

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.139



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 毛竹杆纯弯构件受力性能试验研究

何子奇<sup>a,b</sup>, 刘昌平<sup>a</sup>, 周绪红<sup>a,b</sup>, 肖洒<sup>a</sup>, 钟紫勤<sup>a</sup>

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:**为研究毛竹杆的受弯性能,先对取自 10 根毛竹的 40 组竹条标准材性件进行抗弯试验,得到其破坏模式和抗弯强度;再对直径为 90、120 mm,跨距为 3 000、3 600 mm 的 24 根毛竹杆进行弯曲试验,研究其荷载-位移曲线、初始抗弯刚度、极限承载力、挠度、破坏模式等相关力学性能;理论推导毛竹梁跨距变化对挠度的影响大于直径变化对挠度的影响,毛竹梁直径越大、跨距越小,初始抗弯刚度越大;根据试验数据,按弹性理论计算出毛竹杆受弯破坏时的受压区高度在  $3R/2$  处,在小挠度条件下,毛竹梁受弯符合平截面假定,大挠度条件下,截面受压区高度上移,计算出的破坏边缘拉应力与平截面假定计算的结果不一致,建议毛竹梁受弯破坏弯矩按上边缘顺纹抗压强度达到最大进行计算。

**关键词:**毛竹;受弯性能;极限承载力;破坏模式;抗弯刚度

**中图分类号:**TU366.1; TU317 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2023)04-0133-13

## Experimental study of flexural performance of raw bamboo

HE Ziqi<sup>a,b</sup>, LIU Changping<sup>a</sup>, ZHOU Xuhong<sup>a,b</sup>, XIAO Sa<sup>a</sup>, ZHONG Ziqin<sup>a</sup>

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** In order to study the flexural performance of bamboo member, 40 groups of bamboo standard wood strips from 10 raw bamboos were tested to obtain their failure modes and flexural strength. Then, the 24 raw bamboo beams with diameters of 90 mm and 120 mm making the spans of 3 000 mm and 3 600 mm were subjected to bending collapse tests. And the load-displacement curves, initial bending stiffness, ultimate bearing capacity, deflection and failure modes were analyzed. The height of compressive zone and edge stress of tensile zone of the raw bamboo beams were deduced theoretically. The results show that the influence of span change on deflection of bamboo beam is greater than that of diameter at breast height. The larger diameter at breast height and the smaller span, the greater the initial bending stiffness of the bamboo beams. According to the test data and the classical elastic theory, it is calculated that the compressive zone height of the bamboo beam is

**收稿日期:**2021-04-21

**基金项目:**国家重点研发计划(2017YFC0703504)

**作者简介:**何子奇(1980-)男,博士,副教授,主要从事钢结构、新型原竹结构基本理论和应用研究, E-mail: heziqi@cqu.edu.cn。

周绪红(通信作者),男,博士,教授, E-mail: zhouxuhong@126.com。

**Received:** 2021-04-21

**Foundation item:** National Key R & D Program (No. 2017YFC0703504)

**Author brief:** HE Ziqi (1980-), PhD, associate professor, main research interest: basic theory and application of steel structure and new-type raw bamboo structure, E-mail: heziqi@cqu.edu.cn.

ZHOU Xuhong (corresponding author), PhD, professor, E-mail: zhouxuhong@126.com.

about  $3R/2$  height of the cross-section. Under the condition of small deflection, the bending of *Phyllostachys pubescentis* beam conforms to the assumption of flat section, while under the condition of large deflection, the height of compression zone of section moves up, and the calculated tensile stress of failure edge is inconsistent with the calculated result of the assumption of flat section. It is suggested that the bending moment of *Phyllostachys pubescentis* beam should be calculated according to the maximum compressive strength of the upper edge along the grain.

**Keywords:** moso bamboo; flexural performance; ultimate bearing capacity; failure mode; flexural rigidity

随着“低碳环保建筑”概念的提出,竹结构建筑越来越受到建筑师的关注。竹材生长期短、成材快,吸碳性能显著,是一种理想的建筑原材料。毛竹是中国竹类植物中分布最广、用途最多的优良品种,又称楠竹。毛竹具有可再生、易降解、轻质、保温隔热等优点;同时,毛竹力学性能优良,其强度、硬度约为一般木材(中软阔叶材和针叶材)的2倍左右,密度低于钢材,顺纹抗压强度相当于钢材的 $1/5\sim 1/4$ ,顺纹抗拉强度约为钢材的 $1/2$ (Q235)<sup>[1]</sup>,且毛竹用于建筑结构形式灵活多变,建筑造型优美,能够满足建筑师们对美学的追求。近年来对工程竹研究较多,比如重组竹和胶合竹等。肖岩等<sup>[2]</sup>研究了胶合竹受拉、受压、受弯及受剪等基本力学性能;Kumar等<sup>[3]</sup>研究了胶合竹密度对力学性能和材料吸水率的影响;Lv等<sup>[4]</sup>通过试验研究了普通胶合竹梁和用玄武岩纤维增强聚合物施加预应力的胶合竹梁的抗弯力学性能;周军文等<sup>[5]</sup>研究了重组竹梁的受弯承载力和破坏形态;周爱萍等<sup>[6]</sup>研究了碳纤维增强重组竹的受弯破坏模式与破坏机理,并导出了CFRP增强重组竹梁的极限承载力计算公式;Sá Ribeiro等<sup>[7]</sup>研究了结构竹的抗弯强度并进行了无损评价;Wei等<sup>[8]</sup>研究了重组竹梁的弯曲性能,通过弯曲试验确定了重组竹梁的失效模式、载荷-位移关系、承载力和抗弯刚度等;魏洋等<sup>[9]</sup>对足尺重组竹受弯构件进行了试验研究和理论分析。张苏俊等<sup>[10]</sup>通过抗弯性能试验分析了重组竹梁的抗弯性能和破坏形态,证明了重组竹梁的跨中挠度和纵向应变均与荷载呈线性关系,且与理论结果一致。赵志高等<sup>[11]</sup>研究了重组竹梁在碳纤维增强聚合物两种方法加固后的抗弯承载力特性和破坏模式。

天然原竹仍然受到建筑师和艺术家的青睐,原竹的结构性能也一直为设计人员所关注。肖岩等<sup>[12]</sup>介绍了现代竹结构体系的应用实例,分析总结了现代竹结构发展现状及其优缺点;Garcia-Aladin等<sup>[13]</sup>通过试验和有限元模拟确定了双根竹杆梁刚度,并根据双竹梁转动惯量评估了梁的挠度,得到

