



重组竹的单轴与纯剪应力-应变关系

盛宝璐, 周爱萍, 黄东升

(南京林业大学 土木工程学院, 南京 210037)

摘要:重组竹是将竹丝束平行组坯、经高压胶合而成的一种生物质复合材料,是一种极具潜势的建筑材料。研究重组竹的基本力学性能和应力-应变关系,是建立此类材料本构关系和进行重组竹结构非线性分析的基础。将重组竹理想化为横向各向同性复合材料,通过试验,给出了重组竹各主轴方向的单轴与各主平面的纯剪力学参数,建立了各种应力状态下的应力-应变关系。结果表明,重组竹力学性能优于常用的结构用木材,且变异性较小。重组竹顺纹受拉强度约是顺纹受压强度的2倍;横纹受拉强度远远低于横纹受压强度;横切面内的剪切模量及强度远远低于另外两个方向,且横纹剪切强度是顺纹剪切强度的3倍。重组竹的应力-应变关系和破坏模式与纤维参与受力程度密切相关。顺纹受拉时,拉应力完全由纤维承担,破坏表现为纤维的脆性拉断,强度最高,应力-应变为完全线性关系;其他应力状态下,破坏均发生在基体或纤维-基体界面,若裂纹的扩展受到纤维限制,破坏呈渐进性,强度较低,应力-应变曲线由早期的线性关系转入后期的非线性关系;当裂纹的扩展未受到纤维限制,破坏强度最低,应力-应变呈线性关系。

关键词:重组竹;应力-应变关系;破坏模式;横观各向同性复合材料

中图分类号:TU502 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)06-0024-08

Stress-strain relationship of parallel strand bamboo under uniaxial or pure shear load

Sheng Baolu, Zhou Aiping, Huang Dongsheng

(College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, P. R. China)

Abstract: Parallel Strand Bamboo (PSB) is a biocomposite composed of long narrow parallel bamboo strands which are adhesively bonded under high pressure. It has more and more attractive structural applications in building and construction engineering. It's important to well understand the stress-strain relationship to develop the constitutive law and conduct the nonlinear analysis of PSB structures. The PSB was treated as an transversely isotropic composite in the experiment and the uniaxial parameters in each main material axis and the pure shearing parameters in each main material plane were proposed, and the corresponding stress-strain relationships of each stress state were also established. The results show that compared with common used woods in construction engineering, PSB has higher strengths with less variability. Strength

收稿日期:2015-07-30

基金项目:国家自然科学基金(51378263);林业科学技术成果国家级推广项目([2015]21号)。

作者简介:盛宝璐(1990-),博士生,主要从事现代竹木结构研究,(E-mail)baolu.sheng@yahoo.com。

周爱萍(通信作者),副教授,博士,(E-mail)zaping2007@163.com。

Received:2015-07-30

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51378263); National Promotion Program of Forestry Science and Technology Achievements(No. [2015]21).

Author brief: Sheng Baolu(1990-), PhD candidate, main research interest: mechanics performance analysis of bamboo/wood structure, (E-mail)baolu.sheng@yahoo.com。

Zhou Aiping(corresponding author), associate professor, PhD, (E-mail)zaping2007@163.com。

of tension parallel to grain is nearly as twice as that of compression parallel to grain. In perpendicular to grain direction, the strength of tension is much lower than the that of compression. Shearing in transverse-to-grain plane presents lowest modulus and strength than those shearing in other two directions. The shearing strength in perpendicular to grain is as about 3 times as that of shearing in parallel to grain direction. The stress-strain relationships and the failure modes of PSB are significantly depended on the way in which the fiber participated. In parallel to grain direction, tensile damage almost entirely contributes to the broken of fibers, which shows the highest strength and brittle behavior among all stress states. In other cases, when the expanding of failure cracks are restricted by fibers, the damage presents progressive process and higher strength, and the stress-strain relationships exhibit linearity in the earlear life while turn to nonlinearity in the later life of the specimens. When damages take place in matrix or in fiber-matrix interface without fibers involved in, the material shows lower strength, and the stress-strain curves present linear and brittle behavior.

