

# 毛竹顺纹方向力学性能的试验研究

郝际平<sup>1</sup>, 秦梦浩<sup>1</sup>, 田黎敏<sup>1</sup>, 刘 敏<sup>1</sup>, 赵秋利<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 广州固保系统建筑材料有限公司, 广东 广州 510070)

**摘要:**以毛竹圆竹和竹片为研究对象,研究其顺纹方向的力学性能.通过 41 个试件的试验研究,获得了毛竹竹片顺纹方向的弹性模量、抗压强度、抗拉强度以及毛竹圆竹顺纹方向的抗压强度和抗剪强度等力学指标,所有强度计算结果转化成含水率为 12% 时的强度,以消除含水率差异的影响.结果表明:竹材顺纹抗拉强度略大于抗压强度,以圆竹和竹片为测试单位测得毛竹竹材的顺纹抗压强度相差不大,竹节对竹材的抗压强度提高不明显,对抗拉强度和抗剪强度有所削弱.研究还提出了试件破坏现象及原因,为竹结构房屋设计与进一步理论分析提供必要依据.

**关键词:**竹节;圆竹;竹片;力学性能

中图分类号: TU366.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)06-0777-07

## Experimental research on the mechanical properties of phyllostachys pubescen along the grain direction

HAO Jiping<sup>1</sup>, QIN Menghao<sup>1</sup>, TIAN Limin<sup>1</sup>, LIU Min<sup>1</sup>, ZHAO Qiuli<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Guangzhou CRUPE Systems Building Materials Co. Ltd, Guangzhou 510070, China)

**Abstract:** The experiment was conducted to study the mechanical properties of Moso bamboo culms and bamboo sheets along the grain direction. This enable us to know we know the elastic modulus, the compressive strength, tensile strength and shear strength of the bamboo along the grain direction through the study of 41 specimens. All the strength was converted to when moisture content is 12%, to eliminate the effects of moisture content differences. The results show that the tensile strength of bamboo is slightly larger than compressive strength along the grain direction. The compressive strength is almost equal when it was tested as bamboo culms and bamboo sheets. The bamboo node rarely improved the compressive strength, and weakened the tensile strength and shear strength obviously. This research also proposed the phenomenon of specimens failure and the reasons, provided necessary basis for the bamboo structure housing design and further theoretical analysis.

**Key words:** bamboo node; bamboo culms; bamboo sheets; mechanical properties

竹子作为一种绿色节能建筑材料,具有轻质高强、抗震性能优良、产量高、生长周期短等优点.力学性质是竹材基本的材性指标,也是衡量竹材质量的重要指标,深入了解竹材的力学性能,对推广建造竹结构建筑具有十分重要的意义<sup>[1]</sup>.

目前,针对竹材种类、种源、竹龄、测试部位的不同,国内学者已经对建筑用竹的力学性能进行了一系列研究.张丹<sup>[2]</sup>以圆竹为测试单元,测得毛竹圆竹与竹片的抗压强度、抗剪强度相差不大,但抗弯强度大小差异较大;马媛媛<sup>[3]</sup>用电测法测定了安吉毛竹的弹性模量、泊松比、抗拉强度;李旭<sup>[4]</sup>通过对比有竹节及无竹节试样顺纹抗拉强度

值,指出有竹节试样的顺纹抗拉强度低于无竹节试样 16.86%;李霞镇<sup>[5-6]</sup>对毛竹材顺纹抗拉和抗压的动态破坏形式进行了研究,细致描述了破坏时竹材的微观变化.

在现代竹木建筑中,圆竹可通过螺栓、套筒等连接件,实现建筑造型的多样化<sup>[7-8]</sup>.圆竹中空而直,具有明显的各向异性,竹节对竹子起到了很好的环箍作用.我国已有的试验标准,是以竹壁薄片为测试单元,除去竹节部分,截取标准试样进行测量,这样就忽略了竹节对竹材性能的影响,并不能完全反映圆竹的力学性能.本文通过对竹材顺纹方向的弹性模量、抗拉强度、抗压强

收稿日期: 2016-11-20 修改稿日期: 2017-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608433); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016KTZDSF04-02-02); 住房和城乡建设部科学技术项目(2015-K2-003)

