

引用本文:陈 思,魏 洋,赵鲲鹏,等. 重组竹受弯短期蠕变性能试验[J]. 建筑科学与工程学报,2021,38(5):91-98.

CHEN Si, WEI Yang, ZHAO Kun-peng, et al. Experiment on Short-term Bending Creep Performance of Bamboo Scrimber[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(5): 91-98.

DOI:10.19815/j.jace.2020.10062

重组竹受弯短期蠕变性能试验

陈 思, 魏 洋, 赵鲲鹏, 杭 晨, 赵 康

(南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要:为研究重组竹的受弯蠕变性能,对 9 个不同荷载水平下的重组竹试件进行受弯蠕变试验,得到了重组竹蠕变位移-时间的关系曲线,分析了蠕变增长率和受弯相对蠕变的变化规律。根据试验结果分析了重组竹受弯蠕变的弹性变形、黏弹性变形和黏性变形的变化规律,确定了不同荷载水平下 Burgers 模型的参数,进一步推导了 Burgers 模型参数随荷载水平的变化规律,提出了考虑荷载水平的重组竹受弯蠕变预测模型,模型预测结果与试验曲线趋势吻合较好。研究结果表明:重组竹受弯蠕变试件的蠕变变形随着时间的推移而增加,在较低的荷载水平作用下,变形速率较低,曲线整体较平缓稳定,在较高的荷载水平作用下,蠕变变形速率较快;重组竹受弯蠕变增长率随着时间的增加而逐渐增大,其增长速率则呈现减速状态。

关键词:重组竹;短期蠕变;荷载水平;Burgers 模型

中图分类号:TU366.3

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2021)05-0091-08

Experiment on Short-term Bending Creep Performance of Bamboo Scrimber

CHEN Si, WEI Yang, ZHAO Kun-peng, HANG Chen, ZHAO Kang

(College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the bending creep performance of bamboo scrimber, creep tests were carried out on nine bamboo scrimber specimens under different load levels. The relation curve between the creep displacement and time of bamboo scrimber was obtained, and the variation law of creep growth rate and bending creep was obtained. According to the results, the variation rules of elastic deformation, viscoelastic deformation and viscous deformation in the bending creep test were analyzed, and the parameters of Burgers model with different load levels were determined, then the variation law of parameters influenced by load level was derived. A model for predicting bending creep of bamboo scrimber was proposed, and the results were in good agreement with the trend of the test curves. The study results show that the creep deformation increases with the passage of time. Under the action of lower load level, the deformation rate is low and the curve is gentle and stable as a whole. Under the action of higher load level, the creep deformation rate is faster. The growth rate of bending creep of bamboo scrimber increases gradually with the

收稿日期:2020-10-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51778300,51208262);江苏省自然科学基金项目(BK20191390);

江苏省重点研发计划项目(BE2020703);江苏省“六大人才高峰”资助项目(JZ-017);江苏省“青蓝工程”资助项目(QL2020)

作者简介:陈 思(1996-),女,江苏南通人,工学博士研究生,E-mail:cs0714@njfu.edu.cn.

通信作者:魏 洋(1978-),男,安徽合肥人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:wy78@njfu.edu.cn.

increase of time, and its growth rate presents a decelerating state.

Key words: bamboo scrimber; short-term creep; load level; Burgers model

0 引言

绿色环保的建筑材料是土木工程发展的必然趋势之一,竹材作为可再生易降解的天然建筑材料,兼具承载与美观的双重特点,引起了国内外学者的广泛关注。中国虽然森林资源相对贫乏,但竹类资源十分丰富,竹林总面积超过了 $600\times 10^4\text{ km}^2$,约为世界总量的 30%^[1]。与传统木材相比,竹材生长周期远小于木材,伐后再生能力强且价格低廉,所以开发利用竹类资源,以竹代木可以有效缓解工程结构中木材的供需矛盾。竹质材料是一种以竹为原材料,采用树脂胶进行重组的复合材料。近年来,因竹质材料的环保及优异的力学性能,已被尝试替代木材及混凝土材料应用于建筑行业当中,绿色竹结构得到了快速的发展^[2-3]。目前,竹质复合材料的基本力学性能得到了较多的研究:魏洋等^[4-7]对重组竹的受弯、受压等力学性能进行了研究;陈国等^[8]研究了定向刨花板加固腹板开洞的竹木工字梁的力学性能;李海涛等^[9-10]基于大尺度试件研究了重组竹各向轴压力学性能以及偏压力学性能;李频等^[11]研究了重组竹作为结构构件的受弯性能;陈伯望等^[12]对重组竹柱进行了长期受压试验研究;苏毅等^[13]研究了竹集成材简支梁的抗弯性能。竹材自身的抗拉强度以及弯曲强度可达 150 MPa,受压强度可达 60~70 MPa,弯曲弹性模量可达 10 GPa 以上^[2]。

