

竹筋混凝土梁工作性能研究

杨国松*, 张 洁

南京金宸建筑设计有限公司, 江苏 南京

收稿日期: 2022年11月30日; 录用日期: 2022年12月16日; 发布日期: 2023年3月6日

摘 要

以竹筋代替钢筋的竹筋混凝土受弯构件既能够减少建筑行业对钢材的需求, 又能够减少碳排放。文章通过综合因素折减系数法给出了胶合竹抗拉强度设计值的推荐值。通过已有试验数据, 分析了竹筋与混凝土粘结与锚固、竹筋混凝土梁受弯性能。结果表明, 适当提高配筋率能够有效提高竹筋混凝土梁的受弯承载力。文章认为, 竹筋混凝土梁能够满足低地震烈度区域单层或多层住宅建筑的承载力要求。

关键词

胶合竹, 竹筋混凝土梁, 设计值, 粘结性能, 受弯性能

Research on Working Performance of Bamboo-Reinforced Concrete Beam

Guosong Yang*, Jie Zhang

Nanjing Jinchen Architectural Design Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

Received: Nov. 30th, 2022; accepted: Dec. 16th, 2022; published: Mar. 6th, 2023

Abstract

Bamboo-reinforced concrete flexural members with bamboo reinforcement instead of steel bars can not only reduce the demand for steel in the construction industry, but also reduce carbon emissions. This paper gives the recommended tensile strength design value of glued laminated bamboo through reduction coefficient method. Based on existing test data, this paper analyses the bonding and anchoring performance between bamboo and concrete and the flexural performance of bamboo-reinforced concrete beam. The results show that the flexural bearing capacity of bamboo reinforced concrete beam can be increased effectively by appropriately increasing the reinforcement ra-

*通讯作者。

tio. This paper believes that bamboo-reinforced concrete beams can meet the requirements of single-storey or multi-storey residential buildings in areas with low seismic intensity.

Keywords

Glued Laminated Bamboo, Bamboo Reinforced Concrete Beam, Design Value, Bond Property, Bending Property

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国竹林资源十分丰富,我国竹林面积超过 600 万公顷,位居世界首位,竹材蓄积量也位列世界第一。竹结构住宅在我国具有悠久的历史,西南地区“干阑式”竹屋最具代表性。如今,不少学者认为竹筋增强材料适合在经济欠发达地区作为钢筋的替代材料[1]。文章从胶合竹材顺纹抗拉强度设计值、竹筋与混凝土粘结性能、竹筋的耐久性能、竹筋混凝土梁受弯承载力等方面的研究,深入分析了竹筋混凝土梁的工作性能。研究表明,充分利用竹材顺纹抗拉强度较高的特点,以竹筋代替钢筋制作的竹筋混凝土梁在低烈度区域的单层及多层住宅中具可观的应用前景。

2. 胶合竹顺纹抗拉强度设计值

2.1. 胶合竹抗拉强度影响因素

影响胶合竹材强度的因素种很多,其中,竹材品种、竹龄、含水率、加工工艺、材料缺陷、老化等影响较为明显[2]-[7]。表 1 为不同类别竹材抗拉强度试验数据。

Table 1. Tensile strength test parameters of different kinds of bamboo materials

表 1. 不同类别竹材抗拉强度试验参数

材料类别	抗拉强度试验值/MPa	标准差/MPa	平均值/MPa	极差/MPa
原竹	133 [8]	17	142	20
	140 [5]	20		
	153 [9]	—		
层板胶合竹	90 [10]	23	91	12
	97 [11]	21		
	85 [12]	13		
Glubam	83 [3]	16	—	—
	126 [13]	14	131	21
重组竹	144 [14]	13		
	123 [15]	19		

注: 1) 层板胶合竹是将圆竹材沿顺纹方向加工成一定长、宽、厚的竹片单元,然后通过胶黏剂经蒸汽热压成型的胶合竹材; 2) Glubam 是基于竹席竹帘胶合板开发出的纵横向纤维比为 4:1 的胶合竹材; 3) 重组竹材是一种将竹材纤维重新组织经高温高压固化而成的胶合竹材。