第一作者: 郝际平(1959—),男,博士,教授,博导,主要从事钢结构研究和教学工作. E-mail: haojiping@xauat.edu.cn

度及抗剪强度的测试,分析竹节对竹材各项性能的影响,为竹结构房屋设计提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验对象为井冈山地区毛竹,竹龄均为 4 年。从不少于 100 株样竹中,分散选取 12 株胸径 100 mm 以上,成熟、无缺陷、有代表性的样竹。含水率在 30%~50%之间<sup>[9]</sup>。

### 1.2 试验方法

依据 JG/T199-2007<sup>[10]</sup>,对毛竹片材的顺纹力学性能进行研究;依据 ISO 22157-1-2004(E)<sup>[11]</sup>,ISO 22157-2-2004(E)<sup>[12]</sup>对圆竹的顺纹力学性能进行研究,并考虑竹节的影响。

试件在试验完成后测定其含水率,所有强度计算结果按 JG/T199-2007 建筑用竹材物理力学性能试验方法,转化含水率为 12%时的强度,以消除含水率差异的影响。

### 1.3 试验设备

本次试验采用的仪器设备主要包括:游标卡尺、DNS 电子万能试验机、DGG-9240BD 型电热恒温鼓风干燥箱、BS224S 型电子天平、夹式应变计、切割机(J1G-355)、砂纸等。

## 2 结果与分析

### 2.1 竹材弹性模量的测定

#### 2.1.1 抗压弹性模量的测定

测量竹材顺纹抗压弹性模量的试样尺寸为 60 mm×15 mm× $t$  mm, $t$  为竹壁厚度。试验所用夹式应变计标距为 50 mm,略小于试样高度。将试样放置于垫块的边部,以便有效测量试样变形情况。试验装置如图 1 所示。加荷速度取每分钟 13 N/mm<sup>2</sup>。试验结果见表 1。

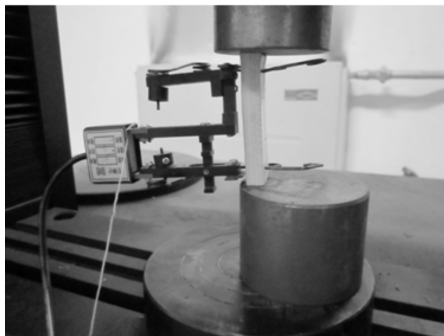


图 1 测定抗压弹性模量试验装置

Fig. 1 Test equipment for determination of the compressive modulus of elasticity of bamboo

表 1 抗压弹性模量试验结果

Tab. 1 Test result of compressive modulus of elasticity

试样编号	YT1	YT2	YT3	平均值	变异系数/%
含水率 $\omega$ /%	44.27	46.65	49.61	46.84	4.66
$E_{c,\omega}$ /GPa	11.32	11.56	11.15	11.34	1.48
$E_{c,12}$ /GPa	12.71	12.97	12.52	12.73	1.45

注:  $E_{c,\omega}$  为试验测得顺纹抗压弹性模量;  $E_{c,12}$  为含水率为 12%时的顺纹抗压弹性模量。

#### 2.1.2 抗拉弹性模量的测定

测量竹材顺纹抗拉弹性模量的试样尺寸为 330 mm×15 mm× $t$  mm,中间有效部位尺寸为 60 mm×4 mm× $t$  mm, $t$  为竹壁厚度。试件尺寸如图 2 所示。

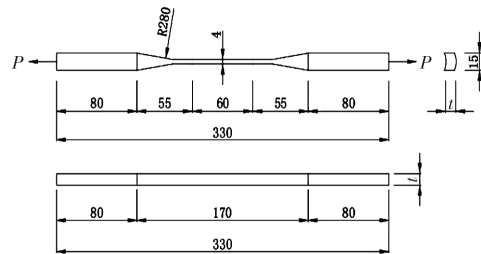


图 2 抗拉弹性模量试样尺寸

Fig. 2 The sample size of tensile modulus of elasticity

将试样两端夹紧在试验机的钳口中,使试样窄面与钳口接触,两端靠近弧形部分露出 20 mm 左右,所用夹式应变计标距为 50 mm,试验装置如图 3 所示。加荷速度取每分钟 15 N/mm<sup>2</sup>,试验结果见表 2。



图 3 抗拉弹性模量试验装置

Fig. 3 Test equipment for determination of the tensile

表 2 抗拉弹性模量试验结果

Tab. 2 Test result of tensile modulus of elasticity

试样编号	YT1	YT2	YT3	平均值	变异系数/%
含水率 $\omega$ /%	42.82	36.07	31.40	36.76	12.75
$E_{t,\omega}$ /GPa	11.63	11.61	11.71	11.65	0.37
$E_{t,12}$ /GPa	12.99	12.90	12.93	12.94	0.29