在各类竹质复合材料中,重组竹的综合性能较好,尤其适合作为结构的承载构件^[14]。重组竹又名重竹,是以竹束纤维为构成单元,将竹材重新组织并加以强化成型的新竹质复合材料。重组竹属于黏弹性材料,黏弹性材料的蠕变现象是其力学性能的重要指标之一,材料长期的蠕变行为对材料本身的力学性能有一定的影响,是检验材料能否运用到工程上的一个重要指标。因此,深入研究重组竹的蠕变性能,掌握蠕变规律,可以为工程设计提供理论依据,对其在结构领域的应用实践具有重要的意义。目前,国内外对木质材料蠕变性能的研究比较成熟^[15-17],而对毛竹以及竹质材料的蠕变性能研究则相对比较匮乏,缺乏可靠的理论计算模型,研究尚处于起步阶段^[18-21]。

为研究重组竹材在荷载作用下的蠕变性能,本文对特定温度、湿度情况下不同荷载水平的重组竹

进行了短期受弯蠕变试验研究,分析了重组竹受弯蠕变的规律,并给出其 Burgers 模型的参数,为重组竹的研究和应用提供了理论依据。

1 试验材料

本试验所采用的重组竹由安徽宏宇竹木科技有限公司生产,含水率为 6%~8%,密度为 $1.1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。本次受弯蠕变试验的试件共有 9 根,每 3 根为 1 组,采用三点弯曲加载,参考美国规范 ASTM D143-09 以及中国国家标准 GB/T 1936—2009,所有试件尺寸均为 $350\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 20\text{ mm}$,支座位置距离试件两端各 25 mm,如图 1 所示。取同一批次重组竹试件的短期抗弯试验的抗弯承载力作为蠕变试验的试验力参考值,短期抗弯试验结果如表 1 所示,短期抗弯试件破坏模式及荷载-位移曲线如图 2,3 所示。取试验力参考值的 20%,40%,60%作为荷载水平(应力比),按照加载的百分比进行编号,见表 2。

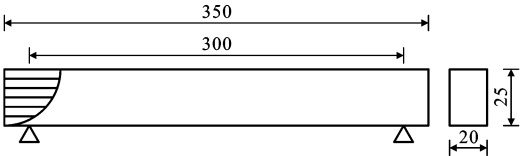


图 1 弯曲蠕变试件(单位:mm)

Fig. 1 Bending Creep Specimen (Unit:mm)

表 1 重组竹短期抗弯试验结果

Table 1 Results of Short-term Bending Test of Bamboo Scrimber

参数	极限荷载/kN	抗弯强度/MPa
平均值	2.90	104.6
标准差	0.36	13.1
变异系数	0.13	0.13

2 试验方案

进行受弯蠕变试验时,室内温度为 32~35 ℃,为使蠕变试验中各试件的内外温湿度平衡以保证蠕变变形结果精确,需要对试件进行预先处理,将每个试件置于温度 40 ℃、湿度 60%的恒温箱中,预处理大于 6 h,保证试件内部温度与湿度平衡后,在相同条件下进行受弯蠕变试验。

试验采用试验力控制,加载速度为 $50\text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$,加载至 0.5 kN,再以 $50\text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度卸载至 0



图 2 重组竹短期抗弯试件破坏模式

Fig. 2 Failure Mode of Short-term Bending Specimens of Bamboo Scrimber

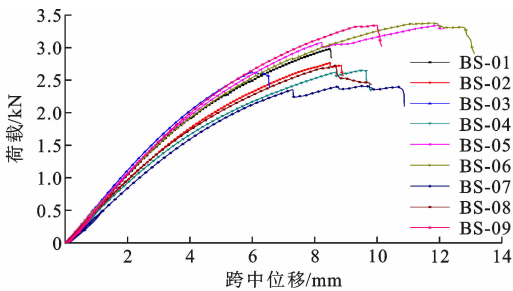


图 3 重组竹短期抗弯试验荷载-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement Curves of Short-term Bending Test of Bamboo Scrimber

