

祝明桥,张紫薇,王华,等. 竹材力学性能及混凝土环境中影响[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(3):50-56. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.03.008

Zhu M Q, Zhang Z W, Wang H, et al. Study on Mechanical Properties of Bamboo and Environmental Effects in Concrete [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 35(3):50-56. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.03.008

# 竹材力学性能及混凝土环境中影响

祝明桥\*, 张紫薇, 王华, 龙勇

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**为研究自然风干下的竹材含水率对材料力学性能的影响,对相同产地的楠竹进行了材料试验.试验设计变量:竹材自然风干时长和浇筑在竹芯-混凝土板中竹材有、无防水处理.研究表明:竹材的含水率对该材料抗拉强度影响显著,其中试验竹材的含水率为11.5%时材料性能最优;混凝土环境中的竹材受环境腐蚀严重,其中无防水处理竹材的强度和延性显著降低,材料呈脆性破坏;通过试验总结出了竹材拉伸应力-应变本构关系,同时提出了该竹材抗拉强度设计值取60 MPa为最佳,该研究为竹材在混凝土结构中应用,提供了理论依据.

**关键词:**竹材;含水率;抗拉强度;本构关系;环境影响

**中图分类号:**TU531.1      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2020)03-0050-07

## Study on Mechanical Properties of Bamboo and Environmental Effects in Concrete

Zhu Mingqiao, Zhang Ziwei, Wang Hua, Long Yong

(College of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to study the influence of the moisture content of the bamboo material under natural air drying on the mechanical properties of the material, a material test was carried out on the bamboo of the same origin. The test design variables were: the natural air-drying time of the bamboo material and whether the bamboo material was poured into the bamboo core bamboo concrete slab with or without waterproof treatment. The research structure shows that: the moisture content of bamboo has a significant effect on the tensile strength of the material, and the material performance is optimal when the moisture content of the tested bamboo is 11.5%; the bamboo in the concrete environment is severely corroded by the environment, and the strength and The ductility is significantly reduced, and the material exhibits brittle failure; the tensile stress-strain constitutive relationship of bamboo is summarized through experiments, and it is proposed that the design value of the tensile strength of the bamboo is 60 MPa as the best. This study provides a theoretical basis for the application of bamboo in concrete structures.

**Keywords:** bamboo; water content; tensile strength; constitutive relations; environmental effects

随着现在建筑行业的不断发展和人们对人居环境观念的改变,以节能减排、低碳环保及绿色可持续的

收稿日期:2018-05-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578236)

\*通信作者, E-mail: 1531290279@qq.com

理念逐渐融入现代建筑行业.现代建筑中,主要建筑材料为钢材、水泥、砖等,这些传统建筑材料能耗高、污染高,对环境产生严重影响,不符合绿色发展的理念.因此,寻找一些绿色生态的新型建筑材料来代替传统材料,是建筑绿色化的一种重要途径之一.我国从古代开始就有用竹材做建筑材料,并且竹类资源丰富、竹林面积大、蓄积量及产量最高,被称为“世界竹业大国”<sup>[1-2]</sup>.竹材作为一种天然的、丰富的可再生资源,具有以下优点:

1) 来源广泛,成材周期短<sup>[3-4]</sup>,成本低;

2) 加工性能好,相比混凝土、木材、钢材等其他材料,加工过程中耗能较低<sup>[4-5]</sup>;

3) 物理力学性能良好,抗拉强度较高,韧性好;

4) 材料生长及应用过程绿色环保,其生长过程中能改善自然和人居环境,作为一种有机材料其废弃后可以自然降解<sup>[6]</sup>.因此,在建筑结构中,用竹材替代混凝土结构中的部分钢筋,使其作为混凝土的结构增强材料<sup>[7-9]</sup>,从而能降低传统结构材料对环境造成的污染,实现建筑结构的可持续发展.

