

文章编号:1007-9629(2023)06-0644-09

木材横纹销槽承压强度研究

冯 新^{1,2}, 肖宏彬^{1,2,*}, 陈伯望^{1,2}, 晏班夫³

(1. 中南林业科技大学 现代木结构工程材制造及应用技术湖南省工程实验室,
湖南 长沙 410004; 2. 中南林业科技大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004;
3. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 设计了 3 种共计 290 个木材横纹销槽试件, 分析了试验方法、判定方法、有效承压高度、试件尺寸及螺栓直径等因素对木材横纹销槽承压强度的影响, 并将试验结果与规范计算结果进行对比. 结果表明: 现行规范中的木材横纹销槽承压强度试验方法和计算方法均存在一定的局限性; 基于本文提出的标准试验方法所得到的木材横纹销槽承压强度, 木结构螺栓连接横纹屈服承载力计算结果与试验结果比值的平均值为 0.92.

关键词: 木材横纹方向; 销槽承压强度; 半孔试件; 全孔试件; 受弯试件; 试验方法

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.06.010

Embedment Strength Perpendicular to Wood Grain

FENG Xin^{1,2}, XIAO Hongbin^{1,2,*}, CHEN Bowang^{1,2}, YAN Banfu³

(1. Hunan Engineering Laboratory for Manufacturing and Application Technology of Modern Timber Structural Engineering Materials, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. College of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Three kinds of 290 embedment perpendicular to wood grain specimens were designed, and the effects of the test methods, determination methods, loaded edge distance, specimen size and bolt diameter on the embedment strength were analyzed. The test results were compared with the calculation results by relevant technical specifications. The results show that the test methods and calculation methods for the measurement of embedment strength perpendicular to wood grain in the current specifications have certain limitations. Based on the embedment strength obtained from the standard test method proposed in this paper, the average ratio between calculated results and the test results of yield bearing capacity of bolted connections with steel plates of timber simply supported beams loaded perpendicular to grain is 0.92.

Key words: perpendicular to wood grain; embedment strength; half-hole specimen; full-hole specimen; bending specimen; test method

木材销槽承压强度与紧固件的类型及直径、木材含水率及种类、试验方法以及判定方法等因素有关^[1-3]. 横纹销槽承压强度试验主要采用半孔试件(HHS)、全孔试件(FHS)和受弯试件(BS). 基于全

孔试件, Ehlbeck等^[1]研究得到了木材横纹销槽承压强度的计算方法, 该方法被 EN 383—2007《Timber structures-test methods: Determination of embedding strength and foundation values for dowel type

收稿日期: 2022-05-22; 修订日期: 2022-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578554); 国家住房和城乡建设部科技项目(2018-K9-069); 中南林业科技大学高层次人才引进项目(ZK2022YJ001); 湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目(2022GK4052)

第一作者: 冯 新(1986—), 男, 安徽阜阳人, 中南林业科技大学高级实验师, 硕士生导师, 博士. E-mail: fxianghai@163.com

通讯作者: 肖宏彬(1958—), 男, 湖南邵阳人, 中南林业科技大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: tfnxhb@sina.com

fasteners》所采纳,是EN 1995-1-1—2004《Eurocode 5: Design of timber structures—Part 1-1: General—Common rules and rules for buildings》中横纹销槽承压强度计算的理论基础.基于半孔试件,Wilkinson等^[4]研究得到了木材横纹销槽承压强度的另一种计算方法,该方法被ASTM D5764-97a—2013《Standard test method for evaluating dowel-bearing strength of wood and wood-based products》所采纳,是NDS—2018《National design specification for wood construction》中横纹销槽承压强度计算的理论基础.GB/T 39422—2020《木结构销槽承压强度及钉连接承载力特征值确定方法》中的横纹销槽承压强度试验方法与ASTM D5764-97a—2013中的半孔试件法一致.研究表明^[5-7],基于EN 383—2007得到的木材横纹销槽承压强度明显大于基于ASTM

D5764-97a—2013得到的结果.基于受弯试件,Whale等^[8]研究了木材横纹销槽承压强度与木材密度及螺钉直径的关系.基于半孔试件的横纹销槽承压强度,Hindman等^[9]采用NDS—2018所得的受弯试件螺栓连接承载力的计算结果偏保守.

本文设计制作了3种共290个木材横纹销槽试件,分析了试验方法、判定方法、有效承压高度、试件尺寸及螺栓直径等因素对横纹销槽承压强度的影响,提出了木材横纹销槽承压强度的标准试验方法.

1 试验

1.1 试验设计

木材为兴安落叶松、国产杉木及欧洲云杉,其密度(含气干密度 ρ_w 和全干密度 ρ_0)和含水率(W ,质量分数)见表1.

表1 木材的密度和含水率
Table 1 Density and moisture content of woods

Index	Dahurian larch			Chinese fir			European spruce		
	$\rho_w / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$W / \%$	$\rho_w / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$W / \%$	$\rho_w / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$W / \%$
Average value	641.0	610.0	12.4	369.0	343.0	11.7	436.0	426.0	11.7
Coefficient of variation / %	11.3	11.1	4.4	10.7	11.4	2.7	7.1	8.9	3.0

试验采用半孔试件、全孔试件及受弯试件.根据ASTM D1761—2012《Standard test methods for mechanical fasteners in wood》、ASTM D5652—2005《Standard test methods for single-bolt connections in wood and wood-based products》和EN 1380—2019《Timber structures—test methods—load bearing nails, screws, dowels and bolts》,受弯试件还可作为验证木材横纹销槽承压强度的木结构螺栓连接试件.以试件尺寸、有效承压高度 h_e 、螺栓直径 d 、木材密度等参数为变量,研究其对木材横纹销槽承压强度的影响.螺栓直径 d 为8、10、12 mm;试件的厚度 b 、高度 h 和长度 l 均是螺栓直径 d 的整数倍,其中厚度 $b=2d$;有效承压高度 $h_e=(3\sim 10)d$;受弯试件的跨径 $l_0>3h$.所有试件的螺栓孔位置附近尽量避免木节等缺陷的存在,为避免螺栓发生弯曲变

形,螺栓采用强度等级为12.9级的内六角螺栓,杆件表面光滑.每组试件数量 $n \geq 5$,共计290个试件.半孔试件、全孔试件及受弯试件的设计参数见表2~4.

