

重组竹力学性能及设计强度取值研究

束必清^{1,2},张文娟²,陶玉鹏²,李晨²,张苏俊²,肖忠平²,傅乃强²,俞君宝²,
顾一鸣²,卢晓宁^{1*}

(1.南京林业大学 材料科学与工程学院,江苏 南京 210037;2.扬州工业职业技术学院 建筑工程学院,江苏 扬州 225127)

摘要:竹材为快速可再生材料,性能优越,用于建筑领域可提高长期固碳能力、增加经济附加值,且建筑业迫切需要寻找再生资源降低对环境的影响。通过试验研究浙江省4~5年生毛竹枝下材制成的重组竹顺纹抗拉、顺纹抗剪、抗弯强度、抗弯弹性模量及其破坏模式,参照《木结构设计手册》分析其设计值,并将其与常见建筑材料进行对比。结果表明,顺纹抗拉强度设计值为16.3 MPa,抗拉破坏属于脆性破坏,破坏模式有3种:受拉纤维拉断、锯齿状界面剪切破坏、纤维拉断和界面剪切破坏同时发生;顺纹抗剪强度设计值为3.69 MPa,抗剪破坏属于脆性破坏,破坏模式为纤维界面的剪切破坏;抗弯强度设计值和抗弯弹性模量分别为33.8 MPa和8.3 GPa,抗弯破坏属于塑性破坏,破坏模式为受拉纤维先拉断、受压纤维后压溃破坏。重组竹可作为建筑结构主体受力材料使用,但须适当提高抗压和抗剪安全系数,用作受弯构件时以挠度控制较为准确。

关键词:重组竹;抗拉强度;抗剪强度;抗弯强度;抗弯弹性模量

中图分类号:S781.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2022)02-0216-07

Mechanical Properties and Strength Design Value of Bamboo Scrimber

SHU Bi-qing^{1,2},ZHANG Wen-juan²,TAO Yu-peng²,LI Chen²,ZHANG Su-jun²,XIAO Zhong-ping²,
FU Nai-qiāng²,YU Jun-bao²,GU Yi-ming²,LU Xiao-ning^{1*}

(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;

2. College of Civil Engineering, Yangzhou Polytechnic Institute, Yangzhou 225127, Jiangsu, China)

Abstract:Bamboo timber is a fast growing and renewable material with superior performance. It can improve long-term carbon sequestration capacity and increase economic added value when it is used in the construction field. The construction industry urgently needs to find out renewable resources to reduce the negative impact on the environment. This paper experimentally studied the tensile strength, shear strength, flexural strength, flexural elastic modulus and failure mode of the bamboo scrimber made from 4- to 5-year-old bamboo timber from Zhejiang Province. The design values were analyzed with the reference of "Wood Structure Design Manual" and compared with common building materials. The design value of the tensile strength along the grain was 16.3 MPa, and the tensile failure was brittle failure. There were three failure modes: tensile fiber breakage, zigzag interface shear failure, fiber breakage and interface shear failure. The design value of the shear strength along the grain was 3.69 MPa, the shear failure was brittle failure, and the failure mode was the shear failure of the fiber interface. The design values of the flexural strength along the grain and the elastic modulus of the flexural strength along the grain were 33.8 MPa and 8.3 GPa, respectively. The flexural failure was plastic failure, and the failure mode was that the tensile

收稿日期:2020-06-10 修回日期:2021-05-31

基金项目:国家基金面上项目(51878590);江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(JNHB-127);国家重点研发计划课题(2017YFC0703501);江苏省住建厅科技项目(2019ZD092,2020ZD40);江苏省高校自然科学研究面上项目(20KJB560010);江苏省自然科学基金(BK20170926);扬州市市科技计划项目(YZ2019047);校科研课题(2019xjzk014)。

第一作者:束必清,副教授,硕士。研究方向:新型建筑材料与建筑结构可靠性。E-mail:baishi1226@126.com

*通信作者:卢晓宁,教授,博士。研究方向:木材工业。E-mail:luxiaoning-nfu@126.com

fiber was broken first, and the compressive fiber was then crushed. It was suggested that the bamboo scrimber could be used as the main stress-bearing material of the building structure, but the safety factor of compression and shear must be appropriately increased. When it is used as a bending member, the deflection control is more accurate.

