

竹木材料受拉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 桂志航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]近年来,竹复合材料作为结构模型的主要材料逐渐受到关注。由于竹条在顺纹方向上的优异抗拉性能,受拉构件成为设计中的关键选择。然而,竹皮受竹节缺陷的影响较大,断裂风险较高,因此在选材时竹条的筛选和处理对确保结构的安全性至关重要。本研究通过拉杆试验研究截面形式、含水率和竹节对受拉构件力学性能的影响,分析了不同情况下受拉杆件的极限受拉承载力、破坏形式及荷质比。结果表明随着受拉杆件截面宽度的增大,极限受拉承载力也相应增加,其中1mm×6mm竹条的极限受拉承载力最高,达到900N;当杆件含水率达到15%时,极限承载力达到最大值;竹节的存在会降低构件的力学性能,导致其承载力减少约15%。

[关键词]竹木材料;竹皮;竹杆;受拉杆件;力学性能

DOI: 10.33142/nsr.v1i3.14933

中图分类号: TU731

文献标识码: A

Research on the Production and Mechanical Properties of Bamboo and Wood Material Tie Rod Components

CHEN Limin¹, LIU Meng¹, LEI Jinnan², YU Haiyang², GUI Zhihang¹, LIU Peiwei¹, YUAN Guangzhi¹, 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: In recent years, bamboo composite materials have gradually received attention as the main material for structural models. Due to the excellent tensile performance of bamboo strips in the longitudinal direction, tension members have become a key choice in design. However, bamboo skin is greatly affected by bamboo joint defects and has a high risk of breakage. Therefore, the selection and treatment of bamboo strips are crucial to ensure the safety of the structure when selecting materials. This study investigated the effects of cross-sectional form, moisture content, and bamboo nodes on the mechanical properties of tension members through tension rod tests, and analyzed the ultimate tensile bearing capacity, failure mode, and load to mass ratio of tension members under different conditions. The results show that as the cross-sectional width of the tension rod increases, the ultimate tensile bearing capacity also increases accordingly. Among them, the ultimate tensile bearing capacity of 1 mm × 6 mm bamboo strips is the highest, reaching 900 N; When the moisture content of the rod reaches 15%, the ultimate bearing capacity reaches its maximum value; The presence of bamboo joints can reduce the mechanical properties of the components, resulting in a decrease of about 15% in their bearing capacity.

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

近年来,随着国内外结构竞赛规则的不断完善,竹复合材料逐渐成为主要的模型材料。然而,竹条和竹皮等材料的特性会影响结构模型的整体受力性能,因此需要通过大量破坏试验来确定最佳方案^[1]。考虑到竹材料的各向异性,尤其是在顺纹方向上的优异抗拉性能,为了实现结构模型的高强度与轻量化,受拉构件应是首选^[2]。尽管竹皮和竹条均可作为受拉构件,但竹皮受竹节缺陷的影响较大,断裂风险较高^[3-4]。因此,在制作模型前,选择合适的竹条作为受拉构件至关重要。受拉构件的筛选和处理直接影响模型的极限承载能力,从而确保整体结构的安全性。

已有学者对受拉竹条的力学性能进行了深入研究。例如,常海林等^[5]人发现0.35mm的竹皮适用于受拉构件,但其缺陷较竹条多,导致不同杆件间力学性能差异显著。

贾新聪等^[6]人测试了竹皮和竹条的抗拉强度,发现竹条的抗拉强度为100~120MPa,约为竹皮的1.5倍,并强调选择受拉材料时应避免明显节点的竹材。王永宝等^[7]人则研究了竹皮制作的空心短杆和长杆的抗压强度及荷质比变化规律。然而,现有研究未深入探讨质量密度和维管束数量对竹条抗拉强度的影响,也未提出科学的受拉竹条选择方法。在大学生结构设计竞赛中,多采用毛竹竹壁部分的竹条,这些竹条因截面内维管束密度不均,导致力学性能差异。特别是近青面的维管束密度较高,而维管束周围纤维密实度和含水率的变化也影响竹材密度,这些因素为竹条选择带来挑战^[8]。

