

文章编号:1674-2974(2016)05-0090-07

侧压竹集成材弦向偏压试验研究*

李海涛^{1, 2, 3†}, 吴刚², 张齐生¹, 陈国¹

(1. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096;
3. 南京林业大学 江苏林业资源高效加工利用协同创新中心, 江苏 南京 210037)

摘要:为了研究侧压竹集成材弦向偏压的力学性能,考虑偏心距的变化,设计18个长细比为36、截面为77 mm×77 mm、弦向偏压的竹集成材柱试件,进行试验研究与分析。结果表明:弦向偏压竹集成材柱的竹片接长部位或竹节部位为受拉区域的薄弱部位,其位置决定了偏压柱的破坏形式。随着偏心率的增大,C面的纵向和横向极限应变绝对值呈上升趋势,而A面及两侧面B面和D面的纵向和横向极限应变绝对值呈下降趋势。对于纵向极限应变,偏心距较小试件的试验结果离散性较大;对于横向极限应变,所有试件试验结果的离散性均较大。偏心距较小时,试件的极限承载力下降较快且离散性较大;偏心距较大时,极限承载力下降较慢。弦向偏压柱试件跨中截面平均应变基本上呈现线性分布,符合平截面假定。给出了弦向偏压竹集成材柱承载力计算公式,公式计算结果与试验结果吻合良好。

关键词:竹集成材;弦向偏压;偏心率;变形

中图分类号:TU398

文献标识码:A

Experimental Study on Side Pressure LBL under Tangential Eccentric Compression

LI Hai-tao^{1, 2, 3†}, WU Gang², ZHANG Qi-sheng¹, CHEN Guo¹

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry Univ, Nanjing, Jiangsu 210037, China;
2. College of Civil Engineering, Southeast Univ, Nanjing, Jiangsu 210096, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation
Center for Efficient Processing and Utilization of Forestry Resource, Nanjing Forestry Univ, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: In order to investigate the eccentric compression performance of side pressure laminated bamboo lumber (LBL), 18 LBL column specimens with the slenderness ratio of 36 and cross-section of 77 mm × 77 mm were designed considering different eccentricity, and loaded under tangential eccentric compression. The test results show that the bamboo-strip connections and bamboo joints are the weak zones for the LBL columns under tangential eccentric compression, which determine the failure modes. The ultimate longitudinal and lateral strains for Face C increased with the increase of the eccentricity ratio, while these values for Face A, Face B, and Face D decreased. The discreteness for the ultimate longitudinal strain of the specimens with small eccentricity was relatively large. However, the ultimate lateral strain values for all specimens exhibited obvious discreteness. After the ultimate strength, the load-carrying capacities of

* 收稿日期:2015-11-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51308301), National Natural Science Foundation of China(51308301);江苏省自然科学基金资助项目(BK20130978);中国博士后基金资助项目(2015M580382);江苏省博士后基金资助项目(1501037A);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介:李海涛(1982-),男,河南临颖人,南京林业大学副教授

† 通讯联系人, E-mail: lhaitao1982@126.com

the specimens with small eccentricity decreased significantly compared with those of the specimens with large eccentricity. However, the smaller eccentricity resulted in more evident discreteness of the ultimate load values. In addition, the strain was distributed linearly at the cross-section of the columns, which satisfies the plane-section assumption. Furthermore, an equation to predict the eccentricity influencing coefficient on the bearing capacity of laminated bamboo lumber columns was proposed. The predictions gave a good agreement with the test results.

Key words: laminated bamboo lumber; tangential eccentric compression; eccentricity ratio; deformation

竹材引起越来越多学者^[1-9]的关注.竹集成材^[8]是将速生、短周期(通常 3~6 年)的竹材加工成定宽、定厚的竹片(去竹青、竹黄),干燥至 8%~12% 的含水率,再用胶黏剂将竹片胶合而成的型材.李海涛等^[8]、Wei Y 等^[9]、Sinha A 等^[10]、Lima Douglas Mateus de 等^[11]均对竹集成材梁的力学性能开展了研究.Luna P 等^[12]研究了长细比对竹(瓜多竹)集成材实心 and 空心方柱力学性能的影响,但实心柱截面尺寸只有 50 mm,空心柱截面尺寸为 100 mm.李海涛等^[13-15]研究了由不同原竹部位制作的短柱轴心受压力学性能,还考虑长细比因素的影响,探讨了竹集成材柱轴压破坏机理.苏靖文等^[16]探讨了竹集成材方柱墩的轴心受压各向力学性能.李海涛等^[17]考虑偏心距的影响,初步探讨了重组竹柱的偏压力学性能.整体上讲,国内外学者对竹集成材柱力学性能的研究较少,对其偏心受压力学性能的研究更少.由于竹材或木材的抗剪性能较差,对其展开偏压力学性能试验的装置较复杂,这是该领域研究较少的一个原因.实际工程中的柱常是偏心受压,并且制作或施工工艺误差等原因也会造成一定的偏心.在此背景下,本文对侧压竹集成材方柱弦向偏压的破坏机理展开了试验研究.