1.2 试验装置及试验方法

在半孔试件和全孔试件中,用螺栓竖向位移表示螺栓在试件中的承压深度(相对滑移);在受弯试件中,用螺栓和试件跨中底面位移之差表示螺栓在试件中的承压深度,用螺栓和试件跨中顶面位移之差表示螺栓在试件中的相对位移.用YWD型位移传感器(P1~P4)记录位移;用50 kN的BLR-1型拉压力传感器记录荷载;用DH5922测试系统同步采集位移和荷载数据,并采用EN 383—2007中的加载方法及加载程序进行加载.试验加载装置和测点布置示意图见图1.

表2 半孔试件的设计参数
Table 2 Design parameters of HHS

Specimen	Wood	b / mm	h / mm	l / mm	d / mm	h_e / mm	n	Specimen	Wood	b / mm	h / mm	l / mm	d / mm	h_e / mm	n
HHS1	Dahurian larch	24	48	128	12	48	5	HHS4	Dahurian larch	24	60	192	12	60	5
HHS2	Dahurian larch	24	48	192	12	48	5	HHS5	Dahurian larch	24	72	128	12	72	6
HHS3	Dahurian larch	24	60	128	12	60	5	HHS6	Dahurian larch	24	72	192	12	72	5

表3 全孔试件的设计参数
Table 3 Design parameters of FHS

Specimen	Wood	$b /$ mm	$h /$ mm	$l /$ mm	$d /$ mm	$h_c /$ mm	n	Specimen	Wood	$b /$ mm	$h /$ mm	$l /$ mm	$d /$ mm	$h_c /$ mm	n
FHS1	Dahurian larch	24	72	128	12	48	10	FHS16	Dahurian larch	16	64	128	8	32	5
FHS2	Dahurian larch	24	72	192	12	48	10	FHS17	Dahurian larch	16	64	192	8	32	5
FHS3	Dahurian larch	24	72	256	12	48	5	FHS18	Dahurian larch	16	56	128	8	40	5
FHS4	Dahurian larch	24	96	128	12	60	5	FHS19	Dahurian larch	16	56	192	8	40	7
FHS5	Dahurian larch	24	96	192	12	60	5	FHS20	Dahurian larch	16	64	128	8	40	5
FHS6	Dahurian larch	24	96	256	12	60	5	FHS21	Dahurian larch	16	64	192	8	40	5
FHS7	Dahurian larch	24	96	128	12	72	5	FHS22	Dahurian larch	16	96	320	8	40	5
FHS8	Dahurian larch	24	96	192	12	72	5	FHS23	Dahurian larch	16	96	320	8	48	5
FHS9	Dahurian larch	24	96	256	12	72	5	FHS24	Dahurian larch	20	120	400	10	50	5
FHS10	Dahurian larch	24	144	640	12	48	5	FHS25	Dahurian larch	20	120	400	10	70	5
FHS11	Dahurian larch	24	144	640	12	60	5	FHS26	European spruce	24	72	128	12	48	8
FHS12	Dahurian larch	24	144	640	12	72	5	FHS27	European spruce	16	56	128	8	32	8
FHS13	Dahurian larch	24	144	640	12	84	5	FHS28	Chinese fir	24	72	128	12	48	9
FHS14	Dahurian larch	16	56	128	8	32	5	FHS29	Chinese fir	16	56	128	8	32	10
FHS15	Dahurian larch	16	56	192	8	32	5								

表4 受弯试件的设计参数
Table 4 Design parameters of BS

Specimen	Wood	$b /$ mm	$h /$ mm	$l /$ mm	$d /$ mm	$h_c /$ mm	n	Specimen	Wood	$b /$ mm	$h /$ mm	$l /$ mm	$d /$ mm	$h_c /$ mm	n
BS1	Dahurian larch	24	144	640	12	48	5	BS10	Dahurian larch	16	80	320	8	48	5
BS2	Dahurian larch	24	144	640	12	60	5	BS11	Dahurian larch	16	80	320	8	56	5
BS3	Dahurian larch	24	144	640	12	72	5	BS12	Dahurian larch	16	80	320	8	64	7
BS4	Dahurian larch	24	144	640	12	84	5	BS13	Dahurian larch	16	96	360	8	48	5
BS5	Dahurian larch	24	144	640	12	108	5	BS14	Dahurian larch	16	96	360	8	56	5
BS6	Dahurian larch	24	144	640	12	120	5	BS15	Dahurian larch	24	80	256	12	60	5
BS7	Dahurian larch	16	80	320	8	24	5	BS16	Dahurian larch	24	80	320	12	60	5
BS8	Dahurian larch	16	80	320	8	32	5	BS17	Dahurian larch	24	80	480	12	60	5
BS9	Dahurian larch	16	80	320	8	40	5								

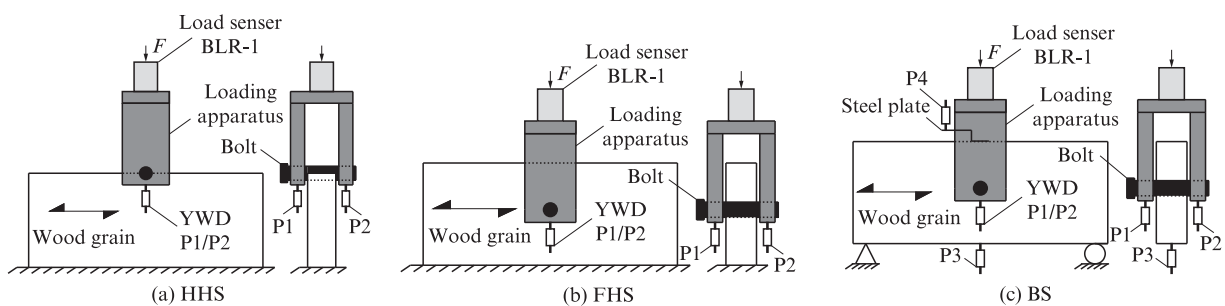


图1 试验加载装置和测点布置示意图

Fig. 1 Sketch of test setup and layout of measuring points in embedding strength tests

