

文章编号: 1000-5692(2007)01-0100-05

竹集成材与常见建筑结构材力学性能比较

张叶田^{1,2}, 何礼平²

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江林学院 园林学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 对竹集成材和竹指接集成材的物理力学性能进行了试验研究, 并与几种常用的建筑结构木材(如落叶松 *Larix gmeini*, 水曲柳 *Fraxinus mandshurica*, 杉木 *Cunninghamia lanceolata*), 毛竹 *Phyllostachys pubescens* 及多孔砖砌体、混凝土物理力学性能相比。结果表明: 竹集成材的抗拉强度和抗压强度较高, 抗剪强度表现良好的塑性性能, 是一种综合力学性能很好的建筑结构材料, 其产品不仅可在梁、板、柱等常见建筑结构中使用, 也适于工字梁、桁架等复杂结构用材; 竹指接集成材受指接的影响, 其抗拉强度、抗压强度和抗剪强度低于竹集成材, 但已能满足一般承重类的结构材料使用。图 5 表 2 参 10

关键词: 林业工程; 工程结构材料; 竹集成材; 物理力学性能

中图分类号: S718.2 **文献标识码:** A

竹材是速生可再生的重要森林资源之一。与木材相比, 竹材具有强度高、韧性好、硬度大和性能优良等特点。但竹材竹秆的形状差异, 刚度不足, 千百年来, 竹材长期停留在以原竹的形式或经过简单加工用于建筑业, 如简易的竹楼、工棚、脚手架和竹艺装修等, 竹集成材的研制成功, 大大地拓宽了竹材在建筑中的使用范围。竹集成材以原竹为原料, 经过一系列的机械和化学加工, 在一定的温度和压力下, 借助胶黏剂或竹材自身的结合力的作用, 胶合而成的板材和型材^[1]。在住宅建筑中, 和传统的结构材料相比, 应用竹集成材结构工程材料, 其轻质高强使得结构所占的面积更少, 同时也能满足建筑上大开间、灵活分割的要求; 况且结构及配套技术相应部件的绝大部分易于定型化、标准化, 实现构件的工厂预制和现场装配化施工, 使之可以实现住宅建筑技术集成化、产业化和工业化新思路, 提高住宅的科技含量。在国际竹藤组织和中国林业科学研究院的技术支持下, 云南屏边小学宿舍于 2004 建成, 这是首次将竹集成材和竹胶合板作为结构材用于建筑^[2]。作者通过竹集成材和竹指接集成材的物理力学性能研究, 为它们在建筑结构中的设计施工应用提供数据参考, 并与几种常用的建筑木材、多孔砖砌体和混凝土的力学性能相比, 分析竹集成材的抗拉强度、抗压强度、抗剪强度和弹性模量等物理力学性能。

1 试验材料

1.1 竹集成材及其指接集成材的制造工艺流程

原竹—截断—开片—竹蔑—编帘—浸渍干燥—组坯—热压—裁边—砂光—冷压—竹集成材

裁制—指接—砂光—拼压—竹指接材。

收稿日期: 2006-02-28; 修回日期: 2006-05-25

基金项目: 浙江省教育厅资助项目(20050191)

作者简介: 张叶田, 工程师, 从事结构工程研究。E-mail: zyt201@163.com

1.2 工艺要点³

1.2.1 竹集成材 原竹以毛竹 *Phyllostachys pubescens* 和龙竹 *Dendrocalamus giganteus* 等大型的竹材为主, 根据压机截成 2.55 m 长的竹段。竹段剖成片, 去掉竹节, 取宽约 25 mm, 竹片除去竹青和竹黄后剖成厚 1 mm 左右的竹蔑, 用细线把竹蔑编成 1.3 m 宽的竹蔑帘, 待浸渍干燥至含水率 12% 左右。酚醛胶浸胶量一般为 $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。组坯层数根据层积材的密度、厚度及竹帘厚度等因素确定。热压温度为 $130 \sim 140 \text{ }^\circ\text{C}$, 热压时间 $2 \text{ min} \cdot \text{mm}^{-1}$, 热压压力 3.5 MPa。热压制成的竹层积板材经裁边砂光后, 将多块竹层积板材各边对齐胶合冷压成集成材, 厚约 40 mm。胶合压力为 1.5 MPa, 加压时间一般是 4 h, 温度不得低于 $15 \text{ }^\circ\text{C}$; 冷压胶采用间苯二酚树脂胶(固体含量为 $550 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 黏度 $666 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), 双面辊涂, 涂胶量 $180 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (单面), 涂胶后闭合陈化约 20 min。