目前,国内外在竹芯-混凝土组合结构的研究成果中,已有部分研究者将竹材应用在混凝土梁、板等结构中,其研究结果表明了竹材替代钢筋的可行性<sup>[10-14]</sup>.在竹芯-混凝土界面连接的研究中,研究者提出了,采用竹材与混凝土组合结构浇筑工程中,竹材因为吸水而膨胀,导致竹筋与混凝土黏结界面分离而脱离<sup>[15]</sup>;同时研究者指出竹筋混凝土组合结构的强度和耐久性均较差<sup>[16]</sup>;研究者对竹筋混凝土结构中,拆除竹筋构件进行研究发现:结构中部分材料受力性能良好,未出现腐烂等现象,但所获得材料的整体承载能力普遍呈下降趋势<sup>[17]</sup>.虽然关于该组合结构的研究较多,但对竹材作为钢筋材料在混凝土中含水率对其耐久性的研究较少,同时关于混凝土环境因素对竹材力学性能的影响仍需进一步研究,以便于推广竹筋混凝土的应用.

为研究竹材力学性能及其在混凝土环境中的影响,本文对相同产地,但在不同环境处理下的竹材进行力学性能试验,试验包括:自然风干状态下及处于混凝土单向板环境中的竹材.本文对试验结果进行对比分析,研究竹材含水率及混凝土环境对竹材力学性能的影响,为该材料的应用及推广提供理论指导.

## 1 试件设计及试验方法

试验材料选自生长在湘潭地区的楠竹,并根据相关规范<sup>[18-19]</sup>对相同取材时间和地点下的竹材进行处理,其设计变量:竹材在不同时长下的自然风干程度,已浇筑1 a的竹芯混凝土板中有、无防水处理的竹材.

试验共设计5组变量,每组变量的竹片按规范截取无节和有节竹材试件,共10组参考变量,每组变量取12片试件,并进行编号.分别测试每组试件顺纹理方向拉伸的应力-应变曲线,并通过数据分析获得材料的弹性模量,同时对拉伸完成后的试件进行含水率测定.

### 1.1 试件制作

试验根据竹材物理力学性能试验方法制作试样<sup>[18]</sup>,试样的设计形状和尺寸如图1所示(单位:mm).试样制作中,所选制作试件均为楠竹中未受损伤或存在初始缺陷的部位.为避免在拉伸试验中端部被夹具夹坏,试样端部端面保持平整.

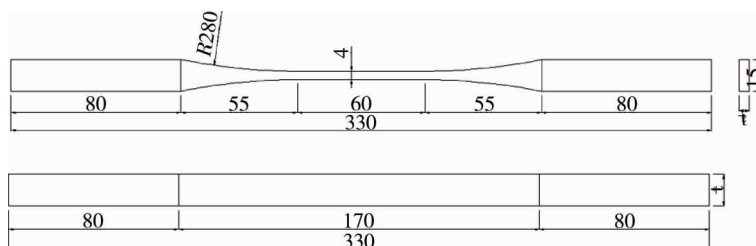


图1 顺纹抗拉强度试样尺寸(单位:mm)

### 1.2 仪器设备

本试验在湖南科技大学土木工程学院完成,试验采用MTS机对竹片进行顺纹抗拉强度及弹性模量测试,其可以直接输出试验试件的荷载-变形曲线以供试验的计算分析.试验中根据筋材试验测试方式和

MTS 试验机操作手册,将试件合理的安装在试验机上.试验加载过程中,控制拉力的加载速度为每分钟 200 N/mm<sup>2</sup>,直到试件完全破坏停止加载.

### 1.3 测量内容

试验中,主要对试件受拉时的荷载-位移曲线、材料的应力和应变进行测量.根据测得的数据分析出每个试件的极限荷载和破坏形态,并根据试验试件的尺寸计算出该材料的抗拉强度与弹性模量,其具体内容:

1) 初始值测量:用游标卡尺测量试件在有效部位端部及中间部位的横截面尺寸,测量精确为 0.1 mm,并将量测截面的平均值作为计算矩形截面的横截计算值,计算出矩形截面面积.

2) 荷载:通过试验机的荷载输出数据,获得顺纹抗拉强度试样的最终破坏荷载  $P_{\max}$  和试件未出现紧缩变形前材料处于弹性变形阶段的峰值荷载  $P$ ,精确至 10 N.

3) 变形:通过试验机的输出数据,获取试样弹性变形阶段的荷载和变形的终点值,及试件破坏时的荷载和变形值,精确至 0.001 mm.

### 1.4 数据处理

试件的抗拉强度算术平均值按式(1)计算.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}. \quad (1)$$

式中: $\bar{x}$  为算术平均值; $x_i$  为各试件的试验结果; $n$  为试件的数量.