1 试验情况

1.1 试件设计与制作

选用的毛竹产自江西靖安.为保证材性的稳定,统一选取根部原竹制作竹集成材试件,采用的胶黏剂为酚醛胶,竹片截面尺寸为 8 mm × 21 mm,排列方式见图 1(a).单个竹片的长度方向采用了机械连接,见图 1(b).竹集成材的实测含水率为 7.6%;密度为 635 kg/m³;抗压强度为 58.68 MPa;弹性模量为 9 643 MPa;极限荷载对应的极限压应变为 0.05;泊松比为 0.338.

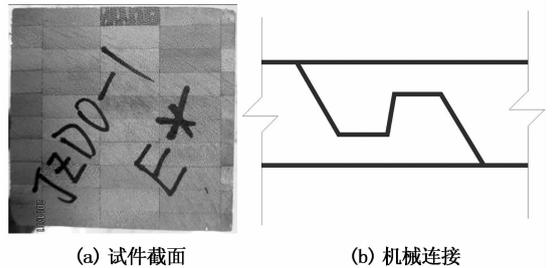


图 1 竹集成材

Fig. 1 Laminated bamboo lumber

考虑偏心距的影响,设计 6 组长细比^[21]为 36 的试件,每组 3 个,共 18 根;其中一组为轴心受压试件;其余组对应的偏心距 e_0 分别为 25 mm, 40 mm, 55 mm, 70 mm 和 85 mm,试件截面宽度 b 和高度 h 均为 77 mm,长度 L 均为 800 mm.试验设计偏心方向示意图见图 2(a),为弦向偏心.竹条矩形断面长向沿 x 轴方向.正对读者的面标为“ A ”,右侧面为“ B ”,左侧面为“ D ”,背面为“ C ”.

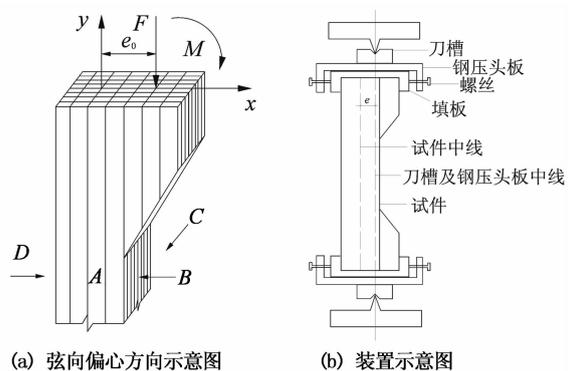


图 2 试验示意图

Fig. 2 Tangential eccentric direction sketch

1.2 试验加载制度

依据 GB/T 50329-2012^[18]进行加载制度设计和试验.试验示意图见图 2(b).采用的加载仪器为新三思 100 t 电液伺服长柱试验机.试件加载初期采用荷载控制,荷载达到极限荷载 80% 左右,改为位移控制.试验从加载到破坏所用时间控制在 5~

10 min 以内. 试验在南京林业大学结构实验室完成.

1.3 测定布置

测量内容包括:柱中部、横向和纵向应变、沿柱高度三分点的侧向挠度及竖向荷载等. 试件跨中侧面均贴有横向和竖向应变片, 试件 B 面、C 面、D 面均布置一个横向应变片和一个纵向应变片; A 面除布置一个横向应变片外, 沿侧面高度粘贴 5 个竖向应变片, 测试柱跨中沿截面高度方向的应变变化, 应变片布置方式见图 3. 在试件 D 面侧向位置对应三分点共布置 3 个激光位移传感器 (LDS, Keyence 牌, 型号为 IL-300), 测试侧向变形, 另布置 2 个激光位移传感器测试轴向变形.