Key words: bamboo scrimber; tensile strength; shear strength; flexural strength; elastic modulu of flexural

竹材在中国分布广^[1],4~5 a 成材,且性能优越,为快速可再生材料^[2],竹林每年均可间伐;应用领域涉及建筑、家具等^[3-4],为木材的替代补充资源^[5],应用于建筑领域可提高竹材的长期固碳能力^[6],增加竹材的经济附加值。

竹材存在尖削度,将原竹直接应用于建筑工程实现工业化生产较为困难,为此将其加工制作成重组竹,形成较为规则的尺寸和形状,便于实现工业化生产、装配式施工。重组竹力学性能高强稳定、尺寸因需而定、原材料利用率高,强重比高于木材和混凝土,可作为建筑主体结构材料使用,顺纹和横纹性能差别大^[7-12]。Y. Yu 等^[13]利用酚醛(PF)树脂浸渍竹纤维束制备重组竹,指出在最佳参数 16% PF 和 1.30 g/cm³ 下,重组竹弯曲强度和弹性模量分别为 310.0 MPa 和 29.7 GPa、抗剪强度 28.2 MPa。重组竹机械性能随密度和纤维取向而显著变化^[14],最佳密度 1.00 g/cm³^[15],顺纹剪切强度 6.0 MPa^[16]。

重组竹力学性能稳定,非碳化重组竹梁延性好、抗弯承载能力高,碳化重组竹梁延性大幅降低,受拉破坏模式为脆性拉断,轴心受压破坏为压屈破坏、剪压破坏和纵向劈裂破坏,偏心受压破坏主要表现为柱身中部竹材纤维受拉断裂^[17-24]。其应用在地板、家具等领域较多,但应用于建筑主体结构较少,魏洋等^[25]利用重组竹设计建造了二层现代竹结构抗震安居房;束必清等^[11]将重组竹用于建筑主体受力构件,设计建造了二层竹博物馆;范慧^[26]将重组竹应用于建筑楼面板,研究了其加工工艺和力学性能。

重组竹应用于建筑工程主体结构,需要有可靠的力学性能,但不同地区竹材,重组竹力学性能可能有差别;不同加工工艺,重组竹力学性能差别较大,使得重组竹应用于建筑领域无统一标准,推广应用存在较大困难。要想解决重组竹力学性能离散型大的问题,实现重组竹在中国建筑领域大规模应用,使重组竹成为木材的补充替代资源,则必须以某一离散型小的加工工艺为统一标准,分别研究不同地区竹材制成的重组竹力学性能,形成中国重组竹使用资料库和性能选用标准。

中国的重组竹研究未形成有效的系统性,绝大多数学者仅研究了重组竹的标准值,未能形成可供推广设计使用的设计值,中国竹林资源丰富的省份

为浙江、福建、江西、湖南^[27],其中仅张秀华等^[28]指出浙江省毛竹制作成重组竹顺纹抗压强度设计值 22.8 MPa、抗弯强度设计值 20.4 MPa,肖纲要等^[29-30]指出四川省毛竹制作成重组竹顺纹抗压强度、抗弯强度和抗弯弹性模量设计值分别为 39.6 MPa、29.5 MPa、28.3 GPa,但对重组竹加工制作工艺交代较少,使得相关研究不具备可重复性,对国内其余重组竹的性能不具备指导和参考性。

针对中国竹林资源丰富的浙江省,选取 4~5 年生毛竹枝下材,在一定的加工工艺下,制作成重组竹,通过试验研究其顺纹抗拉性能、顺纹抗剪性能、顺纹抗弯性能、抗弯弹性模量及其破坏模式,分析其设计强度取值。结合国内已有研究成果将其与常规建筑材料性能进行对比,对不同地区毛竹制作成的重组竹性能进行补充,也为重组竹在中国建筑领域的大规模推广应用指明了研究方向。

