

文章编号: 1000-4750(2018)07-0091-09

薄壁型钢管/胶合竹板组合空芯柱轴压试验研究

周 靖, 陈卓晟, 赵卫锋, 杨 斌

(湘潭大学土木工程与力学学院, 湖南, 湘潭 411105)

摘 要: 为研究薄壁型钢管/胶合竹板组合空芯柱的轴压性能, 进行了 3 批试件的轴压试验, 考察组合柱的破坏形态特征、抗压承载力和变形情况, 综合分析了长细比、净截面尺寸、空心率、截面组配形式、横向约束拉杆排数和相对竖向间距比对轴压性能的影响。结果表明: 组合柱的破坏形态为端部或中部开胶剥离破坏、柱端竹胶板压溃破坏、端部或约束拉杆间开胶压折破坏以及压曲整体失稳破坏; 增大长细比引起失稳破坏的趋势增大, 净截面尺寸增大是极限承载力提高的关键因素; 截面组配形式能影响组合柱破坏形态特征; 设置约束拉杆能提升组合柱的承压稳定性, 优化约束拉杆排数和相对竖向间距比的设计, 能明显改善材料界面的接触效应而提升承载力。通过非线性回归分析, 建立了组合柱的承载力计算方法。

关键词: 胶合竹板; 薄壁型钢管; 组合空芯柱; 约束拉杆; 轴心抗压; 承载力

中图分类号: TU398.+6 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.04.0278

EXPERIMENTAL STUDY ON THE AXIAL COMPRESSION OF THIN-WALLED STEEL TUBE/BAMBOO-PLYWOOD COMPOSITE HOLLOW COLUMNS

ZHOU Jing, CHEN Zhuo-sheng, ZHAO Wei-feng, YANG Bin

(College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China)

Abstract: To study the axial compression performance of thin-walled steel tube/bamboo-plywood composite hollow columns, three group tests of axial compression specimens were carried out to investigate the failure characteristics, bearing capacity and deformation of the composite columns. The influence of slenderness ratio, net sectional size, hollow ratio, sectional mode, row number and relative vertical spacing ratio of binding bars on the axial compression performance were analyzed. The results indicated that the failure modes can be divided into debonding glue failure at the end or middle of the column, crush failure of bamboo plywood at the end of the column, broken damage at the end of the column or between the binding bars, and the compressive buckling failure. The increase in the slenderness ratio enlarges the risk of buckling failure, and the increase in the net sectional size is the key factor to improve the ultimate bearing capacity. Sectional assembly can affect the failure modes of the composite column. Setting binding bars can improve the compressive stability of the composite column, and optimizing the design of the row number and relative vertical spacing ratio of binding bars can improve the contact effect of each material interface to increase the bearing capacity. A calculation method of the bearing capacity was formulated through the nonlinear regression analysis.

收稿日期: 2017-04-10; 修改日期: 2017-09-14

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); 湖南省自然科学基金项目(2017JJ3302, 2018JJ2401)

通讯作者: 赵卫锋(1977—), 女, 湖南人, 讲师, 博士, 从事组合结构研究(E-mail: weifengzhjing@126.com).

作者简介: 周 靖(1974—), 男, 湖南人, 副教授, 博士, 硕导, 从事组合结构和工程结构抗震研究(E-mail: jingzhchina@163.com);

陈卓晟(1993—), 男, 湖南人, 硕士生, 从事组合结构研究(E-mail: czs1@qq.com);

杨 斌(1992—), 男, 湖南人, 硕士生, 从事组合结构研究(E-mail: 18627598495@wo.com.cn).

Key words: bamboo plywood; thin-walled steel tube; composite hollow column; binding bar; axial compression; bearing capacity

钢材、混凝土和砖等传统建筑材料是高能耗、高污染、高排放的产物，带来了巨大的环境负荷，不符合我国可持续发展的要求^[1]。传统建筑结构的自重大，对施工器械要求高，而且不利于工程结构抗震；传统的环保材料如木材虽然质轻高强，但是其生产周期长、大量伐木也会破坏森林资源，造成水土流失等严重的环境问题；竹材生长周期短，抗压和抗弯性能优异，对环境污染小，再加上竹胶合板等改性竹材的成功研制，为竹材在工程结构领域的应用拓宽了途径^[2-9]，随着绿色建材概念的推广，近年来钢/竹组合结构单元也备受国内学者青睐^[10-14]。

课题组提出了一种新型钢/竹组合结构单元：薄壁型钢管/胶合竹板组合空芯柱(SBCC)，以适应新时代绿色建材的要求。SBCC以薄壁型钢管为柱芯，多层高强竹胶合板环向层叠布置于外围，采用结构胶黏剂黏合而成；以竹材作为抗压和抗弯的受力主体，减小组合柱材料制造成本；内置空芯型钢管起内衬作用，可增大柱的外截面尺寸，调控承压稳定性，并且与竹胶合板形成组合效应，充分发挥钢材和竹材的强度；胶合竹板环向层叠的截面装配方式，能确保组合柱具有均衡的抗弯和抗压性能，消除横向的材料各向异性；柱芯钢管两端可设计为螺栓或插栓口以满足柱体的轴向连接要求。其不但可作为多层竹木建筑、中小跨径木质桥梁、室内装饰装修等工程结构领域的竖向承载构件，而且可用于古木建筑维护、防洪救灾、抗震救灾、地铁隧道等大量需要木质材料的领域。由于SBCC抗压易开胶破坏失效，课题组改进设计了一种带横向约束拉杆薄壁型钢管/胶合竹板组合空芯柱(SBCCB)，即在SBCC的基础上，以约束拉杆作为构造增强措施，布置于柱的上、中、下部。约束拉杆与内置空芯型钢管协同形成套箍作用，减小组合柱对基体界面胶合强度的依赖，能显著延缓开胶失效、改变极限破坏形态而提高极限承载力。

