 整体呈现下降趋势, 在 40 %~60 % 百分位数区间呈现小幅度上升趋势。对数据进行线性回归分析, 结果见表 3。

表 3 长度尺寸效应系数与百分位数回归分析

Tab.3 Regression analysis of the length effect coefficient at percentiles

模型	系数	标准误差	t 值	$t_{0.05}$	P 值
截距	0.278	0.013	21.659	2.101	0.000
斜率	-0.349	0.024	-14.340	2.101	0.000

由表3可知, CLT长度尺寸效应系数回归方程 $P < 0.05$, 表明回归方程显著。对方程斜率和截距进行 t 检验, $|t| > t_{0.05}$, 表明斜率与零存在显著差异, S_L 不是常数。因此CLT长度尺寸效应系数 S_L 与百分位数 P_{CS} (compressive strength, CS) 之间存在线性关系:

$$S_L = 0.278 - 0.349 \cdot P_{CS} \quad (7)$$

2.2.2 宽度尺寸效应

如图2所示, CLT宽度尺寸效应系数随着百分位数的增大呈现上下波动趋势, 拟合直线斜率接近于水平。

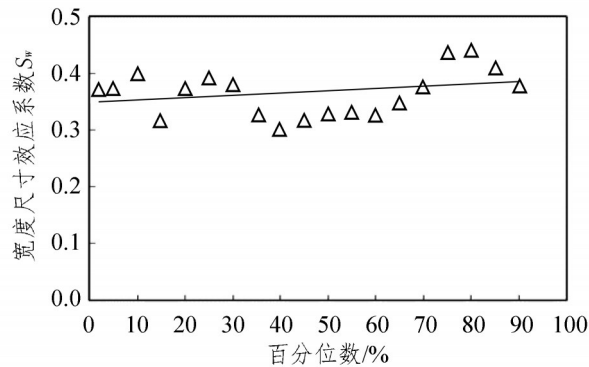


图2 百分位数与宽度尺寸影响系数 S_w 关系

Fig. 2 Relation between percentiles and the width effect coefficient S_w

对数据进行线性回归分析, 分析结果见表4。

表4 宽度尺寸效应系数与百分位数回归分析

Tab.4 Regression analysis of the width effect coefficient at percentiles

模型	系数	标准误差	t 值	$t_{0.05}$	P 值
截距	0.349	0.018	19.340	2.101	0.000
斜率	0.040	0.034	1.157	2.101	0.263

由表4可得, CLT宽度尺寸效应系数 S_w 的拟合方程为 $S_w = 0.349 + 0.04 \cdot P_{CS}$, 其中回归方程截距 $P < 0.05$, $|t| > t_{0.05}$, 表明存在显著性差异; 回归方程斜率 $P > 0.05$, $|t| < t_{0.05}$, 表明斜率与零的差异不显著, 即斜率为零, 截距为宽度尺寸效应系数 S_w 。

$$S_w = 0.349 \quad (8)$$

基于目测等级, 对落叶松制成锯材的顺纹抗压强度^[3]及抗拉强度^[8]的宽度尺寸效应研究发现, 随着宽度的增加, 顺纹抗压强度和抗拉强度降低, 高、低目测等级组的锯材顺纹抗压强度宽度尺寸效应分别为0.11和0.20, 本文研究结果与以上结论相似。