注:  $E_{t,\omega}$  为试验测得顺纹抗拉弹性模量;  $E_{t,12}$  为含水率为 12% 时的顺纹抗拉弹性模量。

对比文献 4、文献 5, 本次试验测量值分别提高了 3.1%、5.7%, 这是由试件的采集地、龄期、立地条件、测试方法等诸多因素的差异造成的。

表 3 抗拉弹性模量数据对比

Tab. 3 The data contrast of tensile modulus of elasticity

参考文献及试验	抗拉弹性模量/GPa
《毛竹材力学及破坏特性研究》	12.54
《基于 DSCM 的竹材顺纹抗拉弹性模量测定》	12.21
本次试验	12.94

2.2 竹片顺纹抗压强度的测定

测量竹材顺纹抗压强度的试样尺寸为 15 mm  $\times$  15 mm  $\times$   $t$  mm,  $t$  为竹壁厚度。将试样放在试验机支座的中心, 试验装置如图 4 所示。按每分钟 80 N/mm<sup>2</sup> 均匀速度加荷, 直至试样破坏。

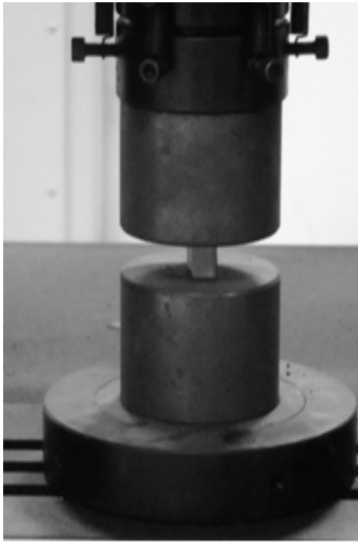


图 4 竹片顺纹抗压强度试验装置

Fig. 4 Test equipment for determination of the compressive strength of bamboo sheets

在加载初期试样没有明显变化, 荷载继续增加, 竹片靠近竹黄一侧发生细微的弯曲, 并随荷载的增加而增大。竹片的顺纹抗压破坏主要出现

在试样端部, 扭曲也发生在靠近加载端一侧。通过观察发现, 最终破坏形态是受压截面整体向竹黄侧倾斜, 靠近竹黄一侧的竹材被压缩的程度较靠近竹青一侧的竹材压缩程度大, 如图 5 (a) 所示。这主要是因为截面维管束分布不均匀, 靠近竹黄处维管束稀疏, 承载能力弱, 容易被压溃。在径向上, 从竹青至竹黄, 维管束呈明显的阶梯状依次由密变疏, 随着荷载的增加, 竹黄部位首先出现剪切破坏, 随后, 竹青部位出现弯曲变形, 导致竹青部位纤维撕裂, 出现图 5 (b) 所示的错层现象。试验结果见表 4。

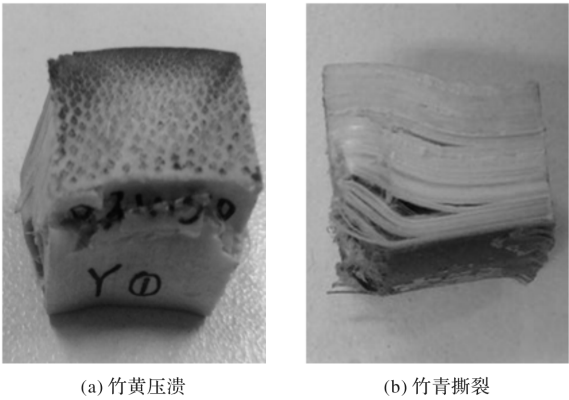


图 5 竹片顺纹受压破坏形态

Fig. 5 The compressive failure of bamboo sheets

表 4 竹片顺纹抗压强度试验结果

Tab. 4 Test result of compressive strength of bamboo sheets

试件 编号	破坏 荷载 $P_{max}$ /N	受压 面积 $A$ /mm <sup>2</sup>	含水率 $\omega$ /%	顺纹抗压强度/MPa	
				试验时 $f_{c,\omega}$	含水率 12% $f_{c,12}$
Y1	6 873	139.5	45.18	49.3	62.3
Y2	6 292	141.0	41.69	44.6	56.3
Y3	6 288	139.5	49.50	45.1	57.0
Y4	6 302	142.5	49.18	44.2	55.9
Y5	6 587	138.0	48.29	47.7	60.4
平均值	6 468	140.1	46.77	46.2	58.4
变异系数/%	3.59	1.05	6.34	4.29	4.32

