

竹木材料受压杆件制作及其力学性能研究

陈厉旻¹ 刘猛¹ 雷锦楠² 余海洋² 滕秉¹ 邢嘉瑶¹ 刘培威¹ 孙方屹¹ 苏鹏¹ 骆辉^{1*}

1. 江苏海洋大学土木与港海工程学院, 江苏 连云港 222005

2. 武昌首义学院, 湖北 武汉 430064

[摘要] 由于我国现行结构设计竞赛中, 关于竹材、竹皮等材料承载能力、拉伸性能等重要理论参数的参考文献较为匮乏, 导致抗压和抗拉杆件的材料性能未得到充分利用和优化。因此, 本研究通过制备不同类型的竹材空心受压杆件, 探讨截面形式、杆件长度以及预处理工艺对竹材力学性能的影响。结果表明受压杆件的承载力随截面尺寸和构件长度变化, 最佳截面尺寸为 7~9mm, 长度达到 250mm 时承载力最大。局部屈曲和断头破坏是受压杆件的主要破坏形式, 应通过加固和节点处理来防止。预处理构件的承载力明显高于普通杆件, 当承载力超过 1200N 时, 使用 0.35mm 竹皮+3mm×3mm 竹杆能获得最佳的承载力和荷质比。

[关键词] 竹木材料; 竹皮; 竹杆; 受压杆件; 力学性能

DOI: 10.33142/ucp.v1i6.15211

中图分类号: TB332

文献标识码: A

Research on the Production and Mechanical Properties of Bamboo and Wood Compression Members

CHEN Limin¹, LIU Meng¹, LEI Jinnan², YU Haiyang², TENG Ao¹, XING Jiayao¹, LIU Peiwei¹, SUN Fangyi¹, SU Peng¹, LUO Hui^{1*}

1. School of Civil and Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang, Jiangsu, 222005, China

2. Wuchang Shouyi University, Wuhan, Hubei, 430064, China

Abstract: Due to the lack of references on important theoretical parameters such as bearing capacity and tensile performance of materials such as bamboo and bamboo skin in current structural design competitions in China, the material properties of compressive and tensile members have not been fully utilized and optimized. Therefore, this study investigates the effects of cross-sectional form, member length, and pretreatment process on the mechanical properties of bamboo by preparing different types of hollow bamboo compression members. The results indicated that the load-bearing capacity of the compression members varies with the cross-sectional size and member length, with the optimal cross-sectional size being 7~9 mm, and the maximum load-bearing capacity achieved at a member length of 250 mm. Local buckling and head failure are the main failure modes of the compression members, which should be prevented by reinforcement and joint treatment. The load-bearing capacity of the treated members is significantly higher than that of the untreated members. When the load-bearing capacity exceeded 1200 N, the use of 0.35 mm bamboo bark combined with 3 mm×3 mm bamboo rod achieves the best load-bearing capacity and strength-to-weight ratio.

Keywords: bamboo and wood materials; bamboo bark; bamboo rod; compressed rod; mechanical properties

竹材作为一种可持续、环保的工程材料, 因其独特的生长特性和优异的力学性能, 在建筑和结构工程中逐渐获得了越来越多的关注^[1-2]。竹材具有良好的抗压、抗拉性能和较高的比强度, 使其在轻型结构中具有潜在的应用价值^[3-4]。Lee、Moreira 和 Mitch 等人总结了竹材力学性能测试方法, 涉及竹材的径向抗拉强度、弹性模量和顺纹抗剪性能^[5-7]。此外, Sharma 和 Garcia 指出目前的竹材性能测试方法较为复杂, 仍需进一步研发简化试验流程, 以实现更快速、准确的性能评估。

目前在我国结构竞赛及相关领域中, 竹材的实际应用仍面临着许多挑战, 尤其是在承载能力、拉伸性能等关键理论参数方面, 相关的参考文献和标准较为匮乏。在结构竞赛中, 竹皮和竹杆是常用的竹材类型。2016 年, 雷鸣