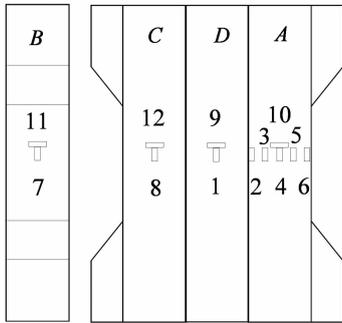


图 3 应变片布置

Fig. 3 Strain gauge arrangement

2 试验结果与分析

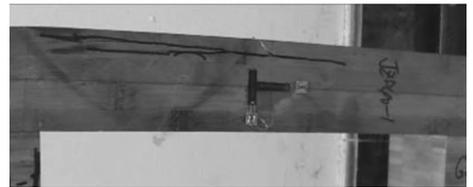
2.1 破坏形态与分析

根据试件的破坏过程和最终破坏形态, 可将其分为 3 类. 第一类破坏: 受拉侧柱高度中心线位置附近首先出现裂缝而导致试件的破坏. 当加载到极限荷载附近时, 试件侧向变形较大, 柱中部受拉侧 D 面最外层竹片首先断裂; 继续加载, 竹纤维由受拉侧最外层向内层层断裂, 断裂的竖向裂缝沿着 A 面、D 面和 C 面向柱子两端延伸, 最终导致试件破坏. 本次试验中, 多数试件发生此类破坏, 典型破坏形式见图 4(a), 对应表 1 中的 M. 第二类破坏: 非牛腿区域受拉侧靠近牛腿位置附近首先出现裂缝并向柱中部延伸而导致的破坏. 这类试件在荷载值达到极限荷载开始下降时, 非牛腿区域靠近牛腿的受拉侧最外层竹片首先断裂; 随着加载的持续, 竹纤维层层断裂并且裂缝向柱中部延伸, 最终导致试件破坏. 典型破坏形式见图 4(b), 对应表 1 中的 L. 本次试验中, 发生该类破坏的试件为 JZD40-1 和 JZD55-2. 第三类破坏: 牛腿区域受拉侧最外层纤维首先出现断裂而

导致的破坏. 该类试件在加载到极限荷载时, 牛腿区域受拉侧最外层竹片首先出现断裂; 随着加载的继续, 裂缝向柱中部延伸, 并且受拉侧纤维层层断裂, 导致试件承载力急剧降低. 典型破坏形式见图 4(c), 对应表 1 中的 B. 发生该类破坏的试件为 JZD40-3 和 JZD55-3.



(a) 第一类破坏(JZD25-2)



(b) 第二类破坏(JZD40-1)



(c) 第三类破坏(JZD40-3)

图 4 典型的破坏形式

Fig. 4 Typical failure modes

仔细观察所有试件首先出现破坏的位置, 发现破坏的原因有两类, 其一, 竹片机械连接 (见图 1) 位置胶层开裂, 由于胶缝位置的纤维已经打断, 只有胶的连接, 胶的强度不够时, 连接位置会首先出现开裂, 见图 5. 其二, 自然竹节部位首先断裂. 竹节部位是竹材的薄弱部位, 该部位抗拉强度较其它部位低, 在拉力作用下, 易断裂.

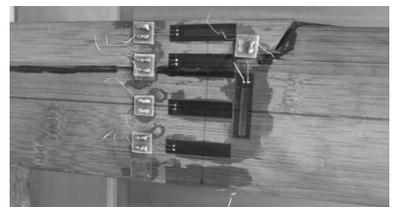


图 5 机械连接破坏

Fig. 5 Mechanical connection failure

2.2 主要试验结果

轴心受压柱均发生失稳破坏, 实测的极限荷载分别为 274.7 kN, 270.2 kN, 275.0 kN. 偏压试件试

验结果见表 1,表中 N_u 为极限荷载; ω_u 为极限荷载对应的柱中部挠度; $\epsilon_{uasD}, \epsilon_{ulsD}$ 分别为极限荷载对应的柱中部受拉侧(D 面)竖向应变和横向应变; $\epsilon_{uasB}, \epsilon_{ulsB}$ 分别为极限荷载对应的柱中部受压侧(B 面)竖向应变和横向应变; M 表示受拉侧柱高度中心线位置附近首先出现裂缝并向两端延伸而导致试件的破坏; L 表示非牛腿区域受拉侧靠近牛腿位置附近首先出现裂缝并向柱中部延伸而导致的破坏; B 表示牛腿区域受拉侧最外层竹片首先出现断裂而导致的破坏. GB 50005-2003^[19]中规定受弯构件跨中最大挠度不能超过跨度的 1/250,对于跨度为 800 mm