2.3 竹片顺纹抗拉强度的测定

为探究竹节对竹片抗拉强度的影响, 试验分有竹节和无竹节两组, 每组各 5 个试样, 几何尺寸与测定抗拉弹性模量试样相同, 有竹节试样的节隔位于中间。按每分钟 200 N/mm<sup>2</sup> 的均匀速度加荷直至试样破坏。

2.3.1 无竹节顺纹抗拉强度的测定

竹片无竹节顺纹抗拉试样破坏形式为撕裂破

坏,主要表现为纤维的纵向撕裂<sup>[13]</sup>.沿顺纹拉伸时,纵向纤维的变形不大,强度值较高;但在此过程中,纵向纤维在纤维结合处撕裂,导致纤维本身的抗拉强度不能充分发挥.试样断口首先出现在靠近竹黄一侧,且垂直于纤维方向,荷载继续增加,裂口随断口的增大而增大,最终产生纵向的撕裂.竹材在拉伸过程中,纤维之间发生相对滑移,使纤维产生撕裂破坏,最终破坏断面层次不齐,呈针状撕裂,如图 6 所示.试验结果见表 5.

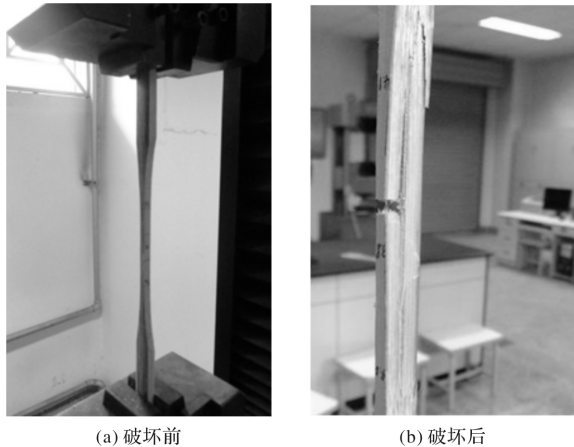


图 6 竹片无竹节顺纹受拉破坏形态

Fig. 6 The tensile failure of bamboo sheets without node

表 5 竹片无竹节顺纹抗拉强度试验结果

Tab. 5 Test result of tensile strength of bamboo sheets without node

试件 编号	破坏 荷载 $P_{\max}/\text{N}$	受压 面积 $A/\text{mm}^2$	含水率 $\omega/\%$	顺纹抗压强度/ $\text{MPa}$	
				试验时 $f_{c,\omega}$	含水率 12% $f_{c,12}$
LW1	5 414	32.3	37.39	167.5	152.6
LW2	5 414	31.4	33.51	195.2	178.0
LW3	6 132	30.4	35.58	157.1	143.2
LW4	4 783	35.4	43.34	196.6	178.9
LW5	6 951	32.6	45.79	173.3	157.6
平均值	5 739	32.4	39.12	177.9	162.1

2.3.2 有竹节顺纹抗拉强度的测定

有竹节试样的破坏形式与无竹节试样的破坏形式存在一定差异.有竹节试样的断裂部位大部分为中间竹节部位或靠近竹节部位,端口平整,中部偶有纵向撕裂,破坏形式为脆性破坏,破坏现象如图 7 所示.试验结果见表 6.



(a) 破坏前 (b) 破坏后

图 7 竹片有竹节顺纹受拉破坏形态

Fig. 7 The tensile failure of bamboo sheets with node

表 6 竹片有竹节顺纹抗拉强度试验结果

Tab. 6 Test result of tensile strength of bamboo sheets with node

试件 编号	破坏 荷载 $P_{\max}/\text{N}$	受压 面积 $A/\text{mm}^2$	含水率 $\omega/\%$	顺纹抗压强度/ $\text{MPa}$	
				试验时 $f_{c,\omega}$	含水率 12% $f_{c,12}$
LY1	5 382	35.8	30.08	150.2	137.3
LY2	4 787	34.2	31.25	140.0	127.9
LY3	5 668	27.9	39.38	203.3	186.0
LY4	5 966	33.5	35.92	178.4	163.9
LY5	4 384	30.5	35.55	143.6	132.0
平均值	5 237	32.4	34.44	163.1	149.4

2.3.3 竹节对竹片抗拉强度的影响

表 7 为无竹节试样和有竹节试样抗拉强度对比.由表可知,竹节对毛竹竹片的顺纹抗拉强度有一定影响,有竹节试样的顺纹抗拉强度比无竹节试样降低了 7.8%.这是由于部分维管束在通过竹节处时不连续,部分竹壁内侧的维管束在节部弯曲,对竹材的抗拉强度有所削弱.

