

# Physical and Mechanical Properties of Bamboo Scrimber

Haida Wang<sup>1</sup>, Wenbo Jia<sup>1</sup>, Yan Liu<sup>1\*</sup>, Xiangyu Su<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Civil Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

<sup>2</sup>Management Committee of Shanghu Innovation Zone, Nantong Jiangsu

Email: \*liuyan@yzu.edu.cn

Received: Jul. 23<sup>rd</sup>, 2020; accepted: Aug. 5<sup>th</sup>, 2020; published: Aug. 12<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Reorganized bamboo is a new material that has been developed and developed in China for nearly ten years and has good application prospects. However, it has not been widely used in the field of building structure. The main reason is that the lack of reconstituted bamboo material meets the design requirements when designing the restructured bamboo structure. The physico-mechanical properties of the reconstituted bamboo materials were studied experimentally. The performance parameters such as density, water content, water absorption/expansion, shear strength and grain compressive strength of the reconstituted bamboo materials were obtained. The design values required for the project were compared with several major building materials. Studies have shown that the reconstituted bamboo material has excellent physical and mechanical properties, but the density is large. The material parameters are close to the TB20 grade wood in the Wood Structure Design Code, which can be used in building structures. However, the application should pay attention to the adverse effects of the reconstituted bamboo material with good water absorption and large water swelling rate.

## Keywords

Bamboo Scrimber, Physical and Mechanical, Experimental Study, Design Value, Comparison

# 重组竹的物理力学性能

王海达<sup>1</sup>, 郝文博<sup>1</sup>, 刘雁<sup>1\*</sup>, 苏相宇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>扬州大学建筑科学与工程学院, 江苏 扬州

<sup>2</sup>上湖创新区管理委员会, 江苏 南通

Email: \*liuyan@yzu.edu.cn

收稿日期: 2020年7月23日; 录用日期: 2020年8月5日; 发布日期: 2020年8月12日

\*通讯作者。

文章引用: 王海达, 郝文博, 刘雁, 苏相宇. 重组竹的物理力学性能[J]. 土木工程, 2020, 9(8): 755-768.

DOI: 10.12677/hjce.2020.98080

## 摘要

重组竹是我国近十年自主研发的性能稳定具有良好应用前景的新材料,但至今未能在建筑结构领域得到较多应用,主要原因是在设计重组竹结构时,缺少重组竹材料符合设计要求的力学性能指标。论文对重组竹材料的物理力学性能进行了试验研究,得到了重组竹材料密度、含水率、吸水性/膨胀性、顺纹抗剪强度和顺纹抗压强度等性能参数,建立了重组竹材料符合工程要求的设计值,并与几种主要建筑材料进行了分析对比。研究表明,重组竹材料物理力学性能优,但密度较大,其材料参数接近《木结构设计标准》中TB20等级木材,可以用于建筑结构。但应用时要注意重组竹材料吸水性好、吸水膨胀率较大的不利影响。

## 关键词

重组竹, 物理力学性能, 试验研究, 设计值, 比较

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国经济的发展,国民环保意识的加强,竹木等自然环保生态的建筑材料越来越受到人们的青睐。我国的竹资源相当丰富,竹林种植面积稳居世界首位。与木材相比,竹材具有生产周期短、再生能力强、质轻高强等优点,以重组竹为代表的现代工程竹出现在民众的视野中。重组竹是将竹材疏解成通长的,相互交联并保持纤维原有排列方式的疏松网状纤维束,经低温干燥至含水率为12%以下,再同方向组坯,经胶合、热压(或冷压)等多种工艺所制成的具有一定规格的高强度、幅面尺寸大、具有天然竹材纹理结构的方材或板材,具备竹材利用率高、物理力学性能优良、外表美观、成本低廉、经济效益好等特点[1]。

目前,重组竹主要用作竹地板、外墙饰面和家具制造等领域,但在结构工程领域应用较少。主要原因是在设计重组竹结构时,缺少重组竹材料符合设计要求的力学性能指标。所以需要重组竹材料进行物理力学性能试验研究,分析重组竹材料的物理力学性能,探讨重组竹在建筑结构领域应用的可能性。论文对重组竹材料的物理力学性能进行了试验研究,得到了重组竹材料密度、含水率、吸水性/膨胀性、顺纹抗剪强度和顺纹抗压强度等性能参数,建立了重组竹材料符合工程要求的设计值。