1 材料与方法

1.1 材料

重组竹原材料为浙江省湖州市安吉县毛竹,生长周期 4~5 a。重组竹由桐庐竹楠木环保科技有限公司提供;竹束疏解 3 次,原纤维束含水率 8%;采用酚醛(PF)树脂常压浸渍竹纤维束,浸胶质量浓度 16%、浸胶时间 20 min,接着在 50 °C 下干燥至含水率 12%;采用模压冷压工艺压制重组竹,压力 60 MPa,密度 1.13 g/cm³。

以 ISO3133:1975 和 ISO3349:1975 为依据,结合试验设备型号尺寸,抗弯强度和抗弯弹性模量检测采用 200 根 20 mm×20 mm×300 mm 重组竹。顺纹抗剪强度检测按照 ISO3347:1976 加工制作试件,顺纹抗拉强度检测按照 ISO3345:1975 加工制作试件,试件数量均为 200 根,顺纹抗拉强度检测试样见图 1。

1.2 方法

重组竹力学性能试验采用长春新特试验机有限公司生产的 WDW-200 型微机控制电子万能试验机,最大试验力 200 kN。百分表采用上海工具厂有限公司生产的 SXB-2 型数显百分表,最大响应速度 1000 mm/s,分度值 0.01 mm。

顺纹抗剪强度检测及强度计算按照 ISO3347:

1976 进行,匀速加载,控制试样在 1.5~2.0 min 内破坏,现场测试如图 2 所示;抗弯强度检测及强度计算按照 ISO3133:1975 进行,加载速度 5 mm/min,现场测试如图 3 所示;抗弯弹性模量检测及模量计算按照 ISO3349:1975 进行,加载速度 1 mm/min,现场测试如图 4 所示;顺纹抗拉强度检测及强度计

算按照 ISO3345:1975 进行,匀速加载,控制试样在 1.5~2.0 min 内破坏,现场测试如图 5 所示。重组竹含水率检测及计算按照 ISO3130:1975 进行,现场试样如图 6 所示。

检测数据的平均值、标准差、标准误差、变异系数和准确指数按照 ISO3129:2012 计算。

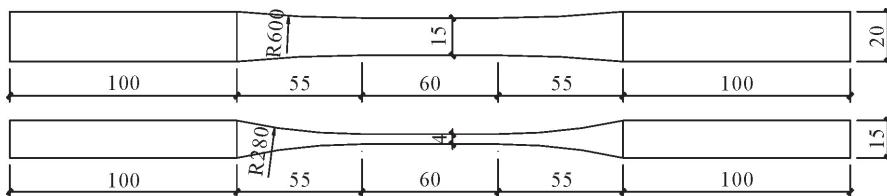


图 1 顺纹抗拉强度检测试样(mm)

Fig. 1 Tensile strength test sample along the grain(mm)



图 2 顺纹抗剪强度检测

Fig. 2 Shear strength test along the grain



图 3 抗弯强度检测

Fig. 3 Bending strength test

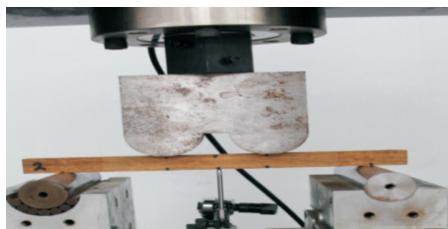


图 4 抗弯弹性模量检测

Fig. 4 Bending elastic modulus detection

2 结果与分析

参照《木结构设计手册》(第 4 版),计算顺纹抗拉强度、顺纹抗剪强度、抗弯强度设计值和弹性模量。尺寸误差影响系数 K_A 取 0.96,抗拉分项系数 γ_{tR} 取 1.95,抗剪分项系数 γ_{vR} 取 1.50,抗弯分项系数 γ_{mR} 取 1.60;干燥缺陷影响系数 K_{Q2} 取 0.9,长期