表 7 不同测试单元的抗拉强度

Tab. 7 The contrast of tensile strength between different samples

试件 组别	平均抗拉 强度/ $\text{MPa}$	降低 比例	标准差	变异系 数/%	准确指 数/%
无竹节	162.1	1.00	14.2	8.74	7.81
有竹节	149.4	0.92	22.2	14.84	13.28

注: 1. 平均抗拉强度为含水率为 12% 时的抗拉强度; 2. 降低比例为试验组强度平均值与无竹节单元组强度的比值.

2.4 圆竹顺纹抗压强度的测定

我国对圆竹力学性能的测定,目前还没有相关的试验标准.为探究竹节对圆竹抗压的影响,试验分为有竹节和无竹节两组,每组各 5 个试样,

依据标准 ISO 22157-1-2004 (E)<sup>[7]</sup>, ISO 22157-2-2004 (E)<sup>[8]</sup>, 试样尺寸为 200 mm×100 mm×t mm, 有竹节试样的节隔位于中间。

2.4.1 无竹节顺纹抗压强度的测定

在加载初期, 试样没有明显的变化; 随后竹壁发生细微的面外鼓曲, 随着荷载的增加, 鼓曲也增大, 当面外鼓曲变形达到弦向极限变形时, 沿顺纹方向出现裂纹, 并逐渐沿纵向贯穿整个试件, 竹壁面外鼓曲变形增加, 破坏形态如图 8 (a) 所示。这主要是因为加载端接触部位存在“环箍效应”, 导致试样沿纵向劈裂破坏, 裂纹将圆竹分成若干竹条; 由于加工和加载时存在初始缺陷, 部分试样竹壁还发生局部屈曲, 如图 8 (b) 所示。试验结果见表 8。

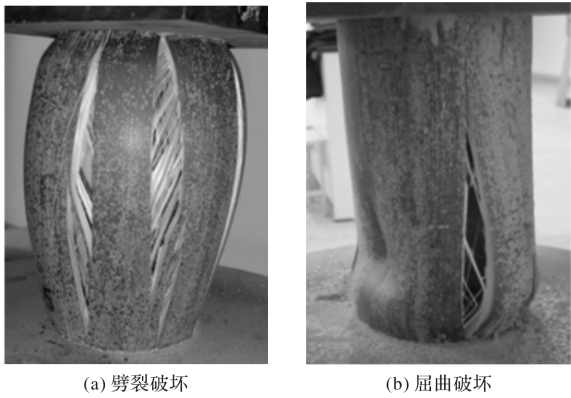


图 8 圆竹无竹节顺纹抗压破坏形态  
Fig. 8 The compressive failure of bamboo culms without node

表 8 圆竹无竹节顺纹抗压强度试验结果  
Tab. 8 Test result of compressive strength of bamboo culms without node

试件 编号	破坏 荷载 $P_{\max}/\text{N}$	受压 面积 $A/\text{mm}^2$	含水率 $\omega/\%$	顺纹抗压强度/MPa	
				试验时	含水率
				$f_{c,\omega}$	12% $f_{c,12}$
YW1	86.79	2 027.6	48.53	42.8	54.2
YW2	112.63	2 472.0	41.31	45.6	57.7
YW3	99.45	2 038.4	44.77	48.8	61.7
YW4	91.60	2 193.4	43.82	41.8	52.9
YW5	95.98	2 059.8	38.99	46.6	58.8
平均值	97.29	2 158.2	43.48	45.1	57.0

2.4.2 有竹节顺纹抗压强度的测定

加载初期, 有竹节试样的变形与无竹节试样相同, 竹壁向外鼓曲, 呈鼓状, 由于竹节对圆竹起到加劲作用, 鼓曲变形没有无竹节试样明显。随着荷载增加, 端部竹壁首先沿顺纹方向劈裂,