的试件,规范容许挠度不超过 3.2 mm;由表 1 知,对于所测试件,无论偏心距大小,其极限荷载对应的挠度均大于 3.2 mm,为规范规定挠度的 6 倍以上,GB 50005-2003^[19]的要求是基于正常使用极限状态来规定的,即使考虑安全可靠度等因素,实测大偏心距试件的极限挠度仍远远大于规范规定. 本次试验结果表明,对于弦向偏压竹集成材柱,控制其设计的是变形或刚度而不是强度. 另外试件极限压应变均远小于竹集成材的实测极限压应变,说明材料的抗压强度没充分发挥.

表 1 试验结果
Tab. 1 Test results

试件编号	N_u/kN	ω_u/mm	$\epsilon_{uasD}/\mu\epsilon$	$\epsilon_{uasB}/\mu\epsilon$	$\epsilon_{ulsD}/\mu\epsilon$	$\epsilon_{ulsB}/\mu\epsilon$	破坏形态
JZD25-1	113.4	24.0	8 963	-1 834.9	-2 044	5 397	M
JZD25-2	103.4	19.5	6 844	-11 016	-1 542	3 680	M
JZD25-3	110.6	19.3	7 551	-14 102	-2 191	4 067	M
JZD40-1	73.0	24.2	7 317	-10 266	-1 748	3 158	L
JZD40-2	88.4	26.5	9 348	-14 633	-1 909	5 241	M
JZD40-3	83.3	23.1	4 964	-9 680	-	3 183	B
JZD55-1	70.5	23.3	9 399	-15 417	-2 540	4 930	M
JZD55-2	63.3	24.2	8 228	-10 547	-1 841	4 038	L
JZD55-3	59.8	20.3	6 497	-9 545	-1 720	2 473	B
JZD70-1	55.3	24.4	8 483	-13 723	-2 049	3 447	M
JZD70-2	55.6	26.7	8 542	-11 786	-2 104	2 615	M
JZD70-3	56.2	22.1	9 305	-12 438	-2 500	3 378	M
JZD85-1	51.7	25.0	9 240	-11 697	-2 261	4 071	M
JZD85-2	48.6	26.8	8 550	-12 042	-2 907	4 262	M
JZD85-3	45.7	19.5	9 160	-10 199	-1 987	2 752	M

2.3 荷载纵向应变关系

为了研究试件从开始加载到破坏整个过程的受力情况,选代表性试件,绘出跨中截面的荷载-纵向应变关系曲线,见图 6.

由图 6 可知,在加载初始阶段,竹集成材处于弹性状态,荷载-应变曲线呈线性变化. 轴压试件在加载初期 4 个侧面的应变比较接近,随荷载的增加,4 个应变值的差别开始增大,荷载增大到 50 kN 后,4 个侧面的应变值差别越来越明显. 对于偏心距较小的试件在极限荷载之前,试件跨中截面受拉区应变较小,且发展缓慢,而受压区应变发展较快;由于试件具有初始偏心,随着荷载的增大,纵向应变发展逐步加快,待加载到极限荷载后,试件跨中截面受拉侧外层竹片接长部位(见图 1(b))或竹节部位开裂,退出工作,荷载骤减,截面应力重分布,试件侧面变形迅速发展,受拉侧竹片层层劈裂. 对于大偏心受压试件,由于初始偏心距较大,附加弯矩影响显著,试件

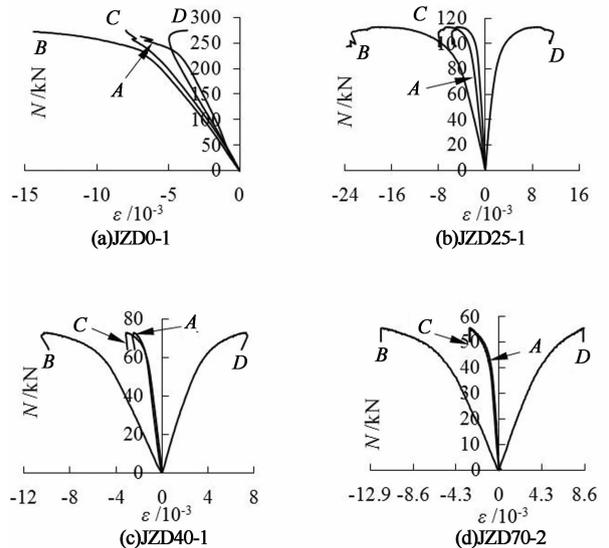


图 6 荷载-纵向应变曲线
Fig. 6 Load-axial strain curves

跨中截面受拉区和受压区应变均发展较快. 整体上

讲,本次试验轴心受压试件 4 个侧面的应变值一直为负值,即 4 个侧面一直承受压力;偏心受压试件有 3 个侧面(A 面、B 面、C 面)以承受压力为主,而 1 个侧面(D 面)以承受拉力为主。