图 5 顺纹抗拉强度检测

Fig. 5 Tensile strength test along the grain

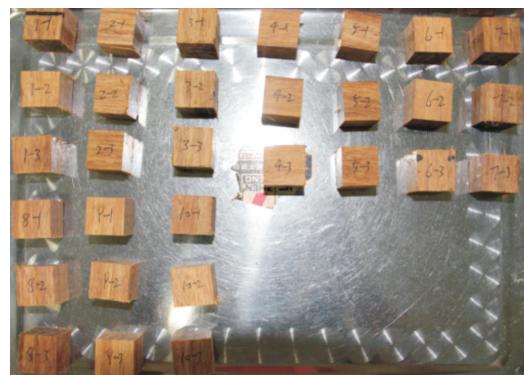


图 6 含水率检测试样

Fig. 6 Water content test sample

受荷强度折减系数 K_{Q3} 取 0.72,尺寸影响系数 K_{Q4} 取 0.75。

2.1 顺纹抗拉强度

通过顺纹抗拉试验检测可知,随着荷载的增大,试件竹纤维拉断发出阵阵响声,抗拉强度较小的纤维先发生断裂使得该截面有效面积减小、应力增加。试件内部各纤维伸长率相近时,试件发生同一截面处纤维拉断破坏(图 7);试件内部各纤维伸长率相差较大时,纤维间产生剪切应力,试件发生锯齿状界

面剪切破坏(图8);试件内部各纤维伸长率差异介于某一状态时,纤维拉断和界面剪切破坏同时发生(图9)。上述3种破坏模式在破坏前征兆均较小,属脆性破坏。

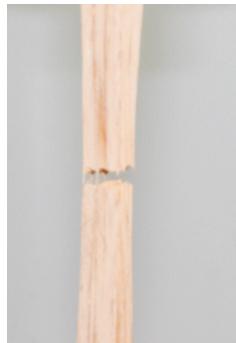


图7 竹纤维拉断

Fig. 7 Bamboo fiber break



图8 锯齿状界面剪切破坏

Fig. 8 Shear failure of serrated interface



图9 纤维拉断和界面剪切同时发生

Fig. 9 Fiber breakage and interface shear occurred simultaneously

通过顺纹抗拉强度检测,得出了重组竹顺纹抗拉强度检测值(表1)。

试件抗拉强度标准值 $f_{tk} = m_{ft} - 1.645\sigma = 112.5 \text{ MPa}$, 方程标准性影响系数 $K_p = 1 - P = 0.921 \leqslant 1.0$ 。

考虑重组竹生产过程中密度分布、纤维长度、铺装工艺等因素的离散性,参照《木结构设计手册》,重组竹抗拉缺陷影响系数 K_{tQ1} 取 0.66。

试件材料强度折减系数 $K_{vQ} = K_{tQ1} K_{Q2} K_{Q3} K_{Q4} = 0.321$, 重组竹顺纹抗拉强度设计值 $f_t =$

$$(K_p K_A K_{tQ} f_{tk}) / \gamma_{tr} = 16.4 \text{ MPa}.$$

为了使检测数据与木材具有可比性,对其进行含水率调整。含水率 12% 时,重组竹顺纹抗拉强度设计值为: $f_{t12} = f_t [1 + 0.015(w - 12)] = 16.3 \text{ MPa}$ 。

参照《木结构设计手册》,计算得出重组竹顺纹抗拉强度设计值为 16.3 MPa,该强度高于常见木材的顺纹抗拉强度设计值,说明从顺纹抗拉强度角度,重组竹可作为木材的替代补充资源在建筑工程领域进行使用。

表1 重组竹顺纹抗拉强度检测值

Table 1 Tensile strength test value of bamboo scrimber along the grain

抗拉强度 平均值 m_{ft} /MPa	标准差 σ /MPa	标准误差 σ_t /MPa	变异系数 C_v /%	准确指数 P /%	平均 含水率 w /%
151.7	23.8	6.1	15.7	7.9	11.7

2.2 顺纹抗剪强度

对试件进行顺纹抗剪试验检测,随着荷载的增大,纤维之间的剪应力呈线性增加,当剪应力超过材料的顺纹抗剪强度,试件发生界面剪切破坏(图10)。破坏前变形较小、无明显征兆,断口平齐,属脆性破坏。



图10 界面剪切破坏

Fig. 10 Interface shear failure

通过顺纹抗剪强度检测,得出了重组竹顺纹抗剪强度检测值(表2)。

试件抗剪强度标准值 $f_{vk} = m_{fv} - 1.645\sigma = 16.5 \text{ MPa}$, 方程标准性影响系数 $K_p = 1 - P = 0.913 \leqslant 0.97$ 。