1.3 木材横纹销槽承压强度的判定方法

木材横纹销槽荷载-螺栓滑移($F-\omega$)曲线见图2。木材横纹销槽承压强度的判定方法为:(1)根据GB/T 50329—2012《木结构试验方法标准》确定比例极限荷载 F_{prop} 的坐标位置,并将其对应的应力水平定义为比例极限销槽承压强度 $f_{e,prop}$;(2)根据ASTM D5764-97a—

2013中的判定方法得到的木材销槽承压荷载、强度分别为 $F_{5\%}$ 、 $f_{e,5\%}$;(3)根据EN 383—2007中的判定方法得到木材销槽承压荷载及强度分别为 F_{5mm} 、 $f_{e,5mm}$;(4) $F-\omega$ 曲线上极限荷载 F_{ult} 所对应的应力水平定义为极限销槽承压强度 $f_{e,ult}$;(5)将 $F-\omega$ 曲线上 $0.1F_{ult}$ 坐标点和 $0.4F_{ult}$ 坐标点之间直线与位移轴夹角的正切值定义为

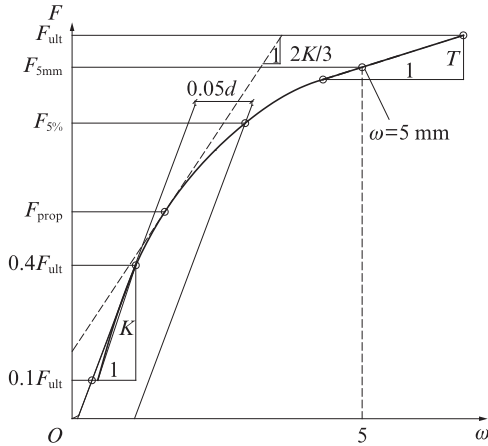


图2 木材横纹销槽荷载-螺栓滑移曲线

Fig. 2 Curve of embedment load perpendicular to wood grain-bolt slip

弹性刚度 K , 则 $F-\omega$ 曲线上比例极限荷载坐标点的切线与位移轴夹角的正切值等于 $2K/3$; (6) 屈服点后的荷载-滑移曲线的线性拟合斜率定义为塑性刚度 T .

2 试验结果及分析

2.1 破坏模式

试件的典型破坏特征见图3. 由图3可见: (1) 半孔试件的螺栓孔处发生明显的面外变形和局部开裂, 且试件两端均出现了翘曲开裂. (2) 全孔试件的螺栓孔处木材纤维发生明显的压溃现象, 导致木材试件开裂和面外变形. 长度较小的全孔试件, 在其螺栓孔位置处, 沿木材纹理方向发生开裂而分成两部分; 国产杉木和欧洲云杉的材质较软, 部分试件没有发生顺纹方向的全长开裂, 只是局部开裂. (3) 与半孔试件和全孔试件不同, 受弯试件随 h_e 的增加, 其销槽承压变形越严重, 其中 BS7 系列试件的螺栓孔几乎没有发生承压变形. 受弯试件最后的破坏形式都是沿着木材纹理方向的开裂, 且大多数试件的开裂长度随 h_e 的增大而增长, 但长度一般不超过试件的跨径.

