赵卫锋,唐凯,龙志林.薄壁型钢管/胶合竹板复合柱抗震性能试验[J].地震工程学报,2018,40(3):450-457.doi:10.3969/j.issn. 1000-0844.2018.03.450

ZHAO Weifeng, TANG Kai, LONG Zhiling. Experiments on the Seismic Behavior of Thin-Walled Steel Tube/Bamboo Plywood Composite Columns[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 450-457. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03. 450

薄壁型钢管/胶合竹板复合柱抗震性能试验

赵卫锋1.2,唐 凯2,龙志林2

(1.广东建设职业技术学院,广东广州 510440; 2. 湘潭大学土木工程与力学学院,湖南 湘潭 411105)

摘要:对9根带约束拉杆的方形薄壁型钢管/胶合竹板复合空芯柱(SBCCB)试件进行低周反复拟静 力测试,考察 SBCCB的破坏过程和形态,分析试件的长细比、胶合竹净横截面面积、截面组合方式 对其受力和抗震性能影响。结果表明:SBCCB破坏形态主要为柱脚胶合面的开裂破坏和胶合竹板 断裂破坏,截面组合方式对其破坏模式有显著影响。SBCCB试件有较好的弹性变形能力和抗震耗 能性能,增大复合柱截面尺寸和长细比能改善抗震性能;约束拉杆有效保证了试件的整体性,抑制 基体开胶破坏,间接提高了抗震性能。

关键词:胶合竹板;薄壁钢管;复合空芯柱;横向约束拉杆;抗震性能
中图分类号:TB332;TU366.1
文献标志码:A
文章编号:1000-0844(2018)03-0450-08
DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.450

Experiments on the Seismic Behavior of Thin-Walled Steel Tube/Bamboo Plywood Composite Columns

ZHAO Weifeng^{1,2}, TANG Kai², LONG Zhiling²

(1. Guangdong Construction Polytechnic, Guangzhou 510440, Guangdong, China;
2. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China)

Abstract: The development of laminated-bamboo has broadened the applications of bamboo material in structural engineering. An assembling composite hollow column parallel to the fiber texture is composed of square thin-walled cold-formed steel tube/bamboo plywood reinforced by transverse binding bars and structural adhesive. The thin-walled steel-tube/bamboo plywood assembling composite hollow columns with binding bars (SBCCBs) are a new type of steel/bamboo composite with excellent physical and mechanical properties. Multi-layered high-strength bamboo plywood forms the primary body in an SBCCB that is subjected to forces, while the square thinwalled steel tube serves as a liner. Large numbers of bamboo are used, which reduces the manufacturing cost of the composite columns and results in a relatively high load-bearing capacity. Nine thin-walled SBCCBs were used to perform low-cyclic reversed quasi-static loading tests, and their damage process and failure modes were investigated. The influence of the shear-span ratio,

收稿日期:2017-08-20

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51708476);广东省自然科学基金项目(2017A030310579)

作者简介:赵卫锋,女,讲师,博士,从事组合结构研究。E-mail:weifengzhjing@126.com。

net cross-sectional area, sectional combination mode of SBCCBs on the bearing capacity, and seismic behavior were analyzed. The results indicate that the failures of SBCCBs are primarily the cracking damage between the gluing interfaces and the fracture damage of plywood material at the foot of column. The sectional combination mode had a significant influence on the failure mode, and the seismic behavior of SBCCB can be improved by increasing the net cross-sectional area and slenderness ratio of the composite hollow columns. SBCCBs have good elastic deformation and seismic energy dissipation capacities, and the binding bars can effectively guarantee the integrity of SBCCB and suppress the gluing failure between the matrix interfaces. SBCCB specimens showed an excellent seismic performance and can be used as the vertical bearing element of a multi-story, pre-fabricated, column-supported, and bamboo-framed wood building.