表 2 重组竹受弯蠕变试件参数

Table 2 Parameters of Bamboo Scrimber Bending Creep Specimens

试件 编号	宽度/ mm	高度/ mm	长度/ mm	跨径/ mm	荷载水 平/%	荷载/ kN
BS-2001	20	25	350	300	20	0.58
BS-2002	20	25	350	300	20	0.58
BS-2003	20	25	350	300	20	0.58
BS-4001	20	25	350	300	40	1.16
BS-4002	20	25	350	300	40	1.16
BS-4003	20	25	350	300	40	1.16
BS-6001	20	25	350	300	60	1.74
BS-6002	20	25	350	300	60	1.74
BS-6003	20	25	350	300	60	1.74

kN,循环 2 次后,以 $50\text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ 的加载速度加载至蠕变试验所需荷载,试验荷载和变形由试验机自带传感器测得(图 4)。受弯蠕变试验开始第 1 h 内的采样间隔为每 2 s 采集 1 个数据,后 5 h 内的采样间隔为每 4 s 采集 1 个数据。本试验在温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿度 60% 的高温条件下进行,通过高温条件进行加速试验,以此研究试件长期蠕变的受力情况,试验时间以



图 4 弯曲蠕变试验

Fig. 4 Bending Creep Test

变形增长趋势稳定为判断依据,每个试件的试验时间约为 6.03 h,各荷载水平下,虽然变形仍在增长,但变形发展趋势趋于稳定。

3 试验结果

3.1 位移-时间曲线

所有试件在蠕变过程中未发生破坏,未见各试件发生表面剥落、开裂等明显异常情况。经过试验机采集得到位移-时间数据,考虑加载时的循环荷载,去除误差,绘制出各受弯蠕变试件从循环荷载结束至蠕变变形 6 h 的位移-时间曲线,如图 5 所示。

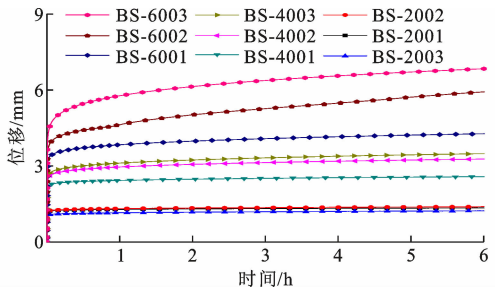


图 5 重组竹受弯蠕变位移-时间关系曲线

Fig. 5 Displacement-time Curves of Bending Creep of Bamboo Scrimber

观察图 5 可知,20%和 40%荷载水平的试件位移已大致趋于稳定,60%荷载水平的试件位移增长趋势也趋于稳定。各组试件的初始位移具有瞬时性与相似性,即同组荷载的试件在加载至所需荷载后,发生瞬时变形,且位移变化数值较接近;随着荷载水平的增加,位移的增加速率增大,且伴随着时间的增加,荷载较大水平组 BS-60 与荷载较小水平组 BS-20 相比,其蠕变速率也相应较大。3 组不同荷载水平的弯曲蠕变曲线均表现出典型蠕变曲线的前 2 个状态阶段:初始瞬时蠕变状态和减速蠕变状态。

3.2 增长率与归一化分析

为研究不同荷载下位移-时间变化的增长规律,

以跨中初始位移为初始值,计算其余所有数据相对该初始值的增长率,如式(1)所示。表 3 给出了各受弯蠕变试件的初始位移、终末位移及最终位移增长率的结果。

$$\xi(t)=\left|\frac{\delta(t)-\delta_0}{\delta_0}\right|\times 100\%$$

(1)

式中: $\xi(t)$ 为时间 t 的位移相对于初始位移的增长率; $\delta(t)$ 为 t 时的位移; δ_0 为初始位移。

表 3 重组竹受弯蠕变位移变化及增长率

Table 3 Variation and Growth Rate of Bending Creep Displacement of Bamboo Scrimber					
试件编号	初始位移/ mm	平均初始 位移/mm	终末位移/ mm	增长率/%	平均增 长率/%
BS-2001	1.173	1.137	1.350	15.11	17.00
BS-2002	1.190		1.407	18.24	
BS-2003	1.048		1.234	17.66	
BS-4001	2.141	2.352	2.580	20.46	31.93
BS-4002	2.409		3.278	36.05	
BS-4003	2.504		3.488	39.28	
BS-6001	3.142	3.569	4.272	35.95	57.76
BS-6002	3.522		5.924	68.22	
BS-6003	4.042		6.835	69.10	

从表 3 可以看出,对应 20%,40%,60%荷载水平的重组竹受弯蠕变最终位移增长率分别为 17.00%,31.93%,57.76%,荷载水平越高,位移增长率的增加幅度越大。

重组竹受弯蠕变的增长率如图 6 所示。为了更加合理地评价蠕变变化规律,规避初始位移绝对数值的影响,参考美国规范 ASTM D6815-02 对相对蠕变的定义,即 $\delta(t)/\delta_0$,将所有受弯蠕变数据归一化处理,得到重组竹受弯相对蠕变-时间曲线,如图 7 所示。