宇等人研究了竹皮的力学性能, 发现 0.35 mm 厚的单层竹皮杆件抗拉强度较弱, 而三层竹皮试件表现较好。他们还通过优化竹筒高度, 得出竹皮抗压强度大约在 18MPa 至 21MPa 之间。2017 年, 常海林^[8]等人分析了竹皮、白卡纸和桐木的力学性能, 提出了不同材料极限承载力与宽度的拟合公式, 并指出 0.35 mm 厚的竹皮最适用于拉索构件。2019 年, 袁晶^[9]等人研究了竹材的宏观压缩性能, 发现竹材的压缩性能与基本密度、维管束分布密度及厚壁纤维组织比量密切相关, 且与基本密度的相关性最为显著。

此外, 由于竹材特性复杂, 尤其是在承压和拉伸方面的性能尚未得到充分挖掘, 竹材的应用潜力尚未完全释放, 特别是在空心受压杆件等复杂结构的设计中, 竹材的利用效率仍有待提高^[10]。因此, 本研究通过制备不同类型的竹

材空心受压杆件,探讨截面形式、杆件长度以及预处理工艺对竹材力学性能的影响,旨在为竹材在结构工程中的更广泛应用提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 原材料

试验所用原材料为历届全国大学生结构设计竞赛中广泛使用的竹皮、竹杆等竹材。竹皮是一种经过层压的竹方,在经过软化工艺后,通过刨切而成的材料。具体的竹材规格如表 1 所示。

表 1 竹材种类及规格

竹材规格		竹材名称
竹皮	1250mm×430mm×0.20(+0.05)mm	集成竹片(单层)
	1250mm×430mm×0.35(+0.05)mm	集成竹片(双层)
	1250mm×430mm×0.50(+0.05)mm	集成竹片(双层)
竹杆	930mm×6mm×1.0(+0.5)mm	集成竹材
	930mm×2mm×1.0(+0.5)mm	集成竹材
	930mm×3mm×1.0(+0.5)mm	集成竹材

1.2 杆件制作

(1) 不同截面形式的受压杆件

本次试验选择赛事官方指定的 0.35 mm 厚和 0.50 mm 厚的竹皮制作空心受压杆件,试件参数如表 2 所示。例如, A35-5-1, A 表示单层竹皮, 5 表示截面宽度 0.5 mm, 1 表示杆件标号为 1。

表 2 受压杆件参数

编号	压杆类型	L/mm	t/mm
A35-5-(1-5)	单 0.35mm	200	0.35
A35-6-(1-5)			
A35-7-(1-5)			
A35-8-(1-5)			
A35-9-(1-5)			
A35-10-(1-5)			
A50-5-(1-5)	单 0.50mm	200	0.50
A50-6-(1-5)			
A50-7-(1-5)			
A50-8-(1-5)			
A50-9-(1-5)			
A50-10-(1-5)			

为了保证构件的成品率,在竹材构件制作过程中均采用材质均匀的竹材,并在制作过程中节选竹皮、竹条没有竹节点的部分制作成压杆。杆件制作示意图如图 1 所示。轴压杆件的制作过程为先节选无竹节点初始材料,后用直尺量定出杆件边长长度,随后用黑笔在竹皮顺纹方向划线,随后用美工刀将每一片竹皮裁出,然后沿着图示方法粘制成轴压杆件,并在两边黏合之处滴入胶水黏合。在制作完成之后应检查是否有制作缺陷。

