

不同截面形式重组竹柱轴心受压试验研究

肖忠平¹,李 晨¹,苏相宇²

(1.扬州工业职业技术学院 建筑工程学院,江苏 扬州 225127;2.扬州大学 建筑科学与工程学院,江苏 扬州 225127)

摘 要:为在重组竹结构中选择合适的柱形式,对结构胶连接的空心箱型柱以及实心柱进行轴心受压试验,考察柱抗压承载力特性、破坏模式等。结果表明,重组竹实心柱破坏模式为失稳破坏,柱中出现轻微开裂;重组竹空心柱破坏模式同样为失稳破坏,并且上下两端端部出现明显裂缝,构件两端压溃破坏,指接处也发生锯齿状断裂。重组竹实心柱极限荷载平均值为 465 kN,空心柱荷载平均值为 418 kN,实心柱极限荷载为空心柱的 1.11 倍,实心柱的延性系数为 1.66,空心柱的延性系数为 1.53,说明重组竹实心柱的承载力和延性更优。重组竹实心柱和空心柱试验值与依据《木结构设计规范》理论计算值吻合较好,说明《木结构设计规范》对重组竹柱的设计具有一定参考作用。空心柱的承载力相比于实心柱相差并不是很大,且材料用量减少,说明重组竹空心柱可在实际工程中进行应用,重量轻、施工方便。

关键词:重组竹;空心箱型柱;实心柱;轴心受压

中图分类号:TS612 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2018)05-0231-05

Experimental Study on Axial Compression of Glued Laminated Bamboo Columns with Different Cross Sections

XIAO Zhong-ping¹, LI Chen¹, SU Xiang-yu²

(1. College of Construction Engineering, Yangzhou Polytechnic Institute, Yangzhou, Jiangsu 225127, China;
2. College of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127, China)

Abstract: In order to choose proper column form in the structure of glued laminated bamboo, experimental study on axial compression of glued laminated bamboo columns with different cross sections were carried out. Compression bearing capacity and failure mode of glued laminated bamboo solid columns and hollow columns were investigated. The results showed that the failure mode of the glued laminated bamboo solid columns was the instability failure, and slight cracking occurred in the middle of column; the failure mode of the glued laminated bamboo hollow columns was also the instability failure, and obvious cracks occurred in the both ends of the columns, crushing failure at both ends of the component, zigzag fault also occurred in the finger junction. The ultimate load of solid column was 465 kN, for hollow column, it was 418 kN, the ultimate load of solid column is 1.11 times as high as that of hollow column, the ductility coefficient of solid column was 1.66, 1.53 for hollow column, indicating that the bearing capacity and ductility of the solid column were better. The test values were in good agreement with the theoretical values calculated according to the code for design of timber structures, it indicated that the code for design of timber structures had a certain reference effect on the design of glued laminated bamboo columns. The bearing capacity of hollow column was not much different from that of solid column, and materials to make hollow column obviously reduced the, it showed that the glued laminated bamboo hollow columns could be applied in practical engineering.

收稿日期:2017-12-20 修回日期:2018-03-05

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0703501):结构用木竹材料强度分级及防护处理技术;2016年江苏省建筑产业现代化专项引导基金示范基地项目(设计研发类):竹木结构建筑产业化研发。

