

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S1.008

竹芯竹筋混凝土板抗弯性能试验研究

龙 勇, 祝明桥, 谢子荣, 王 瑶

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘 要:随着全球资源日益紧缺,环境日益恶劣,人们对建筑材料、环境保护提出了更高的要求。而毛竹属于可再生资源、经济且环保,将毛竹代替钢筋运用于混凝土楼板,不仅减去了钢筋繁琐的加工工序,而且提高了板的空心率,从而达到减轻自重的目的。为研究竹芯竹筋混凝土板中的受力性能,对 3 块配筋率不同的竹筋板进行均布荷载下的抗弯试验性能及相关材料力学性能试验。通过试验现象及数据对比分析,可知:毛竹抗拉破坏无屈服点,属于脆性材料;板破坏时,其跨中挠度可以达到以上,延性很好;竹筋板受弯过程,呈两阶段特征,即开裂前弹性阶段和开裂后带裂 $l_0/25$ 缝工作直至破坏;并结合试验挠度、应变、裂缝、承载力计算结果,提出了竹芯竹筋混凝土板设计的相关构造措施及建议。

关键词:毛竹;竹筋;混凝土板;挠度

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)S1-0041-05

The flexural bearing capacity of reinforced concrete one-way slab bamboo bamboo core

Long Yong, Zhu Mingqiao, Zirong Xie

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

Abstract: As the global resources increasingly scarce, environment is becoming more and more bad, for building materials, environmental protection put forward higher request. And bamboo belongs to renewable resources, economy and environmental protection, apply bamboo instead of steel to concrete floor, not only reduced the steel complex processing working procedure, and increase the rate of the hollow plate, so as to achieve the purpose of reducing weight. For the study of bamboo sticks bamboo mechanical performance of reinforced concrete plate, the 3 piece of reinforcement ratio of different bamboo stiffened plate under uniformly distributed load bending test performance and related material mechanical performance test. Through the experimental phenomena and data contrast analysis, shows that bamboo tensile damage no yield point, belongs to brittle materials; Plate damage, its midspan deflection can reach above, good ductility; Bamboo reinforcement plate bending process, a two stage characteristics, namely the elastic stage before cracking and crack fracture work until after failure; Combined with test deflection, strain, crack, bearing capacity calculation, proposes the bamboo sticks bamboo reinforcement construction measures and Suggestions about the design of concrete slab.

Key words: bamboo; bamboo sticks bamboo reinforcement; one-way slab; the deflection

收稿日期:2015-11-10

基金项目:湖南科技大学研究生创新基金(S140011)

作者简介:龙勇(1990-),男,主要从事混凝土结构理论研究,(E-mail)814980506@qq.com。

祝明桥(通信作者),男,教授,(E-mail)1531290279@qq.com。

目前,建筑材料短缺已发展成为一个全球性问题,特别在发展中国家显得尤为突出。我国作为产竹资源大国,拥有量和品质均居世界首位,如果能将整根毛竹代替钢筋运用实践将大大缓解这一问题。而竹芯竹筋混凝土板^[1]是通过分布于板底的毛竹起到替代钢筋的作用,而毛竹筒身中空来满足板空心率,不仅最大限度的减轻板自身的重量,内置毛竹的腔体使整体板的隔声隔热效果明显提高,并采用竹片作为分布筋,以增加其整体性能,从而实现天然竹筋全部代替钢筋的现浇混凝土板,将主要应用于毛竹丰富的边远山区的房屋建设。

当前,国内外研究主要集中于将竹片代替钢筋应用于混凝土板中^[2-11],研究取得了很多成果,而对整根毛竹代替钢筋,实现竹筋竹芯混凝土板的受力理论与试验研究较少,面对全球资源短缺,环境污染严重的今天,研究毛竹代替钢筋布在混凝土板中的受力性能研究具有重要的理论和现实意义。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验共设计竹筋根数分别为 4、5、6 的混凝土板试件 3 个,长 3 000 mm、宽度 500 mm、厚度 100 mm (试件参数详见表 1)。该竹筋竹芯混凝土板利用整根毛竹作为受力纵向筋,毛竹直径均控制在 38~42 mm 范围内;由于毛竹表面光滑,为防止受力时过早产生相对滑移,在进对表面进行简单处理的情况下,采用尺寸为 480 mm×20 mm 竹片作为上下两层分布筋,分布筋间距为 100 mm,与毛竹连接采用双层钢丝进行绑扎;对锚固端的处理则通过打通毛竹端部 2~3 个竹节,并在 1~2 个竹节(nd) 范围内(试验时取 8d) 均匀削去 1/2~1/3 竹材截面,以增大了毛竹与混凝土粘结面积。试验完成后敲碎混凝土与毛竹截面没有发生滑移,由此说明抗滑移措施效果很好。试件实测受力竹筋混凝土保护层为 25 mm。对于普通钢筋混凝土板,实现了钢筋的全部替代。试件尺寸及配筋见图 1、图 2。

