

足尺重组竹受弯构件的试验与理论分析

魏 洋^{1,2}, 吴 刚², 张齐生¹, 蒋身学¹

(1. 南京林业大学, 南京 210037; 2. 东南大学, 南京 210096)

摘要:通过5个足尺重组竹受弯构件的试验与理论分析,详细研究了重组竹的抗弯性能。研究表明,重组竹受弯构件的典型破坏形态是底部竹纤维拉断和中性轴附近层间剪切破坏,重组竹受弯构件的设计由截面刚度控制,对应挠度限值 $L/250$ 的荷载值 $P_{L/250}$ 与极限荷载 P_{max} 的比值有较好的稳定性,通过回归建立了重组竹抗弯强度 f_m 与弹性模量 E 的相关关系模型,弹性模量表达的刚度能够准确预测承载力;对于重组竹受弯构件,平截面假定依然成立;参考木结构设计计算方法,考虑竹材重组竹的材料特性,给出了重组竹受弯构件的计算方法,初步建议了重组竹抗弯强度设计值、顺纹抗剪强度设计值、弹性模量 E 的设计指标。

关键词:竹结构;竹质工程材料;重组竹;受弯构件;力学性能

中图分类号:TU366.1

文献标志码:A

文章编号:1674-4764(2012)S1-0140-06

Theoretical Analysis and Experimental Test of Full-scale Bamboo Scrimber Flexural Components

WEI Yang^{1,2}, WU Gang², ZHANG Qisheng¹, JIANG Shenxue¹

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037; 2. Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract: The bending tests and theoretical analysis of five full-scale bamboo scrimber components were conducted and the flexural behavior of bamboo scrimber was researched in detail. Results show that the typical failure modes of bamboo scrimber flexural components are the bamboo fiber fracture at the bottom and interlaminar shear failure near the neutral axis. The sectional stiffness control the design for the bamboo scrimber flexural components, the ratio of $P_{L/250}$ of the load corresponding to the deflection limit value of $L/250$ and ultimate load P_{max} has good stability. The relationship model of bending tensile strength f_m and elastic modulus E was established by regression, which shows that the sectional stiffness expressed by the elastic modulus could predict the bearing capacity well. The plane-section assumption is still valid. The bamboo calculation methods of scrimber flexural components were proposed considering the materials properties of bamboo scrimber based on wood structure design methods. The design value of bamboo bending strength, shear strength parallel to grain and the elastic modulus E were presented preliminarily.

Key words: Bamboo structure; Bamboo engineering materials; Bamboo scrimber; Flexural components; Mechanical properties.

国内外针对竹材先后开发了竹材胶合板、竹材集成材、竹材层积材、竹材重组材等多种竹质工程材料,产品品种已经系列化和标准化^[1],竹材作为结构的主要材料在土木工程领域的研究与应用尚处于起步阶段,但已引起越来越广泛的兴趣。竹材较钢材、混凝土、木材具有最高的强重比^[2],竹材作为建筑材料具有环保、低碳、可再生、经济等优良性能^[3],尤其在住宅建筑中更具有广阔的前景^[4],竹材的现代利用可在部分工程中替代混凝土、钢、木等传统材料^[5]。目前,针对竹结构的研究集中于节点、原竹结构和胶合竹结构的基本受力性能:文献[6]针对原竹研究了PVC新型连接节点,可应用于中等跨度的轻质竹结构的建造;文献[7]利用竹层积材加工成不同尺寸和形状的梁部件,然后用螺栓、夹板、钉子等金属连接件连接和组装,制成竹层积材屋架,并在云南屏边小学的校舍建造中进行了应用;文献[8]以普通的竹材胶合