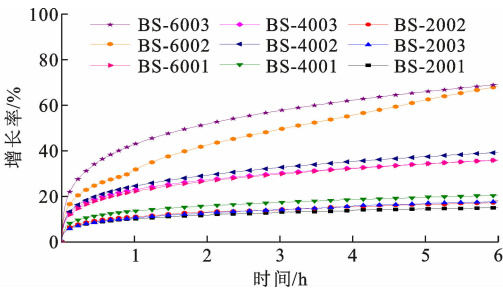


图 6 重组竹受弯蠕变的增长率

Fig. 6 Growth Rate of Bending Creep of Bamboo Scrimber
由图 7 可以发现,随着时间的增加,所有试件的蠕变增长率逐渐增大,其增长速率则呈现减小状态,表现了重组竹蠕变的第二阶段即减速蠕变状态。对比各试件的增长率曲线发现,荷载水平越大,其增长

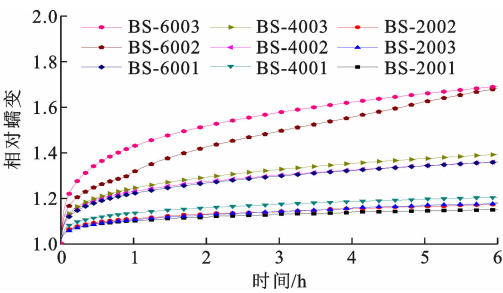


图 7 重组竹受弯相对蠕变-时间曲线

Fig. 7 Bending Relative Creep-time Curves of Bamboo Scrimber

率与位移增长速率也越大。综合对比发现所有试件都表现出明显的有区别的初期变形。可见,相对蠕变随着时间的增大而增大,荷载水平越大的试件相对蠕变也越大,且不同荷载水平组的曲线斜率也不同,荷载水平较大组的相对蠕变增加速率比荷载水平较小组的增加速率大。

3.3 蠕变预测模型

在黏弹性材料蠕变理论模型中,通常使用蠕变柔量 $J(t)$ 来表示材料的蠕变能(图 8),其表达式为

$$J(t)=\delta(t)/F_0=J_0+J_v(t)+J_{ev}(t)$$

(2)

式中: J_0 为瞬时弹性柔量, $J_0=1/E_e$, E_e 为瞬时弹性模量; $J_v(t)$ 为黏性柔量, $J_v(t)=t/\eta_v$, η_v 为黏性系数; $J_{ev}(t)$ 为黏弹性柔量, $J_{ev}(t)=[1-\exp(-E_{ev}t/\eta_{ev})]/E_{ev}$, E_{ev} 为延时弹性模量, η_{ev} 为黏弹性系数; F_0 为材料所受恒载。

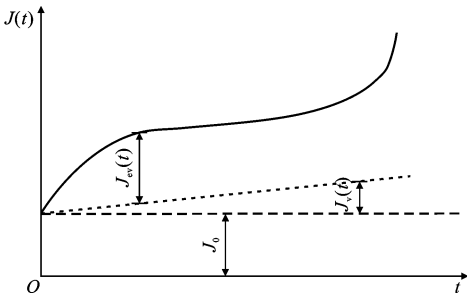


图 8 黏弹性材料蠕变曲线

Fig. 8 Creep Curve of Viscoelastic Material

在蠕变柔量 $J(t)$ 的表达式中,瞬时弹性柔量 J_0 为施加荷载的瞬时弹性变形量,该变形不随时间变化而变化;黏性柔量 $J_v(t)$ 则是随着时间缓慢线性增加的值,其系数值为黏性系数的倒数,在蠕变曲线中表现为恒速蠕变阶段的蠕变速率,即材料的黏性系数越小,材料的蠕变速率越大;黏弹性柔量 $J_{ev}(t)$ 的值受黏弹性模量及黏弹性系数影响,随着时间增加,黏弹性柔量增加明显而后增速减缓,最终会趋于某一数值,在蠕变曲线中呈现为减速蠕变阶段。

采用蠕变柔量特性常数能较好地分析蠕变性能的组成,但在预测重组竹材料的受弯蠕变性能上,缺乏一个较为广泛的实用模型,在蠕变柔量的研究基础之上,需结合现有模型提出符合受弯蠕变试验结果的蠕变理论模型来预测长期变形。

Burgers 模型是目前能比较准确地模拟和预测木质材料蠕变的力学模型,描述黏弹性材料蠕变发展规律的 Burgers 模型的通用表达式为

$$\delta(t)=\frac{F_0}{E_e}+\frac{F_0}{\eta_v}t+\frac{F_0}{E_{ev}}[1-\exp(-\frac{E_{ev}}{\eta_{ev}}t)]$$

(3)

将各分项做进一步简化得

$$\delta(t)=A+Bt+C[1-\exp(-Dt)]$$

(4)