Key words: bamboo plywood; thin-walled steel tube; composite hollow column; lateral bending bars; seismic behavior

0 引言

我国竹材资源丰富,竹藤资源开发利用是国家中 长期科技发展规划优先主题,也是林业科研专项重点 支持领域。竹材具有优良的物理力学性能,如强度 高、韧性好、耐磨损,抗拉和抗弯(抗震)性能十分优 异,其作为工程结构材料具有天然的优势。竹集成复 合板材的研发成功为竹材资源的工业化利用开拓了 途径,但竹集成材在工程领域的应用主要为附加值较 低的混凝土结构施工模板,其作为工程结构主材近些 年才有一些研究和应用^[1-6]。Xiao Yan 等^[7]认为竹材 未能在现代工程结构中充分利用,其主要原因是缺少 基于力学、材料学、结构设计学以及试验等理论的有 效验证。近年来,竹集成材应用有了新的发展方向, 重组竹柱或竹胶合柱是其应用的途径之一[8-11],型 钢/胶合竹复合柱的研发也备受国内学者关注[12-18]。 刘学等[12]研发了钢/竹(慈竹竹帘胶合板)箱型复合 柱,蒋天元等^[13]和解其铁等^[14]研发了薄壁C型钢/竹 胶合板箱型复合柱,Wu等^[15]研发了型钢/竹胶合板 I 型复合柱,李冀等[16]研发了箍筋增强型胶合竹柱,赵 卫锋等[17-18] 研发了带约束拉杆薄壁型钢管/胶合竹组 合柱。国外有关钢/胶合竹复合柱的研究和应用鲜有 报道。本文在带约束拉杆方形薄壁型钢管/胶合竹板 组合柱(SBCCB)抗压性能试验研究^[17-18]的基础上,通 过低周反复拟静力测试,重点研究 SBCCB 的抗震性 能,探讨长细比、截面组合方式以及胶合竹净横截面 面积对其破坏形态和抗震性能的影响,以期为其工程 应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件制作材料和设计

制作试件的竹胶合板材由同批次毛竹竹胶合板

(2 440 mm×1 220 mm×10 mm)顺纹纵向裁切而 成。竹胶合板含水率 9%,横向和纵向静曲强度分 别为 52 MPa 和 83 MPa,横向和纵向弹性模量分别 为 5.4 GPa 和 7.4 GPa;竹胶合板的纵向抗拉和抗压 强度分别为 83 MPa 和 24 MPa,弹性模量分别为 10.3 GPa 和 8.8 GPa;横向抗剪强度为 16 MPa。薄 壁型钢管为 Q235 镀锌无缝方钢管,钢材弹性模量 205 GPa,平均屈服强度 260 MPa,极限强度 340 MPa,依据试件要求选用 40 mm×40 mm×1 mm、 60 mm×60 mm×1 mm、80 mm×80 mm×1 mm 三种型号。约束拉杆采用屈服强度为 260 MPa 的 Ø6 全丝螺杆。胶黏剂为上海生产的喜利得 500-SD 结构黏结剂,黏结抗拉强度≥10 MPa,黏结抗剪强 度≥12 MPa。

依据试件长细比(λ)、截面尺寸($b \times b$)和组合 方式不同设计9根 SBCCB 试件,参数如表1所列, 成品试件如图1所列,截面组合方式如图2所示。 根据 SBCCB 试件抗压测试破坏的结果^[17-18],当横 向约束拉杆间距(S)与截面边长(b)之比小于2.5 时,约束拉杆能有效抑制柱身的局部开胶翘曲破坏, 因此设计约束拉杆间距比 $S/b \leq 2.5$ 。

在试件柱身设置 4 道十字交叉横向拉杆(图 3),约束拉杆间距为 $l_0/4$ (l_0 为试件长度),柱端至 第1道拉杆间距为 $l_0/8$ 。适度紧固约束拉杆,避免 材料压缩破坏。柱底部采用 C30 钢筋混凝土底座 锚固,柱顶采用 400 mm×300 mm×240 mm 的 C30 钢筋混凝土块用作加载夹头。在柱身相邻两侧 的上、中、下 3 个部位黏贴电阻应变片(共 36 个),用 于监测加载过程中的应变反应。

