

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2017.05.026

欢迎按以下格式引用: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实验研究[J].高等建筑教育,2017,26(5):108-114.

# 大学生结构设计大赛材料力学性能 试验研究

常海林,张旭钦,钱格军,李海锋

(华侨大学 土木工程学院,福建 厦门 361021)

**摘要:**为研究大学生结构大赛采用的白卡纸、竹皮、桐木的力学性能,应用 LDS-5 电子拉力试验机对 222 个试件进行轴向拉伸试验,探讨白卡纸、竹皮、桐木 3 种材料在不同厚度、宽度、长度条件下的受力性能。研究表明,对于竹皮、桐木、白卡纸 3 种材料,试件均会发生正截面断裂,少量竹皮、桐木试件发生斜截面断裂。在对试件进行加载过程中,由于施加的拉力存在偏心,削弱了试件的极限承载能力。对于白卡纸试件,长度改变对试件极限承载力无明显影响。竹皮材料随着厚度的增加,极限承载力呈非线性增长。综合强度和结构重量等因素,厚度为 0.35 mm 的竹皮材料最为适合制作拉索构件。最后获得不同材料的弹性模量、极限抗拉强度,并得到受拉构件极限承载能力  $P_u$  与构件宽度  $D$  的关系拟合公式,为学生进行结构设计提供较为科学的设计依据,为结构仿真分析提供较为精确的材料性能数据。

**关键词:**材料抗拉性能;大学生结构设计竞赛;弹性模量

**中图分类号:**G642.423

**文献标志码:**A

**文章编号:**1005-2909(2017)05-0108-07

全国大学生结构设计竞赛由国家教育部、住房和城乡建设部、中国土木工程学会主办,部分高校承办,是培养大学生创新意识、合作精神和工程实践能力的学科性竞赛<sup>[1-3]</sup>。作为大学生的科技活动赛事之一,可以提高学生的工程实践能力和创新能力。结构设计大赛的命题一般要求学生用桐木、竹皮、白卡纸等指定材料进行模型设计及制作,并运用力学知识对结构优化设计。最后通过承载能力试验,以荷重比为主要决胜因素,再综合考虑其他各项因素评出获奖等级<sup>[4-6]</sup>。

受拉构件在高校结构设计大赛结构模型中的作用十分重要。竞赛采用结构形式通常包括高层建筑模型、简支桥梁模型、拱桥模型、斜拉桥模型、悬索桥模型、张弦梁结构大跨屋架模型、塔架结构等<sup>[1]</sup>。由于受拉结构具有质量轻、受力简单的特点,在各类型结构模型中被广泛采用,其作用主要体现在:(1)高层建筑模型中水平抗剪构件,类比于建筑结构柱间斜向支承;(2)房屋建筑模型中承担竖向均布荷载构件,类比于房屋结构中的楼板,竞赛模型通常考虑楼板薄膜

收稿日期:2017-01-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51408240);泉州市科技计划项目(2015Z142)

作者简介:常海林(1994-),男,华侨大学土木工程学院本科生,(E-mail) hailin\_chang@163.com;(通讯作者)李海锋(1983-),男,华侨大学土木工程学院副教授,主要从事钢结构稳定及抗震理论研究,(E-mail) lihail\_feng@126.com。

效应;(3)拱桥模型中抵抗水平推力构件;(4)在斜拉桥模型中作为主要受拉构件;(5)在悬索桥模型中可作为主缆或吊杆等构件;(6)在张弦梁结构中作为张拉构件;(7)在塔架结构中作为拉锚构件,类比于实际塔架结构中的风缆等。

大学生结构设计竞赛结构制作过程中,对各种结构构件的使用缺乏理论依据,构件尺寸只能通过大量的模型制作及加载试验进行不确定选择,造成大量人力物力的浪费,同时,不能通过结构计算得出整体结构的承载能力极限值。为解决以上问题,针对各类结构形式中的受拉构件,制做了222个试件,研究竹皮、桐木、白卡纸3种材料在不同厚度、宽度、长度条件下的力学性能,并得到受拉构件极限承载能力 $P_u$ 与构件宽度 $D$ 的关系拟合公式,为学生进行结构设计提供较为科学的设计依据,为结构仿真分