作者简介:肖忠平,男,博士,教授,研究方向:竹木结构建筑及用材。E-mail: fafuxzp@163.com

Key words:glued laminated bamboo; hollow column; solid column; axial compression

国家大力发展装配式建筑,而竹木结构建筑也正属于这一范畴,竹材和木材都是可再生资源,竹材具有生长周期短、伐后恢复快等优点,并且碳储存能力也超过木材。近年来,随着世界木材资源的日渐匮乏,合理有效地利用竹材资源变得越来越重要。重组竹是一种将竹材重新组织并加以强化成型的竹质新材料,具有优良的力学性能,其强度远远超过其他的木材人造板和普通竹材人造板,目前已经应用在房屋、桥梁结构中^[1-4],高校、研究所以及从事竹木结构建筑建设的企业也开展了相关重组竹结构方面的研究,主要集中在重组竹材性、结构构件以及节点几个方面^[5-11]。在竹结构的构件中主要针对梁构件,少数针对柱构件。刘学^[12]采用慈竹竹帘胶合板制作方形结构柱,通过等边角钢采用螺栓将翼缘板和腹板连接,在翼缘板两侧通过薄型竹胶合板进行固定,然后对其进行轴心受压试验表明,竹质工字型结构柱翼缘板与腹板均出现侧向弯曲,加载后期翼缘板与腹板变形均出现恢复,并且变形最大处为柱翼缘板与腹板中部,变形最小处为两端简支点位置。柱翼缘板由于局部受压发生破坏,柱侧向变形较小,整体稳定性较高,并且轴向压力作用下轴向压缩量较小,抗压性能较优;张苏俊^[13]等对4根重组竹方形实心柱的轴心受压研究表明,实心柱轴心受压时的破坏形态为弯曲屈曲型整体失稳,并且在弹性范

围内,没有出现强度破坏;魏洋^[14]等对6根不同偏心距的重组竹柱进行的偏心受压试验表明,对应峰值载荷时,重组竹柱偏心受压试件的竹材压应变远远大于轴心受压试件,苏靖文^[15]等对重组竹实心柱轴心受压的力学性能也进行了研究。可见,在重组竹构件的研究中,主要是针对实心柱,虽然刘学^[12]对工字型结构柱进行了研究,但所用材料为竹帘胶合板,非重组竹。

重组竹的密度达到 $1.1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,重量大,现场施工不方便,同时,每立方米重组竹成本达到5 000多元。能否采用不同结构形式的重组竹柱,减少重组竹的用量,减少施工难度,降低成本,本研究制作了5组重组竹实心柱、空心箱型柱进行轴心受压试验,研究不同截面形式柱的抗压承载力特性、破坏模式等,为竹结构建筑柱形式的选择与设计提供参考。

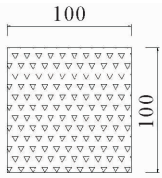
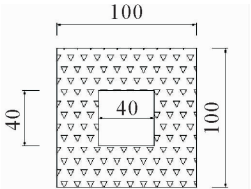
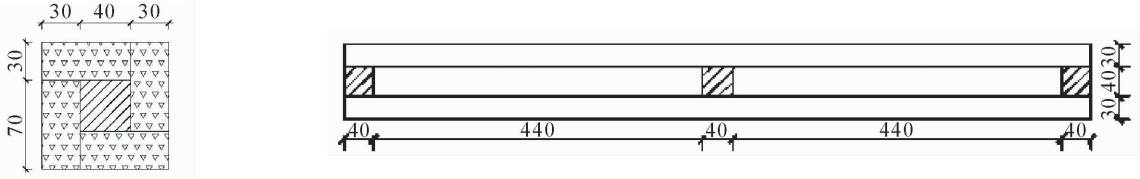
1 材料与方法

1.1 试件设计

试验构件采用的重组竹的物理力学性能为:含水率8.7%,密度 $1.11\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,弹性模量6 997.6 MPa,顺纹抗压强度82 MPa。实心柱试件柱身截面为 $100\text{ mm}\times100\text{ mm}$,试件长度1 000 mm。内加隔板增强型箱型柱尺寸以及内加隔板位置见表1,重组竹空心柱采用四板胶合制作。

表 1 重竹柱截面尺寸

Table 1 Sectional dimension of glued laminated bamboo column

重组竹柱规格	试件长度/mm	截面尺寸/mm	数量
实心柱	1 000		5
箱型柱	1 000		5
空心箱型柱结构图			
			

1.2 装置及方法

试验加载及测试根据 GB/T 50329-2012 进行,试验加载装置采用 2 000 kN 液压式压力传感器和 YAJ-5000 微机控制电液伺服压剪试验机进行轴向加载进行静力加载,在试件的上下两端安装刀铰,通过红外水准仪进行对中矫正。试验前,为测试重组竹柱在受力状态下的应变发展情况,研究不同截面形式的重组竹柱的破坏特点及受力过程中应变发展