1.2 加载装置及制度

采用 JAW-4000 多通道电液伺服加载系统进行

表 1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens								
试件编号	长细比λ	计算长细比 γ	$b \times b$ /(mm×mm)	钢管尺寸 /(mm×mm×mm)	净截面 含钢率/%	组合方式	S/b	
Z1	40	6.09	100×100	$40 \times 40 \times 1$	0.93	Ι	1.52	
Z2	40	7.51	120 imes 120	$60 \times 60 \times 1$	1.09	П	1.56	
Z3	40	9.04	140×140	$80 \times 80 \times 1$	1.19	Ш	1.61	
Z 4	50	7.54	100×100	$40 \times 40 \times 1$	0.93	П	1.89	
Z5	50	9.39	120 imes 120	$60 \times 60 \times 1$	1.09	Ш	1.96	
Z6	50	11.30	140×140	$80 \times 80 \times 1$	1.19	Ι	2.02	
Z7	60	9.05	100×100	$40 \times 40 \times 1$	0.93	Ш	2.26	
Z8	60	11.26	120×120	$60 \times 60 \times 1$	1.09	Ι	2.35	
Z9	60	13.56	140×140	$80 \times 80 \times 1$	1.19	П	2.42	



图 1 复合柱试件 Fig.1 Composite column specimens



Fig.2 Sectional combination form

低周反复拟静力加载试验(图 3)。加载装置由竖向 加荷系统和水平加荷系统两部分组成,加载过程中



图 3 加载装置 Fig.3 Loading setup

试件柱底固结,柱顶可适度轴向滑动。首先通过竖向作动筒施加竖向荷载至试件的预定轴压力(轴压 比 0.2)保持恒定,然后施加水平荷载。加载制度:采 取位移加载控制,估算复合柱极限位移约为 $u_m = l_0/20$,位移计校准柱顶位移。初始按 0.1 u_m 位移加载循环,之后按 0.1 u_m 的幅值递增,每个幅值进行 2 次循环加载,直至试件破坏。当试件开裂破坏严重 或承载力下降幅度较大时终止测试。加载中当复合 柱的轴压力下降时及时对轴力补载。

2 试验结果及分析

2.1 破坏过程和形态

设定加载方向为试件正面,加载垂直方向为试 件侧面。加载初期,试件处于弹性工作状态,无裂缝 现象,有间歇性短促细小开胶声。加载至预估荷载 的 60%左右,柱底正面受压区小幅鼓起(侧面观测 基体间有细微裂缝),由于受约束拉杆和基座的约束 作用,裂缝未立即扩大和延伸;荷载作用方向改变 后,受压面转变为受拉面,此时该部位出现细微水平 裂缝,由于竹材具有较高的弹性变形性能,并不影响



(b) 实际加载图

第40卷第3期

继续承担荷载,结构刚度也未降低。随着荷载加大, 侧面竖向裂缝和正面水平裂缝逐渐发展扩大,并有 较大的开胶破裂声;接近终止测试时,柱底侧面因剪 切力作用出现胶合板翘曲撕裂破坏,正面柱底呈现 局部外鼓压溃或拉断。其中截面组合Ⅰ试件和截面 组合Ⅱ试件正面及侧面均发生明显破坏[图4(a)、 (b)],截面组合Ⅲ试件正面的破坏程度明显重于侧 面[图 4(c)],整体上表现为弯曲或弯剪破坏形式。 除柱脚胶合面开胶破坏和胶合竹板断裂破坏之外, 其他部位未发现很明显的损坏或开裂现象。试件下 部的横向约束拉杆承受拉剪复合作用,无变形屈服 情况,保证了复合柱的整体性,抑制了胶合界面的开 胶破坏。从破坏模式比较,截面组合 I 试件的变形 协调性较好。