李海涛、苏靖文等[2]人通过对重组竹方柱墩的轴压试验研究发现,重组竹的顺纹受压性能远高于横纹的两个方向。肖纲要等[3]通过180组重组竹试件的顺纹抗压试验,结果表明重组竹的顺纹抗压荷载-位移曲线表现出典型的塑性发展阶段,采用正态分布能够更好地拟合重组竹顺纹抗压强度的概率分布。周军文等[4]对5组不同工况下的重组竹试件进行了横纹局压试验,结果表明,重组竹横纹局压极限承载力比较稳定,其变异系数均小于0.1;承压区周围的围压面越多,其承载力越大。朱彦等[5]开展了重组竹高温环境下单轴抗压试验,结果表明在高温环境下,重组竹顺纹和横纹抗压强度折减与欧洲规范EN1995-1-2给出木材高温抗压强度折减规律类似。柯勇涛[6]通过对重组竹立方体三个方向进行受压试验,测得的弹性常数满足玛克斯威尔定理式,得出正交各向异性体模型适用于结构用重组竹柱结构的力学性能研究,故本文仅进行重组竹顺纹方向的受压试验。

## 2. 材料与方法

试件材料来源于江西春红竹业科技有限公司，所有材料试件均同一批次，并且随机选取。

### 2.1. 重组竹密度测定

由于目前国内没有相关的重组竹密度测定标准，所以重组竹密度测定试验参考《木材密度测定方法》(GB/T1933-2009) [7]，制作了 6 个尺寸为 40 mm × 30 mm × 150 mm 的小试件，编号分别为 MD1-6，试验开始前先用纸巾将试件表面灰尘等杂物擦拭干净，之后放置于阴凉通风处自然风干。在 101-4A 型电热恒温鼓风干燥箱中进行，分别测定全干状态和气干状态下重组竹密度，其中气干密度为自然风干后的试件密度，全干密度为试件在(103℃ ± 2℃)条件下烘 48 h 后的密度，试验装置如图 1 所示。



Figure 1. Specimen in oven

图 1. 烘箱中的试件

### 2.2. 重组竹含水率测定

重组竹含水率测定试验参考《木材含水率测定方法》(GB/T1931-2009) [8]，制作了 6 个尺寸为 40 mm × 30 mm × 150 mm 的试件，编号为 HSL1-6，采用烘干法测试试件含水率，试验所使用的仪器为：TE3102S 型电子秤、101-4A 型电热恒温鼓风干燥箱。

### 2.3. 重组竹吸水性、湿胀性测定

重组竹吸水性、湿胀性测定试验参考《木材吸水性测定方法》(GB/T1934-2009) [9]和《木材湿胀性测定方法》(GB/T1934-2009) [10]，制作 12 个尺寸为 40 mm × 30 mm × 150 mm 的试件，分别标记为 XS1-6、SZ1-6。试验所使用的仪器为：游标卡尺、TE3102S 型电子秤、101-4A 型电热恒温鼓风干燥箱，XMTS-9000 型标准恒温水浴箱。具体湿胀性试验步骤如下：

1) 使用游标卡尺记录试件 SZ1-6 的尺寸，试件尺寸用字母  $b$ 、 $h$ 、 $l$  表示，其中  $l$  方向为顺纹方向、 $h$  方向为竹篾压合方向、 $b$  方向为垂直于竹篾压合方向，尺寸记为  $b_w$ 、 $h_w$ 、 $l_w$  (精确至 0.001 mm)；

2) 将试件 SZ1-6 放入到干燥箱内，并在(60 ± 2)℃ 的温度下烘 8 h 后，将其取出、称重、记录。规定干燥温度为(103 ± 2)℃，实际试验过程中发现，重组竹材耐高温性能较差，高温干燥后试件沿顺纹方向爆裂，导致结构变形、体积膨胀，为避免出现类似情况，本次试验默认(60 ± 2)℃ 烘 8 h 后试件已经是足干状态，以保证试件不受高温损伤，增加吸水饱和后测量数据的可信度。记录足干状态下的试件质量  $m_0$ ；

3) 再次使用游标卡尺量测烘干后试件的尺寸，记录为  $b_0$ 、 $h_0$ 、 $l_0$ ；

4) 将试件 SZ1-6 放入恒温水箱，设置水温(20 ± 2)℃，相对湿度(65 ± 3)%。在吸湿过程中，用 2~3

个试件，每隔 6 h 试测一次顺纹尺寸  $l$  的变化，至两次测量结果之差不超过 0.2 mm 时，可以认定尺寸达到稳定。取出试件，用纸巾将试件表面水分轻轻擦去，再次使用游标卡尺测量试件尺寸，记录为  $b_{\max}$ 、 $h_{\max}$ 、 $l_{\max}$ 。

## 2.4. 重组竹垂直剪切试验

市面重竹板材大多是竹篾压合而成，本文对重组竹主篾压合方向的垂直抗剪强度值进行了试验，重组竹垂直剪切试验参考《ASTMD143-14》[11]，制作 6 个重组竹试件进行试验，试件的尺寸为：40 mm × 30 mm × 200 mm，试件编号为 KJ1-6，试验在 NDS100 电子万能试验机上进行，如图 2 所示，具体试验步骤如下：