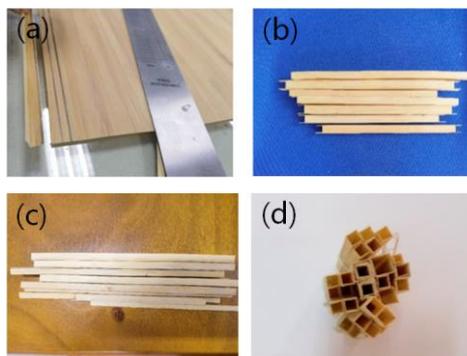


图 1 构件制作示意图

(2) 不同杆件长度的受压杆件

采用 0.35mm 和 0.50mm 两种类型竹皮制作截面宽度为 10mm 的受压构件,改变其长度,测试在同等条件下长度对于结构极限承载力的影响。应为随着杆件截面尺寸的面积不断增大,受压杆件的承载力也会不断增大,其稳定性也会不断增级,因此双层构件长度从 250mm 起开始制作,制作受压杆件规格如表 3 所示。字母 A 表示单层杆件,字母 B 表示双层杆件,字母 L 表示杆件长度,字母 t 表示杆件单边截面厚度。例如 A35-20 表示长为 200mm 的单层 0.35mm 竹皮的受压构件。

表 3 受压杆件参数

编号	压杆类型	L/mm	t/mm
A35-(20-40)	单层 0.35mm	200~400	0.35
A50-(20-40)	单层 0.50mm	200~400	0.50
B35-(20-40)	双层 0.35mm	200~400	0.70
B50-(20-40)	双层 0.50mm	200~400	1.00

空心杆件制作过程如图 2 所示。在制作箱型杆件时,首先使用铅笔在竹皮的顺纹方向上精确划线。接着,在划线处轻轻折出痕迹,但务必谨慎操作以避免折断竹皮。随后,根据折痕的方向,将竹皮逐步卷绕形成箱型结构。在角点以及竹皮叠合的关键部位,需精准滴入胶水以确保牢固黏合。在粘贴过程中,应持续检查胶水涂抹的均匀性,确保黏合效果。

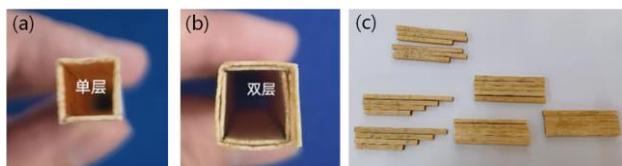


图 2 构件制作示意图

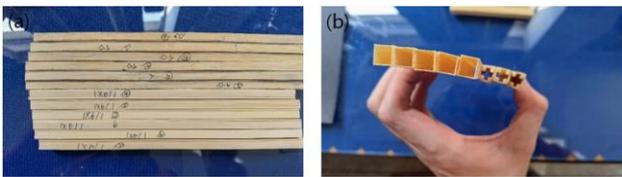
(3) 不同预处理工艺制作的受压杆件

除单层 0.35mm 和 0.50mm 竹皮制作的单层空心杆,还需制作单层竹皮加 2mm×2mm 及 3mm×3mm 竹条的混合空心杆,即在单层 0.35mm 和 0.50mm 竹皮制作的空心杆基础上,在四个角点位置额外加设 2mm×2mm 和 3mm×3mm 的竹条进行加固。制作杆件类型如表 4 所示。

表 4 受压杆件参数

杆件类型	截面尺寸边长 W/mm	长度 L/mm	竹皮厚度 t/mm
0.35mm+2mm×2mm	6~13	10	0.35
0.50mm+2mm×2mm	7~13	10	0.50
0.35mm+3mm×3mm	6~13	10	0.35
0.50mm+3mm×3mm	7~13	10	0.50

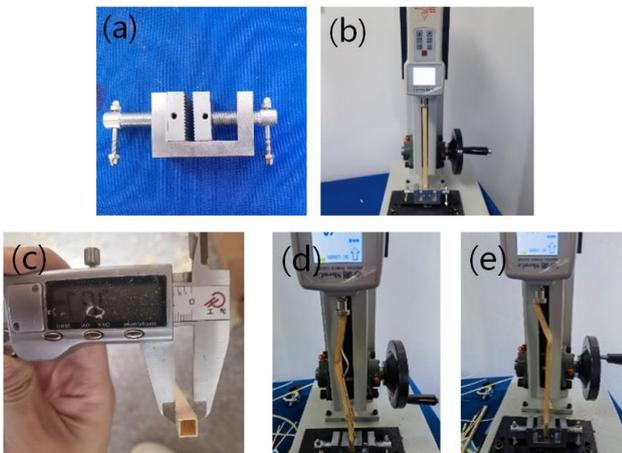
在试件制作过程中,严格筛选材质均匀、竹节少的材料,以确保杆件的质量和性能。杆件制作过程如图 3 所示,首先选取竹片,在其顺纹方向上精准地用刀背刻制折痕。接着根据预先刻好的折痕将竹片折叠成空心杆件形状。为了增强杆件的稳定性和耐久性,在竹皮折叠的接缝处滴入胶水,以弥补因折叠而产生的划痕和竹材本身可能存在的微小缺陷。