规律,在试件上布置应变片,布置位置为柱的 4 个侧面中间处沿竖向和横向。图 1 中沿柱的高度方向两侧均等间距布置 5 个横向位移计,竖向布置 1 个位移计,测试加载过程中重组竹柱的变形特征。在试验加载前期荷载按每级 5 kN 逐级加载,当荷载达到 40 kN 后,加载等级调整为按每级 10 kN 加载直至试件失效破坏,加载过程中加载速度保持为 $2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

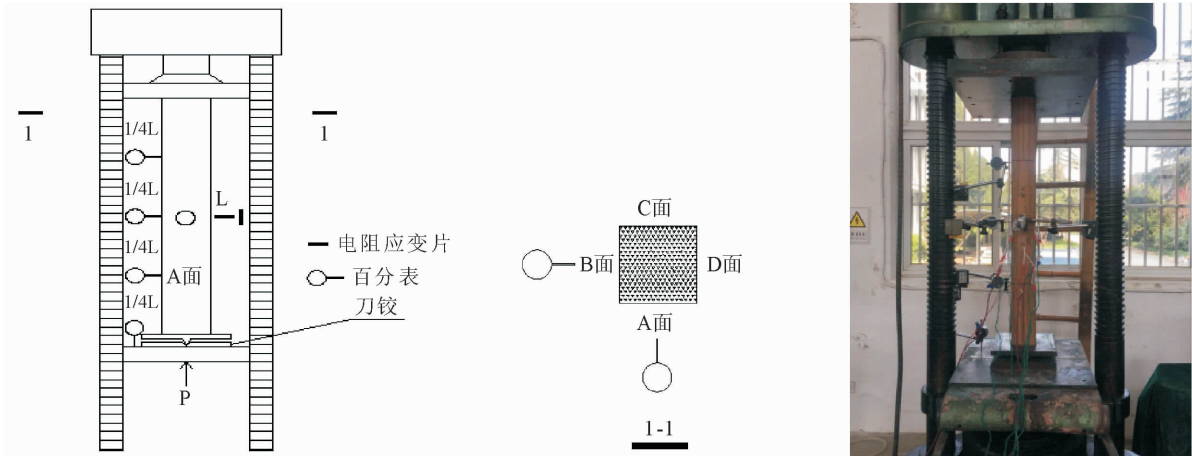


图 1 试验加载装置

Fig. 1 Test setup of column

2 结果与分析

2.1 破坏形式

2.1.1 重组竹实心柱 重组竹实心柱破坏模式见图 2,加载初期重组竹实心柱柱中挠度和应变随着荷载

的增加而呈线性趋势增大,此时处于弹性阶段,支座处几乎没有位移,可忽略不计。继续加载,当荷载达到极限荷载的 80%左右时,重组竹实心柱出现明显的变形,构件向一侧弯曲,柱中轻微开裂;随着荷载继续增大,构件变形愈发明显,最后出现失稳破坏。