式中: A 为瞬时弹性变形; B 为黏性变形相关系数; C 和 D 为黏弹性变形相关系数。

根据本文试验结果可得到式(4)中各参数的取值,见表 4。

表 4 重组竹受弯蠕变 Burgers 模型表达式参数

Table 4 Parameters of Bending Creep Burgers Model

Expressions of Bamboo Scrimber

荷载水平/%	A	B	C	D	R^2
20	1.137	0.015	0.108	7.090	0.974
40	2.352	0.060	0.436	5.936	0.974
60	3.569	0.192	1.037	5.011	0.982

注: R^2 为决定系数。

由此得到各荷载水平下 Burgers 模型的具体表达式为:

20% 荷载水平

$$\delta_{20\%}(t)=1.137+0.015t+0.108[1-\exp(-7.090t)]$$

(5)

40% 荷载水平

$$\delta_{40\%}(t)=2.352+0.060t+0.436[1-\exp(-5.936t)]$$

(6)

表 5 重组竹受弯蠕变中各变形所占比例

Table 5 Proportion of Each Deformation in Bending Creep of Bamboo Scrimber

荷载水平/%	试件编号	位移/mm	弹性变形/mm	黏弹性变形/mm	黏性变形/mm	弹性变形占比/%	黏弹性变形占比/%	黏性变形占比/%
20	BS-2001	1.350	1.226	0.067	0.057	90.82	4.96	4.22
	BS-2002	1.407	1.240	0.077	0.090	88.13	5.47	6.40
	BS-2003	1.234	1.088	0.066	0.080	88.20	5.35	6.45
40	BS-4001	2.580	2.258	0.170	0.152	87.53	6.59	5.88
	BS-4002	3.278	2.612	0.348	0.318	79.69	10.62	9.69
	BS-4003	3.488	2.728	0.390	0.370	78.22	11.18	10.60
60	BS-6001	4.272	3.396	0.447	0.429	79.50	10.46	10.04
	BS-6002	5.924	3.952	0.639	1.333	66.71	10.79	22.50
	BS-6003	6.835	4.622	1.186	1.027	67.63	17.35	15.02

60% 荷载水平

$$\delta_{60\%}(t)=3.569+0.192t+1.037[1-\exp(-5.011t)]$$

(7)

为研究弹性变形、黏弹性变形、黏性变形与荷载水平的规律,取参数 A 值与参数 C 值,结合表 3 中的终末位移数据,求得各受弯蠕变试件的弹性变形、黏弹性变形与黏性变形在总变形中所占比例,如表 5 所示。

由表 5 可以看出:瞬时弹性变形随着荷载水平的增大而增大,其占比随着荷载水平的提高而降低;黏性变形随着荷载水平的增加而增加;黏弹性变形与荷载水平呈正相关,其在总变形中的比例与黏性变形相似。

在蠕变柔量的研究基础上,将公式(3)除以蠕变初始变形 δ_0 ,可以得到 Burgers 模型的相对蠕变表达式,即

$$\zeta(t)=\frac{F_0}{E_e\delta_0}+\frac{F_0}{\eta_v\delta_0}t+\frac{F_0}{E_{ev}\delta_0}[1-\exp(-\frac{E_{ev}}{\eta_{ev}}t)]$$

(8)

式中: $\zeta(t)$ 为相对蠕变。

将 $\zeta(t)$ 转换为参数形式,即

$$\zeta(t)=\beta_1+\beta_2t+\beta_3[1-\exp(-\beta_4t)]$$

(9)

式中: $\beta_1=F_0/(E_0\delta_0)$; $\beta_2=F_0/(\eta_v\delta_0)$; $\beta_3=F_0/(E_{ev}\delta_0)$; $\beta_4=E_{ev}/\eta_{ev}$ 。

由于前文已通过回归得出各组试件的 Burgers 模型参数,将前文中各模型参数与表 3 中的初始位移平均值代入公式(8)即可求得相对蠕变表达式中各参数 $\beta_1,\beta_2,\beta_3,\beta_4$ 的值,如表 6 所示。将各参数值代入公式(8),即可得到重组竹短期受弯蠕变的相对蠕变表达式:

20% 荷载水平

$$\zeta_{20\%}(t)=1.0+0.013t+0.095[1-\exp(-7.090t)]$$

(10)

表 6 重组竹受弯相对蠕变表达式参数

Table 6 Parameters of Bending Relative Creep

Expressions of Bamboo Scrimber

荷载水平 / %	β_1	β_2	β_3	β_4
20	1.0	0.013	0.095	7.090
40	1.0	0.026	0.185	5.936
60	1.0	0.054	0.291	5.011