2.2. 胶合竹抗拉设计计算方法

祝明桥[5]等认为,原竹轴向拉伸试验中应力-应变曲线与无明显屈服点钢筋的应力-应变曲线类似,因此,原竹抗拉强度设计值 f 可按下式计算:

$$f = (0.8 \sim 0.9) f_k \quad (1)$$

$$f_k = f_t - 1.645\delta \quad (2)$$

其中, f_k 为原竹抗拉标准值; f_t 为原竹抗拉强度试验值; δ 为试验值标准差。

笔者建议原竹的抗拉强度设计值在考虑多因素折减后可取 60 MPa [7] [16] [17] [18] [19], 高于肖岩[3]等参考木材的容许应力计算方法得出的设计值。

3. 竹筋与混凝土的粘结与锚固

竹筋在混凝土构件中的锚固

胶合竹属于脆性材料,与钢筋相比,竹筋的冷塑性能较差,这使得竹筋在节点区难以采用弯锚的形式锚固。直锚锚固承载力 P 可近似按下式计算:

$$P = \mu\sigma ul \quad (3)$$

式中, μ 为混凝土强度折减系数, C30 混凝土取 1.0, 对于其他标号混凝土, 取 $1.43/f_t$ (f_t 为混凝土抗拉强度设计值);

σ 为混凝土与竹筋之间的粘结强度(MPa);

u 为锚固段竹筋周长(mm);

l 为竹筋的有效锚固长度。

竹筋与混凝土的粘结力主要包括竹筋与混凝土之间的摩擦力以及机械咬合力。从施工的便利性与经济性考虑, 提高竹筋与混凝土的摩擦力和机械咬合力是既有效也具备操作性的, 并且已经取得一定的研究进展[20] [21] [22] [23] [24]。由于缺乏规范依据以及经验参数, 构件设计时, 不同处理条件下的竹筋与混凝土之间的粘结强度可通过试验获得。

由于竹筋的可塑性较差, 竹筋在混凝土中采取弯折锚固的施工难度较大, 为了减小平直段锚固长度, 可采用端部扩大的方式增强锚固承载力。

4. 竹筋混凝土梁受弯性能

4.1. 竹筋混凝土梁受弯试验

通过已有的试验数据, 将部分竹筋混凝土梁受弯破坏试验参数总结如下:

Table 2. Test of flexural bearing capacity of plain concrete beams and bamboo reinforced concrete beams part I [25]

表 2. 素混凝土梁与竹筋混凝土梁受弯承载力试验一[25]

编号	加载方式	跨度(mm)	截面(mm)	配筋	P (kN)	P' (kN)	w (mm)	w' (mm)
1	三点弯	500	150 × 150	无	12.5	12.5	0.26	0.26
2	三点弯	500	150 × 150	单筋	22.4	13	1.18	0.2
3	三点弯	500	150 × 150	双筋对称	30	13	2.12	0.25

注: P 为破坏荷载; P' 为梁构件保持弹性变形的荷载上限; w 为破坏时挠度; w' 为梁构件保持弹性变形的荷载上限对应的挠度。

Table 3. Test of flexural bearing capacity of bamboo-reinforced concrete beams [26]**表 3.** 竹筋混凝土梁受弯承载力试验[26]

编号	加载方式	跨度(mm)	截面(mm)	配筋	配筋率(%)	P (kN)	f (mm)
1	四点弯	1680	230 × 230	双筋	4%	54	14
2	四点弯	1680	230 × 230	双筋	4%	53	15
3	四点弯	1680	230 × 230	双筋	4%	51	15

注: P 为破坏荷载; f 为破坏时挠度。

Table 4. Test of flexural bearing capacity of plain concrete beams and bamboo reinforced concrete beams part II [27]**表 4.** 素混凝土梁与竹筋混凝土梁受弯承载力试验二[27]