2.4 荷载变形曲线

图 7 给出了实测各试件的荷载与柱中部侧向挠度之间的关系曲线。对于弦向偏心受压试件,由于有初始偏心,在加载初期,试件中部侧向挠度随荷载的增大而增加,跨中挠曲变形较为明显,荷载-挠度曲线呈线性发展;偏心距越大,跨中挠度增加越快,相同荷载下试件变形越大。随着荷载的增加,偏心距较大的试件较快进入非线性阶段。最后,试件在达到极限荷载后,因跨中挠度过大,使得各试件受拉侧中部或牛腿附近竹片接长部位(见图 1)或竹节部位断裂致使整个试件丧失承载力而破坏。

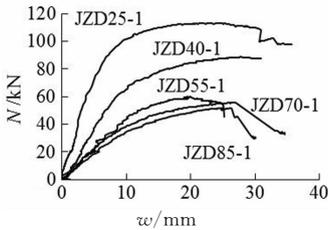


图 7 荷载-挠度关系曲线
Fig. 7 Load-deflection curves

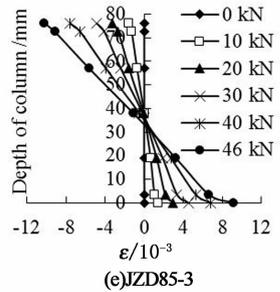
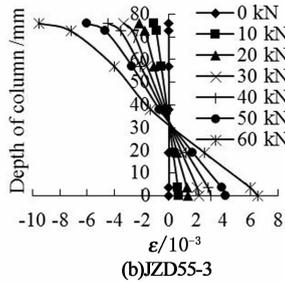
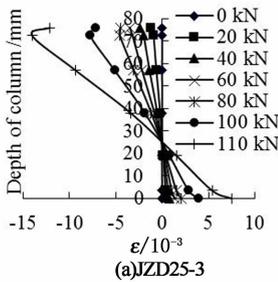


图 9 截面应变分布
Fig. 9 Strain profile for the cross section

2.6 极限值与偏心率

图 10 和图 11 分别给出了试件 3 个代表性侧面纵向和横向极限应变随偏心率变化的关系。极限应变为极限荷载对应的应变,偏心率为 e_0/h 。由图 10 可看出,在本次试验范围内 D 面的纵向极限拉应变,随着偏心率的增大有增大的趋势;B 面和 C 面的纵向极限压应变绝对值,随着偏心率的增大有减小的趋势;对于纵向极限应变,偏心距较小的试件离散性较大。由图 11 可看出,在本次试验范围内 D 面横向极限压应变的绝对值,随着偏心率的增大有增

大的趋势;C 面和 B 面的横向极限拉应变绝对值,随着偏心率的增大有减小的趋势;对于横向极限应变,所有试件试验结果的离散性均较大。

图 8 为实测的各试件的荷载与纵向位移之间的关系曲线, s 为纵向位移。由图 8 可知,在加载初期,荷载-纵向位移曲线基本沿线性发展。对于弦向偏压试件,由于有初始偏心,纵向位移随荷载的增加快于轴心受压试件,偏心距越大,纵向位移增加越快。

综合图 7 和图 8,对比荷载-挠度曲线和荷载-纵向位移曲线可知,试件的极限荷载随着偏心距的增大而减小。偏心距越大,曲线的上升段越平缓,挠度和纵向位移的增加发展就越快。

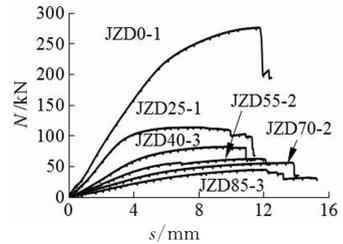


图 8 荷载-纵向位移曲线
Fig. 8 Load-longitudinal displacement curves

2.5 平截面假定验证

典型的跨中截面平均应变分布实测结果见图 9。由图可见,试件在初期加载过程中,沿截面高度各纤维的平均应变基本上为直线,截面应变分布基本符合平截面假定;随着荷载的增大,应变值出现偏离直线的趋势,偏心距越大,这种趋势越明显。