因重组竹生产过程中密度分布、纤维长度、铺装工艺等因素的离散性,参照《木结构设计手册》,重组竹抗剪缺陷影响系数 K_{vQ1} 取 0.80。

试件材料强度折减系数 $K_{vQ} = K_{vQ1} K_{Q2} K_{Q3} K_{Q4} = 0.257$, 重组竹顺纹抗剪强度设计值 $f_v = (K_p K_A K_{vQ} f_{vk}) / \gamma_{vR} = 3.76 \text{ MPa}$ 。

为了使检测数据与木材具有可比性,对其进行

含水率调整。含水率12%时,重组竹顺纹抗剪强度设计值为: $f_{v12} = f_v [1 + 0.015(w - 12)] = 3.69$ MPa。

参照《木结构设计手册》,计算得出重组竹顺纹抗剪强度设计值为3.69 MPa,该强度高于常见木材的顺纹抗剪强度设计值,说明从顺纹抗剪强度角度,重组竹可作为木材的替代补充资源在建筑工程领域进行使用。

表2 重组竹顺纹抗剪强度检测值

Table 2 Shear strength test value of bamboo scrimber along the grain

抗剪强度 平均值 m_{fv} /MPa	标准差 σ /MPa	标准误差 σ_t /MPa	变异系数 C_V /%	准确指数 P /%	平均 含水率 ω /%
22.9	3.9	1.0	17.2	8.7	10.7

2.3 抗弯强度

对试件进行抗弯试验检测可知:加载初期,试件处于弹性阶段,荷载-位移曲线呈线性,该阶段约占整个加载阶段的3/4;随着荷载的增加,受拉区纤维先发生拉断,试件挠度明显增大,中性轴上移,部分试件存在受拉区纤维间的层间界面剥离;加载后期,挠度继续增大,中性轴上移,受压区纤维被压溃,抗弯强度破坏如图11。试件在破坏前有较大挠度变形,破坏征兆明显,属塑性破坏。



图11 纤维先拉断后压溃破坏

Fig. 11 The fiber is first broken and then crushed and destroyed

通过抗弯强度检测,得出了重组竹抗弯强度检测值(表3)。

试件抗弯强度标准值 $f_{mk} = m_{fm} - 1.645\sigma = 172.1$ MPa,方程标准性影响系数 $K_p = 1 - P = 0.909 \leqslant 1.0$ 。

因重组竹生产过程中密度分布、纤维长度、铺装工艺等因素的离散性,参照《木结构设计手册》,重组竹抗弯缺陷影响系数 K_{mq1} 取0.75。

试件材料强度折减系数 $K_{mq} = K_{mq1}K_{q2}K_{q3}K_{q4} = 0.193$,重组竹抗弯强度设计值 $f_m = (K_p K_A K_{mq} f_{mk}) / \gamma_{mr} = 34.2$ MPa。

为了使检测数据与木材具有可比性,对其进行含水率调整。含水率12%时,重组竹抗弯强度设计值为: $f_{m12} = f_v [1 + 0.015(w - 12)] = 33.8$ MPa。

参照《木结构设计手册》,计算得出重组竹抗弯

强度设计值为33.8 MPa,该强度高于常见木材的顺纹抗剪强度设计值,说明从抗弯强度角度,重组竹可作为木材的替代补充资源在建筑工程领域进行使用;该强度高于文献[28]的抗弯强度设计值,略高于文献[30]的抗弯强度设计值,说明无论重组竹原料是否来自于同一地区,重组竹的加工制作工艺不同,重组竹强度会有较大差异,要想大力推广使用重组竹,首先要确定统一的加工制作工艺标准,选用性能好、离散性小的重组竹加工制作工艺作为基本的工艺标准。

表3 重组竹抗弯强度检测值

Table 3 Flexural strength test value of bamboo scrimber

抗弯强度 平均值 m_{fm} /MPa	标准差 σ /MPa	标准误差 σ_t /MPa	变异系数 C_V /%	准确指数 P /%	平均 含水率 ω /%
227.0	33.4	10.6	14.7	9.1	11.3