析提供较为精确的材料性能数据<sup>[5]</sup>。

## 一、试验概况

### (一)试件设计和试件参数

共计222个拉索试件,分为78组,考虑竹皮、桐木材料的不均匀性,每组3个相同试件,白卡纸材质较为均匀,每组2个相同试件,主要参数为拉索宽度、长度和厚度,见表1。表中试件编号分别表示不同材料、试件宽度 $D$ 、试件长度 $L$ 、试件厚度 $t$ 。例如,ZP3102,ZP表示采用竹皮制作,3表示宽度 $D$ 为3 mm,1表示长度 $L$ 为100 mm,02表示厚度 $t$ 为0.2 mm;TM321,TM表示采用桐木制作,3表示宽度 $D$ 为3 mm,2表示长度 $L$ 为200 mm,1表示厚度 $t$ 为1 mm。白卡纸只有一种厚度尺寸,故厚度不进行表示。例如,BKZ51表示采用白卡纸制作,宽度 $D$ 为5 mm,长度 $L$ 为100 mm。

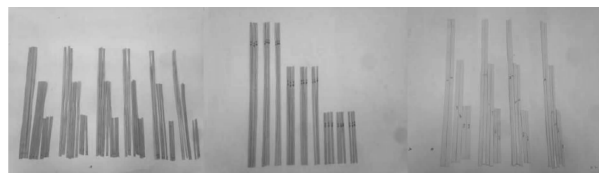
表1 试件参数

试件 编号	$D$ /mm	$L$ /mm	$t$ /mm	试件 编号	$D$ /mm	$L$ /mm	$t$ /mm	试件 编号	$D$ /mm	$L$ /mm	$t$ /mm
ZP3102	3	100	0.2	ZP42035	4	200	0.35	ZP5305	5	300	0.5
ZP4102	4	100	0.2	ZP52035	5	200	0.35	ZP6305	6	300	0.5
ZP5102	5	100	0.2	ZP62035	6	200	0.35	ZP7305	7	300	0.5
ZP6102	6	100	0.2	ZP72035	7	200	0.35	ZP8305	8	300	0.5
ZP7102	7	100	0.2	ZP82035	8	200	0.35	TM311	3	100	1
ZP8102	8	100	0.2	ZP33035	3	300	0.35	TM411	4	100	1
ZP3202	3	200	0.2	ZP43035	4	300	0.35	TM511	5	100	1
ZP4202	4	200	0.2	ZP53035	5	300	0.35	TM321	3	200	1
ZP5202	5	200	0.2	ZP63035	6	300	0.35	TM421	4	200	1
ZP6202	6	200	0.2	ZP73035	7	300	0.35	TM521	5	200	1
ZP7202	7	200	0.2	ZP83035	8	300	0.35	TM331	3	300	1
ZP8202	8	200	0.2	ZP3105	3	100	0.5	TM431	4	300	1
ZP3302	3	300	0.2	ZP4105	4	100	0.5	TM531	5	300	1
ZP4302	4	300	0.2	ZP5105	5	100	0.5	BKZ51	5	100	0.3
ZP5302	5	300	0.2	ZP6105	6	100	0.5	BKZ61	6	100	0.3
ZP6302	6	300	0.2	ZP7105	7	100	0.5	BKZ71	7	100	0.3
ZP7302	7	300	0.2	ZP8105	8	100	0.5	BKZ81	8	100	0.3
ZP8302	8	300	0.2	ZP3205	3	200	0.5	BKZ52	5	200	0.3
ZP31035	3	100	0.35	ZP4205	4	200	0.5	BKZ62	6	200	0.3
ZP41035	4	100	0.35	ZP5205	5	200	0.5	BKZ72	7	200	0.3
ZP51035	5	100	0.35	ZP6205	6	200	0.5	BKZ82	8	200	0.3
ZP61035	6	100	0.35	ZP7205	7	200	0.5	BKZ53	5	300	0.3
ZP71035	7	100	0.35	ZP8205	8	200	0.5	BKZ63	6	300	0.3
ZP81035	8	100	0.35	ZP3305	3	300	0.5	BKZ73	7	300	0.3
ZP32035	3	200	0.35	ZP4305	4	300	0.5	BKZ83	8	300	0.3

