

角钢-集成材 L 形组合柱的受压性能研究

李威¹, 高颖¹, 孟鑫淼^{2*}, 胡祺斌¹, 邱雅琴¹

(1.北京林业大学材料科学与技术学院,木材科学与工程北京市重点实验室,木质材料科学与应用教育部重点实验室,北京 100083;2.北京林业大学土木工程系,北京 100083)

摘要:为提高装配式木结构中异形柱的力学性能,设计了一种用热压等边角钢和 SPF 集成材为原料,环氧树脂胶黏剂连接制作的角钢-集成材 L 形组合柱,作为框架结构或框架剪力墙结构的角柱。以角钢边宽度对 L 形柱正截面承载力的影响进行了轴压试验研究,并进行 ANSYS 有限元模拟,以判断模拟预测的准确性。结果表明:角钢-集成材 L 形组合柱相对于同截面面积的木柱而言承载能力上升 37.0%~51.4%,刚度上升 36.5%~72.8%,同时 L 形柱有良好的延性;适当增加 L 形柱中的角钢边宽度可以使承载能力有效提高,但是其短边处的集成材易产生破裂,增加试件的脆性破坏;集成材之间的环氧树脂胶合界面在破坏前后都性能良好,在材料弹性阶段钢材和木材有效共同受力,承载力计算时需要考虑钢材的塑形增强作用;ANSYS 有限元模拟的角钢-集成材 L 形组合柱弹性模量结果和试验结果一致,误差在 10% 以内,模拟结果基本可靠。研究成果对于预测角钢-集成材 L 形组合柱在实际预制装配时的安全可靠性能提供了理论依据。

关键词: 钢木组合结构;集成材;异形柱;受压性能;有限元分析

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 2096-1359(2020)01-0053-08



Study on compressive performance of angle steel-glued laminated timber L-shaped composite column

LI Wei¹, GAO Ying¹, MENG Xinmiao^{2*}, HU Qibin¹, QIU Yaqin¹

(1. College of Material Science and Technology in Beijing Forestry University, Beijing Key Laboratory of wood Science and Engineering, MOE Key Laboratory of wooden Material Science and Application, Beijing 100083, China;
2. Department of Civil Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the mechanical properties of the special-shaped columns of fabricated wooden structures, this study designed an angle-steel-glued L-shaped composite column made of hot-pressed equiangular steel and spruce, pine and fir (SPF) dimension lumber-laminated material and epoxy resin adhesive, which can be used as the corner column of frame structure or frame shear wall structure. The bearing test and analysis of the influence of the width of the angle steel on the normal section bearing capacity of the special-shaped column were carried out, and the finite element simulation was conducted using ANSYS software to verify the accuracy of the simulation prediction. The results showed that the steel-wood L-shaped composite column had a load-carrying capacity increase of 37.0%–51.4% and a stiffness increase of 36.5%–72.8% with respect to the wood column. At the same time, the L-shaped column had good ductility. The width of the edge can effectively improve the load-carrying capacity, but the laminated material at the short side was prone to cracking and increased the brittleness. The interface bonded with the epoxy resin between the laminated materials always had good performance, and the steel in the material elastic stage effectively combined with wood. The shape enhancement of the steel should be considered in the calculation of the bearing capacity. The elastic modulus of the steel-wood L-shaped composite column simulated by ANSYS software was consistent with the test results, and the error was within 10%, which proved that the simulation results were relatively reliable. The research results can provide a theoretical basis for predicting the safety and reliability of the L-shaped steel-wood composite columns in the practical industrial prefabrication.

Keywords: steel-wood composite structure; glued laminated timber; special-shaped column; compressive performance; finite element analysis

预制装配式木结构建筑由于其节能环保、标准化程度高、施工周期短等优点而越来越被广泛应

收稿日期: 2019-03-19

修回日期: 2019-04-20

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0703503); 国家自然科学基金(31770602); 北京市支持中央在京高校共建项目(2015-共建); 北京林业大学科技创新计划项目(2017JC11); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(BLX201706)。

作者简介: 李威,男,研究方向为木质复合材料。通信作者: 孟鑫淼,男,讲师。E-mail: mengxinmiao@bjfu.edu.cn

用^[1]。《中共中央国务院关于加强城市规划建设管理工作的若干意见》提出大力推广装配式建筑,在具备条件的地方倡导发展现代木结构建筑^[2]。住建部《“十三五”装配式建筑行动方案》提出建立装配式建筑技术体系和关键技术,推动“钢-混”“钢-木”“木-混”等装配式组合结构的研发应用^[3]。但同时,国内装配式木结构建筑技术仍不够完善,施工水平也参差不齐,在安装过程中会存在累计误差影响安装精度的问题。为此,新型的材料组合形式将有助于完善装配式木结构建筑的技术体系。

异形柱指的是形状为L形、T形和十字形的柱^[4]。异形柱结构有利于施工时的安装定位,同时由于具有房间得房率高、空间布置灵活等优点而被应用到钢筋混凝土结构中^[5]。但相应的,与传统矩形柱相比,异形柱的抗震能力和受压时的稳定性会因为截面的异形而受到削弱^[6]。为此有学者提出用型钢混凝土的形式来提高其力学性能^[7],型钢骨架可以使混凝土异形柱的轴心受压^[8]和偏心受压能力^[9]有很大提升。