2.4 抗弯弹性模量

通过抗弯弹性模量检测,得出了重组竹抗弯弹性模量检测值(表4)。

表4 重组竹抗弯弹性模量检测值

Table 4 Flexural elastic modulus test value of bamboo scrimber

抗弯弹性 模量 m_E /GPa	标准差 σ /GPa	标准误差 σ_t /GPa	变异系数 C_V /%	准确指数 P /%	平均 含水率 ω /%
29.2	3.6	1.2	12.5	7.7	9.9

试件抗弯弹性模量标准值 $E_k = m_E - 1.645\sigma = 23.3$ GPa。

参照强度计算,偏于安全,考虑尺寸误差影响系数 K_A 取0.94,天然缺陷影响系数 K_{EQ1} 取0.75,干燥缺陷影响系数 K_{Q2} 取0.85,长期受荷强度折减系数 K_{Q3} 取0.72,尺寸影响系数 K_{Q4} 取0.89。

方程标准性影响系数 $K_p = 1 - P = 0.923 \leqslant 1.0$,重组竹抗弯弹性模量 $E_m = K_p K_A K_{EQ1} K_{Q2} K_{Q3} K_{Q4} E_k = 8.3$ GPa。

参照《木结构设计手册》,计算得出重组竹抗弯弹性模量为8.3 GPa,该值低于常见木材的抗弯弹性模量,说明在进行重组竹抗弯设计时,以受弯构件的挠度控制作为构件设计的依据较为准确,该结论与文献[31]一致。

2.5 材料性能对比

将通过试验分析计算得到的顺纹抗拉强度、顺纹抗剪强度、抗弯强度设计值和抗弯弹性模量结合国内已有研究成果,与常规建筑材料性能进行对比,具体见表5。其中东北落叶松、樟子松、杉木、栎木强度设计值和弹性模量取自《木结构设计规范》(GB 50005—

2017),C30混凝土强度设计值和弹性模量取自《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010(2015版)),Q235钢强度设计值和弹性模量取自《钢结构设计规范》(GB 50017—2017),木材、混凝土和钢材自重取自《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)。

由表5对比可知,重组竹顺纹性能不低于常见

木材和混凝土,强重比高于常见木材和混凝土、略小于钢材,可作为建筑结构主体受力材料使用。由于材料抗压和抗剪破坏属于脆性破坏,故须适当提高抗压和抗剪安全系数。文献[30]的四川重组竹抗弯弹性模量未考虑缺陷等因素进行折减,与本文未折减前抗弯弹性模量平均值基本吻合。

表5 重组竹与常见建筑材料的顺纹性能对比

Table 5 Comparison of along-grain performance between bamboo scrimber and common building materials

材料类型	抗弯强度 /MPa	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	抗剪强度 /MPa	抗弯弹性模量 /MPa	密度 /(g·cm ⁻³)
浙江重组竹	33.8	22.8 ^[28]	16.3	3.69	8 300	1.13
四川重组竹 ^[29-30]	29.5	39.6	—	—	28 300	1.10
东北落叶松	17	15	9.5	1.6	10 000	0.60~0.70
樟子松	13	10	8	1.4	9 000	0.40~0.50
杉木	11	10	7.5	1.4	9 000	0.40
栎木	17	16	11	2.4	11 000	0.80~0.90
桦木	15	14	10	2	10 000	0.60~0.70
C30混凝土	—	14.3	1.43	—	30 000	2.20~2.40
Q235	—	215	215	125	206 000	7.85

重组竹自重大,可通过优化截面设计等措施降低重组竹构件重量。

由于不同地区毛竹材料性能和重组竹加工制作工艺不同,重组竹材料性能相差较大,在确定统一的加工制作工艺标准基础上,比较不同地区毛竹制成的重组竹材料性能,形成中国的重组竹材料性能库,才可大规模提高重组竹在建筑领域的推广应用。

3 结论与讨论

建筑业迫切需要寻找可再生资源;竹材为快速可再生材料,性能优越,用于建筑领域可提高长期固碳能力、增加经济附加值。通过对浙江毛竹枝下材制作成的重组竹进行顺纹抗拉强度、顺纹抗剪强度、抗弯强度、抗弯弹性模量研究,分析其破坏模式,计算其设计强度,并与常规建筑材料性能进行了对比,得出如下结论。