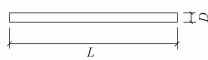
注: $D$ 为试件宽度, $L$ 为试件长度, $t$ 为试件厚度;白卡纸、桐木只有一种厚度尺寸,不作为控制因素。

## (二) 材料特性和试件制作

试验采用材料购于材料厂商的同一批竹皮、桐木及白卡纸。拉索作为结构中非常重要的构件,试件材质需要得到保证,竹皮材料作为多层复合材料,不均匀性较为严重,试件制作时尽量挑选材质较均匀,竹节相对少的竹皮。桐木材料较厚,试件制作时采用玻璃刀切割,竹皮和白卡纸材料较薄,可采用剪刀裁剪。3种材料均沿纹路切割或裁剪,试件构造及实物如图1所示。



(a) 试件实物



(b) 试件构造

图1 试件示意

## (三) 试验装置和加载制度

试验装置采用济南方圆试验仪器有限公司型号为LDS-5电子拉力试验机,最大试验力为5 kN,试验最小分辨率为0.1 N,拉伸试验行程1 000 mm位移,分辨率0.01 mm。本试验以每分钟10 mm的速度进行位移加载,试验机自行采集荷载峰值和位移值,并绘制荷载-位移曲线<sup>[7]</sup>。当出现试件破坏或试件断裂的情况,试验终止<sup>[8-9]</sup>。

## 二、试验结果与分析

### (一) 试件破坏形态

试验结果显示,试件的破坏形态主要有以下2种,如图2所示。

#### 1. 正截面断裂(ZD)

如图2(a)、(b)所示,试件破坏前无明显现象,达到极限荷载时,随着一声闷响,试件会沿着薄弱处或节点处断裂<sup>[10-12]</sup>。白卡纸断裂形态均为正向断裂,且断裂界面十分平齐,竹皮和桐木断裂截面呈锯齿形,并且竹皮更为明显。222个试件中共有198个试件发生正截面断裂。

#### 2. 斜截面断裂(XD)

如图2(c)、(d)所示,加载至极限荷载时,试件突然发生声响并断裂,表现材料脆性特征,断裂截面呈斜向,并伴有锯齿形<sup>[13]</sup>。222个试件中共有24个试件发生斜截面断裂,其中20个为竹皮试件,4个为桐木试件,白卡纸试件全部呈正截面断裂形态。

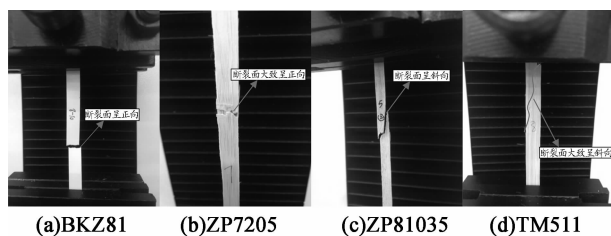


图2 试件破坏形态

## (二) 极限荷载的试验结果与分析

### 1. 极限承载力与试件宽度的关系

图3为3种厚度的竹皮材料极限拉力同试件宽度关系曲线,从中可以看出,在长度、厚度相同条件下,竹皮试件的极限承载力随宽度的增加而增大,呈线性相关。0.35 mm厚度试件增长趋势较稳定,承载力具有较强的上升空间,而0.2 mm和0.5 mm厚度试件宽度增加到5 mm以上之后,增长趋势明显放缓,承载力上升空间不佳。研究表明,厚度为0.35 mm竹皮材料的节点缺陷相对较少,而0.5 mm竹皮材料因为材料节点缺陷相对较多,致使宽度增加到一定值,承载能力达到极限状态。综合强度和结构重量等因素,厚度为0.35 mm的材料最为适合制作拉索构件<sup>[14]</sup>。