图 12 (a), (b) 分别给出了试件纵向位移和侧向挠度极限值随偏心率变化的关系。极限值均为极限荷载对应的位移, s_u 为纵向极限位移。由图可看出,在本次试验范围内纵向极限位移随着偏心率的增大有明显增大的趋势,而侧向挠度极限值受偏心率的影响较小。偏心距较小的试件,实测的纵向极限位移离散性较小,偏心距越大,离散性越大。

图 12 (a), (b) 分别给出了试件纵向位移和侧向挠度极限值随偏心率变化的关系。极限值均为极限荷载对应的位移, s_u 为纵向极限位移。由图可看出,在本次试验范围内纵向极限位移随着偏心率的增大有明显增大的趋势,而侧向挠度极限值受偏心率的影响较小。偏心距较小的试件,实测的纵向极限位移离散性较小,偏心距越大,离散性越大。

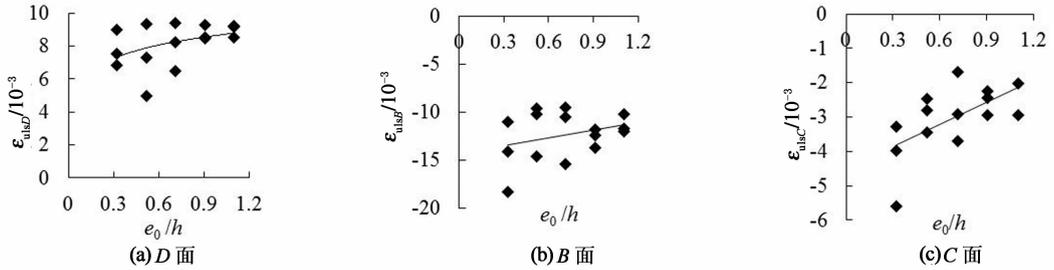


图 10 纵向极限应变与偏心率的关系

Fig. 10 Relationship between the ultimate axial strain and eccentricity ratio

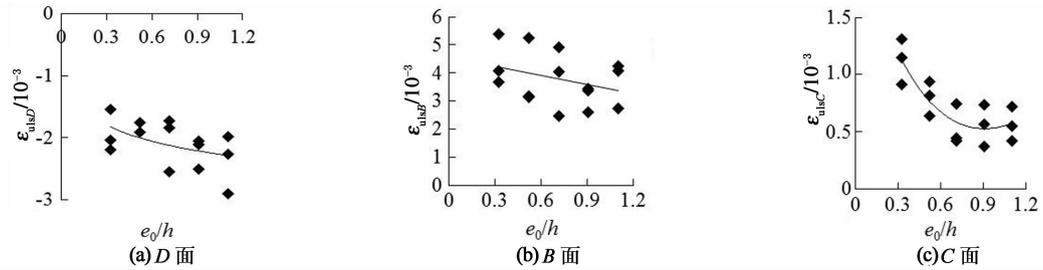


图 11 横向极限应变与偏心率的关系

Fig. 11 Relationship between the ultimate lateral strain and eccentricity ratio

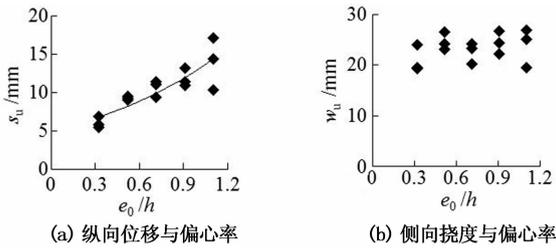


图 12 位移与偏心率的关系

Fig. 12 The displacement and eccentricity ratio relationship

影响系数; N_0 为轴压柱的极限承载力.

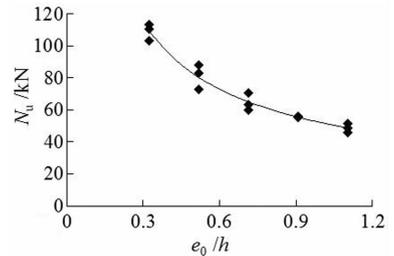


图 13 荷载与偏心率的关系

Fig. 13 Load and eccentricity ratio relationship

图 13 给出了实测各试件极限荷载与其偏心率之间的关系曲线. 由图 13 可看出, 试件的极限承载力随着偏心距的增大而减小. 偏心率较小时, 随着偏心率的增大, 试件极限承载力下降比较快; 偏心率较大时, 试件极限承载力下降相对较缓慢. 由图 13 还可看出, 偏心距较小的试件离散性大一些.