图 3 构件制作示意图

1.3 性能测试方法

本次试验构件的物理性能采用深测智能(深圳)有限公司生产的弹簧拉力/压力测试机进行测试。采用济南川佰试验仪器有限公司生产的电子拉、压试验机进行试验构件的加载测试。该仪器的最小分辨率为 1N, 受压行程为 80cm, 测试速度为每分钟 10mm。

图 4 为试件的加载过程示意图,试验机在加载过程中具备自动监测和记录荷载峰值及其对应的位移值的功能。当试件因承受极限荷载而发生破坏或断裂,试验机将智能地启动自动停止机制, 并立即复位至初始状态。


图 4 试件的加载过程

2 结果与讨论

2.1 截面形式对受压杆件承载力的影响

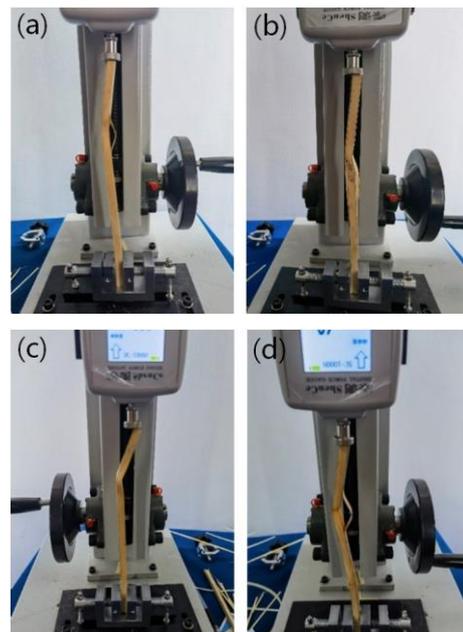
2.1.1 破坏形态分析

不同截面尺寸的受压杆件的抗压承载力测试结果如

表 5 所示。局部受弯破坏常发生在构件的 1/2 至 1/3 界面范围内, 此范围内局部受弯破坏风险极高, 如图 5 所示。虽然理论上构件应处于纯受压状态, 但在实际受力情况下, 它们往往同时承受压力和弯矩的影响。尤其是当构件中某些界面的竹皮存在局部缺陷时, 这种联合作用会显著增加局部屈曲破坏的风险, 最终导致整体结构发生受弯破坏。因此, 我们必须对竹皮的节点等潜在脆弱部位进行仔细检查在手工制作过程中, 并采用胶水等材料进行加固处理, 以减少因局部缺陷导致的弯曲破坏, 从而确保构件的整体稳定性和安全性。

表 5 不同截面尺寸的受压杆件的性能参数

编号	型号	平均质量	平均受压极限承载力	平均荷质比
A35-5-(1~5)	0.35mm/5mm/200mm	1.32	76.9	58.4
A35-6-(1~5)	0.35mm/6mm/200mm	1.34	99.7	74.2
A35-7-(1~5)	0.35mm/7mm/200mm	1.58	149.8	94.9
A35-8-(1~5)	0.35mm/8mm/200mm	1.79	219.0	122.64
A35-9-(1~5)	0.35mm/9mm/200mm	2.06	188.4	91.45
A35-10-(1~5)	0.35mm/10mm/200mm	2.29	198.6	86.65
A50-5-(1~5)	0.50mm/5mm/200mm	2.29	82.5	43.27
A50-6-(1~5)	0.50mm/6mm/200mm	1.91	100.5	45.62
A50-7-(1~5)	0.50mm/7mm/200mm	2.20	181.3	77.10
A50-8-(1~5)	0.50mm/8mm/200mm	2.77	217.1	75.69
A50-9-(1~5)	0.50mm/9mm/200mm	3.62	273.7	75.69
A50-10-(1~5)	0.50mm/10mm/200mm	3.71	226.4	60.97