试件抗拉强度值的标准差由式(2)计算出:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}. \quad (2)$$

式中: $n$  为试件数量; $S$  为标准差.

$$v = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\%. \quad (3)$$

式中: $v$  为变异系数,%.

### 1.5 含水率测定

在试件破坏后,从试验机中取出试件,并清除附在试件表面的碎片和杂物.对清理好的试件,采用烘干法进行含水率测定.其主要内容:

1) 测定试样的初始质量,精确至 0.001 g.

2) 将试样放入烘箱后,将烘箱温度保持为  $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,烘 8 h 后取出其试样进行首次承重测量,测量完成后再次放入烘箱中,首次称重测量后,每间隔 2 h 对前次的试件再次进行称重测量,当前后 2 次质量差小于 0.002 g 时认为试样已烘干.

3) 将烘干后的竹材从烘箱中取出,放于干燥的环境中直到试样冷却至室温,并再次对试件进行称量测量,计算中以该测量值为试件的全干质量.

4) 含水率按式(4)计算,精确至 0.1.

$$w = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\%. \quad (4)$$

式中: $w$  为含水率,%; $m_1$  为试样的初始质量,g; $m_0$  为试样的全干质量,g.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 混凝土环境中的主要影响因素-含水率

对各竹材的抗拉强度及含水率试验数据进行整理记录,见表 1.

表 1 竹材顺纹抗拉强度及含水率

试件环境	含水率/%	试件类型	平均值/MPa	标准差 S	变异系数 $\nu$ /%	$f_t$ /MPa
第一批自然风干 1 个月	9.3	有节竹片	144.03	19.41	13.5	109.75
		无节竹片	148.61	25.05	16.9	
		平均值	146.32	—	—	
混凝土板	有防水处理	有节竹片	98.39	19.20	19.5	70.80
		无节竹片	114.04	19.02	16.7	
		平均值	106.21	—	—	
	无防水处理	有节竹片	77.01	14.30	18.6	53.04
		无节竹片	80.89	16.20	20.0	
		平均值	78.95	—	—	
—	—	—	—	—	—	61.92
第 1 批自然风干 1 年	9.1	有节竹片	140.40	20.90	14.9	104.45
		无节竹片	143.20	24.50	17.1	
		平均值	141.80	—	—	
第 2 批自然风干 1 个月	13.5	有节竹片	136.50	24.00	17.6	99.00
		无节竹片	139.60	23.40	16.7	
		平均值	138.05	—	—	

注:各表中 $f_t$ 是竹筋试验数据处理得到的有 95%保证率的抗拉强度标准值, $f_t = \bar{x} - 1.645S$ ,  $S$  为对应数量试件标准差

由表 1 数据进行对比分析,可得到:

- 1)不同批次的竹材在 1 个月自然风干条件下的试验对比可知:对于相同产地,不同选材时间的竹材的抗拉强度受材料含水率的影响较大,含水率越高,材料抗拉强度越低.
- 2)相同批次的竹材在不同自然风干时间下的试验对比可知:竹子在室内自然环境风干条件下多放置了 1 a 时间之后其含水率下降 0.2%,但材料的平均抗拉强度下降 3%.通过分析,竹材作为有机材料,其耐久性能较差,从而导致材料抗拉性能下降.
- 3)相同放置时长下,不同风干环境的竹材试验对比可知:竹芯-混凝土板中,竹材的含水率显著升高,其中有防水处理的竹材含水率略低于无防水处理的竹材;与自然风干竹芯材料相比,竹芯-混凝土板中竹芯的抗拉性能显著降低.
- 4)竹芯-混凝土板中有、无防水处理的竹材试验对比可知:虽然 2 种竹材含水率相差较小,但是无防水处理的竹材受拉性能仅为有防水处理的 70%左右,该现象表明组合材料中,防水处理能提高材料的耐久性能.

综上所述,含水率对竹材的力学性能影响较大,研究含水率与材料的抗拉强度之间的关系具有重要的工程意义<sup>[20]</sup>.同时,竹材的应用环境也是影响材料的力学性能的关键因素之一,其中未经防水处理的竹材在混凝土环境中其耐久性能将降低,从而导致其力学性能降低,因此在工程应用中要注意加强对竹材防水处理.

