

钢管-木-混凝土轴压短柱有限元分析

李帼昌,岳祥虎,杨志坚

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 分析钢管-木-混凝土短柱在轴压荷载作用下的力学性能,研究不同参数对其受力性能的影响规律。**方法** 合理地选用钢材、混凝土、木材的本构关系,采用非线性有限元软件 ABAQUS 对钢管-木-混凝土轴压短柱进行有限元模拟,分析典型构件的荷载-位移曲线。**结果** 随着木材截面尺寸的增大,构件的初始刚度不变,极限承载力呈现小幅度增长,荷载-位移曲线下降段逐渐变缓,构件延性得到有效改善,但木材截面尺寸过大构件延性优势有所减弱;随着钢管壁厚、钢材强度和混凝土强度的增大,构件荷载-位移曲线的弹性阶段变化不明显,构件的承载力增大。**结论** 在钢管混凝土中加入木材后,利用木芯轻质高强的特点替代核心混凝土,可以显著减轻结构自重,有效延缓混凝土裂缝的开展,改善组合柱的延性性能。

关键词 有限元模拟;木材截面形式;木材尺寸;钢材强度;混凝土强度

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Finite Element Analysis of Steel Tube-Wood-Concrete Short Columns under Axial Compression

LI Guochang, YUE Xianghu, YANG Zhijian

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: This paper analyzes the mechanical properties of the steel pipe wood concrete short column under the axial load, and explores the influence of the form and size of the wood section, the wall thickness of the steel tube, the steel strength and the concrete strength on the mechanical properties of the members. The nonlinear finite element software ABAQUS is used to simulate the axial compression short column of steel tube wood concrete and analyze the load displacement curve of typical components. The section size of wood has little influence on the ultimate bearing capacity of the component, and has a great influence on the ductility of the component; with the increase of the section size of wood, the initial stiffness of the component remains unchanged, the ultimate bearing capacity shows a small increase, the curve of the falling section of the load displacement curve gradually slows down, and the ductility of the component is effectively improved, but the ductility advantage of the component decreases with the increase of the section

收稿日期:2019-12-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51938009)

作者简介:李帼昌(1964—),女,教授,博士,主要从事钢与混凝土组合结构等方面研究。

size of wood with the increase of steel pipe thickness, steel strength and concrete strength, the elastic stage of load displacement curve is not obvious, and the bearing capacity of the component is increased. After adding wood into CFST, the characteristics of light weight and high strength of wood core are used to replace the core concrete, which can significantly reduce the self-weight of the structure, effectively delay the development of concrete macro cracks, and improve the ductility of composite columns.

Key words: finite element simulation; wood section form; wood size; steel strength; concrete strength

木材是一种使用历史悠久的生物材料,具有自重轻、强度高、加工容易等优点。近年来,新型工程木制品的出现和国家对绿色建筑的倡导,激发了对木材广泛应用的探索,国内外学者对木材组合结构进行了大量研究^[1]。2014 年王香云^[2]对两根原木柱和 6 根不同管壁厚度的钢管加固木柱进行了试验研究;2015 年 T. Ghanbari 等^[3]通过轴压试验研究了圆钢管嵌套木柱和 CFRP 包裹木柱两种组合结构;2015 年刘清等^[4]对 15 根外侧包裹了 BFRP 布轴压杨木短柱进行了试验研究;2015 年 M. Khelifa 等^[5]对被 CFRP 包裹且在四点弯曲荷载作用下的云杉木梁进行了试验研究;2016 年 A. Sotayo 等^[6]对由 3 根柱两根梁组成的两层框架进行了三点抗弯试验;2016 年陈爱国等^[7]对 9 根钢-木抗弯组合梁进行了试验研究;2016 年曾丹等^[8]对 5 组具有不同长细比的轴压木柱进行了试验研究;2017 年马溯源等^[9]对外侧包裹 BFRP 布的圆形杨木轴压短柱进行了试验研究;2017 年 T. G. Ghazijahani 等^[10]对内置不同几何形状木材的矩形混凝土轴压短柱进行试验研究;2017 年褚云朋^[11]对 36 根钢管木塑轴压长柱进行了试验研究;2018 年贺俊筱等^[12]对 3 组具有不同高径比的足尺木柱进行了试验研究;2019 年霍瑞丽等^[13]对外侧粘贴碳纤维布圆形轴压短柱进行了试验研究。