Key words: Parallel strand bamboo; stress-strain relationship; failure mode; transversely isotropic composite

竹材是一种可再生、可降解的天然生物质复合材料,一般3~5年就可以成材,具有硬阔叶树材的诸多优良特性,其比强度和比刚度高于钢材,是一种理想的绿色高强建筑材料。竹结构建筑的环境负荷远小于钢材、混凝土等传统建筑。但原竹材壁薄中空,几何变异性大、含糖高易虫蛀、质地不均匀、耐久性较差,不能满足现代工程结构对构件的力学性能和几何构形要求。原竹剖割成约长2 m、宽15 mm、厚3 mm的竹蔑,经80℃恒温烘干至含水率低于11%,再将竹蔑碾压成竹丝束,同方向平行组坯并浸渍酚醛树脂胶,通过高温热压胶合,制成重组竹^[1-3]。由于在工业化制造的过程中,竹材经过筛选,剔除了原竹的缺陷,且含水率低,故重组竹力学性能均匀、变异性小、强度高、耐久性好,很少出现收缩、翘曲、开裂等现象。重组竹可以加工成不同截面的型材,适用于房屋的梁、柱及跨度较大的构件^[4-6]。因此,重组竹可以满足现代建筑结构对材料的力学、环保与耐久性等方面的性能要求。研究表明,重组竹结构在节能环保、工业化生产、装配式施工等方面有着传统材料不可替代的优势,以重组竹作为结构材料建造多层甚至高层建筑是极具潜势的发展方向。

重组竹纤维沿材料纵向相互平行,沿横向随机均匀分布,其力学性能具有明显的定向性,不仅纵向(顺纤维方向)与横向(垂直纤维方向)的力学性能差异很大,即使同一方向的拉、压性质亦明显不同^[7],故重组竹是一种纤维定向增强复合材料^[8]。试验表明,重组竹的纵向受压应力-应变关系呈明显的非线性特征,这使得重组竹结构基本构件在接近或达到

承载力极限状态时,荷载-变形关系亦呈明显的非线性^[9]。在结构设计中考虑这种非线性特性,是概率极限状态设计方法的基本要求,采用中国现行《木结构设计规范》(GB 50005—2013)^[10]中基于线性原理的方法计算重组竹构件的承载力或变形误差很大。

此外,结构服役期内,材料常常处于复杂应力状态。作为复杂应力状态下纤维定向复合材料的破坏准则,常包含多个材料常数。如, Hill^[11]提出的正交各向异性材料破坏准则,包涵了6个弹性常数,由于 Hill 准则忽略了材料拉、压性质的差异,故不适用于重组竹材料强度分析。Hoffman^[12]考虑了材料拉、压力学性能的差异,提出了如式(1)的破坏准则。

$$C_1(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + C_2(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + C_3(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + C_4\sigma_1 + C_5\sigma_2 + C_6\sigma_3 + C_7\tau_{23}^2 + C_8\tau_{31}^2 + C_9\tau_{12}^2 = 1 \quad (1)$$

式中: σ_i 和 τ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$)分别是3个主材料方向主应力和3个主平面的剪应力; C_k ($k = 1, 2, \dots, 9$)是材料常数,由3个主轴方向的单轴拉、压和3个主平面的纯剪强度确定。Hoffman 准则可以作为重组竹材料的屈服条件。破坏准则建立了材料的应力状态与强度之间的关系,但为了分析结构从加载至破坏全过程响应,还须了解材料在各种应力状态下的应力-应变关系。可见,确定重组竹的弹性常数、建立其非线性应力-应变关系,是重组竹结构基本构件非线性分析的基础。

本文将重组竹理想化为横向各向同性复合材料,通过各主轴和主平面的单轴与纯剪试验,研究重组竹3个主方向的拉、压力学性能和3个主平面的剪切性能^[13-15],建立相应的应力-应变关系,为进一

步建立重组竹的本构关系^[16]奠定基础。

1 重组竹力学性能的描述

为了定量的描述重组竹材料的力学性能,采用如图 1 所示的三维笛卡尔坐标系,1 轴代表材料纵向,即纤维方向;2 轴、3 轴分别为垂直于 1 轴的另外 2 个方向,即横向。因此,需 9 个弹性常数来描述重组竹刚度系数,即 6 个单轴拉、压模量和 3 个剪切模量,即顺纹、横纹和横切面内(本文将垂直于纤维的平面定义为横切面)的剪切模量。根据横观各向同性假定,材料在 2 轴与 3 轴方向的弹性常数相同,因此,重组竹的弹性常数缩减为 7 个,即 4 个拉、压弹性模量 E_{11}^t 、 E_{11}^c 、 E_{22}^t 和 E_{22}^c ,和 3 个剪切模量 G_{12} 、 G_{31} 、 G_{23} 。这里, E 为弹性模量,其中,第一个下标代表所在平面的外法线方向,第二个下标表示弹性模量方向,上标 t、c 分别表示拉伸和压缩; G 为剪切模量,其中,第一个下标表示剪切平面的外法线方向,第二个下标表示剪应力方向。同样,描述重组竹强度的参数也有 7 个,分别为 3 个主方向的拉、压强度 f_i^t 、 f_i^c ($i = 1, 2, 3$, $f_2^t = f_3^t$ 和 $f_2^c = f_3^c$) 和 3 个主平面的剪切强

