

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.164



开放科学(资源服务)标识码OSID:



侧压竹集成材梁受剪承载力试验研究

邓谋韬, 陈伯望, 谢亚孜, 王怀, 陈璇
(中南林业科技大学 土木工程学院, 长沙 410004)

摘要:竹集成材是一种融入了现代加工技术且强质比高、环保美观的工程复合材料。为研究剪跨比对侧压竹集成材梁受剪承载力的影响,设计了剪跨比分别为0.75、1.0、1.5、2.0和2.5的5组(每组3根)竹集成材梁进行四点弯曲试验,研究侧压竹集成材梁在荷载作用下的变形特征、破坏形式及剪跨比的影响规律,探究竹集成材梁抗剪性能的影响因素及其承载能力的计算方法。结果表明,竹集成材梁具有较高的承载力和刚度;其受剪承载力与剪跨比有关;当剪跨比小于1.5时,发生层间剪切破坏,而大于等于1.5时,发生弯曲破坏。提出了竹集成材梁的受弯承载力、受剪承载力和弹性变形计算公式,计算结果与实测值吻合较好。

关键词:侧压竹集成材梁;剪跨比;受剪性能;破坏形式;承载力

中图分类号:TU366.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2023)02-0158-08

Experimental study on shear capacity of side-loaded bamboo-integrated beams

DENG Moutao, CHEN Bowang, XIEYazi, WANG Huai, CHEN Xuan

(College of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, P. R. China)

Abstract: Bamboo composite is a kind of engineering composite bamboo with modern processing technology, high strength and quality ratio, environmental protection and beautiful appearance. In order to study the influence of shear-span ratio on the shear capacity of side-loaded bamboo-integrated beams, five groups of three beams in each group with shear-span ratio of 0.75, 1.0, 1.5, 2.0 and 2.5 were designed to carry out four-point bending tests. The deformation characteristics, failure modes and the influence of shear-span ratio of side-loaded bamboo-integrated beams were studied. The influencing factors of shear performance and the calculation method of bearing capacity of bamboo composite beams were studied. The results show that the bamboo composite beams have higher bearing capacity and stiffness, and the shear capacity is related to the ratio of shear span. When the shear span ratio is less than 1.5, interlaminar shear failure occurs, while when the shear span ratio is greater than or equal to 1.5, bending failure occurs. The formulas for calculating the flexural bearing capacity, shear bearing capacity and elastic deformation of bamboo composite beams are put forward, which is in good agreement with the measured values.

收稿日期:2021-02-03

基金项目:湖南省创新创业技术投资项目(2019GK5087)

作者简介:邓谋韬(1996-),男,主要从事侧压竹集成材研究,E-mail:714277091@qq.com。

陈伯望(通信作者),男,博士,教授,E-mail:644746697@qq.com。

Received:2021-02-03

Foundation item: Innovation and Entrepreneurship Technology Investment Project of Hunan Province(2019GK5087)

Author brief: DENG Moutao (1996-), main research interest: side pressed bamboo aggregate, E-mail: 714277091@qq.com.

CHEN Bowang (corresponding author), PhD, professor, E-mail: 644746697@qq.com.

Keywords: side-loaded bamboo-integrated beams; shear span ratio; shear performance; mode of failure; bearing capacity

现代建筑结构主要以混凝土结构、钢结构为主,需要消耗大量钢材、水泥,为了实现节能环保,中国乃至全世界都在大力推广木材及竹材,在此背景下,竹材在建筑领域内的应用越来越广^[1-2]。中国竹材资源非常丰富,竹材的种类和竹林的面积占世界的1/4,产量居世界第一^[3-4]。