通过国内外众多学者对木材组合结构的试验研究、数值模拟与理论分析可知,木材组合结构的研究主要针对木柱的加固补强和对木梁抗弯性能的改善,而对钢管、混凝土、木

材三种材料的组合研究较少。基于此,笔者所在研究团队提出了钢管-木-混凝土组合柱结构形式,在钢管混凝土中加入木材,利用木材轻质高强的特点,有效替换构件核心处的混凝土,大大减少了构件的自身质量,有效抑制混凝土宏观裂缝的开展,同时混凝土能够抑制木材的纤维撕裂破坏,使木材充分发挥顺纹抗压性能。

1 有限元模型

1.1 模型参数

笔者共设计了 20 根钢管-木-混凝土轴压短柱,木材的截面形式分为方形和圆形,木材选用顺纹抗压性能较好的落叶松。构件截面形式见图 1,模型参数见表 1。

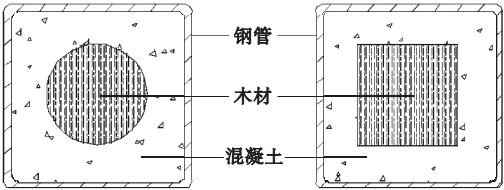


图 1 钢管-木-混凝土组合柱截面

Fig. 1 Section form of steel tube-wood-concrete composite columns

1.2 材料本构关系

笔者研究钢管构件采用的是普通钢材,所以在有限元模型建立过程中,钢材本构关系模型采用文献[14]提出的低碳软钢模型。混凝土的本构关系采用文献[15]提供的模型,其中核心混凝土泊松比取 0.2,弹性模量按 $E_c = 4\,730\sqrt{f_c}$ 计算(f_c 为混凝土圆柱体抗压强度)。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

构件编号	$B\times t\times L/\text{mm}$	f_y/MPa	f_{cu}/MPa	d/mm	b/mm	A_w/mm^2	N_u/kN
SC-1	150×5×450	355	50	—	—	—	1 919
SCSL-1	150×5×450	355	50	—	40	1 600	1 921
SCSL-2	150×5×450	355	50	—	60	3 600	1 928
SCSL-3	150×5×450	355	50	—	80	6 400	1 943
SCSL-4	150×5×450	355	50	—	100	10 000	1 953
SCCL-1	150×5×450	355	50	40	—	1 256	1 920
SCCL-2	150×5×450	355	50	60	—	2 826	1 926
SCCL-3	150×5×450	355	50	80	—	5 024	1 938
SCCL-4	150×5×450	355	50	100	—	7 850	1 957
SCCL-Q235	150×5×450	235	50	80	—	5 024	1 527
SCCL-Q355	150×5×450	355	50	80	—	5 024	1 938
SCCL-Q390	150×5×450	390	50	80	—	5 024	2 044
SCCL-Q420	150×5×450	420	50	80	—	5 024	2 153
SCCL-C30	150×5×450	355	30	80	—	5 024	1 713
SCCL-C40	150×5×450	355	40	80	—	5 024	1 825
SCCL-C50	150×5×450	355	50	80	—	5 024	1 938
SCCL-C60	150×5×450	355	60	80	—	5 024	1 925
SCCL-t4	150×4×450	355	50	80	—	5 024	1 759
SCCL-t5	150×5×450	355	50	80	—	5 024	1 938
SCCL-t6	150×6×450	355	50	80	—	5 024	2 113
SCCL-F1	150×5×450	355	50	45.2	—	1 603	1 921
SCCL-F2	150×5×450	355	50	67.72	—	3 600.1	1 924
SCCL-F3	150×5×450	355	50	90.3	—	6 401	1 946
SCCL-F4	150×5×450	355	50	112.88	—	10 002	1 980

注: B 为钢管宽度; t 为钢管壁厚; L 为钢管高度; f_y 为钢材屈服强度; f_{cu} 为混凝土抗压强度; d 为圆木芯的截面直径; b 为方木芯的截面边长; A_w 为木材的截面面积。

木材采用 Bachtel 和 Norris 双折线顺纹受压本构模型^[16]。采用 Engineering Constants 方法对木材弹性参数设定,具体借助纵向、径向、弦向的弹性模量、剪切弹模和泊松比等 9 个参数进行定义。借助 ABAQUS 中 Hill's Potential 函数来实现对塑性阶段的木材属性的定义。

1.3 单元选取与边界条件

构件中各组成部分均选择 C3D8R 实体单元,采用结构化技术对网格进行划分。在

材料属性设置端板时,考虑把其弹性模量定义为无限大,同时泊松比定义为无限小。

钢管与混凝土选择法向硬接触,切向选择库伦摩擦,系数为 0.6^[17]。端板与混凝土和钢管选择 Tie 绑定约束,混凝土与两端盖板选择法向硬接触。木材与混凝土之间的摩擦借鉴文献[18]木材混凝土之间的接触方式,与钢管和混凝土之间的接触相似采用同性库伦摩擦^[19],木与混凝土之间的摩擦系数为 0.62。