- 1) 运用游标卡尺测量试件中央的宽度  $b$  和厚度  $h$ ，精确至 0.001 mm；
- 2) 调节支座跨距为试件公称厚度的 4 倍即 120 mm，加载辊直径 10 mm，支承辊直径 30 mm；
- 3) 将试件装入试验装置中，调整试件在试验装置中的位置，使试件上表面的中线与试验装置中加载辊直径的中线重合，以保证轴心传力；
- 4) 试验加载速度由位移控制，以约 2 mm/min 均匀速度控制加荷，直至试件破坏时，记下最大荷载值。

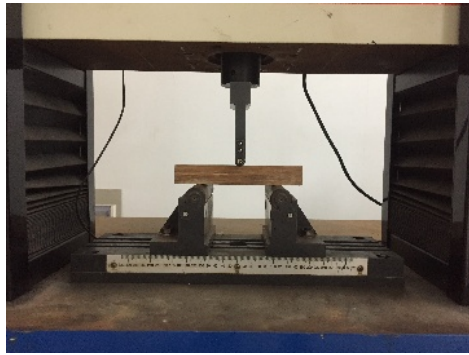


Figure 2. Vertical shear test map of Bamboo Scrimber  
图 2. 重组竹垂直剪切试验图

## 2.5. 重组竹顺纹抗压试验

试验主要参考《木材物理力学性质试验方法总则》[12]、《木材顺纹抗压强度试验方法》[13]、《木结构试验方法标准》[14]、《木材顺纹抗压弹性模量测定方法》[15]进行。

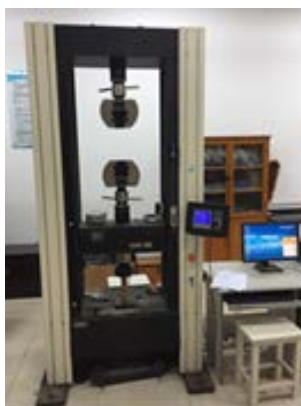
制作了 10 根尺寸为 40 mm × 40 mm × 200 mm 的标准试件进行重组竹的顺纹抗压试验，编号分别为 KY1-10。试验采用主要设备为 WDW-300 电子万能试验机，在试件的 4 个表面中部横向和纵向分别粘贴电阻应变片，通过 TS3861 静态电阻应变仪记录应变数值，从而完成抗压强度、弹性模量及泊松比的试验。重组竹顺纹抗压试验装置见图 3。

具体试验步骤如下：

- 1) 用游标卡尺测量试件中部的宽度和厚度，精确至 0.01 mm；
- 2) 在试件的 4 个面中部用砂纸打磨平整，将打磨后的试件表面擦拭干净后，用 502 胶水将应变片沿顺纹和横纹方向黏贴至试件 4 个面的中部，分别用于测量 4 试件受压时 4 个面的纵向应变和横向应变，测量值可以计算弹性模量和泊松比。本次试验采用 120-3AA 型免焊应变片，将应变片的接引线通过导线连接到静态电阻应变仪上，为保证试验精度，应变仪不出现跳表，应变片引接线和长导线连接时，使用电烙铁焊接。将试件四个侧面沿顺时针方向标定为 A、B、C、D 面，将应变片分别编号为 1-8；

3) 将试件放置在 WDW 电子万能试验机上, 调整试件在试验装置中的位置, 使试件的轴线与试验装置的中线重合, 保证轴心力的传递;

4) 设置好加载方案: 先采用力控制 600 N/s 的均匀速度进行加载, 目标力控制 40 kN, 在 10 kN 和 40 kN 处设置保载, 保载试件控制 30 s, 用以读取和记录应变仪读数, 测定受压弹性模量; 40 kN 后采用位移控制加载速度 1.5 mm/s, 直至试件破坏, 结束条件设置断裂百分比 40%。观察试验现象, 采集试验数据并填入记录表中。



**Figure 3.** Test apparatus for compressive resistance along grain of Bamboo Scrimber

**图 3.** 重组竹顺纹抗压试验装置

### 3. 试验结果与分析

#### 3.1. 重组竹密度测定

分别测定全干状态和气干状态下重组竹密度, 其中气干密度为自然风干后的试件密度, 全干密度为试件在  $60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  条件下烘 8 h 后的密度, 重组竹试件风干密度及全干密度如表 1 所示。

由表 1 可知: 重组竹材气干密度平均值为  $1.204 \text{ g/cm}^3$ , 全干密度为  $1.081 \text{ g/cm}^3$ , 可见重组竹较为致密, 密度超过大部分木材。而同等条件下毛竹密度为  $0.869 \text{ g/cm}^3$ , 与重组竹密度相比, 减小了 27.8%, 表明重组竹具有较大的容重, 密度和重木相当, 密实性要好于毛竹。