学者们对竹材的受力性能进行了诸多探索。在竹材的抗剪试验研究方面,在考虑试件的剪跨比、截面高宽比条件下,李海涛等^[5]对14个侧压竹集成材简支梁试件进行了研究,验证了截面平均应变呈线性分布的结论。唐卓^[6]通过对胶合竹工字梁的试验研究,为其设计和应用提供参考。Xiao等^[7]参考《木材无疵小试样的标准试验方法标准》(ASTMD143-14),验证了平面内抗剪强度、平面外抗剪强度值均服从正态分布的结论,并建立了格鲁班面外剪切强度的经验公式。李佳等^[8]从双向竹纤维数量的角度对格鲁班胶合竹材的抗剪性能做了比较深入的研究,并给出了材料的容许应力值、结构构件的抗力计算公式、95%保证率下剪切强度的标准值和设计值。李玉顺等^[9]对9根钢-竹组合工字梁进行受剪性能试验,分析了组合梁的破坏过程、破坏机理,并提出了组合梁的受弯、受剪承载力公式。李冉等^[10]通过试验证明了增加翼缘和腹板处竹胶板厚度可提高组合梁的受剪承载力。Correal等^[11]对胶合层合瓜竹(GLG)的物理力学性质进行了全面研究,研究表明,剪切通过gua-dua基体是剪切纤维的典型破坏模式,胶粘剂的剪切阻力不是控制因素。Correal等^[12]还对胶合层合瓜竹的粘结性能进行了较全面的研究,研究表明,在考虑经济性、强度和耐久性的条件下,50%脲醛(UF)和50%三聚氰胺甲醛(MF)为胶合层瓜竹结构应用的最佳胶粘剂。Jakovljević等^[13]研究了干湿程度对毛竹力学性能的影响,得到了在潮湿条件下毛竹的参数预测模型。在竹结构(梁、柱)的试验研究方面,Nugroho等^[14]将6块竹层积板用3种不同方式组合在一起,研究其受弯性能,结果发现,3种不同组合对断裂模量和弹性模量没有明显影响,竹集成材的受弯性能可与单板层积材相媲美。在竹结构的抗剪试验研究方面,Penellum等^[15]将纤维体积分数分析结果与弯曲试验结果进行比较,发现纤维体积分数分析是竹

梁刚度无损评价的有效方法。Kim等^[16]研究了3种不同方法提取的竹纤维束的拉伸强度和界面剪切强度(IFSS),并比较了其在3种不同条件下的分布。Tan等^[17]介绍了一系列功能梯度竹材结构力学性能的多尺度试验结果和数值模型结果。

从目前的研究来看,学者们对竹集成材的抗弯及抗压等力学性能研究较多,但对其抗剪性能研究甚少,为了弥补对抗剪性能研究的不足,笔者对竹集成材梁的抗剪性能进行探究。以剪跨比作为变化参数,采用四点弯曲试验方法,对侧压竹集成材梁的抗剪性能进行研究。取剪跨比为0.75、1.0、1.5、2.0、2.5的5组15根梁进行承载力试验,探究其变形规律、破坏形式,对侧压竹集成材的抗剪性能进行研究,并推导其抗剪承载力计算公式。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验所用侧压竹集成材梁均由湖南风河竹木科技股份有限公司加工制作完成。以梁的剪跨比为变量设计5组试件,每组3根,梁的跨度和截面尺寸保持不变,试件具体尺寸如表1所示。

表1 试件尺寸
Table 1 Specimen size

编号	剪跨比	截面	长度 /mm	跨度 /mm	根数	剪跨/ mm
CL1	0.75	60 mm×120 mm	1 440	1 200	3	90
CL2	1.0	60 mm×120 mm	1 440	1 200	3	120
CL3	1.5	60 mm×120 mm	1 440	1 200	3	180
CL4	2.0	60 mm×120 mm	1 440	1 200	3	240
CL5	2.5	60 mm×120 mm	1 440	1 200	3	300

1.2 试验装置

试验在中南林业科技大学结构实验室完成。试验前,先架好竹梁,确定好支座、剪跨处和加载点处中线并对中划线。竹梁底部左右两端分别布置可动铰支座和固定铰支座,根据剪跨距离在梁顶相应位置对称放置两个呈对称的铰支座,在跨中和支座两端各布置一只百分表,用于记录位移。在分配梁跨中上方放置20 t压力传感器和千斤顶。在竹材梁跨中截面等距离粘贴5片型号为120-80AA免焊