2 有限元结果分析

2.1 荷载 - 位移曲线分析

构件 SCCL-3 荷载 - 位移曲线见图 2。将曲线划分五个阶段:弹性阶段、弹塑性阶段、塑性强化阶段、破坏阶段、平缓阶段。

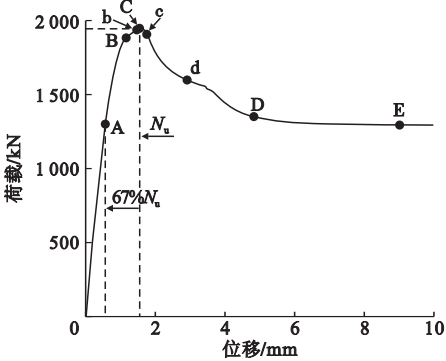


图 2 构件 SCCL-3 荷载 - 位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curve of SCCL-3 members

弹性阶段(OA 段)。初始加载时,方钢管、混凝土和木材各自承担荷载,且都处于弹性状态。达到 A 点时构件达到弹性极限状态,弹性极限荷载约为极限承载力的 67%。

弹塑性阶段(AB 段)。达到 A 点后,钢管进入非线性状态但未屈服,混凝土处于非线性状态,方钢管与混凝土之间开始产生相互作用,混凝土受到钢管的约束而处于三向受压的状态,其强度得到很大提高,同时木材

处于弹性状态。到达 B 点时,钢管达到屈服应力开始屈服。

塑性强化阶段(BC 段)。达到 B 点后,钢管进入屈服阶段,达到 b 点时混凝土达到极限承载力,钢管应力开始处于稳定状态。到达 C 点时,构件达到极限承载力,而木材弹性阶段较长,木材承载力保持近似线性增长,但因木材总体承载比例不大,所以构件整体荷载 - 位移曲线表现出明显的非线性。

下降阶段(CD 段)。达到 C 点后,方钢管壁开始出现局部屈曲失稳,构件中部钢管对混凝土的套箍作用逐渐减弱。c 点之后木材进入弹塑性状态,木材处于混凝土的包裹下表现出来良好的顺纹抗压性能,木材开始与混凝土产生相互作用,木材处于三向受压状态。d 点时木材达到极限顺纹抗压屈服强度,木材分担荷载达到最大值,d 点之后木材因达到极限承载力强度细胞壁开始发生变形和破坏,木材逐渐被压皱承载能力开始下降。

平稳阶段(DE 段)。曲线到达 D 点之后承载力下降幅度变缓,此阶段构件残余承载力可达极限承载力的 71% 左右。

2.2 应力云图分析

图 3 为构件 SCCL-3 中混凝土纵向应力云分布图,图中 A、b、c、d 对应图 2 中各特征点。

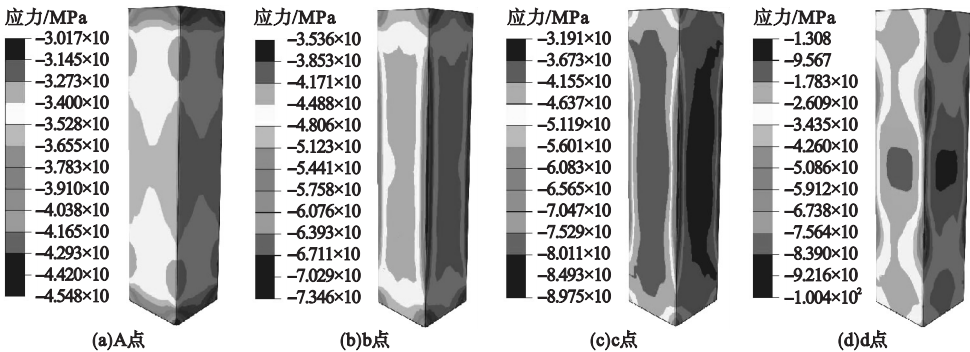


图 3 钢管 - 木 - 混凝土柱混凝土纵向应力分布

Fig. 3 Longitudinal stress distribution of concrete in steel tube-wood-concrete columns