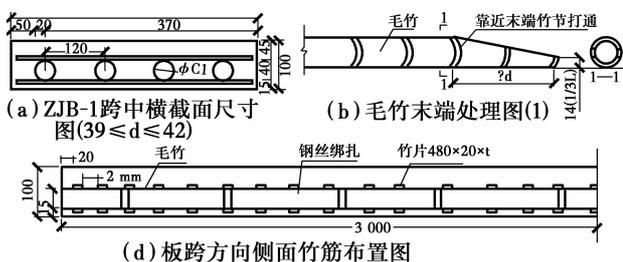


图 1 ZJB-1 几何尺寸图

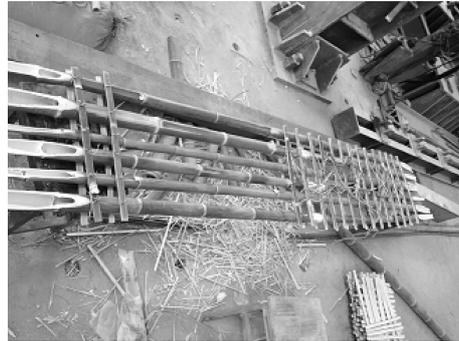


图 2 ZJB 现场竹筋绑扎

表 1 试件基本参数

试件编号	混凝土强度设计等级	截面尺寸		受力竹筋根数/n	竹筋直径范/mm	截面配筋率/ ρ	空心率/%
		b/mm	h/mm				
ZJB-1	C25	509	105	4	40-43	7.68	5.87
ZJB-2	C25	510	106	5	39-42	8.92	6.90
ZJB-3	C25	507	115	6	39-42	12.1	7.41

注:表中截面配筋率 $\rho = \frac{\sum S_z}{bh_0}$, 其中 S_z 为纵向受力竹筋横截面面积,

h_0 为截面的有效高度;截面空心率 $\rho_{\text{空}} = \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} - Z_s \right) / bh$, 其中 d 为毛竹平均直径;其它参数同上。

材料性能指标:混凝土强度等级均为 C25, 实测混凝土强度等级具有 95% 保证率,按混凝土强度总体分布的平均值减去 1.645 倍标准差计算的普通混凝土抗压强度标准值 $h_0 = 24.32$ MPa;将采伐的毛竹从中随机抽取 3 株制作试件,按《建筑用竹材物理力学性能试验方法》(JG/T199—2007) 要求,人工加工 56 个竹片试件,分无节和有节两种,通过对其进行顺纹抗拉强度、弹性模量及含水率试验实测竹片抗拉强度为 100.15 MPa、弹性模量为 $2.8 \times Z_s$ MPa。实测竹片平均含水率 9.18%。

本次试验未在试件上布置应变片和安装引伸计等量测变形的装置,主要通过观察试验机控制微机所存储数据进行处理得到竹片应力-应变曲线。选取其中有代表性某试件曲线,如图 3 所示。由竹片曲线分析可知:竹片抗拉破坏无屈服点,属于典型脆性材料;结合曲线图及加载过程中实验现象,可将竹片破坏过程分为“三阶段”,当竹片达到最大抗拉荷载时,最里层竹黄部分先破坏,此时应力达到最大,试件已经破坏;但最外层竹青还未被完全拉断,而最后被拉断的是中间层竹黄。为消除竹片弹性模量测试误差并验证结果准确性通过在试件上布置应变片