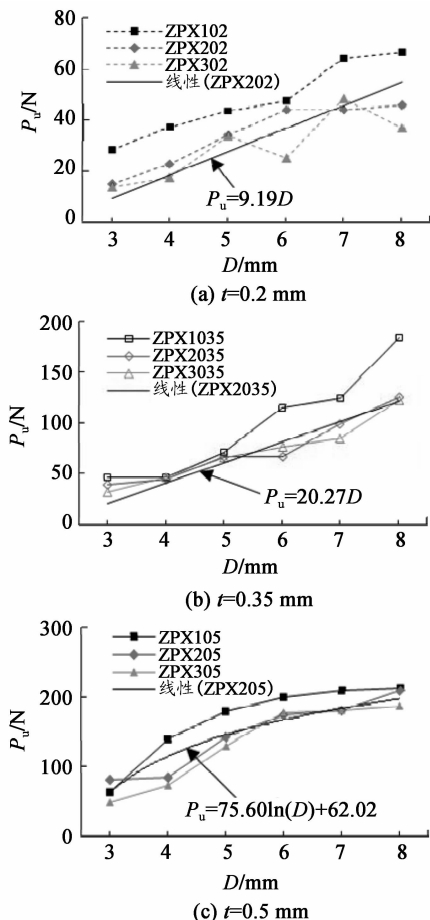


图3 竹皮材料极限荷载同试件宽度关系曲线

表2 极限承载能力  $P_u$  (N)  
与宽度  $D$  (mm) 的关系拟合公式

材料	公式
0.2 mm 厚竹皮	$P_u = 9.19D$
0.35 mm 厚竹皮	$P_u = 20.27D$
0.5 mm 厚竹皮	$P_u = 75.60\ln(D) + 62.02$
1 mm 厚桐木	$P_u = 27.87 D - 34.38$
白卡纸	$P_u = 5.68 D$

注:公式是针对长度为20 cm 试件极限承载能力的拟合,其他长度构件可根据此公式折减。

图4为桐木材料极限拉力同试件宽度关系曲线,从图4可以得出,由于桐木材料相对于竹皮具有较好的均匀性,随着试件宽度的增加,极限荷载相应增加,大致呈线性相关。

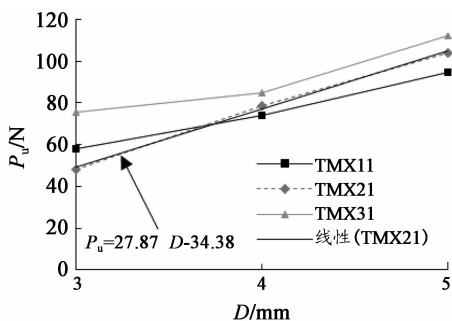


图4 桐木材料极限荷载同试件宽度关系曲线

图5为白卡纸材料极限拉力同试件宽度关系曲线,从图5可以看出,对于白卡纸试件,随着试件宽度的增加,极限抗拉承载力线性增长。

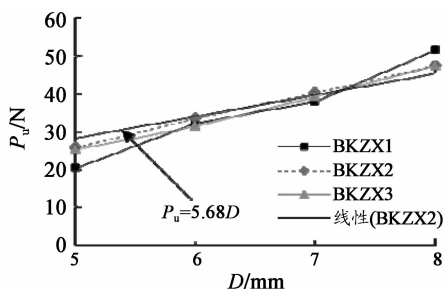
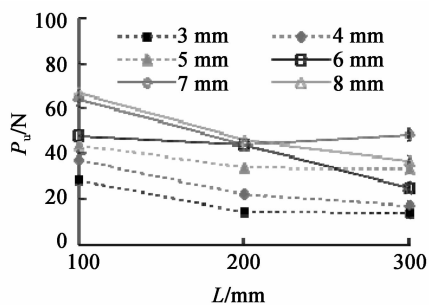