40% 荷载水平

$$\zeta_{40\%}(t) = 1.0 + 0.026t + 0.185[1 - \exp(-5.936t)] \quad (11)$$

60% 荷载水平

$$\zeta_{60\%}(t) = 1.0 + 0.054t + 0.291[1 - \exp(-5.011t)] \quad (12)$$

表 6 中 β_1 为材料初始弹性变形, β_2, β_3 随着应力比的增加, 其参数值相应地呈线性增大, 且趋势明显; β_4 随着应力比的增加呈线性减小。 β_2, β_3 和 β_4 都与应力比 γ 存在线性关系, 如图 9 所示。

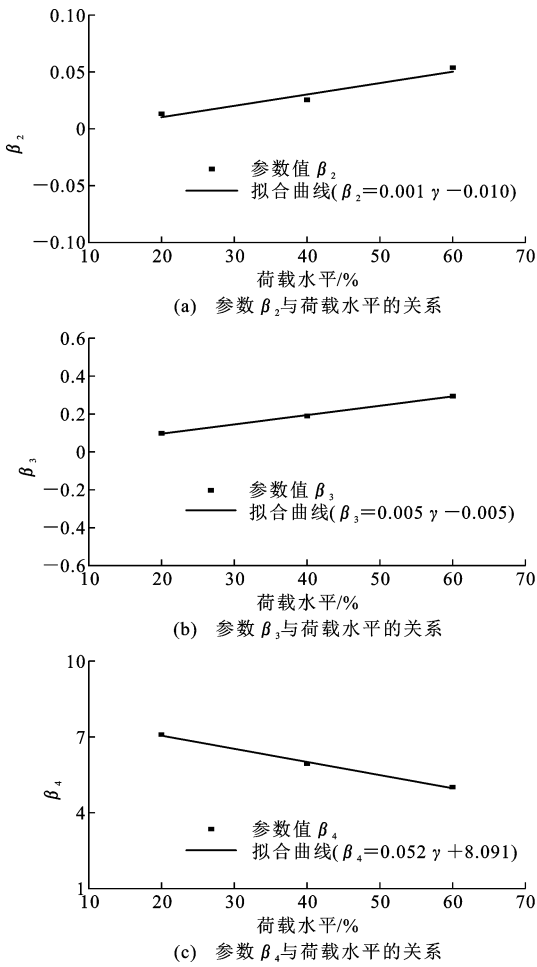


图 9 重组竹受压相对蠕变参数值与应力比的关系

Fig. 9 Relations Between Relative Creep Parameters and Stress Ratios of Bamboo Scrimber Under Compression

经过回归分析可得各参数的表达式为

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= 1.0 \\ \beta_2 &= 0.001\gamma - 0.010 \\ \beta_3 &= 0.005\gamma - 0.005 \\ \beta_4 &= -0.052\gamma + 8.091 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

结合式(9)的相对蠕变表达式, 可以得到重组竹的受弯相对蠕变与应力比、时间相关的表达式为

$$\zeta_\gamma = 1 + (0.001\gamma - 0.010)t + (0.005\gamma - 0.005) \cdot \{1 - \exp[-(-0.052\gamma + 8.091)t]\} \quad (14)$$

式中: ζ_γ 为应力比 γ 下的相对蠕变。

采用公式(14)对本文的重组竹受弯蠕变进行预测, 并与试验结果进行对比, 如图 10 所示。由图 10 可见, 试验结果反映了参数影响的变化规律, 预测曲线与试验曲线的发展趋势基本一致, 表明本文建议模型能够很好地应用于重组竹受弯短期蠕变的预测。

