

结构用重组竹抗弯力学性能

肖纲要¹, 李霞镇¹, 钟永²

(1. 湖南省产商品质量监督检验研究院, 长沙 410007; 2. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 通过对 180 个重组竹抗弯试件的测试, 研究了重组竹的抗弯强度、抗弯弹性模量、荷载-位移曲线、破坏现象和概率分布, 并将重组竹抗弯性能与 3 种典型竹、木结构材进行对比。结果表明, 重组竹的抗弯试件经历了弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段等 3 个阶段; 重组竹的抗弯强度和抗弯弹性模量的概率分布均服从正态分布; 参照中国木材强度设计值计算方法, 确定了重组竹抗弯强度和抗弯弹性模量的设计值指标, 其设计值指标均显著大于其他 3 种材料。

关键词: 重组竹; 抗弯强度; 抗弯弹性模量; 概率分布; 设计值

中图分类号: S781.9; TU366.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)01-0060-05

Bending properties of the structural recombinant bamboo

XIAO Gangyao¹, LI Xiaozhen¹, ZHONG Yong²

(1. Hunan Testing Institute of Product and Commodity Supervision, Changsha 410007;

2. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091)

Abstract: A total of 180 bending specimens were tested to obtain the modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), loading-displacement curves, failure modes and probability distribution of the recombinant bamboo. Those parameters were further compared with other wood or bamboo-based materials. The results showed that the bending test of the recombinant bamboo went through three stages: the elastic stage, the plastic stage and the failure stage. Moreover, the χ^2 test results indicated that the normal modes could provide good fit for probability distribution of MOR and MOE of the recombinant bamboo. Referring to the calculation method of strength design values of timber, the design values of MOR and MOE of the recombinant bamboo were determined, which were significantly greater than those of other woods or bamboo-based materials.

Key words: bamboo scrimber; modulus of rupture (MOR); modulus of elasticity (MOE), probability distribution; design values

我国竹资源拥有量和品质均居世界首位, 且竹子为短期的可再生资源, 生长 3~4 年即可成材, 在绿色建材领域具有巨大的应用前景^[1]。为了推进竹质工程材料在建筑结构中的应用, 我国科研人员开展了大量的研究, 研究对象涉及胶合竹^[2-3]、竹积层材^[4]和重组竹^[5-6]等。尤其是重组竹, 其作为一种新型复合竹质工程材料, 以竹束单元为原材料, 并经顺纹组坯、热压(或冷压)胶合而成, 制造的产品具有优良的力学性能^[7-8]。为了推进重组竹在建筑结构中的使用, 魏洋等^[9-11]还采用纤维增强和组合梁技术来提高重组竹梁的极限承载力。

因此, 本研究对 180 个重组竹抗弯试件进行了测试, 研究了重组竹的抗弯强度、抗弯弹性模量、荷载-位移曲线、破坏现象和概率分布, 给出了重组竹抗弯强度和抗弯弹性模量的设计值指标, 并与其他 3 种典型竹、木结构材进行对比, 以期重组竹在建筑结构中的合理利用提供有效的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料采购自四川竹元科技有限公司, 它是以慈竹 (*Neosino calamus affinis*) 为原材料, 经过

收稿日期: 2016-06-13

基金项目: 中央级科研院所基金(CAFINT2014C01) 和“十二五”科技支撑课题(2012BAD23B01)共同资助。

作者简介: 肖纲要, 高级工程师。E-mail: Xiaogy_111@163.com

锯解、碾压、干燥、浸胶和热压等工艺加工而成^[5]。原竹厂自四川洪雅, 为丛生竹 (*Sympodial bamboo*) 的一种。重组竹用胶为酚醛胶 (型号: PF16L510), 由北京太尔化工有限公司提供。材料的规格尺寸为 20 mm (厚度) × 1 250 mm (宽度) × 2 500 mm (长度), 其在气干状态下的含水率约为 1.9%, 密度约为 1.1 g·cm⁻³。

