

文章编号:1671-6833(2016)02-0067-06

# 基于大尺度重组竹试件各向轴压力学性能研究

李海涛<sup>1</sup>, 苏靖文<sup>1</sup>, 魏冬冬<sup>2</sup>, 张齐生<sup>1</sup>, 陈 国<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 江西飞宇竹业集团有限公司, 江西 奉新 330700)

**摘 要:** 对大尺度重组竹试件进行了 3 个方向轴心受压试验研究与分析,探讨了其破坏机理及所测参量之间的相互关系. 竹重组材的受压破坏属于延性破坏,沿 3 个方向的破坏过程均经历弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段和破坏阶段;但破坏阶段有所区别. 试件各向受压的最终破坏形态较接近,均出现沿对角线方向的主裂缝. 顺纹方向的实测抗压强度、弹性模量和泊松比值最大,离散性较大;横纹方向 I 的抗压强度稍大于横纹方向 II 的抗压强度,但其弹性模量和泊松比比横纹方向 II 对应的值要小. 基于试验结果,给出了各个方向抗压强度、弹性模量和泊松比相互之间对应的关系.

**关键词:** 竹材重组材;轴心抗压;破坏机理;抗压强度;弹性模量;泊松比

**中图分类号:** TU398

**文献标志码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.201412053

## 0 引言

重组竹是将竹材<sup>[1-3]</sup>疏解成通长的、相互关联并保持纤维原有排列方式的疏松网状纤维束,再经干燥、施胶、组坯成型后热压而成的板状或其他形式的材料<sup>[4-6]</sup>. 这种材料强度高,材质均匀,长度、密度可根据需要任意控制,加工性能好,可满足建筑结构对材料物理力学性能的需求. 不少学者<sup>[4-14]</sup>对竹重组材的制造、加工及基本力学性能展开了初步研究,但目前国内外没有重组竹相关试验标准及建筑设计标准,在建筑上的应用研究较少,大量基本理论还没建立,人类对这种材料的破坏机理和本构模型的了解很有限. 现有研究多数基于小尺度试件. 苏靖文等<sup>[4]</sup>对重组竹轴心受压柱进行了试验研究与分析. 李海涛等<sup>[5]</sup>对重组竹偏心受压柱进行了试验研究与分析. 张俊珍等<sup>[6]</sup>对重组竹横纹抗压强度和顺纹抗压强度进行了试验研究与分析,但所选择的尺寸截面仅为 20 mm × 20 mm. 重组竹应用到建筑领域的梁柱构件中,均以大尺度试件为主,而在大尺度下,重组竹的受压力学性能如何鲜有文献报道. 试件尺寸越大,所含缺陷越多,其破坏机理同小尺寸有所区

别,并且尺寸越大越能反映重组竹的整体力学性能. 基于此,笔者对重组竹三个方向轴心受压力学性能展开了试验研究与分析,借以探讨重组竹的破坏机理.

## 1 试验情况

### 1.1 试件设计与制作

试验用毛竹产自江西奉新,竹重组材的生产厂家为“江西省飞宇竹业集团有限公司”. 设计试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm,共 18 个,根据加载方向不同,将其分成 3 组,每组 6 个试件. 3 个加载方向见图 1,其中 1 为顺纹方向(竹纤维束方向),2 为横纹方向 I (原竹筒弦向),3 为横纹方向 II (原竹筒径向). 为了保证试件材性

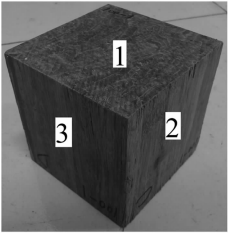


图 1 竹重组材试件

Fig. 1 Parallel bamboo strand lumber specimen

收稿日期:2014-12-29;修订日期:2015-04-19

基金项目:教育部博士点基金资助项目(20123204120012);住建部科技资助项目(2014k4023);江苏省住建厅科技项目(JS2012ZD34);江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介:李海涛(1982—),男,河南临颍人,南京林业大学副教授,博士后,主要从事竹木结构、混凝土结构、复合材料结构等相关研究工作,E-mail:lhaitao1982@126.com.

引用本文:李海涛,苏靖文,魏冬冬,等. 基于大尺度试件重组竹各向轴压力学性能研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2016,37(2):67-72.