了按平行移轴理论计算出的有效惯性矩数值偏大、使计算挠度大大低于试验挠度的结论。何子奇等<sup>[14]</sup>研究了毛竹受压时的力学性能,并针对单根毛竹承载力不足提出了多肢抱合柱竹;于金光等<sup>[15]</sup>研究了含水率、竹节和取材单元对原竹抗压强度、环刚度及抗弯强度等力学性能的影响;张丹等<sup>[16]</sup>研究了毛竹力学性能的变异规律;Bahtiar等<sup>[17]</sup>对190根不同长度 *Guadua* 竹杆的屈曲性能进行了试验研究,得出了竹杆的几何和物理特性、抗压强度及承载能力,通过屈曲公式拟合试验数据,对比各屈曲公式的拟合优度,证明了Ylinen屈曲公式更适用于 *Guadua* 竹杆在整个长细比范围内的屈曲折减系数计算;陈肇元<sup>[18]</sup>分析了圆竹杆件作为受压杆件的优缺点,并通过试验数据拟合得到一种计算原竹压杆承载力的计算方法;Ghavami<sup>[19]</sup>对比分析了钢筋和竹筋在混凝土构件中的耐久性能,并通过竹条抗拔试验得到了竹筋与混凝土之间的粘接强度;Tian等<sup>[20]</sup>对多组单根原竹柱和多组单根原竹外涂复合砂浆的复合柱进行轴压试验,研究了两种竹柱的强度和稳定性。综上,对竹子的研究目前主要集中在工程竹的物理力学性能、原竹杆件物理力学性能及其作为加筋体的组合构件的受力性能,而对原竹杆受弯性能方面的研究较少,不利于原竹在建筑工程领域的广泛推广。

笔者主要探究毛竹的跨距、直径对毛竹梁初始刚度、极限承载力和挠度等抗弯性能的影响。选用24根两种不同跨距和直径的毛竹进行受弯试验,对比其受弯性能,并分析了直径为100、120 mm和跨距为3 000、3 600 mm四种不同毛竹梁受弯破坏时的受压区高度。

## 1 试验概况

### 1.1 竹条标准件抗弯强度试验

1.1.1 试件设计 竹条标准件取自同批砍伐风干后10根不同的毛竹,从每根毛竹的根部和梢部各取2组竹条标准件,总共40组试件。试件长度为220

mm,截面高度为15 mm,厚度取天然状态的壁厚;规定B代表毛竹,B1代表第1根毛竹,随后接数字,1、2表示试件取自毛竹梢部,3、4表示试件取自毛竹根部,如B1-1表示取自第1根毛竹梢部的第1组试件,B1-2表示取自第1根毛竹梢部的第2组试件,B1-3表示取自第1根毛竹根部的第1组试件。B1-4表示取自第1根毛竹根部的第2组试件,试件测试结果见表1。

1.1.2 试验方案 加载装置为300 kN液压夹具试验机,按《建筑用竹材物理力学性能试验方法》(JG/T 199—2007)<sup>[21]</sup>规定的两点对称加载方式进行加载,如图1所示,以每分钟150 N/mm<sup>2</sup>的速度加载至试件破坏。



图1 标准件抗弯性能加载

Fig. 1 Flexural performance loading of standard parts

### 1.2 毛竹杆受弯试验

1.2.1 试件设计 为研究毛竹直径、跨距对毛竹梁受弯性能的影响,试件材料选用竹龄大于4 a且无明显缺陷的毛竹24根,试件直径有90、120 mm两种规格,跨距选择3 000、3 600 mm;规定B代表毛竹,后面数字分别代表毛竹杆直径、跨距、编号,如B90-3600-1表示第1根毛竹杆直径为90 mm、跨距为3 600 mm;24根毛竹杆分别分为B90-3600系列、B90-3000系列、B120-3600系列、B120-3000系列4组,每组6根。根据设计的试件参数对毛竹进行加工并测量实际尺寸,试件实测尺寸见表1。试验加载装置示意如图2所示,分配梁间距离 $l=1\ 200$  mm,即为毛竹梁纯弯段长度。

1.2.2 测点布置 将拉线式位移计连接在毛竹杆跨中正下方,用于测量毛竹杆在试验过程中的挠度信息,具体布置方式如图3所示。

1.2.3 加载制度 采用自行组装的试验装置对试件进行加载,如图4所示,主要包括反力架、液压千斤顶、30 t力传感器及混凝土刚性支座,通过调节液压千斤顶的油压控制试验加载速率。试验初期,以

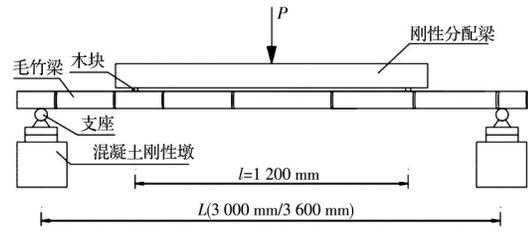


图2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test device

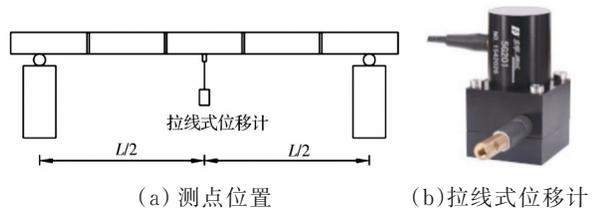


图3 测点布置

Fig. 3 Measuring point arrangement

0.5 kN为加载级差,每级荷载加载完成后持荷1 min,试验后期,挠度较大时以位移控制加载,以5 mm位移增量为加载级差,当试件破坏或荷载下降至极限荷载的80%时停止试验,并保存相关试验数据。



图4 毛竹杆受弯性能加载装置图

Fig. 4 Diagram of loading device for bending performance of Moso bamboo pole

## 2 竹条标准件受弯试验结果

### 2.1 试验现象及破坏模式

加载初期,竹条标准件发生弯曲变形,随着试验的进行试件开始破坏,根据观察到的试验现象将试件的破坏模式分为如图5所示的4种:竹条试件两加载点受拉侧竹纤维被拉断并相互交错,加载点受压侧顶部出现微小裂缝,如图5(a)所示;竹条跨中在受拉侧底部出现横向断裂,随着荷载的施加,裂缝逐渐往受压侧延伸,当裂缝延伸至横截面约1/2高度处时,横向断裂停止,之后断裂沿着纵向发生,如图5(b)所示;竹条某一个加载点处的底部受拉区域产生横向断裂,当断裂裂缝延伸至横截面约1/2



高度处时,竹条在横向裂缝的顶部沿着纵向发生断裂,如图 5(c)所示;竹条跨中受拉区域底部的竹纤维被拉断,之后加载点处正下方的受拉区底部产生横向断裂,当横向裂缝延伸至横截面约 1/3 高度处时,竹条开始沿着纵向发生断裂,如图 5(d)所示。对取自 10 根不同毛竹的竹条标准件主要受弯破坏模式进行了统计,见表 1。