由于我国目前尚未建立有关重组竹材力学性能的相关标准, 本研究中参照 GB 1927-2009—1943-2009《木材物理力学性能试验方法》^[12]加工重组竹抗弯试件。试件重复数为 180 个, 尺寸均为 20 mm (高度) × 20 mm (宽度) × 300 mm (长度), 长度方向为顺纹方向 (图 1)。重组竹的抗弯弹性模量和抗弯强度试验均采用同一试件, 待测定抗弯弹性模量后, 再进行抗弯强度试验。

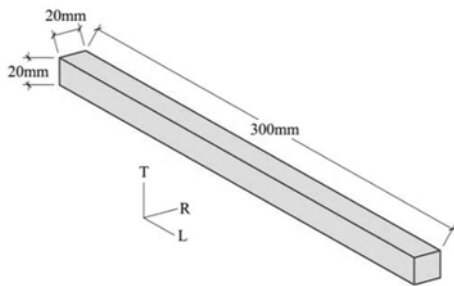


图 1 抗弯试件尺寸

Figure 1 Specimen dimensions of bending tests

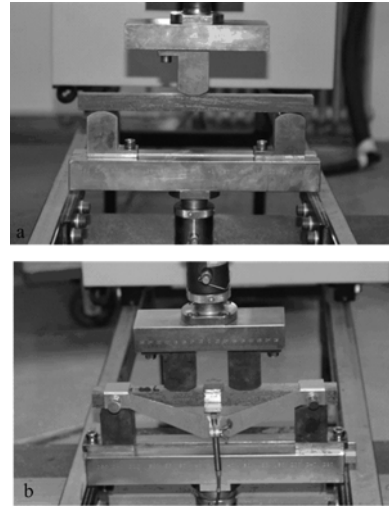
1.2 试验方法

参照木材物理力学测试方法^[12], 重组竹的抗弯强度和抗弯弹性模量试验分别参照 GB/T 1936.1《木材抗弯强度试验方法》^[13]和 GB/T 1936.2《木材抗弯弹性模量测定方法》^[14]中的相关规定和要求进行。试验加载设备为 10 t 的 Instron5582 万能力学试验机。抗弯试件两支座的支撑跨距均为 240 mm, 支座圆弧曲率半径为 30 mm。其中抗弯强度采用中心点单点加载方法 (图 2-A), 而抗弯弹性模量则采用 3 等分 2 点加载方法 (图 2-B)。

重组竹抗弯弹性模量试验如图 2-B 所示。先利用游标卡尺测试重组竹抗弯试件中央的截面宽度和高度, 精确至 0.1 mm, 对试件进行编号。将试件放置于支座上, 并将引伸计固定于截面中性轴位置, 用于测量试件中央的变形。以 1.0 mm·min⁻¹ 匀速加载至 700 N, 记录下限载荷 300 N 和上限载荷 700 N 所对应的各自变形值, 再卸载至 200 N 左右进行重新加载, 反复 3 次。

待重组竹抗弯弹性模量试验结束后, 进行重组竹抗弯强度试验, 如图 2-A 所示。先输入前面抗弯

弹性模量已测得的尺寸数据, 将试件放置于支座上, 沿厚度方向以 2.0 mm·min⁻¹ 进行加载, 直至试件出现明显破坏或载荷出现明显下降后停止加载, 并记录下最大载荷。



A. 抗弯强度 Modulus of rupture (MOR); B. 抗弯弹性模量 Modulus of elasticity (MOE)

图 2 重组竹抗弯加载示意图

Figure 2 Bending test of bamboo scrimber

根据测试标准^[13-14], 重组竹抗弯强度和抗弯弹性模量的计算公式如下:

$$\sigma = 3P_{\max} l / (2bh^2) \quad (1)$$

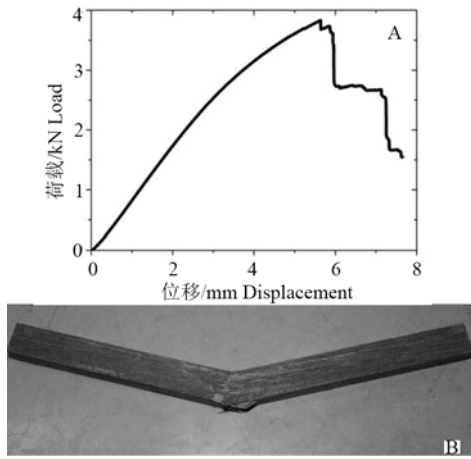
$$E = 23\Delta P l^3 / (10^3 \times 108bh^3 \Delta w) \quad (2)$$