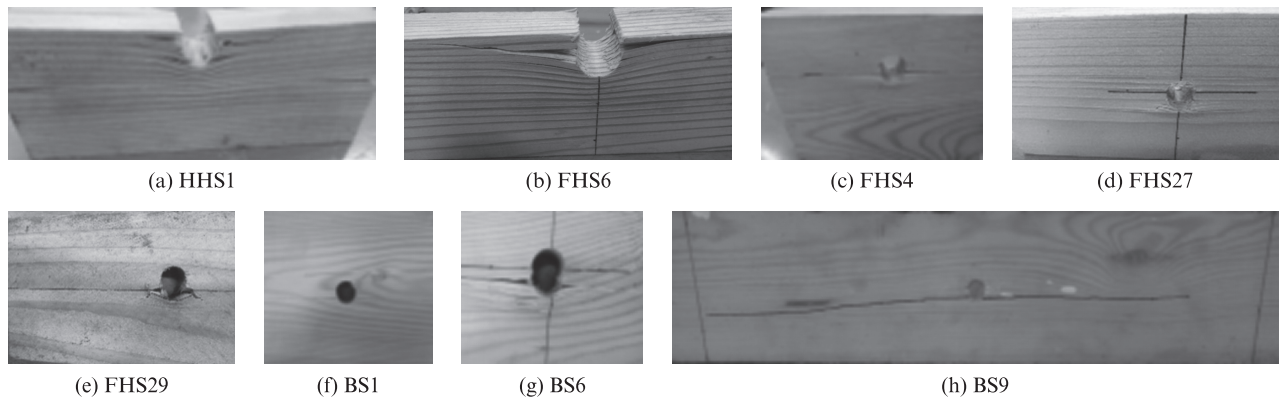


图3 试件的典型破坏特征

Fig. 3 Typical failure patterns of specimens

2.2 木材横纹销槽承压强度的影响因素分析

2.2.1 判定方法

木材横纹销槽承压强度试验结果见表5(表中 C_{V1} 、 C_{V2} 、 C_{V3} 、 C_{V4} 分别为 $f_{e,prop}$ 、 $f_{e,5\%}$ 、 $f_{e,5mm}$ 、 $f_{e,ult}$ 的变异系数). 由表5可见: (1) 半孔试件的 $f_{e,prop}$ 平均值为 12.52 MPa, $f_{e,5\%}/f_{e,prop}$ 、 $f_{e,5mm}/f_{e,prop}$ 、 $f_{e,ult}/f_{e,prop}$ 平均值分别为 1.41、2.05、2.28. (2) 由于螺栓直径和木材密度不同, 全孔试件的 $f_{e,prop}$ 波动较大, 其 $f_{e,5\%}/f_{e,prop}$ 、 $f_{e,5mm}/f_{e,prop}$ 、 $f_{e,ult}/f_{e,prop}$ 平均值分别为 1.45、2.27、2.59; 全孔试件的 $f_{e,5\%}/f_{e,prop}$ 平均值与半孔试件基本一致, 而其 $f_{e,5mm}/f_{e,prop}$ 和 $f_{e,ult}/f_{e,prop}$ 平均值略大于半孔试件. (3) 受弯试件的 $f_{e,5\%}/f_{e,prop}$ 、 $f_{e,5mm}/f_{e,prop}$ 、 $f_{e,ult}/f_{e,prop}$ 平均值分别为 1.34、1.99、2.08. 在螺栓的承压深度达到 5 mm 之前, 大多数试件的荷载已达到最大值, 故受弯试件的 $f_{e,5mm}/f_{e,prop}$ 与 $f_{e,ult}/f_{e,prop}$ 平均值较为接近. 受弯试件的 $f_{e,5\%}/f_{e,prop}$ 、

$f_{e,5mm}/f_{e,prop}$ 和 $f_{e,ult}/f_{e,prop}$ 平均值与半孔试件的结果较为接近. 综上, 木材横纹销槽承压强度与螺栓滑移有很大的相关性, 同一试件的 $f_{e,ult} \geq f_{e,5mm} > f_{e,5\%} > f_{e,prop}$.

2.2.2 试验方法

与半孔试件相比, 相同尺寸的全孔试件 $f_{e,prop}$ 、 $f_{e,5\%}$ 、 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 平均值略小, 且其离散性也较小. 相较于半孔试件, 虽然全孔试件的未加载端没有直接承受荷载作用, 但其限制了螺栓滑移, 进而使全孔试件的弹性刚度 K 和塑性刚度 T 大于半孔试件. 对同一判定方法, 半孔试件和全孔试件的结果相差较小, 但半孔试件结果的离散性略大.

受弯试件的横纹销槽承压强度小于相同尺寸的全孔试件, 这是由于受弯试件的螺栓滑移为螺栓和试件跨中底面位移之差, 相较于相同尺寸的全孔试件, 受弯试件的弹性刚度 K 更大, 而其横纹销槽承压

表5 木材横纹销槽承压强度试验结果
Table 5 Test results of embedment strength perpendicular to grain of specimens