从图中可以看出,在 A 点时,混凝土压应力沿构件高度分布比较均匀,两端角部的压应力值略小,压应力最大值位于构件中截

面附近。A 点之后,混凝土处于三向受压状态,混凝土强度得到很大提升。b 点处,除端部和角部之外混凝土所受压应力相对均匀,

从构件两端的四分之一处开始出现条状应力分布,且中部混凝土强度得到明显提高。在b点以后,混凝土裂缝开始扩大,混凝土慢慢局部被压碎,所承受的纵向压应力开始减少。c点时,木材开始进入弹塑性阶段,混凝土中部应力下降较多,整体来看混凝土应力下降较缓。d点时,木材达到顺纹极限抗压应力,木材开始破坏,混凝土应力下降开始变快,最终在此处产生较大破坏变形。

构件 SCCL-3 在各特征点处钢管 Mises 应力分布云图如图 4 所示。从图中可以看出,在 A 点之前,钢管承担荷载呈现弹性增长,三者分别单独承受竖向荷载,钢管对核心

混凝土没有产生紧箍效应。达到 A 点时,钢管应力分布变化不大,钢管两端端部应力相比之下略小。在 A 点之后,钢管开始进入非线性阶段,但钢管并未屈服,钢管应力缓慢增加,钢管对混凝土产生套箍作用,钢管处于横纵向受压环向受拉状态。达到 B 点时,钢管开始局部屈服,钢管应力开始保持不变,处于稳定状态。达到 C 点时,构件处于极限承载力状态,钢管应力变化不大,基本处于稳定状态。达到 D 点时,构件中部的塑性应变发展较快,钢管应力得到局部提升,最终钢管在中部产生过大的塑性变形。

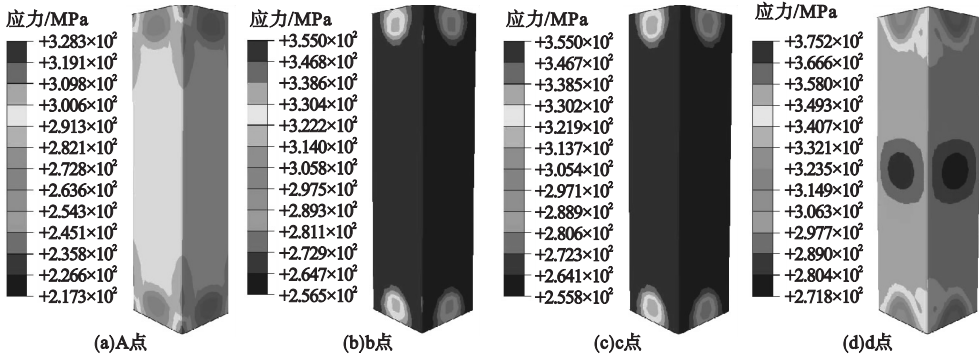


图4 不同特征点下钢管 Mises 应力分布图

Fig. 4 Mises stresses distribution diagram of steel tube at each characteristic points

构件 SCCL-3 木材顺纹应力分布云图如图 5 所示。从图中可以看出,在 A 点时,构件处于弹性状态,木材也处于弹性状态,木材整体顺纹受压应力沿高度分布均匀。A 点之后,木材全截面顺纹压应力持续线性增长且分布较均匀。在 c 点时,木材开始进入弹塑

性阶段,此时在木材中部和两端 1/4 处应力较大。达到 c 点之后荷载继续加载,木材包裹混凝土当中,混凝土向内对木材产生挤压作用,木材处于三向受压状态,延长了木材的弹塑性阶段,且中截面顺纹压应力得到不同程度的提高。到达d点时,木材达到了极限

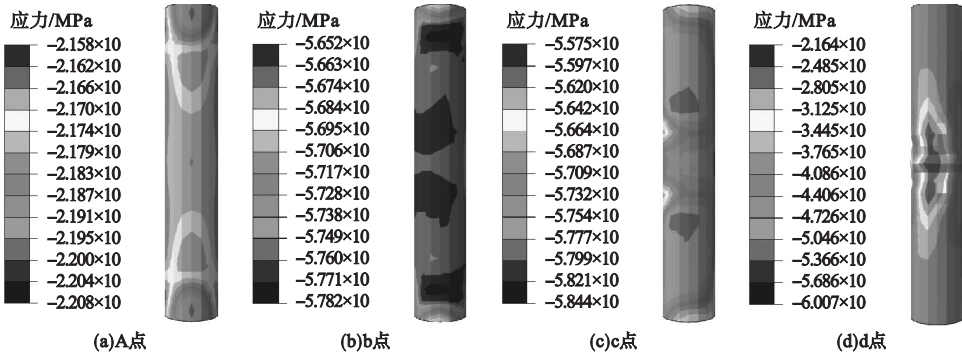


图5 钢管-木-混凝土柱木材顺纹应力分布图

Fig. 5 Distribution of wood strain stresses in steel tube-wood-concrete columns

顺纹抗压应力,木材中部一侧应力较大。随后木材开始出现局部压皱破坏,木材截面应力开始下降,但因木材与混凝土作用逐渐加强,木材截面应力下降幅度不大。达到 D 点时,木材最大程度的被压密,此时木材应力沿高度方向分布相对均匀,在木材中部内部应力偏小。