类别	加载方式	跨度(mm)	截面(mm)	配筋率(%)	P (kN)	P' (kN)	f (mm)	f' (mm)
素混凝土	四点弯	1100	150 × 150	—	22	20	1.9	1.8
	四点弯	1100	150 × 150	—	24	22	1.8	1.6
	四点弯	1100	150 × 150	—	25	23	2.2	2.1
钢筋混凝土	四点弯	1100	140 × 150	1.2	65	55	8.0	4.2
	四点弯	1100	140 × 150	1.2	68	58	8.5	4.5
	四点弯	1100	140 × 150	1.2	69	59	9.0	4.8
竹筋混凝土	四点弯	1100	140 × 150	2.8	41	32	4.0	2.2
	四点弯	1100	140 × 150	2.8	47	35	4.8	3.0
	四点弯	1100	140 × 150	2.8	43	36	5.2	2.5
	四点弯	1100	140 × 150	3.8	63	45	6.9	2.8
	四点弯	1100	140 × 150	3.8	63	39	6.5	3.0
	四点弯	1100	140 × 150	3.8	70	42	6.0	2.5

注: 本试验样本为双筋矩形梁; P 为破坏荷载; P' 为梁受拉区出现裂缝时荷载; f 为破坏时挠度; f' 为梁受拉区出现裂缝时挠度。

表 2~4 中试件的竹筋均为原竹, 试验结果表明, 竹筋混凝土梁破坏模式均为脆性破坏, 开裂挠度约为破坏时挠度的 50%。在受拉区出现裂缝前, 梁的刚度基本保持稳定, 挠度与荷载呈线性相关, 当受拉区混凝土出现裂缝并持续开展后, 竹筋混凝土梁的刚度出现小幅下降, 且下降幅度随荷载的继续增大而增大, 并在达到极限荷载时发生脆断。

承载能力方面, 单筋矩形梁的承载能力低于双筋矩形梁; 竹筋混凝土梁的受弯承载力显著高于素混凝土梁, 且承载力提高幅度取决于受拉区竹筋配筋率的大小, 配筋率越大, 承载力提高幅度越高; 在配筋率相同的前提下, 竹筋混凝土梁受弯承载力低于钢筋混凝土梁, 通过适当增加配筋率可以提高竹筋混凝土梁的极限承载力, 从表 4 可以看出, 当竹筋混凝土梁受拉区竹筋配筋达到钢筋混凝土梁的 3 倍时, 二者极限承载力几乎相同, 但此时, 竹筋混凝土梁的弯曲变形能力依然显著低于钢筋混凝土梁。

此外, 竹筋混凝土梁破坏时, 通常表现为受拉区竹筋在竹节处拉断, 这表明, 竹纤维在竹节处的不规律、不完全连续分布导致竹筋在受拉时节处出现应力集中, 从而不能完全发挥竹材节间抗拉承载力。理论上, 以薄竹片为基本单元, 采用错位搭接热压胶合工艺的胶合竹能够在一定程度上避免竹节处纤维分布在同一断面的情况, 如图 1 所示, 从而达到增强竹筋抗拉承载力的连续性和稳定性。



Figure 1. Glued laminated bamboo

图 1. 胶合竹

4.2. 配筋率对抗弯强度的影响

为了实现延性设计, 我国现行抗震规范限制了框架梁端纵向受拉钢筋的配筋率不超过 2.75%。从抗震设计、经济性、以及施工等角度来看, 竹筋混凝土梁的合理配筋率值得深入探讨。表 5 列出了竹筋混凝土梁中, 受拉区竹筋配筋率对梁破坏形态的影响。从表中数据可以看出, 竹筋混凝土适筋梁的配筋率已经远大于钢筋混凝土梁纵向受拉钢筋配筋率最大限值, 当试件的配筋率超过 6% 时, 构件易发生超筋破坏。表中竹筋在试件破坏时的抗拉强度参照现行混凝土规范计算得到, 可以看出, 除试件 1 和试件 2 发生少筋破坏之外, 其余试件在破坏时, 受拉区竹筋抗拉强度均远低于表 1 中的试验值。此外, 构件截面也是影响受拉竹筋发挥其抗拉承载力的一大要素, 截面为 135 mm × 235 mm 的试件 (I 类试件) 在破坏时竹筋抗拉承载力发挥系数要显著优于截面为 100 mm × 180 mm 的试件 (II 类试件)。

Table 5. Failure modes of bamboo reinforced concrete beams with different reinforcement ratios [20] [27]

表 5. 不同配筋率竹筋混凝土梁破坏形态 [20] [27]