板为基本材料,使用常规的规格板材,采用模块式设计和生产,进行了快速装配式竹结构抗震安置房的建设;文献[9]对胶合竹板制成长梁的成型工艺和构件的力学性能进行了研究,并以胶合竹板为基本材料建造了竹结构人行桥梁;文献[10]对层积材梁进行了较为深入的研究,研究了层积材梁的破坏特征及承载性能;文献[11]以重组竹柱、层积材梁和竹帘胶合板楼板构建了现代竹结构抗震安居房体系,梁柱结构体系承重,金属节点连接。利用竹材制品而建造的竹结构在生态性、装配化、抗震性等各个方面具有与木结构相似的优良性能,而相对于竹材胶合板、竹材集成材、竹材层积材等制品,竹材重组材具有更好的材料均质性,力学性能更稳定,竹材利用率更高,然而,针对竹材重组材的抗弯性能的研究目前还未见公开报道。笔者通过5个足尺重组竹受弯构件的试验与理论分析,详细研究了重组竹抗弯性能,包括其破坏

收稿日期:2012-03-10

基金项目:教育部博士点基金(20103204120007);住房和城乡建设部科学技术项目(2011-K2-9);混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室开放课题

作者简介:魏洋(1978-),男,副教授,主要从事竹、木、FRP复合材料与新型结构方面的研究,(E-mail)wy78_seu@yahoo.com.cn.

形态、计算方法及其力学性能的设计指标等,为重组竹在土木工程领域的应用奠定一定的基础。

1 重组竹生产工艺与加载测试

1.1 重组竹生产工艺

重组竹又称重竹,是一种将竹材重新组织并加以强化成型的一种新型竹质工程材料,其将竹材碾压加工为纵向不断裂、松散而交错相连的竹丝束,以竹丝束为基本单元,通过干燥、浸胶、组坯、热压固化而成的一种高强度、高密度、材质均匀、纹理美观的新型竹质工程材料,其广泛应用于高档地板、家具制作领域,作为建筑构件也是理想的材料。重组竹的成型工艺可分为普通热压工艺、冷压工艺和高频热压工艺 3 种成型工艺^[12]:热压成型法构件的厚度一般不能超过 50 mm,冷压成型法的构件长度目前不超过 2 000 mm,高频热压成型法突破了重组竹生产的厚度和长度等局限,目前已经处于初试阶段。本文所采用的重组竹构件仍然为冷压成型工艺生产,关键工艺如图 1 所示,(a)为浸胶干燥后的竹丝束,(b)为

冷压机械,(c)为竹材冷压坯料装模加锁情况,(d)为冷压成型重组竹方料。

1.2 试验加载及测试

为研究重组竹受弯构件的抗弯性能,共制作了 5 个重组竹受弯构件,分别以 B1~B5 编号,试件尺寸为 1 870 mm×160 mm×106 mm,加载装置采用杭州邦威结构加载系统,四点弯曲加载,两加载点间距 570 mm,试件全长 1 870 mm,两支座中心线间距 1 710 mm。正式加载前,先预加 3 kN 荷载对试件预压,检查仪器是否正常工作以及消除接触不良现象,加载过程中采用位移控制加载,试验初期加载速度为 2 mm/min,在接近理论最大荷载时速度变为 1.5 mm/min,以便观察试件的具体破坏过程。试验时,测量试件跨中位移,同时在跨中截面沿试件高度及顶、底面粘贴应变片测量侧面应变及顶、底面应变,试件外表面共计布置了 9 个应变片,分别记为 1#~9#,具体的加载装置图及跨中截面应变片布置如图 2 所示。