课题组针对SBCC、SBCCB短试件已开展了抗压和抗震性能试验研究^[15-17]。本文对已有的试验资料^[15-16]进一步分析研究，并增大SBCCB试件的长细比、改变约束拉杆设置，主要考察组合柱长试件与短试件的轴压性能差异，研究横向约束拉杆的不同设计参数对SBCCB的破坏形态与极限承载力的

影响规律，建立统一的SBCC和SBCCB承载力计算方法。

1 试件材料与制作

采用规格为2440 mm×1220 mm×10 mm的同批次毛竹竹席胶合板，其含水率为9%，横向和纵向静曲强度分别为52 MPa和83 MPa，纵向顺纹抗压强度为24 MPa，横向和纵向弹性模量分别为7.4 GPa和8.3 GPa；薄壁型钢管为Q235镀锌无缝方型钢管，弹性模量为 2.05×10^5 MPa，屈服强度260 MPa，极限强度340 MPa；约束拉杆采用屈服强度为260 MPa的 $\phi 6$ 全丝螺杆；薄壁型钢管在柱两端均内缩15 mm~20 mm，与横向约束拉杆形成套箍作用，同时协助竹材承压；界面粘结剂选用改性环氧树脂胶，其收缩率 $\leq 1\%$ ，抗拉强度 ≥ 10 MPa，抗剪强度 ≥ 12 MPa。试件制作流程如下：1) 将竹胶合板按设计要求裁切成板带；2) 钢管和竹胶合板定位打孔；3) 对钢管和竹胶合板的表面进行打磨、除灰等处理；4) 黏合钢管和多层竹胶合板带，并安装约束拉杆，用夹具紧固组合柱，在通风干燥条件下养护7 d~10 d，确保胶合强度充分发挥(图1)。



图1 制作试件

Fig.1 Making specimens

2 轴压试验分析

2.1 SBCC 轴压试验

主要考察SBCC的长细比、截面尺寸和空心率($K=b^2/B^2$)对组合柱轴压性能的影响，采用加工制作简便的截面组配方式(图2)，设计制作了15个试件，其设计参数及极限承载力测试结果如表1所示。

试件破坏现象主要为胶合竹板材料破坏、开胶破坏和失稳破坏，15个试件均发生了不同程度的胶

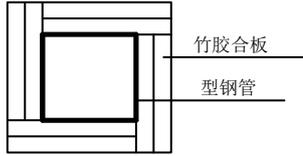


图 2 SBCC 截面形式

Fig.2 Sectional mode of SBCC

表 1 SBCC 试件参数及极限承载力

Table 1 Parameters and ultimate bearing capacity of SBCC

试件编号	长细比 λ	截面尺寸 $B \times B / \text{mm}$	钢管截面 $b \times b \times t / \text{mm}$	净截面尺寸 / mm^2	空心率 K	试件长度 L / mm	极限承载力 N_u / kN
Z1	32.86	60×60	20×20×1	3200	0.11	600	58
Z2	43.82	60×60	20×20×1	3200	0.11	800	50
Z3	54.77	60×60	20×20×1	3200	0.11	1000	45.5
Z4	25.21	80×80	20×20×1	6000	0.06	600	105
Z5	33.61	80×80	20×20×1	6000	0.06	800	83.5
Z6	42.01	80×80	20×20×1	6000	0.06	1000	70
Z7	20.38	100×100	20×20×1	9600	0.04	600	165
Z8	27.17	100×100	20×20×1	9600	0.04	800	151.5
Z9	33.97	100×100	20×20×1	9600	0.04	1000	128
Z10	23.24	80×80	40×40×1	4800	0.25	600	99
Z11	30.98	80×80	40×40×1	4800	0.25	800	93
Z12	38.73	80×80	40×40×1	4800	0.25	1000	72
Z13	17.82	100×100	60×60×1	6400	0.36	600	109
Z14	23.76	100×100	60×60×1	6400	0.36	800	失败
Z15	30.8	100×100	60×60×1	6400	0.36	1000	98.5

合竹板材料破坏, 根据 SBCC 破坏形态特征可划分为 3 类: 1) 端部竹胶板开胶剥离破坏: 典型试件为 Z1、Z4、Z7, 因为长细比和空心率较小, 组合柱整体刚度较大, 在轴压过程中柱身受力较均匀, 抗压性能表现稳定, 柱端局部破坏先于整体破坏; 2) 中部竹胶板开胶剥离破坏: 典型试件为 Z12、Z15, 该类试件空心率大且长细比较大, 柱身侧向刚度较小, 在轴压过程中易产生挠曲二阶效应而产生附加弯矩, 从而导致柱中部竹胶板发生开胶剥离; 3) 压曲整体失稳破坏: 典型试件为 Z2、Z3、Z6, 表明 SBCC 长细比增大到 40 后, 由于柱身柔性大, 柱中部侧向挠度剧增, 最终因为试件纵向弯曲失去平衡而丧失承载力, 发生试件整体失稳破坏, 胶合竹板的材料强度尚未充分发挥。