Specimen	$f_{e,prop}/$ MPa	$C_{V1}/\%$	$f_{e,5\%}/$ MPa	$C_{V2}/\%$	$f_{e,5mm}/$ MPa	$C_{V3}/\%$	$f_{e,ult}/$ MPa	$C_{V4}/\%$	$f_{e,5\%}/$ $f_{e,prop}$	$f_{e,5mm}/$ $f_{e,prop}$	$f_{e,ult}/$ $f_{e,prop}$
HHS1	10.98	12.9	12.78	11.8	18.81	8.3	18.94	7.9	1.16	1.71	1.72
HHS2	12.19	15.8	14.52	14.1	19.83	16.5	22.56	14.8	1.19	1.63	1.85
HHS3	9.85	20.6	15.98	20.1	22.47	21.4	24.97	19.2	1.62	2.28	2.54
HHS4	11.40	22.6	17.56	20.4	28.35	24.3	32.87	21.4	1.54	2.49	2.88
HHS5	14.39	19.1	21.47	28.0	31.39	19.7	31.81	19.6	1.49	2.18	2.21
HHS6	16.33	18.6	23.80	19.2	33.10	24.1	40.82	25.1	1.46	2.03	2.50
FHS1	10.26	10.9	16.04	19.6	22.04	22.1	22.63	21.6	1.56	2.15	2.21
FHS2	11.08	25.8	16.25	27.3	23.52	19.5	25.59	18.7	1.47	2.12	2.31
FHS3	14.10	39.6	18.88	31.6	25.20	14.7	30.01	6.3	1.34	1.79	2.13
FHS4	11.62	1.7	16.58	3.2	24.23	11.2	25.56	10.0	1.43	2.09	2.20
FHS5	12.69	3.8	18.69	6.1	27.15	7.1	31.49	13.5	1.47	2.14	2.48
FHS6	11.76	7.3	16.13	14.6	26.71	13.3	34.11	17.5	1.37	2.27	2.90
FHS7	11.98	4.8	16.48	9.7	24.25	10.5	27.09	16.8	1.38	2.02	2.26
FHS8	12.41	7.3	16.44	3.7	25.12	7.6	30.67	6.1	1.32	2.02	2.47
FHS9	14.21	10.7	20.43	21.6	29.40	23.5	33.16	14.0	1.44	2.07	2.33
FHS10	15.87	13.1	20.59	23.7	28.74	28.2	40.11	26.3	1.30	1.81	2.53
FHS11	15.33	10.4	23.20	12.5	33.32	10.0	42.71	15.1	1.51	2.17	2.79
FHS12	15.48	6.9	19.74	14.3	29.99	17.3	39.09	19.3	1.28	1.94	2.53
FHS13	15.61	12.8	18.37	13.1	26.26	9.2	35.28	17.0	1.18	1.68	2.26
FHS14	9.79	4.1	15.61	4.3	25.27	12.2	25.43	11.5	1.59	2.58	2.60
FHS15	11.52	2.6	14.54	3.6	25.70	7.3	28.31	9.7	1.26	2.23	2.46
FHS16	8.95	3.7	12.53	9.2	21.44	4.4	22.69	5.4	1.40	2.40	2.54
FHS17	9.72	5.5	14.99	10.2	28.31	22.9	29.14	23.9	1.54	2.91	3.00
FHS18	11.21	5.6	16.19	14.0	26.05	15.2	26.69	10.8	1.44	2.32	2.38
FHS19	12.88	13.9	17.64	21.8	31.02	20.6	34.02	19.3	1.37	2.41	2.64
FHS20	10.75	1.3	14.38	2.1	25.13	11.5	25.13	11.5	1.34	2.34	2.34
FHS21	10.83	1.1	15.03	3.2	27.89	5.4	30.04	5.6	1.39	2.58	2.77
FHS22	19.60	6.4	24.82	11.8	36.94	20.0	51.91	17.0	1.27	1.88	2.65
FHS23	19.89	7.7	25.88	3.3	40.02	7.5	53.80	12.2	1.30	2.01	2.70
FHS24	19.03	6.1	26.95	10.2	40.72	9.1	52.58	9.0	1.42	2.14	2.76
FHS25	17.29	13.9	26.88	7.9	42.31	5.8	54.08	4.5	1.55	2.45	3.13
FHS26	5.24	6.8	10.01	15.1	14.61	13.7	14.73	14.1	1.91	2.79	2.81
FHS27	5.65	2.1	9.55	7.4	17.28	9.8	17.42	10.5	1.69	3.06	3.08
FHS28	3.73	2.3	6.63	7.4	9.68	9.1	10.81	13.9	1.78	2.60	2.90
FHS29	6.02	10.8	9.98	9.8	16.42	13.1	17.42	15.7	1.66	2.73	2.89
BS1	12.24	6.2	13.89	16.5	20.39	6.2	20.39	6.2	1.13	1.67	1.67
BS2	11.49	2.9	18.19	19.3	20.58	14.3	22.46	19.5	1.58	1.79	1.95
BS3	13.98	5.6	17.44	19.9	28.55	18.8	29.67	15.5	1.25	2.04	2.12
BS4	13.90	7.4	14.72	15.0	35.29	17.6	35.51	10.1	1.06	2.54	2.55
BS5	16.37	2.8	17.84	5.8	29.28	14.3	33.10	22.2	1.09	1.79	2.02
BS6	13.16	4.0	19.05	12.9	35.09	5.5	38.39	15.4	1.45	2.67	2.92
BS8	13.91	12.7	18.29	4.4	24.25	27.5	24.25	27.5	1.32	1.74	1.74
BS9	11.50	14.4	16.42	1.5	25.72	15.6	25.78	15.4	1.43	2.24	2.24
BS10	13.51	6.1	19.20	18.0	26.30	25.9	27.55	22.3	1.42	1.95	2.04
BS11	15.70	9.0	20.24	8.0	27.87	11.4	30.37	16.7	1.29	1.78	1.93
BS12	15.96	13.3	20.49	22.9	33.26	13.6	33.64	13.0	1.28	2.08	2.11
BS13	13.99	9.2	20.26	17.1	28.41	11.3	29.02	10.7	1.45	2.03	2.07
BS14	15.01	9.4	20.91	13.3	32.18	17.9	34.97	14.3	1.39	2.14	2.33
BS15	11.27	4.9	14.55	7.8	20.82	10.5	22.11	8.2	1.29	1.85	1.96
BS16	12.05	8.1	17.44	13.9	24.03	11.2	25.40	7.7	1.45	1.99	2.11

强度却较小.由此可见,受弯试件的弯曲应力导致了其横纹销槽承压强度的降低.

2.2.3 有效承压高度

对半孔试件,试件的 $f_{e,prop}$ 、 $f_{e,5\%}$ 、 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 均随着有效承压高度 h_e 的增加而增大,但 h_e 对 $f_{e,prop}$ 的影响相对较小.

对全孔试件:随着 h_e 的增大,除 $h_e=60$ mm外,其余全孔试件的 $f_{e,prop}$ 、 $f_{e,5\%}$ 、 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 波动均较小,且没有明显的规律;试件的 $f_{e,prop}$ 和 $f_{e,5\%}$ 与 h_e 基本无关, $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 均随着 h_e 的增加略有增大.整体上看, h_e 对全孔试件的 $f_{e,prop}$ 、 $f_{e,5\%}$ 、 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 基本没有影响.

对受弯试件:随着 h_e 的增加,试件的 $f_{e,prop}$ 和 $f_{e,5\%}$ 稍有波动,波动幅值较小,且无明显的规律;而 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 有明显增大的趋势,特别是 $l_0=320$ mm的试件,木材力学特性的变异性导致了 $l_0=640$ mm系列试件个别数据的突变,但整体上 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 的增大趋势也较为明显.这与全孔试件的变化规律有所不同,是因为 $f_{e,prop}$ 、 $f_{e,5\%}$ 、 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 与螺栓滑移有很大的相关性,受弯试件中的螺栓滑移明显小于全孔试件,且其螺栓滑移随着 h_e 的增加而增大.

2.2.4 试件几何尺寸

半孔试件的 $h=h_e$,其 $f_{e,prop}$ 、 $f_{e,5\%}$ 、 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 均随着试件长度和高度的增加而增大.当 $l=128$ mm时,全孔试件的 $f_{e,prop}$ 、 $f_{e,5\%}$ 、 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 均随着试件高度的增加有不同程度的降低,其幅值在0.46~3.83 MPa之间.当 $l=192$ mm时,随着试件高度的增加,未加载端高度($h-h_e$)由16 mm增加至24 mm时, $h_e=40$ mm系列全孔试件的 $f_{e,prop}$ 、 $f_{e,5\%}$ 、 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 均有降低的趋势,未加载端高度由24 mm增加至32 mm时, $h_e=32$ mm系列全孔试件的 $f_{e,prop}$ 降低了1.80 MPa,而 $f_{e,5\%}$ 、 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 均有增大趋势.综上所述,在一定范围内,未加载端高度对横纹销槽承压强度有一定影响,但未见明显的规律.在保持未加载端高度一致的情况下,假设 h_e 对横纹销槽承压强度无影响,当试件长度在一定范围内时, $f_{e,prop}$ 、 $f_{e,5\%}$ 、 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 均随着试件长度的增加而增大,只是 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 的增大趋势更加明显.