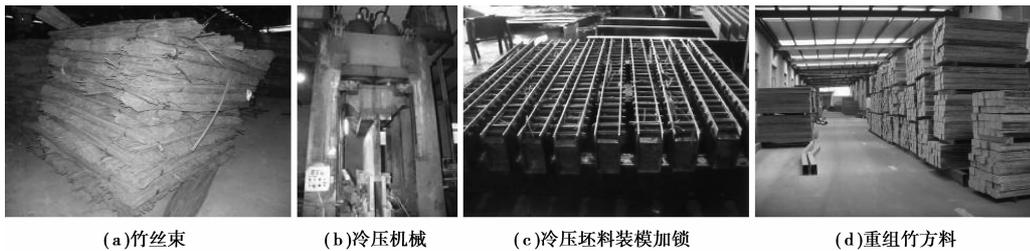


图 1 重组竹冷压成型关键工艺

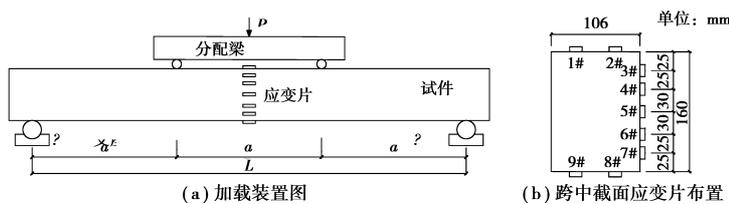


图 2 加载装置图及跨中截面应变片布置

2 试验结果与分析

2.1 荷载-位移曲线及破坏特征

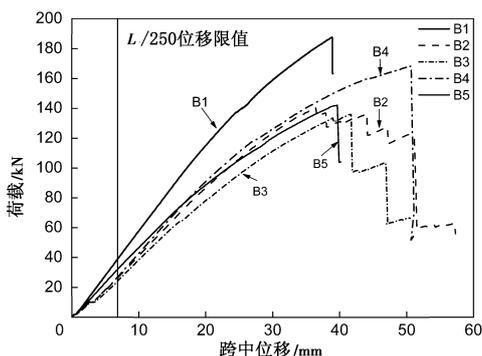


图 3 试件荷载-跨中位移关系曲线

初期,随着荷载的增加,位移基本呈线性增加,继续加载,曲线的斜率呈逐渐减小的变化,定义荷载-位移曲线由线性变化为非线性的转折点为比例极限 P_y ,B1~B5 的比例极限 P_y 分别为 128.1、98.6、90.0、110.3、83.9 kN,其约为极限荷载的 60%~70%左右,继续加载,构件表现出一定的塑性变形,刚度略有下降,变形渐趋明显,荷载上升越来越慢,在接近极限荷载时,出现竹纤维断裂的轻微响声。

各重组竹受弯试件的破坏特征的典型照片见图 4。其典型破坏形态可归纳为两种。破坏形式 1 为试件底部竹纤维拉断(如 B1、B2、B3、B5),其破坏发生于试件中部弯矩较大区域,由于底部最外层纤维所受拉应力最大,在达到极限荷载时底部外侧纤维受拉断裂,其裂口齐整,裂口高度 20~30 mm,约为截面高度的 1/8~1/5,其一旦出现裂口,再继续加载时,即在裂口顶端产生水平纵向裂缝,水平纵向裂缝自裂口开始,沿试件的纵向向两端扩展,使得水平纵向裂缝以下的竹材逐渐丧失承载作用,截面裂缝以上竹材继续工作,并维持一定的荷载值,持续加载,在试件跨中区域,竹材继续向上断裂,截面有效高度越来越小,承载力呈阶梯形下降(如

图 3 给出了试件的跨中位移随荷载的变化曲线,在加载

B2、B3),受拉破坏是重组竹受弯试件的主要破坏形式,虽然受压区较早进入塑性,但其极限压应变较大,而受拉断裂更容易在受拉侧区瑕疵处出现(如竹纤维搭接、不连续处等)。破坏形式2为试件中性轴附近发生沿着纵向水平的竹纤维层之间的层间剪切破坏(如B4),在剪力作用下,中性轴附近剪应力最大,加载后期,在试件轴线方向出现一条贯通左右的水平裂缝,截面中部发生了竹材层间的水平错动,荷载急剧下降,达到其极限荷载,分析原因,由于重组竹的胶合特性,其层间剪切强度不足,在剪力作用下,发生剪切破坏,尤其是高跨比较大时。