2.3 荷载分担比例分析

构件 SCCL-3 中钢管、混凝土、木材单独承载占构件总荷载的比例与位移关系曲线如图 6 所示。分析可知,当构件加载位移达到 0.56 mm 时,构件达到 A 点,钢管和混凝土开始进入非线性状态,但钢管还未屈服,木材保持弹性状态,此时三者承载之比约为 8.06 : 4.96 : 1。当构件加载位移达到 1.16 mm 时,构件达到 B 点,钢管开始屈服,承担荷载处于稳定状态,此时三者承载之比

约为 5.29 : 3.48 : 1,此时木材处于弹性状态。到达 b 点时,混凝土承担荷载在构件达到极限承载力之前达到最大值,此后混凝土承担荷载开始下降。达到 C 点时,构件达到极限承载力,而木材依然处于弹性状态,此时加载位移为 1.56 mm,三者承载之比约为 3.89 : 2.62 : 1,此后混凝土承载能力开始持续大幅下降。到达 c 点时,木材进入弹塑性阶段,开始与混凝土产生相互作用,承担荷载持续增加,但增长幅度不大。到达 d 点时,木材达到极限顺纹抗压强度,开始发生破坏并逐渐局部被压皱,此时构件位移加载到 2.9 mm,三者承载之比约为 3.41 : 1.12 : 1,加载达到 4.82 mm 时,即 D 点状态,此时三者各自承载之比约为 5.47 : 1.13 : 1。达到 D 点之后,各自承担荷载趋于稳定。

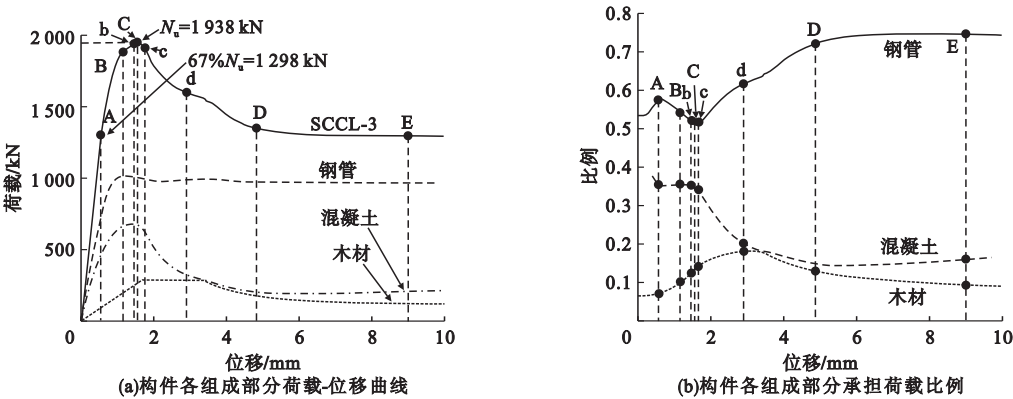


图 6 SCCL-3 各组成部分承担荷载曲线
Fig. 6 Load curves of each component of SCCL-3

3 影响因素分析

3.1 钢材屈服强度影响

构件钢材为 Q235、Q355、Q390、Q420 时荷载-位移曲线见图 7。从图中可以看出,在构件加载初期,各构件的初始刚度保持不变。构件极限承载力随钢管屈服强度的增大而逐渐增大,Q355 构件比 Q235 构件极限承载力提高了 26.9%,Q390 构件比 Q355 构件极限承载力提高了 5.5%,Q420 构件比 Q390 构件极限承载力提高了 4.5%。钢材

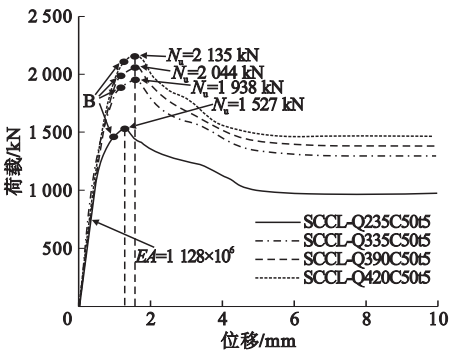


图 7 不同钢管屈服强度构件荷载-位移曲线
Fig. 7 Load displacement curves of members with different yield strength of steel tubes