式中: σ 为重组竹的抗弯强度, MPa; P_{\max} 为破坏载荷, N; l 为两支座间跨距, mm; b 为抗弯试件的宽度, mm; h 为抗弯试件的高度, mm; E 为重组竹的抗弯弹性模量, GPa; ΔP 为上限荷载 (700 N) 与下限荷载 (300 N) 之差, N; Δw 为上、下限荷载所对应的变形差值, mm。

2 结果与分析

2.1 重组竹抗弯强度试验破坏现象

重组竹抗弯试件的典型荷载-位移曲线和破坏模式见图 3。在加载初期, 重组竹试件处于弹性阶段, 其荷载-位移曲线表现为线性, 载荷随位移呈线性递增; 随着载荷的进一步增加, 在重组竹试件受压侧的纤维首先出现褶皱受压破坏, 进入塑性发展阶段, 其荷载-位移曲线表现为非线性递增; 在加载后期, 重组竹试件受拉侧的纤维持续被拉断, 载荷开始出现明显下降, 试件进入破坏阶段。其破坏模与张秀华等^[15] 研究结果一致。



A 荷载-位移曲线 Loading-displacement curve; B. 破坏模式 Failure mode

图 3 抗弯强度测试的典型荷载-位移曲线及破坏模式

Figure 3 Typical load-displacement curves and failure modes for bending strength tests

2.2 重组竹力学性能试验结果

通过重组竹的抗弯测试, 得出了重组竹的抗弯强度和抗弯弹性模量指标(表 1)。重组竹的抗弯强度和抗弯弹性模量的平均值分别为 188.2 MPa 和 28.3 GPa, 变异系数分别为 10.9% 和 13.0%。与其他 3 种典型的结构用木、竹材^[2, 16]进行对比, 重组竹抗弯强度的平均值分别为胶合竹、杉木和落叶松的 1.90、2.55 和 1.66 倍, 而抗弯弹性模量则为 3.01、3.01 和 1.95 倍。结果表明重组竹的抗弯强度和抗弯弹性模量平均值均远高于其他材料, 而变异系数也相对较小, 表现出优良的力学性能。

2.3 重组竹抗弯性能的概率分布

确定重组竹力学性能的设计值指标是保证其在

建筑结构中安全应用的关键之一。在推导重组竹力学性能设计值的过程中, 首先要确定该力学性能的概率分布, 并进行合理检验^[17]。在此, 先假定重组竹抗弯强度和抗弯弹性模量的概率分布均服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 并采用 Pearson χ^2 方法来进行检验和判定其概率分布是否满足正态分布的要求。

图 4 为重组竹抗弯强度和抗弯弹性模量分布的直方统计图。根据其概率分布被假定为正态分布, 则其累计概率分布的计算如下:

$$F_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (3)$$

式中: x 为抗弯强度或抗弯弹性模量这一随机变量; μ 和 σ 为两个未知参数, 将在下面采用极大释然法进行估计。

由于重组竹抗弯强度和抗弯弹性模量的计算类似, 以重组竹抗弯强度为例进行计算。抗弯强度的组间距设置为 10 MPa, 则落在每个子区间的实测个数见表 2。为了检验抗弯强度的概率分布是否服从正态分布, 需要先比较每个子区间的实测个数与理论预测个数的差别。根据表 2 得到式 (3) 中 μ 和 σ 的极大释然估计分别为:

$$\hat{\mu} \approx \frac{1}{180} \sum_{i=1}^{11} n_i \bar{x}_i = 188.3 \text{ MPa} \quad (4)$$

$$\hat{\sigma} \approx \sqrt{\frac{1}{180} \sum_{i=1}^{11} n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2} = 20.3 \text{ MPa} \quad (5)$$