接应变片,在一侧剪跨中线处粘贴一枚应变花,用以测量弯剪段最大剪应力,应变片数据由DH3818东华静态应变系统采集。加载装置示意图如图1所示。

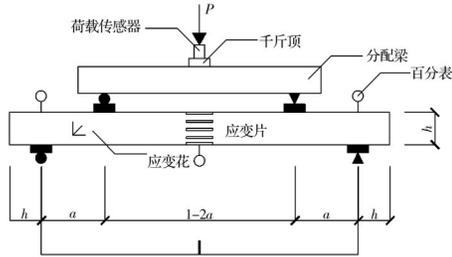


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test device

1.3 试验方法

采用四点弯曲即两点对称加载法进行分级加载。由于竹结构试验没有相应的规范,试验设计参考《木结构试验方法标准》(GB/T 50329—2012)^[18]中的相关内容。

加载前先预加载,观察传感器和百分表是否正常。加载前先估算其极限承载力,如果极限承载力在150 kN之内,在弹性阶段,每级加载为3 kN,在进入弹塑性破坏阶段及接近破坏时,改用每级1 kN加载。对于极限承载能力在150~300 kN的梁,弹性阶段每级加载为6 kN,在进入弹塑性破坏阶段以及接近破坏时,改用3 kN加载,直至试件完全破坏,试验时记录好数据并精确采集。数据采集的内容包括每级荷载下的应变、跨中及两端的位移。

2 试验现象

加载初期CL1组试件为弹性变形阶段,未见明显裂缝出现;随着荷载的增加,试件表现出一定的塑性变形,刚度逐渐降低,变形更加明显。加载过程中,试件梁不断发出“吱吱”的纤维断裂声;加载

到192 kN时,支座处发生脆响,出现细小水平裂缝。随着加载的继续,内部竹纤维逐渐撕裂,加载到222 kN时,左端层间开裂,发出巨大声响,出现明显水平裂缝,如图2(a)所示。梁被分为两部分,裂缝向跨中延伸,加载到232 kN时,试件从跨中断裂,发出巨大声响,达到其极限承载力而发生破坏,破坏前无明显征兆,属于层间剪切破坏。

CL2组试验梁破坏现象与CL1相似,加载到117 kN时,试件开始不断发出纤维撕裂的灼烧声;加载到151 kN时,试件发生巨响,胶合能力不足以抵抗荷载作用所产生的层间剪切力,试件在距左端梁底1/3处发生横向层间滑移,左端层间出现细微裂缝,如图2(b)所示。裂缝向跨中延伸,同时,支座处下缘纤维拉断翘起,出现细小裂缝,裂缝也向跨中延伸。加载到157 kN时,试件层间裂缝逐渐增大,随后跨中发生断裂,伴随剧烈响声,达到其极限承载能力,之后荷载下降至30 kN左右。

CL3组试件的破坏形式与前2组梁不同,加载初期,跨中挠度随荷载的变化而呈线性变化,当加载到78.1 kN时,试件发出轻微响声;加载到114.3 kN时,试件发出撕裂的声音,在靠近加载点处底部竹纤维拉断,随即出现水平通缝,随着荷载的增加,裂缝沿纯弯段延伸;加载至155.3 kN时,跨中挠度大约为25 mm,试件发出“砰”的巨响,跨中纤维被层层拉断,出现断裂,发生弯曲破坏,试件达到其极限承载能力,破坏形式如图2(c)所示。

CL4组试件的破坏现象与CL3相似,加载至68.8 kN时,试件发出轻微灼烧声,说明随着荷载的增加,竹梁内部竹纤维在逐渐撕裂;加载至85.5 kN时,达到其极限承载力,跨中挠度达到最大值,试件弯曲破坏,随后承载力降至66.4 kN,如图2(d)所示。