1.2.2 竹指接集成材 沿竹层积板材的长度方向锯成一定宽度厚板条, 厚板条通过指接的方法接长, 放在集成材两侧面的指接厚板条进行单面砂光, 放在集成材中间的指榫条需要两面砂光。然后把指接过的厚板条进行指接部位错开拼压成竹指接集成材。试验所用竹指接集成材断面为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 含 2 个指接。试验试件采用有榫肩指接, 指榫长为 30 mm, 指顶宽 2 mm, 斜度 1 ° , 指榫间隙为 $1.5 \sim 2.1 \text{ mm}$ 。采用间苯二酚树脂胶, 指接压力为 $5 \sim 8 \text{ MPa}$ (常温下 $30 \sim 40 \text{ min}$), 再养生 48 h。拼压采用间苯二酚树脂胶, 拼压的指接条砂光面全部涂胶, 涂胶量约 $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 拼压压力为 1.5 MPa, 在室温下拼压时间 $3 \sim 4 \text{ h}$ 。

2 试样与方法

考虑竹集成材及其指接集成材在轴向力作用下的应力与应变线性关系与竹材相似, 故测定竹集成材及其指接集成材的弹性模量、抗拉强度和抗压强度按《GB/T 15780—1995 竹材物理力学性能试验方法》⁴ 进行; 其中抗弯强度和抗剪强度的测定国内尚无相关的标准, 因而试验参照日本《JAS SLVL STANDARD—1993 结构用单板层积材标准》。试验设备采用 WDW-3000 级微机控制电子万能力学试验机。竹集成材及其指接集成材的平均含水率为 $10\% \sim 12\%$, 其力学性能试验结果见表 1。

表 1 竹集成材和竹指接集成材的力学性能

Table 1 Physical-mechanical properties of glued laminated bamboo wood

试件号	竹集成材					竹指接集成材				
	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	抗压强度/ MPa	抗弯强度/ MPa	抗剪强度/ MPa	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	抗压强度/ MPa	抗弯强度/ MPa	抗剪强度/ MPa
1	13.10	147.50	59.21	124.51	16.89	12.55	78.65	43.35	68.10	15.87
2	12.79	149.23	58.90	125.68	17.90	12.90	79.77	42.10	70.24	14.49
3	12.92	147.70	61.10	125.46	17.10	13.32	77.85	41.58	71.20	14.82
4	12.89	149.50	60.50	126.10	17.42	12.65	82.10	44.10	68.22	15.20
平均值	12.93	148.48	59.93	125.44	17.33	12.86	79.60	42.78	69.44	15.10

说明: 抗剪强度为平行加载剪切值。

2.1 弹性模量与抗拉强度

利用材料在弹性范围内, 在轴向拉力作用下应力与应变成线性关系的原理进行。试验仪器为荷载传感器、位移传感器、动态应变仪和 X-Y 记录仪等。试样采用直边等截面试件, 尺寸为 $280 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 共 8 个, 其中 4 个竹集成材, 另 4 个指接集成