3 承载力计算

确定沿弦向偏压竹集成材柱承载力计算公式为:

$$N_u = \varphi_e N_0. \tag{1}$$

式中: N_u 为弦向偏压柱的极限承载力; φ_e 为偏心距

根据试验结果, 经过回归分析和理论计算, 可确定偏心距影响系数 φ_e 的表达式为

$$\varphi_e = 0.34(e_0/h)^2 - 0.7e_0/h + 0.61. \tag{2}$$

将式(2)代入式(1), 即可进行弦向偏压竹集成材柱承载力的计算. 为了验证公式的正确性, 用所推导公式计算的值同试验值作比较, 见表 2. 表 2 中, N_u^t 为偏压柱试验值的平均值, N_u^c 为依据推导公式的计算值, μ 为 N_u^t/N_u^c 的平均值. 对比发现, 变异系数和标准差均比较小, 可见推导公式的计算结果与试验结果吻合良好.

表 2 计算结果与试验结果对比

Tab. 2 Comparison between calculation results and test results

试件	e_0 /mm	e_0/h	N_u^t /kN	φ_e	N_u^c /kN	$\mu = N_u^t/N_u^c$	标准差	变异系数
JZD25	25	0.32	109	0.399	109	1.00	0.047 0	0.047 0
JZD40	40	0.52	81.6	0.307	83.9	0.97	0.093 5	0.096 2
JZD55	55	0.71	64.5	0.241	65.8	0.98	0.083 0	0.084 6
JZD70	70	0.91	55.7	0.200	54.7	1.02	0.008 1	0.008 0
JZD85	85	1.10	48.7	0.185	50.7	0.96	0.059 1	0.061 5

4 结 论

根据试验研究与分析结果,得出结论如下:

1) 弦向偏压竹集成材柱的破坏形式可分为三类:受拉侧柱高度中心线位置附近首先出现裂缝而导致试件的破坏;非牛腿区域受拉侧靠近牛腿位置附近首先出现裂缝并向柱中部延伸而导致的破坏;牛腿区域受拉侧最外层纤维首先出现断裂而导致的破坏。竹片接长部位及竹节部位为弦向偏压柱受拉区域的薄弱部位,该位置决定了偏压柱的破坏形态。

2) 弦向偏压柱跨中截面平均应变基本上呈现线性分布,符合平截面假定。试件中竹材的抗压强度没有充分发挥,破坏时的跨中挠度远超规范的规定值。

3) 沿弦向偏心,随着偏心率的增大,柱受拉侧 C 面的纵向和横向极限应变绝对值呈上升趋势,而受压侧 A 面及对称两侧面 B 面和 D 面的纵向和横向极限应变绝对值呈下降趋势。对于纵向极限应变,偏心距较小的试件离散性较大;对于横向极限应变,所有试件试验结果的离散性均较大。

4) 偏心距是影响竹集成材柱力学性能的主要因素之一,随着构件偏心距的增大,试件的刚度和极限承载力均呈下降趋势。偏心率较小时,随着偏心率的增大,试件极限承载力下降比较快,但试验结果离散性较大;偏心率较大时,试件极限承载力下降相对较缓慢,且试验结果离散性较小。

5) 在试验研究与分析的基础上,给出了弦向偏压竹集成材柱稳定承载力计算公式,推导公式的计算结果与试验结果吻合良好。

参 考 文 献

- [1] WU Wen-qing. Experimental analysis of aending resistance of bamboo composite I-shaped beam [J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(4): 04013014-1-13.
- [2] 肖岩,单波. 现代竹结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2013. XIAO Yan, SHAN Bo. Modern bamboo structures[M]. Beijing, China Architecture & Building Press, 2013. (In Chinese)
- [3] 陈国,张齐生,黄东升,等. 胶合竹木工字梁受弯性能的试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2015,42(5):72-79. CHEN Guo, ZHANG Qi-sheng, HUANG Dong-sheng, et al. Bending tests of OSB webbed bamboo I-joist [J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2015, 42(5): 72-79. (In Chinese)
- [4] 单波,高黎,肖岩,等. 预制装配式圆竹结构房屋的试验与应用[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2013,40(3):7-14. SHAN Bo, GAO Li, XIAO Yan, et al. Experimental research and application of prefabricated bamboo pole house[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2013, 40(3): 7-14. (In Chinese)
- [5] 陈国,张齐生,黄东升,等. 腹板开洞竹木工字梁受力性能的试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2015,42(11):17-24. CHEN Guo, ZHANG Qi-sheng, HUANG Dong-sheng, et al. Experimental study on mechanical performance of I-joist bamboo wood beam

with holes on the web [J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2015, 42(11): 17-24. (In Chinese)