稳定,统一选取梢部原竹制作竹重组材短柱试件.实测的密度为  $990.2\text{ kg/m}^3$ ,实测含水率为  $7.8\%$ .

1.2 试验加载制度

依据 GB/T 50329—2012<sup>[15]</sup> 进行加载制度设计和试验.试验现场图如图 2.试件加载初期采用荷载控制,当荷载达到极限荷载大约 80% 左右,改为位移控制.试验从加载到破坏所用时间控制在  $5\sim 10\text{ min}$ .试件就位后,首先进行几何对中,使加载的作用线和构件的几何中心对齐,以保证轴压,然后通过预加载来检测仪器是否工作正常并减少系统误差.

1.3 测点布置

试件 4 个侧面中间位置均粘有两个应变片(见图 2),用以测量 4 个面中间点竖向和横向的应变变化.本次试验采用非接触式激光位移计(LDS,见图 2)来测试件的轴向变形.试验采用的

加载仪器为  $100\text{ t}$  电液伺服万能试验机,采集仪器为 TDS530 数据自动采集系统.

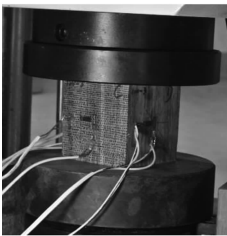


图 2 试验现场图  
Fig.2 Real test photo

2 试验结果与分析

所有试件顶面标示有“\*”.顺纹方向,以一个侧面(弦向)记为 A 面,围绕试件竖直方向轴线顺时针依次标上 A、B、C、D.横纹方向Ⅰ和Ⅱ,均以一侧(顺纹)记为 A 面,围绕试件竖直方向轴线顺时针依次标上 A、B、C、D.主要试验结果见表 1.

表 1 试验结果  
Tab.1 Test results

试件编号	极限承载力/kN	实测面积/ mm <sup>2</sup>	极限强度 /MPa	弹性模量 /MPa	A 面(C 面) 泊松比	B 面(D 面) 泊松比
1-100-1	625.1	10 112	61.8	11 640	0.270	0.205
1-100-2	692.0	10 089	68.6	11 208.5	0.275	0.340
1-100-3	639.5	10 058	63.6	12 238.3	0.315	0.280
1-100-4	622.0	10 066	61.8	11 656.3	0.470	0.395
1-100-5	718.6	10 111	71.1	13 051.8	0.275	0.550
1-100-6	638.5	10 084	63.3	10 510.4	0.270	0.365
2-100-1	234.3	10 222	22.9	886.9	0.141	0.042
2-100-2	274.6	10 100	27.2	834.3	0.098	0.031
2-100-3	255.6	10 095	25.3	960.0	0.153	0.033
2-100-4	240.0	10 081	23.8	842.6	0.168	0.023
2-100-5	261.6	10 127	25.8	834.3	0.160	0.035
2-100-6	244.0	10 128	24.1	712.4	0.111	0.021
3-100-1	216.9	9 955.6	21.8	1536.7	0.165	0.055
3-100-2	190.0	10 110	18.8	1 488.0	0.200	0.045
3-100-3	220.1	10 030	21.9	1 669.7	0.329	0.061
3-100-4	209.2	9 928.5	21.1	1 567.7	0.302	0.071
3-100-5	225.2	9 924.9	22.7	1 723.8	0.191	0.057
3-100-6	211.9	9 842.3	21.5	1 707.8	0.203	—

2.1 顺纹方向

选取典型试件 1-100-6 描述其破坏过程如图 3 所示.在加载初期,材料基本处于弹性状态,试件表面无明显现象,四侧面中心的应变值基本相等;随着荷载的增加,试件由弹性阶段逐步进入弹塑性阶段,试件表现出一定的塑性变形,刚度有所降低,变形渐趋明显;当荷载增加至极限承载力附近时,可听到明显竹丝劈裂声,仔细观察发现试件

D 表面左下角和右上角距离侧面边大约  $25\text{ mm}$  范围内出现多条细微裂缝,B 表面沿左上角右下角对角线方向也出现细微裂缝;当荷载稍过峰值后,D 面两个部位的裂缝均向试件中部扩展,B 面沿左上角右下角对角线方向裂缝增加,发生明显局部竹纤维弯曲和错位.继续加载,B 面和 D 面沿另外一条对角线方向也开始出现明显裂缝及竹纤维弯曲和错位现象,并且 A 面和 C 面靠近顶面和

底面的竹纤维均发生外凸.从加载仪器上取下试件,发现顶面和底面均出现开裂.从图 3 试件 1-100-6 的最终破坏图可看出,试件主要发生以局部纤维弯曲为主的破坏,并且套箍效应沿着 A 面、C 面方向表现较明显.