重组竹顺纹抗拉强度设计值为16.3 MPa,抗拉破坏属于脆性破坏,破坏模式有3种:受拉纤维拉断、锯齿状界面剪切破坏、纤维拉断和界面剪切破坏同时发生。

重组竹顺纹抗剪强度设计值为3.69 MPa,抗剪破坏属于脆性破坏,破坏模式为纤维界面的剪切破坏。

重组竹抗弯强度设计值和抗弯弹性模量分别为33.8 MPa和8.3 GPa,抗弯破坏属于塑性破坏,破坏模式为受拉纤维先拉断、受压纤维后压溃破坏。

重组竹强重比高于常见木材和混凝土、略小于钢材,可作为建筑结构主体受力材料使用,但须适当

提高抗压强度和抗剪强度安全系数,用作受弯构件时以挠度控制较为准确。

选用性能好、离散性小的重组竹加工制作工艺作为全国统一的基本工艺标准,比较不同地区毛竹制成的重组竹材料性能,形成中国重组竹材料性能库,具有较大的实用意义。

参考文献:

- [1] SHU B,REN Q,LU X,*et al.* Study on mixed biomass binderless composite based on simulated wood[J]. Wood Research, 2019,64(6):1023-1034.
- [2] 肖忠平,李晨,苏相宇.不同截面形式重组竹柱轴心受压试验研究[J].西北林学院学报,2018,33(5):231-235.
- [3] XIAO Z P,LI C,SU X Y. Experimental study on axial compression of glued laminated bamboo columns with different cross sections[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018,33(5):231-235. (in Chinese)
- [4] ATANDA J. Environmental impacts of bamboo as a substitute constructional material in Nigeria[J]. Case Studies in Construction Materials, 2015,3:33-39.
- [5] FU Y,FANG H,DAI F. Study on the properties of the recombinant bamboo by finite element method[J]. Composites Part B,2017,115:151-159.
- [6] 束必清,任琴,何倩,*等*.基于蒸爆法的无胶混杂型纤维板构成[J].扬州大学学报:自然科学版,2020,23(1):54-58,67.
- [7] SHU B Q,REN Q,HE Q,*et al.* Study on the formation cause of binderless hybrid fiberboard on steam explosion method[J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2020,23(1):54-58,67. (in Chinese)
- [8] YUEN J,FUNG T,ZIEGLER A D. Carbon stocks in bamboo ecosystems worldwide: estimates and uncertainties[J]. Forest Ecology and Management,2017,393:113-138.