2.2.3 厚度尺寸效应

由图3可知, CLT厚度尺寸效应系数随着百分位数的增加整体呈现先减后增趋势, 没有明显的线性关系。

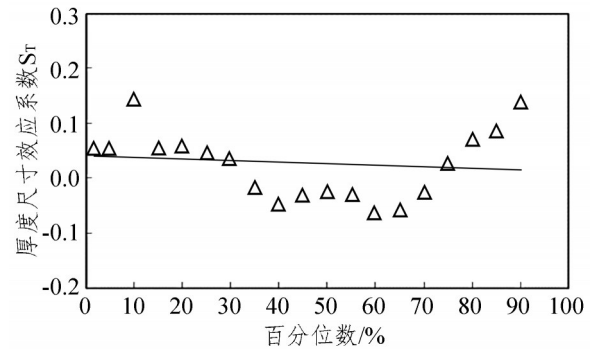


图3 百分位数与尺寸影响系数 S_T 对应关系

Fig. 3 Relation between percentiles and the thickness effect coefficient S_T

对数据进行回归分析, 结果见表5。

表5 厚度尺寸效应系数与百分位数回归分析

Tab.5 Regression analysis of the thickness effect coefficient at percentiles

模型	系数	标准误差	t 值	$t_{0.05}$	P 值
截距	0.040	0.028	1.405	2.101	0.178
斜率	-0.027	0.054	-0.501	2.101	0.623

由表5可知, CLT厚度尺寸效应系数回归方程 $P > 0.05$, 表明回归方程不显著; 对回归方程截距和斜率 t 检验结果: $|t| < t_{0.05}$, 说明截距和斜率与零的差异不显著, 即厚度的尺寸效应系数 S_T 为零。

3 结论

1) 在本试验范围内, 国产落叶松CLT顺纹抗压强度随着试件长度的增加而减小, 随着宽度从90 mm增加到180 mm, 抗压强度减少22.49%, 但厚度变化对CLT抗压强度无显著性差异。

2) 在本试验范围内, 国产落叶松CLT长度尺寸效应系数 S_L 随着百分位数增加整体变化呈现下降趋势, S_L 与百分位数之间存在线性关系 $S_L = 0.278 - 0.349 \cdot P_{CS}$; 宽度尺寸效应系数 S_w 为常数0.349; 厚度方向不存在尺寸效应, 因此在满足墙体保温隔音的前提下, 可考虑采用薄CLT板用于墙体制作。层板厚度的降低不仅可节省材料成本, 也有利于提高木材的出材率, 为我国小径级人工林木材的利用提供了可能。

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.
GONG Y C, REN H Q. Characteristics and development prospect of cross-laminated timber[J]. World Forestry Research, 2016, 29(3): 71-74.
- [2] 赵秀, 吕建雄, 江京辉等. 结构用规格材抗弯强度的尺寸效应[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(4): 734-737.
ZHAO X, LYU J X, JIANG J H, et al. Size effect of modulus of rupture for the Larch dimension lumber[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(4): 734-737.
- [3] 周海宾, 骆秀琴, 赵秀, 等. 落叶松目测等级规格材顺纹抗压强度尺寸效应[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(3): 435-438.
ZHOU H B, LUO X Q, ZHAO X, et al. Effect of size on ultimate compression strength parallel to grain of visually-graded Chinese Larch dimension lumber [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(3): 435-438.
- [4] Billy. Bohannon. Effect of size on bending strength of wood members [R]. Madison: USDA Forest Service, 1966.
- [5] 胡绪腾, 辛朋朋, 宋迎东. 基于最弱环理论的缺口件概率疲劳寿命预测方法[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(2): 164-169.
HU X T, XIN P P, SONG Y D. Probabilistic fatigue life prediction method for notched specimens based on the Weakest-link theory[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(2): 164-169.
- [6] 滕冲, 汪同庆. SPSS 统计分析[M]. 武昌: 武汉大学出版社, 2014: 82-85.
- [7] 赵荣军, 王丽, 张俊珍, 等. 单板层积材顺纹抗拉与抗压强度的尺寸效应分析[J]. 木材工业, 2016, 30(3): 38-40, 48.
ZHAO R J, WANG L, ZHANG J Z, et al. Dimension effect on tension and compression strength of laminated veneer lumber[J]. China Wood Industry, 2016, 30(3): 38-40, 48.
- [8] 周海宾, 江京辉, 王学顺, 等. 兴安落叶松目测等级锯材抗拉强度的宽度尺寸效应[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(1): 127-130.
ZHOU H B, JIANG J H, WANG X S, et al. Size effects of width on tensile strength of visually-graded Chinese larch lumber[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(1): 127-130.

(本文编校 张 鹏、向 琴)