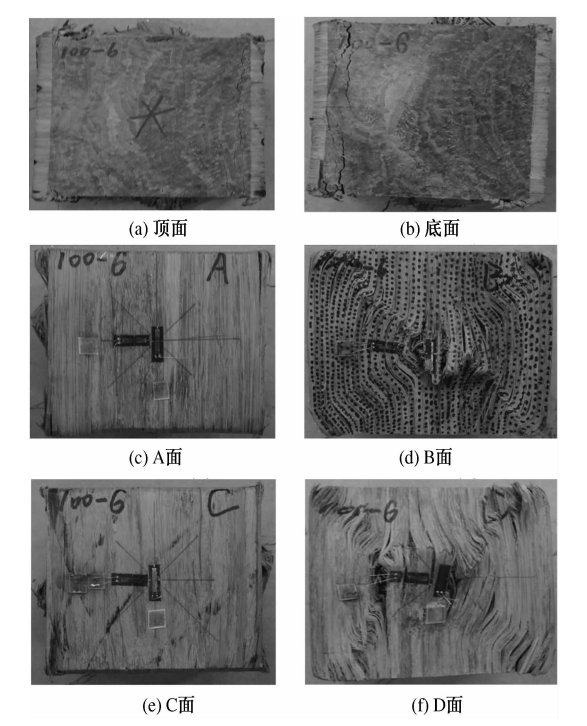


图 3 顺纹受压典型破坏形态(1-100-6)  
Fig.3 Typical failure mode for compression parallel to grain (1-100-6)

2.2 横纹方向 I

选取典型试件 2-100-1 描述其破坏过程如图 4 所示.加载初期,同顺纹方向受压类似,材料基本处于弹性状态,试件表面无任何明显现象;随着荷载增加,试件由弹性阶段逐步进入弹塑性阶段,试件表现出一定的塑性变形,刚度有所降低,变形渐趋明显;当荷载增加至极限承载力 90% 左右时,试件 D 面距底边 30 mm 左右位置开始出现细微裂缝,A 面右上角和 C 面左上角也出现细微裂缝;当荷载增加至极限承载力附近时,A 面和 C 面沿对角线出现的裂缝开始增大并向侧面中心发展,从 D 面可看到明显开裂;继续加载,D 面首先出现裂缝的地方,竹纤维向外翘出,B 面下部分距底边大约 20~30 mm 以内出现明显开裂,A 面左上角、左下角及右下角对角线附近均出现明显开裂,并向试件侧面中心发展.最后,试件发生过大轴向变形(大于 15 mm)的情况下停止加载.从加载仪器上取下试件,发现顶面和底面也出现明显

开裂.从试件 2-100-1 的最终破坏图可以看出,顶部和底部的加载板对试件 B 面、D 面方向有明显的套箍效应.

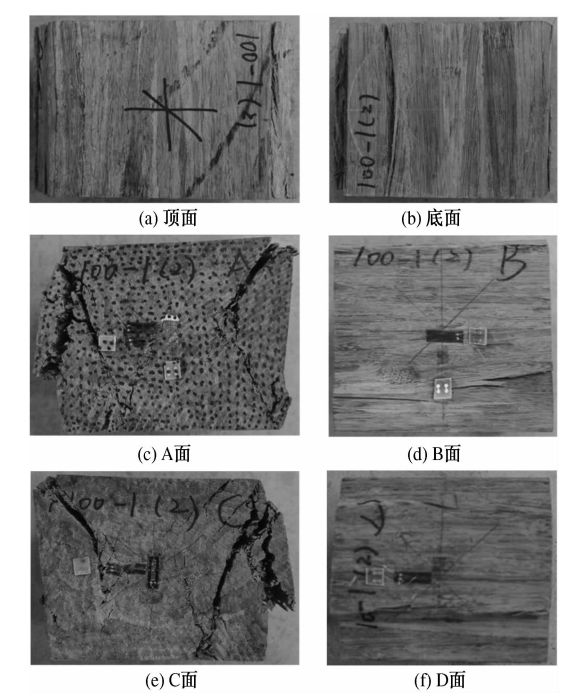


图 4 横纹受压 I 典型破坏形态(2-100-1)  
Fig.4 Typical failure mode for compression perpendicular to grain I (2-100-1)