度 S_{23} 、 S_{31} 和 S_{12} 。上述所有弹性常数和强度参数均可通过重组竹 3 个主方向的单轴拉、压和 3 个主平面纯剪试验得到。

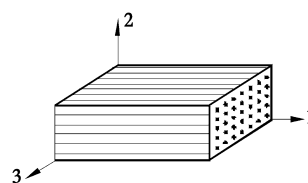


图 1 重组竹 3 个材料主方向

Fig.1 Main direction of PSB composite

2 重组竹基本力学性能试验

试验竹材取自浙江安吉 5 年生毛竹(Phyllostachys),按照重组竹标准制作工艺制成试验材料,试件的密度和含水率分别为 11.0 kN/m³ 和 8.0%。每个试验类型的试件为 30 个,试件构形见表 1。单轴试验参照 ASTM D143-09^[17]、剪切试验参照 ASTM D7078 标准^[18]进行。采用 TDS-530 多通道数据采集箱同时采集荷载、变形和应变,采集频率为 1 Hz。各类型试验过程与现象详见表 2。

表 1 试件的尺寸、形状和相关参数计算公式

Table 1 Sketch of experimental specimens and the calculation formulae for related parameters

试验类型	试件构型/mm	相关参数的计算公式		
		弹性模量/Mpa	强度/Mpa	泊松比
顺纹 受拉		$E_{11} = \frac{\Delta F_{11}}{b_1 t_1 \Delta \epsilon_{11}}$	$f_{11} = \frac{F_{11}^0}{b_1 t_1}$	$\nu_{12} = -\frac{\Delta \epsilon_{22}}{\Delta \epsilon_{11}}$
横纹		$E_{22} = \frac{\Delta F_{22}}{b_2 t_2 \Delta \epsilon_{22}}$	$f_{22} = \frac{F_{22}^0}{b_2 t_2}$	—
顺纹 受压		$E_{11} = \frac{\Delta F_{11}}{w_1 d_1 \Delta \epsilon_{11}}$	$f_{11} = \frac{F_{11}^0}{w_1 d_1}$	$\nu_{21} = -\frac{\Delta \epsilon_{11}}{\Delta \epsilon_{22}}$
横纹		$E_{22} = \frac{\Delta F_{22}}{w_2 d_2 \Delta \epsilon_{22}}$	$f_{22} = \frac{F_{22}^0}{w_2 d_2}$	—

续表 1

试验类型	试件构型/mm	相关参数的计算公式			
		弹性模量/Mpa	强度/Mpa	泊松比	
顺纹		$G_{21} = \frac{\Delta F_{21}}{l\delta (\Delta\epsilon_{45}^{c_1} + \Delta\epsilon_{-45}^{c_1})}$	$S_{21} = \frac{F_{21}^u}{l\delta}$	—	
剪切	横纹		$G_{23} = \frac{\Delta F_{23}}{l\delta (\Delta\epsilon_{45}^{c_2} + \Delta\epsilon_{-45}^{c_2})}$	$S_{23} = \frac{F_{23}^u}{l\delta}$	—
垂直于面 内剪切		$G_{12} = \frac{\Delta F_{12}}{l\delta (\Delta\epsilon_{45}^{c_3} + \Delta\epsilon_{-45}^{c_3})}$	$S_{12} = \frac{F_{12}^u}{l\delta}$	—	

表中: ΔF_{11}^u 、 F_{11}^u 分别为顺纹受拉的线性阶段荷载增量和极限荷载; $\Delta\epsilon_{11}^c$ 和 $\Delta\epsilon_{22}^c$ 分别是顺纹与横纹受拉线性阶段的应变增量; b_1 和 t_1 是顺纹受拉试件有效部位的厚度与宽度, 试验中通过对断口实际测量得到。 ΔF_{22}^u 、 F_{22}^u 分别为横纹受拉的线性阶段荷载增量和极限荷载; b_2 、 t_2 分别为横纹受拉试件有效部位的厚度和宽度。 ΔF_{11}^c 、 F_{11}^c 分别为顺纹受压的线性阶段荷载增量和极限荷载; $\Delta\epsilon_{11}^c$ 为顺纹受压线性阶段应变增量; w_1 、 d_1 为顺纹受压试件横截面尺寸。 ΔF_{22}^c 、