钢木组合异形柱与型钢混凝土异形柱相似,可以通过木材与钢材的组合和协同作用来确保结构柱在异形截面下保持良好的力学性能。钢木组合结构常用于增加木质结构柱的承载能力,主要分为两种形式:一种是木质圆柱或方柱中间设置型钢,再用胶黏剂与角钢相连接^[10-12],包覆层可起到防止钢材屈曲的作用,同时又可减少钢材与外界空气的接触,防止其氧化生锈。另一种是在圆柱或方柱外围包覆钢材^[13-14],约束木材的横向变形。目前对钢木组合柱的研究主要围绕在对钢木组合柱承载力的分析预测以及结构柱在受到荷载时钢材与木材的共同工作情况。已有的研究认为规则形状钢木组合柱的轴向承载力相对于纯木柱显著提升^[10],木材的使用可以较大程度地提升强重比^[13]。木包钢的结构形式可以使型钢的屈曲行为得到很大的改善^[11],钢材和木材

可以通过胶黏剂结合而有效地共同承担荷载^[12];钢包木的结构可以通过胶黏剂使木材和钢材相连,可以改善木材裂缝、木节等天然缺陷对木材强度的影响,明显改善木材破坏形态,起到加固木材、提升刚度的作用^[14]。

虽然目前国内外对钢木组合柱进行了相关研究^[15],但是研究的均是规则形状的柱体,木结构建筑中的异形柱结构形式在国内外都未发现有研究和使用。考虑到木包钢的结构形式相对于钢包木更加易于预制与维护,且外形美观、安装方便,本研究设计了两组不同角钢类型的角钢-集成材组合L形异形柱,作为框架结构或框架剪力墙结构的角柱,并对其进行了轴压试验研究;以角钢边宽度对L形柱正截面承载力的影响进行了试验研究与有限元模拟分析。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1) 北美进口一级SPF规格材(云杉-松木-冷杉),密度 0.457 g/cm^3 ,含水率13.99%。

2) 型钢:试验采用热轧等边角钢,角钢相关参数如表1所示。

表1 角钢类型及尺寸

Table 1 The type and size of angle steel

角钢类型	钢材型号	边宽度 b / mm	边厚度 d / mm	纵向长度 L / mm
S100×8	Q235	100	8	500
S125×8	Q235	125	8	500

3) 胶黏剂:水性乙烯基聚氨酯胶黏剂,用于结构用集成材的制作;e-44环氧树脂胶和固化剂650聚酰胺树脂,用于角钢与结构用集成材之间的胶合连接。

1.2 试件设计

试验设计了两组角钢-集成材L形组合柱截面尺寸,如图1所示,同时设计了与L形柱横截面积

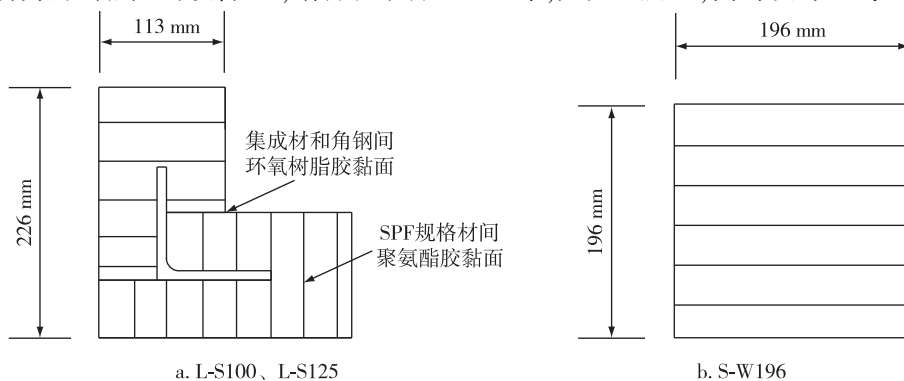


图1 试件截面示意图

Fig. 1 The cross section of specimens

相近的方形木柱作为对照组。其中 L-S100 和 L-S125 为角钢集成材 L 形柱, S-W196 为方形木柱。

L 形柱和木柱使用的角钢类型、试件长度和截面面积如表 2 所示。

表 2 试件类型及尺寸

Table 2 The types and sizes of specimens

组号	角钢类型	试件长度/ mm	角钢截面 面积/mm ²	整体截面 面积/mm ²	数量
L-S100	S100×8	500	1 564	38 307	2
L-S125	S125×8	500	1 975	38 307	2
S-W196	-	500	-	38 416	2

1.3 角钢-集成材 L 形组合柱的制作

1) 结构用集成材制备。将 SPF 规格材使用水性乙烯基聚氨酯胶黏剂胶合, 胶黏剂涂抹量 250 g/m², 加压温度 30 ℃, 压紧压力 3~10 kgf/m², 加压时间 60 min, 分别制作成规格为 113 mm×174 mm×500 mm 和 113 mm×226 mm×500 mm 的结构用集成材, 开槽后嵌入角钢。同时制作了规格为 196 mm×196 mm×500 mm 的集成材作为对照木柱。