2.3 横纹方向 II

选取典型试件 3-100-4 描述如图 5 所示.加载初期,同前述类似,材料基本处于弹性状态;随着荷载的增加,试件由弹性阶段进入弹塑性阶段,试件表现出一定的塑性变形,刚度有所降低,变形渐趋明显;当荷载增加至极限承载力 90% 左右时,A 面左上角和 C 面右上角附近开始出现细微裂缝;当荷载增加至极限承载力附近时,A 面左上角和 C 面右上角沿对角线出现的裂缝开始增大并向侧面中心发展,同时 A 面右下角和 C 面左下角也出现明显裂缝,D 面顶边附近可看到明显开裂;继续加载,D 面顶边部分竹纤维向外翘出,A 面左下角和 C 面右下角附近也出现明显裂缝,并且 A 面和 C 面对角线方向的裂缝均向试件侧面中心发展.最后,试件发生过大轴向变形(大于 15 mm)的情况下停止加载.从加载仪器上取下试件,发现顶面和底面与 B 面和 D 面交接的边附近也出现明显开裂.从试件 3-100-4 的最终破坏图可看出,顶部和底部的加载板对试件 B 面、D 面方向有明显的套箍效应.

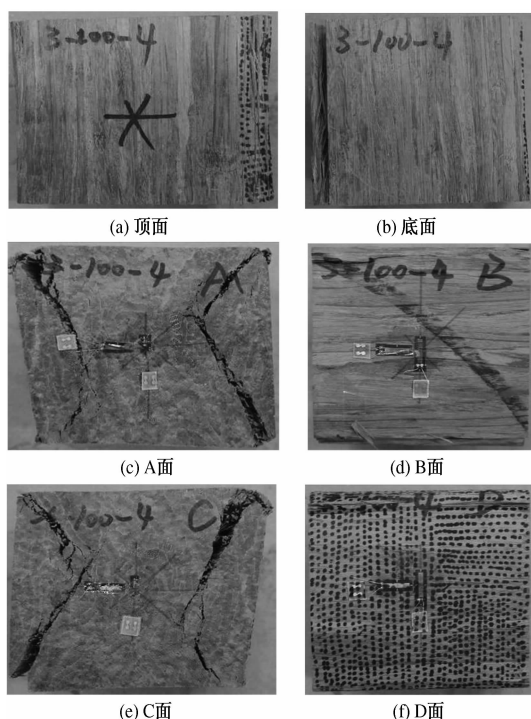


图5 横纹受压Ⅱ典型破坏形态(3-100-4)

Fig.5 Typical failure mode for compression perpendicular to grain Ⅱ (3-100-4)

### 3 综合分析

#### 3.1 抗压强度对比

重组竹顺纹方向、横纹方向Ⅰ、横纹方向Ⅱ的抗压强度平均值分别为 65.0、24.9、21.3 MPa,标准偏差分别为 3.87、1.55、1.34 MPa,变异系数分别为 0.059 6、0.062 4、0.062 9,具有 95% 保证率的强度特征值为 58.7、22.3、19.1 MPa. 很明显,竹材顺纹方向抗压强度最大,但是同另外两个方向相比,其试验结果的离散性较大;横纹方向Ⅰ的抗压强度比横纹方向Ⅱ的抗压强度要大. 基于试验结果 3 个方向的抗压强度标准值关系式可以用式(1)、式(2)和式(3)表示,其中  $f_{\text{sek}}$ 、 $f_{\text{h I ck}}$ 、 $f_{\text{h II ck}}$  分别为顺纹、横纹方向Ⅰ、横纹方向Ⅱ对应的抗压强度标准值.