图 5 受压杆件破坏示意图

2.1.2 受压杆件性能分析

图 6 (a) 给出了受压杆件极限受压承载力的线性拟

合图像,由图可知各类型受压杆件的极限承载力随着截面尺寸的增长,先增加再减小(或趋于平缓)。0.35mm类型压杆和0.50mm类型压杆的相关系数分别为0.88和0.90。在结构竞赛模型制作当中的常用杆件尺寸中,将压杆边长从5mm提升到8mm或9mm,可分别将0.35mm构件和0.50mm构件的承载力提升至219N和273N,提升幅度可达185%和230%。在同样的边长尺寸之下,用0.50mm构件代替0.35mm构件,可将承载力提升6%~30%。具体的提升强度选择可在制作时候根据相应的边长尺寸而选择。

图6(b)给出了不同类型的空心杆件荷质比随截面边长尺寸的变化关系。由图可知0.50mm杆件有着较高的承载力。当截面尺寸小于等于8mm时,0.35mm构件的荷质比最高可达122.64N/g,相较于0.50mm构件,增幅可达56%,因此考虑到荷质比因素。在所需承载力小于等于200N时,可选择0.35mm构件,当所需承载力大于200N时,可选择0.50mm构件。保守选用时,可通用0.50mm构件。

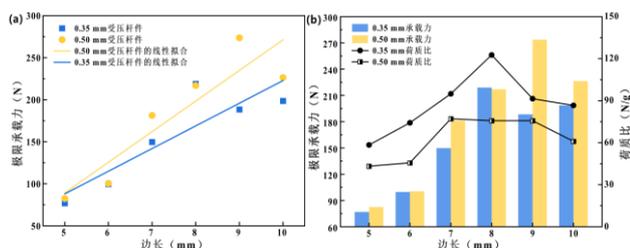


图6 (a) 受压杆件极限承载力的线性拟合 (b) 边长对受压杆件力学性能的影响

2.2 杆件长度对受压杆件稳定性的影响

2.2.1 破坏形态分析

由图7可知受压杆件开裂可分为端部开裂,中间截面断裂,竹皮或棱角开裂破坏。局部受压段竹皮的刚度小于挤压机的钢板刚度,这会导致受压杆件端部部分发生局部屈曲破坏,进而导致整体破坏,在一般模型制作中只要做好节点处理一般不会发生此类现象。中间截面断裂一般发生在杆件的1/3至1/2处。此处最容易发生局部屈曲破坏。原因是,不同于理想情况之下,杆件只会遭受受压破坏,在竞赛的实际过程当中,构件会同时遭受轴压力和弯曲力的共同作用。如果在杆件的制作过程中在制作模型的过程中,任何截面出现的制作误差或材料缺陷,都可能成为局部屈曲的潜在诱因,进而引发该点的局部破坏。这种局部破坏一旦产生,会显著影响结构的整体性能,导致整体结构在受到弯曲力时易于发生破坏。因此,在模型制作的每一个环节,应在杆件薄弱之处或存有缺陷之处,加以胶水、粉末等修补加固。竹皮或棱角开裂一般出现在杆件的中间位置,由于在制作过程当中竹皮存在顺纹裂缝。在加载过程中,无法保证顺纹部分不发生破坏,因此在制作之前挑选材料之时就应该加以挑选,晒去存在过多缺陷的竹皮。此外棱角破坏还尤其容易发生于单层竹皮构件当中,因此