编号	截面(mm)	跨度(mm)	单/双筋	加载方式	配筋率(%)	P (kN)	破坏形式	f_j (MPa)
1	100 × 180	1290	双筋	三点弯	2.87	18	少筋破坏	157
2	100 × 180	1290	双筋	三点弯	5.17	22	少筋破坏	54
3	100 × 180	1290	双筋	三点弯	8.78	30	斜拉破坏	36
4	100 × 180	1200	双筋	三点弯	7.05	34	超筋破坏	50
5	100 × 180	1200	双筋	三点弯	7.12	28	超筋破坏	39
6	100 × 180	1200	双筋	三点弯	9.72	30	斜拉破坏	30
7	100 × 180	1200	双筋	三点弯	7.20	42	竹筋滑移	64
8	100 × 180	1200	双筋	三点弯	7.63	36	斜拉破坏	50
9	100 × 180	1200	双筋	三点弯	9.32	30	超筋破坏	41
10	135 × 235	1740	双筋	三点弯	6.34	43	超筋破坏	92
11	135 × 235	1740	双筋	三点弯	6.78	43.5	超筋破坏	81
12	135 × 235	1780	双筋	三点弯	7.31	29	竹筋滑移	45
13	135 × 235	1660	双筋	三点弯	8.51	52	斜拉破坏	75
14	135 × 235	1740	双筋	三点弯	8.64	32	超筋破坏	45
15	135 × 235	1700	双筋	三点弯	11.27	37	斜拉破坏	89
16	135 × 235	1740	双筋	三点弯	11.26	62	斜拉破坏	65

注: 本试验样本为双筋矩形梁; P 为破坏荷载; f_j 为梁破坏时受拉区竹筋拉力。

多组互相独立实验表明, 以原竹为受拉增强材料的竹筋混凝土梁的受弯承载力比素混凝土梁有了较高的提升, 除表 5 中试件的承载力表现出较大离散外, 其它几组试验结果的同组差异性较小, 显示出竹筋混凝土梁较为稳定的工作性能。胶合竹在更为严格的选材以及在制作工艺上针对材料缺陷的处理, 理论上能够满足竹筋混凝土梁的工作稳定性。

5. 结论

文章主要从竹筋与混凝土的锚固和配筋率对素混凝土梁承载力的影响两个方面分析了竹筋混凝土梁的工作性能。研究表明, 竹筋与混凝土之间的锚固承载力计算可参照钢筋混凝土, 但锚固段竹筋与混凝土的粘结力需要通过试验获得; 试验数据表明, 竹筋混凝土梁的抗弯承载显著高于素混凝土梁, 在配筋率介于 3%~6%时, 能够充分利用竹筋的抗拉强度。由于目前尚未进行竹筋的搭接方式以及搭接承载力研究, 住进混凝土梁只能用于层数较少、跨度和楼屋面荷载较小的结构中。