但竹节在一定程度上约束了试样的开裂, 破坏形态如图 9 (a) 所示。达到极限承载力后, 变形继续增加, 直至竹节被完全撕裂, 竹壁也劈裂成竹条状, 如图 9 (b) 所示, 试验结果见表 9。

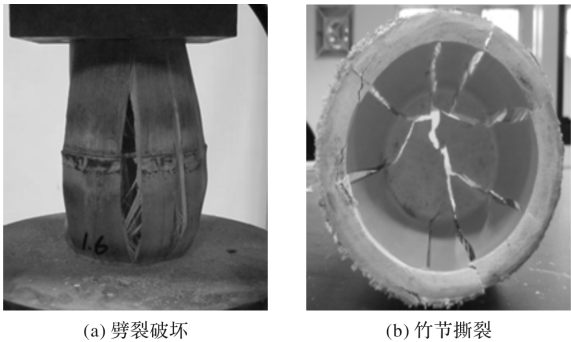


图 9 圆竹有竹节顺纹抗压破坏形态  
Fig. 9 The compressive failure of bamboo culms with node

表 9 圆竹有竹节顺纹抗压强度试验结果  
Tab. 9 Test result of compressive strength of bamboo culms with node

试件 编号	破坏 荷载 $P_{\max}/\text{N}$	受压 面积 $A/\text{mm}^2$	含水率 $\omega/\%$	顺纹抗压强度/MPa	
				试验时	含水率
				$f_{c,\omega}$	12% $f_{c,12}$
YY1	116.56	2 200.9	40.12	53.0	66.8
YY2	131.15	2 491.5	40.28	52.6	66.4
YY3	127.90	2 412.2	47.66	53.0	67.1
YY4	89.81	2 177.6	37.81	41.2	52.2
YY5	85.00	2 136.9	46.53	39.8	50.4
平均值	110.08	2 283.8	42.48	47.9	60.6

2.4.3 竹节对圆竹抗压强度的影响

表 10 为圆竹无竹节试样和有竹节试样抗压强度对比。由表可知, 有竹节试样的抗压强度比无竹节试样提高了 5.9%, 竹节对圆竹顺纹抗压强度的增强作用并不明显。虽然竹节具有加劲作用, 但由于竹节部位局部膨大, 向外鼓曲, 在压缩之前就有初弯曲, 削弱了试样的极限承载力。

表 10 不同测试单元的抗压强度  
Tab. 10 The contrast of compressive strength between different samples

试件 组别	平均抗拉 强度/MPa	降低 比例	标准差	变异系 数/%	准确指 数/%
无竹节	57.0	0.94	3.2	5.58	4.99
有竹节	60.6	1.00	7.6	12.57	11.24

注: 1. 平均抗压强度为含水率为 12% 时的抗压强度; 2. 降低比例为试验组强度平均值与有竹节单元组强度的比值。

2.5 圆竹顺纹抗剪强度的测定

依照标准 ISO 22157-1-2004 (E)<sup>[7]</sup>, ISO

22157-2-2004(E)<sup>[9]</sup>,对圆竹进行抗剪试验.为探究竹节对圆竹抗剪的影响,试验分有竹节和无竹节两组,每组各 5 个试样,试样尺寸为 100 mm×100 mm×*t* mm,有竹节试样的节隔位于中间.

2.5.1 无竹节顺纹抗剪强度的测定

试验开始前,在圆竹两端交错放置两个对三角垫块,使其上下边缘对齐,以保证试件最终沿垫块边缘面剪切破坏.加载初期,没有明显现象,逐步加载过程中,突然发出巨响,达到试样破坏荷载.此时在垫块边缘两侧的竹片出现上下相对滑移,如图 10 (a)所示,至此试验结束.卸掉试验装备后,可观察到竹壁内侧竹黄基体部分沿剪切面破裂,如图 10 (b)所示.试验结果见表 11.