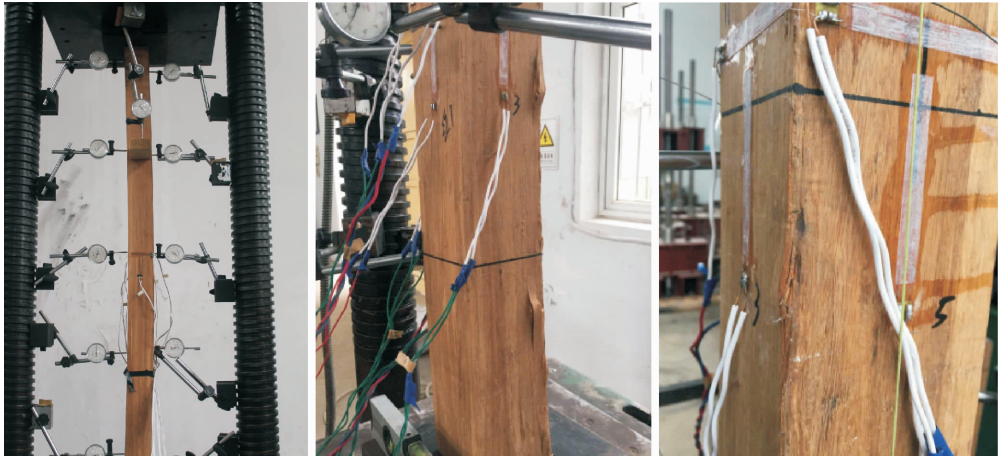


图 2 实心柱破坏形式

Fig. 2 Failure models of glulam bamboo solid columns

2.1.2 重组竹空心柱 重组竹空心柱破坏模式见图 3,加载初期重组竹实心柱柱中挠度和应变随着荷载的增加而呈线性趋势增大,此时处于弹性阶段,支座处几乎没有位移,可忽略不计。当荷载加载至 300 kN 左右时,重组竹空心柱表面虽然没有出现明显的破坏,但伴随有轻微的撕裂响声。加载中期,当

荷载增大到 380 kN 左右时,可以听到较大的响声,柱中位置开始出现轻微开裂,随着荷载的增加,柱的挠度越来越大。加载后期,当荷载增大到 435 kN 左右时,肉眼能观察到空心柱发生极大挠曲。此时,重组竹空心柱上下两端端部出现明显裂缝,构件两端压溃破坏,指接处也发生锯齿状断裂。

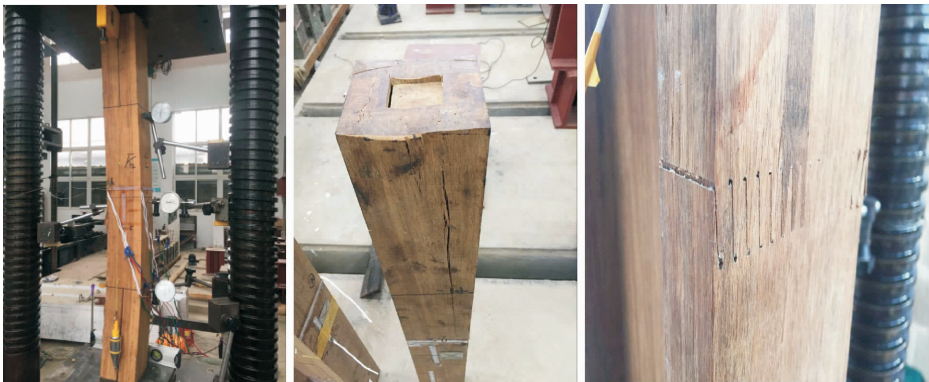


图 3 重组竹空心柱破坏形式

Fig. 3 Failure models of glulam bamboo hollow columns

2.2 重组竹柱荷载-挠度曲线

图 4 为重组竹实心柱和空心柱试件柱中的荷载-位移曲线。试验加载前期,2 种形式柱跨中变形均随荷载增加而增大,并且为线性增长,说明此时 2 种形式柱均处于弹性阶段;荷载继续增加,实心柱荷载达到 420 kN,空心柱荷载达到 388 kN 时,2 种形式柱荷载-变形曲线斜率呈现减小的趋势,进入塑性阶段;荷载继续增大后,实心柱荷载达到 470 kN,空心柱荷载达到 412 kN,二柱均发生失稳破坏,进入破坏阶段,实心柱极限荷载为空心柱的 1.14 倍,结合上述 2 种形式柱的破坏形式可发现破坏形式均为塑性破坏。根据试验所得各柱荷载-挠度数据计算重组竹柱的位移延性系数(最大位移和屈服位移的比值),重组竹实心柱的延性系数为1.66,空心柱的延性系数为 1.53,说明重组竹实心柱的延性较好。

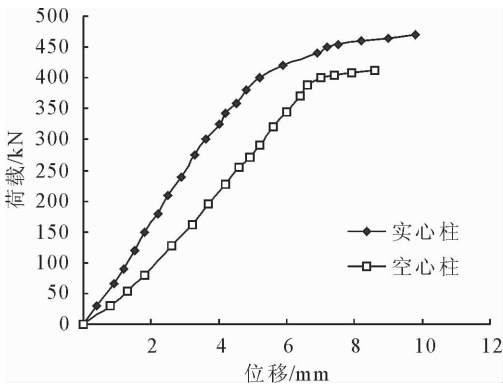


图 4 重组竹柱荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of glulam bamboo columns