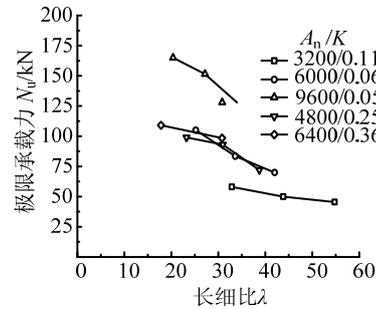
极限承载力与设计参数关系曲线如图 3 所示。结果表明, 随着长细比增加, 极限承载力呈线性缓慢下降趋势; 净截面尺寸的增加是极限承载力提高的主要因素, 特别是: 由于尺寸效应, 截面尺寸为 80 mm×80 mm 的试件, 随着柱芯型钢管截面边长 b 的减小, 净截面尺寸增大却对极限承载力无明显

提升作用; 空心率对极限承载力的影响规律以 $K=0.11$ 为界, 当 $K \leq 0.11$ 时, 极限承载力随空心率的增大而剧减, 当 $K \geq 0.11$ 时, 极限承载力随空心率的增大而缓慢提高。

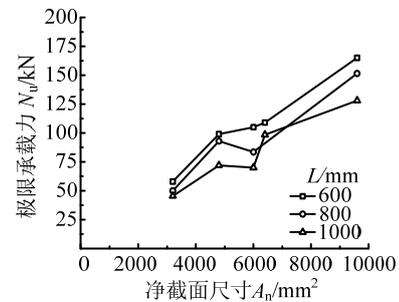
2.2 SBCCB 短柱轴压试验

由于 SBCC 抗压易开胶破坏失效, 为解决此问题, 以横向十字形约束拉杆作为构造增强措施, 布置于柱的中部以及距离柱两端 0.2 倍柱高处, 改进设计而提出了 SBCCB。探讨 SBCCB 的长细比、截面尺寸和截面形式对组合柱轴压性能的影响规律。3 种不同的截面组配方式如图 4 所示, 采用正交试验设计制作了 9 个试件, 其参数设计及极限承载力测试结果如表 2 所示。

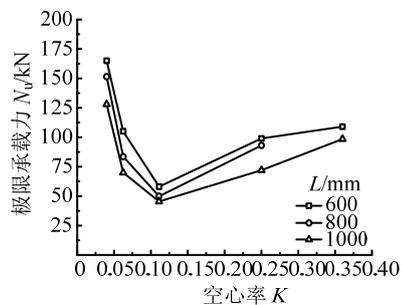
根据试验现象, 以约束拉杆作为构造增强措施的 SBCCB 破坏形态特征可分为 3 类: 1) 端部竹胶



(a) N_u - λ 曲线



(b) N_u - A_n 曲线



(c) N_u - K 曲线

图 3 极限承载力与各参数关系曲线

Fig.3 Curves of ultimate bearing capacity vs design parameters

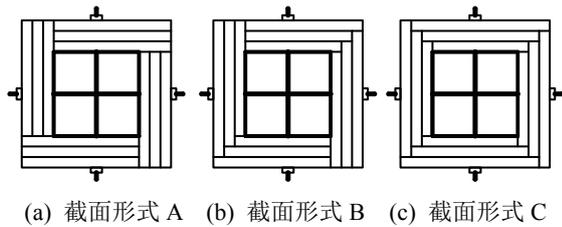


图 4 SBCCB 截面形式

Fig.4 Sectional modes of SBCCB

表 2 SBCCB 短柱试件参数及极限承载力

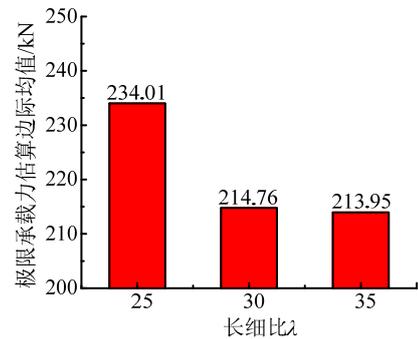
Table 2 Parameters and ultimate bearing capacity of short SBCCB

试件 编号	长细 比 λ	截面 尺寸 $B \times B / \text{mm}$	钢管 截面 $b \times b \times t / \text{mm}$	截面 形式	试件 长度 L / mm	极限 承载力 N_u / kN
S1	25	100×100	40×40×1	A	778	157.10
S2	25	120×120	60×60×1	B	968	215.76
S3	25	140×140	80×80×1	C	1163	329.16
S4	30	100×100	40×40×1	B	933	165.73
S5	30	120×120	60×60×1	C	1161	212.52
S6	30	140×140	80×80×1	A	1395	266.02
S7	35	100×100	40×40×1	C	1089	171.34
S8	35	120×120	60×60×1	A	1355	202.71
S9	35	140×140	80×80×1	B	1628	267.80