**Table 1.** Dry density and total dry density of Bamboo Scrimber

**表 1.** 重组竹气干密度、全干密度

试件编号	气干密度 $\text{g/cm}^3$	全干密度 $\text{g/cm}^3$
MD1	1.221	1.074
MD2	1.060	0.947
MD3	1.283	1.159
MD4	1.261	1.180
MD5	1.190	1.060
MD6	1.210	1.064
平均值	1.204	1.081
标准差	0.072	0.076
变异系数	5.95%	7.03%

### 3.2. 重组竹含水率测定

重组竹试件气干状态下的含水率，按式(1)进行计算，精确至 0.1%:

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} \quad (1)$$

式中， $w$ —试件的含水率，%；

$m_w$ —试件含水率为  $w\%$  时的质量，单位 g；

$m_0$ —试件全干时的质量，单位 g。

表 2 列出了重组竹的含水率。由表 2 可知，重组竹材的平均含水率为 6.6%。

**Table 2.** Moisture content of Bamboo Scrimber  
**表 2.** 重组竹含水率

试件编号	气干质量/g	全干质量/g	含水率/%
HSL1	215.652	201.356	7.1
HSL2	191.705	179.500	6.8
HSL3	224.568	211.458	6.2
HSL4	217.784	204.877	6.3
HSL5	208.417	195.513	6.6
HSL6	210.126	196.932	6.7
平均值	—	—	6.6
标准差	—	—	0.3
变异系数	—	—	4.5%

### 3.3. 重组竹吸水性、湿胀性测定

重组竹试件的吸水率，按式(2)进行计算，精确至 0.1%:

$$A = \frac{m_{\max} - m_0}{m_0} \times 100 \quad (2)$$

式中， $A$ —试件的吸水率，%；

$m_{\max}$ —试件吸水后的质量，单位 g；

$m_0$ —试件全干时的质量，单位 g。

重组竹试件的吸水率如表 3 所示。由表 3 可知，重组竹吸水率为 12.8%，

**Table 3.** Water absorption rate of Bamboo Scrimber  
**表 3.** 重组竹吸水率

试样编号	试件全干后质量/g	浸水饱和后质量/g	吸水率/%
XS1	201.356	228.323	13.4
XS2	208.044	234.466	12.7
XS3	211.458	236.842	12.0
XS4	204.877	229.828	12.2
XS5	195.513	222.093	13.6
XS6	196.932	222.189	12.9
平均值	—	—	12.8
标准差	—	—	0.6
变异系数	—	—	4.5%

湿胀率可以分为线湿胀率  $a$  和体积湿胀率  $a_V$ ，也可以分为从全干到气干湿胀率  $a_w$ 、 $a_{V_w}$  和从全干到吸水至尺寸稳定的湿胀率  $a_{\max}$ 、 $a_{V_{\max}}$ 。受地理位置、季节、时间每天的影响，气干湿胀率会产生波动，本文仅计算了从全干到吸水至尺寸稳定的顺纹方向的线湿胀率  $a_{\max}$  和体积湿胀率  $a_{V_{\max}}$ 。重组竹试件的湿胀性测试记录表如表 4 所示。

**Table 4.** Recombination bamboo swelling measurement record  
**表 4.** 重组竹湿胀性测定记录表

试样 编号	试样尺寸/mm										
	全干时				气干时			吸水后			
	$b_0$	$h_0$	$l_0$	$V_0$	$b_w$	$h_w$	$l_w$	$b_{\max}$	$h_{\max}$	$l_{\max}$	$V_{\max}$
SZ1	4.230	2.938	14.852	184.577	4.070	2.950	14.860	4.342	2.960	14.890	191.370
SZ2	4.212	2.940	14.844	183.817	4.068	2.966	14.858	4.320	2.988	14.862	191.841
SZ3	4.156	2.958	14.778	181.673	4.018	2.962	14.766	4.258	2.966	14.788	187.696
SZ4	4.080	2.930	14.558	174.032	3.988	2.984	14.550	4.196	2.968	14.569	181.426
SZ5	4.214	2.918	14.668	180.364	4.070	2.960	14.688	4.328	2.952	14.720	188.066
SZ6	4.264	2.970	14.438	182.844	4.062	2.936	14.458	4.374	2.982	14.466	188.684

重组竹试件的线湿胀率，按式(3)进行计算，精确至 0.1%:

$$a_{\max} = \frac{l_{\max} - l_0}{l_0} \times 100 \quad (3)$$

式中： $a_{\max}$ —试件吸水至尺寸稳定时顺纹方向的线膨胀率，%；  
 $l_{\max}$ —试件吸水至尺寸稳定时顺纹方向的长度，单位 mm；  
 $l_0$ —试件足干时顺纹方向的长度，单位 mm。

重组竹试件的体积湿胀率，按式(4)进行计算，精确至 1%:

$$a_{V_{\max}} = \frac{V_{\max} - V_0}{V_0} \times 100 \quad (4)$$

式中： $a_{V_{\max}}$ —试件从全干到吸水至尺寸稳定时的体积膨胀率，%；  
 $V_{\max}$ —试件吸水至尺寸稳定时的体积，单位  $\text{mm}^3$ ；  
 $V_0$ —试件足干时的体积，单位  $\text{mm}^3$ 。