2.3 跨中截面应变变化规律分析

图 5 为试验所得柱中截面在不同荷载等级下的应变情况。柱中应变在加载初期随着截面高度的增大而上升,呈线性变化,柱四侧截面应变基本相同,此时 2 种形式柱均处于弹性阶段;随着荷载的增加,截面各部位应变发展迅速,当实心柱荷载增大到 422 kN,空心柱荷载增大到 388 kN 后,试件开始出

现明显的弯曲变形,进入塑性阶段。柱四侧截面应变开始出现较大差异,D 面由于柱弯曲变形,为受压侧,压力增加速度变快,应变发展速度也最为迅速,最后破坏时实心柱应变超过 12 000 $\mu\epsilon$,空心柱应变超过 7 500 $\mu\epsilon$;A、C 面由于构件变形应变也增大较快,最后破坏时实心柱应变超过 8 000 $\mu\epsilon$,空心柱应变超过 5 000 $\mu\epsilon$;B 面为受拉侧,进入塑性阶段后,应变反而减小,直至破坏。

2.4 理论分析

由于目前重组竹结构还没有具体规范,依据《木结构设计规范》对重组竹柱进行理论值计算(表 2)。

表 2 重组竹柱承载力

Table 2 Bearing capacity of glued laminated bamboo column				
构件规格	长度 /mm	截面 /mm	极限承载力 试验平均值 /kN	理论 计算值 /kN
实心柱	1 000	100×100	465	482.16
空心柱	1 000	外 100×100 (内 40×40)	418	414.66

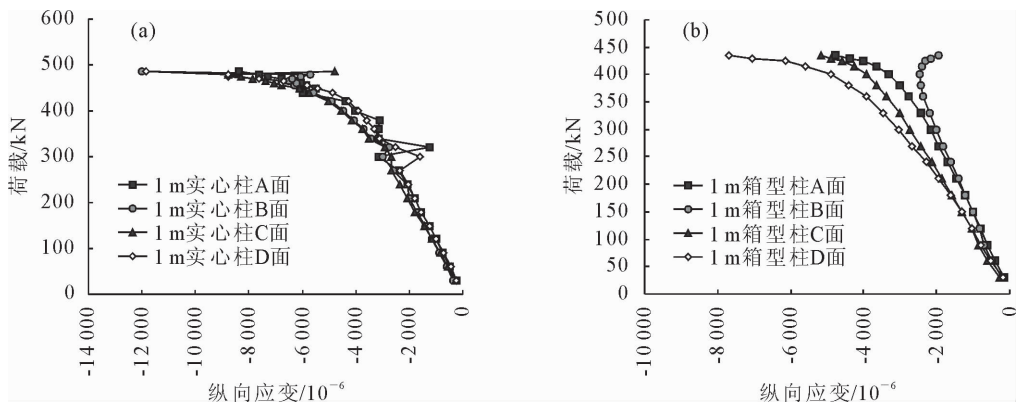
由表 2 可知,重组竹实心柱与空心柱试验值与依据《木结构设计规范》理论计算值吻合较好,说明《木结构设计规范》对重组竹柱的设计具有一定参考作用。

2.5 经济性分析

表 3 为实心柱与空心柱的用料比值及承载力比值,可以看出空心柱的承载力相比于实心柱相差并不是很大,并且材料用量减少,说明重组竹空心柱可以在实际工程中进行应用,并且重量轻、便于施工。

表 3 重组竹实心柱与空心柱对比

Table 3 The comparison of hollow column and solid column				
构件规格	长度 /mm	截面 /mm	构件用料 比值	承载力 比值
实心柱	1 000	100×100	1.19	1.11
空心柱	1 000	外 100×100 (内 40×40)		