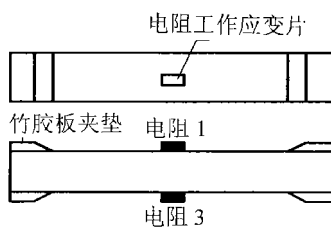


图 1 抗拉试件图

Figure 1 Tension specimen

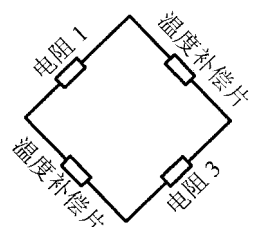


图 2 全桥电路图

Figure 2 Diagram of electricity bridge

材。加荷采用分级加载，速率控制在 $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右，直至破坏，用 DH3815 型静态电阻应变仪测量应变。在试样的正反两面的几何中心处沿轴向贴有单轴电阻应变片(图 1)，以免试样在拉伸时造成偏心受拉而产生的弯曲变形。在试样端部贴有竹胶板夹垫，厚度为 8 mm，以便保护试样的表面不受损及改善轴力向试样的传递。电桥采用全桥方式(图 2)。荷载与应变的关系见图 3。根据静态电阻应变仪测得的应变值 $\epsilon_{\text{测}}$ 及桥路补偿法^[5]，拉伸引起的应变 ϵ 为 $0.5 \epsilon_{\text{测}}$ 。

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{P}{A \cdot \epsilon}$$

其中： E 为试件弹性模量 (GPa)， σ 为试件应力 (MPa)， ϵ 为试件应变， P 为最大荷重 (kN)， A 为试件断面面积 (mm^2)。

2.2 抗压强度

试件尺寸为 $70 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ，共 8 个，其中 4 个竹集成材，另 4 个指接集成材，加荷采用分级加载，直至破坏。试验仪器为荷载传感器、位移传感器、动态应变仪和 $X-Y$ 记录仪。荷载与应变的关系见图 4。

2.3 抗弯强度

试件尺寸为 $920 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ，共 8 个，其中 4 个作竹集成材加载试验，另 4 个作指接集成材加载试验，加荷采用分级加载，每级荷载 250 N，直至破坏。试验仪器为荷载传感器、位移传感器、动态应变仪和 $X-Y$ 记录仪等。

2.4 抗剪强度

试件尺寸为 $240 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ，共 8 个，其中 4 个作横向加载试验，另 4 个作纵向加载试验，以 $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度匀速对试件加载，直至破坏。数据采集用荷载传感器、位移传感器、动态应变仪和 $X-Y$ 记录仪等。荷载与变形的关系见图 5。