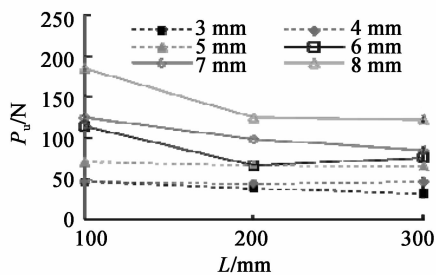
图5 白卡纸材料极限荷载同试件宽度关系曲线

## 2. 极限承载力与试件长度的关系

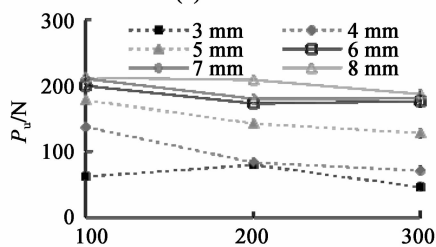
从图6可以看出,竹皮材料在厚度和宽度相同的条件下,试件长度越长,极限荷载值越小。研究表明,每片桐木材料都有清晰可见的节点,随着试件长度的增加,材料的面积随之增加,材料节点缺陷出现的概率同时增加,因此,当试件长度越长时,极限荷载值越小。



(a)  $t=0.2$  mm



(b)  $t=0.35$  mm



(c)  $t=0.5$  mm

图6 竹皮材料试件长度与极限承载力的关系曲线

从图7可以看出,桐木材料随着试件长度的增加,极限荷载略有增长,完全不同于竹皮材料。研究表明,在试件进行加载过程中,施加的拉力存在偏心,偏心矩的存在削弱了试件的承载能力,同时,实测桐木材料的弹性模量相对较大,导致拉力偏心对桐木材料极限承载能力的影响更明显。研究表明,试件长度越短偏心矩对极限承载力的影响越明显,试件加长,会减弱偏心矩对极限荷载力的影响。建议在结构设计中,加强对拉索构件偏心问题的注意。由图8可知,白卡纸材料试件长度改变时,极限荷载值几乎不变,说明白卡纸材料的长度对其试件极限承载力无明显影响。

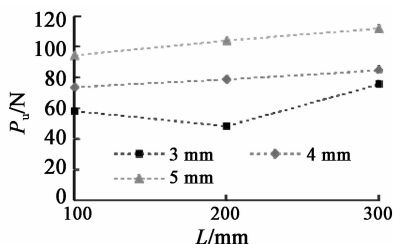


图7 桐木材料试件长度与极限承载力的关系曲线

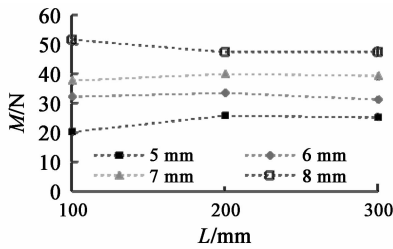
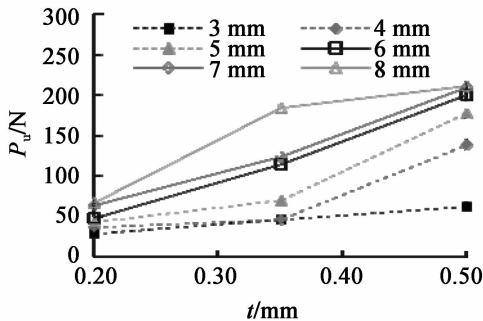


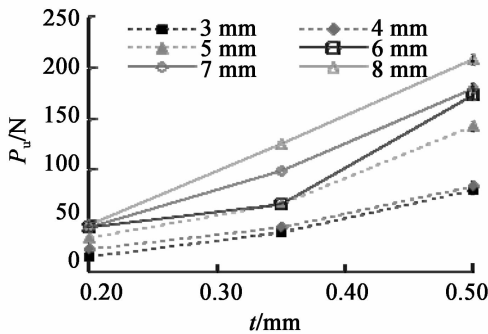
图8 白卡纸材料试件长度与极限承载力的关系曲线

3. 竹皮材料厚度与极限承载力的关系

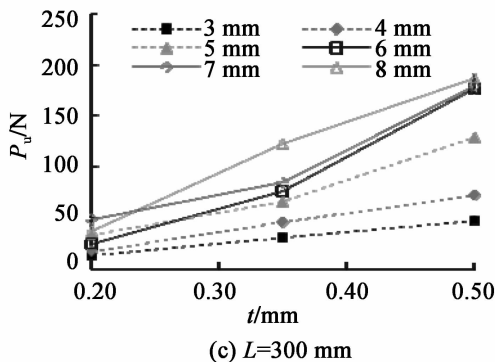
从图9可以看出竹皮试件在长度、宽度相同条件下,极限承载力随着厚度增加而增大,同时,其增长的幅度呈上升趋势。