参考文献

- [1] Sajjad, Q., Asif, H., Rayed, A., *et al.* (2020) Flexural Strength Improvement in Bamboo Reinforced Concrete Beams Subjected to Pure Bending. *Journal of Building Engineering*, **31**, Article ID: 101289. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101289>
- [2] Lo, T.Y., Cui, H.Z. and Leung, H.C. (2004) The Effect of Fiber Density on Strength Capacity of Bamboo. *Materials Letters*, **58**, 2595-2598. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2004.03.029>
- [3] 肖岩, 杨瑞珍, 单波, 余立永, 李磊. 结构用胶合竹力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(11): 150-157.
- [4] 于金光, 郝际平, 田黎敏, 邓光睿. 圆竹的力学性能及影响因素研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(1): 30-36.
- [5] 祝明桥, 张紫薇, 王华, 龙勇. 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.
- [6] 邵卓平, 黄盛霞, 吴福社, 周亮, Clement. Arnaud.毛竹节间材与节部材的构造与强度差异研究[J]. 竹子研究汇刊, 2008(2): 48-52.
- [7] 单波, 肖岩, 陈杰. 格鲁斑胶合竹耐候性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(4): 26-32.
- [8] Yu, H.Q., Jiang, Z.H., Hse, C.Y. and Shupe, T.F. (2008) Selected Physical and Mechanical Properties of Moso Bamboo (*Phyllostachys pubescens*). *Journal of Tropical Forest Science*, **20**, 258-263.
- [9] Ghavami, K. and Marinho, A.B. (2001) Determinação das propriedades mecânicas dos bambus das espécies: Moso, matake, Guaduaangustifolia, guaduaatagoara e Dendrocalamus giganteus, para utilização na engenharia. PUC-Rio, Publicação RMNC-1 Bambu 01/2001, Rio de Janeiro. (In Portuguese)
- [10] Sharma, B., Gatóo, A., Bock, M., *et al.* (2015) Engineered Bamboo for Structural Applications. *Construction and Building Materials*, **81**, 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.077>
- [11] 王文静, 左宏亮, 郭楠, 韩晓彬. 胶合竹顺纹受拉力学性能试验研究[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(4): 38-40.
- [12] Li, Z., Yang, G.S., Zhou, Q., Shan, B. and Xiao, Y. (2019) Bending Performance of Gluban Beam Made with Difference Processes. *Advances in Structural Engineering*, **22**, 535-546. <https://doi.org/10.1177/1369433218794327>
- [13] 刘方舟, 左宏亮, 陈冠华. 结构用重组竹材顺纹抗拉力学性能试验研究[J]. 山西建筑, 2016, 42(7): 27-29.
- [14] 盛宝璐, 周爱萍, 黄东升, 黄镇. 重组竹的顺纹拉压强度与本构关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(5): 123-128.
- [15] 潘金炎, 王立, 张玉强, 刘亚辉. 基于重组竹的结构用胶合竹材力学性能试验研究[J]. 施工技术, 2018, 47(21): 135-139.
- [16] 任红玲, 陆方, 张禄晟, 覃道春. 腐朽过程中毛竹主要化学成分的变化[J]. 林产工业, 2013, 40(1): 52-54.
- [17] Wakchaure, M.R. and Kute, S.Y. (2012) Effect of Moisture Content on Physical and Mechanical Properties of Bamboo. *Asian Journal of Civil Engineering*, **13**, 753-763.
- [18] Xu, Q.F., Harries, K., Li, X.M., *et al.* (2014) Mechanical Properties of Structural Bamboo Following Immersion in Water. *Engineering Structures*, **81**, 230-239. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.044>
- [19] Wang, H.K., Tian, G.L., Li, W.J., *et al.* (2015) Sensitivity of Bamboo Fiber Longitudinal Tensile Properties to Moisture

- Content Variation under the Fiber Saturation Point. *Journal of Wood Science*, **61**, 262-269. <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1466-y>
- [20] Ghavami, K. (1995) Ultimate Load Behavior of Bamboo-Reinforced Lightweight Concrete Beams. *Cement and Concrete Composites*, **17**, 281-288. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00018-8](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00018-8)
- [21] Pereira da Rosa, S.P.A. (2002) Analise Teorica e Experimental de Colunas Armado com Bambu. MSc Thesis, Civil Engineering Department, PUC-Rio. (In Portuguese)
- [22] Navarro, E.H.A. (2002) Lajes de Concreto com Forma permanente de Bambu. MSc Thesis, Civil Engineering, PUC-Rio. (In Portuguese)
- [23] 李昱澄, 张晓港. 竹筋混凝土中竹材与混凝土的粘结性能实验研究[J]. 山东工业技术, 2017(14): 98-99.
- [24] Ghavami, K. (2005) Bamboo as Reinforcement in Structural Concrete Elements. *Cement and Concrete Composites*, **27**, 637-649. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.06.002>
- [25] Rahman, M.M., Rashid, M.H., Hossain, M.A., *et al.* (2011) Performance Evaluation of Bamboo Reinforced Concrete Beam. *International Journal of Engineering & Technology*, **11**, 113-188.
- [26] Mali, P.R. and Datta, D. (2019) Experimental Evaluation of Bamboo Reinforced Concrete Beams. *Journal of Building Engineering*, **28**, Article ID: 101071. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101071>
- [27] Kankam, C.K. and Odum-Ewuakye, B. (2000) Flexural Strength and Behavior of Babadua-Reinforced Concrete Beam. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **12**, 39-45. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2000\)12:1\(39\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:1(39))