屈服强度由 Q235 变为 Q355 时构件极限承载力提高幅度最大,而钢材屈服强度依次由 Q355 到 Q420 时,构件的极限承载力提升幅度变小。

3.2 混凝土抗压强度的影响

构件混凝土强度为 C30、C40、C50、C60 时荷载-位移曲线见图 8。从图中可以看出,随着混凝土强度的增大,构件初始刚度增大,极限承载力近似呈线性增长,C40 构件比 C30 构件极限承载力提高了 6.5%,C50 构件比 C40 构件极限承载力提高了 6.2%,C60 构件比 C50 构件极限承载力提高了 6.6%,但构件延性逐渐降低。

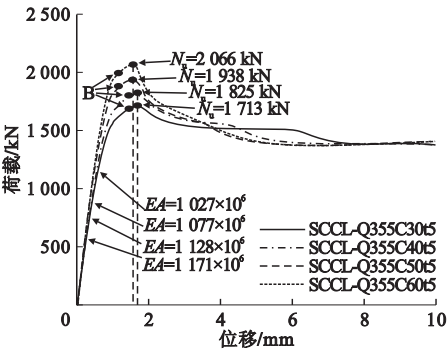


图 8 不同混凝土强度构件荷载-位移曲线
Fig. 8 Load displacement curves of members with different concrete strength

3.3 钢管壁厚对构件性能的影响

图 9 为钢管壁厚为 4 mm、5 mm、6 mm、

7 mm 构件荷载-位移曲线。从图中可以看出,随着钢管壁厚的增大,构件初试刚度增大,5 mm 壁厚构件比 4 mm 壁厚构件极限承载力提高了 10.2%,6 mm 壁厚构件比 5 mm 壁厚构件极限承载力提高了 9.1%,7 mm 壁厚构件比 6 mm 壁厚构件极限承载力提高了 9%,构件延性得到明显提升,但钢管壁厚增大构件延性提升幅度逐渐减小。到加载后期,随着钢管壁厚的增大,构件残余承载力逐渐增大,增长幅度近似相等。

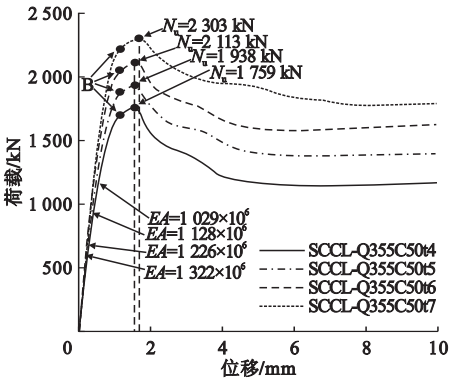


图 9 不同钢管壁厚构件荷载-位移曲线
Fig. 9 Load displacement curves of steel tube members with different wall thickness

3.4 木材截面尺寸的影响

图 10 分别是木材边长为 40 mm、60 mm、80 mm、100 mm 和直径为 40 mm、60 mm、80 mm、100 mm 构件荷载-位移曲

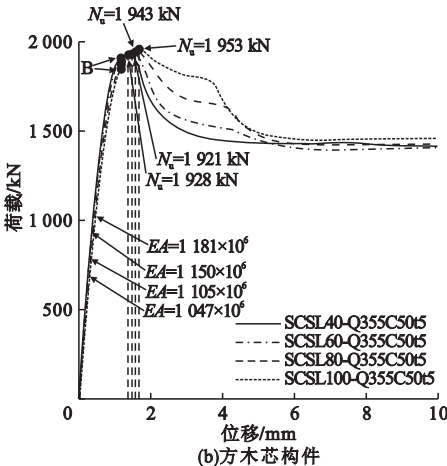
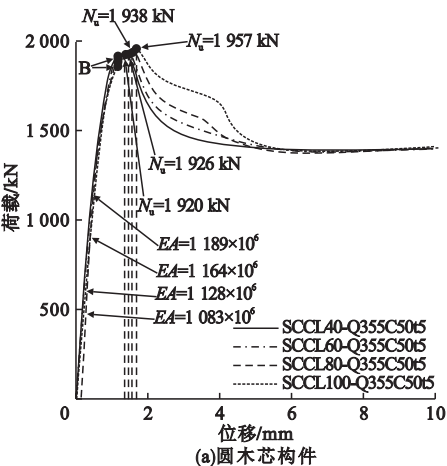