则重组竹抗弯强度的理论累计概率分布可表示为:

$$F_0(x) = \frac{1}{20.3\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-188.3)^2}{2 \times 20.3^2}} dt \quad (6)$$

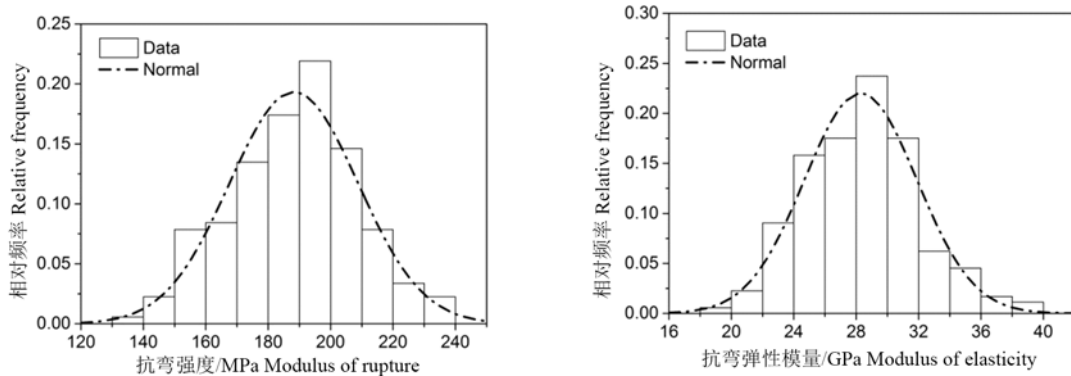


图 4 抗弯性能分布的直方图

Figure 4 Histograms of bending properties distribution

为了方便计算, 将其标准正态化, 令 $u=(x-188.3)/20.3$, 则 $F_0(x)=\Phi(u)$, 这里 $\Phi(u)$ 为标准正态分布 $N(0, 1)$ 的分布函数。根据标准正态分布函数,

可得在假设条件成立的情况下, 随机变量落入第 i 个子区间 (a_{i-1}, a_i) 中的理论概率 $\hat{p}_i = F_0(a_i) - F_0(a_{i-1})$ 和理论个数 $n\hat{p}_i$ 。

表 1 重组竹的抗弯强度和弹性模量的统计参数

Table 1 Statistical parameters of MOR and MOE of bamboo scrimber

产品类型 Product type	抗弯强度 Modulus of rupture		抗弯弹性模量 Modulus of elasticity	
	Avg/MPa	COV/%	Avg/MPa	COV/%
重组竹 Bamboo scrimber	188.2	10.9	28.3	13.0
胶合竹 ^[2] Gulum bamboo	99.0	10.0	9.4	10.0
杉木 ^[16] Chinese fir	73.7	14.5	9.4	12.1
落叶松 ^[16] Larch	113.3	16.5	14.5	19.5

注: Avg、COV 分别为平均值和变异系数。Note: “Avg” and “COV” refer to the mean value and coefficient of variation, respectively.

表 2 重组竹抗弯强度的概率计算

Table 2 Calculation of probability of modulus of rupture

x 组限 Interval of x	\bar{x}_i Central of interval	实际个数 n_i Observed number	u 组限 Interval of u	理论概率 \hat{p}_i Predicted probability	理论个数 $n\hat{p}_i$ Predicted number
[130, 140]	135	1	[-2.869, -2.377]	0.007	1.199
[140, 150]	145	4	[-2.377, -1.886]	0.021	3.773
[150, 160]	155	14	[-1.886, -1.394]	0.052	9.366
[160, 170]	165	15	[-1.394, -0.902]	0.102	18.338
[170, 180]	175	24	[-0.902, -0.410]	0.157	28.323
[180, 190]	185	33	[-0.410, 0.082]	0.192	34.511
[190, 200]	195	39	[0.082, 0.574]	0.184	33.173
[200, 210]	205	26	[0.574, 1.066]	0.140	25.157
[210, 220]	215	14	[1.066, 1.558]	0.084	15.050
[220, 230]	225	6	[1.558, 2.049]	0.039	7.102
[230, 240]	235	4	[2.049, 2.541]	0.015	2.644
Sum			$\Sigma n_i=180, \Sigma n\hat{p}_i=178.636$		