2) 结构用集成材开槽。将制作好的结构用集成材进行铣形并开槽成截面形状为图 2 所示, 标注为 1 和 2 的两根木柱, 并使两根木柱相互垂直相接。木槽与角钢为间隙配合, 间隙为 0.5 mm。木柱 2 与热轧等边角钢(图中标注为 3)角部内圆弧相接触的部分倒圆角, 半径与热轧等边角钢内圆弧

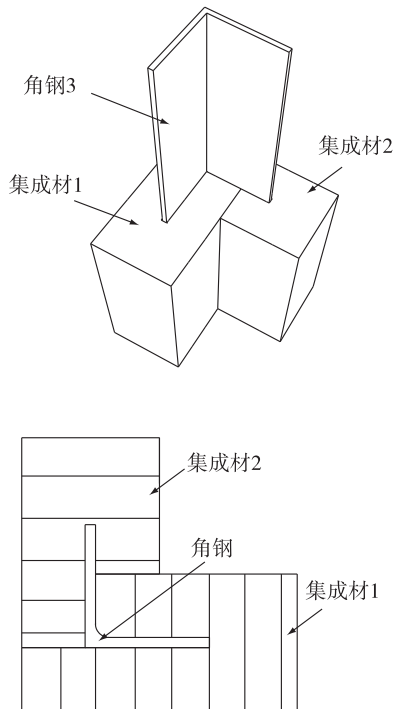


图 2 角钢-集成材 L 形组合柱组坯示意图

Fig. 2 The manufacturing process of specimens

半径相同(试件 L-S100 为 12 mm、试件 L-S125 为 14 mm)。

3) 施胶与组坯。将环氧树脂 e-44(6101) 和聚酰胺树脂按照 1:1 的比例搅拌均匀, 然后将搅拌均匀的胶黏剂填充至结构用集成材 1、2 的槽内后插入热轧等边角钢 3, 使角钢与结构用集成材之间的空隙被填满。涂胶时在两根木柱 1、2 之间的连接部位也施加胶黏剂, 使其紧密连接, 组坯时角钢对称轴和组合柱对称轴重合。

4) 加压与校准。将已经组坯完成的钢木 L 形组合柱上下左右四面加压, 加压温度为 30 ℃, 加压时间 48 h, 加压压力 3~10 kgf/m², 加压时确保 L 形柱的角度为 90°。

1.4 试件加载方案及设备

轴压试验使用济南方辰 wAw-2500B500t 作动器加载系统施加轴向荷载, 参考美国标准 ASTM D198-15《Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes》, 在正式加载之前, 对安装好的试验柱进行预加载, 保证加载系统和量测系统正常工作。正式开始试验后以 1 mm/min 的均匀速度进行加载, 试件破坏后承载力降至最大荷载的 80% 时停止试验。

L 形柱两端用特制夹具夹紧以减小端部开裂对试验结果的影响, 夹具与试件之间使用 113 mm×113 mm×100 mm 的木质垫块以确保加载时的稳定性, 如图 3 所示。

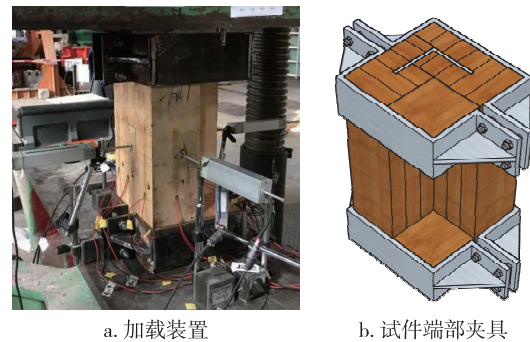


图 3 试件加载装置及夹具

Fig. 3 Experimental setup and instrumentations

试件的位移计和应变片布置如图 4 所示, 采用东华测试公司 DH3816 数据采集系统进行位移和应变的采集。在 L 形柱中央截面的各个方向黏贴标距为 100 mm 的电阻应变片, 记录荷载作用下的应变; 在柱脚两侧各安设一个位移计, 记录轴向压缩位移; 在柱的中央截面的 4 个方向各安设一个位移计, 记录跨中挠度值。对照组轴压试验加载制度与 L 形柱相同。

