

不同荷载方向对云杉胶合木销槽 承压强度的影响

徐心怡¹, 滕启城², 阙泽利¹, 张柳柳¹

(1. 南京林业大学材料科学与工程学院, 210037, 南京; 2. 保国寺古建筑博物馆, 315033, 浙江宁波)

摘 要: 以云杉胶合木和自攻螺钉为研究材料, 探讨不同荷载方向下云杉胶合木的销槽承压强度, 分析荷载方向与胶合木销槽承压性能的关系, 将试验结果与欧洲和美国木结构设计规范中的理论公式计算值进行对比, 修正了销槽承压强度关于倾斜角度的理论计算模型。

关键词: 荷载方向; 销槽承压强度; 自攻螺钉; 胶合木

中图分类号: TU 502+.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-4726(2019)04-0419-04

EFFECT OF DIFFERENT LOAD DIRECTIONS ON EMBEDMENT STRENGTH OF SPRUCE GLULAM

XU Xin-yi¹, TENG Qi-cheng², QUE Ze-li¹, ZHANG Liu-liu¹

(1. College of Materials Science and Technology, Nanjing Forestry University, 210037, Nanjing, China;

2. Baoguo Ancient Architecture Museum, 315033, Ningbo, Zhejiang, China)

Abstract: In this paper, spruce glulam and self-tapping screws were used as research materials to investigate the embedment strength of spruce glulam under different load directions, and to analyze the relationship between load direction and the embedment strength of the glulam. Finally, the test results were compared with the calculated values of the theoretical formulas in the European and American wood structure design specifications, and the theoretical calculation model of the embedment strength was respect to the tilt angle was corrected.

Keywords: load direction; embedment strength; self-tapping screws; glulam

作为中国几千年历史中一种主流的建筑形态, 木结构建筑不仅符合建筑节能减排的迫切需求和新型绿色材料应用的趋势, 且在装配式生产、绿色快捷施工、抗震性能等方面拥有天然优势。有研究显示, 木结构建筑的损坏 80% 源于木结构连接节点的失效^[1]。所以木结构的节点连接是木结构研究的重要环节。

在木结构建筑的各种连接方式中, 以圆钉、自攻螺钉、螺栓、销等为代表的销轴类连接件具有优良的轴向承载能力和安全可靠。销轴类连接件连接方式在木结构建筑, 特别是现代重型木结构构件连接中广泛应用。与其他销轴连接件相比, 自攻螺钉具有无需预钻孔, 对构件破坏小, 耐火强度高, 支承稳固回弹少, 施工效率高, 可重复利用等优势, 在许多国家的木结构框架建筑节点连接中都出现了以自攻螺钉代替圆钉和螺栓的趋势^[2]。早期的 Johansen 屈服理论^[3]认为连接节点的承载能力与木材的销槽承压强度和连接件的抗弯屈服强度有关。销槽承压强度是木材在销轴类

连接件横向荷载作用下抵抗破坏的能力, 木材的销槽承压强度影响着木材螺钉连接节点的各项性能, 因此对木材销槽承压强度的研究尤为重要。

在实际工程中, 为增强连接节点的承载能力, 自攻螺钉的钉入方向往往不垂直于木纤维方向, 而是呈一定的倾斜角度。张俊珍等^[4]研究 3 种加载方向对日本落叶松胶合木销槽承压强度的影响, 提出加载方向和销槽承压强度存在明显的负相关关系。由佳等^[5]研究红松横纹和顺纹的销槽承压强度, 提出横纹和顺纹销槽承压强度差异较大。目前关于加载方向对木材销槽承压强度的影响研究并不多, 现行 GB 50005—2017《木结构设计标准》^[6]和 GB/T 50708—2012《胶合木结构技术规范》^[7]中对自攻螺钉连接节点的相关规定较简单, 特别是有关斜螺钉连接形式的木材销槽承压屈服强度等的计算几乎没有。

本文采用“半孔法”研究对云杉胶合木的销槽承压强度, 分析荷载方向对胶合木销槽承压性能的影响, 通过对比欧洲木结构设计规范 EC5 和美国木结构设计规范 NDS, 修正了销槽承压屈服强度关于倾斜角度的理论计算模型, 以期对销槽承压强度计算和后期云杉胶合木销槽结构的设计提供理论依据。