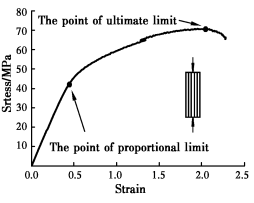

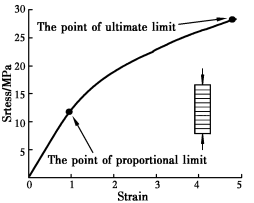

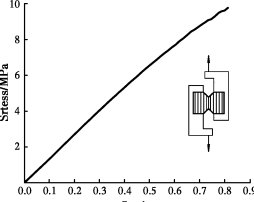

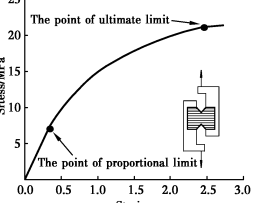

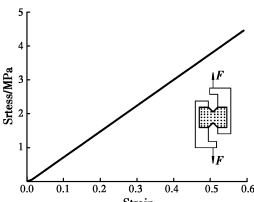

F_{22}^c 分别为横纹受压的线性阶段荷载增量和峰值荷载; $\Delta\epsilon_{22}^c$ 为横纹受压线性阶段应变增量; w_2 、 d_2 为横纹受压试件横截面的尺寸。 ΔF_{21} 、 ΔF_{23} 、 ΔF_{12} 分别为 2-1、2-3 和 1-2 面内纯剪试验线性响应阶段的剪切荷载增量; F_{21}^u 、 F_{23}^u 、 F_{12}^u 分别为 2-1、2-3 和 1-2 面内纯剪试验的峰值剪力; $\Delta\epsilon_{45}$ 、 $\Delta\epsilon_{-45}$ 分别为在剪切试件的测试点与荷载方向成 45° 和 -45° 的应变增量; l 、 δ 为剪切试件 V 形切口处的截面宽度和厚度。

表 2 试验过程与现象

Table 2 Process and phenomenon from the experiments

试验类型	应力-应变关系	破坏模式	试验过程	试验现象
顺纹 受拉			试件被紧固在两个夹具之间, 试件轴线与两夹具的轴线重合; 在试件中部表面分别沿顺纹和横纹方向黏贴 2 个电阻应变片, 以测定该处 2 个方向的应变; 以 1 mm/min 的加载速度位移控制单调加载至试件破坏。	在整个加载过程中, 应力-应变呈线性关系, 当荷载达到最大值时, 试件发生脆性断裂; 破坏模式可分别为两种。I. 试件断裂面平整并垂直于材料顺纹方向; II. 试件断裂面与顺纹方向成一倾斜角。统计分析表明, 两种破坏形态所测得的力学参数没有明显差异。
横纹			试件被紧固在两个夹具之间, 使得顺纹方向垂直于两夹具的轴线; 在试件侧面最小截面处分别沿顺纹与横纹两个方向粘贴电阻应变片, 以测定该处两个方向的应变; 以 0.5 mm/min 的加载速度位移控制单调加载至试件破坏。	加载初期, 试件最小截面处首先出现顺纹方向的细小裂纹, 随着荷载增加, 这些细小的裂纹沿着纤维方向不断发育扩展, 最终在最小截面处形成断裂面, 试件被拉断。从加载至破坏的整个过程中, 受拉应力-应变关系几乎呈完全非线性, 曲线斜率随着裂纹的扩展单调递减。

