

木材销槽承压强度的测定方法和理论公式比较

张刚 王朝晖 刘柯珍 李海栋 张忠利

(中国林科院木材工业研究所; 国家林业局木材科学与技术重点实验室, 北京 100091)

摘 要: 本文对各国木材销槽承压强度的测定方法进行归纳总结, 列出国内外销槽承压强度的理论计算公式并对计算结果进行比较, 分析表明销轴直径 5% 偏移法作为木材销槽承压强度的判定方法较为合理; 通过兴安落叶松规格材和胶合木销槽承压强度试验 5% 偏移法测定结果与美国木结构设计规范 NDS 规定的木材销槽承压强度理论值比较吻合。

关键字: 销槽承压强度 5% 偏移法 理论计算公式

Determination methods and comparison of theoretical formula of wood embedding strength

ZHANG Gang, WANG Zhao-hui, LIU Ke-zhen, LI Hai-dong, ZHANG Zhong-li
(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Wood Science and Technology of State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: This paper described the determination methods of wood embedding strength, and listed international and domestic theoretical formula of wood embedding strength; The results of theoretical formula results were compared. The result obtained 5% off-set as a evaluating method was more reasonable, and theoretical values of wood embedding strength from NDS were in good agreement with the experimental values of larch dimension lumbers and glued-laminated timber by 5% off-set.

Key words: embedding strength; 5% off-set; theoretical formula

木材的销槽承压强度是木结构销轴类连接节点设计的基础参数, 准确合理的木材销槽承压强度值对销轴类连接节点设计有重要的意义。而国内外木材的销槽承压强度存在不同的测定方法和理论计算公式, 使设计时准确选取木材销槽承压强度值较为困难。本文综合阐述了国内外木材销槽承压强度的测定方法, 列出国内外木材销槽承压强度的理论计算公式并将美国木结构设计规范 NDS^[1] 中销槽承压强度的计算结果与试验结果进行比较, 为木材销槽承压强度的选取提供参考。

1 木材销槽承压强度的测定方法

基金项目: 中央级公益性科研院所重点项目“国产落叶松材木结构关键技术研究 (CAFINT2010K01)”

作者简介: 张刚, 1988 年生, 男, 中国林科院木材工业研究所, 硕士研究生。邮箱: woodsgood_gzhang@126.com。

通讯作者: 王朝晖, 男, 博士, 中国林科院木材所副研究员, 主要研究木材力学与木结构工程。Email: zhwang@caf.ac.cn

1.1 木材销槽承压强度的测试方法

通过试验测定木材销槽承压强度的方法有半孔和全孔两种方法，测试过程中销轴类紧固件（主要包括螺栓、钢销和六角头木螺钉等）不能发生弯曲，如图 1 所示。由图可见，半孔法测试简单，试验结果误差较小；由于测试过程中销轴类紧固件不发生弯曲，测试结果能够准确反映木材的销槽承压强度，但与实际使用情况不完全相符。全孔法试验要求较高，试验结果的影响因素较多，但测试方法与螺栓等紧固件实际使用情况相符，能够更好地反映真实受力情况时木材销槽承压强度；全孔法还能够考虑到木材整体在试验拉伸或压缩过程中对销槽承压强度的影响。对于测试结束之前试件发生开裂导致试验终止的情况，应采用全孔测试方法。

目前测定木材销槽承压强度的具体试验方法，主要参照美国 ASTM(D5764-97a)^[2] 和欧盟 EN 383-2007^[3]。两者都是采用单个销轴类紧固件测定木材的销槽承压强度。前者采用半孔或全孔两种测试方法，后者仅采用全孔测试方法。它们都对测试试件的尺寸和螺孔的位置做出规定，但两者规定不同，为避免测试过程中销轴类紧固件发生弯曲，前者要求试件的厚度不小于 38mm 或者 2 倍紧固件直径，后者则要求试件的厚度不超出 1.5 倍至 4 倍紧固件直径的范围。为避免测试过程中试件开裂，前者要求紧固件距试件受力端的端距不小于 50mm 或者 4 倍紧固件直径，距非受力端的端距不小于 50mm 或者 2 倍紧固件直径；后者则要求顺纹时紧固件距试件的端距为 7 倍紧固件直径，横纹时为 20 倍紧固件直径。测试时，ASTM(D5764-97a) 规定只能对试件进行压缩试验测定木材的销槽承压强度，而 EN 383-2007 规定可以通过对试件的压缩试验或拉伸试验测定顺纹木材销槽承压强度，通过试件的压缩试验测定横纹的木材销槽承压强度。