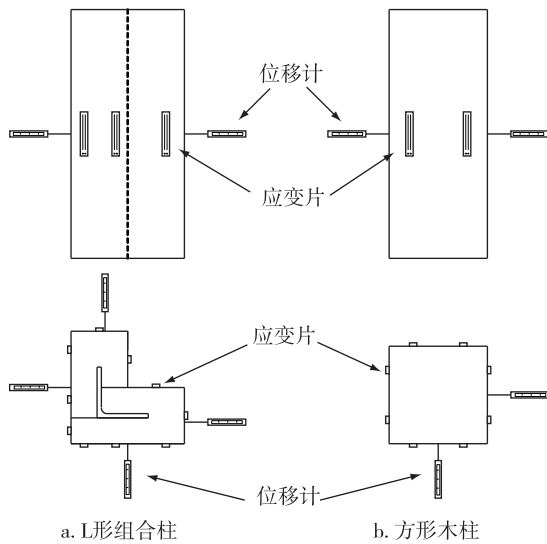


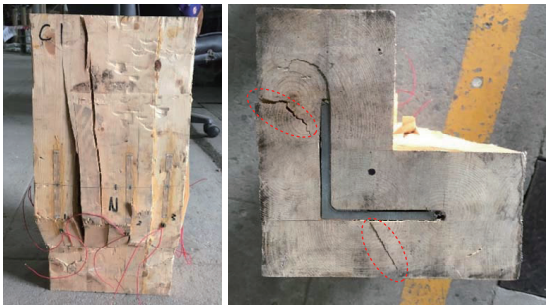
图4 量测装置布置图

Fig. 4 Measurement schematic view

2 结果与分析

2.1 试件破坏形态

试验加载初期,试件各个方向的横向位移相近,没有明显差别,说明在弹性阶段,钢木L形组合柱各截面均匀受力。随着荷载的持续增加,柱体



a. L-S100破坏形态



b. L-S125破坏形态

图5 角钢-集成材L形组合柱破坏形态

Fig. 5 The failure modes of composite specimens

2.2 试件荷载-位移曲线

试件 L-S100、L-S125 和 S-W196 峰值荷载见表 3,荷载-位移曲线见图 6,其中初期刚度取荷载位移曲线上 $0.1P_{max}$ 和 $0.4P_{max}$ 两点的割线刚度。在加载的初期,3根试件受力处于弹性阶段,荷载随位移线性增加。随后进入屈服阶段,荷载仍然在增加,但增加速率变小,此时钢材进入屈服阶段,试件进入弹塑性变形阶段。当荷载增大到一定限值时,试件进入塑性阶段。最终由于集成材屈曲或压溃断裂,试件荷载开始下降,然后达到破坏。试件 L-S125 和木柱在达到最大荷载后的荷载位移曲线相似,开始均匀下降;试件 L-S100 在达到最大荷载后荷载随位移下降缓慢。试验结果表明,试件 L-

的木质部分开始出现裂纹,此时柱体仍能继续承担荷载;当荷载继续增大时,裂纹开始增多并扩大,试件 L-S100 裂纹出现在长边处,而试件 L-S125 的裂纹出现在短边处,这是由于 L-S125 试件的角钢边宽度较大、槽较深造成的。裂纹分为聚氨酯胶缝裂缝和木材本身开裂两种。木材本身开裂时,长边集成材出现侧向鼓胀。试件各阶段的破坏特征有所不同,图 5a 和 5b 分别是试件 L-S100 和 L-S125 的最终破坏形态:L-S100 的集成材出现屈曲和断裂,试件承载能力缓慢下降直到完全破坏,L-S125 的集成材中间部位出现压溃断裂,试件失去承载能力。

试件破坏后,两块集成材之间环氧树脂胶层界面连接紧密,未出现破坏现象;角钢内侧与集成材的胶合界面有较为明显分离,胶层分离处粘连有木材,角钢外侧与木材的胶合依然紧密;角钢的屈曲形状与集成材鼓胀形状一致,这是由于在弹性阶段时,角钢的横向变形受到木材的约束,屈曲受到限制,从而较好地与木材共同承担荷载,而在试件破坏时,由于胶黏剂的使用,角钢和木材之间共同作用,一起产生横向变形,所以破坏形状相似。压弯后的试件钢材的顶部高度略低于集成材。

S100 和 L-S125 的最大荷载比木柱分别增加了 37.0% 和 51.4%,试件 L-S100 和 L-S125 的刚度比木柱分别增加了 36.5% 和 72.8%。从图 6d 可以看出,