续表 2

试验类型	应力-应变关系	破坏模式	试验过程	试验现象
受压	顺纹 		将试件置于下部带球铰的压盘之上,以保证压力均匀分布,在试件侧表面中部,分别沿顺纹方向、横纹方向黏贴 2 个电阻应变片,以测定该处的顺纹与横纹应变;以 0.5 mm/min 的加载速度位移控制单调加载至试件破坏。	加载初期,应力-应变呈线性关系;进一步加载至荷载超过比例极限,试件的侧面开始出现裂缝,应力-应变关系进入非线性强化阶段;随着荷载加大,这些裂缝沿着材料顺纹方向扩展,试件被分割成两个或多个较小的棱柱,称之为子柱。荷载达到峰值后,部分子柱发生局部屈曲,承载力开始下降,应力-应变曲线转为非线性软化阶段,但由于部分剩余子柱仍有一定的承载力,试件并未立即破坏,当承载力下降到峰值承载力的 85% 时,认为试件破坏,停止加载。
	横纹 			
剪切	顺纹 		在整个加载过程中,应力-应变呈线性关系,最后,试件沿 V 形切口被切为两半,呈明显的脆性破坏特征。	
	横纹 			加载初期,应力-应变呈线性关系。由于一点的剪应力总是成对出现的,故垂直于纤维方向的剪应力会在该点引起平行于纤维方向的等值剪应力。随着荷载的增加,纤维与基体界面之间的剪应力会首先达到极限值而产生顺纤维方向的裂纹,应力-应变关系随即转入非线性阶段,其斜率随荷载增加不断下降,裂纹沿纤维与基体的界面不断展开,试件的剪切刚度不断衰减。最后,切口两边产生较大的相对位移,受剪面不再承受剪剪力,外荷载完全由跨越受剪面的纤维拉伸作用承受。由于纤维抗拉强度很高,试件几乎不可能被切成两半。
	垂直于面内剪切 			同顺纹剪切。

3 试验结果与分析

3.1 主要力学性能参数

统计分析表明,各类型试验的力学参数基本呈正态分布,图2给出了横纹受压力学参数的正态检验结果。表3为试验测得的力学参数统计分析结果。可以看出,重组竹顺纹拉、压模量差异很小,顺纹受拉强度约为顺纹受压强度的两倍;横纹受拉弹性模量约是横纹受压弹性模量的两倍,横纹受拉强度远远低于横纹受压强度;顺纹剪切弹性模量与横纹剪切弹性模量非常接近,顺纹剪切强度远远低于横纹剪切强度,而横切面内的剪切模量及强度远远低于另外2个方向。

表4将重组竹与常用的结构用木材性能^[19]进行了比较,可以看到,重组竹顺纹弹性模量高于大部分的常用的结构用木材,而强度远高于所有常用的

结构用木材;重组竹材料力学参数的变异性比木材小。因此,重组竹的性质优于木材,是一种理想的建筑结构材料。

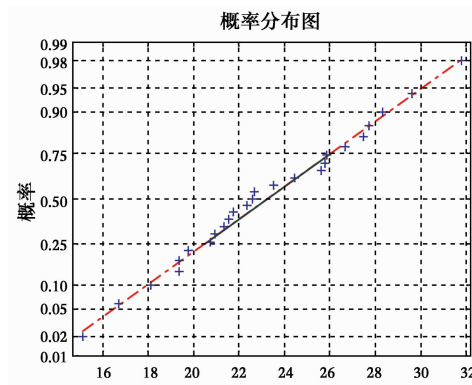


图2 横纹受压正态分布检验图

Fig. 2 Gaussian distribution test for compression in perpendicular-to-grain

表3 试验力学参数

Table 3 The mean values and CVs of mechanical parameters of each type of experiments

试验类型		弹性模量		泊松比		比例极限				峰值强度				极限强度			
						应力		应变		应力		应变		应力		应变	
		均值/ MPa	CV/ %	均值/ MPa	CV/ %	均值/ MPa	CV/ %	均值/ MPa	CV/ %	均值/ MPa	CV/ %	均值/ MPa	CV/ %	均值/ MPa	CV/ %	均值/ MPa	CV/ %
顺纹	受拉	10 296	14	0.3	7					118.4	20	1.26	13				
	受压	11 890	8	17	33.09	3	0.28	6	65.53	9	1.40	19	55.76	8	2.07	22	
	受剪	1 361	18						8.21	19	0.77	25					
横纹	受拉	3 066	28	0.3					4.43	15	0.28	27					
	受压	1 365	14			7.68	10	0.59	9	23.14	15	3.50	15				
	受剪	1 446	13			9.73	15	0.78	5	23.44	10	3.76	34				
垂直于平面内剪切	746	14							3.64	10	0.62	14					

表4 重组竹与结构木材的力学性能比较

Table 4 Comparing mechanical properties of PSB with that of some softwoods in structural use