- [7] 谢鹏,刘问,胡雨村,等.重组竹横向准脆性断裂的断裂参数[J].复合材料学报,2019,37(6):1-12.
- XIE P, LIU W, HU Y C, et al. Fracture parameters of bamboo scrimber's transverse quasibrittle fracture[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 37(6): 1-12. (in Chinese)
- [8] 束必清,肖忠平,姚振,等.重组竹作为新型建筑材料的优势与不足[J].四川建筑,2017,37(1):188-190.
- [9] 李霞镇,钟永,任海清,等.毛竹基重组竹力学性能研究[J].木材加工机械,2016,27(4):28-30.
- [10] 吴文清,宋晓东.重组竹基本力学性能的试验分析与研究[J].武汉理工大学学报,2017,39(4):46-51.
- WU W Q, SONG X D. Analysis and research of basic mechanics performance test of recombinant bamboo[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2017, 39 (4): 46-51. (in Chinese)
- [11] 束必清,肖忠平,赵志高,等.重组竹框架结构的设计[J].林业科技开发,2014,28(5):82-86.
- [12] 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.
- [13] YU Y, LIU R, HUANG Y, et al. Preparation, physical, mechanical, and interfacial morphological properties of engineered bamboo scrimber[J]. Construction and Building Materials, 2017, 157: 1032-1039.
- [14] KUMAR A, VLACH T, LAIBLOVA L, et al. Engineered bamboo scrimber: Influence of density on the mechanical and water absorption properties[J]. Construction and Building Materials, 2016, 127: 815-827.
- [15] YANG T, LEE T. Effects of density and heat treatment on the physico-mechanical properties of unidirectional round bamboo stick boards (UBSBs) made of Makino bamboo (*Phyllostachys makinoi*) [J]. Construction and Building Materials, 2018, 187: 406-413.
- [16] TAKEUCHI C P, ESTRADA M, LINERO D L. Experimental and numerical modeling of shear behavior of laminated Guadua bamboo for different fiber directions[J]. Construction and Building Materials, 2018, 177: 23-32.
- [17] 肖忠平,俞君宝,束必清,等.重组竹高温处理后的性能研究[J].西北林学院学报,2017,32(4):240-243.
- XIAO Z P, YU J B, SHU B Q, et al. Performance of glued laminated bamboo after high temperature treatment[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(4): 240-243. (in Chinese)
- [18] 靳肖贝,张禄晟,李瑜瑶,等.3种阻燃剂对重组竹燃烧性能和物理力学性能的影响[J].西北林学院学报,2015,30(5):214-218.
- JIN X B, ZHANG L S, LI Y Y, et al. Effects of three flame retardants on combustion, physical and mechanical properties of bamboo scrimber[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(5): 214-218. (in Chinese)
- [19] 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.
- [20] 李频.重组竹的力学性能试验[J].湖南文理学院学报:自然科学版,2018,30(2):53-57.
- LI P. Experimental study on mechanical properties of bamboo scrimber[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science: Science and Technology, 2018, 30(2): 53-57. (in Chinese)
- [21] 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 Y, JI X W, DUAN M J, et al. Model for axial stress-strain relationship of bamboo scrimber[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(3): 572-579. (in Chinese)
- [22] 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 Y, ZHOU M Q, YUAN L D. Mechanical performance of glulam bamboo columns under eccentric loading[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(2): 379-385. (in Chinese)
- [23] 盛宝璐,周爱萍,黄东升.重组竹的单轴与纯剪应力应变关系[J].土木建筑与环境工程,2015,37(6):24-31.
- SHENG B L, ZHOU A P, HUANG D S. Stress-strain relationship of parallel strand bamboo under uniaxial or pure shear load[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2015, 37(6): 24-31. (in Chinese)
- [24] 盛宝璐,周爱萍,黄东升,等.重组竹的顺纹拉压强度与本构关系[J].南京林业大学学报:自然科学版,2015,39(5):123-128.
- SHENG B L, ZHOU A P, HUANG D S, et al. Uniaxial strength and constitutive law of parallel strand bamboo[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2015, 39(5): 123-128. (in Chinese)
- [25] 魏洋,吕清芳,张齐生,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):52-54.
- [26] 范慧.建筑楼面板用重组竹材关键制备技术研究[D].杭州:浙江农林大学,2018.
- [27] 吴继林,郭起荣.中国竹类资源与分布[J].纺织科学研究,2017,11(3):76-78.
- WU J L, GUO Q R. Bamboo resources and distribution in China[J]. Textile Science Research, 2017, 11 (3): 76-78. (in Chinese)
- [28] 张秀华,鄂婧,李玉顺,等.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.
- ZHANG X H, E J, LI Y S, et al. Experimental research on compression and flexural mechanical performance of recombinant bamboo [J]. Industrial Construction, 2016, 46(1): 7-12. (in Chinese)
- [29] 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.
- XIAO G Y, LI X Z, ZHONG Y. Experimental study on the compressive properties parallel to grain of structural bamboo scrimber[J]. Wood Processing Machinery, 2019, 30 (3): 4-8. (in Chinese)
- [30] 肖纲要,李霞镇,钟永.结构用重组竹抗弯力学性能[J].安徽农业大学学报,2017,44(1):60-64.
- XIAO G Y, LI X Z, ZHONG Y. Bending properties of the structural recombinant bamboo[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2017, 44(1): 60-64. (in Chinese)
- [31] ZHAO J, MENG Z, JIN Z, et al. Bending properties of bamboo scrimber with holes in different sizes and positions[J]. Construction and Building Materials, 2019, 200: 209-217.