进行试验量测,试件有效长度正反两面分别布置应变片,结果验证了以上结果的准确性。

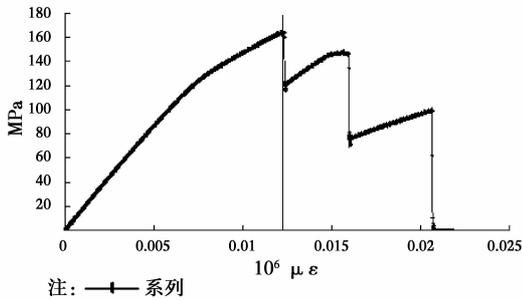


图3 竹片应力-应变曲线

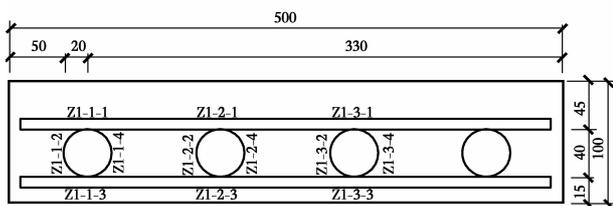
1.2 试验加载方案与测点布置

所采用的加载方式为砝码与沙袋分级加载(如图4)。先进行砝码加载,由板两端向中央对称进行,沙袋的摆放形式为推叠布置,采用分级加载;受条件限制不能进行破坏阶段试验,故在加载过程中,经常观察裂缝的出现、分布和发展情况,同时经常注意挠度的发展。



图4 加载现场

毛竹应变的控制是将混凝土应变片布置于毛竹表面,通过对单根毛竹纵向跨中截面上、下、左、右四个方向表面分别布置(12片/板)(如图5)。而板纵向跨中表面通过布置等间距的混凝土应变片来控制板受力过程中混凝土应变变化(5片/板)(如图5)。



1号板跨中截面毛竹应变片布置图

注:毛竹应变片用“Z”表示

图5 ZJB毛竹应变布置

2 试验现象与试验结果

2.1 弯矩-挠度(M-Δ)曲线(未计入自重)

挠度是控制竹筋板受弯全过程重要因素之一,结合图6所示弯矩-挠度曲线图分析,可知,板在开裂前处于弹性工作阶段;开裂后拉区混凝土退出工作,截面抗弯刚度下降,挠度增长较快,曲线明显转折,板处于带裂缝工作状态直至破坏,板呈两阶段受力特征。而仔细分析弯矩-挠度斜率可知:混凝土开裂前,三块板曲线斜率变化相似,随着竹筋率的增大,一定程度上改变了截面材质属性,导致开裂荷载都不相同;开裂后,各板跨中挠度的增速有所不同,随着竹筋率的增加,板的整体刚度增大,板的跨中挠度减小明显,截面抵抗弯矩的能力得到提高。当板挠度达到 $f \geq l_0 / 50$,此时的竹芯竹筋混凝土板的应变、裂缝均处于正常,与普通钢筋混凝土板相比,竹筋板的整体延性较好;继续施加荷载,毛竹应变、板挠度继续增大,当挠度超过 $130 \sim 140 \text{ mm}$ ($l_0 / 23 \sim l_0 / 22$)时,此时,竹筋板的变形很大,裂缝也已达到破坏标志,板早已不能满足实际工作需求直至板破坏。

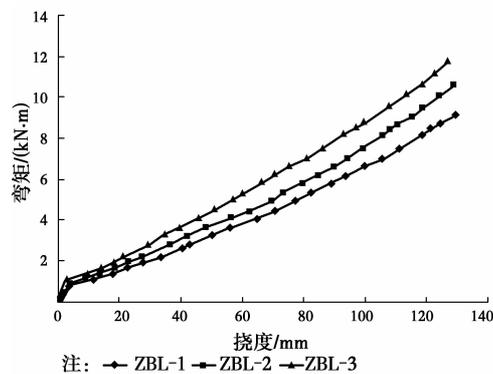


图6 ZJB 弯矩-挠度变化曲线

综上所述,1)随着板内毛竹数量的改变,对开裂荷载值的影响不大;2)竹芯竹筋混凝土板挠度可以达到 $(l_0 / 23 \sim l_0 / 22)$ 以上,表现出非常好的延性;3)竹芯竹筋混凝土板的挠度变化不同于普通钢筋混凝土,整个变化过程仅表现出两个阶段,没有平稳段和下降段。

2.2 弯矩-应变

结合毛竹弯矩-应变曲线图(7)可知:随着弯矩的逐渐增大,到混凝土开裂前,毛竹的平均应变变化很小且呈线性变化,混凝土开裂后,曲线出现明显转折,应变变化较大,之后呈非线性增大,增大幅度明

显大于开裂前。弯矩-应变曲线变化规律直至板破坏时,整个毛竹应变变化曲线呈两阶段特点;结合单块板毛竹弯矩应变曲线图,分析板内单根毛竹局部受力应变特点,可知:在竹筋板整个受弯直至板破坏过程中,毛竹靠近板底部分承受主要拉应力,两侧次之且受力较均匀,顶部受力最小。