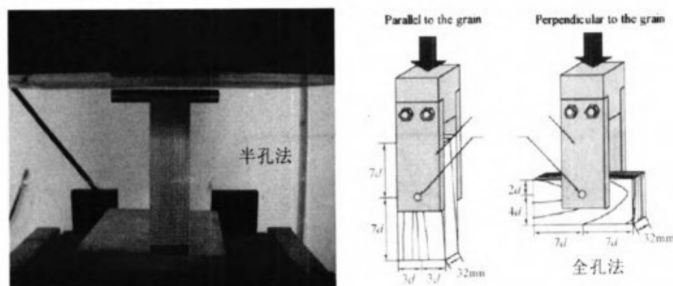


图 1 木材销槽承压强度试验测试方法
Fig.1 Determination methods of wood embedding strength

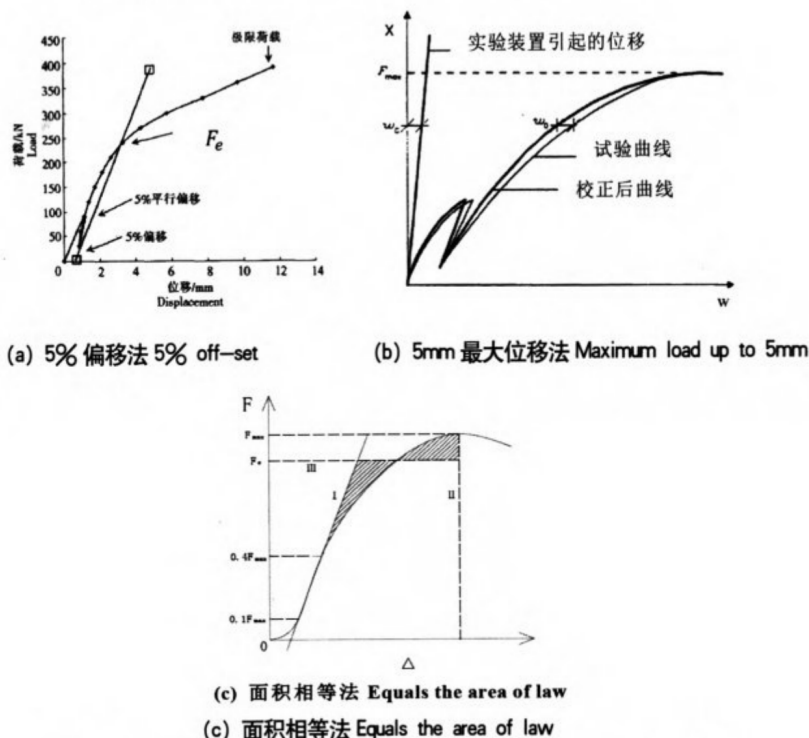


图 2 木材销槽承压强度试验中荷载 - 位移曲线上荷载的三种判定方法
Fig.2 Three evaluating methods of wood embedding strength

1.2 木材销槽承压强度的判定方法

木材的销槽承压强度不能通过试验直接测得,通过上述试验我们可以得到紧固件在荷载作用下的荷载-位移曲线;将通过荷载-位移曲线上某点对应的销槽承压荷载 F_e 与紧固件直径 D 和构件厚度 T 乘积的比值 F_e/DT 定义为木材的销槽承压强度。那么不同的销槽承压荷载 F_e 判定方法,将会得到不同的木材销槽承压强度。