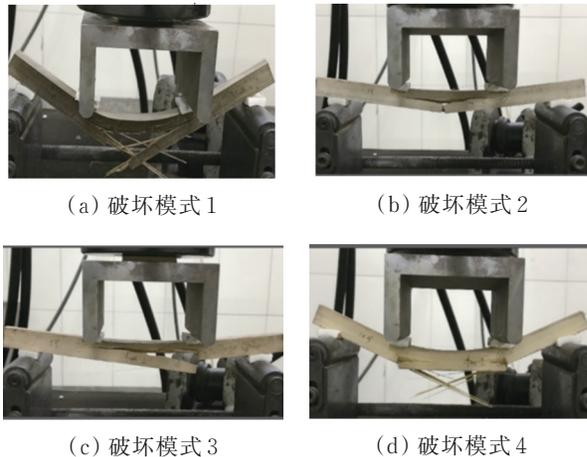


图 5 竹条标准件抗弯破坏模式

Fig. 5 Bending failure modes of bamboo standard parts

### 2.2 抗弯强度

通过计算试验所得弯曲破坏荷载可得试件抗弯强度  $f_{m,0}$ , 根据《建筑用竹材物理力学性能试验方法》(JG/T 199—2007)<sup>[21]</sup> 将各试件实际含水率抗弯强度转化为含水率为 12% 时的抗弯强度  $f_{c,12}$ , 以消除竹条间含水率差异对试件强度的影响。

抗弯强度计算结果见表 1, 根据表 1 中抗弯强度计算结果绘制散点图, 见图 6。对比取自不同毛竹的所有竹条试件, 抗弯强度离散性较大, 这主要是由于毛竹立地条件、竹龄等有差异以及营林措施所

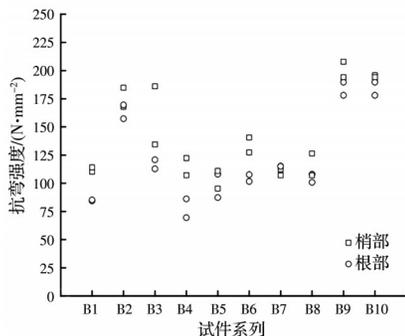


图 6 竹条标准件抗弯强度散点图

Fig. 6 Scatter diagram of bending strength of bamboo standard parts

致<sup>[22]</sup>;而对比取自同一根毛竹相同部位的两根竹条试件, 抗弯强度差异小, 对比取自同一根毛竹根部和梢部的两根竹条试件, 抗弯强度差异较大, 这主要是由于竹子根部和梢部的维管束体积比不同导致的, 同一根毛竹梢部维管束体积比大, 力学性能好, 根部维管束体积比小, 力学性能相对较差<sup>[23]</sup>。

## 3 毛竹杆受弯试验结果

### 3.1 试验现象及破坏模式

在加载初期, 试件的变形现象相似, 都是挠度随着荷载的增加而增大。当荷载大于极限荷载时, 试验进入卸载阶段, 此时试件将发生强度破坏, 根据试验现象, 试件的破坏模式为沿纵向劈裂、在试件中部爆裂、在支座处爆裂、在分配梁加载点处爆裂 4 种破坏模式。

1) 试验现象: 在加载初期, B90 系列的毛竹梁产生挠曲变形, 类似余弦曲线, 当荷载接近极限荷载时, 荷载上升幅度变缓, 梁挠度却持续增大, 如图 7(b) 所示; 当荷载大于极限荷载时, 毛竹杆将在分配梁的其中一个加载点处或梁跨中部产生爆裂。B120 与 B90 系列试件变形基本相同, 但达到极限荷载时对应的跨中挠度比 B90 系列小。



(a) 试验加载初期



(b) 试验加载后期

图 7 试件加载图

Fig. 7 Loading diagram of specimen

2)破坏模式:到达极限荷载后,试件 B90-3000-1 从加载点到中部贯通劈裂破坏,如图 8(a)所示;试件 B90-3000-2 从中部位置忽然爆裂且断口平整,如图 8(b)所示;试件 B90-3000-3 出现若干贯穿试件纵向裂缝,上部受压破裂的竹条向上拱出,产生比较明显的局部受压破坏,如图 8(c)所示;试件 B90-3000-5 也产生了类似试件 B90-3000-4 的破坏模式,加载点处局部爆裂导致纯弯段上下部都出现断口,如图 8(d)所示;加载至极限荷载时,试件 B90-3000-6 其中一加载点处产生爆裂,爆裂处断口不平整。B120 系列试件的破坏模式与 B90 系列基本相同,破坏模式如图 8 所示,各毛竹杆件受弯破坏模式统计见表 2。



(a) 破坏模式 1



(b) 破坏模式 2



(c) 破坏模式 3



(d) 破坏模式 4

图 8 试件破坏模式

Fig. 8 Failure modes of specimens

综上,大部分毛竹梁在卸载阶段都会产生爆裂现象,这是因为毛竹的顺纹抗压强度明显低于抗拉强度,而毛竹杆在受弯时,截面上翼缘处于受压状态,下翼缘处于受拉状态,因此,毛竹梁上部的压应

力易达到抗压强度而破坏,直接导致爆裂。

### 3.2 荷载-位移曲线

根据试验数据得到各试件的荷载-位移曲线,如图 9 所示。图 9(a)、(b)分别为跨距为 3 000、3 600 mm 时不同直径毛竹梁对应的荷载-位移曲线,从图中可以看出,在跨距相同的情况下,毛竹直径越大,其荷载-位移曲线越陡,毛竹梁的极限荷载也越大,最大挠度越小。图 9(c)、(d)分别为毛竹直径为 90、120 mm 时不同跨距毛竹梁对应的荷载-位移曲线,从图中可以看出,在直径相同的情况下,毛竹梁跨距越大,其荷载-位移曲线越平缓,毛竹的极限荷载也越小,最大挠度越大。出现上述现象的原因可根据简支梁受弯承载力-挠度公式进行解释,运用图乘法计算出竹梁跨中挠度,如图 10 所示。

跨中挠度

$$u = \frac{900(L-1200)(2L-1200) + (L-1200)^3}{48EI} P \quad (1)$$

令

$$K_f = \frac{48EI}{900(L-1200)(2L-1200) + (L-1200)^3} \quad (2)$$

则

$$P = K_f u \quad (3)$$

将竹梁截面近似看成圆环截面, $E$ 为竹梁的弹性模量,为常量; $I$ 为竹梁跨中截面惯性矩, $I = \frac{\pi D^4 - \pi(D-2t)^4}{64}$ ;  $L$ 为竹梁跨距; $D$ 为竹梁外径; $t$ 为竹梁厚度; $u$ 为竹梁跨中挠度; $P$ 为竹梁跨中承载力。