各重组竹受弯试件在破坏时,试件的变形都非常显著,

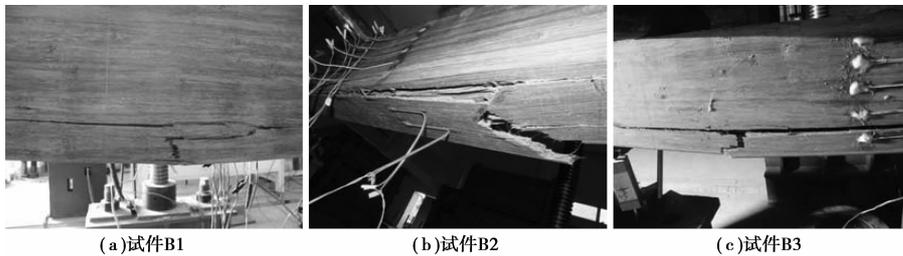


图4 破坏形式1:底部纤维脆性断裂

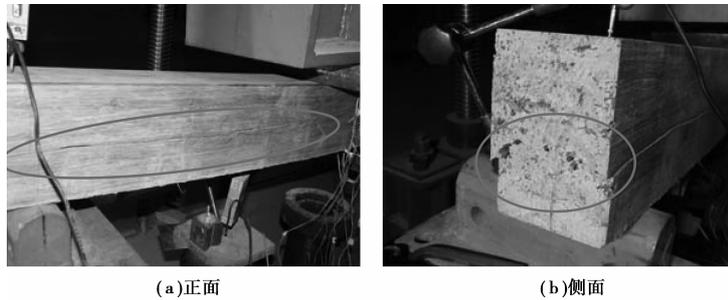


图5 破坏形式2:纵向剪切破坏(B4)

2.2 承载特性分析

各试件试验结果及截面刚度分析见表1,包括最大荷载 P_{\max} 、比例极限 P_y 、对应 $L/250$ 时的荷载值 $P_{L/250}$ 及弯曲弹性模量等。最大荷载 P_{\max} 的最大值为187.6 kN,最小值为136.0 kN,不计剪切破坏的B4,平均为151.5 kN,标准差22.3 kN,按弹性理论计算,相应抗弯强度平均为95.5 MPa,标准差15.3 MPa,变异系数为0.16。

由虚功原理,忽略剪力与轴力的影响,可以推导出四点加载弯曲试件跨中挠度计算公式

$$\Delta = \frac{Pa}{48EI}(3L^2 - 4a^2) \quad (1)$$

式中: Δ 为跨中挠度; P 为两加载点总荷载; E 为竹材弹性模量; I 为截面惯性矩; L 为梁跨度; a 为加载点距支座的距离(见图2)。

由公式(1),可以推得竹材弯曲弹性模量可按公式(2)计算,对应 $L/250$ 时各试件的弯曲弹性模量平均为11 936 MPa,标准差1 491 MPa,变异系数为0.12,具有95%的保证率的标准值为9 483 MPa。

$$E = \frac{Pa}{48\Delta I}(3L^2 - 4a^2) \quad (2)$$

跨中位移36~50 mm,约为跨度的 $1/50 \sim 1/30$,根据中国《木结构设计规范》^[14]规定,作为结构的受弯构件,梁和搁栅的挠度限值为 $L/250$ (L 为跨度),各试件破坏时的挠度均远远超过这一限值,从图3可以看出,各试件对应 $L/250$ 的荷载值与极限荷载相差甚远,按照规范的挠度限值要求,其材料强度得不到充分发挥,构件设计由截面刚度控制;从各试件荷载-位移曲线对比情况分析,除了试件B1的荷载值较大、刚度较大外,其他几个试件的试验曲线非常接近,离散型很小,表现出较为稳定的力学性能,其优于竹材层积材的试验结果^[10],反映了重组竹材料较好的均质性。

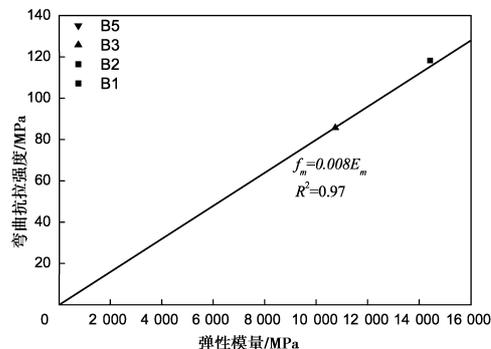


图6 重组竹抗弯强度 f_m 与弹性模量 E_m 的关系

根据文献^[10]的试验结果,竹材层积材梁的抗弯强度平均值为60.7 MPa,标准差14.5 MPa,弹性模量平均值为12 610 MPa,标准差1 609 MPa,对比分析,可以得出结论:重组材的抗弯强度明显高于层积材,变异系数较小,强度稳定性较好,而重组竹的弯曲弹性模量与层积材并无明显区别,二者相近。虽然各试件的承载力和弹性模量都有着一定的离散型,但同时可以发现 $P_{L/250}$ 与 P_{\max} 的比值 $P_{L/250}/P_{\max}$ 有