(a) 截面组合 I

(b) 截面组合 Ⅱ
 图 4 试件的破坏形态
 Fig.4 Failure pattern of specimens



2.2 抗震性能

2.2.1 滞回曲线

荷载-位移滞回曲线如图 5 所示。从曲线可看 出所有试件的损伤破坏都经历了弹性阶段、弹塑性 阶段直至最后破坏。弹性阶段试件基本完好,滞回 曲线基本为直线,刚度退化很小,型钢管和胶合竹板 表现出较好的复合效应。随着荷载增加,试件逐渐 进入弹塑性阶段,滞回曲线逐渐倾斜,刚度和强度退 化,滞回环面积不断增大,残余变形增大。达到极限 荷载后承载力和位移都下降较快,滞回曲线中心明 显偏离原点。由于材料的差异,滞回曲线不对称分 布,滞回曲线呈"弓形",均有较明显的滑移捏拢现 象,滑移主要是柱底胶合竹板的脱胶开裂和型钢管 的屈曲变形造成的。截面组合方式不同的试件有不 同的破坏发展机制,组合方式 I 试件(Z1、Z6、Z8)和 组合方式 Ⅱ 试件(Z2、Z4、Z9)的滞回曲线比组合方 式Ⅲ试件(Z3、Z5、Z7)相对饱满,滑移捏拢量小。组 合方式Ⅲ试件的剪切破坏成分较多,分析其原因是 由于试件基体间的变形协调能力相对偏弱。从长细 比因素分析,随长细比增大滞回曲线趋向饱满,且滞 回环更平稳,呈现出弯曲破坏特征,如截面组合方式 Ⅱ的3个试件(Z2、Z4、Z9)与截面组合方式Ⅲ的3 个试件(Z3、Z5、Z7)比较,滞回曲线饱满程度明显不 同。综上所述,截面组合方式和长细比影响滞回曲 线特征。

2.2.2 骨架曲线

图 6 为截面组合方式相同、长细比不同试件的 骨架线比较。一般长细比增大骨架线下降平缓,长 细比越大越明显,如图 6 所示 3 组试件中的 Z7、Z8 和 Z9。此现象表明发生塑性变形后,长细比影响试 件的内力或应力路径,对试件的抗震性能影响较大。 由于同组试件的截面尺寸不同以及终止试验的条件 差异,承载力和极限变形与长细比之间的定性关系 不明显。

图 7 为长细比相同、截面尺寸不同试件的骨架 线比较。总体上截面尺寸越大骨架线下降越平缓, 承载力和极限变形较大。竹材的抗弯和变形能力较 强,增大净截面积即能增强试件的承载力和变形,因 此优化截面尺寸可获得较好的抗震性能。

2.2.3 强度退化

由图 6 和图 7 的骨架线可知,加载超过荷载峰 值后,随循环增加试件强度退化较快。定义本级位 移与相邻前一级相应的水平荷载差值与本级水平荷 载的比值为强度退化系数。各试件强度退化系数如 表 2 所列。正向和负向的退化系数平均值相差较 大,可能是由于胶合竹材本身的不均匀性以及胶合 强度不稳定造成的。前述已解释截面组合方式对复 合柱的开裂影响很大,开裂位置以及裂缝发展速度 对复合柱的极限承载力有很大的影响。各因素控制 的强度退化系数如表 3 所列。截面组合 I 试件裂缝 发展时间长,破坏累积程度高,达到极限荷载后强度 退化快(Z1、Z6、Z8 总强度退化系数平均值为 0.119);截面组合Ⅲ试件裂缝发展快但延伸慢,破坏 累积程度低,强度退化慢(Z3、Z5、Z7 总强度退化系 数平均值为0.066),但存在脆性破坏现象;截面组合 Ⅱ试件强度退化居中(Z2、Z4、Z9 总强度退化系数平 均值为0.084)。增大试件长细比、截面尺寸,总强度 退化系数平均值均减小,长细比 40、50、60 试件的强 度退化系数平均值依次为 0.108、0.095、0.07,截面 尺寸 100、120、140 试件的总强度退化系数平均值依 次为 0.103、0.086、0.080。



Fig.6 Comparison between the skeleton curves of composite columns with the same sectional combination form





Fig.7 Comparison between the skeleton curves of composite columns with the same slenderness ratio