(a)  $L=100\text{ mm}$



(b)  $L=200\text{ mm}$



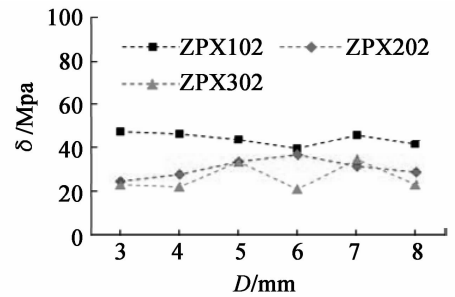
(c)  $L=300\text{ mm}$

图9 竹皮材料试件厚度与极限承载力的关系曲线

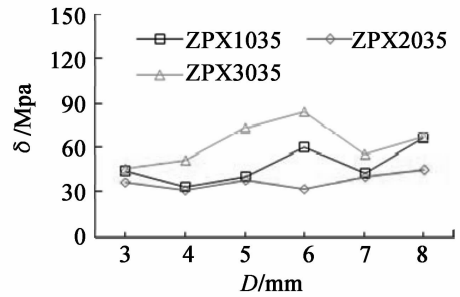
(三) 极限应力的试验结果与分析

从图10可以看出,厚度为0.2 mm和0.35 mm的竹皮材料的极限应力大致相同,实测极限应力数据点大致在20~50 Mpa之间,而厚度为0.5 mm的竹皮材料,实测极限应力数据点大致在50~70 Mpa

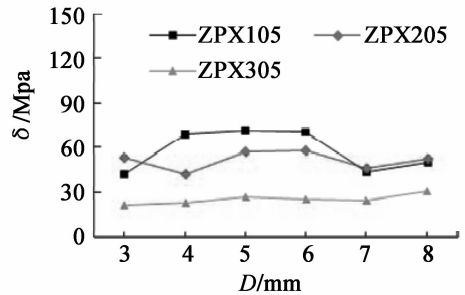
之间。研究还表明,宽度、长度的改变,对竹皮材料的极限应力影响不明显。



(a)  $t=0.2\text{ mm}$



(b)  $t=0.35\text{ mm}$



(c)  $t=0.5\text{ mm}$

图10 3种厚度竹皮材料极限应力同试件宽度关系曲线

从图11可以看出,对于桐木材料,实测极限应力数据点大致在20 Mpa左右,试件长度增大时,极限应力略微增大,与前面对桐木材料极限荷载分析的结论相符。同时,宽度的改变对桐木材料的极限应力无明显影响。

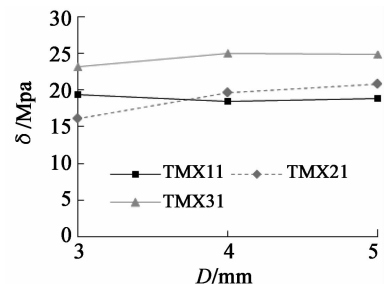


图11 桐木材料极限应力同试件宽度关系曲线

从图12可以看出,对于白卡纸材料,实测极限应力数据点大致在17 Mpa左右,同时试件宽度增加时,极限应力略微呈上升趋势。

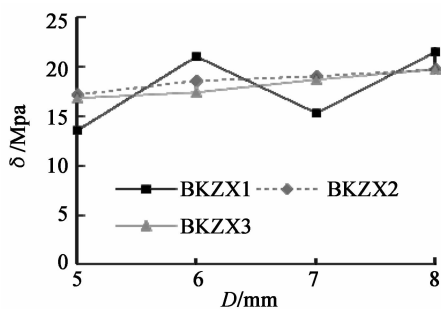


图 12 白卡纸材料极限应力同试件宽度关系曲线

(四)材料弹性模量试验结果与分析

图 13 为实测竹皮材料弹性模量数据曲线,从图 13 和表 3 可以看出,实测竹皮材料的弹性模量数据点大致在 3 000 ~ 6 000 Mpa 之间。从曲线形态上可以看出,试件宽度、长度、厚度对弹性模量均无影响。图中 ZPX3035 试件的弹性模量较大,因为在进行材料选取时,制作该类试件的部分材料加工质量较好。研究表明,影响竹皮材料弹性模量的主要因素是多层材料复合加工时的粘贴强度。