较好的稳定性,平均为 0.17,这与竹材层积材的试验结果相似^[10],即意味着构件的刚度高时,其承载力一定较大,进一步对重组竹抗弯强度 f_m 与弹性模量 E 的关系进行分析,如图 6 所示,二者具有非常好的相关性,对数据进行回归可得到公式(3),相关指标 $R^2 = 0.97$,意味着弹性模量高时其强度即高,弹性模量表达的刚度能够很好地预测承载力。

$$f_m = 0.008E \quad (3)$$

根据试件 B4 的试验结果,其沿着纵向水平发生剪切破坏,在剪区,剪切破坏的水平面基本位于截面高度 1/2 附近,根据极限承载力,按照剪应力计算公式(5),代入荷载及几何参数,推算重组竹的纵向层间剪切强度为 7.44 MPa,文献[13]根据重组竹梁的试验结果得到各试件的抗剪强度在 6.34~7.57 MPa之间,平均 7.09 MPa,本文试验结果与文献[13]的试验结果相近,这为重组竹试件的抗剪验算提供重要依据。

表 2 各试件试验结果及截面刚度分析

梁编号	最大荷载 P_{max}/kN	抗弯强度/ MPa	L/250 时的荷载 $P_{L/250}/kN$	$P_{L/250}/P_{max}$	弹性极限 P_y/kN	P_y/P_{max}	L/250 时的弯曲 弹性模量/MPa
B1 梁	187.6	118.2	35.5	0.19	128.10	0.68	14 418
B2 梁	140.3	88.4	23.3	0.17	98.60	0.70	11 408
B3 梁	136.0	85.7	21.9	0.16	90.00	0.66	10 730
B4 梁	168.2	—	24.2	0.14	110.30	0.66	12 165
B5 梁	142.0	89.5	29.5	0.21	83.90	0.59	10 961
平均	151.5	95.5	26.9	0.17	102.18	0.66	11 936
标准偏差	22.3	15.3	5.6	0.03	17.60	0.04	1 491
标准值	114.8	70.4	17.6	0.13	73.30	0.59	9 483

说明:挠度限值楼板梁和搁栅及 $l > 3.3$ m 的檩条 $L/250$ ^[14],试验梁即是 6.8 mm,标准值取其正态概率分布的 0.05 分位值确定,即具有 95%的保证率。

2.3 截面应变分析

图 7 为典型试件跨中截面的应变随荷载的变化,正为拉负为压,可以看出,在整个加载过程中,无论是受拉区,还是受压区,各测点的荷载-应变关系基本可近似为线性变化,只是在后期表现出一定的非线性,尤其是受压区的塑性表现明显,在达到极限荷载时,各试件受压区的竹纤维最大应变可

达 0.010~0.011,受拉区的竹纤维最大应变可达 0.008~0.010,截面最大拉应变略低于截面最大压应变,即使如此,受压区的最大压应变距离竹材 0.015~0.020 的极限压应变还较远,其受压的塑性并未充分发挥。试验过程中,重组竹试件截面平均应变沿截面高度基本呈线性分布,图 8 为典型试件跨中截面应变沿高度变化图。