表 2

强度退化系数

Table 2 Strength degradation coefficient						
试件编号	正向	负向				
Z1	0.106,0.347(0.227)	0.054,0.065,0.122,0.218(0.115)				
Z2	0.056,0.142(0.099)	-				
Z3	0.016,0.039(0.028)	0.023,0.116(0.07)				
Z 4	0.038,0.061,0.107(0.069)	0.111,0.023,0.151(0.095)				
Z 5	0.009,0.056,0.128(0.064)	0.005,0.231(0.118)				
Z6	0.035,0.131,0.197(0.121)	0.02,0.143,0.143(0.102)				
Z7	0.037,0.057,0.031(0.041)	0.035,0.064,0.118(0.072)				
Z8	0.053,0.028,0.13,0.2(0.103)	0.048,0.013,0.032,0.085(0.044)				
Z9	0.062,0.051,0.09,0.076,0.083,0.15(0.086)	0.06,0.057,0.06,0.086,0.063,0.108(0.072)				

注:表中括号里数字为退化系数平均值

表 3 各因素强度退化系数平均值

Table	5 The	average value of s	strength degradation coefficient influenced by vario	Jus factors	
因素		试件编号	强度退化系数	平均值	
	Ι	Z1,Z6,Z8	(0.227,0.115)(0.121,0.102)(0.103,0.044)	0.119	
截面组合	П	Z2,Z4,Z9	(0.099,-)(0.069,0.095)(0.086,0.072)	0.084	
	Ш	Z3, Z5, Z7	(0.028,0.07)(0.064,0.118)(0.041,0.072)	0.066	
	40	Z1, Z2, Z3	(0.227, 0.115)(0.099, -)(0.028, 0.07)	0.108	
长细比	50	Z4, Z5, Z6	(0.069,0.095)(0.064,0.118)(0.121,0.102)	0.095	
	60	Z7, Z8, Z8	(0.041,0.072)(0.103,0.044)(0.086,0.072)	0.070	
	100	Z1, Z4, Z7	(0.227,0.115)(0.069,0.095)(0.041,0.072)	0.103	
截面尺寸	120	Z2,Z5,Z8	(0.099,-)(0.064,0.118)(0.103,0.044)	0.086	
	140	Z3,Z6,Z9	(0.028,0.07)(0.121,0.102)(0.086,0.072)	0.080	

Table 3 The average value of strength degradation coefficient influenced by various factor

2.2.4 刚度退化

图 8 为割线刚度-位移曲线,可见整体上 9 根试 件的刚度退化都比较均匀。试件截面尺寸越大刚度 退化系数越小,而长细比和截面组合方式对刚度退 化的影响存在交互作用。随试件截面尺寸增大,刚 度退化缓慢,如试件 Z1、Z2、Z3 的刚度退化系数依 次递减(0.016、0.012、0.006)。由于组合方式影响裂 缝发展速度,组合方式对复合柱的开裂有较大影响, 在刚度退化中也有体现,如截面组合方式 III 的试件 Z3、Z5、Z7 的刚度变化幅度相对较大。

2.2.5 延性系数

取最大承载力下降 20% 对应的位移作为极限

位移,采用能量等值法确定屈服点,计算位移延性 系数,结果如表4所列。同传统钢筋混凝土柱相 比,SBCCB试件的极限侧向变形相对较大,平均约 *l*/18;计算的屈服变形相对也较大,平均约*l*/35; 因此SBCCB试件计算延性系数相对较小,平均1.9 左右。以上数据说明SBCCB的弹性变形能力较 强,而弹塑性变形能力不具优势,进入屈服破坏后 塑性发展段较短,抗震承载力设计时应充分考虑此 不利因素。