收稿日期: 2019-02-18

基金项目: 国家自然科学基金 (31670566)

作者简介: 徐心怡 (1996—), 女, 安徽宣城人, e-mail: 15755121835@163.com.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本试验的材料包括云杉 (*Picea glauca* Mast.) 规格材和自攻螺钉, 其中云杉规格材产地加拿大, J 级, 纹理通直, 无病虫害, 有少量活节, 尺寸为 38 mm × 89 mm × 4000 mm, 平均密度为 0.469 g/cm³, 平均含水率为 15.3%; 自攻螺钉为购自意大利 Rothoblass 公司的结构用自攻螺钉 VGS9 × 200, 其长度为 200 mm, 钉帽直径为 16.0 mm, 螺纹内径为 5.9 mm, 螺纹外径为 9.0 mm, 螺纹间距为 5.5 mm, 不完整螺纹长度为 26.0 mm。

1.2 试件制备

云杉胶合木由单组分异氰酸酯胶粘剂胶合而成, 尺寸为 362 mm × 50 mm × 1200 mm (图 1)。胶合木密度为 0.445 g/cm³。试验中荷载与木纤维间的角度为 α , 从平行于纤维方向按每 15° 递增, 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° 共 7 种荷载方向, 按 ASTM D5764-97a^[8] 与 EN383^[9] 对试件的要求制造试件, 其尺寸见表 1。

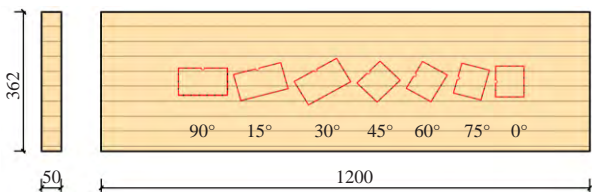


图 1 不同角度胶合木销槽承压试件锯解示意

表 1 销槽承压强度试验试件规格尺寸

角度 $\alpha / (^\circ)$	测试数量	尺寸		
		宽 w / mm	高 h / mm	厚 t / mm
0	8	80	70	50
15	8	120	70	50
30	8	120	70	50
45	8	80	70	50
60	8	80	70	50
75	8	80	70	50
90	8	120	70	50

自攻螺钉钉入胶合木构件时通常不需预钻孔, 为准确模拟自攻螺钉的销槽承压状态, 采用如下方法预制槽孔: 将 2 块锯解后的胶合木小试件准备钻孔承压的侧面对齐贴紧, 为保证槽孔位于两试件之间且垂直于试件表面, 用 U 形夹固定后先预钻 2 mm 透孔, 将 VGS9 × 200 自攻螺钉顺槽孔旋入至穿透试件, 再反方向旋出, 在两块胶合木试件贴合的侧边形成相同的半孔。

1.3 测试方法

测试前, 将全新的自攻螺钉采用旋入方式使试件位于钉杆中部位置, 自攻螺钉不重复使用。测试时环境温度为 20~25℃, 相对湿度为 55%~65%。采用万能力学试验机加载, 半孔销槽承压强度加载方式如图 2 所示, 加载速度为 1 mm/min。测试全过程通过精度为 10 N 的 YBY-50 kN 型荷载传感器和对称布置的两精度为 0.001 mm 的 CDP-25 型位移传感器接入 TDS530 数据采集仪, 记录加载过程中的荷载和自攻螺钉的位移, 绘制完整的荷载 - 位移曲线。

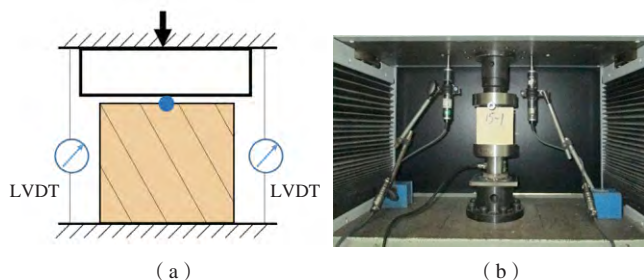


图 2 销槽承压强度试验加载
(a) 加载方式; (b) 试验装置

采用 5% 偏移法得到胶合木的销槽承压屈服荷载 (图 3)。

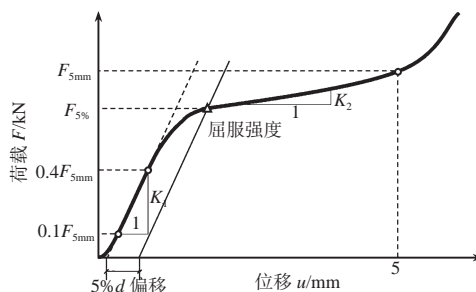


图 3 销槽承压强度解析方法

通过下式计算得到强度值:

$$f_{h,5\%} = \frac{F_y}{b \cdot t} \quad (1)$$

式中: $f_{h,5\%}$ 为 5% 偏移法销槽承压屈服强度 (MPa); F_y 为 5% 偏移法屈服荷载或最大荷载 (N); b 为自攻螺钉内径 (mm); t 为胶合木试件厚度 (mm)。

2 试验结果及讨论

2.1 试验结果

2.1.1 破坏模式

在荷载方向与木纤维间角度为 0° 时, 胶合木在自攻螺钉完全压入前发生了明显的顺纹脆性劈裂, 荷载突然下降, 试验停止。从 15°~45°, 胶合木槽孔下方顺纹劈裂趋势减小, 但槽孔下方木材表现出被压

溃的趋势。60°和75°槽孔位置开始压溃变形时, 顺纹方向槽孔区域的最高侧也出现了木材劈裂。90°时自攻螺钉几乎完全嵌入槽孔, 槽孔下方局部区域胶合木被明显压溃, 试件一侧或两侧非胶线位置发生翘裂。

所有销槽承压测试后, 观察自攻螺钉受压区域螺纹, 均未发现有明显压溃变形, 故LVDT位移计测量的位移均来自胶合木槽孔位置的压溃变形。

2.1.2 荷载-位移曲线

图4为0°~90°销槽的承压荷载-位移曲线, 在荷载方向平行于木纤维时, 曲线刚度、屈服荷载和破坏荷载最高, 随角度增大刚度段逐渐降低, 但屈服荷载过后均明显表现出第2个线性阶段, 且斜率随角度增加有增大趋势。这与新西兰Franke测试不同荷载方向与木纤维之间角度的螺栓销槽承压荷载-位移典型曲线表现为相同的特征^[10]。

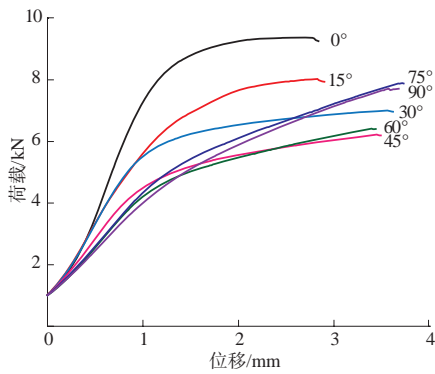


图4 不同荷载方向销槽承压荷载-位移曲线

2.2 荷载方向对销槽承压强度的影响

在不同角度条件下, 胶合木销槽承压强度试验结果及欧洲木结构设计规范EC5和美国木结构设计规范NDS中理论公式计算值见表2。

表2 不同角度胶合木销槽承压试验值与计算值

角度 / (°)	$f_{h,max}$ / MPa	COV / %	$f_{h,5\%}$ / MPa	COV / %	$f_{h,EC5}$ / MPa	$f_{h,NDS}$ / MPa	K_1 / (kN/mm)	K_2 / (kN/mm)
0	31.27	12.0	29.65	14.3	30.86	30.90	8.62	0
15	27.27	12.3	24.80	10.8	29.98	30.22	7.63	0.11
30	23.77	20.4	20.59	16.8	27.02	28.50	5.42	0.29
45	21.87	14.4	17.79	13.0	22.16	26.45	4.04	0.43
60	22.66	13.8	17.17	8.9	16.68	24.67	3.54	0.67
75	26.54	19.1	19.17	18.1	11.84	23.51	3.35	1.05
90	27.88	14.6	20.01	12.8	8.23	23.12	2.90	1.25