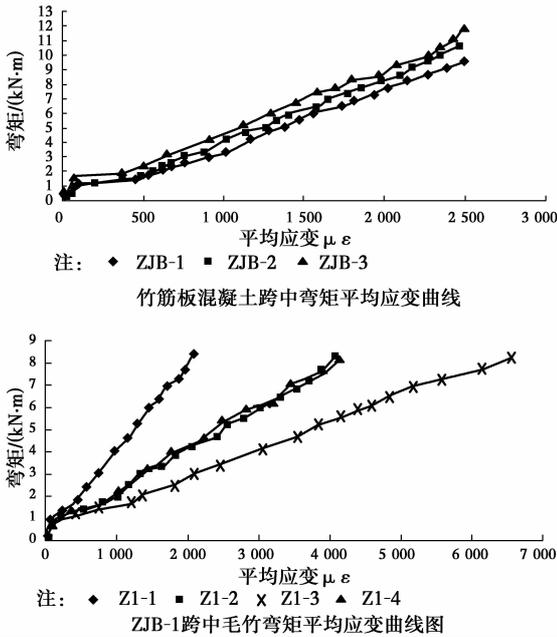


图 7 ZJB 弯矩-应变曲线

2.3 裂缝展开

2.3.1 试验前裂缝展开 试件的养护期间,板上表面均出现沿板跨方向的通长裂缝,三块板纵向裂缝有 2 个共同特点:1)裂缝发展至距离两短边 260~320 mm 时均未继续延伸,而板内毛竹末端是通过打通毛竹端部 2~3 个竹节,并在 1~2 个竹节(8 d)范围内,均匀削去 1/2~1/3 竹材截面;2)纵向裂缝距板长边边缘距离均接近毛竹顶部距板边距离。分析原因,板内毛竹本身接近椭圆或圆形,在混凝土内上半部分的毛竹类似“拱”形,可以产生对周围介质产生不均匀变形,从而产生裂缝。而毛竹之间通过上下横向分布的竹片形成类似的“环箍”却可以很好的抑制裂缝的出现,故竹芯竹筋混凝土板养护期间板两侧容易出现纵向长裂缝。

早期裂缝可能原因如下:1)可能由于施工时配置混凝土的水泥安定性不佳,养护不足从而出现比较普遍的、不规则的收缩裂缝;2)毛竹属于纯天然可再生绿色植物,具有很强的吸水性,天然竹材的含水率可以达到 50% 以上,在试验前通过材料试验测得平均含水率为 9.2%,未进行任何处理的毛竹在板

内吸水引起裂缝;3)温度原因引起开裂等。通过对毛竹表面进行涂抹丙乳防水砂浆处理后竹筋板与未进行任何处理的板养护 28 天后效果对比,可知处理后的竹筋板表面无任何裂缝。

2.3.2 试验过程裂缝展开 根据试验观察和毛竹表面未经任何处理的试件裂缝展开图 8,试件裂缝的分布、间距及裂缝宽度有以下特点:1)通过敲碎板观察裂缝分布可知,裂缝基本分布于分布筋之间;2)裂缝分布、开展与试件的配筋率大小有关。随着配筋率增大,裂缝间距愈大、裂缝宽度愈宽。例如:ZBL-1/ZBL-2 裂缝一旦出现,最大裂缝宽度就达到 0.1 mm 左右;极限荷载时,平均裂缝宽度分别是 123.8 mm、130.72 mm。配筋率越大,裂缝相对宽而稀。例如:ZBL-3 裂缝一出现就达到 0.3 mm,极限荷载时裂缝间距达到 165 mm。

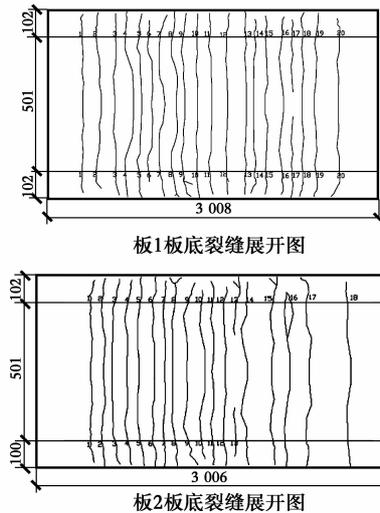


图 8 板底裂缝展开

2.4 极限承载力计算

按《混凝土结构设计规范》^[14]以下简称《规范》,提供的混凝土构件正截面承载力计算公式,对本文混凝土板进行正截面承载力计算。正截面受弯承载力 M_u 的计算公式为:

$$\sum X = 0, a_1 f_c b x = f_y A_s \quad (1)$$

$$\sum M_s = 0, M \leq a_1 f_c b x (h_0 - \frac{x}{2}) \quad (2)$$

式中: a_1 按《规范》6.2.6 条计算; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值,计算中混凝土强度取棱柱体轴心抗压强度标准值 f_{ck} ,可由实测立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 按《规范》公式 $f_{ck} = 0.88 a_1 a_2 f_{cu,k}$, a_1 为棱柱体与立方体强度的比值, a_2 为脆性影响系数,按《规范》,混凝土强度等级 C25,取 $= 0.76$ 、 $a_2 = 1.0$; b