注:(a)为重组竹实心柱荷载-应变图;(b)为重组竹空心柱荷载-应变图。

图 5 重组竹柱荷载-应变曲线

Fig. 5 Load-strain curves of glulam bamboo columns

3 结论与讨论

重组竹实心柱破坏模式为失稳破坏,并柱中出现轻微开裂;重组竹空心柱破坏模式同样为失稳破坏,并且上下两端端部出现明显裂缝,构件两端压溃破坏,指接处也发生锯齿状断裂。

重组竹实心柱极限荷载为空心柱的 1.11 倍,实心柱的延性系数为 1.66,空心柱的延性系数为 1.53,说明重组竹实心柱的承载力和延性更优。

重组竹实心柱与空心柱试验值与依据《木结构设计规范》理论计算值吻合较好,说明《木结构设计规范》对重组竹柱的设计具有一定参考作用。

空心柱的承载力相比于实心柱相差并不是很大,能满足承载力要求,并且材料消耗更少,重量轻,便于施工,能够应用在竹结构建筑中。但是由于空心柱的箱型结构,在梁柱连接节点设计时,是否还能与实心柱一样采用角钢和螺栓的连接方式,这种连接是否对空心柱的抗剪承载力有影响,采用何种连接方式最可靠这些还需要进一步的研究,以便保证重组竹空心柱在实际工程应用中的安全性。

参考文献:

[1] 李延军,许斌,张齐生.我国竹材加工产业现状与对策分析[J].林业工程学报,2016,1(1):2-7.
LI Y J,XU B,ZHANG Q S,*et al.* Present situation and the countermeasure analysis of bamboo timber processing industry in China [J]. Journal of Forestry Engineering,2016,1(1):2-7. (in Chinese)
[2] 于文吉.我国重组竹产业发展现状与趋势分析[J].木材工业,2012,26(1):11-14.
[3] 单炜,李玉顺.竹材在建筑结构中的应用前景分析[J].森林工程,2008(2):62-65.
SHAN W,LI Y S. Application prospect of bamboo utilization in building structures[J]. Forest Engineering,2008(2):62-65. (in Chinese)
[4] 肖忠平,张苏俊,束必清.碳化重组竹在竹结构建筑中的应用

[J]. 林产工业,2013(6):44-45,53.
[5] SINHA A, GUPTA R, NAIRN J A. Thermal degradation of bending properties of structural wood and wood-based composites[J]. Holzforschung,2011,65(2):221-229.
[6] 钟永,温留来,周海滨.竹层积材在高温中和高温后的抗弯性能研究[J].建筑材料学报,2014,17(6):1115-1120.
[7] 靳肖贝,张禄晟,李瑜瑶,等.3种阻燃剂对重组竹燃烧性能和物理力学性能的影响[J].西北林学院学报,2015,30(5):214-218.
JIN X B,ZHANG L S,LI Y Y,*et al.* Effects of three flame retardants on combustion,physical and mechanical properties of bamboo scrimber[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(5):214-218. (in Chinese)
[8] 李海涛,苏靖文,魏冬冬,等.基于大尺度试件重组竹各向轴压力学性能研究[J].郑州大学学报:工学版,2016,37(2):67-72.
LI H T,SU J W,WEI D D,*et al.* Comparison study on parallel bamboo strand lumber under axial compression for different directions based on the large scale[J]. Journal of Zhengzhou University:Engineering Science,2016,37(2):67-72. (in Chinese)
[9] 肖忠平,俞君宝,束必清,等.重组竹高温处理后的性能研究[J].西北林学院学报,2017,32(4):240-243,287.
XIAO Z P,YU J B,SHU B Q,*et al.* Study on the performance of glued laminated bamboo after high temperature treatment [J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(4):240-243,287. (in Chinese)
[10] 孙照斌.不同温度热压干燥时竹材的温度变化特性[J].西北林学院学报,2006,21(4):172-175.
SUN Z B. The characteristic of temperature distribution for bamboo timber during hot press drying[J]. Journal of Northwest Forestry University,2006,21(4):172-175. (in Chinese)
[11] 黄梦雪,张晓春,余文军,等.高温蒸汽软化竹材的力学性能及结构表征[J].林业工程学报,2016,1(4):64-68.
[12] 刘学.竹质建筑构件研究[D].长沙:中南林业科技大学,2013.
[13] 张苏俊,赵志高,张文娟,等.竹重组轴心受压试验研究[J].施工技术,2015,44(24):120-123.
[14] 魏洋,周梦倩,袁礼得,等.重组竹柱偏心受压力学性能[J].复合材料学报,2016,33(2):379-385.
[15] 苏靖文,吴繁,李海涛.重组竹柱轴心受压试验研究[J].中国科技论文,2015,10(1):39-41.