材料	顺纹弹性模量		顺纹受压强度		横纹受压强度		顺纹剪切强度		横纹受压强度		顺纹受拉强度	
	均值/ MPa	CV/ %	均值/ MPa	CV/ %	均值/ MPa	CV/ %	均值/ MPa	CV/ %	均值/ MPa	CV/ %	均值/ MPa	CV/ %
PSB 重组竹	11890	8	65.53	9	23.14	15	23.44	10	4.43	15	118.40	20
美国花旗松	12300		47.60		5.30		2.70		2.30		107.60	
港澳福德雪松	11700		43.10		5.50		9.40		2.80		78.60	
西部铁杉	11300	22	49.00	18	3.80	28	8.60	14	2.30		89.60	25
北美乔松	8500		33.10		3.00		6.20		2.10		73.10	
英格曼云杉	8900		30.90		2.80		8.30		2.40		84.80	

3.2 应力-应变关系

根据试验结果,重组竹各应力状态下的应力-应变关系大致可以分为 4 类。类型 1 为完全线性关系,包括顺纹受拉、顺纹剪切、横切面内的剪切。类型 2 为 2 段式应力-应变关系,即应力小于比例极限时,应力-应变关系呈线性,超过比例极限后,应力-应变曲线表现为非线性强化特征,包括横纹抗压、横纹剪切。顺纹抗压应力-应变关系属于类型 3,为 3 段式应力-应变关系,即应力小于比例极限时,应力-应变呈线性关系;应力介于比例极限和峰值应力之间时,应力-应变关系呈非线性强化特性;超过峰值后,曲线进入非线性软化段,该类型的破坏表现出良好的延性。横纹抗拉应力-应变关系属于类型 4,从加载到破坏,应力-应变关系都表现明显的非线性强化特征。

对于类型 1 的应力-应变关系和其他类型应力-应变关系的线性部分,可以将应力表达为关于应变的一次函数,其中,一次项的斜率为材料弹性模量,常数项为 0。通过对试验曲线的非线性段特征的分析,可以采用二次函数或指数函数来描述非线性应力-应变关系,则类型 2 与类型 3 的应力-应变关系具体表达如下

横纹受压应力-应变关系

$$\sigma_{22}^c(\epsilon) = \begin{cases} E_{22}^c \epsilon & \epsilon \leq \epsilon_{22}^{cc} \\ k\gamma^n & \epsilon_{22}^{cc} \leq \epsilon \leq \epsilon_{22}^{cu} \end{cases} \quad (2)$$

横纹剪切应力-应变关系

$$\tau_{23}(\gamma) = \begin{cases} G_{23} \gamma & \gamma \leq \gamma_{23}^{cc} \\ \mu\gamma^m & \gamma_{23}^{cc} \leq \gamma \leq \gamma_{23}^{cu} \end{cases} \quad (3)$$

式中,材料常数可以通过 $n = \frac{\ln(f_{22}^{cc}/f_{22}^{cu})}{\ln(\epsilon_{22}^{cc}/\epsilon_{22}^{cu})}$, $k = f_{22}^{cc}/(\epsilon_{22}^{cc})^n$ 和 $m = \frac{\ln(\tau_{23}^{cc}/\tau_{23}^{cu})}{\ln(\gamma_{23}^{cc}/\gamma_{23}^{cu})}$, $\mu = \tau_{23}^{cc}/\gamma_{23}^{cc}$ 确定。这里, ϵ_{22}^{cc} 、 f_{22}^{cc} 和 ϵ_{22}^{cu} 、 f_{22}^{cu} 分别是横纹受压比例极限压应变、压应力和极限压应变、压应力; γ_{23}^{cc} 、 τ_{23}^{cc} 和 γ_{23}^{cu} 、 τ_{23}^{cu} 分别是横纹剪切比例极限剪应力、剪应变和极限剪应力、剪应变。

顺纹受压应力-应变关系

$$\sigma_{11}^c(\epsilon) = \begin{cases} E_{11}^c \epsilon & \epsilon \leq \epsilon_{11}^{cc} \\ \lambda_1 \epsilon^2 + \lambda_2 \epsilon + \lambda_3 & \epsilon_{11}^{cc} \leq \epsilon \leq \epsilon_{11}^{cm} \\ \beta_1 \epsilon^2 + \beta_2 \epsilon + \beta_3 & \epsilon_{11}^{cm} \leq \epsilon \leq \epsilon_{11}^{cu} \end{cases} \quad (4)$$