通常采用的销槽承压荷载 F_e 判定方法有:5% 偏移法、5mm 最大位移法和面积相等法三种,如图 2 所示。5% 偏移法指试验得到的荷载-位移曲线上以初始线性阶段的直线沿水平位移轴移动 5% 紧固件直径的位移,该斜直线与曲线的交点对应的荷载定义为销槽承压荷载 F_e ,如图 2 (a) 所示;5mm 最大位移法指试验得到的荷载-位移曲线应减去由实验装置引起的位移,校正后的荷载-位移曲线对应的最大荷载或者 5mm 位移处对应的荷载为销槽承压荷载 F_e ,如图 2 (b) 所示;面积相等法指试验得到的荷载-位移曲线上水平直线Ⅲ使过 $0.1P_{max}$ 和 $0.4P_{max}$ 的直线 I、过 P_{max} 的竖直直线 II 和曲线围成的两块图形面积相等时对应的荷载定义为销槽承压荷载 F_e ,如图 2 (c) 所示。

Sawata K 等^[4]对 5% 偏移法和 5mm 最大位移法测试木材销槽承压强度进行比较,结果表明两种方法测得木材顺纹的销槽承压强度比较接近,都约为 0.9 倍的木材顺纹承压强度;而使用上述两种方法测得木材的横纹销槽承压强度差异较大,整体上约 4 倍的木材横纹承压强度;且 5mm 最大位移法的结果还与紧固件的直径有关。造成木材顺纹销槽承压强度小于木材顺纹承压强度,横纹的大于木材的横纹销槽承压强度的原因是:木材顺纹承压的应力-应变模型是理想弹塑性模型,而木材横纹承压的应力-应变模型是弹性-线性强化型;这种特性使偏移判定法得到的木材顺纹销槽承压强度与试验中木材的顺纹承压强度接近,而木材横纹销槽承压强度远大于由比例极限法得到的木材横纹承压强度。从 Sawata K 等^[4]试验得到的销槽承压强度-位移曲线可以清楚看到木材的这种特性,如图 3 所示。

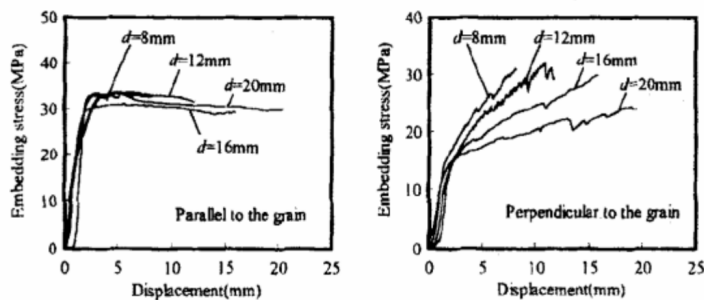


图 3 试验测得木材销槽承压强度-位移曲线

Fig.3 Experimental curves of wood embedding strength and displacement

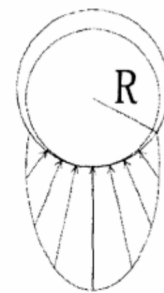


图 4 螺栓周围木材的应力状态

Fig.4 The stress state of wood around the bolt

在木材销槽承压强度试验过程中,螺栓周围木材的应力分布如图 4 所示,对于给定尺寸试件螺栓与木材的最初接触面积随着螺栓直径的增大,同时螺栓对木材横纹方向的挤压作用也会随之增大,即增大螺栓直径可以提高试验中销槽的承压荷载同时提高了木材开裂破坏的可能性。由此可以得出考虑用螺栓直径因素判定木材销槽承压荷载的 5% 偏移法比较合理。

2 国内外木材销槽承压强度的理论计算公式及比较

2.1 国内外木材销槽承压强度的理论计算公式

国内外木结构设计规范中,木材的销槽承压强度理论计算公式均与木材的密度紧密联系;有的理论计算公式还考虑到紧固件直径的影响。以下分别列出国内外木结构设计规范给出的木材销槽承压强度的理论计算公式:

1) 我国《木结构设计手册》^[5]中给出木材销槽承压强度设计值公式,主要由木材的顺纹抗压强度设计值决定,如下式所示:

木材的顺纹销槽承压强度设计值: $f_{e,0} = f_{c,0}$

木材的横纹销槽承压强度设计值: $f_{e,90} = k_{90} f_{c,0}$

式中: $f_{c,0}$ ——木材顺纹抗压强度设计值 (N/mm^2);

k_{90} ——木材横纹销槽承压强度降低系数 (见表 1);

表 1 木材横纹销槽承压强度降低系数
Table.1 Decreasing coefficient of embedding strength perpendicular to the grain of wood