- [6] 吴秉岭,余养伦,齐锦秋,等. 竹束精细疏解与炭化处理对重组竹性能的影响[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2014,38(6):115-120. WU Bing-ling, YU Yang-lun, QI Jing-qiu, et al. Effects of bamboo bundles treated with fine fluffing and carbonized treatment on the properties of bamboo scrimber[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science, 2014, 38(6): 115-120. (In Chinese)
- [7] 魏洋,骆雪妮,周梦倩. 纤维增强竹梁抗弯力学性能研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2014,38(2):11-15. WEI Yang, LUO Xue-ni, ZHOU Meng-qian. Study on flexural mechanical performance on bamboo beams reinforced with FRP[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences, 2014, 38(2): 11-15. (In Chinese)
- [8] 李海涛,苏靖文,张齐生,等. 侧压竹材集成材梁试验研究与分析[J]. 建筑结构学报,2015,36(3):121-126. LI Hai-tao, SU Jing-wen, ZHANG Qi-sheng, et al. Experimental study on mechanical performance of side pressure laminated bamboo beam [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(3): 121-126 (In Chinese)
- [9] WEI Y, JIANG S X, LV Q F, et al. Flexural performance of glued laminated bamboo beams[J]. Advanced Materials Research, 2011, 168/170: 1700-1703.
- [10] SINHA A, WAY D, MLASKOI S. Structural performance of glued laminated bamboo beams[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140(1): 04013021-1-8.
- [11] DOUGLAS MATEUS D E L, MARIANA MENDES A, HUMBERTO CORREIA J, et al. Avaliação do comportamento de vigas de bambu laminado colado submetidas à flexão Behavior analysis of glued laminated bamboo beam under bending[J]. Ambiente Construído, 2014, 14(1): 15-27.
- [12] LUNA P, TAKEUCHI C, ALVARDO C, et al. Glued laminated guadua angustifolia bamboo columns [C]// Acta Horticulturae. Belgium: Int Soc Horticultural Science, 2013: 125-129.
- [13] 李海涛,张齐生,吴刚. 侧压竹集成材受压应力应变模型[J]. 东南大学学报:自然科学版,2015,45(6):1130-1134. LI Hai-tao, ZHANG Qi-sheng, WU Gang. Stress-strain model under compression for side pressure laminated bamboo[J]. Journal of Southeast University: Natural Science, 2015, 45(6): 1130-1134. (In Chinese)
- [14] LI Hai-tao, ZHANG Qi-sheng, HUAN Dong-sheng, et al. Compressive performance of laminated bamboo [J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 54(1): 319-328.
- [15] LI Hai-tao, SU Jing-wen, ZHANG Qi-sheng, et al. Mechanical performance of laminated bamboo column under axial compression [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 79: 374-382.
- [16] 苏靖文,李海涛,张齐生,等. 竹材集成材方柱墩各向轴压力学性能研究[J]. 林业科技开发,2015,29(4):45-49. SU Jing-wen, LI Hai-tao, ZHANG Qi-sheng, et al. Dongsheng huang. mechanical performance study on laminated bamboo lumber column pier under axial compression [J]. China Forestry Science and Technology, 2015, 29(4): 45-49 (In Chinese)
- [17] LI Hai-tao, SU Jing-wen, DEEKS A J, et al. Eccentric compression performance of parallel bamboo strand lumber column [J]. BioResources, 2015, 10(4): 7065-7080.
- [18] 中华人民共和国标准 GB/T 50329-2012 木结构试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012. The Standard of the People's Republic of China, GB/T 50329-2012 Standard for test methods of timber structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (In Chinese)
- [19] 中华人民共和国标准 GB 50005-2003 木结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2004. The Standard of the People's Republic of China, GB 50005-2003 Code for design of timber structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (In Chinese)