式中:系数 λ_i 和 β_i ($i=1, 2, 3$), 可以由下式确定

$$\lambda_1 = \frac{f_{11}^{cc} - f_{11}^{cm}}{(\epsilon_{11}^{cm} - \epsilon_{11}^{cc})^2}, \lambda_2 = \frac{2\epsilon_{11}^{cm}(f_{11}^{cm} - f_{11}^{cc})}{(\epsilon_{11}^{cm} - \epsilon_{11}^{cc})^2}, \lambda_3 = \frac{(\epsilon_{11}^{cc})^2 f_{11}^{cm} - 2\epsilon_{11}^{cc} \epsilon_{11}^{cm} f_{11}^{cm} + (\epsilon_{11}^{cm})^2 f_{11}^{cc}}{(\epsilon_{11}^{cm} - \epsilon_{11}^{cc})^2}$$

$$\beta_1 = \frac{f_{11}^{cm} - f_{11}^{cu}}{(\epsilon_{11}^{cu} - \epsilon_{11}^{cm})^2}, \beta_2 = \frac{2\epsilon_{11}^{cu}(f_{11}^{cu} - f_{11}^{cm})}{(\epsilon_{11}^{cu} - \epsilon_{11}^{cm})^2}, \beta_3 = \frac{(\epsilon_{11}^{cm})^2 f_{11}^{cu} - 2\epsilon_{11}^{cm} \epsilon_{11}^{cu} f_{11}^{cu} + (\epsilon_{11}^{cu})^2 f_{11}^{cm}}{(\epsilon_{11}^{cu} - \epsilon_{11}^{cm})^2}$$

式中: ϵ_{11}^{cc} 和 f_{11}^{cc} 、 ϵ_{11}^{cm} 和 f_{11}^{cm} 、 ϵ_{11}^{cu} 和 f_{11}^{cu} 分别是顺纹受压比例极限、屈服极限、极限压应变和压应力。

横纹受拉应力-应变关系

$$\sigma_{22}^t(\epsilon) = \frac{f_{22}^{tu} - E_{22}^t \epsilon_{22}^{tu}}{(\epsilon_{22}^{tu})^2} \epsilon^2 + E_{22}^t \epsilon \quad (5)$$

式中: ϵ_{22}^{tu} 、 f_{22}^{tu} 是横纹受拉极限拉应变和拉应力。

图 3 表示上述解析公式得到的曲线与试验曲线的比较。可以看出,两者吻合良好。

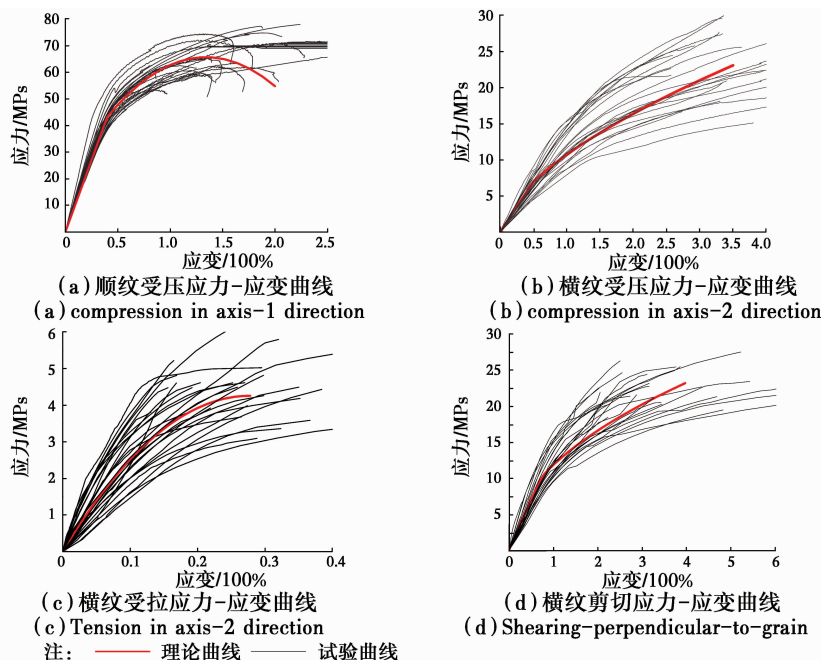


图 3 应力-应变曲线曲线的比较

Fig. 3 Compare the calculating stress-strain curves to those obtained by experiments