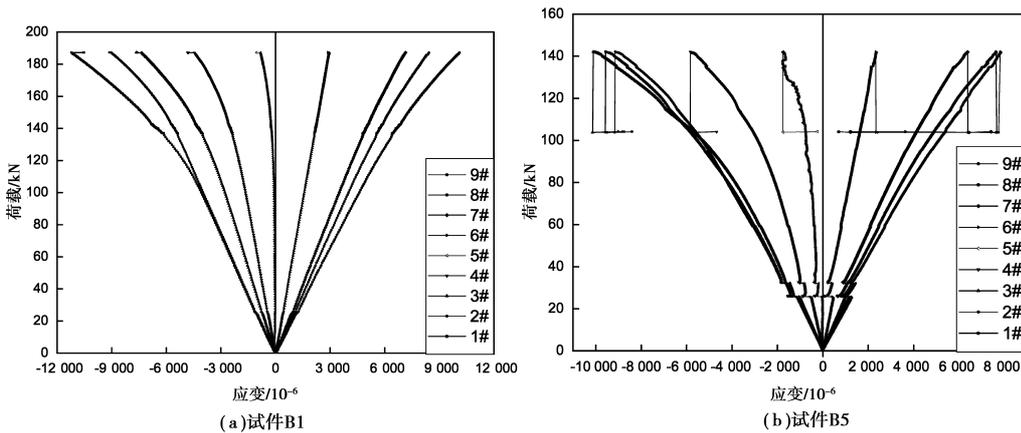


图 7 典型试件荷载-跨中截面应变曲线

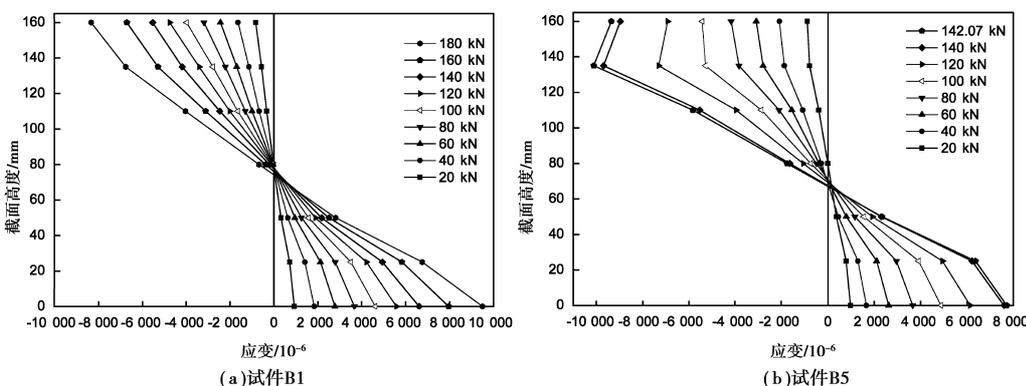


图 8 典型试件跨中截面应变沿高度变化图

可以看出平截面假定对于重组竹受弯构件是成立的,由于加载过程中试件受压边缘先进入塑性,而竹材受拉强度较高,受拉侧仍处于弹性阶段,此时中性轴不断下移,随着达到极限拉应变,试件最终破坏,中性轴的位置在加载过程中下降变化幅度不大,整个加载过程,中性轴距梁底距离为68~76 mm,约为0.425~0.475 h (h 为截面高度),平均0.45 h ,大约位于截面中部略微偏下,这与竹材层积材梁的试验结果也极为相似^[10]。

3 重组竹受弯构件的设计计算

目前,中国《木结构设计规范》对木结构受弯构件设计计算是基于弹性理论的一种简化方法,未考虑木材的弹塑性发展过程,未考虑构件实际承载的极限状态,对重组竹受弯构件,目前完整的重组竹应力-应变关系模型还未能建立,已有的研究表明竹材的受力性能与木材相似^[1-11],暂参考木结构设计计算方法,考虑竹材重组竹的材料特性,即可完成重组竹受弯构件的计算,其抗弯承载力、抗剪承载力分别按公式(4)、(5)计算,其挠度按照公式(6)验算:

$$\frac{M}{W_n} \leq f_m \quad (4)$$

式中: f_m 为竹材抗弯强度设计值; M 为弯矩设计值; W_n 为净截面抵抗矩。

$$\frac{VS}{Ib} \leq f_v \quad (5)$$

式中: f_v 为竹材纵向抗剪强度设计值; V 为剪力设计值; I 为全截面惯性矩; b 为截面宽度; S 为剪切面以上的截面面积对中性轴的面积矩。

$$w \leq [w] \quad (6)$$

式中: $[w]$ 为受弯构件的挠度限值; w 为受弯构件按荷载效应的标准组合计算的挠度。

对于公式(4)~(6)所涉及的重组竹力学性能指标:抗弯强度设计值 f_m 、抗剪强度设计值 f_v 以及弹性模量 E 理论上应该通过大量的试验进行确定。对于普通木材强度,中国《木结构设计规范》仍是基于无疵小试件试验确定,需要考虑天然缺陷、尺寸效应等因素对强度的影响,将小试件试验所获得的参数转化为结构木材的统计参数^[14],过程较为复杂,而国际上现较为流行的是基于足尺试件试验确定木材强度,因为足尺试件的试验结果已经包含了天然缺陷、尺寸效应等因素的影响。笔者基于足尺试验的结果,遵循《建筑结构可靠度设计统一标准》^[15]规定,材料强度的标准值可取其概率分布的0.05分位值确定,材料弹性模量标准值可取其概率分布的0.5分位值确定,建议如下:

鉴于竹材与木材力学性能的相似性,参考木材抗拉分项系数,顺纹抗弯 $\gamma_R=1.6$,顺纹受剪 $\gamma_R=1.5$ ^[16],其重组竹抗弯强度设计值 $f_m=f_k/\gamma_R=44.0$ MPa,顺纹抗剪强度 f_v 的变异系数参考抗弯强度的变异系数,取0.15,偏于安全地取发生顺纹剪切破坏的B4的剪切强度作为 f_v 平均值,则重组竹顺纹抗剪强度设计值 $f_v=f_k/\gamma_R=4.16$ MPa,弹性模量 E 的设计指标取其标准值,根据概率分布的0.5分位值确定,故重组竹弹性模量设计指标可取11 936 MPa。

4 结论

笔者对5个足尺重组竹受弯构件进行了试验研究,重组竹受弯构件表现出优良的结构性能,在土木工程领域具有很好的应用前景,根据试验结果和理论分析,可得到如下结论:

1)重组竹受弯构件的典型破坏形态是底部竹纤维拉断和中性轴附近层间剪切破坏:底部竹纤维拉断是由于底部最外层纤维所受拉应力最大而导致底部外侧纤维受拉断裂,其裂口齐整;中性轴附近层间剪切破坏是由于中性轴附近剪应力最大,较大的剪应力产生层间剪切破坏。

2)各重组竹受弯构件在达到极限破坏时,试件的变形都非常显著,约为跨度的1/50~1/30,重组材的抗弯强度明显高于层积材,变异系数较小,强度稳定性较好,而重组竹的弯曲弹性模量与层积材并无明显区别,二者相近。

3)重组竹受弯构件设计由截面刚度控制,对应挠度限值 $L/250$ 的荷载值 $P_{L/250}$ 与极限荷载 P_{max} 的比值有较好的稳定性,通过回归建立了重组竹抗弯强度 f_m 与弹性模量 E 的相关关系模型,其表明弹性模量表达的刚度能够准确预测承载力。

4)在极限破坏时,重组竹受弯构件受压区的竹纤维最大应变可达0.010~0.011,受拉区的竹纤维最大应变可达0.008~0.011,在整个加载过程中,平截面假定成立,中性轴在加载过程中不断下移,但变化幅度不大。

5)参考木结构设计计算方法,考虑竹材重组竹的材料特性,给出重组竹受弯构件的计算方法,基于现有的试验数据,初步建议了重组竹抗弯强度设计值、顺纹抗剪强度设计值、弹性模量 E 的设计指标。

参考文献:

- [1] 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 Qisheng, JIANG Shenxue, et al. Basic properties and prospects of modern bamboo engineering materials applied in building structures[J]. Architecture Technology, 2011, 42(5):390-393.
- [2] Mahdavi M, Clouston P L, Arwade S R. Development of laminated bamboo lumber: review of processing, performance, and economical considerations[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2011, 23(7):1036-1042.
- [3] Lugt V, Dobbeltstein V, Janssen J. An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures[J]. Construction and Building Materials, 2006, 20(9):648-656.
- [4] YU Dongwei, TAN Hongwei, RUAN Yingjun. A future bamboo-structure residential building prototype in China: Life cycle assessment of energy use and carbon emission[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(10):2638-2646.
- [5] de Flander K, Rovers R. One laminated bamboo-frame house per hectare per year[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1):210-218.
- [6] Albermani F, Goh G Y, Chan S L. Lightweight bamboo double layer grid system[J]. Engineering Structures, 2007, 29(7):