$$f_{\text{sek}} = 2.63f_{\text{h I ck}}, \quad (1)$$

$$f_{\text{sek}} = 3.07f_{\text{h II ck}}, \quad (2)$$

$$f_{\text{h II ck}} = 0.857f_{\text{h I ck}}. \quad (3)$$

#### 3.2 弹性模量对比

重组竹顺纹方向、横纹方向Ⅰ、横纹方向Ⅱ的弹性模量平均值分别为 11 717.5、845.1、1 615.6 MPa,标准偏差分别为 869.2、81.0、97.9 MPa,变异系数分别为 0.074 2、0.095 9、0.060 6,其具有 95% 保证率的强度特征值为 10 287.7、711.9、

1 454.5 MPa. 同抗压强度类似,顺纹方向弹模最大并且离散性较大;同抗压强度不同的是,横纹方向Ⅱ的弹模比横纹方向Ⅰ的弹模要大. 基于试验结果,3 个方向的弹性模量标准值关系式可以用式(4)、式(5)和式(6)表示,其中  $E_{\text{sek}}$ 、 $E_{\text{h I ck}}$ 、 $E_{\text{h II ck}}$  分别为顺纹、横纹Ⅰ、横纹Ⅱ对应的弹模标准值.

$$E_{\text{sek}} = 14.45E_{\text{h I ck}}, \quad (4)$$

$$E_{\text{sek}} = 7.07f_{\text{h II ck}}, \quad (5)$$

$$E_{\text{h II ck}} = 2.04f_{\text{h I ck}}. \quad (6)$$

#### 3.3 A 面(C 面)泊松比对比

重组竹顺纹、横纹Ⅰ、横纹Ⅱ的 A 面(C 面)泊松比平均值分别为 0.313、0.139、0.232,标准偏差分别为 0.079、0.028、0.067,变异系数分别为 0.253、0.203、0.289,具有 95% 保证率的强度特征值为 0.182、0.092、0.122. 同弹模类似,顺纹 A 面(C 面)泊松比最大并且具有较大离散性;横纹Ⅱ的 A 面(C 面)泊松比比横纹Ⅰ的 A 面(C 面)泊松比要大,但离散性也较大. 基于试验结果,3 个方向的 A 面(C 面)泊松比标准值关系式可以用式(7)、式(8)和式(9)表示,其中  $v_{\text{sekAC}}$ 、 $v_{\text{h I ckAC}}$ 、 $v_{\text{h II ckAC}}$  分别为顺纹、横纹Ⅰ、横纹Ⅱ对应的 A 面(C 面)泊松比标准值.

$$v_{\text{sekAC}} = 1.98v_{\text{h I ckAC}}, \quad (7)$$

$$v_{\text{sekAC}} = 1.49v_{\text{h II ckAC}}, \quad (8)$$

$$v_{\text{h II ckAC}} = 1.33v_{\text{h I ckAC}}. \quad (9)$$

#### 3.4 B 面(D 面)泊松比对比

重组竹顺纹方向、横纹方向Ⅰ、横纹方向Ⅱ的 B 面(D 面)泊松比平均值分别为 0.356、0.031、0.058,标准偏差分别为 0.117、0.007 8、0.009 4,变异系数分别为 0.328、0.253、0.163,其具有 95% 保证率的强度特征值为 0.164、0.018、0.042. 同 A 面(C 面)泊松比类似,顺纹方向 B 面(D 面)泊松比最大并且具有较大离散性;横纹方向Ⅱ的 B 面(D 面)泊松比比横纹方向Ⅰ的 B 面(D 面)泊松比要大. 基于试验结果,3 个方向的 B 面(D 面)泊松比标准值关系式可以用式(10)、式(11)和式(12)表示,其中  $v_{\text{sekBD}}$ 、 $v_{\text{h I ckBD}}$ 、 $v_{\text{h II ckBD}}$  分别为顺纹、横纹方向Ⅰ、横纹方向Ⅱ对应的 B 面(D 面)泊松比标准值.