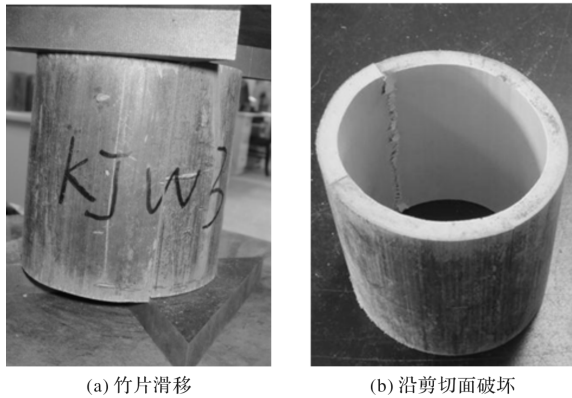


图 10 圆竹无竹节顺纹抗剪破坏形态  
Fig. 10 Shearing failure of bamboo culms without node

表 11 圆竹无竹节顺纹抗剪强度试验结果  
Tab. 11 Test result of shearing strength of bamboo culms without node

试件 编号	破坏 荷载 $P_{\max}/\text{N}$	受压 面积 $A/\text{mm}^2$	含水率 $\omega/\%$	顺纹抗压强度/MPa	
				试验时 $f_{c,\omega}$	含水率 12% $f_{c,12}$
KJW1	44.00	3 244.4	32.90	13.56	20.24
KLW2	48.76	2 903.5	41.45	16.79	25.06
KJW3	47.62	3 292.0	46.87	14.47	21.59
KJW4	48.00	3 173.9	43.69	15.12	22.57
KJW5	56.00	3 272.3	39.40	17.11	25.52
平均值	48.88	3 177.2	40.86	15.41	23.00

2.5.2 有竹节顺纹抗压强度的测定

在加载初期,有竹节试样无明显变化;逐步加载过程中,伴随一声巨响,试样达到破坏荷载,沿垫块边缘发生剪切破坏,节隔局部被撕裂,破坏形态如图 11 所示.试验结果见表 12.

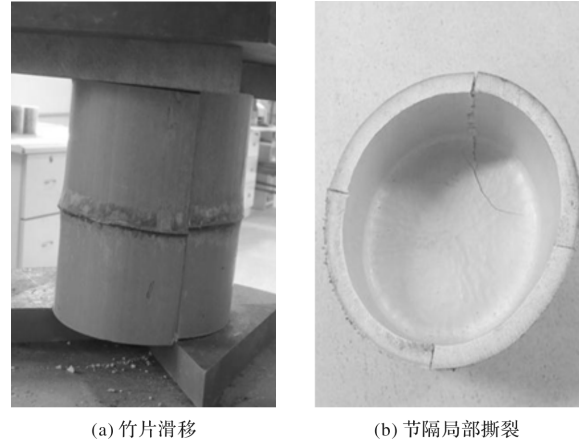


图 11 圆竹有竹节顺纹抗剪破坏形态  
Fig. 11 Shearing failure of bamboo culms with node

表 12 圆竹有竹节顺纹抗剪强度试验结果  
Tab. 12 Test result of shearing strength of bamboo culms with node

试件 编号	破坏 荷载 $P_{\max}/\text{N}$	受压 面积 $A/\text{mm}^2$	含水率 $\omega/\%$	顺纹抗压强度/MPa	
				试验时 $f_{c,\omega}$	含水率 12% $f_{c,12}$
KJY1	39.83	3 120.2	37.37	12.77	19.05
KLY2	35.33	2 742.0	40.37	12.88	19.22
KJY3	30.91	3 290.6	49.78	9.39	14.02
KJY4	41.98	3 602.0	36.69	11.65	17.39
KJY5	38.87	3 424.1	40.75	11.35	16.94
平均值	37.38	3 235.8	40.99	11.61	17.33

2.5.3 竹节对圆竹抗剪强度的影响

表 13 为无竹节试样和有竹节试样抗剪强度对比.由表可知,无竹节顺纹抗剪强度相较于有竹节顺纹抗剪强度提高了 24.65%,这主要是由于竹节处纤维出现变向,向外鼓曲,导致纤维间距离加大,粘结力下降.竹节对圆竹抗剪强度不仅没有增强作用,反而有一定的降低作用.

表 13 不同测试单元的抗剪强度  
Tab. 13 The contrast of shearing strength between different samples

试件 组别	平均抗拉 强度/MPa	降低 比例	标准差	变异系 数/%	准确指 数/%
无竹节	23.00	1.00	2.3	9.82	8.78
有竹节	17.33	0.75	2.1	12.13	10.85

注:1. 平均抗剪强度为含水率为 12%时的抗剪强度;2. 降低比例为试验组强度平均值与无竹节单元组强度的比值.