图 10 不同木材截面尺寸构件荷载-位移曲线

Fig. 10 Load displacement curves of members with different wood section sizes

线。从图中可以看出,随着木材截面尺寸增大,圆木芯构件和方木芯构件初始刚度逐渐减小,而圆木芯构件和方木芯构件极限承载力逐渐增大,但增长幅度不明显,60 mm 比 40 mm、80 mm 比 60 mm、100 mm 比 80 mm 圆木芯构件极限承载力依次提高了 6 kN、13 kN、19 kN,60 mm 比 40 mm、80 mm 比 60 mm、100 mm 比 80 mm 方木芯构件极限承载力依次提高了 7 kN、15 kN、10 kN,极限承载力提高不明显。同时随着截面尺寸的增大,圆木芯构件和方木芯构件延性逐渐增大,木材截面尺寸越大构件延性越好。

3.5 木材截面形式的影响

图 11 是 4 组木材截面形式为方形和圆形构件荷载 - 位移曲线。以方形木材面积为参考,将每一组构件都保持木材截面面积相等。从图中可以看出,加载初始时,圆木芯构件和方木芯构件初始刚度近似相等。在木材截面尺寸为 40 mm、60 mm、80 mm 时,方木芯构件与圆木芯构件极限承载力近似相同,木材尺寸较小时,截面形式对构件极限承载力影响较小。当截面尺寸为 100 mm 时,圆木芯极限承载力略大于方木芯构件,同时方木芯构件延性要好于圆木芯构件延性。