螺栓的直径/mm Diameter of Bolt/mm	8	10	12	14	16	18	20	22	24
	0.85	0.75	0.68	0.65	0.60	0.56	0.54	0.51	0.50

2) 我国《胶合木结构技术规范》GB/T 50708-2012^[6] 规定了木材销槽承压强度的理论计算公式, 如下式所示:
木材的顺纹销槽承压强度: $f_{e,0} = 77G$

木材的横纹销槽承压强度: $f_{e,90} = \frac{212G^{1.45}}{\sqrt{d}}$

式中: G ——主构件材料的平均全干相对密度;

d ——销轴类紧固件直径 (mm);

3) 美国木结构设计规范 NDS^[1] 规定木材销槽承压强度的理论计算公式如下式所示:

木材的顺纹销槽承压强度: $f_{e,0} = 77.2G$

木材的横纹销槽承压强度: $f_{e,90} = \frac{212G^{1.45}}{\sqrt{d}}$

式中: G ——主构件材料的平均全干相对密度;

d ——销轴类紧固件直径 (mm);

4) 加拿大木结构设计手册^[7] 规定木材销槽承压强度的理论计算公式如下式所示:

木材的顺纹销槽承压强度: $f_{e,0} = 50G(1-0.01d)$

木材的横纹销槽承压强度: $f_{e,90} = 22G(1-0.01d)$

式中: G ——主构件材料的平均全干相对密度;

d ——销轴类紧固件直径 (mm);

5) 欧洲木结构设计规范^[8] 对木材销槽承压强度的理论计算公式考虑比较全面, 主要由木材的密度、荷载作用方向与木材纹理的夹角、荷载持续时间、紧固件顺纹方向之间的间距以及木构件的树种共同决定。对单个销轴类紧固件, 木材销槽承压强度的理论计算公式如下所示:

对于钢钉:

未钻孔, 木材的销槽承压强度为: $f_e = 0.082\rho_k d^{-0.3}$ (任意角度)

钻孔后, 木材的销槽承压强度为: $f_e = 0.082(1-0.01d)\rho_k$ (任意角度)

式中: ρ_k ——木材气干密度的 5% 分位值 (kg/m^3);

d ——钉子的直径 (mm);

对于螺栓:

木材顺纹的销槽承压强度为: $f_{e,0} = 0.082(1-0.01d)\rho_k$

当螺栓的荷载作用方向与木材纹理方向存在夹角 α 时, 木材的销槽承压强度为:

$$f_{e,\alpha} = \frac{f_{e,0}}{K_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

式中: ρ_k ——木材气干密度的 5% 分位值 (kg/m^3);

$f_{e,0}$ ——木材顺纹的销槽承压强度;

$$K_{90} = \begin{cases} 1.35 + 0.015d & \text{针叶材} \\ 0.90 + 0.015d & \text{阔叶材} \end{cases}$$

6) 日本木结构设计规范^[9] 给出的木材销槽承压强度的理论计算公式如下:

木材的顺纹销槽承压强度: $f_{e,0} = 0.082(1-0.01d)\rho$

木材的横纹销槽承压强度: $f_{e,90} = 0.5 f_{e,0}$

式中: ρ ——木材气干密度的 5% 分位值 (kg/m^3);

d ——紧固件的直径。

综上所述, 各国给出的木材销槽承压理论计算公式都与木材的密度有关, 只是具体形式不同; 除我国和美国, 其他国家木材顺纹销槽承压强度的理论计算公式还与紧固件的直径有关。总体上欧洲木结构设计规范对木

材销槽承压强度的规定比较全面,我国木结构设计规范对木材销槽承压强度的规定较少,应考虑到不同的树种和材料,应在此加以完善。

2.2 国内外木材销槽承压强度的理论公式计算结果以及试验结果比较

各国木结构设计规范给出的木材销槽承压强度理论计算公式都有一定差别。为了充分说明各个理论计算公式的不同,本文对具体的密度和紧固件直径对应的计算结果进行比较。此处紧固件采用螺栓,木材选用兴安落叶松,比较结果如表 2 所示。

表 2 木材销槽承压强度不同公式的计算结果/(MPa)
Table.2 Calculation results of different formula of embedding strength/(MPa)