2.1.1 抗拉强度-含水率关系曲线

为探究竹材含水率对竹筋抗拉强度的关系,试验取 2 个不同批次的毛竹,分别相同风干环境下,对第一批自然风干 1 个月、1 a 及第二批自然风干 1 个月状态下的竹材进行直接拉伸试验,并在上述试验数据的基础上分析了竹材含水率与强度关系的曲线,如图 2 所示.

由图 2 可知,该产地竹材的含水率与材料抗拉强度

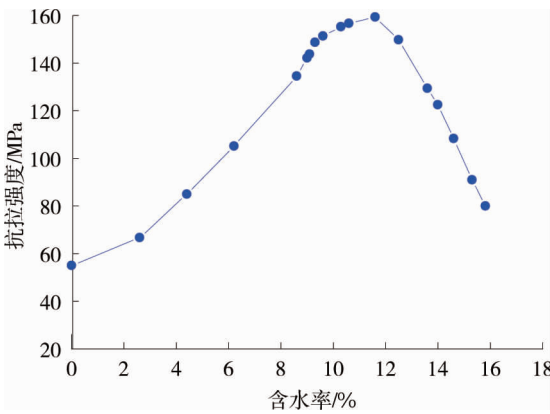


图 2 竹材抗拉强度-含水率关系曲线

呈凸函数变化关系,当竹材的含水率为12%时,其抗拉强度有极大值为160 MPa.由上述分析可知,含水率对材料的力学性能影响呈凸函数变化趋势,只有合理的选取含水率才能使材料的力学性能得到充分的发挥.

## 2.2 破坏曲线

相同放置时长下的竹材,在自然风干状态下及混凝土环境中的竹材的破坏形态如图3所示,其破坏曲线如图4所示,通过对试验现象及数据分析可得:

竹材作为一种天然复合材料其分别由竹黄和竹青组合,且竹青材料强度高于竹黄.由图4中3种竹材的应力-应变关系曲线可知,竹材从受力到破坏,主要分3个阶段变化.第1阶段:线弹性变形阶段,该阶段竹材中的2种材料共同承受拉力,应力和应变呈线性增长;第2阶段:非线性变化阶段,该阶段竹黄由内而外逐步退出工作,材料刚度明显降低,应力和应变呈二次曲线变化;第3阶段:破坏阶段,竹黄完全退出工作,竹青单独受力,材料变形增长较快,直至竹青逐步退出工作,该阶段应力和应变呈锯齿形变化,破坏时材料具有一定的延性.由3种试件的应力-应变曲线可知,无混凝土环境下的竹材受拉过程中无明显屈服点,同时最后阶段曲线斜率较小,该现象表明竹材中竹青的弹性模量最小.

无防水处理的竹芯-混凝土板竹芯试件呈脆性破坏,其余3种试件均呈延性破坏,竹层破坏顺序相同.