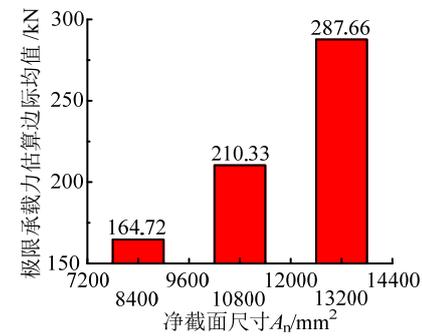
板压溃破坏：典型试件为 S1、S6、S8、S9，该类试件截面尺寸大，承压稳定性良好，主要是无交错竹胶板带黏贴方式的截面形式 A。在轴压过程中，该类试件抗压性能稳定，侧向变形受到较好约束，因其柱端截面胶合界线平直，胶合竹板在接近极限荷载的作用下易按胶合界线发生轻微外翻，最终导致压溃；2) 端部开胶压折破坏：典型试件为 S2、S4、S5，该类试件的特点是长细比较小而截面尺寸较大，整体刚度较大，截面主要为 B 形式。当轴向荷载达到一定水平时，端部竹胶板法向拉应力超过了胶合强度，导致端部开胶后的胶合竹板和柱芯型钢管无法继续协同作用，最终强度相对较弱的胶合竹板被压折而向外鼓曲；3) 约束拉杆间开胶压折破坏：典型试件为 S3、S7，因为截面形式 C 交错咬合的胶合界线，使其柱端部位表现稳定，约束拉杆附近区域也受到显著的套箍效应，所以局部薄弱部位便出现在柱身约束拉杆之间，开胶后的胶合竹板受压发生较大侧向变形而向外鼓曲，最终被压折。

对试验数据采用极差分析法进行分析，计算每个因素不同水平所对应的极限承载力估算边际均值，得到柱形图如图 5 所示；计算长细比、净截面尺寸和截面形式对应的极限承载力估算边际均值极差分别为 20.06、122.94、29.06，表明这 3 个因

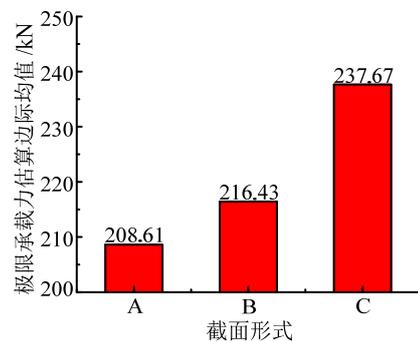
素对极限承载力影响的显著性从大到小依次为净截面尺寸、截面形式、长细比。进一步分析表明：净截面尺寸所提供的承载能力是组合柱承载力的最主要构成，随着净截面尺寸的增大，极限承载力提升幅度大；3 种截面形式对极限承载力的影响较大，胶合界线交错咬合程度越大，越能有效抑制裂缝发展贯穿缝隙黏结面，从而提升极限承载力，缺点是不利于制作工艺的简化；长细比增加，极限承载力下降程度较小；设置横向十字形约束拉杆可有效抑制试件开胶剥离破坏，充分发挥材料强度直到胶合竹板被压折破坏才丧失承载力。



(a) N_u - λ 曲线



(b) N_u - A_n 曲线



(c) N_u -截面形式曲线

图 5 极限承载力估算边际均值与设计因素的柱形图

Fig.5 Column charts between the estimated marginal means of N_u and design parameters

2.3 SBCCB 长柱轴压试验

增大 SBCCB 试件的长细比、改变约束拉杆设

置, 主要考察组合柱长试件与短试件的轴压性能差异, 研究约束拉杆排数和相对竖向间距比(竖向间距与柱截面边长之比)、长细比、截面尺寸对 SBCCB 的破坏形态与极限承载力的影响规律。本批次试件均采用制作工艺简便的截面形式 A, 共设计制作了 4 个试件, 其参数设计及极限承载力测试结果如表 3 所示。

表 3 SBCCB 长试件参数及极限承载力

Table 3 Parameters of specimens and ultimate bearing capacity for long SBCCB

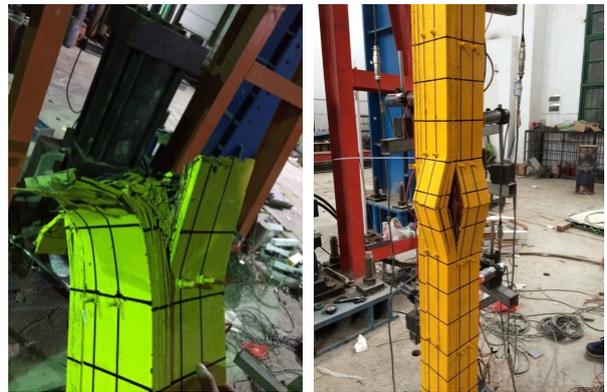
试件编号	长细比 λ	截面尺寸 $B \times B / \text{mm}$	钢管截面 $b \times b \times t / \text{mm}$	约束拉杆排数 r_1
C1	40	140×140	80×80×2	2
C2	50	120×120	60×60×2	2
C3	60	100×100	60×60×2	1
C4	70	80×80	40×40×2	1