根据表 2 中获得的重组竹抗弯强度的实测个数与理论个数, 采用 Pearson χ^2 方法进行检验, 来判断重组竹抗弯强度的概率分布是否符合正态分布假设, 检验水平设置为 0.05。Pearson χ^2 方法的计算公式如下:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{11} \frac{(n_i - n\hat{p}_i)^2}{n\hat{p}_i} \quad (7)$$

由于重组竹抗弯强度和弹性模量的子区间个数均设置为 11, 则其自由度数为 8。因此, 在 0.05 水平下 χ^2 方法对应的检验临界值为 15.51。通过式 (7) 计算得到重组竹抗弯强度和弹性模量的 χ^2 值分别为 5.67 和 7.40, 均小于检验临界值, 则可判定重组竹抗弯强度和弹性模量的分布均符合正态分布, 与先前假设一致。文献[8]中的研究表明重组竹的顺纹抗压强度也服从正态分布。

2.4 重组竹抗弯强度的计算设计

目前, 我国大多数建筑结构设计规范^[17]采用概率极限状态设计法来确定材料的强度设计值指标和抗力分项系数, 以满足我国可靠度指标的规范要求^[18]。由于我国尚未建立关于重组竹材料强度的计算设计方法或标准, 考虑到重组竹力学性能与木材

相似, 以下将参考《木结构设计手册》^[16]来进行计算设计。

2.4.1 重组竹抗弯强度的标准值 根据前面 Pearson χ^2 检验分析得到重组竹的抗弯强度服从正态分布, 参照《木结构设计手册》^[16]取正态概率分布的 0.05 分位值作为重组竹抗弯强度的标准值 f_k , 其计算公式如下:

$$f_k = \mu_f(1 - 1.645\delta_f) \quad (8)$$

式中: μ_f 为测试获得的重组竹抗弯强度平均值; δ_f 为测试获得的重组竹抗弯强度的变异系数。

将上述试验获得的数据(表 1)采用式 (8) 计算, 得到重组竹抗弯强度的标准值为 154.5 MPa。

2.4.2 重组竹抗弯强度的设计值 由上述得到的重组竹抗弯强度标准值仍需要经过合理折减后, 才能作为设计值指标应用于建筑结构设计中。参照木结构设计方法^[16], 重组竹抗弯强度设计值 f_d 的计算如下:

$$f_d = K_P K_A K_Q f_k / \gamma_R \quad (9)$$

式中: K_P 为方程精确性影响系数; K_A 为尺寸误差影响系数; K_Q 为材料强度折减系数; γ_R 为抗力分项系数, 取 1.60。其中强度折减系数 K_Q 的计算如

下^[15-16];

$$K_Q = K_{Q1}K_{Q2}K_{Q3}K_{Q4} \quad (10)$$

式中: K_{Q1} 为天然缺陷影响系数; K_{Q2} 为干燥缺陷影响系数; K_{Q3} 为长期受荷强度折减系数; K_{Q4} 为尺寸影响系数。

与天然木材不同, 重组竹是经过严格的生产质量控制环节而制成的一种重组新型复合材料, 其抗弯强度的变异系数小于天然木材(表1)。因此, 在参照木材设计方法确定重组竹抗弯强度设计值时, 需要综合考虑各种因素的影响来修正重组竹的抗弯强度值, 为重组竹抗弯强度设计值提供理论依据。

按照木材强度设计值的确定方法, 对重组竹抗弯强度设计值的部分影响系数进行了调整, 包括天然缺陷影响系数 K_{Q1} 和干燥缺陷影响系数 K_{Q2} , 分别选择 1.2 和 1.1 作为对应的调整系数。对于其他系数由于受材料影响较小^[2,15], 故不作调整。表 3 为重组竹抗弯强度的折减系数。