可适当对杆件外围进行“箍筋”处理。



图7 杆件开裂破坏形态

2.2.2 受压杆件性能分析

图8展示了不同截面类型空心受压杆件的极限承载力变化规律。随着杆件长度的逐步增加,受压空心杆件的极限承载力总体上呈现下降趋势。值得注意的是,当杆件的截面面积增大,特别是边长增加时,极限承载力的下降幅度会更为显著。具体来说,当单层0.35mm构件、单层0.50mm构件、双层0.35mm构件以及双层0.50mm构件的长度从250mm增长到400mm时,其极限承载力分别减少了41%、30%、31%和41%。这一数据进一步验证了杆件长度和截面尺寸对极限承载力的显著影响。因此在制作杆件时对于较长杆件,推荐使用双层杆,较短杆件时推荐使用单层杆件,保守起见也可使用双层杆件。另外随着构件见面面积的增大,可以显著提升杆件的承载力,由图可知单层0.35mm的承载力区间在130~225N之间,单层0.50mm构件的承载力区间在160~280N之间,而双层0.35mm构件和双层0.50mm的构件承载力则分别在230~330N和320~550N之间。分别较单层提升了54%和70%,说明截面面积提升2倍,承载力提升接近60%。其根本原因在于双层构件的结构缺陷,因手工制作导致强度降低的程度减少。

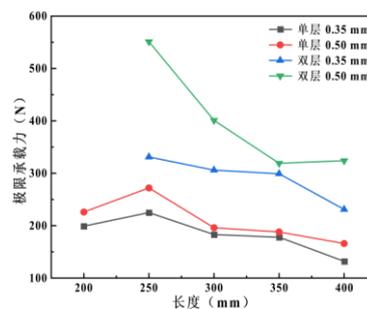


图8 不同长度杆件的极限承载力

2.3 预处理工艺对受压杆件性能的影响

不同尺寸的受压杆件经过预处理后的抗压强度变化如表6和图9所示。由图可知在0.35mm和0.50mm两种竹皮制作的空心受压杆件的四角设置2mm×2mm和3mm×3mm竹条之后,受压杆在受压承载力极限显著提高,其中3mm×3mm竹条+0.35mm竹皮的预处理构件受压承载力最高,最高可高达1145N。

此外,0.35mm竹皮的构件搭配3mm×3mm竹条的极限承载力大于相对应的0.50mm竹皮预处理后的构件,在拥有高承载力的同时,0.35mm竹皮预处理后的构件的质量还会显著低于0.50mm预处理后的构件。同时预处理增加

3mm×3mm 竹条的构件的承载力较与预处理增加 2mm×2mm 竹条的构件,其相对应的承载力提升大约 20%~30%,在所需承载力为 600~900N 区间时,推荐使用 0.35mm 竹皮+2mm×2mm 竹条的预处理构件,在 900~1100N 之间则推荐使用 0.50mm 竹皮+2mm×2mm 竹条的预处理构件,在 1100N 以上之时则推荐使用 0.35mm 竹皮+3mm×3mm 竹条构件。其中在边长超过 11mm 之后,手工制作因素会导致各类杆件均发生承载力下降。单层 0.35mm+2mm×2mm 构件则更为明显,在边长超过 10mm 之后就会明显发生。

表 6 不同压杆预处理后的极限承载力

杆件类型	极限承载力/N							
	6	7	8	9	10	11	12	13
0.35mm+2mm×2mm	649	750	880	976	1148	968	932	946
0.50mm+2mm×2mm	-	695	904	897	810	1186	1066	1165
0.35mm+3mm×3mm	1065	1270	1032	1115	1076	1445	1345	1326
0.50mm+3mm×3mm	-	1001	1115	1213	1210	1439	1056	1150