试件编号	约束拉杆相对竖向间距比 r_2	试件长度 L / mm	极限承载力 N_u / kN
C1	2	1862	306.63
C2	2	1936	220.20
C3	2.5	2020	147.40
C4	2.5	1807	83.20

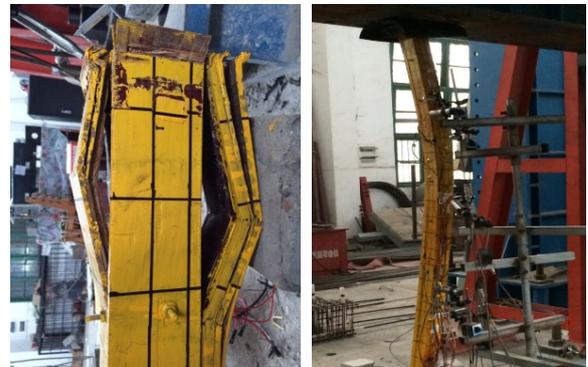
本批次 SBCCB 长试件破坏形态特征与 SBCCB 短试件的结果^[16]既有相似也有不同之处, 如图 6 所示, 可划分以下 4 类: 1) 端部竹胶板压溃破坏: 典型试件为 C1, 其截面尺寸大、长细比较小, 柱身刚度较大, 约束拉杆不仅设置成两排, 而且相对竖向间距比较小, 套箍作用显著, 侧向变形受到极大约束, 因此在轴压过程中, 柱身并未出现明显的开胶剥离现象, 最终柱端竹胶板在很大的荷载作用下按胶交界线发生外翻而被压溃; 2) 约束拉杆间开胶压折破坏: 典型试件为 C2, 因为截面尺寸大、长细比较小, 柱端部位承压稳定, 约束拉杆布置密集, 侧向约束作用明显, 所以局部薄弱部位便出现在柱身约束拉杆之间, 开胶后的胶合竹板受压向外鼓曲, 最终被压折; 3) 端部开胶压折破坏: 典型试件为 C3, 其截面尺寸变小、长细比进一步增大, 约束拉杆布置仅为一排且相对竖向间距比增大, 从而使其在轴压过程中, 柱端薄弱部位先于其他部位发生开胶压折破坏; 4) 压曲整体失稳破坏: 典型试件为 C4, 在文献[16]设置了约束拉杆构造增强措施后, 有效地抑制了组合柱的侧向变形, 从而消除了整体失稳破坏现象, 本批次试件 C4 由于长细比提高幅度大而又再次出现整体失稳破坏, 表明 SBCCB 的抗压

承载有长细比的上限, 且该长细比限值在 70 附近。

图 7 为轴压荷载与轴向位移和应变、柱中部侧向位移和应变的测试结果。分析表明, 试件的各阶段承载荷载随长细比增大、截面尺寸减小而降低; 长细比越大, 试件的轴向和侧向刚度越小, 轴向变形曲线的弹性段越短, 较早进入塑性变形段, 侧向变形和应变的发展也较大。约束拉杆两排布置且相对竖向间距比较小的试件 C1 和 C2, 表现出较好的抗压能力; 约束拉杆和柱芯型钢管形成的套箍效应, 表现为试件裂缝出现时机延后, 开胶破坏只出现在局部薄弱部位。