图5为不同角度下的销槽承压屈服强度的变化趋势, 以及依据欧洲和美国木结构设计规范给出的不同角度销槽承压公式得到的理论计算值。从图5可看

出, 随荷载方向与木纤维之间角度增大, 胶合木销槽承压强度表现出先降低后略上升的趋势, 在0°时胶合木销槽承压屈服强度最大, 在45°~75°之间存在一个最小的销槽承压屈服强度值。对比试验值与预测计算值, EC5和NDS对0°时销槽承压屈服强度预测较准确且接近; NDS对不同角度销槽承压屈服强度变化趋势的预测比EC5更接近试验值变化趋势, 但对0°和90°中间角度预测值比试验值更高。EC5对中间角度的预测相对更准确, 但角度越大强度值下降越多, 使90°时屈服强度值与试验值相差较大。在NDS规范中, 采用ASTM D5764-97a中的“5%销径偏移法”获得销槽承压屈服荷载; 而EC5中销槽承压屈服荷载在通过双直线法, 即荷载-位移曲线线性阶段与屈服阶段拟合直线交汇点处的荷载值。由于本文试验结果处理时参考了ASTM方法中的偏移法, 所以屈服强度试验值随角度变化的趋势更接近NDS规范中的预测公式。

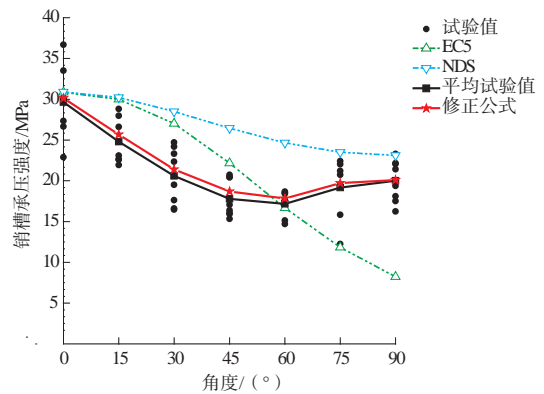


图5 不同角度5%偏移销槽承压强度

总体而言, EC5和NDS中推荐的理论计算公式对销槽承压屈服强度值有一定的预测能力, 但为实现更准确的理论预测, 基于本文不同角度销槽承压屈服强度试验结果, 对NDS中的销槽承压屈服强度公式进行了修正, 如式(2), (3)。修正后的曲线如图5中的红色实线, 与本文的销槽承压强度试验值及其关于角度变化趋势的吻合度更高, 说明修正后的公式对销槽承压屈服强度的预测能力更强。

木材顺纹销槽承压计算公式不变, 木材横纹销槽承压强度计算公式修正为:

$$f_{h,90} = 210 \cdot G^{1.55} \cdot d^{-0.5} \quad (2)$$

荷载方向与木材纤维方向成 α 角时销槽承压强度计算公式修正为:

$$f_{h,\alpha} = \frac{f_{h,0} \cdot f_{h,90}}{f_{h,0} \cdot \sin(1.2\alpha^{1.5}) + f_{h,90} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (3)$$

式中: $f_{h,90}$ 为荷载方向平行于木纤维方向时的销

槽承压屈服强度值 (N/mm^2)； $f_{h,0}$ 为荷载方向垂直于木纤维方向时的销槽承压屈服强度值 (N/mm^2)； $f_{h,\alpha}$ 为荷载方向与木纤维方向成 α 角时的销槽承压屈服强度值 (N/mm^2)； G 为木材在烘干状态下的比重； d 为销钉的直径 (mm)。

2.3 荷载方向对极限销槽承压强度、刚度的影响

分析胶合木试件的荷载-位移曲线时，取荷载最大值或 5mm 处荷载值为极限销槽承压荷载，再除以自攻螺钉内径和实际销孔长度得到胶合木极限销槽承压强度值。从不同角度下，极限销槽承压强度的变化趋势可看出，该强度随角度增大表现为先减小后增大，在 0° 时出现最大值，在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 间存在最小值。对比图 5，极限销槽承压强度与屈服强度对荷载方向与木材纤维之间的角度变化趋势相同。