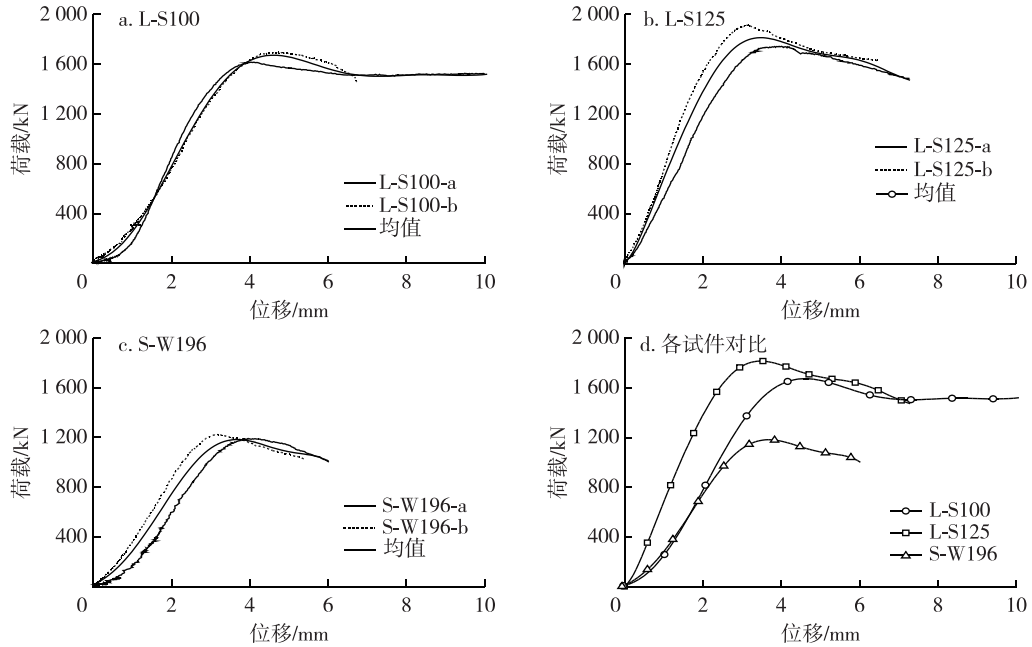
表3 试件峰值荷载对比

Table 3 The comparison of ultimate load among different specimens

试件编号	角钢型号/ mm	峰值荷载 P_{max} / kN	初期刚度 K_0 / ($kN \cdot mm^{-1}$)
L-S100-a	S100×8	1 611	662.7
L-S100-b	S100×8	1 691	444.0
L-S125-a	S125×8	1 740	612.8
L-S125-b	S125×8	1 909	788.0
S-W196-a	-	1 188	360.0
S-W196-b	-	1 222	450.7

适当增加 L 形组合柱中的角钢边宽度可以使承载能

力有效提高,但是其短边处的集成材易产生破裂。



注:试件型号中 a,b 代表同一组的不同试件。下同。

图 6 试件荷载-位移曲线图

Fig. 6 Load-displacement curve of specimens

2.3 试件截面应变分析

通过在试件中部黏贴的应变片,获取试件的截

面应变分布情况(图 7)。试件在加载过程中,截面应变在弹性工作范围内呈线性增长,最早进入塑形

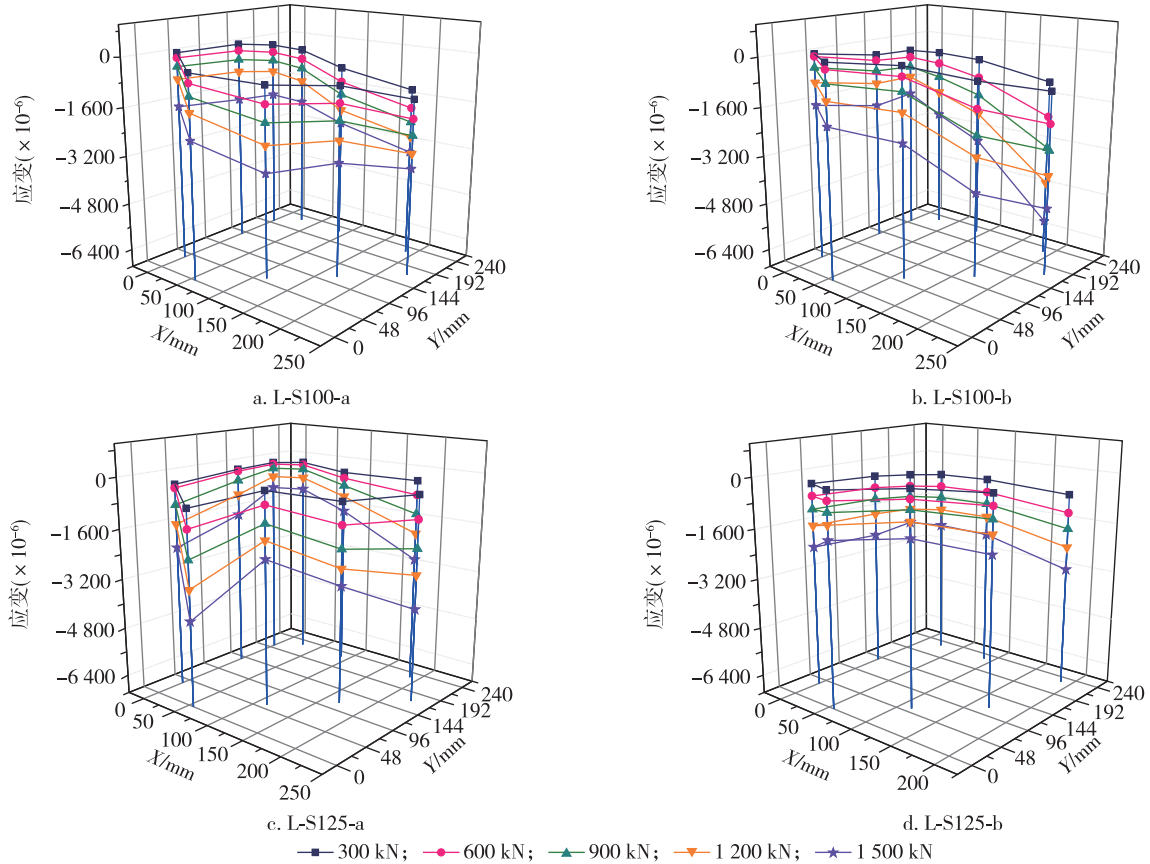


图 7 不同荷载下试件 L-S100 和 L-S125 各截面应变

Fig. 7 The cross section strain of species L-S125 and L-S100 under different levels of load