重组竹试件的湿胀率如表 5 所示。

**Table 5.** Linear expansion rate and volume expansion rate of Bamboo Scrimber  
**表 5.** 重组竹线膨胀率、体积膨胀率

试件 编号	线湿胀率 $a_{\max}/\%$			体积湿胀率 $a_{V_{\max}}/\%$
	$b$ 方向	$h$ 方向	$l$ 方向	
SZ1	2.6	0.7	0.3	3.7
SZ2	2.6	1.6	0.1	4.4
SZ3	2.5	0.3	0.1	3.3
SZ4	2.8	1.3	0.1	4.2
SZ5	2.7	1.2	0.4	4.3

Continued

SZ6	2.6	0.4	0.2	3.2
平均值	2.6	0.9	0.2	3.9
标准差	0.2	0.5	0.1	0.5
变异系数	—	—	—	12.8%

注:  $h$  方向为顺纹方向、 $b$  方向为竹篾压合方向、 $l$  方向为垂直于竹篾压合方向,  $V$  为试件体积。

由表 5 可知, 重组竹体积湿胀率为 3.9%, 沿竹丝篾合方向的线湿胀率最大, 为 2.6%。重组竹遇水易变形, 应在重组竹产品表面做好防水措施。

### 3.4. 重组竹垂直剪切试验

在加载的初期, 随着载荷的增减, 在试件的中部出现微小的变形; 在加载中期, 试件的变形随着载荷的增大而增加, 并伴随有轻微的响声; 在加载的后期, 试件发出连续轻响, 并在试件下端中部产生裂缝, 并不断扩散, 达到极限状态之后, 突然发生破坏并伴随有很大的响声, 破坏后的试件见图 4。



Figure 4. Test piece after shear failure

图 4. 剪切破坏后的试件

重组竹试件顺纹抗剪强度按式(5)确定:

$$\tau = \frac{3F}{4bh} \quad (5)$$

式中:  $\tau$ —抗剪强度(MPa);

$F$ —试件最终破坏时的荷载(N);

$b$ —垂直加载时的试件宽度(mm);

$h$ —垂直加载时的试件厚度(mm)。

将重组竹垂直加载剪切强度试验的数据进行整理分析, 如表 6 所示。由表 6 可知, 重组竹抗剪强度为 14.8 MPa。

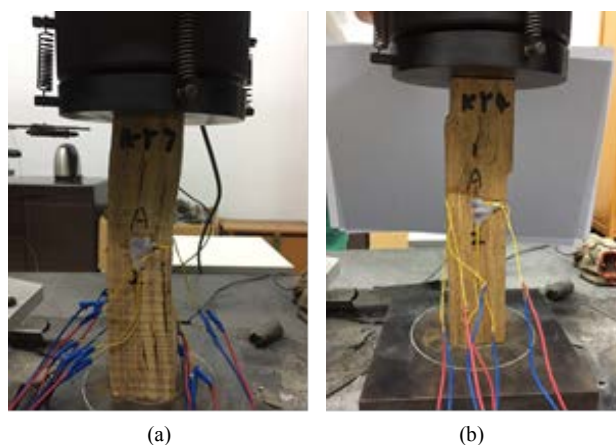
### 3.5. 重组竹顺纹抗压试验

在加载初期, 试件为弹性阶段, 变形随着载荷的增加而线性增大; 随着载荷的增加, 试件进入弹塑性阶段, 试件变形值增幅明显快于荷载增量, 试件开始出现轻微的响声, 并且在试件的表面出现凸起和褶皱现象; 进入塑性阶段后, 试件纤维缓慢撕裂, 发出连续、清脆的响声; 随着荷载的进一步增加, 试件表面的应变片逐渐出现损坏, 褶皱越发明显, 直至破坏。试件的最终破坏形态可分压屈破坏和压剪破坏(图 5)。



**Table 6.** Vertical shear failure load and shear strength of Bamboo Scrimber  
**表 6.** 重组竹垂直剪切破坏荷载和抗剪强度

试件编号	试件尺寸 $b \times h$ (mm $\times$ mm)	破坏荷载(kN)	抗剪强度 $f_t$ (MPa)
KJ1	40.40 $\times$ 29.40	22.893	14.46
KJ2	40.54 $\times$ 29.26	22.454	14.20
KJ3	40.10 $\times$ 28.98	24.730	15.96
KJ4	40.82 $\times$ 29.08	22.308	14.09
KJ5	40.44 $\times$ 29.38	23.129	14.60
KJ6	41.24 $\times$ 29.18	24.847	15.49
平均值	—	—	14.80
标准差	—	—	0.69
变异系数	—	—	4.65%