对于受弯试件,当跨径由256 mm增加到480 mm时, $f_{e,prop}$ 、 $f_{e,5\%}$ 、 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 均呈先增大后减小的趋势,但变化的幅值不大.可以认定,当跨径 l_0 大于 $3h$ 时,木材横纹销槽承压强度与跨径基本无关.在跨径对横纹销槽承压强度无影响的前提下,当未加载端高度在一定范围内时,随未加载端高度的增加, $f_{e,prop}$ 和 $f_{e,5\%}$ 基本没有变化,而 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 的增大趋势较为明显.

2.2.5 木材密度和螺栓直径

随着木材密度的增加,全孔试件的横纹销槽承压强度 $f_{e,prop}$ 、 $f_{e,5\%}$ 、 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 均呈现增大的趋势.随着

螺栓直径的增加,受弯试件和全孔试件的 $f_{e,prop}$ 、 $f_{e,5\%}$ 、 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 均明显呈减小的趋势.当全孔试件的螺栓直径由8 mm增加到10 mm时, $f_{e,5\%}$ 和 $f_{e,5mm}$ 略有增大.

2.3 木材横纹销槽承压强度的试验方法分析

虽然 $f_{e,prop}$ 的影响因素相对较少,变异性也较小,但半孔试件、全孔试件和受弯试件中的 $f_{e,prop}$ 均较小,若将其作为木材横纹销槽承压强度的设计指标,显然不能充分发挥木材的力学性能.

由于GB/T 39422—2020中的木材横纹销槽承压强度试验方法和取值方式与美国ASTM D5764-97a—2013中的半孔试件法一致,因此GB 50005—2017《木结构设计标准》中的承载力计算以半孔试件的 $f_{e,5\%}$ 为基础,记作 F_{GB} ;美国NDS—2018中的承载力计算以全孔试件的 $f_{e,5\%}$ 为基础,记作 F_{NDS} ;欧洲EN 1995-1-1—2004中的承载力计算以全孔试件的 $f_{e,5mm}$ 为基础,记作 F_{EC5} ;基于全孔试件的 $f_{e,ult}$ 得到的承载力计算值记作 F^a ,基于受弯试件的 $f_{e,5\%}$ 、 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 得到的承载力计算值分别记作 $F_{5\%}^a$ 、 F_{5mm}^a 和 F_{ult}^a .以受弯试件为例,验证了不同试验方法和判定方法下木材的横纹销槽承压强度,结果见表6(表中上标a表示以试验值作为销槽承压强度计算所得的承载力;上标b表示采用规范的规定值作为销槽承压强度计算所得的承载力; $F_{5\%}$ 的测定基于规范NDS—2018和GB 50005—2017).因BS7的 $h_e < 4d$,不满足规范要求,且其螺栓孔基本没有发生明显的变形,故将其剔除.其余系列受弯试件的破坏模式均为欧洲屈服模式I. EN 1995-1-1—2004、NDS—2018和GB 50005—2017中关于木结构销轴类连接欧洲屈服模式I的计算公式均相同.木材横纹销槽承压强度的试验值及计算值见表7.

由表6可见,木材横纹销槽承压强度无论取半孔试件和全孔试件的试验值,还是取规范值,所得到的承载力计算结果均明显大于试验结果.这说明现行标准和规范所推荐的木材横纹销槽承压强度试验方法和计算公式均不适用于木结构钢板螺栓连接横纹屈服承载力的计算.虽然横纹销槽承压强度取受弯试件的 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 时,承载力计算值与试验值相差不大,但 h_e 对 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 有非常明显的影响.更重要的是,GB 50005—2017中是以连接产生 $0.05d$ 的塑性变形为承载力极限状态的标志,而不是以最大荷载作为承载力极限状态.因此以受弯试件的 $f_{e,5\%}$ 作为木材横纹销槽承压强度较为合适,除承载力计算值与试验值较为吻合之外, $f_{e,5\%}$ 还不受 h_e 变化的影响.

此外,由表7可见:除了 $d=12$ mm全孔试件的 $f_{e,5mm}$ 外,木材横纹销槽承压强度试验值与计算值均

表6 木材横纹销槽承载力试验方法对比分析结果

Table 6 Comparison results of test method of embedment strength perpendicular to the wood grain