全干密度 Oven-dry density/(g/cm ³)	0.40		0.50		0.60		0.70	
纹理方向 Direction of grain	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
螺栓直径 Diameter of Bolt/mm								
d=12mm								
1	15.0	10.2	15.0	10.2	15.0	10.2	15.0	10.2
2	30.8	16.2	38.5	22.4	46.2	29.2	53.9	36.5
3	30.9	16.2	38.6	22.4	46.3	29.2	54.0	36.5
4	17.6	7.7	22.0	9.7	26.4	11.6	30.8	13.6
5	25.9	17.0	32.1	21.0	38.2	24.9	44.1	28.8
6	25.9	13.0	32.1	16.1	38.2	19.1	44.1	22.0
d=14mm								
1	15.0	9.8	15.0	9.8	15.0	9.8	15.0	9.8
2	30.8	15.0	38.5	20.7	46.2	27.0	53.9	33.8
3	30.9	15.0	38.6	20.7	46.3	27.0	54.0	33.8
4	17.2	7.6	21.5	9.5	25.8	11.4	30.1	13.2
5	25.3	16.2	31.4	20.1	37.3	23.9	43.1	27.6
6	25.3	12.7	31.4	15.7	37.3	18.6	43.1	21.5
d=16mm								
1	15.0	9.0	15.0	9.0	15.0	9.0	15.0	9.0
2	30.8	14.0	38.5	19.4	46.2	25.3	53.9	31.6
3	30.9	14.0	38.6	19.4	46.3	25.3	54.0	31.6
4	16.8	7.4	21.0	9.2	25.2	11.1	29.4	12.9
5	24.8	15.6	30.6	19.3	36.4	22.9	42.1	26.5
6	24.8	12.4	30.6	15.3	36.4	18.2	42.1	21.0

注: 1) 表中 1、2、3、4、5、6 分别对应我国《木结构设计手册》、《胶合木结构技术规范》和美国、加拿大、欧洲、日本对木材销槽承压强度的理论公式; 1 对应的值为设计值;

2) 表中的数据是将全干密度转换成相应公式中规定形式后计算得到的;

3) 全干相对密度 $G = \text{全干密度} / 4\text{℃时水的密度}$; 5% 分位值 = 平均值 $\times (1 - 1.65 \times 10\%)$;

4) 气干密度与全干密度的转换公式: $\rho_w = (100 + \omega) / (100 + 0.85 \rho_g \omega)$, 为木材的含水率, 此处取 $\omega = 12$;

5) 表中 0° 和 90° 分别代表木材的顺纹方向和横纹方向。

从表 2 中可以得出: 我国《木结构设计手册》中木材顺纹销槽承压强度的设计值相对较小, 且不随着密度和螺栓直径的变化而变化, 与实际情况不符; 我国《胶合木结构技术规范》GB/T 50708-2012 和美国木结构设计规范对木材销槽承压强度的理论计算结果高于欧洲, 这主要是因为由欧洲木结构设计规范中木材销槽承压强度理论公式计算得到的强度值为木材销槽承压强度的 5% 分位值, 美国的计算结果则为木材销槽承压强度的平均值。欧洲和日本的木结构设计规范对木材

表 3 兴安落叶松规格材与胶合木的销槽承压强度试验结果
Table.3 Experimental results of embedding strength of larch dimension lumbars and glued-laminated timber

材料 Materials	螺栓直径/mm Diameter of Bolt/mm	平均气干密度/(g/cm ³) Average of Air-dry density/(g/cm ³)	含水率/(%) Moisture content/(%)	销槽承压强度/(MPa) Embedding strength/(MPa)
规格材 Dimension lumber	12	0.589 (11.43%)	10.4	39.9 (15.00%) (顺纹)

胶合木 Glued-laminated timber	10	0.608 (11.03%)	10.2	27.4 (25.07%) (横纹)
		0.590 (8.46%)	10.1	44.6 (14.23%) (顺纹)
	12	0.604 (9.97%)	10.4	24.9 (19.38%) (横纹)
		0.613 (10.08%)	10.3	44.2 (11.86%) (顺纹)
	18	0.599 (8.87%)	11.2	21.8 (17.92%) (横纹)
		0.614 (12.29%)	10.4	42.3 (11.76%) (顺纹)