2.2.6 耗能性能

将一次循环中荷载-变形滞回曲线所包围的面 积定义为能量耗散(图9)。达到荷载最大值前,单





表 4

位移延性系数

Table 4 Displacement ductility factor							
试件编号	加载方向	极限位移/mm	屈服位移/mm	最大荷载/kN	最大荷载降 20%	延性	延性平均值
Z1	正向	41.55	19.43	13.2	10.56	2.14	2.20
	负向	39.32	17.46	13.0	10.40	2.25	
79	正向	42.67	26.84	17.1	13.68	1.59	1.83
	负向	48.50	23.51	17.8	14.24	2.06	
72	正向	60.00	29.14	18.3	14.64	2.06	1.77
23	负向	60.00	40.87	25.6	20.48	1.47	
74	正向	41.53	22.07	11.2	8.96	1.88	2.02
Z-i	负向	52.60	24.48	14.2	11.60	2.15	
75	正向	60.00	35.34	23.3	19.00	1.70	1.66
20	负向	59.35	36.60	21.3	17.04	1.62	
76	正向	66.22	41.23	23.0	18.40	1.61	1.71
20	负向	66.44	36.70	25.0	20.00	1.81	
Z7	正向	59.00	27.72	10.9	9.27	2.13	1.95
	负向	60.85	34.37	11.3	9.04	1.77	
70	正向	63.03	33.31	15.0	12.00	1.89	1.83
20	负向	72.00	40.82	16.8	13.44	1.76	
Z9	正向	67.59	34.91	13.6	10.88	1.94	1.90
	负向	79.66	43.13	17.8	14.24	1.85	



图 9 试件的能量耗能

Fig.9 Energy dissipation of specimens

级能量耗散随位移增大而增加;除个别循环由于试 件细微开裂有起伏外,基本呈线性变化。当试件达 到最大荷载后,相邻后一级的能量耗散开始下降,但 仍保持较高的耗能水平。增大截面尺寸和长细比均 可有效提高复合柱的耗能性能。

3 结论

(1)低周反复荷载作用下带约束拉杆薄壁钢 管/胶合竹板复合柱的破坏形态主要为柱脚不同基 体胶合面的开裂破坏和胶合竹板材料断裂破坏;约

385

束拉杆能有效地保证复合柱的整体性,抑制基体间 胶合面开裂破坏。

(2) SBCCB 滞回曲线有明显的滑移捏拢特征, 总体表现为弯曲或弯剪破坏特征。

(3)截面组合方式对抗震破坏模式有显著影响, 增大复合柱截面尺寸和长细比能改善其抗震性能。

(4) SBCCB 有较好的抗震性能,侧向弹性变形 能力和耗能性能较高,弹塑性变形和延性能力不具 优势。

参考文献(References)

- [1] SHARMA B.Gatóo A.BOCK M.et al.Engineered Bamboo for Structural Applications[J].Construction and Building Materials,2015,81:66-73.
- [2] 肖岩,杨瑞珍,单波,等.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.

XIAO Yan, YANG Ruizhen, SHAN Bo, et al. Experimental Research on Mechanical Properties of Glubam [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(11):150-157.

- [3] 孙正军,程强,江泽慧.竹质工程材料的制造方法与性能[J].复 合材料学报,2008,24(1):80-83.
 SUN Zhengjun, CHENG Qiang, JIANG Zehui. Processing and Properties of Engineering Bamboo Products[J]. Acta Materiae
- Compositae Sinica,2008,24(1):80-83.
 [4] 高黎,王正,常亮.建筑结构用竹质复合材料的性能及应用研究
 [J].世界竹藤通讯,2008,6(5):1-5.
 GAO Li,WANG Zheng, CHANG Liang. Properties and Utilization Research of Structural Bamboo-based Composites [J].
 World Bamboo and Rattan,2008,6(5):1-5.
- [5] 王绍民.我国竹胶合模板"以竹代木"成效显著、前景广阔[J]. 建筑技术,2010,41(1):19-22.

WANG Shaoming. Replace Wood with Bamboo Outstanding Effect and Broad Prospect of Domestic Bamboo Glued Board [J].Architecture Technology,2010,41(1):19-22.