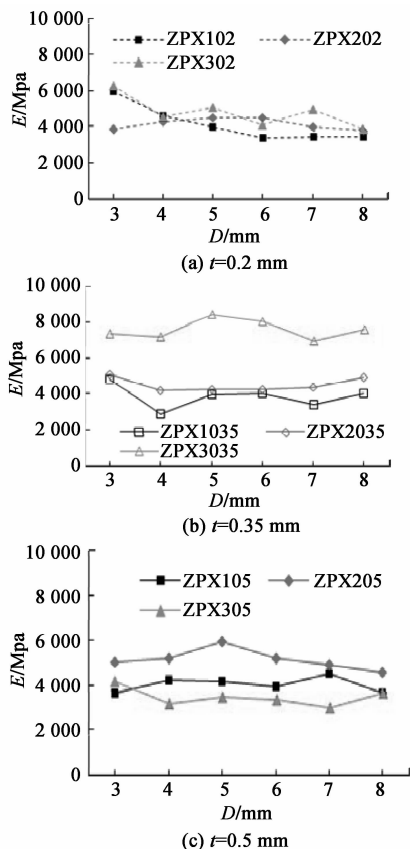


图 13 3 种厚度竹皮材料弹性模量同试件宽度关系曲线

从图 14 可以看出,实测桐木材料的弹性模量数据点大致在 2 500 ~ 4 000 Mpa 之间,试件宽度、长度、厚度对弹性模量无明显影响。

从图 15 可以看出,实测白卡纸材料的弹性模量

数据点大致在 400 ~ 600 Mpa 之间,并且试件宽度、长度、厚度对弹性模量无影响。

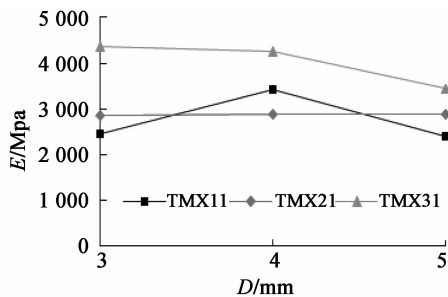


图 14 桐木材料弹性模量同试件宽度关系曲线

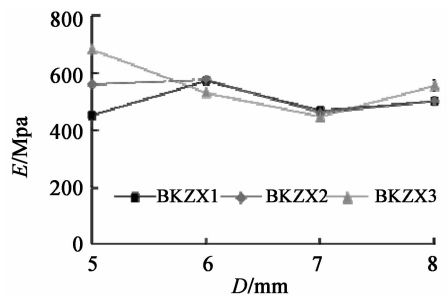


图 15 白卡纸材料弹性模量同试件宽度关系曲线

表 3 材料极限应力和弹性模量平均值

材料	$f_u$ /MPa	$E$ /Mpa
0.2 mm 竹皮	47.50	4 300
0.35 mm 竹皮	44.13	5 300
0.5 mm 竹皮	42.20	4 200
桐木	14.70	2 800
白卡纸	13.53	530

三、结语

文章应用 LDS - 5 电子拉力试验机对 222 个试件进行了轴向拉伸试验。研究了试件宽度、厚度与长度对受力性能的影响,得到以下主要结论:

(1) 得到受拉构件极限承载能力  $P_u$  与构件宽度  $D$  的关系拟合公式。

(2) 所有试件的破坏形式可分为两类,正截面断裂和斜截面断裂,3 种试件均会发生正截面断裂,其中,少量竹皮、桐木试件发生斜截面断裂。

(3) 对于 3 种材料,在厚度和宽度相同的条件下,由于长度增加,材料节点缺陷出现的概率越大,极限荷载值越小,且竹皮材料此特征明显。

(4) 竹皮材料随着厚度的增加,增长幅度呈上升趋势,厚度为 0.2 mm 的试件增长趋势呈线性,且增长幅度不明显,其中 0.35 mm 增长趋势大致呈线性,增长幅度较稳定,0.5 mm 厚度试件宽度增加到 5 mm 以上之后,由于材料节点缺陷对极限承载力的影响,增长趋势呈非线性,增长幅度明显放缓。