3 结论

(1)试验测得 4 年生毛竹的抗压弹性模量为

12.73 GPa; 抗拉弹性模量为 12.94 GPa, 顺纹抗拉弹性模量略大于抗压弹性模量。

(2)竹片有竹节顺纹抗拉强度较无竹节抗拉强度降低 7.8%, 竹节削弱了竹材的抗拉强度。

(3)竹片顺纹抗压强度为 58.4 MPa, 圆竹无竹节顺纹抗压强度为 57.0 MPa, 有竹节试样为 60.6 MPa, 采用不同测试单元对测试结果没有太大影响, 在实际应用中可直接采用以竹片为测试单元的试验结果; 有竹节试样较无竹节试样抗压强度提高了 5.9%, 竹节对试样的增强作用并不明显。

(4)圆竹无竹节顺纹抗剪强度为 23.00 MPa, 有竹节试样为 17.33 MPa, 无竹节顺纹抗剪强度较有竹节顺纹抗剪强度提高了 24.65%, 竹节对圆竹抗剪强度降低作用明显。

## 参考文献 References

- [1] 陈溪,许清风,KENT A Harries. 竹材力学性能及其在土木工程中应用的研究进展[J]. 结构工程师,2015,31(6):208-217.  
CHEN Xi, XU Qingfeng, KENT A Harries. Research on mechanical properties and application of bamboo in civil engineering: state of the art [J]. Structural Engineers, 2015,31(6):208-217.
- [2] 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 Dan, WANG Ge, ZHANG Wenfu, et al. Mechanical properties of phyllostachys pubescens [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012,32(7):119-123.
- [3] 马媛媛,朱松松. 安吉毛竹主要力学性能的测定[J]. 实验科学与技术,2013,11(4):22-24.  
MA Yuanyuan, ZHU Songsong. Determination of the mechanical properties of anji moso bamboo [J]. Experiment Science and Technology, 2013, 11(4):22-24.
- [4] 李旭. 楠竹力学性能试验研究及分析[D]. 长沙:湖南大学,2011.  
LI Xu. Test research and analysis on mechanical properties of phyllostachys pubescens[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [5] 李霞镇. 毛竹材力学及破坏特性研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2009.  
LI Xiazhen. Research on mechanics and failure properties of Moso Bamboo [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009.
- [6] 李霞镇,任海青,马少鹏. 基于 DSCM 的竹材顺纹抗拉弹性模量测定[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2011,35(6):107-110.  
LI Xiazhen, REN Haiqing, MA Shaopeng. Modulus of elasticity in tension parallel to grain of bamboo based on DSCM [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2011, 35(6):107-110.
- [7] 张楠,柏文峰. 原竹建筑节点构造分析及改进[J]. 科学技术与工程,2008,8(18):5318-5322,5326.  
ZHANG Nan, BAI Wenfeng. Analyzing and improving the construction of bamboo houses nodes [J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(18):5318-5322,5326.
- [8] 田黎敏,寇跃峰,郝际平,等. 喷涂保温材料——原竹组合楼板抗弯性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2017,45(11):41-45.  
TIAN Limin, KOU Yuefeng, HAO Jiping, et al. Study on flexural behavior of bamboo composite slabs with sprayed thermal insulation material[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017,45(11):41-45.
- [9] XU Q, HARRIES K A, LI X, et al. Mechanical properties of structural bamboo following immersion in water [J]. Engineering Structures, 2014, 81: 230-239.
- [10] 中华人民共和国建设部. 建筑用竹材物理力学性能试验方法:JG/T199-2007[S]. 北京:中华人民共和国建设部,2007.  
Ministry of Construction P. R. China. Testing methods for physical and mechanical properties of bamboo used in building: JG/T199-2007 [S]. Beijing: Ministry of Construction P. R. China. 2007.
- [11] Bamboo Determination of physical and mechanical properties-Part 1: Requirements [S]. ISO 22157-1-2004.
- [12] Bamboo Determination of physical and mechanical properties-Part 2: Laboratory manual [S]. ISO/TR 22157-2-2004.
- [13] 周爱萍,黄东升,车慎思,等. 竹材维管束分布及其抗拉力学性能[J]. 建筑材料学报,2012,15(5):730-734.  
ZHOU Aiping, HUANG Dongsheng, CHE Shensi, et al. Distribution of vascular bundles of bamboo and its tensile mechanical performances[J]. Journal of Building Materials, 2012,15(5):730-734.

(编辑 吴海西)