因此,本文通过拉杆试验,研究了三种不同截面尺寸(1mm×6mm、2mm×2mm和3mm×3mm)竹条材料的力学性

能。试验的主要目的是分析不同截面尺寸的空心受拉杆件在不同加载条件下的极限受拉承载力、破坏形式以及荷质比的变化规律。通过对这些不同竹材样本的拉伸性能进行比较与分析,进一步揭示了竹材力学性能与其尺寸、形态、含水率等因素之间的关系,为参赛队伍在设计和制作受拉杆件时,提供了关于合理规格选择和制作工艺的实用参考。

1 材料与方法

1.1 杆件制作

(1) 不同截面尺寸的受拉杆件

本实验采用全国大学生结构设计竞赛赛事官方指定的三种规格的竹条,根据我校在全国大学生结构设计竞赛中用竹条制作结构模型抗拉条构件时的常用尺寸和行业标准《建筑用竹材物理力学性能试验方法》,确定构件长度为 200mm。选取表面完好无明显弯曲的初始竹条,选取无竹节点部分。每种规格的竹条选用 6 根并用数字 1、2、3...做好标记。裁好试件后用精度为 0.01mm 的游标卡尺测量试件的宽度长度,剔除偏差大于 0.4mm 的试件并补齐试件。测试杆件规格见表 1。

表 1 试件规格

编号	杆件类型	W/0.1 mm	t/mm
FWX-X	1 mm×6 mm	5-10	6
TWX-X	2 mm×2 mm	5-10	2
THWX-X	3 mm×3 mm	5-10	3

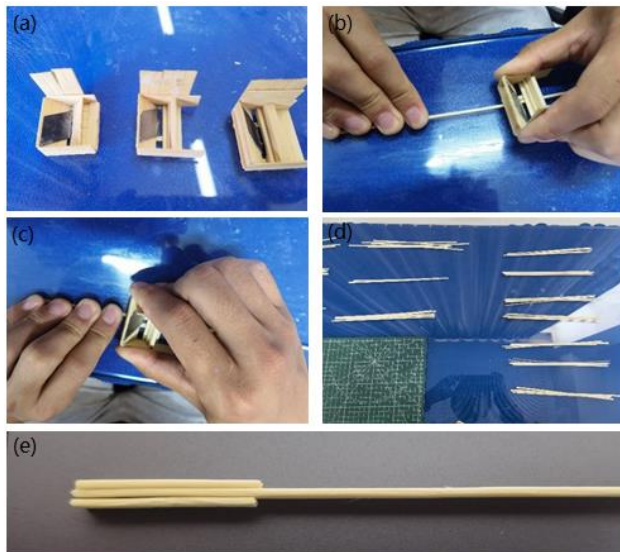


图 1 试件制备及粘连保护样式

(2) 不同含水率的受拉杆件

通过测试,试件的自然状态下的含水率为 15%。选取 1mm×6mm 和 3mm×3mm 这 2 种截面尺寸进行试验,每组内采用杆件长度为 200mm 的竹条 2 根,形成杆件对比。由于 2mm×2mm 竹条截面过小,其强度主要由纤维缺陷决定,因此仅分析 1mm×6mm 与 3mm×3mm 竹条的试验结果。试件

的制备过程如图 2 所示。

为了准确评估不同含水率下受拉构件的受力性能,并考虑到结构竞赛的实际环境条件,我们采用了一种简便的含水率调节方法,即将竹条浸泡于水中不同时间段。准备两组相同的竹条,分别在不同时间(0、10、20、30 分钟)进行浸泡,浸泡后将其表面水分擦干,并置于密封塑料袋中静置 30 分钟,以确保水分在竹条内部均匀分布。