CL5组梁与CL4破坏形式相似,如图2(e)所示。



(a) CL1左端层间开裂 (b) CL2端部层间开裂 (c) CL3跨中断裂破坏 (d) CL4跨中断裂破坏 (e) CL5跨中断裂破坏

图2 5组试件破坏形式

Fig. 2 Failure modes of five groups of specimens

3 试验结果分析

3.1 极限承载力及破坏形式

5组 15根竹集成材梁的试验结果见表 2。

表 2 试件极限荷载及破坏形式

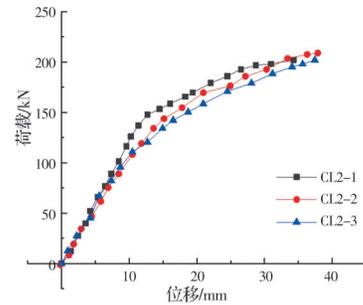
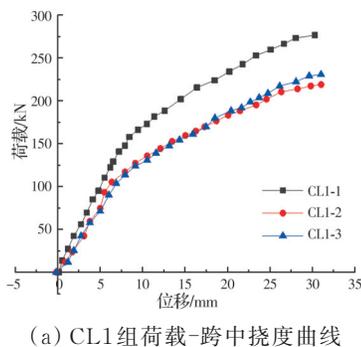
Table 2 Ultimate load and failure modes of specimen

组号	试件编号	剪跨比	极限承载力/kN	平均值/kN	破坏形式
CL1	CL1-1	0.75	280.0	242.3	剪切破坏
	CL1-2		215.0		
	CL1-3		232.0		
CL2	CL2-1	1.0	202.0	203.7	剪切破坏
	CL2-2		208.0		
	CL2-3		201.0		
CL3	CL3-1	1.5	124.0	114.8	弯曲破坏
	CL3-2		123.0		
	CL3-3		97.5		
CL4	CL4-1	2.0	88.2	88.3	弯曲破坏
	CL4-2		91.2		
	CL4-3		85.5		
CL5	CL5-1	2.5	81.0	77.7	弯曲破坏
	CL5-2		84.0		
	CL5-3		68.0		

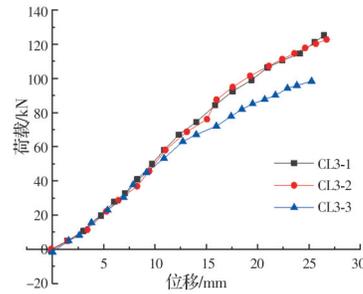
由表 2 可见,CL1 组梁的平均极限承载力最大,CL5 组梁的承载力最小,随着剪跨比 λ 的增大,承载能力逐渐降低,变形幅度增加,破坏形态逐渐由剪切破坏向弯曲破坏变化。当剪跨比为 0.75、1.0 时,侧压竹集成材梁的破坏形式表现为明显的层间剪切破坏,当剪跨比为 1.5、2.0、2.5 时,侧压竹集成材梁的破坏形式表现为弯曲破坏。

3.2 荷载-跨中挠度分析

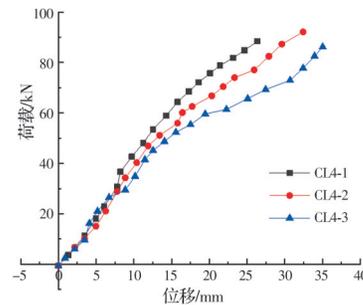
5 组梁的荷载-跨中挠度关系曲线如图 3 所示。



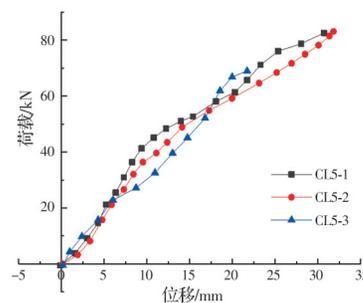
(b) CL2 组荷载-跨中挠度曲线



(c) CL3 组荷载-跨中挠度曲线



(d) CL4 组荷载-跨中挠度曲线



(e) CL5 组荷载-跨中挠度曲线

图 3 荷载-跨中挠度曲线图

Fig. 3 Load-mid-span deflection curve

从图 3 可以看出,在加载初期,侧压竹集成材梁跨中位移随荷载基本呈线性增长,当加载超过弹性阶段时,表现出一定的非线性增长,试件的弯曲刚度随荷载的增加逐渐降低,跨中挠度的增长加快,当加载到极限荷载时,出现剪切破坏或弯曲破坏。