当跨距  $L$  相同时,毛竹直径越大,竹梁跨中截面惯性矩  $I$  越大,计算出的  $K_f$  值也随着  $I$  的增大而增大。由于  $P = K_f u$ ,相应地,荷载-位移曲线斜率越大,曲线就越陡;当直径  $D$  相同,竹梁跨中截面惯性矩  $I$  相同时,毛竹梁跨距越大,计算出的  $K_f$  值随着  $L$  的增大而减小。由于  $P = K_f u$ ,相应地,荷载-位移曲线斜率越小,曲线就越平缓。

### 3.3 初始抗弯刚度

毛竹梁初始刚度  $K$  取荷载-位移曲线上挠度为 5 mm 的点到挠度为  $L/200$  对应的点之间直线的斜率, $L$  为竹梁跨距,计算公式为

$$K = \frac{P_{L/200} - P_{\Delta=5}}{L/200 - 5} \quad (4)$$

式中: $P_{L/200}$ 为毛竹梁挠度为  $L/200$  所受的力; $P_{\Delta=5}$ 为毛竹梁挠度为 5 mm 时所受的力。

表2 试件抗弯承载力和初始抗弯刚度

Table 2 Flexural capacities and initial stiffness of the specimens

试件编号	大头 直径 $D_1/\text{mm}$	小头 直径 $D_2/\text{mm}$	大头壁 厚 $t_1/\text{mm}$	小头 壁厚 $t_2/\text{mm}$	截面 面积 $A/\text{mm}^2$	挠度 $u/\text{mm}$	$P_{\Delta=5}/\text{N}$	$(P_{L/200}/200)/\text{N}$	$P_u/\text{N}$	$P_{L/200}/P_u$	$K/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	破坏模式
B90-3000-1	90.3	76.8	9.2	6.2	1 836	128.46	197	667	4 490	14.9%	31.3	破坏模式1
B90-3000-2	90.3	74.7	11.6	6.5	2 089	112.59	126	388	2 932	13.2%	17.5	破坏模式2
B90-3000-3	81.9	69.7	8.6	6.4	1 604	177.90	112	317	3 813	8.3%	13.7	破坏模式3
B90-3000-4	80.0	60.8	8.4	6.2	1 447	151.30	103	351	3 253	10.8%	16.5	破坏模式4
B90-3000-5	86.4	68.6	10.2	6.4	1 803	181.14	170	502	4 583	11.0%	22.1	破坏模式4
B90-3000-6	92.6	67.7	9.2	6.4	1 777	153.81	141	401	3 728	10.8%	19.3	破坏模式4
平均值									3 800	11.5%	20.1	
标准差									0.598	0.021	5.65	
B90-3600-1	89.9	69.9	8.3	6.0	1 624	217.9	92	303	3 167	9.6%	11.7	破坏模式4
B90-3600-2	77.4	65.0	9.5	6.3	1 575	218.0	76	249	2 850	8.7%	9.6	破坏模式1
B90-3600-3	89.8	75.1	10.5	6.8	2 008	239.0	97	367	3 311	11.1%	15.0	破坏模式3
B90-3600-4	87.1	75.4	10.5	6.8	1 977	251.3	90	575	4 428	13.0%	21.4	破坏模式4
B90-3600-5	86.8	71.6	10.1	7.0	1 894	267.0	94	315	3 299	9.5%	12.3	破坏模式2
B90-3600-6	88.7	67.7	9.6	6.8	1 805	314.4	81	219	2 870	7.6%	7.7	破坏模式2
平均值									3 321	9.9%	13.0	
标准差									0.528	0.017	4.41	
B120-3000-1	116.5	103.2	11.2	9.1	3 175	94.9	620	1 630	7 625	21.4%	67.3	破坏模式4
B120-3000-2	118.0	102.7	11.0	7.8	2 973	97.9	577	1 700	8 708	19.5%	74.9	破坏模式1
B120-3000-3	121.0	102.5	12.6	9.3	3 462	102.0	711	2 045	10 937	18.7%	88.9	破坏模式2
B120-3000-4	117.7	104.6	11.0	8.7	3 135	96.6	610	1 850	8 880	20.8%	82.7	破坏模式4
B120-3000-5	122.2	105.9	12.0	8.8	3 376	94.3	447	1 438	8 437	17.0%	66.1	破坏模式2
B120-3000-6	116.5	106.3	11.3	8.3	3 132	94.0	455	1 583	9 174	17.3%	75.2	破坏模式1
平均值									8 960	19.1%	75.9	
标准差									1.007	0.016	8.03	
B120-3600-1	116.6	97.0	12.8	7.1	3 033	123.7	224	900	6 367	14.1%	37.6	破坏模式4
B120-3600-2	119.9	98.3	10.2	8.0	2 858	185.3	413	1 274	7 209	17.7%	47.8	破坏模式2
B120-3600-3	121.2	98.9	13.2	10.1	3 591	130.8	258	894	4 716	19.0%	35.3	破坏模式4
B120-3600-4	119.3	96.9	11.5	8.3	3 060	162.1	325	1 189	7 788	15.3%	48.0	破坏模式4
B120-3600-5	113.7	99.8	11.2	9.2	3 097	178.2	219	887	6 637	13.4%	37.1	破坏模式1
B120-3600-6	112.0	92.1	13.8	9.5	3 305	179.3	265	944	7 042	13.4%	37.7	破坏模式1
平均值									6 627	15.5%	40.6	
标准差									0.964	0.022	5.24	

根据式(4)计算出所有试件的初始刚度值,见表2。在相同跨距下,比较不同直径毛竹梁的初始刚度值可以发现,毛竹梁的初始刚度随着直径的增大而增大。也可通过荷载-位移曲线图上挠度为5 mm的点到挠度为 $L/200$ 对应的点之间直线的斜率对比得到该结论,如图10所示。在相同跨距下,随

着毛竹梁直径的增大,荷载-位移曲线对应段直线的斜率越大,即毛竹梁的初始刚度随直径的增大而增大。在相同直径下,比较不同跨距毛竹梁的初始刚度值可以发现,毛竹梁初始刚度随着跨距的增大而减小。同时,通过荷载-位移曲线图可知,在相同直径下,随着毛竹梁跨距的增大,荷载-位移曲线对