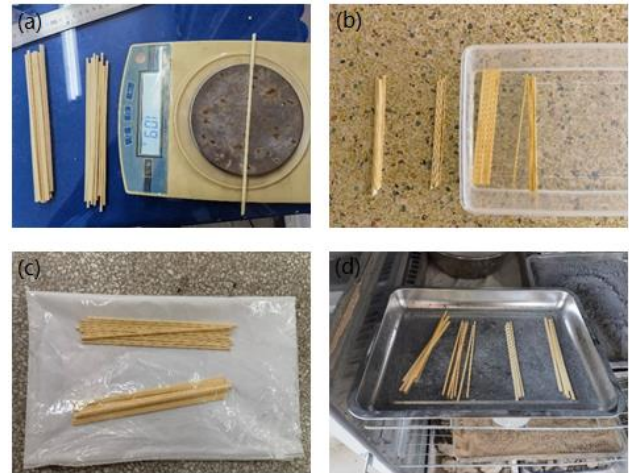


图 2 试件制备过程

(3) 不同竹节的受拉杆件

结构的好坏很大程度上取决于材料性能是否得到充分发挥,因此熟悉材料性能对此次大赛非常重要。由于制作工艺的差别可能导致材料实际强度与参考强度产生差异,因此,我们对原材料是否含有竹节及竹节是否对性能造成影响做试验。参照标准,选取我校赛事常用规格竹材,0.50mm×3mm 的竹条作为基础竹条。分为有竹节组和无竹节组两组进行对照,如图 3 所示。

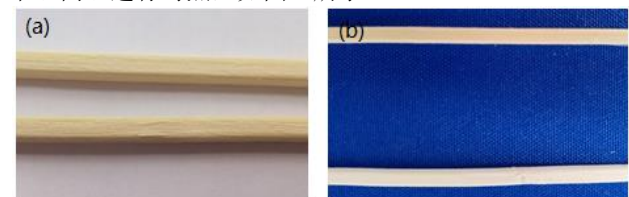


图 3 有无竹节的杆件对照

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。具体试验过程如下:

将制做好的竹材试件分类;

安装试件,将制作好的各类试件放置于加载机器之上;

依次加载。将安装好的试件手动加载后,记录机器峰值荷载。

不同含水率的受拉杆件采用两种处理方式进行测试:将受拉杆件分为两组,一组竹条在称重后放入烘箱,12

小时后取出并在自然环境下冷却，以测定烘干后的质量；另一组竹条直接用于拉力机测试，以测定其抗拉极限承载力。通过比较竹条前后的质量变化，我们可以精确计算出竹条的含水率，并据此分析不同含水率对受拉构件的受力性能的影响。

2 结果与讨论

2.1 截面形式对受拉构件性能的影响

2.1.1 破坏形态分析

不同细致观察受拉试件的破坏形态，我们可以将其破坏类型归结为顺纹破坏和 Z 字形破坏两类（图 4）。在顺纹一字型破坏的情况下，由于竹条中的竹纤维分布均匀，并且当试件受到拉力作用时，其中轴线与拉力作用线恰好重合。由于竹纤维的抗拉性能优于竹基，竹基会首先开裂。随着竹基退出工作，竹纤维将承担全部拉力，并迅速达到其抗拉强度极限，导致整个竹纤维几乎同时断裂，形成整齐的一字型破坏面。而 Z 字形破坏的机理则有所不同。当竹纤维分布不均或试件的中轴线与拉力作用线不重合时，轴心拉力会在试件质心处产生附加弯矩，使试件两侧分别处于拉伸和压缩的应力状态。一旦受拉一侧的竹基开裂，竹纤维将承受全部拉力，直至达到其承载力极限而断裂。此时，裂缝会沿着竹纤维与竹基结合界面的薄弱环节扩展至另一侧。随着原先受压的一侧也开始承受全部拉力并迅速达到受拉极限，试件最终断裂，形成 Z 字形的断裂开裂缝。



图 4 受拉杆件破坏示意图

2.1.2 受压杆件性能分析

图 5 为三类杆件的不同截面宽度对极限抗拉承载力和荷质比的影响。由图可知，1×6 类构件的抗拉强度最大，在经过初步加工过后，其受拉承载力极限可达 550~900N，同等截面厚度的 3×3 型构件和 2×2 型构件只能达到其强度的 22%和 15%。由于在结构设计竞赛中，除了考虑杆件的力学性能，对结构的总体重量也有所要求，

1×6 型构件、3×3 型构件、2×2 型构件的荷质比平均值分别为 661.6、498.6 和 458.1。1×6 型构件在结构力学竞赛中质量得分贡献上相较于 3×3 型构件和 2×2 型构件分别提升了 32%和 44%。因此说明在比赛现场尽可能选用 1×6 型竹条制作受拉构件，当 1×6 型构件不足且需要承载的拉力较大时可采用 3×3 型构件。当构件所需要承受的拉力较小时，也可适当采用 2×2 型构件，缓解 1×6 型构件数量不足的缺点。