形变的部位先产生鼓胀破坏。不同试件纵向的应变在截面内分布不同,L-S100 试件形心朝长边方向产生偏压,而 L-S125 试件沿形心向 L 形内侧偏压。L-S100 试件面积较小的柱肢的纵向应变更大,可能是由于 L-S100 角钢在该柱肢内的长度较短,导致胶合面积较小侧集成材为较薄弱区,产生更大的应变,最早发生破坏与倾斜;L-S125 试件的角钢具有更大的边宽度,使两段集成材受力较为均匀,靠近两柱肢端部应变均较大。胶缝对长边应变的应变影响较小,说明环氧树脂胶工作性能良好。所有试件的 L 形内侧应变均比长边部位小,说明长边是 L 形柱应力较为集中的地方。

2.4 试件承载力与弹性模量理论分析

将试验所得的 L 形柱周围的应变值通过 Matlab 软件,利用最小二乘法进行线性回归模拟,得到柱轴心处的应变值,如表 4 所示。基于弹性力学理论,组合柱的名义弹性模量可按下述公式计算:

$$E = E_s C_s + E_b C_b \quad (1)$$

式中: E 为名义弹性模量; E_s (E_b) 为钢材(木材)弹性模量; C_s (C_b) 为试件含钢(木)率,即截面上钢(木)占总截面面积的百分比。

表 4 试件抗压弹性模量对比

Table 4 The comparison of compressive modulus of specimens

试件编号	角钢型号/ mm	弹性模量/ GPa	平均弹性模量/ GPa
L-S100-a	100×8	17.6	16.3
L-S100-b	100×8	15.1	
L-S125-a	125×8	17.7	18.6
L-S125-b	125×8	19.4	
S-W196-a	-	9.4	8.9
S-W196-b	-	8.4	

据此计算可知,L-S100 的弹性模量 E 为 16.8 GPa,L-S125 的弹性模量 E 为 18.9 GPa,试件 L-S100 和 L-S125 的计算值分别为理论值的 94.9% 和 96.1%。公式(1)只考虑了两种材料本身的弹性模量因素,而未考虑 L 形柱异形截面对试件弹性模量有所影响,因此引入截面异形系数 K 对公式进

行调整,如式(2)所示:

$$E = K(E_s C_s + E_b C_b) \quad (2)$$

式中, K 为截面异形系数。可以看出 K 的取值和角钢的边宽度有一定正相关关系,因为角钢边宽度的增加可以改善 L 形柱异形截面对力学性能的不利影响。取 K 值为 95% 可以较好地拟合实际情况。

根据试验结果,角钢的屈服标志着整个试件开始进入塑性阶段;试件达到的极限承载力值与弹性极限值之间有明显塑形形变阶段,塑性强化作用较为明显。将试件达到的弹性极限值作为组合柱的受压承载力。由此可得钢木组合柱的承载力计算公式为:

$$N_u = AE\delta_{sy} / E_s \quad (3)$$

式中: N_u 为组合柱承载力; A 为试件的截面总面积; δ_{sy} 为钢材屈服强度。试件的实际承载力比公式(3)算得的计算承载力高了 8.3%~13.5%,这部分的差异是由于钢材的屈曲受到木材限制,角钢进入塑形强化阶段,从而提高了最大承载力。

2.5 ANSYS 有限元模型分析

ANSYS 有限元分析采用 SOLID 45 各向异性塑性材料实体单元定义木材,SOLID 185 单元定义钢材,划分网格如图 8,边界条件与试验一致。选取云杉的材料参数作为集成材的力学参数,表 5、6 列出了集成材和钢材所用的材料参数,其中集成材材料参数参考《Wood Handbook》。加载过程为力加载。

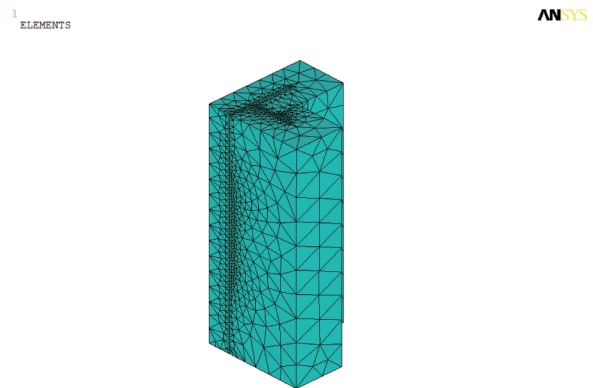


图 8 试件有限元模型网格划分结果
Fig. 8 Mesh results of finite element model

表 5 集成材所用材料参数

Table 5 The material parameters of glued laminated timber

材料	弹性模量/MPa			μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{xz}	剪切模量/MPa		
	E_x	E_y	E_z				G_{xy}	G_{yz}	G_{xz}
集成材	566.4	1 228.8	9 600(8 900)	0.255	0.083	0.058	96	1 190.4	1 152

L-S100 的有限元模拟结果见图 9。轴向变形的模拟计算值为 3.12 mm,比试验结果小 14.33%~

35.96%,这可能是由于有限元分析未考虑到木材在加载初期柱体端部的纤维细胞被压密的情况。

L 形柱的两端木柱柱肢处位移较大,这与试验过程中测得的 L 形柱 L-S125 周围各点应变值变化情况基本一致。

表 6 钢材所用材料参数

Table 6 Material parameters of steel

弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	屈服应力/ MPa	切向斜率
206 000	0.3	235	0