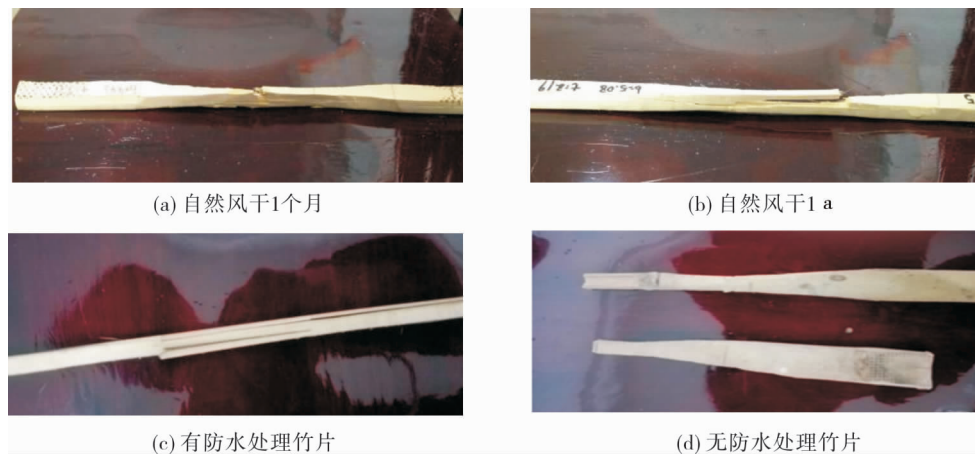


图3 竹片最终破坏形态

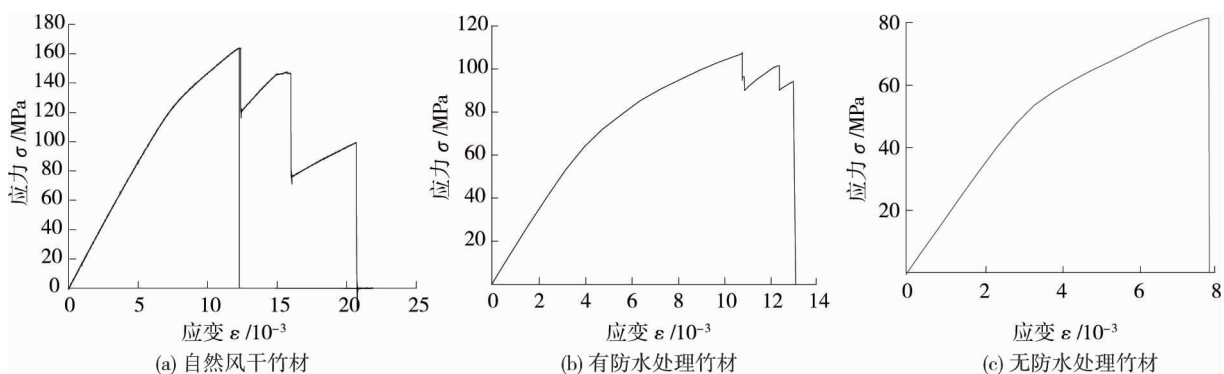


图4 试件顺纹抗拉试验破坏曲线

## 2.3 材料本构关系

对各组试验数据进行分析,获得各材料的应力-应变曲线,如图5所示.

由图5可知,3种竹材在线弹性阶段,其应力-应变曲线基本重合;在非线性变化阶段,与混凝土环境中的竹材相比,无混凝土环境下竹材的抗拉强度最高;在破坏阶段,无防水处理试件呈脆性破坏,而其他2类试件破坏过程类似,虽然试件破坏时,其峰值应力相差很大,但是其应变相近;当试件达到峰值应力以后,有防水处理试件的延性较差.综上所述,混凝土环境对竹材的力学性能影响显著,在使用中需对竹材进



行防水处理,以防止结构出现脆性破坏.

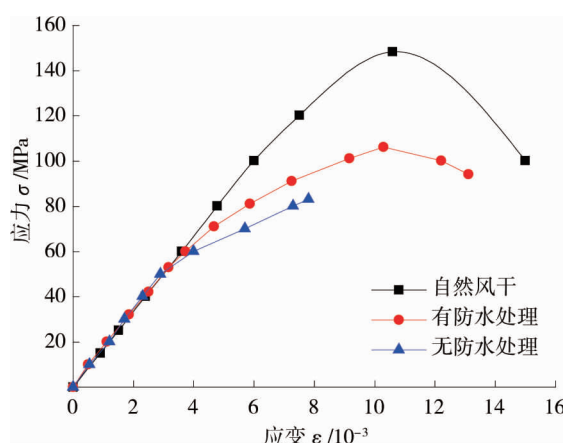


图5 竹片应力-应变曲线

## 2.4 设计取值

由竹材的应力-应变关系曲线可知,除无防水处理的竹芯-混凝土板中的竹芯试件外,其他试件在达到极限应力时的应变均为  $12\,000\,\mu\epsilon$ ,从而获得竹材达到破坏时的破坏应变标志为  $12\,000\,\mu\epsilon$ ,由线弹性阶段的应力-应变关系曲线的斜率可知竹材的平均弹性模量为  $1.592\times 10^4\text{ MPa}$ .

通过分析,竹材受拉过程中没有明显屈服阶段,但材料具有一定的延性,其破坏形态类似于无明显屈服点的钢筋.由上述试验可知竹材的应力-应变曲线与无明显屈服点的钢筋变化趋势相当,所以可以采用相同的计算方式来计算竹材抗拉屈服强度的标准值,从而为竹材的设计提供理论基础.在无明显屈服点的钢筋抗拉强度标准值计算中,规范中基于大量试验的基础上,将残余应变为0.2%的抗拉强度值定义为条件屈服点,其计算公式为

$$f_{0.2} = (0.8 \sim 0.9)f_t \quad (5)$$

式中: $f_t$  为抗拉强度标准值.