表 3 重组竹抗弯强度的折减系数

Table 3 Reduction coefficient of bending strength of bamboo scrimber

K_P	K_A	K_{Q1}	K_{Q2}	K_{Q3}	K_{Q4}
1.0	0.94	0.62	0.88	0.67	0.89

表 4 重组竹抗弯性能的设计值

Table 4 Design values of bending properties of bamboo scrimber

产品类型 Product type	抗弯强度 / MPa MOR	抗弯弹性 模量/ GPa MOE
重组竹 Bamboo scrimber	29.5	28.3
胶合竹 ^[2] Gulum bamboo	14.6	9.4
杉木 ^[16] Chinese fir	10.9	9.4
落叶松 ^[16] Larch	16.7	14.5

根据重组竹抗弯强度的试验结果及调整后的强度折减系数, 得到重组竹抗弯强度的设计值并与 3 种典型的结构用木、竹材进行对比, 结果如表 4 所示。另外, 重组竹抗弯弹性模量的设计值直接取其平均值。从表 4 中可知, 与胶合竹、杉木和落叶松等 3 种典型材料的抗弯性能设计值相比, 重组竹的抗弯强度和抗弯弹性模量设计值均远高于这 3 种材料, 故重组竹具有的优良力学性能使其在绿色建材中具有广阔的应用前景。

3 结论

重组竹抗弯试件的破坏分为弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段等 3 个阶段, 其破坏形式表现为受压

侧纤维先出现褶皱压缩破坏, 当受拉侧纤维拉断时达到最大载荷。

试验测得重组竹的抗弯强度和抗弯弹性模量平均值分别为 188.2 MPa 和 28.3 GPa, 变异系数范围为 10%~13%。

重组竹的抗弯强度和抗弯弹性模量的概率分布均服从正态分布。

基于重组竹的概率分布及强度折减系数, 给出了重组竹抗弯强度和抗弯弹性模量的设计参考值, 均远大于其他几种典型的竹、木结构材料, 其作为一种竹质复合材料, 拥有良好的力学性能, 在绿色建材领域中具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] JIANG Z H. Bamboo and rattan in the world [M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 2008.
- [2] 肖岩, 杨瑞珍, 单波, 等. 结构用胶合竹力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(11): 150-157.
- [3] 陈国宁. 胶合竹层板的制备及力学性能研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
- [4] 邱亚新, 王戈, 陈复明, 等. 竹束单板层积材物理力学性能均匀性研究[J]. 林产工业, 2013, 40(2): 47-49.
- [5] 于文吉. 我国重组竹产业发展现状与趋势分析[J]. 木材工业, 2012, 26(1): 11-14.
- [6] 李霞镇, 徐明, 蔡芸, 等. 电测法测试结构用重组竹弹性常数的研究[J]. 安徽农业大学学报, 2015, 42(5): 756-760.
- [7] YU Y L, HUANG X N, YU W J. A novel process to improve yield and mechanical performance of bamboo fiber reinforced composite via mechanical treatments [J]. Compos Part B-Eng, 2014, 56: 48-53.
- [8] ZHONG Y, JIANG Z H, SHANGGUAN W W, et al. Design value of the compressive strength for bamboo fiber-reinforced composite based on a reliability analysis [J]. Bio Resources, 2014, 9(4): 7737-7748.
- [9] 魏洋, 骆雪妮, 周梦倩. 纤维增强竹梁抗弯力学性能研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(2): 11-15.
- [10] 魏洋, 王晓伟, 李国芬, 等. 配筋重组竹受弯试件力学性能试验[J]. 复合材料学报, 2014, 31(4): 1030-1036.
- [11] 魏洋, 吴刚, 李国芬, 等. 新型 FRP-竹-混凝土组合梁的力学行为[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(12): 4384-4392.
- [12] 国家林业局. 木材物理力学性能试验方法总则: GB/T 1928-2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [13] 国家林业局. 木材抗弯强度试验方法: GB/T 1936.1-2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [14] 国家林业局. 木材抗弯弹性模量测定方法: GB/T 1936.2-2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [15] 张秀华, 鄂婧, 李玉顺, 等. 重组竹抗压和抗弯力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(1): 7-12.
- [16] 《木结构设计手册》编辑委员会. 木结构设计手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [17] 潘景龙, 祝恩淳. 木结构设计原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [18] 中华人民共和国建设部. 建筑结构可靠度设计统一标准: GB50068-2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.