**Figure 5.** Failure modes of Bamboo Scrimber specimens under longitudinal compression. (a) Buckling failure; (b) Compression shear failure

**图 5.** 重组竹顺纹受压试件破坏形态。(a) 压屈破坏；(b) 压剪破坏

试件产生不同破坏形态的可能原因是，重组竹是一种人工合成材料，不同试件重组存在一定差异，导致材料内部的受力机理也会有所不同，最终材料破坏形态与破坏机理也不尽相同。二种破坏形态，裂纹附近的纵向纤维都会发生局部屈曲。

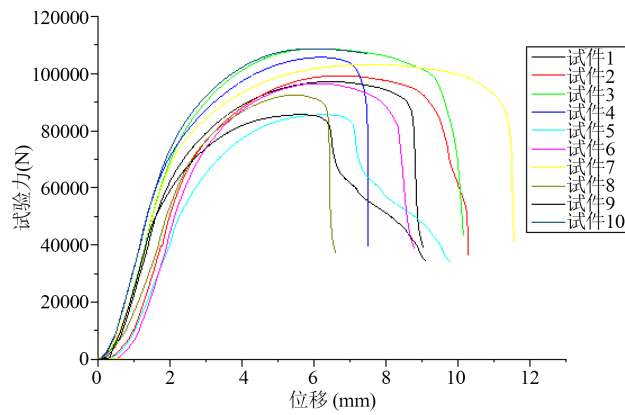
重组竹试件的荷载 - 位移曲线见图 6，由图 6 可知重组竹试件沿顺纹方向受压的变化趋势基本相同，经历了弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段和开裂破坏阶段；重组竹荷载 - 位移曲线经历了上升段、稳定阶段和下降段，其中上升段又分为弹性阶段和弹塑性阶段。

对于本文所研究的重组竹构件而言，由于国内外关于竹木构件规范或规程尚未进行竹构件延性方面的研究，未给出竹构件位移延性系数的计算公式，因此本文借鉴混凝土延性系数的特性，将其推广到结构用重组竹构件中，即选用构件位移延性系数来评价结构用重组竹柱的抗震性能。通过文献[6]中几何作图法(图 7)获得试件的屈服位移。位移延性系数求解公式如下：

$$DI = \Delta\mu / \Delta y \quad (6)$$

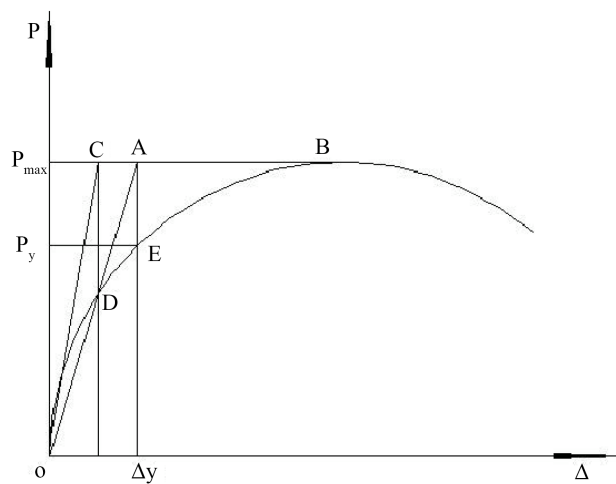
式中： $DI$ —重组竹位移延性系数；

$\Delta\mu$  —重组竹极限位移(mm);  
 $\Delta y$  —重组竹屈服位移(mm)。



**Figure 6.** Load-Displacement Curve of Bamboo Scrimber specimens under longitudinal compression

**图 6.** 重组竹顺纹受压荷载 - 位移曲线



**Figure 7.** Geometrograph

**图 7.** 几何作图法

从表 7 可知重组竹构件的延性系数均值为 3.99，标准差为 0.21，变异系数为 5.16%，表现出良好的延性性能，这对于将结构用重组竹推广到抗震设防区和灾区重建项目中具有重要的意义。

**Table 7.** Displacement ductility coefficient of bamboo scrimber

**表 7.** 重组竹位移延性系数

试件编号	屈服位移 $\Delta y$ /mm	极限位移 $\Delta\mu$ /mm	位移延性系数(DI)
KY1	2.06	8.76	4.25
KY2	2.24	9.35	4.17
KY3	2.33	9.61	4.12
KY4	1.97	7.48	3.80
KY5	1.88	7.12	3.78

Continued

KY6	2.12	8.37	3.95
KY7	2.76	11.31	4.10
KY8	1.73	6.42	3.71
KY9	1.89	9.12	3.81
KY10	1.78	8.89	4.17
平均值	—	—	3.99
标准差	—	—	0.21
变异系数	—	—	5.16%

试验结束之后,木材的抗压强度 $f_c$ ,通过最终破坏载荷除以试件的实际面积得到,计算方法如下:

$$f_c = \frac{P_u}{A} \quad (7)$$

式中, $f_c$ —为试样含水率为 $w\%$ 时的抗压强度,单位 MPa;