为矩形截面宽度; h_0 为截面有效高度; x 为截面受压区高度; Z_s 为具有 95% 保证率的抗拉强度, 取 $Z_s = 100.15 \text{ MPa}$, 计算时将 Z_s 代替 f_y ; A_s 为受拉竹筋截面面积 a_1 。

表 2 承载力试验值与计算值

试件编号	$M_0^t /$ (kN·m)	$M_0^c /$ (kN·m)	M_0^t / M_0^c
ZJB-1	10.09	9.90	1.10
ZJB-2	12.35	11.8	1.05
ZJB-3	13.72	13.1	1.11

注: M_0^t 为竹筋混凝土极限弯矩实测值, M_0^c 为竹筋混凝土极限弯矩计算值。

由表 2 可知: 增加竹筋板的配筋率能提高板的抗弯截面承载力; 竹筋板的极限承载力计算值与实测值均接近, 说明可按钢筋混凝土单向板受弯承载力的计算方法同样适用于竹筋混凝土单向板的计算。

3 结 论

通过对 3 块竹筋竹芯混凝土板受力性能试验研究, 结合试验数据结果, 并经分析比较后, 可得出以下结论:

1) 通过对毛竹材料力学性能试验, 可知: 本批竹片含水率为 9.18%、抗拉强度为 100.15 MPa、弹性模量为 12.8 GPa, 竹片抗拉破坏过程中, 无明显屈服点, 属于典型脆性材料; 故对竹芯竹筋混凝土单向板设计计算时, 为保证结构安全性, 建议材料系数折减系数为 1.2。

2) 竹芯竹筋混凝土单向板从初始加载直至破坏, 经历了开列前、带裂缝工作, 板破坏前, 呈两阶段破坏特征; 同时, 板的挠度可以达到 $l_0/23$ 以上, 表现出非常好的延性; 而通过对竹筋混凝土单向板抗弯承载力计算, 发现可近似采用混凝土结构设计规范提供的方法。

3) 板的受弯过程中, 分析板的裂缝特点可知: 随着配筋率增大, 裂缝间距愈大、裂缝宽度愈宽, 故板内毛竹未经任何处理情况下, 毛竹与混凝土之间的粘结效果不佳, 考虑到毛竹本身防水防腐要求, 故建议在今后试验研究中, 可采用丙乳防水砂浆对毛竹表面进行处理。

参考文献:

- [1] 祝明桥, 龙勇, 梁辰坤. 竹筋现浇混凝土板[P]. 中国, ZL201420428872.3, 2014.
- [2] 杨云芳, 刘志坤. 毛竹材抗拉弹性模量及抗拉强度. 浙江林学院学报, 1996, 13(1): 21-27.
- [3] 杨云芳. 竹材作为混凝土楼板增强材料适宜性的研究[J]. 福建林学院学报, 1996(2): 105-108.
- [4] 吴以莉, 朱劲松, 等. 竹筋混凝土楼板试验研究[J]. 化工生产技术, 1998(3): 62.
- [5] 吴以莉, 江爱明, 等. 竹筋混凝土楼板校核[J]. 工程力学 (Sup), 2001(38): 383-388.
- [6] 陈璐. 竹筋-陶粒混凝土粘结性能及复合墙板抗弯性能的试验与理论分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [7] 戚明军. 竹筋与混凝土粘结强度试验研究[J]. 山西建筑, 2012(38): 112-113.
- [8] 周乾. 竹芯竹筋混凝土板受力性能研究与分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [9] 吕韬. 高填方边坡中竹筋的应用研究[J]. 木工程学报, 2010, 43(7): 91-96.
- [10] 谢咸颂. 竹筋混凝土楼板的结构性能检验及评估[J]. 建筑设计, 2010(11): 39-42.
- [11] 张文福. 圆竹的应用领域与研究进展[J]. 竹子研究汇刊, 2011, 30(2): 1-4.
- [12] 周乾. 竹材混凝土空心板受力性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [13] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].
- [14] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

(编辑 王 宣)