## 3 结论

1) 含水率是影响竹材抗拉强度的关键因素之一,且含水率与材料抗拉强度呈凸函数关系,其中试验中的竹材当含水率为12%时,材料力学性能最佳.在实际工程中,为使竹材的材料性能达到最佳,应尽量选用处于最佳含水率的竹材.

2) 与自然风干状态下的竹材相比,竹芯-混凝土板中,竹材的含水率呈不同程度的增加,且材料的力学性能下降较明显;经防水处理后的竹材力学性能及耐久性能优于无防水处理的竹料,所以在实际应用中竹材的防水处理必不可少.

3) 得到了竹材的拉伸状态下的应力-应变本构关系,竹材在破坏过程中呈现出分层破坏特征,其表现为首先是最竹黄破坏,最后是最外层竹青,且自然风干条件下的竹材最终呈延性破坏特征.

4) 由于竹材的应力-应变曲线关系与无明显屈服点钢筋类似,所以可以采用无屈服点钢筋的计算方法获取竹材屈服强度标准值.

## 参考文献:

- [1] 吴继林,郭起荣.中国竹类资源与分布[J].纺织科学研究,2017(3):76-78.
- [2] 李岚,朱霖,朱平.中国竹资源及竹产业发展现状分析[J].南方农业,2017,11(1):6-9.
- [3] 许昆,郝际平,赵曰亭,等.竹材在建筑结构中的应用发展与研究现状[J].竹子研究汇刊,2013,32(4):12-18.
- [4] Flander K D, Rovers R. One laminated bamboo-frame house per hectare per year [J].Construction and Building Materials,

- 2009, 23(1): 210-218.
- [5] 李旭. 楠竹力学性能实验研究与分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [6] van der Lugt P, van den Dobbelsteen A A J F, Janssen J J A. An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2006, 20(9): 648-656.
- [7] 周乾. 竹材混凝土空心板受力性能研究与分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [8] Li Y, Shen H, Shan W, et al. Flexural behavior of lightweight bamboo-steel composite [J]. *Thin-walled Structures*, 2012, 53(1): 83-90.
- [9] 邹立华, 钟坤禄, 谢吉鸿, 等. 改性竹筋混凝土受弯构件力学性能试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2015(10): 33-40.
- [10] 龙勇, 祝明桥, 谢子荣, 等. 竹芯竹筋混凝土板抗弯性能试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2015(s2): 41-45.
- [11] 谢威颂, 丁雄峰, 朱朝晖. 竹筋混凝土楼板的结构性能检验及评估[J]. *工程建设与设计*, 2010, (11): 39-42.
- [12] Terai M, Minami K. Fracture behavior and mechanical properties of bamboo reinforced concrete members [J]. *Procedia Engineering*, 2011(10): 2697-2972.
- [13] Zhu M Q, Long Y. Experimental study on bending bearing capacity of bamboo-reinforced concrete plate [C]// *Proceedings of the 2015 International Forum on Energy, Environment Science and Materials*, Shen Zheng, China, 2015: 526-531.
- [14] Schneider N, Pang W, Gu M. Application of bamboo for flexural and shear reinforcement in concrete beams [C]// *Structures Congress 2014*, American Society of Civil Engineers, Boston, Massachusetts, United States, 2014: 1025-1035.
- [15] Ghavami K. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27(6): 637-649.
- [16] 胡松林. 竹筋混凝土板的初步研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 1956, 10(1): 3-24.
- [17] Janssen J A. *Designing and building with bamboo* [R]. Beijing, China: INBAR, 2000.
- [18] 建设部建筑工程标准技术归口单位, 中国建筑科学研究院. 建筑用竹材物理力学性能试验方法: JG/T 199-2007 [S]. 2007.
- [19] 全国竹藤标准化技术委员会. 竹材物理力学性质试验方法: GB/T 15780-1995 [S]. 1996.
- [20] Xu Q, Harries K A, Li X, et al. Mechanical properties of structural bamboo following immersion in water [J]. *Engineering Structures*, 2014, 81: 230-239.