$P_u$ —为极限载荷,单位 N;

$A$ —为试件的横截面积,根据 $A = b \times h$ 得到,单位  $\text{mm}^2$ ;

$b$ —为试件截面的宽度,单位 mm;

$h$ —为试件截面的厚度,单位 mm。

试件的受压弹性模量 $E_c$ ,根据循环加载的试验测得的变形值增量的平均值,再用载荷值之差与它的比值,即可得到,计算方法如下:

$$E_c = \frac{\Delta F}{\Delta \varepsilon A} \quad (8)$$

式中, $E_c$ —木材顺纹抗压弹性模量,单位  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;

$A$ —试件截面的实际面积,根据 $A = b \times h$ 得到,单位  $\text{mm}^2$ ;

$\Delta F$ —荷载增量,在比例极限以下,其值为 $\Delta F = F_1 - F_2$ ,单位 N;

$\Delta \varepsilon$ —在荷载增量 $\Delta F$ 作用下的压缩应变增量,取四个面的平均值。

按照公式(9)计算试件在弹性阶段的泊松比:

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right| \quad (9)$$

式中, $\mu$ —试件的泊松比;

$\varepsilon'$ —试件弹性阶段的横向应变;

$\varepsilon$ —试件弹性阶段的纵向应变。

表 8 列出了重组竹顺纹抗压试验的极限荷载、抗压强度、弹性模量和泊松比。由表 8 可知,重组竹顺纹抗压试验的抗压强度平均值为 57.35 MPa,弹性模量平均值为 11,809.32 MPa,泊松比为 0.384。

我国暂时还没有关于重组竹材料强度标准值的计算公式,故参考《木结构设计手册》[16]进行重组竹强度标准值计算。

$$f_{ck} = m - 2.104S \quad (10)$$

式中: $f_{ck}$ —重组竹顺纹抗压强度标准值(MPa);

$m$ —重组竹顺纹抗压强度平均值(MPa);

$S$ —重组竹顺纹抗压强度标准差。

由式(10)和表 8, 得到  $f_{ck}$  为 54.95 MPa。

**Table 8.** Parameters related to compressive resistance test of Bamboo Scrimber  
**表 8.** 重组竹顺纹抗压试验相关参数

试件 编号	极限荷载 $P$ (KN)	抗压强度 $f_c$ (MPa)	弹性模量 $E$ (MPa)	泊松比 $\mu$
KY1	96.51	56.69	10,577.00	0.338
KY2	102.96	56.16	11,467.25	0.360
KY3	106.99	59.32	10,570.50	0.393
KY4	100.53	58.44	10,903.25	0.435
KY5	94.05	55.87	13,291.82	0.358
KY6	92.36	57.05	11,398.20	0.408
KY7	99.77	58.36	12,411.50	0.425
KY8	94.23	56.92	13,828.55	0.353
KY9	95.56	58.34	11,479.67	0.346
KY10	93.49	56.36	10,683.89	0.367
平均值	—	57.35	11,809.82	0.384
标准差	—	1.14	1161.80	0.034
变异系数	—	1.99%	9.84%	8.91%

通过公式(11)计算得出重组竹顺纹抗压强度设计值  $f_c$ 。

$$f_c = Kf_{ck} \quad (11)$$

式中:

$$K = K_p K_A K_Q / \gamma_R \quad (12)$$

$$K_Q = K_{Q1} K_{Q2} K_{Q3} K_{Q4} \quad (13)$$

式中:  $K$ —修正系数;  $f_c$ —重组竹顺纹抗压强度设计值;  $\gamma_R$ —抗力分项系数, 取 1.45;  $K_p$ —方程精确性影响系数;  $K_A$ —尺寸影响系数;  $K_Q$ —材料强度折减系数;  $K_{Q1}$ —天然缺陷影响系数;  $K_{Q2}$ —干燥缺陷影响系数;  $K_{Q3}$ —长期荷载对强度影响系数;  $K_{Q4}$ —尺寸影响系数。各影响系数取值参考了张秀华[17]的理论计算, 见表 9。

**Table 9.** Scrimber Reduction factor of compressive strength of Bamboo Scrimber under compression  
**表 9.** 重组竹顺纹受压强度折减系数

材料	$K_p$	$K_A$	$K_{Q1}$	$K_{Q2}$	$K_{Q3}$	$K_{Q4}$	$\gamma_R$
重组竹	1.00	0.96	0.80	1.00	0.67	1.00	1.45

由式(11)和表 9, 计算得到顺纹抗压强度设计值  $f_c$  为 19.68 MPa。

#### 4. 典型材料的对比分析

由以上得出的重组竹数据与混凝土[18]、其他种类的木材[19] [20] [21]数据进行对比, 数据见表 10。

**Table 10.** Comparison of physical and mechanical properties of reconstituted bamboo and concrete, wood  
**表 10.** 重组竹与混凝土, 木材的物理力学性能对比