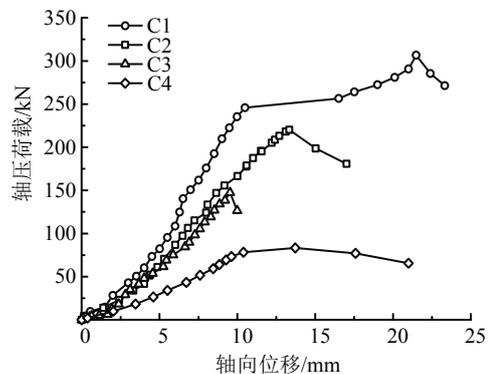
(a) 端部竹胶板压溃破坏 (b) 约束拉杆间开胶压折破坏



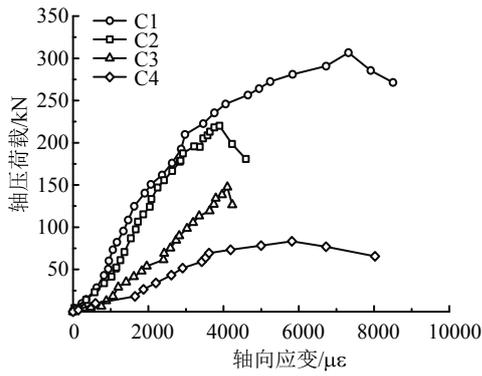
(c) 端部开胶压折破坏 (d) 压曲整体失稳破坏

图 6 试件破坏形态

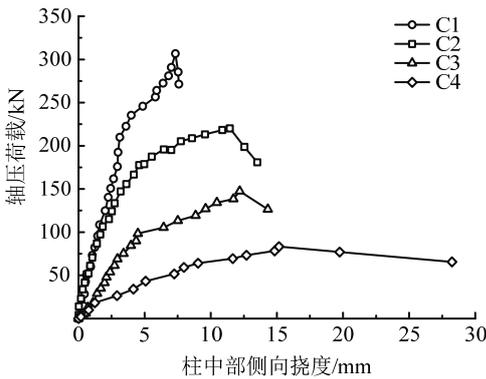
Fig.6 Failure modes of specimens



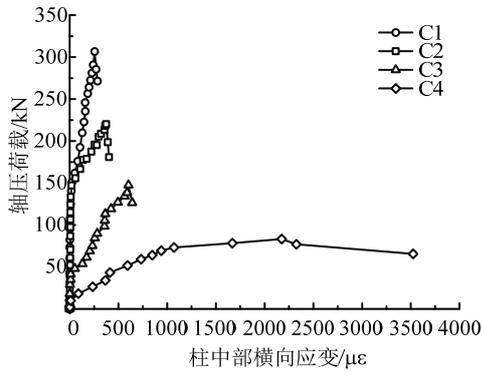
(a) 轴压荷载-轴向位移曲线



(b) 轴压荷载-轴向应变曲线



(c) 轴压荷载-柱中部侧向挠度曲线



(d) 轴压荷载-柱中部横向应变曲线

图 7 轴压测试结果

Fig.7 Test results of specimens

3 轴压承载力

3.1 影响规律

对比上述 3 批次试验的极限压应力，如表 4 所示，SBCC 抗压易发生开胶剥离破坏而丧失承载力，此时胶合竹板材料强度尚有潜力未发挥，通过横向十字形约束拉杆作为构造增强措施后的 SBCCB，开胶剥离现象被有效抑制，胶合竹板直到被压折才丧失承载能力，平均极限压应力相对提升 26.3%，且 SBCCB 的极限压应力变异系数为 0.086，相对 SBCC 的 0.146 减小了 41.1%，数据离散程度更小，

说明约束拉杆的设置能提升组合柱的承压稳定性。通过优化约束拉杆参数设计，主要考察约束拉杆排数和相对竖向间距比的 SBCCB 长试件，即使长细比大幅度提升，但是其平均极限压应力可达到 23.16 MPa，相对文献[16]提升 14.1%，表明改变约束拉杆布置方式能明显改善各材料界面间的接触效应，套箍作用显著，从而提升组合柱的轴压性能。

表 4 极限压应力比较

Table 4 Comparison of ultimate compressive stress

试件编号	极限承载力 N_u/kN	净截面尺寸 A_n/mm^2	极限压应力/MPa	平均极限压应力/MPa
Z1	58.0	3200	18.13	
Z2	50.0	3200	15.63	
Z3	45.5	3200	14.22	
Z4	105.0	6000	17.50	
Z5	83.5	6000	13.92	
Z6	70.0	6000	11.67	
Z7	165.0	9600	17.19	
文献[15] Z8	151.5	9600	15.78	16.06
Z9	128.0	9600	13.33	
Z10	99.0	4800	20.63	
Z11	93.0	4800	19.38	
Z12	72.0	4800	15.00	
Z13	109.0	6400	17.03	
Z14	失败	6400	/	
Z15	98.5	6400	15.39	
S1	157.10	8400	18.70	
S2	215.76	10800	19.98	
S3	329.16	13200	24.94	
S4	165.73	8400	19.73	
文献[16] S5	212.52	10800	19.68	20.29
S6	266.02	13200	20.15	
S7	171.34	8400	20.40	
S8	202.71	10800	18.77	
S9	267.80	13200	20.29	
本试验 C1	306.63	13200	23.23	
本试验 C2	220.20	10800	20.39	
本试验 C3	147.40	6400	23.03	23.16
本试验 C4	83.20	3200	26.00	

在 SBCC 和 SBCCB 长柱的轴压试验中，均有试件出现了整体失稳破坏。发生整体失稳破坏的长细比限值对 SBCC 和 SBCCB 分别约为 40 和 70，失稳破坏同样不能充分发挥竹材的强度。文献[16]提出的 3 种截面组配形式，能直接影响组合柱破坏

形态特征，具体表现为：截面胶合界线交错咬合程度越大，越能有效抑制裂缝发展贯穿缝隙黏结面，从而改变组合柱的薄弱部位，提升极限承载力。缺点是胶合界线交错咬合程度越大，制作装配越复杂，不利于工业化生产，因此，综合考虑各因素，建议量产采用截面形式 A。

胶合竹板的净截面尺寸所提供的承载力是组合柱承载能力的最主要构成，净截面尺寸的增大是极限承载力提高的关键因素，通过合理设计截面尺寸和空心率来确定净截面尺寸，是比较科学合理的方法。在净截面尺寸相同的条件下，空心率越大，则截面尺寸越大，组合柱承压稳定性更优，柱身受受力较均匀；同样地，在净截面尺寸相同的条件下，当柱计算长度也相同时，空心率更大的试件计算长细比较小，可显著增大整体刚度而改善组合柱的轴压性能。

3.2 承载力估算公式

从测试破坏过程和荷载-变形数据分析可知，组合柱基本保持了胶合竹的材料特性，属于脆性破坏，即轴压承载力达到峰值后承载力迅速退化，塑性发展阶段较短，因此轴压承载力计算方法以最大承载荷载为构建计算方法的依据；以柱芯型钢管和外围胶合竹板黏结装配而成的组合柱，既具有组合结构的特点，也具有胶合木结构的特点。虽然柱芯型钢管的净截面比例不高，但钢材的抗压强度和弹性模量比胶合竹板高，有不可忽视的影响，为保持与我国《胶合木结构技术规范》^[18]基本相似的设计