CL1-CL5 共 15 根梁试件跨中位移达到了 25~45 mm,约为跨度的 1/30~1/40,而根据《木结构设

计标准》规定,作为结构的受弯构件,正常使用情况下挠度限值为 $1/250$,对应的荷载约为极限承载力的 20% 。

4 竹集成材梁承载力及变形计算

4.1 受弯承载力计算

CL3、CL4、CL5组梁发生弯曲破坏,梁实测截面受弯承载力按式(1)计算。

$$M_{\text{exp}} = \frac{F_{\text{exp}} a}{2} \quad (1)$$

式中: F_{exp} 为试验实测极限荷载; a 为剪跨长度。

梁截面受弯承载力理论计算值按式(2)计算。

$$M_{\text{cal}} = f_m W \quad (2)$$

式中: W 为竹集成材梁实际截面的抵抗矩, $W = \frac{bh^2}{6} = 144\,000\text{ mm}^3$; f_m 为试件的抗弯强度,由清材小试件静曲强度(文献[19]试验实测无瑕疵清样小试件的静曲强度 $\sigma_m = 96.2\text{ MPa}$)考虑构件的尺寸效应和天然缺陷折减后得到,参照木结构取尺寸折减系数为 $0.9^{[20]}$,由于竹集成材是经过现代工艺加工后的材料,缺陷远小于天然木材,故取天然缺陷系数为 0.87 ,则 $f_m = 0.9 \times 0.87 \times 96.2 = 75.3\text{ MPa}$ 。

对于受弯破坏的构件,其受弯承载力计算结果见表3。

表3 受弯承载力计算结果

Table 3 Calculation results of bending capacity

试件编号	$M_{\text{cal}}/$ (kN·m)	$M_{\text{exp}}/$ (kN·m)	$M_{\text{cal}}/M_{\text{exp}}$	破坏形式
CL3-1	11.0	11.16	0.99	弯曲破坏
CL3-2	11.0	11.07	0.99	弯曲破坏
CL3-3	11.0	8.78	1.25	弯曲破坏
CL4-1	11.0	10.60	1.03	弯曲破坏
CL4-2	11.0	11.00	1.00	弯曲破坏
CL4-3	11.0	10.30	1.07	弯曲破坏
CL5-1	11.0	12.15	0.91	弯曲破坏
CL5-2	11.0	12.60	0.87	弯曲破坏
CL5-3	11.0	10.20	1.16	弯曲破坏

注: M_{cal} 、 M_{exp} 为试件在极限承载力状态下所承受的弯矩理论值和实际值。

由表3可知,试件CL3-1~CL5-3的受弯承载力计算值与实测值吻合较好。

4.2 受剪承载力计算

4.2.1 剪切破坏机理 侧压竹集成材梁的破坏形式主要有两种:第1种为破坏发生在截面弯矩的最

大处,底部的外侧竹纤维所受到的拉应力最大,当所受到的拉应力大于竹材的抗拉强度时,竹梁底部纤维拉断引起的弯曲破坏;第2种为破坏发生在剪力最大截面的中性轴附近,平行于中性轴,因为该处剪应力最大,当剪应力大于竹纤维的层间剪切强度时,便发生层间剪切破坏。

4.2.2 影响受剪承载力的因素

1) 剪跨比

随着剪跨比的增加,竹集成材梁的受剪承载力逐渐降低。由试验可知,当剪跨比 $\lambda \geq 1.5$ 时,竹集成材梁拉应变率先达到极限应变,构件的破坏由集成材梁的抗拉强度控制,构件发生弯曲破坏。当 $\lambda < 1.5$ 时,构件的破坏始于梁端水平剪切错动,构件发生剪切破坏,受剪承载力较高。

弯剪破坏的界限剪跨比与梁的跨高比有关,试验梁的跨高比为10,发生弯剪破坏的界限剪跨比为1.5。

2) 抗剪强度

梁的受剪承载力与材料的抗剪强度成正比例,竹集成材各个方向的抗剪强度不同,径向顺纹抗剪强度比其他方向小,故侧压竹集成材梁的剪切破坏均表现为水平顺纹层间剪切破坏。

3) 截面尺寸

截面尺寸与梁的受剪承载力呈线性关系。研究表明,材料的抗剪强度具有明显的尺寸效应,当采用竹集成材清材小试件抗剪强度计算竹集成材梁受剪承载力时,需考虑尺寸效应影响的尺寸折减系数 0.9 。