类别	混凝土			木材				TB20 强度等级
	C30	C40	LVL	花旗松	落叶松	樟子松	重组竹	
密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.36	2.40	0.57	0.463	0.51	0.46	1.204	
抗压强度(N/mm <sup>2</sup> )	20.10	26.80	27.83	45.47	41.00	52.60	57.35	36
弹性模量(×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	3.00	3.25	1.11	0.73	1.11	0.91	1.18	1.20

分析表 10, 可以得出:

1) 在与其他典型材料密度的对比中, 重组竹的密度小于 C30、C40 混凝土的密度, 大于其他 5 种木材的密度; 相较于混凝土, 重组竹具有质轻的优点;

2) 重组竹在表中 5 种木材中, 密度最大, 密实度高; 顺纹抗压强度最大, 顺纹抗压强度高; 顺纹弹性模量最大, 刚度大, 有很好的抵抗变形的能力; 重组竹的强度指标接近《木结构设计标准》[22]中 TB20 的强度等级。

## 5. 结论

通过试验得出: 重组竹的气干密度为 1.204 g/cm<sup>3</sup>, 平均含水率为 6.6%, 吸水率为 12.8%, 体积湿胀率为 3.9%, 垂直剪切强度标准值为 12.94 MPa, 顺纹抗压强度标准值为 57.35 MPa, 顺纹抗压强度设计值为 19.68 MPa, 泊松比为 0.384, 顺纹弹性模量为 11,810 MPa, 位移延性系数为 3.99。重组竹的强度指标接近《木结构设计规范》中 TB20 的强度等级, 对试验现象和结果进行了分析, 得出如下结论:

- 1) 相较于其他木材, 重组竹密度大, 密实度高, 材质均匀;
- 2) 重组竹吸水性能好, 吸水膨胀率较大, 工程中需做好重组竹材遇水变形的预防工作。
- 3) 重组竹垂直剪切强度标准值远低于顺纹抗压强度标准值, 工程中需充分发挥重组竹的抗压性能好的特点, 减少重组竹的剪切受力;
- 4) 重组竹材性均匀, 变异小, 具备良好的物理力学性能, 可以作为建筑材料。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(51878590)。

## 参考文献

- [1] 李琴, 华锡奇, 戚连忠. 重组竹发展前景展望[J]. 竹子研究汇刊, 2001, 20(1): 76-80.
- [2] 李海涛, 苏靖文, 魏冬冬, 等. 基于大尺度重组竹试件各项轴压力学性能研究[J]. 郑州大学学报, 2016, 37(2): 67-72.
- [3] 肖纲要, 李霞镇, 钟永. 结构用重组竹的顺纹抗压力学性能试验研究[J]. 木材加工机械, 2019, 30(3): 4-8.
- [4] 周军文, 黄东升, 沈玉蓉. 重组竹横纹局部受压承载力试验研究[J]. 林业工程学报, 2018, 3(1): 123-127.
- [5] 朱彦, 卞玉玲, 周爱萍, 黄东升. 重组竹高温下单轴抗压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2020.
- [6] 柯勇涛. 结构用重组竹框架结构柱试验研究与分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2014.
- [7] 全国木材标准化技术委员会. GB/T1933-2009 木材密度测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [8] 全国木材标准化技术委员会. GB/T1931-2009 木材含水率测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [9] 全国木材标准化技术委员会. GB/T1934.1-2009 木材吸水性测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [10] 全国木材标准化技术委员会. GB/T1934.2-2009 木材湿胀性测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [11] (2014) Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber (ASTMD143-14). ASTM Special Technical Pub-

lication, Philadelphia.

- [12] 全国木材标准化技术委员会. GB/T1928-2009 木材物理力学试验方法总则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [13] 全国木材标准化技术委员会. GB/T1935-2009 木材顺纹抗压强度试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [14] 中华人民共和国国家标准. GB/T50329-2012 木结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [15] 中华人民共和国国家标准. GB/T15777-1995. 木材顺纹抗压弹性模量测定方法[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [16] 龙卫国. 木结构设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [17] 张秀华, 鄂婧, 李玉顺. 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.
- [18] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [19] 刘雁, 王洪鹤, 丁佩蓉, 等. 意杨旋切板胶合木材料的物理力学性能[J]. 林产工业, 2017, 44(2): 12-16.
- [20] 曹海. 花旗松工程木的材性研究[J]. 黄山学院学报, 2010, 12(5): 95-97.
- [21] 邢新婷, 张赛男, 赵川, 等. 日本落叶松进口木材主要物理力学性质研究[J]. 木材加工机械, 2017(1): 9-12 + 16.
- [22] 全国木材标准化技术委员会. GB/T50005-2017 木结构设计标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.