取柱高度中央截面轴心节点的应变和应力绘制应力-应变曲线,与试验结果的对比如图 10 所示。从图中可看出,应力-应变曲线的模拟值与试验值的发展趋势基本一致。初始阶段模拟弹性模量比试验值的弹性模量小,可能由于钢材与木材之间设置的接触对面积较大,产生较大的界面应力带来的误差。实际试验中由于加工以及端面的个体差异,初始斜率大小呈现略微差异,在弹塑性阶段应力-应变曲线拟合程度最好。取加载点处的竖向位移绘制荷载-位移曲线,如图 11 所示,有限元模拟结果与试验结果基本吻合。模拟弹性模量与试

验值和理论计算值的对比见表 7。从表中可发现角钢边宽度越大,钢木 L 形组合柱模拟所得的弹性模量越大,与试验结果以及理论计算结果一致,误差在 10% 以内,ANSYS 有限元模拟结果基本可靠。

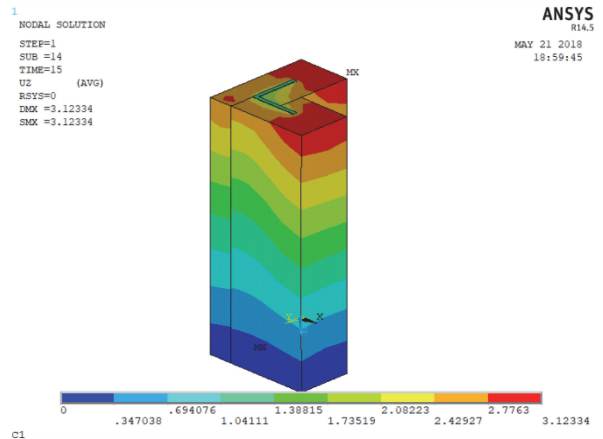


图 9 有限元分析中 L 形组合柱位移变形图
Fig. 9 The deformation of L-shaped composite column using FEA

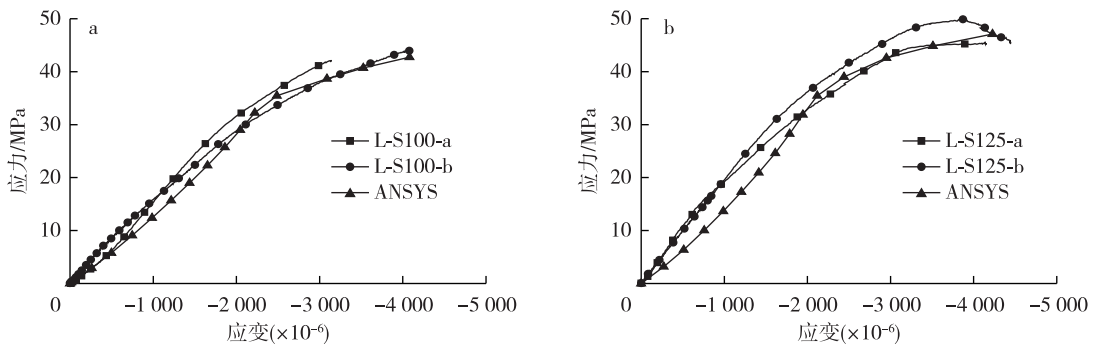


图 10 试件有限元与试验应力-应变曲线对比
Fig. 10 Experimental stress-strain curve of specimens compared with FEA results

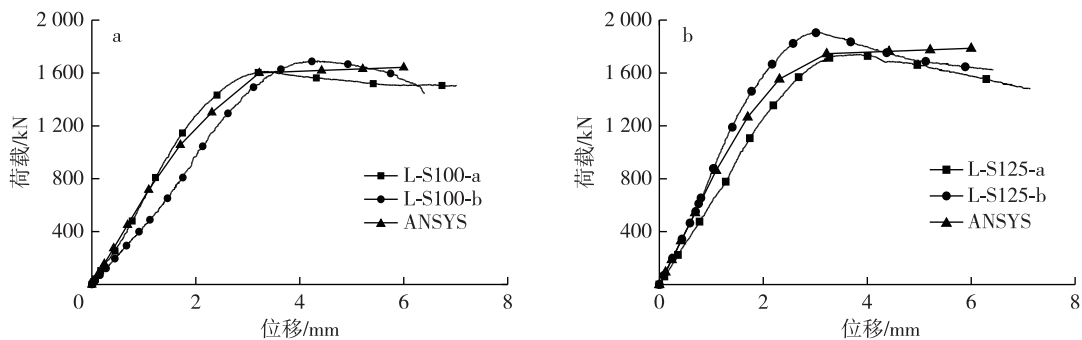


图 11 试件有限元与试验荷载-位移曲线对比
Fig. 11 Experimental load-displacement curve of specimens compared with FEA results