4) 其他因素

除前面提到的几个因素外,影响侧压竹集成材梁受剪承载力的因素还包括梁的跨高比、加载方式等。对于承受跨中集中荷载的简支梁,为保证发生层间剪切破坏,跨高比不大于 $5^{[21]}$ 。

4.2.3 受剪承载力计算公式 剪力作用下竹集成材梁在复杂应力状态下的强度理论尚未成熟,迄今还未能定量地建立剪切破坏的力学关系,因此,由解析法建立受剪承载力的计算公式还相当困难,目前只能通过对试验结果的分析,探讨传力机制和破坏机理,同时采用数理统计的方法来建立受剪承载力的计算公式。

竹集成材梁的受剪承载力除与剪跨比、竹集成材的剪切强度和截面尺寸有关外,还与梁的跨高比、荷载模式等有关,由于研究还不够深入,暂且只

考虑剪跨比、竹集成材的剪切强度和截面尺寸。引入竹材抗剪贡献系数 β ,根据经验公式^[9]推导出竹集成材梁的受剪承载力计算公式,见式(3)。

$$V_{cal} = \frac{1}{1 + \lambda} \beta b h f_v \quad (3)$$

式中: V_{cal} 为理论计算竹集成材梁的受剪承载力; β 为竹集成材的抗剪贡献系数,取 2.5; b 和 h 为竹集成材梁截面的宽度和高度; f_v 为竹材顺纹抗剪强度,根据实测清材切向顺纹抗剪强度并考虑尺寸效应后,取值为 11.0 MPa; λ 为剪跨比, $\lambda < 0.5$ 时取 0.5, $\lambda > 2$ 时取 2。

按式(3)计算出试件的受剪承载力 V_{cal} ,并与试验结果 V_{exp} 进行对比,见表 4。由表 4 可以看出,试件受剪承载能力计算值与实测值吻合较好。

4.3 变形计算

竹集成材梁在弹性阶段的变形可按理想弹性材料计算,依据竹集成材梁的变形特点,引入材料变形特征系数 η ,则竹集成材梁的挠度计算式为

$$f = \eta \frac{P a l^2}{48 E I} (3 - 4 \alpha^2) \quad (4)$$

式中: f 为挠度; E 为弹性模量,按实测取 10 853.4 MPa; I 为截面轴惯性矩, $I = b h^3 / 12$; $\alpha = a / l$, a 为支座距加载点的剪跨长度;对于受剪破坏的试件 CL1、CL2,考虑剪切变形对刚度的影响, η 取值为 0.9,对于受弯破坏的试件 CL3、CL4、CL5, η 取值为 1.4。

表 4 试件受剪承载力与计算值对比

Table 4 Comparison of shear bearing capacity of specimens with calculated values

试件编号	V_{cal}/kN	V_{exp}/kN	V_{cal}/V_{exp}	破坏形式
CL1-1	113.1	140.0	0.82	剪切破坏
CL1-2	113.1	107.5	1.06	剪切破坏
CL1-3	113.1	116.0	0.99	剪切破坏
CL2-1	99.0	101.0	0.99	剪切破坏
CL2-2	99.0	104.0	0.96	剪切破坏
CL2-3	99.0	100.5	0.99	剪切破坏