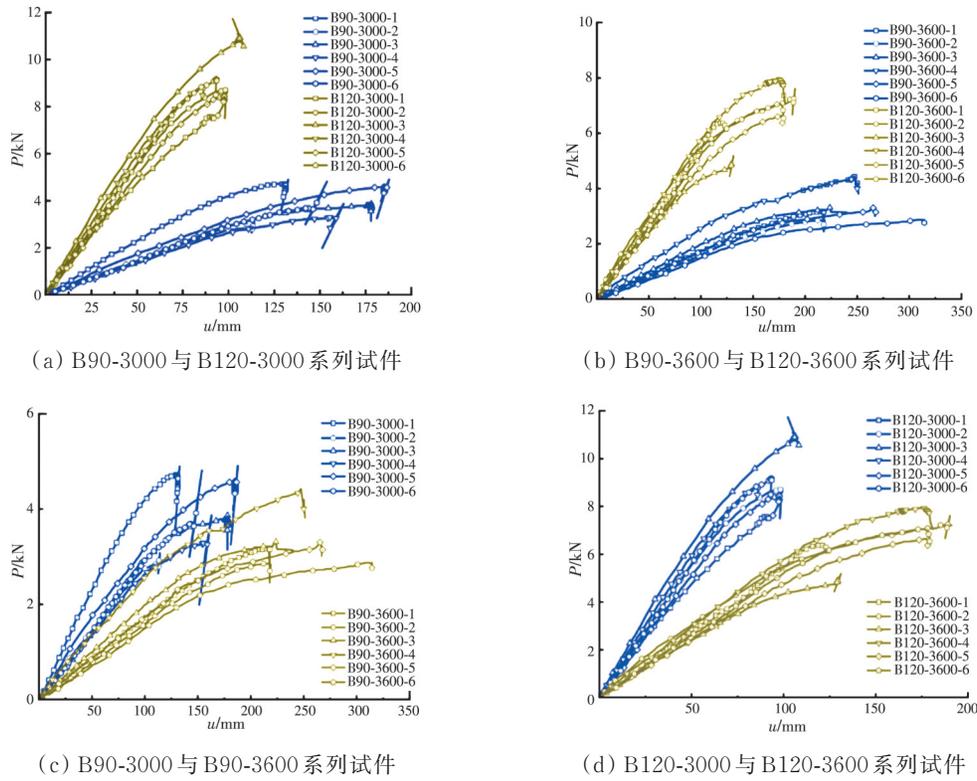


图 9 试件的荷载-位移曲线对比

Fig. 9 Comparison of load-displacement curves of specimens

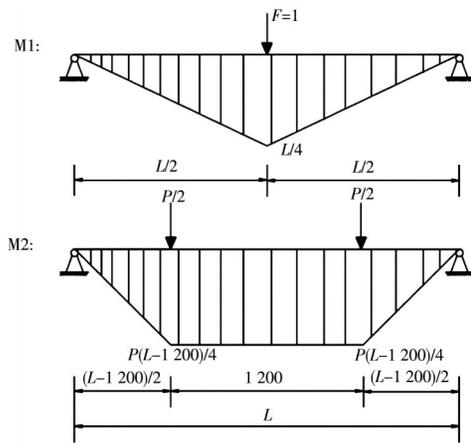


图 10 图乘法计算简图

Fig. 10 Graph multiplication calculation diagram

应段直线斜率越小,即毛竹梁的初始刚度随跨距的增大而减小。

根据各系列试件初始刚度平均值(图 11)可知, B120-3000 系列试件初始刚度为 75.85 N/mm, B90-3000 系列试件初始刚度为 20.8 N/mm, 两者比值在 3 左右; B120-3600 系列试件初始刚度为 40.59 N/mm, B90-3000 系列试件初始刚度为 12.95 N/mm, 两者比值在 3 左右, 所以, 在毛竹梁跨距相同的条件下, 直径为 120 mm 的毛竹梁初始刚度是直径为 90 mm

的毛竹梁初始刚度的 3 倍左右; 同理, B120-3000 和 B120-3600 系列试件初始刚度的比值在 1.5 左右, B90-3000 和 B90-3600 系列试件初始刚度的比值也在 1.5 左右, 所以, 在毛竹梁直径相同的条件下, 跨距为 3 000 mm 的毛竹梁初始刚度是跨距为 3 600 mm 的毛竹梁初始刚度的 1.5 倍左右。

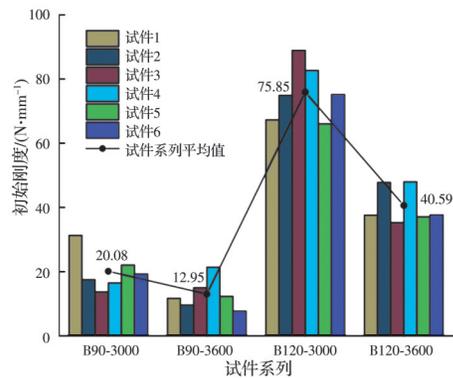


图 11 各系列试件初始刚度

Fig. 11 Initial stiffness of each series of specimens

### 3.4 极限承载力

《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2018)<sup>[24]</sup>中规定, 当构件达到承载力极限或不适于继续承载的变形时, 认为该构件达到了承载能力的极

限状态,此时的力即为极限承载力。

各试件极限承载力的取值为竹梁受弯试验中通过力传感器测得的最大荷载值,如表 2 所示。直径、跨距对极限承载力的影响分别按各系列试件极限承载力均值进行考察,由于各系列试件有 6 根毛竹杆,所以,其极限承载力均值取 6 根毛竹杆极限承载力的平均值,各系列试件极限承载力如图 12 所示。在相同跨距下,直径 120 mm 的毛竹梁极限承载力是直径 90 mm 毛竹梁的 2.0~2.5 倍;在相同直径下,跨距 3 000 mm 的毛竹梁极限承载力是跨距 3 600 mm 毛竹梁的 1.0~1.5 倍左右。当毛竹杆的直径减小 25% 时,跨距为 3 000、3 600 mm 的梁所对应的极限承载力分别降低了 57.6% 和 50%;当梁的跨距减小 16.7% 时,直径为 90、120 mm 的梁所对应的极限承载力分别增大了 14.4% 和 35.1%。可以看出,相较于梁的跨距,毛竹杆直径的变化对梁极限承载力的影响程度更大。

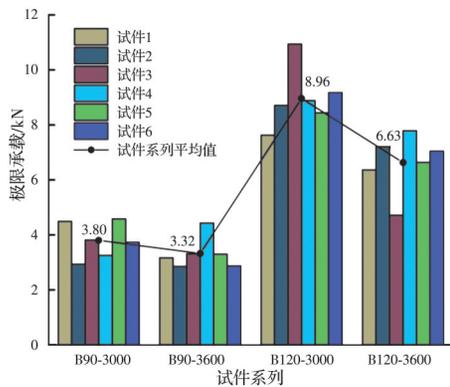


图 12 各系列试件极限承载力  
Fig. 12 Ultimate bearing capacity of each series of specimens

### 3.5 挠度

由试验得到各系列试件的挠度,如图 13 所示。由图 13 可知, B90-3000 系列试件的极限挠度约为

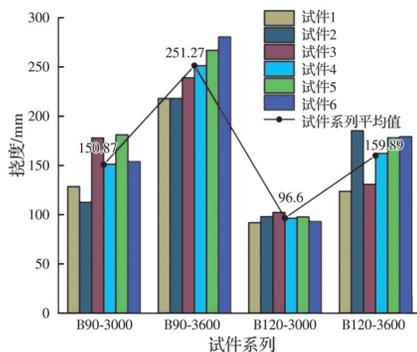


图 13 各系列试件挠度  
Fig. 13 Deflection of each series of specimens

B120-3000 系列试件的 2 倍, B90-3600 系列试件的极限挠度比 B120-3600 系列试件大,但两者相差不大;而对于相同跨径、不同跨距的毛竹梁, 3 600 mm 跨距的毛竹梁挠度约是 3 000 mm 跨距的 2 倍。综上所述可得,毛竹梁跨距对梁的挠度影响更大。