- 1499-1506.
- [7] 陈绪和,王正. 竹胶合梁制造及在建筑中的应用[J]. 世界竹藤通讯, 2005, 3(3): 18-20.
CHEN Xuhe, WANG Zheng. Bamboo based panels for structural application[J]. World Bamboo and Rattan, 2005, 3(3): 18-20. (in Chinese)
- [8] 肖岩,余立永,单波,等. 现代竹结构在汶川地震灾后重建中的应用[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(3): 14-18.
XIAO Yan, SHE Liyong, SHAN Bo. Application of modern bamboo structure to reconstruction after Wenchuan earthquake [J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(3): 14-18.
- [9] Xiao Yan, Zhou Quan, Shan Bo. Design and Construction of Modern Bamboo Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2010, 15(5): 533-541.
- [10] Wei Y, Jiang S X, Lv Q F, et al. Flexural Performance of Glued Laminated Bamboo Beams[J]. Advanced Materials Research, 2011, 168-170: 1700-1703.
- [11] 魏洋,吕清芳,张齐升,等. 现代竹结构抗震安居房的设计与施工[J]. 施工技术, 2009, 38(11): 52-55.
WEI Yang, LYU Qingfang, ZHANG Qisheng, et al. Design and construction of the modern bamboo anti-seismic living room [J]. Construction Technology, 2009, 38(11): 52-55.
- [12] 蒋身学,张齐生,傅万四,等. 竹材重组材高频加热胶合成型压机研制及应用[J]. 林业科技开发, 2011, 25(3): 109-111.
JIANG Shenxue, ZHANG Qisheng, FU Wansi, et al. Development and application of high-frequency heating molding press for parallel bamboo sliver lumber [J]. China Forestry Science and Technology, 2011, 25(3): 109-111.
- [13] 魏洋,蒋身学,李国芬,等. FRP筋增强竹梁的力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(S1): 327-331.
WEI Yang, JIANG Shenxue, LI Guofen, et al. Experimental study on mechanical properties of bamboo beams reinforced with FRP bars [J]. Industrial Construction, 2009, 39(S1): 327-331.
- [14] 中华人民共和国国家标准. 木结构设计规范(GB 50005—2003) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
Chinese National Standards. Code for design of timber structures (GB 50005—2003) [S]. Beijing, China Architecture and Building Press, 2003.
- [15] 中华人民共和国国家标准. 建筑结构可靠度设计统一标准(GB 50068—2001) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
Chinese National Standards. Unified standard for reliability design of building structures (GB 50068—2001) [S]. Beijing, China Architecture & Building Press, 2001.
- [16] 潘景龙,祝恩淳. 木结构设计原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
PAN Jinglong, ZHU Enchun. Wood structural design principle [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

(编辑 张 苹)

(上接第 139 页)

- [12] Liu G B, Xie K H. Transient response of a spherical cavity with a partially sealed shell embedded in viscoelastic saturated soil [J]. Journal of Zhejiang University Science, 2005, 6A(3): 194-201.
- [13] Hasheminejad S M, Hosseini H. Dynamic stress concentration near a fluid-filled permeable borehole induced by general modal vibrations of an internal cylindrical radiator [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(6): 441-458.
- [14] 刘干斌,谢康和,施祖元,等. 横观各向同性土中深埋圆形隧道的应力和位移分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 727-731.
LIU Ganbin, XIE Kanghe, SHI Zuyuan. Analysis of stress and displacement around a deep circular tunnel in transversely isotropic soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6): 727-731.
- [15] LI X. Stress and displacement fields around a deep circular tunnel with partial sealing [J]. Computers and Geotechnics, 1999, 24(2): 125-140.
- [16] YANG X, PAN Y. Axisymmetrical analytical solution for vertical vibration of end-bearing pile in saturated viscoelastic soil layer [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2010, 31(2): 193-204.

(编辑 张 苹)