由图 4 发现，不同角度的销槽承压曲线均表现出初期弹性刚度阶段和明显的第二阶段刚度阶段。销槽承压初期刚度 K_1 由曲线初始直线段斜率求出，二次刚度 K_2 由曲线第二阶段直线段斜率求出。图 6 为不同角度下，初期刚度和二次刚度的变化趋势。随荷载方向与木材纤维间角度增大初期刚度逐渐降低，但其降低由快变缓。结合破坏模式可发现，角度增大后，销槽承压的破坏模式由木材顺纹劈裂逐渐变为槽孔下方木材的压溃，荷载方向与顺纹方向夹角越大，越不容易发生木材顺纹方向的劈裂。由于木材顺纹抗压强度和刚度均大于横纹方向，所以销槽承压初期刚度逐渐下降。由图 6 可看出，第 2 个线性阶段的刚度值与荷载方向和木材纤维间角度表现出较好的线性关系，线性相关性系数为 0.98。根据破坏模式的分析，在角度逐渐增大时，槽孔下的木材压溃越来越明显，特别是在 90° 时，最终发生胶合木试件两侧翘裂前，销槽承压持续表现为木材压溃现象。所以在 K_1 阶段由木材顺纹抗压的刚度支配，在 K_2 阶段则为木材横纹压溃的刚度起主导作用。

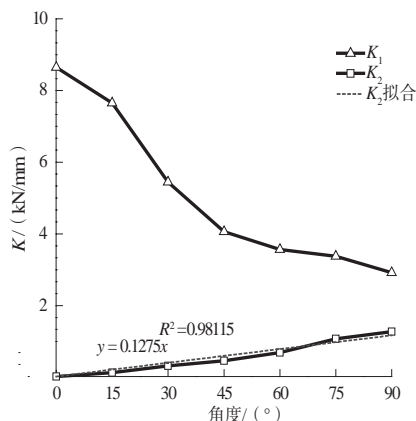


图 6 不同角度销槽承压曲线刚度

3 结论

本文参考 ASTM D5764-97a 方法标准，采用“半孔法”测试云杉胶合木对自攻螺钉不同荷载方向下的销槽承压强度；采用 5% 销径偏移法求取了胶合木销槽承压屈服荷载，并将试验值与国外木结构设计规范中销槽承压理论公式计算值进行对比，得出结论如下。

(1) 顺纹时销槽承压曲线刚度、屈服荷载和破坏荷载最高，随荷载方向与木纤维间角度增大刚度段逐渐降低，但屈服荷载过后均明显表现出第 2 个线性阶段，且斜率表现出增大的趋势。随角度增大，极限销槽承压强度表现为先减小后增大的趋势，在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 间存在最小值，屈服强度与角度关系表现相同趋势，初期刚度的降低由快变缓。荷载-位移曲线第 2 个线性阶段的刚度值与荷载方向和木材纤维间角度表现出较好的线性关系。在 K_1 阶段由木材顺纹抗压的刚度支配，在 K_2 阶段木材横纹压溃的刚度起主导作用。

(2) EC5 和 NDS 中推荐的理论计算公式对销槽承压屈服强度值有一定的预测能力，特别是对 0° 时的销槽承压屈服强度预测与试验值较接近；对其他角度销槽承压屈服强度值变化趋势的预测，NDS 比 EC5 更接近试验值变化趋势，但中间角度预测较高。对 NDS 中的销槽承压屈服强度公式进行修正后，计算值与试验值关于角度变化趋势的吻合度更高，预测能力更强。

参考文献

- [1] ITANI R Y, FAHERTY K F. Structural Wood Research : State-of-the-Art and Research Needs[J]. 1983.
- [2] HASHIM A M. The Performance of Structural Screws in Canadian Glulam [D]. Montreal: McGill University, 2012.
- [3] JOHANSEN K W. Theory of timber connections[J]. International association of bridge and structural engineering. Berm, 1949(9):249.
- [4] 张俊珍, 赵荣军, 任海青, 等. 日本落叶松胶合木销槽承压强度的影响因素分析 [J]. 木材工业, 2014, 28(3):22-25.
- [5] 由佳, 武国芳, 龚迎春. 红松销槽承压强度试验研究 [J]. 木材加工机械, 2018, 29(2):28-32.
- [6] 木结构设计标准: GB 50005—2003[S].
- [7] 胶合木结构技术规范: GB/T 50708—2012[S].
- [8] American society for testing and materials. standard test method for evaluating dowel-bearing strength of wood and wood-based products: ASTM D5764-97a[S].
- [9] European Committee for Standardization. Timber structures-Test methods -Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners: BS EN 383:2007[S].
- [10] FRANKE S, QUENNEVILLE P. Investigation of the embedding strength of Radiata Pine and LVL[C]. Proceedings of the 10th world connection timber engineering, Trentino, Italy, 2010.