方法，将柱芯型钢管净截面面积按轴压承载力相等的原则等效为胶合竹截面面积后考虑折减系数；试验测试的柱端约束条件均为单向刀铰，承载力计算方法的试件长度系数均取 1.0，暂不考虑其他柱端支座类型。

考虑各参数对极限承载力的影响规律，以上述 3 批次试验测试结果作为样本，参考《木结构设计规范》^[19]，借鉴钢筋混凝土柱箍筋约束指标(配箍特征值)和带约束拉杆钢管混凝土柱的拉杆约束系数^[20]，构造统一的承载力计算公式如下：

$$N_u = \varphi f_b A_{b,eq} = \varphi_\lambda \varphi_r f_b \left(A_b + \alpha_1 A_s \frac{f_s}{f_b} \right) \quad (1)$$

$$\text{当 } \lambda \leq 50 \text{ 时, } \varphi_\lambda = \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda}{\alpha_2} \right)^2} \quad (2)$$

$$\text{当 } \lambda > 50 \text{ 时, } \varphi_\lambda = \frac{\alpha_3}{\lambda^2} \quad (3)$$

$$\varphi_r = 1 + \frac{\alpha_4 f_r r_1^{\alpha_5}}{f_b r_2 B} \quad (4)$$

式中： φ 为轴压稳定系数； φ_λ 为长细比影响系数； φ_r 为约束拉杆影响系数；竹胶板纵向抗压强度 $f_b=24$ MPa；钢材屈服强度 $f_s=260$ MPa；约束拉杆屈服强度 $f_r=260$ MPa； $A_{b,eq}$ 为等效竹胶板截面面积； A_b 为竹胶板净截面积； A_s 为型钢管截面积； λ 为长细比； B 为柱截面边长； r_1 、 r_2 分别为约束拉杆排数和相对竖向间距比； α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 、 α_5 为待定参数。

通过非线性回归分析，得到简化参数 $\alpha_1=0.20$ 、

表 5 极限承载力试验值与计算值的比较

Table 5 Comparison between test values and calculated values on N_u

试件编号	试验值 N_u /kN	计算值 N_{ui} /kN	相对误差/(%)	试件编号	试验值 N_u /kN	计算值 N_{ui} /kN	相对误差/(%)
Z1	58.00	51.84	10.6	Z15	98.50	111.32	13.0
Z2	50.00	40.54	18.9	S1	157.10	199.38	26.9
Z3	45.50	53.84	18.3	S2	215.76	247.45	14.7
Z4	105.00	111.39	6.1	S3	329.16	294.56	10.5
Z5	83.50	93.43	11.9	S4	165.73	173.46	4.7
Z6	70.00	77.40	10.6	S5	212.52	216.88	2.1
Z7	165.00	192.96	16.9	S6	266.02	259.58	2.4
Z8	151.50	169.66	12.0	S7	171.34	151.51	11.6
Z9	128.00	146.83	14.7	S8	202.71	190.42	6.1
Z10	99.00	96.41	2.6	S9	267.80	228.77	14.6
Z11	93.00	82.44	11.4	C1	306.63	311.37	1.5
Z12	72.00	69.48	3.5	C2	220.20	214.30	2.7
Z13	109.00	142.50	30.7	C3	147.40	122.14	17.1
Z14	失败	/	/	C4	83.20	69.32	16.7

$\alpha_2=44$ 、 $\alpha_3=2000$ 、 $\alpha_4=5.47$ 、 $\alpha_5=1.57$ ，整体相关性系数 $R^2=0.936$ 。对比极限承载力计算值与试验值如表 5 所示，除去有明显偏差的 Z13 和 S1，其他误差均控制在 18.9%以内，表明：此承载力计算公式适用于本文 3 批次试验试件，统一了 SBCC 和 SBCCB 的承载力计算方法，可为(带约束拉杆)薄壁型钢管/胶合竹板组合空芯柱的工程设计与应用提供参考。

4 结论

(1) 组合柱的破坏形态可分为：端部或中部开胶剥离破坏、柱端竹胶板压溃破坏、端部或约束拉杆间开胶压折破坏和压曲整体失稳破坏。

(2) 约束拉杆的设置能提升组合柱的承压稳定性和抗压承载力，通过优化约束拉杆排数和相对竖向间距比的设计，明显改善了各材料界面的接触效应，套筒作用显著，能有效约束柱身侧向变形和裂缝的开展，抑制开胶剥离现象，从而提高组合柱的极限承载力。

(3) 净截面尺寸的增大是极限承载力提高的关键因素，通过合理设计截面尺寸和空心率来确定净截面尺寸，是较好的方法；极限承载力随长细比的增大而降低，发生整体失稳破坏的长细比限值针对 SBCC 和 SBCCB 分别约为 40 和 70。