CL1、CL2、CL3、CL4 和 CL5 在荷载作用下跨中挠度实测值与计算值的对比见图 4,由图 4 可知,弹性阶段的跨中挠度计算值与实测值基本吻合。

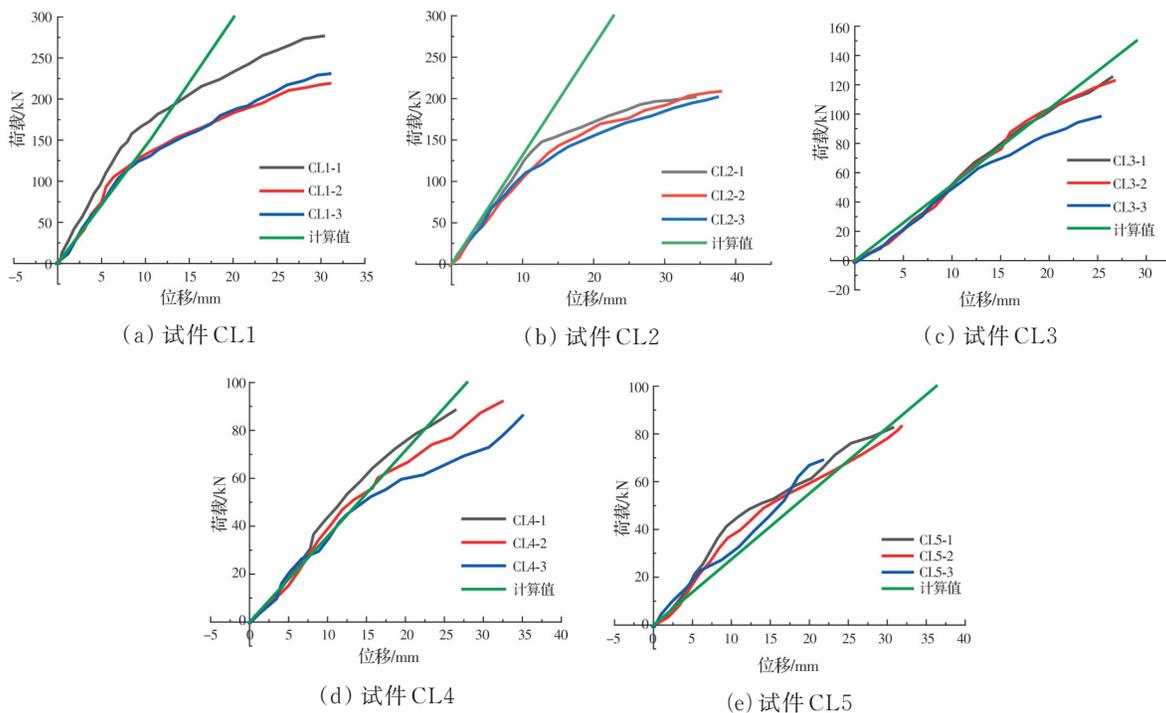


图 4 竹集成材梁弹性阶段荷载-跨中挠度实测值与计算值的比较

Fig. 4 Comparison between measured and calculated values of load-mid-span deflection of bamboo composite beams in elastic stage

5 结论

1)侧压竹集成材梁的破坏形式主要有两种,一种是跨中底面竹纤维被拉断而引起的弯曲破坏,另一种是层间剪切强度不足以抵抗剪应力而引起梁端层间错动导致的层间剪切破坏。

2)竹集成材梁的极限抗剪承载能力与剪跨比、顺纹抗剪强度及截面尺寸有关,随着剪跨比的增大而逐渐降低,当剪跨比 $\lambda < 1.5$ 时为剪切破坏,当剪跨比 $\lambda \geq 1.5$ 时为弯曲破坏。

3)在加载过程中,前期侧压竹集成材梁跨中挠度随位移基本呈线性变化,后期呈弹塑性变形,破坏前无明显预兆,为脆性破坏;正常使用时极限状态的荷载为极限荷载的20%左右,达到承载能力极限状态时的跨中位移超过了跨度的1/40。