4 结 论

重组竹可以理想化为横向各向同性正交异性复合材料,重组竹的应力-应变关系与破坏形态与纤维参与受力的程度有关。顺纹受拉作用主要由纤维承担,破坏表现为纤维的突然断裂,故表现了较高的强度与脆性,应力-应变关系呈完全线性特征;顺纹、横纹抗压破坏时,裂纹出现在基体-纤维界面上,但裂缝的扩展又被纤维限制,纤维在一定程度上参与受力,破坏过程呈渐进性特征,故它们的强度低于顺纹抗拉强度,应力-应变关系在比例极限后表现出非线性特征;顺纹剪切、横纹剪切和横切面内的剪切破坏属于基体-界面破坏,纤维几乎不参与受力,表现了较低的强度与脆性。本文采用指数函数或二次函数来描述重组竹的非线性应力-应变关系,给出的解析表达式与试验结果吻合良好。

重组竹顺纹拉、压弹性模量相差无几,顺纹抗拉强度大约是横纹抗压强度的2倍,横纹抗拉强度低于横纹抗压强度;顺纹、横纹剪切弹性模量相近,大约是顺纹抗拉弹性模量的1/8;顺纹抗剪强度大大低于横纹抗剪强度,横切面内的抗剪弹性模量与强度都低于另外两个方向的剪切强度与剪切模量。

参考文献:

- [1] 张宏健,李君,叶喜.竹条重组枋生产工艺的研究开发[J].建筑人造板,1998(3):24-26.
Zhang H J, Li J, Ye X. Research on the fabricated technique of reformed bamboo [J]. Building Artificial Boards, 1998(3):24-26. (in Chinese)
- [2] 李琴,汪奎宏.重组竹生产工艺的初步研究[J].人造板通讯,2001(7):6-9.
Li Q, Wang K H. Research on the manufacture process of reformed bamboo [J]. China Wood-based Panels, 2001(7):6-9. (in Chinese)
- [3] 叶良明,姜志宏,叶建华.重组竹板材的研究[J].浙江林学院学报,1991,8(2):133-140.
Ye L M, Jiang Z H, Ye J H. Study on the laminated bamboo panel [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 1991, 8(2):133-140. (in Chinese)
- [4] Shigeyasu A D, Sun U T. Fracture properties of bamboo [J]. Composites: Part B. 2001, 32: 451-459.
- [5] Zhou A P, Huang D S, Li H T, et al. Hybrid approach to determine the mechanical properties of fibers and matrixes of bamboo [J]. Construction and building materials, 2012, 35: 191-196.

- [6] Zheng M H. Micromechanical prediction of ultimate strength of transversely isotropic fibrous composites [J]. Solids and Structures, 2011, 38: 4147-4172.
- [7] Amada S, Lchikawa Y, Munekata T, et al. Fiber texture and mechanical graded structure of bamboo [J]. Composites Part B, 1997, 28(1):13-20.
- [8] Abdul H P S, Bhat I U H, Jawaid M, et al. Bamboo fiber reinforced biocomposites: A review [J]. Materials and Design, 2012, 42: 353-368.
- [9] Yokozeki T, Ogasawara T, Ishikawa T. Effects of fiber nonlinear properties on the compressive strength prediction on unidirectional carbon-fiber composites [J]. Composite Science and Technology, 2005, 65: 2140-2147.
- [10] Canadian Wood Council. Wood design manual [S]. Ottawa, Ontario, Canada, 2010.
- [11] Hill R. The mathematical theory of plasticity [M]. Oxford University Press, London, 1950.
- [12] Hoffman O. The brittle strength of orthotropic materials [J]. J. Compos. Mater. 1967, 2: 200-206.
- [13] Naik N K, Kumar R S. Compressive strength of unidirectional composites: evaluation and comparison of prediction modes [J]. Composite Structures, 1999, 46: 299-308.
- [14] Shioya M, Takaku A. Estimation of fiber and interfacial shear strength by using a single-fiber composite [J]. Composites Science and Technology. 1995: 33-39.
- [15] Gundel D B, Waner F E. Experimental and theoretical assessment of the longitudinal tensile strength of unidirectional Sci-Fiber / Titanium-matrix [J]. Composite Science and Technology. 1997, 57: 471-481.
- [16] Matzenmiller A, Lubliner J, Taylor R L. A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites [J]. Mechanics of Materials. 1995, 20: 125-152.
- [17] American Society For Test Materials (ASTM). Standard test method for small clear specimen of timber, D143-09[S].
- [18] American Society for Test Materials (ASTM). Standard test method for shear properties of composite materials by V-notched rail shear method. D7078/D7078M-12[S].
- [19] United States Department of Agriculture, Forest Products Laboratory. Wood Handbook: Wood as an Engineering Material [M]. Centennial Edition, 2010.