- [6] WU Wenqing. Experimental Analysis of Bending Resistance of Bamboo Composite I-Shaped Beam[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(4):111-122.
- [7] XIAO Yan, SHAN Bo, CHEN Guo, et al. Development of Laminated Bamboo Modern Structures [C]//Proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies. Bath U K, University of Bath, 2009;6-9.
- [8] 张苏俊,赵志高,张文娟,等.重组竹柱轴心受压试验研究[J]. 施工技术,2015,44(24):120-123.
 ZHANG Sujun,ZHAO Zhigao,ZHANG Wenjuan, et al.Experimental Research on Axial Compression of Recombinant Bamboo Columns[J].Construction Technology,2015,44(24):120-
- 123. [9] 肖岩,冯立,吕小红,等.胶合竹柱轴心受压试验研究[J].工业 建筑,2015,45(4):12-17.

XIAO Yan, FENG Li, LÜ Xiaohong, et al. Experimental Stud-

ies of Glubam Columns under Axial Loads[J].Industrial Construction, 2015, 45(4):12-17.

- [10] LI Haitao, SU Jingwen, ZHANG Qisheng, et al. Mechanical Performance of Laminated Bamboo Column under Axial Compression[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 79 (9):374-382.
- [11] 魏洋,周梦倩,袁礼得.重组竹柱偏心受压力学性能[J].复合 材料学报,2016,33(2):379-385.
 WEI Yang, ZHOU Mengqian, YUAN Lide. Mechanical Performance of Glulam Bamboo Columns under Eccentric Loading[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(2):379-
- [12] 刘学,喻云水,周蔚虹.竹质建筑结构柱抗压性能的研究[J].
 中南林业科技大学学报,2013,33(1):104-108.
 LIU Xue,YU Yunshui,ZHOU Weihong.Study on Compression Resistance of Bamboo Building Structural Column[J].
 Journal of Central South University of Forestry and Technology,2013,33(1):104-108.
- [13] 蒋天元,李玉顺,单炜,等.薄壁C型钢一竹胶板组合箱型柱抗 震性能试验[J].东北林业大学学报,2011,39(12):82-85.
 JIANG Tianyuan,LI Yushun,SHAN Wei,et al.Experimental Study on Seismic Behavior of Thin-wall C Steel-bamboo Plywood Composite Column[J].Journal of Northeast Forestry University,2011,39(12):82-85.
- [14] 解其铁,张王丽,蒋天元,等.钢一竹复合柱轴心受压性能的试验研究[J].工程力学,2012,29(增刊2):221-225.
 XIE Qitie,ZHANG Wangli,JIANG Tianyuan, et al. Experimental Study on Performance of Steel-bamboo Composite Column under Axial Compression[J].Engineering Mechanics, 2012,29(Supp2):221-225.
- [15] WU F,ZHANG X Y,DING J W.Experimental Study on Performance of Steel and Composite Plate Combined Column[J]. Advanced Materials Research.2014.919-921:1805-1811.
- [16] 李冀,陈思甜,孟旭.箍筋增强型胶合竹柱抗压试验[J].林业 科技开发,2014,28(4):113-115.
 LI Ji,CHEN Sitian,MENG Xu.Compressive Strength Test on Bamboo Column Reinforced by Clamps[J].China Forestry Science and Technology,2014,28(4):113-115.
- [17] 赵卫锋,屈鹏,周靖,等.带约束拉杆方形薄壁钢管/竹胶合板 组合空芯柱轴心抗压性能[J].复合材料学报,2016,33(10): 2325-2335.

ZHAO Weifeng,QU Peng,ZHOU Jing,et al.Axial Compression Behavior of Square Thin-walled Steel Tube/Bamboo Plywood Composite Hollow Column with Binding Bars[J].Acta Materiae Compositae Sinica,2016,33(10):2325-2335.

 [18] 赵卫锋,谷伟,周靖,等.带约束拉杆薄壁型钢管/胶合竹板组合 空芯柱偏心抗压性能[J].农业工程学报,2016,32(15):75-82.
 ZHAO Weifeng,GU Wei,ZHOU Jing, et al. Eccentric Compression Behavior of Thin-walled Steel-tube/Bamboo-plywood Assembling Hollow Column with Binding[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (15):75-82.