注：表中括号内的数值是对应数值的变异系数。

销槽承压强度的理论计算结果较接近，且整体上与美国木结构设计规范理论计算结果的差距随着密度的增大而增大。

文献 [10] 参照 ASTM D5764-97a 对兴安落叶松规格材和胶合木的销槽承压强度进行测定，试验结果如表 3 所示。将试验结果与美国木结构设计规范 NDS 的理论公式计算结果进行比较，如表 4 所示。

表 4 兴安落叶松的销槽承压强度试验结果与 NDS 中理论公式计算结果比较
Table 4 Comparison between experimental results and NDS results of embedding strength of larch

	规格材 Dimension lumber	胶合木 Glued-laminated timber					
	12	10		12		18	
螺栓直径 Diameter of Bolt/mm	12	10	90°	0°	90°	0°	90°
纹理方向 Direction of grain	0°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
试验结果 /(MPa) experimental results/(MPa)	39.9	44.6	27.4	44.2	24.9	42.3	21.8
NDS 结果 /(MPa) NDS results/(MPa)	43.0	43.7	30.2	45.1	27.5	44.8	22.3
误差 Error/%	7.73	-2.02	10.38	2.09	10.34	5.94	2.70

注：1) 差异 $=[(\text{NDS 计算结果} - \text{试验结果}) / \text{试验结果}] \times 100\%$

由表 4 可以得出：NDS 给出的理论公式的结果与参照美国 ASTM D 5764-97a 中半孔销槽承压强度 5% 偏移测定法的试验结果比较吻合，兴安落叶松销槽承压强度顺纹时的试验与理论公式差异范围在 -2.02% 至 7.73% 之间，横纹时的差异范围在 2.70% 至 10.38% 之间。

3 建议与结论

1) 我国新颁布的《胶合木结构技术规范》GB/T 50708-2012 中给出了销轴类紧固件销槽承压强度的理论计算公式，未给出不同的紧固件在针叶材、阔叶材和胶合板等材料时销槽承压强度的计算公式，应再加以细化和补充。

2) 木材销槽承压强度的半孔测试方法能够准确测得木材的销槽承压强度，但与实际受力情况不符；全孔测试方法能够准确反映实际受力情况时木材的销槽承压强度，但影响因素较多。5% 偏移法能够考虑到螺栓等紧固件直径对木材销槽承压强度的影响，作为判定销槽承压强度试验中销槽承压荷载的判定方法较为合理。

3) 我国《木结构设计手册》中木材顺纹销槽承压强度的规定设计值相对较小，且不随着密度和螺栓直径的变化而变化，与实际情况不符。NDS 给出的木材销槽承压强度理论公式的结果与参照美国 ASTM D 5764-97a 中半孔销槽承压强度 5% 偏移测定方法的试验结果吻合，兴安落叶松销槽承压强度顺纹时的差异范围在 -2.02% 至 7.73% 之间，横纹时的误差范围在 2.70% 至 10.38% 之间。

参考文献

- [1] American Forest & Paper Association. ANSI/AF&PA NDS-1997. National Design Specification for Wood Construction[S]. AF&PA: Washington, D.C. 1997.
- [2] ASTM International. ASTM D 5764-97a. Standard test method for evaluation dowel-bearing strength of wood and wood-based products[S].
- [3] British Standards Institution. BS EN 383:2007. Timber Structures — Test methods — Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners [S]. BSI, London, 2004.
- [4] Sawata K., Yasumura M. Determination of embedding strength of wood for dowel-type fasteners[J]. Journal of Wood Science, 2002, 48(2): 138-146.
- [5] 《木结构设计手册》编委会. 木结构设计手册(第三版)[M]. 北京: 中国建筑出版社, 2005.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 50708-2012. 胶合木结构技术规范 [S]. 2003.
- [7] Canadian Standard Association(CSA). Engineering Design in Wood[S]. Mississauga, Ontario, Canada, 2009.
- [8] British Standards Institution. BS EN 1995-1-1. Eurocode 5: Design of timber structures—Part 1-1: General—Common rules and rules for buildings[S]. BSI, London, 2004.
- [9] 日本建筑学会. 木质构造设计标准 [S]. 2007.
- [10] 刘柯珍. 落叶松胶合木梁柱连接节点设计与承载性能评价 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.