$$v_{\text{sekBD}} = 9.11v_{\text{h I ckBD}}, \quad (10)$$

$$v_{\text{sekBD}} = 3.9v_{\text{h II ckBD}}, \quad (11)$$

$$v_{\text{h II ckBD}} = 1.33v_{\text{h I ckBD}}. \quad (12)$$

所有试件 3 个方向的抗压强度、弹性模量、泊松比的对比图见图 6~图 9. 由表 1 及图 6~图 9 可明显看出,3 个方向相比,不管是抗压强度,还

是弹性模量和泊松比,均是顺纹方向的实测值最大,但是顺纹方向数据离散性较大;两个横纹方向相比,横纹方向 I 的抗压强度稍大于横纹方向 II 的抗压强度,但是横纹方向 II 的弹性模量和泊松比均比横纹方向 I 对应的值要大。

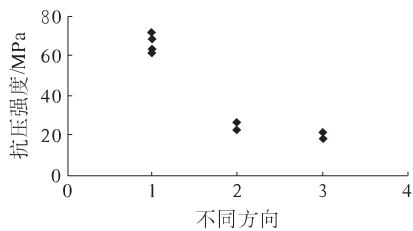


图 6 抗压强度比较  
Fig. 6 Compression strength comparison

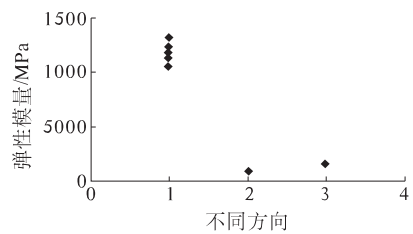


图 7 弹性模量比较  
Fig. 7 Elastic modulus comparison

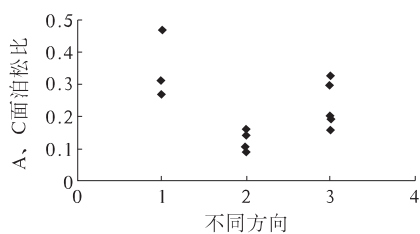


图 8 A、C 面泊松比对比  
Fig. 8 Poisson's ratio comparison for face A and C

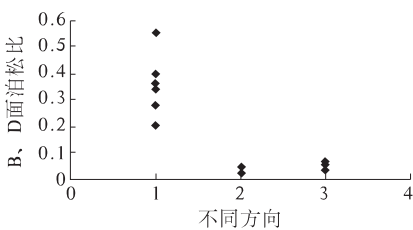


图 9 B、D 面泊松比对比  
Fig. 9 Poisson's ratio comparison for face B and D

3.5 典型荷载轴向变形曲线对比

典型荷载一位移曲线对比见图 10。由图 10 可看出,沿 3 个方向的破坏过程类似,均经历弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段和破坏阶段;但是对于破坏阶段,顺纹方向受压破坏和两横纹方向受压破坏有区别。顺纹方向的破坏阶段可以分为荷载下降阶段、荷载残余阶段,荷载轴向变形曲线在变形为 4 mm 左右进入下降段;两横纹方向的破

坏阶段荷载虽有下降,但较少,且随着加载的继续,变形增加明显,荷载降低很少或基本保持不变。两横纹方向的试件,一直到加载结束都没出现明显下降段。另外,顺纹荷载轴向变形曲线弹性阶段的斜率最大,横纹 II 对应的斜率其次,横纹 I 对应的斜率最小;同样荷载增量下,顺纹方向产生的变形最小,横纹 II 其次,横纹 I 最大,这说明顺纹方向的弹性模量最大,横纹 II 其次,横纹 I 最小,同实测结果保持一致。

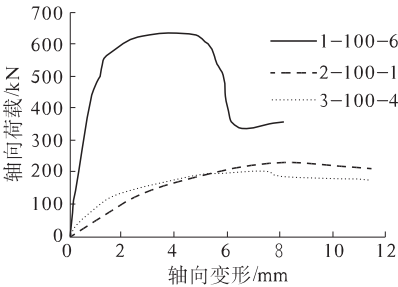


图 10 典型荷载-位移曲线对比  
Fig. 10 Typical load-displacement curves comparison

4 结论

(1)沿 3 个方向的受压破坏过程均经历弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段和破坏阶段。顺纹方向受压破坏阶段还可分为荷载下降阶段、荷载残余阶段;对于两个横纹方向,破坏阶段荷载虽均有下降,但下降较少,且随着加载的继续,变形增加明显,荷载降低很少或基本保持不变。