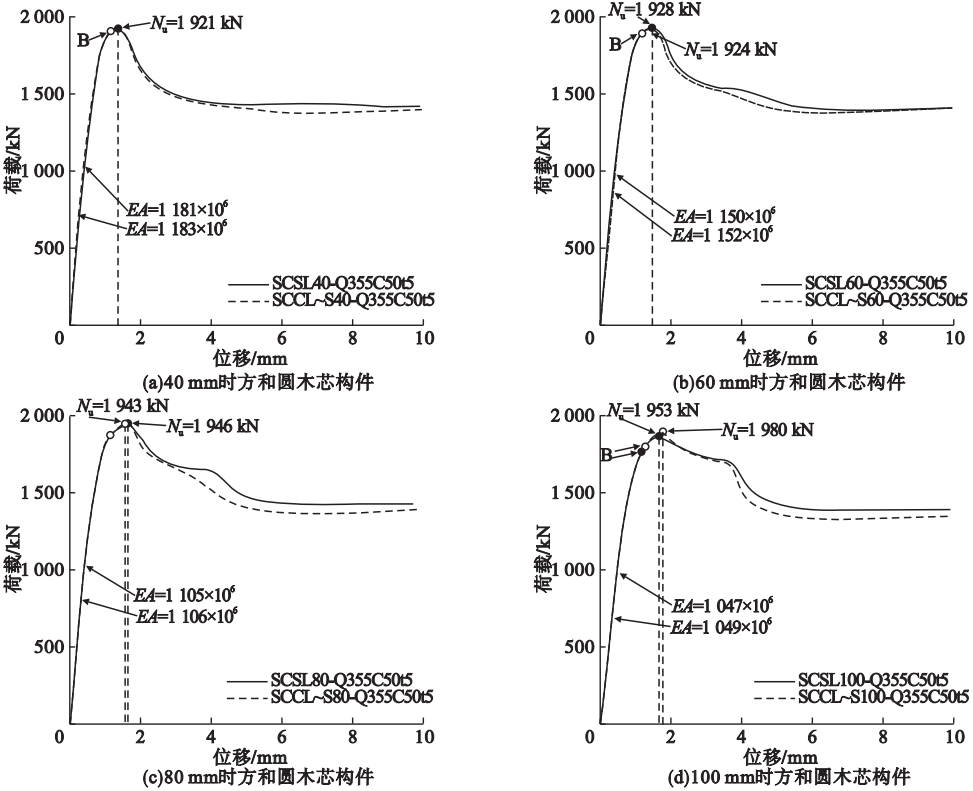


图 11 不同木材截面形式构件荷载 - 位移曲线

Fig. 11 Load displacement curves of members with different wood sections

4 结 论

(1) 钢管 - 木 - 混凝土轴压短柱受力阶段分为弹性阶段、弹塑性阶段、塑性强化阶段、下降阶段和平缓阶段。

(2) 在方钢管混凝土柱基础上,加入木

材,组合柱承载力得到轻微提高,构件延性显著提升。

(3) 随着钢材强度、钢管壁厚、混凝土强度提高,构件极限承载力越大。木材截面尺寸越大构件延性越好,且在方钢管混凝土的约束下,方木芯构件力学性能优于圆木芯构件。

参考文献

- [1] 张建国,谷立静.我国绿色建筑发展现状、挑战及政策建议[J].中国能源,2012,34(12):19-24.
(ZHANG Jianguo, GU Lijing. Development status, challenges and policy suggestions of green building in China [J]. China energy, 2012, 34 (12): 19-24.)
- [2] 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 Xiangyun. Experimental study on axial compression behavior of timber columns strengthened with steel tubes [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.)
- [3] GHANBARI T, JIAO H, HOLLOWAY D. Timber filled CFRP jacketed circular steel tubes under axial compression[J]. Construction and building materials, 2015, 94: 791-799.
- [4] 赛尔江哈力克,刘清,韩风霞. BFRP 加固新疆杨木柱的抗压试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 25(3): 111-115.
(SELJIANG Halik, LIU Qing, HAN Fengxia. Experimental study on compression resistance of Xinjiang poplar columns strengthened with BFRP [J]. Earthquake resistance and reinforcement reconstruction of engineering, 2015, 25(3): 111-115)
- [5] KHELIFA M, LAHOUE M A, CELZARD A. Flexural strengthening of finger-jointed timber beams with CFRP [J]. Journal of adhesion science and technology, 2015, 29 (19): 2104-2116.
- [6] SOTAYO A, GREEN S, TURVEY G. Experimental and finite element (FE) modelling of timber fencing for benchmarking novel composite fencing [J]. Composite structures, 2016, 158(5): 44-55.
- [7] 方超,邢信慧,陈爱国. H 形钢-木组合梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 9 (3): 60-65.
(FANG Chao, XING Jihui, CHEN Aiguo. Experimental study on flexural behavior of H-shaped steel wood composite beams [J]. Journal of building structures, 2016, 9(3): 60-65.)
- [8] 曾丹,周先雁,曹磊. 落叶松胶合木柱轴心受压性能研究[J]. 工业建筑, 2016, 15(2): 63-67.
(ZENG Dan, ZHOU Xianyan, CAO Lei. Study on axial compression behavior of larch glulam columns [J]. Industrial architecture, 2016, 15 (2): 63-67.)
- [9] 马溯源. 外粘贴 BFRP 布加固新疆杨圆形截面短柱轴心抗压试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.
(MA Suyuan. Experimental study on axial compression of Xinjiang poplar short columns with circular section strengthened with BFRP sheets [D]. Urumchi: Xinjiang University, 2017.)
- [10] GHAZIHAJANI T G, JIAO H, HOLLOWAY D. Concrete-filled circular steel tubes with a timber infill under axial compression [J]. Journal of structural engineering, 2017, 143 (7): 17-37.
- [11] 褚云朋,姚勇,杨东升. 冷弯薄壁方钢管木组合长柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构, 2017, 10(4): 80-85.
(CHU Yunpeng, YAO Yong, YANG Dongsheng. Experimental study on axial compression behavior of cold-formed thin-walled square steel tubular timber composite long columns [J]. Building structure, 2017, 10 (4): 80-85)
- [12] 贺俊筱,王娟,杨庆山. 考虑高径比影响的木结构柱抗侧能力试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(3): 32-40.
(HE Junxiao, WANG Juan, YANG Qingshan. Experimental study on lateral resistance of timber columns considering the influence of height diameter ratio [J]. Acta civil engineering, 2018, 51(3): 32-40.)
- [13] 霍瑞丽,刘伟庆,童忆南. 碳纤维增强复合材料约束短木柱轴压性能[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(4): 536-540.
(HUO Ruili, LIU Weiqing, TONG Yi'nan. Axial compression properties of short timber columns confined by carbon fiber reinforced composites [J]. Journal of materials science and engineering, 2019, 37(4): 536-540)
- [14] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
(HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures: theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2007)
- [15] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005.
(LIU Wei. Study on working mechanism of concrete filled steel tubular under local compression [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.)
- [16] BECHTEL S C, NORRIS C B. Strength of wood beam and rectangular cross section as affected by span-depth ration[R]. USA: Forest Products Laboratory, 1952.
- [17] BALTAY P, GJELSVIK A. Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress [J]. Journal of materials in civil engineering, 1990, 2(1): 46-49.
- [18] 谢岚. 木-混凝土组合结构螺栓连接件剪切性能研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
(XIE Lan. Study on shear behavior of bolt connectors in wood concrete composite structure [D]. Changsha: Central South University of Forestry Science and Technology, 2017.)
- [19] 闻洋,于蛟,付立平. 钢管约束橡胶混凝土短柱轴心受压力学特性研究[J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2020, 36(4): 593-602.
(WEN Yang, YU Jiao, FU Liping. Study on mechanical characteristics of axial compression of short column of confined rubber concrete filled steel tube [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36 (4): 593-602.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)