## 4 理论分析

### 4.1 毛竹梁破坏受压区高度

由于图 5 中的竹条是实心截面,竹条标准件下边缘表面纤维被拉断前已发生很大的挠曲变形,当受压区屈服产生塑性变形直至达到极限承载力时,下边缘表面纤维被拉断而发生脆性破坏;而原竹梁是中空截面,当荷载作用在竹梁上并不断增大时,竹梁的非线性挠曲变形明显,在接近极限承载力时,挠曲急剧增大,且竹梁加载点局部区域存在集中荷载效应,上述两种效应叠加于此,最终使竹梁因中空截面局部承压能力不足而破坏。此时,下边缘纤维未达到拉应变极限状态,同时,毛竹材顺纹抗压强度小于顺纹抗拉强度<sup>[25]</sup>,因此,计算截面破坏弯矩时按受压区边缘应力达到最大来控制。毛竹杆受弯后直到破坏时截面承载力仍满足力和力矩的平衡,如图 14 所示。取几个特殊的受压区高度计算出每一类毛竹梁截面弯矩理论值,将理论值与试验值进行对比,若理论值和试验值较为接近,则可确定该受压区高度为毛竹梁破坏受压区高度。

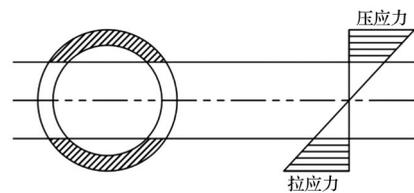


图 14 竹杆受弯截面应力分布  
Fig. 14 Stress distributions of bending section of bamboo beam

根据截面力矩平衡,得到计算式

$$\int_{R-h}^{R-t} 2(\sqrt{R^2-y^2}-\sqrt{(R-t)^2-y^2})y\sigma_z dy + \int_{R-t}^R 2(\sqrt{R^2-y^2})y\sigma_z dy = \frac{M}{2} \quad (5)$$

式中:  $R$  为毛竹梁半径,取竹梁大头、小头半径的平均值;  $t$  为毛竹梁壁厚,取竹梁大头、小头壁厚的平均值;  $h$  为受压区高度;  $\sigma_z$  为毛竹梁顺纹抗压强度,根据毛竹受压材性试验取值为 50.9 MPa<sup>[25]</sup>;  $M$  为截面破坏弯矩理论值。

根据上述公式可以计算出不同受压区高度下

的理论弯矩值,由于中性轴只可能出现在竹梁横截面内,因此,可把竹梁横截面划分为几个区间来试算受压区高度的大致范围。假定中性轴区间界限在以下部位:竹梁截面厚度内边缘处、形心轴处以及形心轴到竹梁上、下厚度内边缘中空部分各一处;将根据4处受压区高度试算出的理论弯矩值与试验弯矩值进行对比,确定受压区高度的大致范围,分别取受压区高度  $h=t$ 、 $h=R/3$ 、 $h=R$ 、 $h=3R/2$  进行试算。通过毛竹梁受弯试验得到梁的极限承载力,再通过公式计算毛竹梁纯弯段截面的弯矩,即为毛竹梁截面破坏弯矩试验值。如图 15 所示,分

配梁跨距为 1 200 mm,毛竹梁跨距为  $L$ ,极限承载力为  $P_k$ , $M_k$ 为截面破坏弯矩试验值,计算式为

$$M_k = \frac{L - 1\,200}{4} P_k \quad (6)$$

确定破坏受压区高度  $h$ ,试算对比结果见表 3,表中的  $R$ 、 $t$ 均取该系列试件尺寸的平均值。通过比较可知,当  $h$ 取  $3R/2$ 时,试验值与理论值较为接近,特别是对于直径为 120 mm 的毛竹梁,基本接近,无需进一步缩小中性轴的区间范围;而对于直径为 90 mm 的毛竹梁,理论值与试验值差距较大,主要是由于 90 mm 毛竹梁受弯挠曲过大,几何非线性和物理非线性效应更为明显。

表 3 受压区高度试算表

Table 3 Trial balance of compressive zone height

试件名称	$R/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$M_{h=t}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$M_{h=R/3}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$M_{h=R}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$M_{h=3R/2}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$M_k/(\text{N}\cdot\text{m})$
B90-3000	39.0	8.0	791.6	1 117.2	1 424.1	1 542.4	1 710.0
B90-3600	39.4	8.2	978.8	1 157.0	1 478.2	1 598.3	1 992.6
B120-3000	55.7	10.1	1 978.7	3 014.3	3 800.1	4 095.4	4 032.0
B120-3600	53.6	10.4	1 924.3	2 803.2	3 555.2	3 836.7	3 976.2

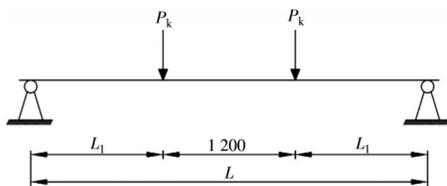


图 15 毛竹杆受弯承载计算简图

Fig. 15 Bending calculation diagram of bamboo beam

4.2 结果对比

通过上述试算结果对比,得出 4 种不同类型毛竹梁破坏受压区高度  $h$  约为  $3R/2$ ,再分别计算每种类型的 6 根试件的理论弯矩值,对比当受压区高度  $h$  取  $3R/2$ 时按照公式计算出的每一根试件理论弯矩值和试验弯矩值的差别,计算结果如表 4 所示。可见,理论弯矩值与试验弯矩值较为接近,即可证明受弯破坏时毛竹梁受压区高度  $h=3R/2$  是合理的。

4.3 受拉区边缘应力

毛竹梁以边缘压应力达到顺纹抗压强度为破坏控制条件。按弹性理论计算出的毛竹梁受压区高度为  $3R/2$ ,根据毛竹梁截面拉力和压力相等原则,可以推出受拉区边缘应力,如图 16 所示。