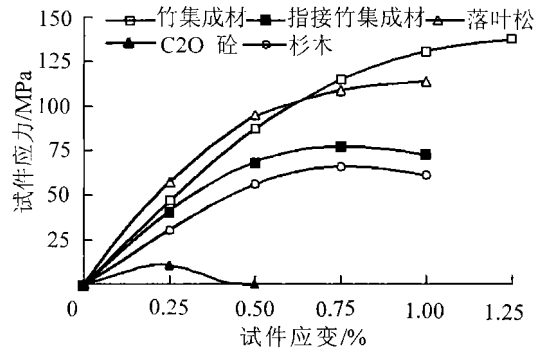


图 3 材料拉应力-应变曲线图

Figure 3 Tension stresses-strain relationship of lumber

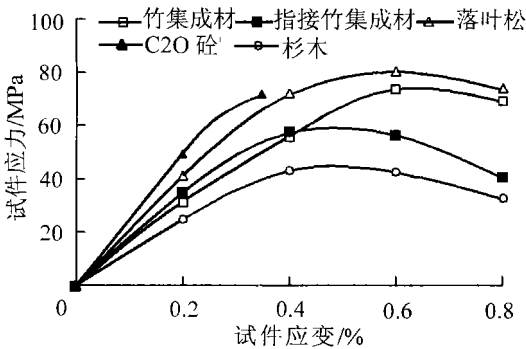


图 4 材料压应力-应变曲线

Figure 4 Compression stresses-strain relationship of lumber

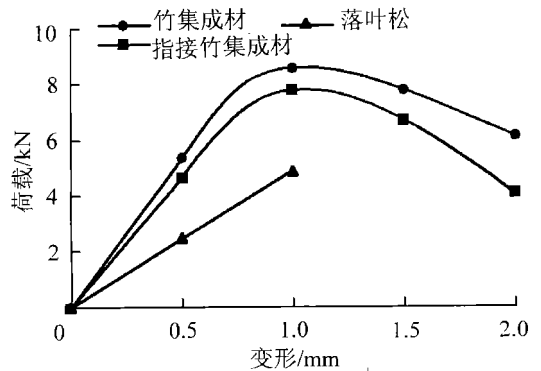


图 5 材料抗剪性能比较

Figure 5 Comparison of shear properties curves

3 结果与分析

3.1 抗拉抗弯性能

表 2 和图 3 可看出，竹集成材的抗拉强度和抗弯强度超过落叶松 *Larix gmelini*，水曲柳 *Fraxinus mandshurica*，杉木 *Cunninghamia lanceolata*，并远大于 C20 砼和烧结多孔砖的强度。竹集成材密度为 $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 约为混凝土密度的 $2/5$ ，烧结多孔砖的 $1/2$ ，具有良好的强重比，适于工字梁、桁架等复合结构用材。竹集成材的抗弯弹性模量为 12.93 GPa ，低于落叶松、水曲柳和 C20 砼，与毛竹持平，指

表 2 竹集成材、指接集成材与常见的几种建筑材料的力学性能

Table 2 Physical-mechanical properties of glued laminated bamboo and common structural lumber

产品名称	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	抗弯强度/ MPa	弹性模量/ GPa	抗剪强度/ MPa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
竹集成材	59.93	148.48	125.44	12.93	17.33	1 000.00
指接集成材	42.78	79.60	69.44	12.86	15.10	1 000.00
毛竹 ^[6]	66.42	185.00	151.80	12.27	18.70	740.00
落叶松 ^[7]	57.60	129.90	113.30	14.50	8.50	517.00
水曲柳 ^[7]	52.50	138.70	118.60	14.60	11.30	499.00
杉木 ^[7]	32.00	73.80	60.70	9.30	4.60	289.00
C ₂₀ 砼 ^[8]	13.40	1.54		25.50		2 500.00
烧结多孔砖砌体 (M ₁₀ MU ₁₀) ^[9]	3.02	0.30	0.27	4.84	0.27	1 800.00

说明: 木材与毛竹的抗压强度、抗拉强度和抗弯强度为顺纹强度值, 抗剪强度为顺纹径面剪切值。

接集成材的抗拉强度 79.60 MPa, 虽低于毛竹、落叶松和水曲柳, 但已能满足一般承重梁类的结构材料使用, 由于指接竹集成材受指接的影响, 应力集中, 首先出现该部位竹纤维撕裂产生裂缝, 其抗拉强度约为竹集成材的 55%, 因此, 如用指接竹集成材作为承重梁类的结构材料来使用, 提高指接部位的抗拉强度是关键。从竹集成材、指接集成材抗弯断口与断口面呈平直的素混凝土比较发现, 集成材断口呈纤维质断裂, 拉断纤维呈撕裂状态; 试件在轴心受拉状态下的应力-应变大致呈线性关系, 并有明显的塑性变形流幅, 其破坏是一种塑性破坏。

3.2 抗压强度

从表 2 和图 4 可看出, 试件在轴心受压状态下的应力-应变曲线由线性关系转为非线性关系, 塑性变形增幅较大, 表现较好的延性。集成材的抗压强度超过落叶松、水曲柳和杉木, 略低于毛竹, 高于 C20 砼和烧结多孔砖的强度, 集成材强度高, 密度低, 使得结构所占的面积更少, 提高建筑使用面积。集成材双向抗压强度接近为 59.90 MPa, 因指接竹集成材受指接的影响, 在轴压状态下, 指接集成材表面有指接处首先出现局部压溃, 降低了构件承载力, 其双向抗压强度为 42.80 MPa。竹集成材纵向与横向强度差异不大, 而毛竹和几种木材纵向抗压强度为横向抗压强度的 11~13 倍^[10], 是典型的各向异性材料, 这表明集成材适合于双向复合受力场合使用。