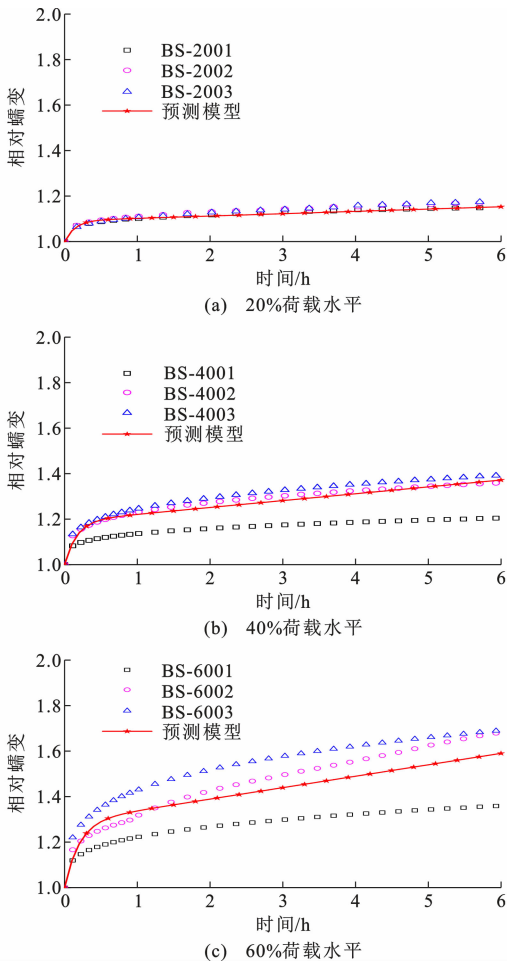


图 10 重组竹受弯蠕变预测结果与试验结果对比

Fig. 10 Comparison Between Predicted Results and Experimental Results of Bending Creep of Bamboo Scrimber

通过公式(14)可以预测重组竹受弯相对蠕变的长期发展趋势,在确定施加荷载的情况下,可以预测重组竹在几小时后的受弯蠕变量。本文研究结果是基于特定的温度与湿度环境中的重组竹受弯加载试验所得到,对于承受长期荷载作用的实际工程中的重组竹受弯构件,其所处的环境、温度、湿度等因素均随着时间的变化而改变,如需预测确定荷载下的长期变形,尚需建立加速环境与普通使用环境之间的重组竹受弯构件蠕变量的定量模型关系,其定量评价实际重组竹工程结构的长期变形尚需大量试验数据的积累。因此本文只对承受长期荷载作用的实际重组竹工程结构提供设计方面的参考,并提示重组竹受弯设计使用应注意的环境温度、荷载条件。

4 结 语

(1)重组竹受弯蠕变试件在较低的荷载水平下蠕变曲线数据接近,蠕变变形随着时间的推移而增加,变形速率较低,曲线整体较平缓稳定;在较高荷载水平作用下,蠕变变形速率较快。

(2)受弯蠕变试验的初始变形具有阶段性,在加载至所需荷载后,荷载不变,变形比较明显,变形增长率随着时间增加而逐渐增大,其增长速率则呈现减速状态,表现了重组竹蠕变的减速蠕变状态。

(3)重组竹受弯蠕变总变形中,瞬时弹性变形随着荷载水平的增加而增大,其在总变形中的占比随着荷载水平的增加而减小;黏弹性变形和黏性变形及其在总变形中的占比均随着荷载水平的增大而增大,黏弹性变形和黏性变形在荷载水平达到40%和60%时,其占比相对于20%荷载水平时明显增加。

(4)基于试验结果,确定了不同荷载水平的Burgers模型参数,并给出了各参数值的变化规律,基于此,建议了考虑荷载水平的重组竹受弯短期蠕变预测模型,模型预测结果与试验结果吻合较好。

参考文献:

References:

- [1] 李玉敏,冯鹏飞. 基于第九次全国森林资源清查的中国竹资源分析[J]. 世界竹藤通讯, 2019, 17(6): 45-48.
LI Yu-min, FENG Peng-fei. Bamboo Resources in China Based on the Ninth National Forest Inventory Data[J]. World Bamboo and Rattan, 2019, 17(6): 45-48.
- [2] 魏 洋,张齐生,蒋身学,等. 现代竹质工程材料的基本性能及其在建筑结构中的应用前景[J]. 建筑技术,

2011, 42(5): 390-393.

WEI Yang, ZHANG Qi-sheng, JIANG Shen-xue, et al. Basic Properties and Prospects of Modern Bamboo Engineering Materials Applied in Building Structures[J]. Architecture Technology, 2011, 42(5): 390-393.

- [3] 李海涛,宣一伟,许 斌,等. 竹材在土木工程领域的应用[J]. 林业工程学报, 2020, 5(6): 1-10.
LI Hai-tao, XUAN Yi-wei, XU Bin, et al. Bamboo Application in Civil Engineering Field[J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, 5(6): 1-10.
- [4] 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(增1): 140-145.
WEI Yang, WU Gang, ZHANG Qi-sheng, et al. Theoretical Analysis and Experimental Test of Full-scale Bamboo Scrimber Flexural Components[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(S1): 140-145.
- [5] 魏 洋,周梦倩,袁礼得. 重组竹柱偏心受压力学性能[J]. 复合材料学报, 2016, 33(2): 379-385.
WEI Yang, ZHOU Meng-qian, YUAN Li-de. Mechanical Performance of Glulam Bamboo Columns Under Eccentric Loading[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(2): 379-385.
- [6] 魏 洋,纪雪微,端茂军,等. 重组竹轴向应力-应变关系模型[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3): 572-579.
WEI Yang, JI Xue-wei, DUAN Mao-jun, et al. Model for Axial Stress-strain Relationship of Bamboo Scrimber[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(3): 572-579.
- [7] CHEN S, WEI Y, HU Y F, et al. Behavior and Strength of Rectangular Bamboo Scrimber Columns with Shape and Slenderness Effects[J]. Materials Today Communications, 2020, 25: 101392.
- [8] 陈 国,于云飞,李 祥,等. 定向刨花板加固腹板开洞竹木工字梁力学性能研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 260-266.
CHEN Guo, YU Yun-fei, LI Xiang, et al. Study on Laminated Bamboo Lumber-wood I Shaped Joist with Web Opening Reinforced by Oriented Strand Board Plates[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(23): 260-266.
- [9] 李海涛,苏靖文,魏冬冬,等. 基于大尺度重组竹试件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.
LI Hai-tao, SU Jing-wen, WEI Dong-dong, et al. Comparison Study on Parallel Bamboo Strand Lumber Un-