Specimen	Test result/kN		Comparison between calculation result and test result								
	$F_{5\%}$	F_{ult}	$F_{GB}^a/F_{5\%}$	$F_{NDS}^a/F_{5\%}$	$F_{NDS}^b/F_{5\%}$	F_{EC5}^a/F_{ult}	F_{EC5}^b/F_{ult}	F^a/F_{ult}	$F_{5\%}^a/F_{5\%}$	F_{5mm}^a/F_{ult}	F_{ult}^a/F_{ult}
BS1	3.85	5.87	1.32	1.53	2.24	1.45	1.48	1.93	1.26	1.38	1.47
BS2	5.14	6.47	0.99	1.15	1.67	1.32	1.35	1.75	0.94	1.26	1.33
BS3	4.92	8.54	1.04	1.20	1.75	1.00	1.02	1.32	0.99	0.95	1.01
BS4	4.17	10.23	1.22	1.41	2.06	0.83	0.85	1.11	1.16	0.79	0.84
BS5	5.11	9.53	1.00	1.15	1.68	0.89	0.91	1.19	0.95	0.85	0.90
BS6	5.44	11.06	0.94	1.08	1.58	0.77	0.79	1.02	0.89	0.73	0.78
BS8	2.25	3.10		1.44	2.08	1.59	1.36	2.18	1.10	1.59	1.64
BS9	2.05	3.30		1.58	2.29	1.49	1.28	2.05	1.08	1.13	1.17
BS10	2.41	3.53		1.35	1.94	1.40	1.19	1.92	1.18	1.07	1.10
BS11	2.57	3.89		1.26	1.82	1.27	1.08	1.74	1.01	1.00	1.03
BS12	2.62	4.31		1.24	1.79	1.14	0.98	1.57	0.94	0.90	0.93
BS13	2.53	3.71		1.28	1.85	1.33	1.13	1.82	0.92	0.82	0.84
BS14	2.65	4.48		1.22	1.77	1.10	0.94	1.51	0.96	0.95	0.98
BS15	4.16	6.37	1.22	1.42	2.07	1.34	1.37	1.78	0.91	0.79	0.81
BS16	4.90	7.32	1.04	1.20	1.76	1.16	1.19	1.55	1.17	1.28	1.35
BS17	4.29	6.45	1.19	1.37	2.01	1.32	1.35	1.76	0.99	1.11	1.18
Average			1.11	1.32	1.91	1.27	1.19	1.72	1.03	1.05	1.11
Coefficient of variation/%			12.10	11.00	10.90	26.70	23.30	27.70	10.90	22.90	23.10

表7 木材横纹销槽承压强度的试验值及计算值

Table 7 Test values and calculated values of embedment strength perpendicular to the wood grain

d/mm	Test value/MPa						Calculated value/MPa		
	HHS1-HHS6		FHS10-FHS13 and FHS22-FHS23		BS1-BS6 and BS8-BS12		GB 50005—2017 and NDS—2018	EN 1995-1-1—2004	
	$f_{e,5\%}$	$f_{e,5\%}$	$f_{e,5mm}$	$f_{e,ult}$	$f_{e,5\%}$	$f_{e,5mm}$	$f_{e,ult}$	$f_{e,5\%}$	$f_{e,5mm}$
12	17.69	20.48	29.58	39.30	16.86	28.2	29.92	29.89	30.23
8		25.35	38.48	52.86	18.93	27.48	28.32	36.60	32.90

不一致;当 $d=8$ mm时,基于不同规范的计算值相差较大。这进一步说明现行标准和规范所推荐的木材横纹销槽承压强度试验方法与计算公式均存在一定的局限性。

综上,将受弯试件作为木材横纹销槽承压强度的标准试验试件,受弯试件需满足:净跨径 l_0 取 $3h$ 和 $40d$ 两者中的较大者;有效承压高度 $h_e \geq 4d$,未加载端高度 $(h-h_e) \geq 4d$;最小厚度 b 取 $2d$ 和 38 mm中的较小值。具体的加载方法和强度判定方法可参照标准 GB/T 39422—2020。

3 木材横纹销槽承压强度适用性分析

以文献[10]中的木结构钢板螺栓连接横纹屈服承载力试验结果为对象,分析受弯试件的 $f_{e,5\%}$ 作为横

纹销槽承压强度的适用性。文献[10]中的试件设计和加载方法依据 ASTM D1761—2012,每组试件有5个重复试件,螺栓直径 $d=12$ mm,木结构简支梁与横纹销槽承压强度试验所用兴安落叶松为同一批材料,由于试验时间的差异,文献[10]中木材含水率实测值为 11.4% 。

以受弯试件 BS1~BS4 的 $f_{e,5\%}$ 的平均值作为横纹销槽承压强度,所得屈服承载力计算值记作 F 。木结构简支梁钢板螺栓连接横纹屈服承载力对比结果见表8。由表8可见,若仅从承载力的比值分析, F_{GB} 与文献试验结果最为接近, F 与文献试验结果较为接近,其屈服承载力计算结果与文献试验结果比值的平均值为 0.92 , F_{NDS} 明显大于文献试验结果。但半孔试件的 $f_{e,5\%}$ 有明显的尺寸效应,其数值并不可靠,所

得的承载力计算结果需要进一步商榷.因此,基于受弯试件 $f_{e,5\%}$ 所得的屈服承载力计算结果虽偏保守,但其与文献试验结果吻合较好.木材含水率的差异也

是造成承载力计算结果 F 偏保守的原因之一.S1系列的承载力计算结果 F 略大于文献试验结果,原因是S1系列中的 h_e 略小于规范规定的最小值 $4d$.

表8 木结构简支梁螺栓连接承载力对比结果

Table 8 Comparison results of bearing capacity of bolted connections with steel plates for timber simply supported beam

Serial	b/mm	h/mm	l_0/mm	h_e/mm	Test value		Calculated value/kN			Comparison result		
					$F_{5\%}/kN$	Coefficient of variation/%	F	F_{GB}	F_{NDS}	$F/F_{5\%}$	$F_{GB}/F_{5\%}$	$F_{NDS}/F_{5\%}$
S1	38	150	1200	45	7.09	12.0	7.32	8.07	9.34	1.03	1.14	1.32
S2	38	150	1200	60	7.66	24.3	7.32	8.07	9.34	0.96	1.05	1.22
S3	38	150	1200	75	8.03	11.4	7.32	8.07	9.34	0.91	1.00	1.16
S4	38	150	1200	90	8.08	11.9	7.32	8.07	9.34	0.91	1.00	1.16
S5	38	150	1200	105	7.98	15.4	7.32	8.07	9.34	0.92	1.01	1.17
S6	38	150	1200	120	8.39	12.9	7.32	8.07	9.34	0.87	0.96	1.11
S7	38	150	900	75	7.97	16.7	7.32	8.07	9.34	0.92	1.01	1.17
S8	38	150	750	75	8.50	22.6	7.32	8.07	9.34	0.86	0.95	1.10
S9	38	150	450	75	7.96	20.3	7.32	8.07	9.34	0.92	1.01	1.17
Average										0.92	1.01	1.17
Coefficient of variation/%										5.40	5.40	5.40

4 结论

(1)对于同一种试验方法,不同木材横纹销槽承压强度判定方法所得结果不同;对于相同的试件, $f_{e,ult} \geq f_{e,5mm} > f_{e,5\%} > f_{e,prop}$.