3.3 抗剪强度

从表 2 和图 5 可看出, 集成材的抗剪强度高于木材的抗剪强度, 木材的顺纹抗剪破坏是沿木纹方向劈开, 木材达到最大强度即破裂, 是一种脆性破坏, 而集成材抗剪破坏则表现很好的延性, 在达到极限荷载时不发生瞬间破坏, 是一种塑性破坏。集成材这种特性使构件与构件之间连接采用铰接或刚接, 与木材相比强度变得更可靠, 也更安全。

4 结论

通过不同纤维排列方向的竹蔑进行组坯、热压和冷压取得的集成材, 使得纵横两个方向的强度均匀且高, 改变了竹材、木材径向与纤维方向力学性能差异大的缺陷。竹集成材综合力学性能优越, 整体性能好, 其产品不仅可在工程受力复杂结构中使用, 而且其低的密度, 还可作为结构材料, 大大减轻建筑物自重, 降低基础的造价, 并且在地震作用下产生较小的惯性力, 表现出较好的抗震性能。

竹集成材作为一种新型建筑结构材料, 与传统建筑竹材相比, 不再受到自然的限制, 制造竹集成材的尺寸和形状相对自由, 完全可根据设计需要制造出不同形状的结构用材, 这给建筑设计带来很大的自由度, 也为大跨度建筑和各种富有创意的结构造型设计创造了条件, 同时在建筑产品生产过程中, 竹集成材易实现构件模数化、标准化, 这对推进我国住宅产业化和工业化, 提高住宅的科技含量, 实现住宅可持续发展, 有着广阔的前景。

竹指接集成材受指接的影响, 受力破坏首先出现在指接部位, 呈纤维断裂或劈裂破坏, 使得竹指接集成材的抗拉强度、抗压强度、抗剪强度和弹性模量低于竹集成材, 因此, 如何提高指接部位的强

度是促进竹指接集成材有效应用的关键。

参考文献:

- [1] 江泽慧. 竹藤世界[M]. 辽宁: 辽宁科学技术出版社, 2002.
- [2] 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.
- [3] 唐宏辉, 陈鸿斌, 王正. 结构用竹集成材制造工艺技术简介[J]. 人造板通讯, 2004, 5(9): 16—19.
- [4] 中华人民共和国国家质量技术监督局. GB/T 15780—1995 竹材物理力学性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [5] 王济川, 王晋生. 建筑结构试验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [6] 马灵飞, 韩红, 马乃训. 毛竹竹材物理力学性质的研究[J]. 浙江林学院学报, 1993, 10(4): 361—367.
- [7] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 50005—2003 木结构设计手册[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [8] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [9] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 50003—2001 砌体结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [10] 伊思慈. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996.

Comparison of mechanical properties for glued laminated bamboo wood and common structural timbers

ZHANG Ye-tian^{1,2}, HE Li-ping²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China; 2. School of Landscape Architecture, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: The physical and mechanical parameters of glued laminated bamboo wood was obtained by test research for providing a useful guidelines in safe design and construction. Besides, by comparing with those of other materials such as *Larix gmeini*, *Fraxinus mandshurica*, *Cunninghamia lanceolata*, *Phyllostachys pubescens*, fired perforated brick and concrete, conclusions could be made that glued laminated bamboo wood was a kind of material with excellent physical and mechanical performances including comparatively higher ultimate tensile and compressive strength and better plastic performance in shear resistance, etc. So, glued laminated bamboo wood could be used as column or beam not only in common structures but also in complicated ones such as truss and I-beam. The study also showed that glued laminated bamboo wood with finger joint, with lower value of mechanical parameters than glued laminated bamboo wood, could still be used as a common load-carrying building material. [Ch, 5 fig, 2 tab, 10 ref.]

Key words: forest engineering; structural timber; glued laminated bamboo wood; physical and mechanical properties