由  $f_c \cdot A_c = f_t \cdot A_t$  得

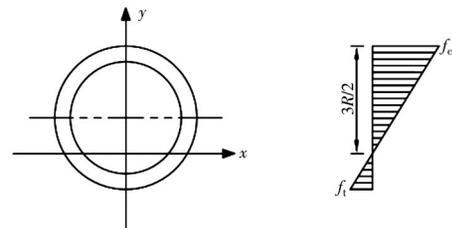


图 16 竹梁中性轴在  $3R/2$  处截面应力分布

Fig. 16 Sectional stress distribution of neutral axis of bamboo beam at  $3R/2$

$$F_c = \int_0^{3R/2} \frac{4\sigma_z y}{3R} \sqrt{R^2 - \left(y - \frac{R}{2}\right)^2} dy - \int_0^{3R/2-t} \frac{4\sigma_z y}{3R} \sqrt{(R-t)^2 - \left(y - \frac{R}{2}\right)^2} dy \quad (7)$$

$$F_t = \int_{-R/2}^0 \frac{-4\sigma y}{R} \sqrt{R^2 - \left(y - \frac{R}{2}\right)^2} dy - \int_{t-R/2}^0 \frac{-4\sigma y}{R} \sqrt{(R-t)^2 - \left(y - \frac{R}{2}\right)^2} dy \quad (8)$$

式中: $A_t$ 、 $A_c$ 分别为截面拉、压区面积; $\sigma_z$ 为毛竹梁顺

纹抗压强度,取 50.9 MPa; $R$ 为毛竹直径; $t$ 为毛竹壁厚; $F_c$ 为截面受压区合力; $F_t$ 为截面受拉区合力; $\sigma$

为受拉区边缘应力。将上述参数代入式(7)、式(8)可反求出 $\sigma$ ,计算结果如表 4 所示。

表 4 毛竹杆受弯试验结果和理论弯矩值的对比

Table 4 Comparison between the test results and the bending theoretical bending moment of the bamboo beam

试件名称	$R/mm$	$t/mm$	$\sigma/MPa$	$h=3R/2$	$M/(N\cdot m)$	$M_k/(N\cdot m)$	$M/M_k$
B90-3000-1	41.78	7.71	9.49	62.67	1 752.37	1 710	1.02
B90-3000-2	41.24	9.06	12.95	61.86	1 909.85		1.12
B90-3000-3	37.90	7.48	10.78	56.85	1 373.60		0.80
B90-3000-4	35.22	7.30	11.76	52.83	1 142.04		0.67
B90-3000-5	38.75	8.30	12.41	58.13	1 556.52		0.91
B90-3000-6	40.07	7.82	10.57	60.11	1 611.29		0.94
B90-3600-1	39.96	7.10	8.78	59.94	1 490.53	1 993	0.75
B90-3600-2	35.61	7.93	13.22	53.41	1 240.64		0.62
B90-3600-3	41.23	8.67	12.04	61.84	1 849.71		0.93
B90-3600-4	40.62	8.68	12.37	60.93	1 789.79		0.90
B90-3600-5	39.60	8.54	12.55	59.40	1 668.58		0.84
B90-3600-6	39.11	8.21	12.01	58.67	1 577.70		0.79
B120-3000-1	54.93	10.14	9.49	82.40	3 983.16	4 032	0.99
B120-3000-2	55.18	9.38	7.96	82.77	3 794.79		0.94
B120-3000-3	55.87	10.94	10.63	83.81	4 375.95		1.09
B120-3000-4	55.57	9.86	8.75	83.35	4 002.75		0.99
B120-3000-5	57.01	10.37	9.22	85.52	4 405.54		1.09
B120-3000-6	55.71	9.82	8.63	83.57	4 014.32		1.00
B120-3600-1	53.40	9.98	9.73	80.10	3 692.01	3 976	0.93
B120-3600-2	54.57	9.10	7.61	81.85	3 616.61		0.91
B120-3600-3	55.03	11.62	12.13	82.54	4 412.06		1.11
B120-3600-4	54.05	9.93	9.40	81.07	3 779.73		0.95
B120-3600-5	53.39	10.21	10.18	80.09	3 755.08		0.94
B120-3600-6	51.022	11.64	13.73	76.53	3 711.57		0.93
平均值							0.92
标准差							0.13

由上述计算可知,毛竹梁受弯破坏时的受压区高度在 $h=3R/2$ 处。若满足平截面假定,当毛竹梁受压区边缘应力达到顺纹抗压强度(50.9 MPa)时,受拉区边缘应力应为 17 MPa;而按照 $F_c = F_t$ 计算

出的边缘压应力小于 17 MPa,如图 17 所示。根据平截面假定计算出的毛竹梁的破坏边缘拉应力与根据毛竹梁截面拉压力平衡计算出的不相等,故毛竹梁受弯破坏弯矩建议按上边缘顺纹抗压强度达

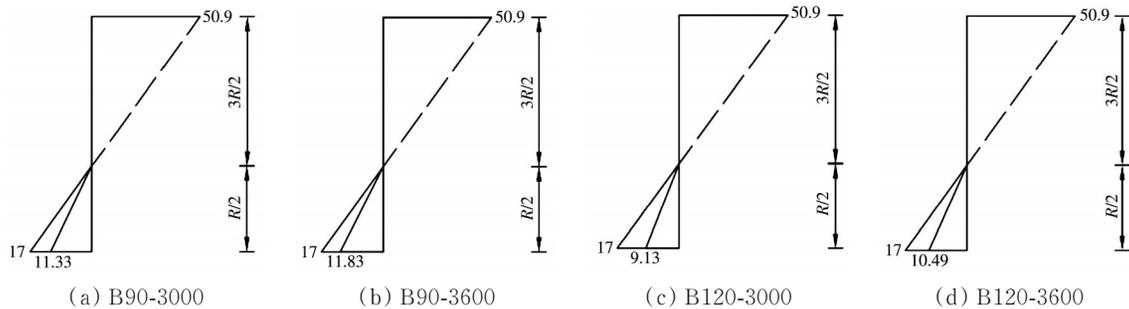


图 17 边缘应力分析图

Fig. 17 Edge region stress analysis diagram

到最大来进行计算。

## 5 结论

设计了4类不同直径、跨距的受弯毛竹杆24根,先通过竹条受弯试验确定竹条的抗弯强度,再进行毛竹梁受弯试验研究和计算对比,得出如下结论:

1)毛竹梁跨距变化对挠度的影响大于直径变化。相同跨距下,两种不同直径的毛竹梁挠度差不多;但相同直径下,跨距大的毛竹梁挠度是跨距小的2倍;根据荷载-位移曲线可以得出,毛竹梁直径越大、跨距越小,其初始抗弯刚度越大。

2)跨距相同时,毛竹梁直径越大,极限承载力越大;直径相同时,跨距越大,极限承载力越小;直径变化大于跨距变化对其极限承载力的影响。

3)根据试验数据,按弹性理论计算出毛竹梁受弯破坏时的受压区高度在 $3R/2$ 处,按受压区高度在 $3R/2$ 处计算毛竹梁破坏时的理论弯矩值,再与试验弯矩值进行对比得出,毛竹梁直径越大,计算出的理论弯矩值越接近试验弯矩值。