4)提出了竹集成材梁的受弯承载力、受剪承载力和弹性变形计算公式,与实测值进行对比吻合较好。

参考文献

- [1] 陈志敏. 竹材和杉木复合材料现状的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2019.
CHEN Z M. Study on the present situation of bamboo and Chinese fir composites [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019. (in Chinese)
- [2] 樊志权. 我国竹产业发展现状及对策[J]. 现代园艺, 2020, 43(18): 22-23.
FAN Z Q. Development status and countermeasures of bamboo industry in China [J]. Modern Horticulture, 2020, 43(18): 22-23. (in Chinese)
- [3] 叶忠华. 毛竹材特性及工业利用分析[J]. 林业科技, 2002, 27(3): 39-42.
YE Z H. Analysis on the character and industrial utilization of bamboo timber [J]. Forestry Science and Technology, 2002, 27(3): 39-42. (in Chinese)
- [4] 史军义, 周德群, 马丽莎, 等. 中国竹类多样性及其重要价值[J]. 世界竹藤通讯, 2020, 18(3): 55-65, 72.
SHI J Y, ZHOU D Q, MA L S, et al. Diversity and important value of bamboos in China [J]. World Bamboo and Rattan, 2020, 18(3): 55-65, 72. (in Chinese)
- [5] 李海涛, 吴刚, 张齐生, 等. 侧压竹集成材弦向偏压试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(5): 90-96.
LI H T, WU G, ZHANG Q S, et al. Experimental study on side pressure LBL under tangential eccentric compression [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(5): 90-96. (in Chinese)
- [6] 唐卓. 胶合竹工字梁的试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
TANG Z. An experimental study on glue laminated bamboo I-joists [D]. Changsha: Hunan University, 2017. (in Chinese)
- [7] XIAO Y, WU Y, LI J, et al. An experimental study on shear strength of glulam [J]. Construction and Building Materials, 2017, 150: 490-500.
- [8] 李佳, 肖岩, 杨瑞珍, 等. 典型胶合竹剪切强度试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(4): 7-12, 25.
LI J, XIAO Y, YANG R Z, et al. Research on shear strength tests of typical glulam materials [J]. Industrial Construction, 2015, 45(4): 7-12, 25. (in Chinese)
- [9] 李玉顺, 沈煌莹, 单炜, 等. 钢-竹组合工字梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(7): 80-86.
LI Y S, SHEN H Y, SHAN W, et al. Experimental study on shear behavior of I-shaped section bamboo-steel composite beams [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(7): 80-86. (in Chinese)
- [10] 李冉, 李玉顺, 何佳伟, 等. 钢-竹组合箱形截面梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(Sup1): 330-336.
LI R, LI Y S, HE J W, et al. Experimental study on shear behavior of box section bamboo-steel composite beams [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(Sup1): 330-336. (in Chinese)
- [11] CORREAL J F, ECHEVERRY J S, RAMÍREZ F, et al. Experimental evaluation of physical and mechanical properties of Glued Laminated Guadua angustifolia Kunth [J]. Construction and Building Materials, 2014, 73: 105-112.
- [12] CORREAL J F, RAMIREZ F. Adhesive bond performance in glue line shear and bending for glued laminated guadua bamboo [J]. Journal of Tropical Forest Science, 2010, 22(4): 433-439.
- [13] JAKOVLJEVIĆ S, LISJAK D. Investigation into the effects of humidity on the mechanical and physical properties of bamboo [J]. Construction and Building Materials, 2019, 194: 386-396.
- [14] NUGROHO N, ANDO N. Development of structural composite products made from bamboo I: Fundamental properties of bamboo zephyr board [J]. Journal of Wood Science, 2000, 46(1): 68-74.
- [15] PENELLUM M, SHARMA B, SHAH D U, et al. Relationship of structure and stiffness in laminated

- bamboo composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 165: 241-246.
- [16] KIM H, FUJII T. Study on tensile properties and interfacial shear strength of bamboo fibre bundles [J]. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2009, 36: 115.
- [17] TAN T, RAHBAR N, ALLAMEH S M, et al. Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures [J]. *Acta Biomaterialia*, 2011, 7(10): 3796-3803.
- [18] 木结构试验方法标准: GB/T 50329—2012 [S]. 北京: 建筑工业出版社, 2012.
- Standard for methods testing of timber structures: GB/T 50329-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [19] 汤春安. 侧压竹集成材力学性能试验研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
- TANG C A. Experimental study on mechanical properties of bamboos integrated by side press [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2020. (in Chinese)
- [20] 木结构设计手册 [M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- Handbook of wood structure design [M]. 4th Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021. (in Chinese)
- [21] 王瑞, 进藤裕英, 堀口胜三. 超低温下层合板复合材料的短梁法层间剪切强度研究[J]. *天津工业大学学报*, 2001, 20(1): 6-10.
- WANG R, SHINDO Y, KATUMI H. Study on short-beam interlaminar shear strength of glass-cloth/epoxy laminates at low temperatures [J]. *Journal of Tianjin Institute of Textile Science and Technology*, 2001, 20(1): 6-10. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)