表 2 不同截面尺寸、厚度的受拉杆件的性能参数

编号	截面尺寸与长度	平均质量	平均受拉极限承载力	平均荷质比
TW5-(1-5)	2×0.5/200mm	0.156	73.3	470.6
TW6-(1-5)	2×0.6/200mm	0.190	92.3	483.5
TW7-(1-5)	2×0.7/200mm	0.226	95.2	423.0
TW8-(1-5)	2×0.8/200mm	0.236	110.2	468.0
TW9-(1-5)	2×0.9/200mm	0.258	122.1	473.5
TW10-(1-5)	2×1.0/200mm	0.290	135.6	468.0
THW5-(1-5)	3×0.5/200mm	0.186	90.0	492.8
THW6-(1-5)	3×0.6/200mm	0.244	118.9	489.8
THW7-(1-5)	3×0.7/200mm	0.270	136.2	506.5
THW8-(1-5)	3×0.8/200mm	0.302	153.8	509.7
THW9-(1-5)	3×0.9/200mm	0.352	171.9	488.7
THW10-(1-5)	3×1.0/200mm	0.396	193.7	489.4
FW7-(1-5)	6×0.7/200mm	0.900	562.4	625.3
FW8-(1-5)	6×0.8/200mm	1.098	672.4	612.9
FW9-(1-5)	6×0.9/200mm	1.184	809.6	683.9
FW10-(1-5)	6×1.0/200mm	1.252	904.7	724.4

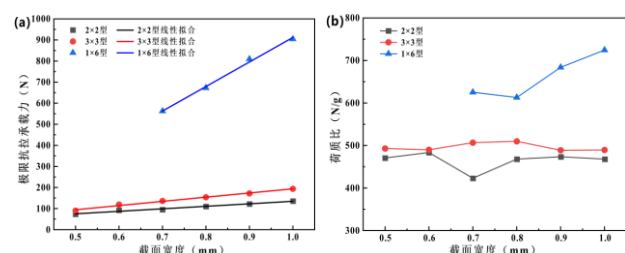


图 5 不同截面宽度对极限抗拉承载力和荷质比的影响

2.2 含水率对受拉构件力学性能的影响

表 3 为自然状态和浸泡后杆件的力学性能。由表可知两种竹材的材料浸泡时间与竹材含水率成正比，3×3 型和 1×6 型竹材的相关系数分别为 0.88 和 0.92。这表明，在一定浸泡时间下，竹材的含水率变化可预测并具有较高的一致性。经过 40 分钟的浸泡处理后，竹材的含水率平均提高了约 15%。这一结果为实际工程中通过浸泡调整竹材含水率提供了可行的处理方案，尤其在竹材作为建筑和结构材料应用时，合理调整其含水率对于力学性能的提升至关重要。

此外,通过进一步的实验分析,不同浸泡时间对竹材力学性能的影响也得到了验证。随着竹材含水率的逐渐增加,其极限抗拉承载力呈现出一个先上升后下降的趋势。在含水率接近 15%时,竹材的极限抗拉承载力达到了最大值,分别为 3×3 型竹材 900 N 和 1×6 型竹材 620 N。这表明竹材的抗拉性能与其含水率有显著的关系,并且其变化趋势呈现出凹函数的形态。竹材含水率过低或过高都会对其抗拉强度产生负面影响,且这种影响是非线性的,降幅可高达 20%至 30%。因此,竹材的最佳含水率对于保持其强度和力学性能的稳定性至关重要。

竹材存在最佳含水率的原因主要在于竹纤维的饱和状态,无论是未达到饱和还是过度饱和,都会对竹材的强度产生显著影响。观察试验和试验处理出来的结果,可以发现不同含水率的对于结构稳定性有着十分重要的影响,在参与结构竞赛进行结构设计和计算书设计时可以考虑采用采取所测数据的 90%极限承载力,以保证在实际制作时避免人为制作等因素所造成的影响。