4)根据平截面假定计算出的毛竹梁破坏边缘拉应力与根据毛竹梁截面拉压力平衡计算出的不相等,为了简便计算,毛竹梁受弯破坏弯矩建议按上边缘顺纹抗压强度进行计算。

## 参考文献

- [1] 程秀才, 张晓冬, 张齐生, 等. 四大竹乡产毛竹弯曲力学性能的比较研究[J]. 竹子研究汇刊, 2009, 28(2): 34-39.
- CHENG X C, ZHANG X D, ZHANG Q S, et al. A comparative study on binding performance of moso bamboo from four hometowns of bamboo [J]. Journal of Bamboo Research, 2009, 28(2): 34-39. (in Chinese)
- [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.
- XIAO Y, YANG R Z, SHAN B, et al. Experimental research on mechanical properties of glulam [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(11): 150-157. (in Chinese)
- [3] KUMAR A, VLACH T, LAIBLOVA L, et al. Engineered bamboo scrimber: Influence of density on the mechanical and water absorption properties [J]. Construction and Building Materials, 2016, 127(30): 815-827.
- [4] LV Q, LIU Y, DING Y. Analyses on prestress loss and flexural performance of the laminated bamboo beam applied with prestressed BFRP sheet [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 1-13.
- [5] 周军文, 姜慧辉, 鲁良辉, 等. 重组竹梁受弯承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(23): 42-45.
- ZHOU J W, JIANG H H, LU L H, et al. Experimental study on flexural bearing capacity of recombinant bamboo beams [J]. Building Structure, 2016, 46(23): 42-45. (in Chinese)
- [6] 周爱萍, 刘睿, 沈玉蓉, 等. 碳纤维增强重组竹受弯构件的极限承载力试验[J]. 林业工程学报, 2017, 2(3): 137-142.
- ZHOU A P, LIU R, SHEN Y R, et al. Experiment study on ultimate load-bearing capacity of carbon fiber reinforced polymer reinforced parallel bamboo beam [J]. Journal of Forestry Engineering, 2017, 2(3): 137-142. (in Chinese)
- [7] SÁ RIBEIRO R A, SÁ RIBEIRO M G, MIRANDA I P A. Bending strength and nondestructive evaluation of structural bamboo [J]. Construction and Building Materials, 2017, 146(4): 38-42.
- [8] WEI Y, JI X W, DUAN M J, et al. Flexural performance of bamboo scrimber beams strengthened with fiber-reinforced polymer [J]. Construction and Building Materials, 2017, 142(3): 66-82.
- [9] 魏洋, 吴刚, 张齐生, 等. 足尺重组竹受弯构件的试验与理论分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(Sup1): 140-145.
- WEI Y, WU G, ZHANG Q S, et al. Theoretical analysis and experimental test of full-scale bamboo scrimber flexural components [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34 (Sup1): 140-145. (in Chinese)
- [10] 张苏俊, 赵志高, 张文娟, 等. 重组竹梁抗弯性能试验[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2016, 19(1): 51-54, 67.
- ZHANG S J, ZHAO Z G, ZHANG W J, et al. Research on the flexural performance of bamboo scrimber [J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2016, 19(1): 51-54, 67. (in Chinese)
- [11] 赵志高, 肖忠平, 束必清, 等. 碳纤维增强重组竹梁的抗弯性能[J]. 林业工程学报, 2017, 2(6): 127-132.
- ZHAO Z G, XIAO Z P, SHU B Q, et al. Flexural behavior of carbon fiber reinforced polymer reinforced bamboo scrimber beam [J]. Journal of Forestry Engineering, 2017, 2(6): 127-132. (in Chinese)
- [12] 肖岩, 李佳. 现代竹结构的研究现状和展望[J]. 工业建筑, 2015, 45(4): 1-6.
- XIAO Y, LI J. The state of the art of modern bamboo structures [J]. Industrial Construction, 2015, 45(4): 1-6.

- (in Chinese)
- [13] GARCÍA-ALADÍN M F, CORREAL J F, GARCÍA J J. Theoretical and experimental analysis of two-culm bamboo beams [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 2018, 171(4): 316-325.
- [14] 何子奇,周绪红,肖洒,等.毛竹受压构件性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(Sup2): 233-241.  
HE Z Q, ZHOU X H, XIAO S, et al. Experimental investigation on bamboo columns under axial compression [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(Sup2): 233-241. (in Chinese)
- [15] 于金光,郝际平,田黎敏,等.圆竹的力学性能及影响因素研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 50(1): 30-36.  
YU J G, HAO J P, TIAN L M, et al. The study on the main influencing factors and mechanical properties of phyllostachys pubescens [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 50(1): 30-36. (in Chinese)
- [16] 张丹,王戈,张文福,等.毛竹圆竹力学性能的研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(7): 119-123.  
ZHANG D, WANG G, ZHANG W F, et al. Mechanical properties of *Phyllostachys pubescens* [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2012, 32(7): 119-123. (in Chinese)
- [17] BAHTIAR E T, MALKOWSKA D, TRUJILLO D, et al. Experimental study on buckling resistance of *Guadua angustifolia* bamboo column [J]. *Engineering Structures*, 2021, 228: 111548.
- [18] 陈肇元.中心受压的圆竹杆件[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 1957(4): 23-38.  
CHEN Z Y. Round bamboo rod under center compression [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1957(4): 23-38. (in Chinese)
- [19] GHAVAMI K. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27(6): 637-649.
- [20] TIAN L M, KOU Y F, HAO J P. Axial compressive behaviour of sprayed composite mortar-original bamboo composite columns [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 215(4): 726-736.
- [21] 建筑用竹材物理力学性能试验方法: JG/T 199—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.  
Testing methods for physical and mechanical properties of bamboo used in building: JG/T 199—2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. (in Chinese)
- [22] 周芳纯.竹材物理力学性质的研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 1981, 5(2): 1-32.  
ZHOU F C. Studies on physical and mechanical properties of bamboo woods [J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 1981, 5(2): 1-32. (in Chinese)
- [23] 洗杏娟,洗定国.竹材的微观结构及其与力学性能的关系[J]. *竹子研究汇刊*, 1990, 9(3): 10-23.  
XIAN X J, XIAN D G. The relationship of microstructure and mechanical properties of bamboo [J]. *Journal of Bamboo Research*, 1990, 9(3): 10-23. (in Chinese)
- [24] 建筑结构可靠度设计统一标准: GB 50068—2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.  
Unified standard reliability design of building structures: GB 50068—2001 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese)
- [25] 肖洒.楠竹杆件基本受力性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.  
XIAO S. Experimental study on basic mechanical properties of bamboo members [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)