(5) 偏心矩会削弱试件的承载能力, 试件长度越小, 偏心矩对极限承载力的影响越明显, 试件加长, 会减弱偏心矩对极限荷载力的影响, 建议在结构设计中, 加强对拉索构件偏心问题的注意。

(6) 对于白卡纸试件, 随着试件宽度的增加, 极限抗拉承载力线性增长, 并且长度对试件极限承载力无明显影响。

(7) 综合强度和结构重量等因素进行分析, 厚度为 0.35 mm 的竹皮材料最为适合制作拉索构件。

#### 参考文献:

- [1] 陈庆军, 罗嘉濠, 陈思煌, 等. 国内外大学生结构设计竞赛总结及研究[J]. 东南大学学报: 哲学社会科学版, 2012(5): 173-177.
- [2] 陈庆军, 季静, 王晓旋, 等. 土木工程专业创新模型试验课程教学探索[J]. 力学与实践, 2016, 38(3): 328-330.
- [3] 程涛. 结构模型设计竞赛与土木工程专业教学改革[J]. 力学与实践, 2010, 32(6): 91-94.
- [4] 刘承斌, 王步宇, 孙凤钢, 等. 结构设计大赛材料性能试验[J]. 实验室研究与探索, 2007, 26(10): 178-179.
- [5] 张炎圣, 陆新征. 大学生结构设计大赛中的计算机仿真分析[J]. 力学与实践, 2009, 31(4): 110-112.
- [6] 郭金龙, 陈庆军, 郑锦洪, 等. 竹质框架模型受侧向冲击测试及分析[J]. 力学与实践, 2014, 36(1): 69-75.
- [7] 宋或. 建筑结构试验与检测[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [8] 王海鹏, 陈新文, 李晓骏, 等. 玻璃纤维复合材料不同温度条件拉伸强度统计分布[J]. 材料工程, 2008(7): 76-78.
- [9] 叶勇, 郭子雄, 崔俊, 等. HRB500 钢筋搭接焊接头抗拉性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39(2): 31-35.
- [10] 张磊. Q235 钢拉伸性能的有限元仿真与试验[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [11] 谢超. 非均质材料断裂位错机理多尺度研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2011.
- [12] 李智慧, 师俊平, 汤安民. 金属材料脆性断裂机理的实验研究[J]. 应用力学学报, 2012, 29(1): 50-54.
- [13] 洪礼卫. 几种金属材料破坏机理与断裂形式的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- [14] 周克民. 结构的优化设计分析(大学生结构设计竞赛评述)[J]. 福建建筑, 2006(4): 28-30.

## Experimental study on mechanical properties of materials for structure design contest for college students

CHANG Hailin, ZHANG Xuqin, QIAN Gejun, LI Haifeng

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, P. R. China)

**Abstract:** In order to study the mechanical properties of white cardboard, bamboo skin and paulownia used by structure design contest for college students, the LDS-5 electronic tensile testing machine was used to carry out the axial tension test on 222 specimens, to investigate the stress performance of white cardboard, bamboo skin and paulownia in the condition of different thickness, width and length. The results showed that the breakage of all specimens of the three materials occurred at the normal section, and the breakage of a few specimens of the bamboo skin and paulownia occurred at the oblique section. In the course of the specimens' loading, because the tension was exerted eccentrically, the ultimate bearing capacity of specimens was weakened. White cardboard specimens' length change had no significant effect on ultimate bearing capacity of the specimens. Bamboo skin materials' ultimate strength showed a nonlinear growth with thickness increases. Considering the strength, structural weight and other factors, the 0.35 mm-thickness bamboo skin materials were most suitable for the production of cable structures. Elastic modulus and ultimate tensile strength of different materials, as well as the fitting formula of relationship between ultimate bearing capacity of tension member ( $P_u$ ) and widget width ( $D$ ) were obtained, to provide a more scientific design basis for students' structure design and to provide a more accurate performance data for structure simulation analysis.

**Keywords:** tensile properties of materials; structure design contest for college students; elastic modulus

(编辑 周沫)