(4) 截面组配形式能影响组合柱破坏形态特征。截面胶合界线交错咬合程度越大，越能有效抑制裂缝发展贯穿缝隙黏结面，从而改变组合柱的薄弱部位，提升极限承载力。

(5) 通过非线性回归分析建立了承载力计算公式，考虑了约束拉杆排数和相对竖向间距比的影响，统一了 SBCC 和 SBCCB 的承载力计算方法，能更全面地体现组合柱承载力的变化规律，可为工程设计与应用提供参考。

参考文献：

[1] 谢启芳, 吕西林, 熊海贝. 轻型木结构房屋的结构特点与改进[J]. 建筑结构学报, 2010, (S2): 350—354.
Xie Qifang, Lv Xilin, Xiong Haibei. Structural characteristics and improvement of light wood-frame houses [J]. Journal of Building Structures (Supplementary Issue 2), 2010, (S2): 350—354. (in Chinese)

[2] Bahtiar E T, Nugroho N, Surjokusumo S, et al. Eccentricity effect on bamboo's flexural properties [J]. Journal of Biological Sciences, 2013, 13(2): 82—87.

[3] Verma C S, Chariar V M. Stiffness and strength analysis of four layered laminate bamboo composite at

macroscopic scale [J]. Composites Part B Engineering, 2013, 45(1): 369—376.

[4] Sharma B, Gatóo A, Bock M, et al. Engineered bamboo for structural applications [J]. Construction and Building Materials, 2015, 81: 66—73.

[5] Xiao Y, Zhou Q, Shan B. Design and construction of modern bamboo bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 15(5): 533—541.

[6] 肖岩, 陈国, 单波, 等. 竹结构轻型框架房屋的研究与应用[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 195—203.
Xiao Yan, Chen Guo, Shan Bo, et al. Research and applicant of lightweight glue—laminated bamboo frame structure [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 195—203. (in Chinese)

[7] Li H T, Su J W, Zhang Q S, et al. Mechanical performance of laminated bamboo column under axial compression [J]. Composites Part B Engineering, 2015, 79: 374—382.

[8] 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—385. (in Chinese)

[9] 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(1): 80—83.
Sun Zhengjun, Cheng Qiang, Jiang Zehui. Processing and properties of engineering bamboo products [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008(1): 80—83. (in Chinese)

[10] Shen H, Li Y, Zhang Z, et al. Research advances of bamboo-steel composite structural members [J]. Journal of Computational & Theoretical Nanoscience, 2011, 4(8): 2963—2967.

[11] 解其铁, 张玉丽, 蒋天元, 等. 钢-竹组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(Suppl 2): 221—225. (in Chinese)

[12] 李玉顺, 蒋天元, 单炜, 等. 钢-竹组合梁柱边节点拟静力试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 241—248.
Li Yushun, Jiang Tianyuan, Shan Wei, et al. Quasi-static test on steel-bamboo composite beam-column exterior joints [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 241—248. (in Chinese)

[13] Wu W. Experimental analysis of bending resistance of bamboo composite I-shaped beam [J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(4): 111—122.

[14] 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 & Technology, 2013, 33(1): 104—108. (in Chinese)
- [15] 赵卫锋, 张武东, 周靖, 等. 薄壁方型钢管/竹胶板组合空芯柱轴心抗压性能[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 37—45.
- Zhao Weifeng, Zhang Wudong, Zhou Jing, et al. Axial compression behavior of square thin-walled steel tube-laminated bamboo composite hollow columns [J]. Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(6): 37—45. (in Chinese)
- [16] 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. (in Chinese)
- [17] Zhou J, Zhao W, Tang K, et al. Seismic performance of square, thin-walled steel tube/bamboo plywood composite hollow columns with binding bars [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 89: 152—162.
- [18] GB/T 50708—2012, 胶合木结构技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- GB/T 50708—2012, Technical code of glued laminated timber structures [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [19] GB 50005—2003, 木结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- GB 50005—2003, Code for design of timber structures [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [20] 杨国庆, 赵均海, 封文字. 基于统一强度理论的带约束拉杆矩形钢管混凝土短柱轴压承载力研究[J]. 混凝土, 2015(9): 5—8, 11.
- Yang Guoqing, Zhao Junhai, Feng Wenyu. Theoretical research on axial bearing capacity of rectangular concrete filled steel tube stub column with binding bars on twin shear unified strength theory [J]. Concrete, 2015(9): 5—8, 11. (in Chinese)

(上接第 78 页)

- [16] 王滨, 董毓利. 钢筋混凝土双向板火灾试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 57(4): 53—62.
- Wang Bin, Dong Yuli. Experimental study of two-way reinforced concrete slabs under fire [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 57(4): 53—62. (in Chinese)
- [17] Bailey C G, White D S, Moore D B. The tensile membrane action of unrestrained composite slabs simulated under fire conditions [J]. Engineering Structures, 2000, 22(12): 1583—1595.
- [18] Usmani A S, Cameron N J K. Limit capacity of laterally restrained reinforced concrete floor slabs in fire [J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(2): 127—140.
- [19] Cameron N J K, Usmani A S. New design method to determine the membrane capacity of laterally restrained composite floor slabs in fire. Part 1: Theory and method [J]. The Structural Engineer, 2005, 83(19): 28—33.
- [20] GB 50152-1992, 混凝土结构试验方法标准[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992: 15—18.
- GB 50152-1992, Standard Methods for Testing of Concrete Structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992: 15—18. (in Chinese)