(2)整体上讲,沿着 3 个方向加载,试件的最终破坏形态比较接近,均为强度破坏,都出现沿对角线方向的主裂缝。

(3)顺纹方向的实测抗压强度、弹性模量和泊松比值最大,但是顺纹方向数据的离散性较大;横纹方向 I 的抗压强度稍大于横纹方向 II 的抗压强度,但是横纹方向 II 的弹性模量和泊松比均比横纹方向 I 对应的值要大。

(4)基于试验结果,给出了各个方向抗压强度、弹性模量和泊松比相互之间对应的关系。

参考文献:

[1] 李海涛,苏靖文,张齐生,等.侧压竹材集成材筒支梁力学性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(3):121-126.  
[2] 苏靖文,李海涛,杨平,等.竹复成材方柱墩各向轴压力学性能研究[J].林业科技开发,2015,29(4):45-49.  
[3] 陈国,张齐生,黄东升,等.胶合竹木工字梁受弯

- 性能的试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(5):72-79.
- [4] 苏靖文, 吴繁, 李海涛, 等. 重组竹柱轴心受压试验研究与分析[J]. 中国科技论文, 2015, 10(1): 39-41.
- [5] 李海涛, 苏靖文, 张齐生, 等. 竹材重组材柱偏心受压试验研究与分析[J]. 建筑材料学报, [2015-03-13]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20150313.1054.022.html>.
- [6] 张俊珍, 任海青, 钟永, 等. 重组竹抗压与抗拉力学性能的分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, 36(4):107-111.
- [7] 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.
- [8] 魏万姝, 覃道春. 不同竹龄慈竹重组材强度和天然耐久性比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(6):111-115.
- [9] 关明杰, 朱一辛, 张心安. 重组木与重组竹抗弯性能的比较[J]. 东北林业大学学报, 2006, 34(4): 20-21.
- [10] 吴秉岭, 余养伦, 齐锦秋, 等. 竹束精细疏解与炭化处理对重组竹性能的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(6):115-120.
- [11] 秦莉. 热处理对重组竹材物理力学及耐久性能影响的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院学位论文, 2010.
- [12] LI H T, ZHANG Q S, HUANG D S, et al. Compressive performance of laminated bamboo[J]. Composites part B: engineering. 2013, 54(1): 319-328
- [13] LI H T, SU J W, ZHANG Q S, et al. Mechanical performance of laminated bamboo column under axial compression [J]. Composites part B: engineering. 2015, 79: 374-382.
- [14] KIM Y J, MOTOAKI O TOSHIMINE Y. Study on sheet material made from zephyr strands V: Properties of zephyr strand board and zephyr strand lumber using the veneer of fast-growing species such as poplar [J]. Journal of wood science, 1998, 44 (1) : 438-443.
- [15] 木结构试验方法标准: GB/T 50329-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

## Comparison Study on Parallel Bamboo Strand Lumber under Axial Compression for Different Directions Based on the Large Scale

LI Haitao<sup>1</sup>, SU Jingwen<sup>1</sup>, WEI Dongdong<sup>2</sup>, ZHANG Qisheng<sup>1</sup>, CHEN Guo<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Jianxi Feiyu Bamboo Industry Group co., LTD, Fengxin 330700, China)

**Abstract:** In order to investigate the axial compression damage mechanism and the relationship between the test parameters for three directions, the experimental study on parallel bamboo strand lumber (PBSL) based on the large scale was conducted in this paper. The axial compressive failure for the PBSL belongs to the ductile damage. Except for the different damage stage, the whole failure process for specimens along three directions are similar with each other and can be divided into four stages: elastic stage, elastic-plastic stage, plastic stage and failure stage. The final failure mode for the three directions are similar with each other which is the main crack appeared along the diagonal. With large discreteness, the compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio for the parallel to grain direction are biggest among three directions. The compressive strength for the perpendicular to grain direction I is bigger than that for II while the modulus of elasticity and Poisson's ratio for direction I is smaller than that for II. Based on the test analysis of the results, the relationship between the compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio for three main directions were proposed for the PBSL under axial compression.

**Key words:** PBSL; axial compression; damage mechanism; compressive strength; modulus of elasticity; Poisson's ratio