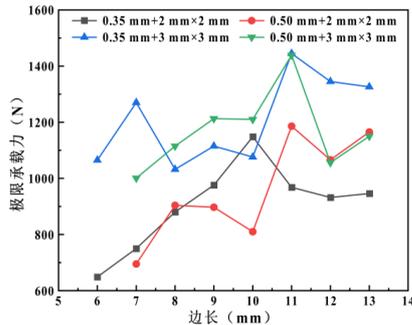


图 9 预处理构件承载力随边长变化关系

3 结论

本文通过研究截面形式、杆件长度、预处理工艺对空心受压杆件的力学性能等性能的影响,分析了各种情况下各种类型的受压杆件的受压极限承载力、破坏形式、荷质比。得出了以下结论:(1)结构设计竞赛中常用的受压杆件其抗压承载力随截面尺寸的增加,呈现先增加再减小的趋势。在常用的单层受压构件中,截面边长控制在 7~9mm 最为合适。(2)在所需承载力小于等于 200N 时,可选择 0.35mm 构件,当所需承载力大于 200N 时,可选择 0.50mm 构件。(3)受压杆件的破坏形式主要有断头破坏和中间部分中间竹皮或棱角开裂和局部屈曲破坏。其中以局部屈曲破坏为主。在空心受压杆件制作过程当中,应控制截面尺寸,在杆件 1/3~1/2 处加固杆身防止屈曲破坏。各杆件相连时做好节点加固防止断头破坏。(4)受压杆件的承载力极限和荷质比随杆件的长度先上升再减小。各类杆件在长度达到 250mm 时会达到极限承载力的最大值,双层杆件可高达 550N 单层杆件可高达 250N。超过此长度之后,极限承载力和荷质比均会下降,其中双层杆件下降幅度大于单层杆件。(5)预处理构件的承载力显著高于普通杆件,

当所需承载力超过 800N 之后推荐预处理使用 3mm×3mm 长条。所需承载力高于 1200N 时,尤为推荐使用 0.35mm 竹皮+3mm×3mm 竹条给预处理构件,在承载力和荷质比两方面最佳。

基金项目:国家自然科学基金(52108322);结构设计竞赛材料物理力学性能及模型(江苏海洋大学大学生创新创业训练计划省级项目);竹质杆件材料物理力学性能及桥梁模型设计研究(江苏海洋大学优秀本科毕业设计项目:5509007000X99)。

[参考文献]

[1]LUO X,WANG X,REN H,et al.Long-term mechanical properties of bamboo scrimber [J].Constr Build Mater,2022(338):127659.
 [2]黄彬,方长华,刘焕荣,等.工程用竹方材研究现状与展望 [J].林产工业,2021,58(9):43-9.
 [3]LIU P,QIN Y,ZHOU Q,et al.Experimental investigation on the physical and mechanical properties of P.edulis bamboo and their correlations [J].European Journal of Wood and Wood Products,2022(26):1-16.
 [4]赵邦林,黄玲玲,王立彬,等.结构用竹木材料的高温力学性能研究 [J].林产工业,2024,61(6):33-8.
 [5]MITCH D,HARRIES K A,SHARMA B.Characterization of splitting behavior of bamboo culms [J].J Mater Civil Eng,2010,22(11):1195-9.
 [6]MOREIRA L E,SEIXAS M.Analysis of the bending behavior of bamboo culms with a full longitudinal crack [J].Engineering Structures,2022(251):113501.
 [7]LEE A W,BAI X,PERALTA P N.Selected physical and mechanical properties of giant timber bamboo grown in South Carolina [J].Forest Products Journal,1994,44(9):40.
 [8]常海林,张旭钦,钱格军,等.大学生结构设计大赛材料力学性能试验研究 [J].高等建筑教育,2017,26(5):108-14.
 [9]袁晶,张雪霞,余雁,等.维管束分布及结构对竹材宏观压缩性能的影响 [J].中南林业科技大学学报,2019,39(6):121-7.
 [10]SYLVAYANTI S P,NUGROHO N,BAHTIAR E T.Bamboo scrimber's physical and mechanical properties in comparison to four structural timber species [J].Forests,2023,14(1):146.
 作者简介:陈厉旻(2003—),男(汉族),上海市人,土木工程专业在读本科生;*通讯作者:骆辉(1990—),男,江苏连云港人,讲师,博士,主要从事新型土木工程材料与结构方向的研究。