- der Axial Compression for Different Directions Based on the Large Scale[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2016, 37(2): 67-72.
- [10] 李海涛, 魏冬冬, 苏靖文, 等. 竹重组材偏心受压试验研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(3): 561-565, 583.
LI Hai-tao, WEI Dong-dong, SU Jing-wen, et al. Experimental Study on PSBL Under Eccentric Compression[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(3): 561-565, 583.
- [11] 李 频, 陈伯望. 结构用重组竹抗弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(2): 117-121, 116.
LI Pin, CHEN Bo-wang. Experimental Research on Flexural Properties of Bamboo Scrimber Beam[J]. Building Structure, 2020, 50(2): 117-121, 116.
- [12] 陈伯望, 刘玉琪, 吕炜磊, 等. 重组竹柱长期受压性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2019, 45(5): 27-31.
CHEN Bo-wang, LIU Yu-qi, LYU Wei-lei, et al. Research on the Mechanical Properties of Reconsolidated Bamboo Column Under Long Term Axial Compression[J]. Sichuan Building Science, 2019, 45(5): 27-31.
- [13] 苏 毅, 宗生京, 徐 丹, 等. 竹集成材简支梁抗弯性能试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(1): 54-60.
SU Yi, ZONG Sheng-jing, XU Dan, et al. Experimental Study on Flexural Properties of Glued Laminated Bamboo Simply Supported Beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(1): 54-60.
- [14] 赵培焱, 张新培. 结构用重组竹弯曲强度和剪切强度的尺寸效应研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(4): 184-190.
ZHAO Pei-yan, ZHANG Xin-pei. Size Effect of Bending Strength and Shear Strength of Structural Bamboo Scrimber [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(4): 184-190.
- [15] GOTTRON J, HARRIES K A, XU Q. Creep Behaviour of Bamboo[J]. Construction and Building Materials, 2014, 66: 79-88.
- [16] HOSEINZADEH F, ZABIHZADEH S M, DAS-TOORIAN F. Creep Behavior of Heat Treated Beech Wood and the Relation to Its Chemical Structure[J]. Construction and Building Materials, 2019, 226: 220-226.
- [17] VAN DEN OEVER M, MOLENVELD K. Creep Deflection of Wood Polymer Composite Profiles at Demanding Conditions[J]. Case Studies in Construction Materials, 2019, 10: e00224.
- [18] 李玉顺, 张秀华, 吴培增, 等. 重组竹在长期荷载作用下的蠕变行为[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1): 65-71.
LI Yu-shun, ZHANG Xiu-hua, WU Pei-zeng, et al. Creep Behavior of Bamboo Scrimber Under Long-term Load[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1): 65-71.
- [19] 孙丽惟, 卞玉玲, 周爱萍, 等. 重组竹短期蠕变性能研究[J]. 林业工程学报, 2020, 5(2): 69-75.
SUN Li-wei, BIAN Yu-lin, ZHOU Ai-ping, et al. Study on Short-term Creep Property of Bamboo Scrimber[J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, 5(2): 69-75.
- [20] 章卫钢, 江文正, 唐荣强. 重组竹短期抗弯蠕变特性及其微观结构研究[J]. 林业工程学报, 2017, 2(3): 33-37.
ZHANG Wei-gang, JIANG Wen-zheng, TANG Rong-qiang. Study on Short-term Bending Creep Behavior and Microstructure of Bamboo Scrimber[J]. Journal of Forestry Engineering, 2017, 2(3): 33-37.
- [21] 赵卫锋, 杨 斌, 周 靖, 等. 带约束拉杆方钢管/竹胶合板组合柱轴压蠕变性能[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(3): 465-471.
ZHAO Wei-feng, YANG Bin, ZHOU Jing, et al. Creep Behavior of Square Steel Tube/Bamboo-plywood Composite Column with Binding Bars[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(3): 465-471.