表 7 弹性模量对比

Table 7 The comparison of elastic modulus

组号	角钢型号/ mm	试验弹性模量/ GPa	计算理论弹性 模量/GPa	ANSYS 模拟弹性 模量/GPa	模拟与试验值 差距/%	计算理论值与 试验值差距/%
L-S100	100×8	16.3	16.8	14.9	8.76	3.07
L-S125	125×8	18.6	18.9	17.04	8.14	1.61

3 结 论

1)角钢-集成材 L 形组合柱相对于同截面面积的本柱承载能力上升 37.0%~51.4%,刚度上升 36.5%~72.8%。

2)适当增加钢木 L 形组合柱的角钢边宽度可有效提高其承载能力,但短边处的集成材易发生破裂。

3)L 形组合柱的两块集成材之间的环氧树脂胶合界面在破坏前后性能良好,承载力计算时需要考虑钢材的屈服后强化作用。

4)ANSYS 有限元模拟的钢木 L 形组合柱弹性模量结果和试验结果误差在 10%以内,模拟结果基本可靠。

参考文献(References):

- [1] 杨学兵. 我国现代木结构建筑发展趋势分析[J]. 建设科技, 2017(5): 12-15. DOI:10.16116/j.cnki.jskj.2017.05.001.
YANG X B. Analysis of the development trend of modern wood structure construction in China [J]. Construction Science and Technology, 2017(5): 12-15.
- [2] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见[J]. 住宅产业, 2016(10): 10-12.
General Office of the State Council. Guiding opinions of the General Office of the State Council on vigorously developing prefabricated buildings[J]. Residential Industry, 2016(10): 10-12.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. “十三五”装配式建筑行动方案[Z]. 2017-03-23.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. “13th Five-Year” Prefabricated Building Action Plan[Z]. 2017-03-23.
- [4] XU Y Y, WU B. Fire resistance of reinforced concrete columns with L-, T-, and +-shaped cross-sections [J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(6): 869-880. DOI:10.1016/j.firesaf.2009.04.002.
- [5] 叶倩. 异形柱和短肢剪力墙体系的结构设计[D]. 合肥:合肥工业大学, 2006.
YE Q. Structural design of systems with special-shaped columns and short leg shear wall[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.
- [6] 程绍革, 陈善阳, 刘经纬. 高层建筑短肢剪力墙结构振动台试验研究[J]. 建筑科学, 2000, 16(1): 12-16. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2000.01.003
CHENG S G, CHEN S Y, LIU J W. A shaking table test on shear wall structure with framed short Pillars for high-rise buildings[J]. Building Science, 2000, 16(1): 12-16.
- [7] 陈宗平, 张喜德, 苏益声, 等. 一种新型混凝土异形柱:型钢混凝土异形柱的概念体系初探[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(2): 25-27.
CHEN Z P, ZHANG X D, SU Y S, et al. A new type of concrete special-shaped columns; study of steel reinforced concrete special-shaped columns concept system [J]. Sichuan Building Science, 2006, 32(2): 25-27.
- [8] 李哲, 阙良刚, 徐凯, 等. L 形和 T 型钢异形截面柱轴心受压承载力的试验研究[J]. 西安理工大学学报, 2005, 21(2): 165-168. DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2005.02.013.
LI Z, QUE L G, XU K, et al. Testing study of axial pressure bearing capacity of T-shaped and L-shaped steel reinforced concrete columns [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2005, 21(2): 165-168.
- [9] 宋怀金, 苏益声, 罗永峰. SRC 不等肢 L 形截面异形柱正截面承载力研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(12): 1597-1601, 1621.
SONG H J, SU Y S, LUO Y F. Loading-bearing capacity of normal cross section of SRC L-shaped columns[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35 (12): 1597 - 1601, 1621.
- [10] JANG S, KIM Y, SHIN I. Structural properties of steel-glulam composite column[J]. Journal of the Korean Wood Science and Technology, 2010, 38(5): 399-404. DOI:10.5658/wood.2010.38.5.399.
- [11] 张峰. 钢—木屈曲约束支撑抗震性能研究[D]. 南京:南京工业大学, 2015.
ZHANG F. Study on the seismic performance of steel-timber buckling restrained brace [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2015.
- [12] 潘福婷, 王艳华, 吴京. 钢木组合柱的有限元分析及其设计[J]. 阴山学刊(自然科学版), 2016, 30(1): 26-29. DOI:10.13388/j.cnki.ysajs.20150910.002.
PAN F T, WANG Y H, WU J. Finite element analysis and theoretic design of steel-timber combined column[J]. Yinshan Academic Journal(Natural Science Edition), 2016, 30(1): 26-29.
- [13] GHANBARI GHAZIJAHANI T, JIAO H, HOLLOWAY D. Rectangular steel tubes with timber infill and CFRP confinement under compression: experiments [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 114:196-203. DOI:10.1016/j.jcsr.2015.07.015.
- [14] 王香云. 钢管加固木柱轴心受压性能试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2014.
WANG X Y. Experimental research on axial compressive behaviors of timber column strengthened with steeltube [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.
- [15] 孟颖. 钢—木组合柱抗侧力性能研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2017.
MENG Y. Research on the lateral force resistance of steel-wood composite column[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017.

(责任编辑 田亚玲)