(2)不同试验方法所得到的木材横纹销槽承压强度差别较大,半孔试件横纹销槽承压强度-螺栓滑移曲线的弹性刚度 K 和塑性刚度 T 均小于全孔试件,受弯试件的横纹销槽承压强度小于全孔试件.

(3)半孔试件的横纹销槽承压强度随试件尺寸的增加而增大.当全孔试件的长度和未加载端高度在一定范围内时,横纹销槽承压强度随着试件长度的增加而增大,未加载端高度和有效承压高度 h_e 对横纹销槽承压强度有一定的影响,但未见明显的规律.当受弯试件的跨径 $l_0 > 3h$ 时,横纹销槽承压强度与跨径无关.当未加载端高度在一定范围内时,随着未加载端高度和 h_e 的增加,受弯试件的 $f_{e,prop}$ 和 $f_{e,5\%}$ 基本无变化,而 $f_{e,5mm}$ 和 $f_{e,ult}$ 有明显的增大趋势.随着螺栓直径的增加,全孔试件和受弯试件的横纹销槽承压强度均呈明显减小的趋势.

(4)以受弯试件的 $f_{e,5\%}$ 作为横纹销槽承压强度,采用基于欧洲屈服模式的销轴类连接承载力计算方法,所得的木结构简支梁钢板螺栓连接横纹屈服承载力计算结果与文献试验结果比值的平均值为0.92,计算结果虽偏于保守,但与文献试验结果吻合较好.

参考文献:

- [1] EHLBECK J, WERNER H. Softwood and hardwood embedding strength for dowel-type fasteners[C]// The 25th International Council for Research and Innovation in Building and Construction. Karlsruhe: International Council for Research and Innovation, 1992:25-7-2.
- [2] YURRITA M, CABRERO J M. The embedment strength as a system property [C]// The 50th International Council for Research and Innovation in Building and Construction. Karlsruhe: International Council for Research and Innovation, 2017:50-7-2.
- [3] 马贵进,徐德良,陆伟东,等.湿度对胶合木销槽承压强度的影响试验[J].建筑科学与工程学报,2016,33(1):120-126. MA Guijin, XU Deliang, LU Weidong, et al. Experiment on effect of humidity on dowel bearing strength of glued laminated timber[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(1):120-126. (in Chinese)
- [4] WILKINSON T L. Dowel bearing strength [R]. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1991:1-9.
- [5] SANTOS C L, DE JESUS A M P, MORALS J J L, et al. A comparison between the EN 383 and ASTM D5764 test methods for dowel-bearing strength assessment of wood: Experimental and numerical investigations[J]. Strain, 2010, 46(2):159-174.
- [6] 张尚,董春雷,窦玲,等.糠醇和玻璃纤维处理对木材弯曲蠕变的影响[J].建筑材料学报,2020,23(1):162-167. ZHANG Shang, DONG Chunlei, DOU Ling, et al. Effect of furfurylation and glass fiber treatment on bending creep of wood [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):162-167. (in Chinese)
- [7] 张刚,王朝晖,王金平,等.木结构螺栓连接设计中销槽承压强

- 度值的确定方法[J]. 林产工业, 2014, 41(4):22-26.
- ZHANG Gang, WANG Zhaohui, WANG Jinping, et al. Determination methods of wood embedding strength for bolt connection of wooden structure [J]. China Forest Products Industry, 2014, 41(4):22-26. (in Chinese)
- [8] WHALE L R J, SMITH I, LARSEN H J. Design of nailed and bolted joints-proposals for the revision of existing formulae in draft Eurocode 5 and the CIB code [C]// The 20th International Council for Research and Innovation in Building and Construction. Karlsruhe: International Council for Research and Innovation, 1987:20-7-1.
- [9] HINDMAN D P, FINKENBINDER D E, LOFERSKI J R, et al. Strength of sawn lumber and wood composite dowel connections loaded perpendicular to grain. I: NDS design equations [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(12): 1217-1225.
- [10] 冯新. 螺栓连接木结构构件横纹受力性能研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
- FENG Xin. Research on mechanical performances of timber members loaded perpendicular to grain by bolted connections [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2020. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 643 页)

- (2) 一半柔性混合料路用性能评价方法[J]. 石油沥青, 2021, 35(6):1-11.
- LING Senlin, WANG Yongxin, JIN Huiqiu, et al. Review on pouring semi-flexible pavement (2) — Road performance evaluation method of semi-flexible mixture [J]. Petroleum Asphalt, 2021, 35(6):1-11. (in Chinese)
- [ 8 ] 日本道路协会. アスファルト舗装工事共通仕様書解説[M]. 东京: 丸善株式会社出版事业部, 1992:72-88.
- Japan Road Association. Understanding the common workbook for asphalt works [M]. Tokyo: Maruzen Co., Ltd. Publishing Division, 1992:72-88. (in Japanese)
- [ 9 ] CAI X, ZHANG J Y, ZHANG H, et al. Identification of microstructural characteristics in semi-flexible pavement material using micromechanics and nano-techniques [J]. Construction and Building Materials, 2020, 246:118426.
- [10] 马峰, 温雅喆, 傅珍, 等. 多聚磷酸复合改性沥青混合料路用性能[J]. 应用化工, 2021, 50(4):887-891.
- MA Feng, WEN Yalu, FU Zhen, et al. Road performance of polyphosphate composite modified asphalt mixture [J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(4):887-891. (in Chinese)
- [11] LEAHY R, HICKS R, MONISMITH C, et al. Framework for performance-based approach to mix design and analysis [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1995, 64:431-473.