表 3 自然状态和浸泡后杆件的性能参数

型号	处理方式	烘干前平均质量	烘干后平均质量	平均抗拉承载力	平均含水率	平均荷质比
1×6/ 200 mm	自然状态	1.26	1.06	905.58	0.15	721.23
	浸泡 10 min	1.29	1.08	805.22	0.16	625.76
	浸泡 20 min	1.34	1.10	555.38	0.18	415.16
	浸泡 30 min	1.37	1.10	686.63	0.20	502.70
	浸泡 40 min	1.56	1.11	650.77	0.29	418.10
3×3/ 200 mm	自然状态	1.18	1.01	619.27	0.15	525.83
	浸泡 10 min	1.21	1.01	518.58	0.16	430.68
	浸泡 20 min	1.26	1.04	485.80	0.18	386.41
	浸泡 30 min	1.34	1.07	538.07	0.20	402.70
	浸泡 40 min	1.49	1.08	641.98	0.28	432.79

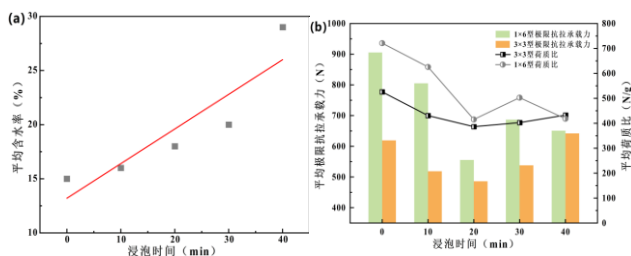


图 6 不同浸泡时间对含水率、杆件极限抗拉承载力和荷质比的影响

2.3 竹节对受拉构件力学性能的影响

含有竹节和不含竹节的受拉杆件的抗拉承载力结果如表 4 所示。从对比结果可以看出,当受拉构件中不存在竹节点时,其抗拉承载力表现出较为稳定的特性,承载力大致维持在 90N 左右,波动幅度较小。而当受拉构件存在竹节点时,性能则变得不稳定,抗拉承载力出现明显的波

动,波动幅度大约为 15%。这表明竹节点对受拉构件的性能有显著影响,竹节可能导致局部结构的应力集中,进而影响其整体承载能力。因此,在设计和制作受拉构件时,应优先选择无竹节点的竹条,以提高构件的抗拉承载力和使用安全性。

表 4 受拉构件的抗拉承载力

	编号	破坏时拉力/N	破坏形式
有竹节	1	64.2	竹节拉断(正常)
	2	41.5	竹节拉断(正常)
	3	50.7	竹节拉断(正常)
无竹节	4	90.2	剪坏(材料密实度不均)
	5	92.5	剪坏(材料密实度不均)
	6	87.1	剪坏(材料密实度不均)

3 结论

本章通过研究截面形式、含水率和竹节对受拉构件力学性能的影响,分析了不同情况下受压杆件的受压极限承载力、破坏形式及荷质比。得出以下结论:

(1) 受拉杆件的受拉极限承载力与截面宽度密切相关,随着截面宽度的增大,受拉极限承载力也相应增加。其中,1mm×6mm 竹条的极限受拉承载力显著高于其他两种尺寸,最高可达 900N。

(2) 含水率对杆件的受拉极限承载力有明显影响,其数值随含水率变化呈现先增大后减小的趋势,当含水率达到 15%时,极限承载力达到最大值。

竹节的存在会降低构件的力学性能,导致其承载力减少约 15%。因此,在模型制作过程中,应避免使用含竹节点的材料,或将带有竹节点的构件放置在受力较小的区域。

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] 邹翼,王庆,程玉珍,等.竹皮结构设计与制作分析[J].高等建筑教育,2018,27(4):73-81.
- [2] 刘波,陈志勇,殷亚方,等.两项竹材物理力学性质试验方法标准的比较[J].木材工业,2008(4):26-9.
- [3] SASSU M, DE FALCO A, GIRESENI L, et al. Structural solutions for low-cost bamboo frames: Experimental tests and constructive assessments[J]. Materials, 2016, 9(5):346.
- [4] ZHANG H, LI H, LI Y, et al. Effect of nodes on mechanical properties and microstructure of laminated bamboo lumber units [J]. Constr Build Mater, 2021(304):124427.

[5]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.

[6]贾新聪.结构竞赛模型材料物理力学性能及模型设计制作研究[D].郑州:华北水利水电大学,2018.

[7]王永宝,贾靖垚,张脩,等.加肋箱型长杆极限承载力实验研究[J].力学与实践,2021,43(5):722-7.

[8]徐正明,罗兆辉,高占远,等.结构设计竞赛竹材的轴心抗压性能研究[J].天津城建大学学报,2020,26(3):173-7.

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;*通信作者: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。