

钢管-再生混凝土-拼接木复合长柱 轴压性能有限元分析

刘永军¹,王紫怡¹,佟 舟²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳城市建设学院土木工程学院,辽宁 沈阳 110167)

摘 要 目的 研究钢管-再生混凝土-拼接木复合长柱轴压力学性能,为该类构件的设计和工程应用提供参考。方法 通过有限元软件 ABAQUS 对其进行数值模拟研究,探讨复合长柱的受力机理和应力分布,分析再生混凝土强度、长细比以及钢管壁厚等参数对复合长柱轴压性能的影响。结果 再生混凝土强度每增加 10 MPa,构件的极限承载力分别提升 6.07%、5.13%、5.90%、6.53%;构件延性系数随之逐渐降低;对初始刚度影响不显著。提高构件的长细比,其极限承载力和初始刚度均有所减小,但复合长柱延性随之有所增大。钢管壁厚从 3 mm 增加至 7 mm,每增加 1 mm,其极限承载力分别提升 11.34%、8.24%、7.07%、6.54%;其延性和初始刚度均随壁厚的增加而增加。结论 钢管-再生混凝土-拼接木复合长柱的轴压力学性能良好,可以满足工程需要。

关键词 拼接木;再生混凝土;复合长柱;轴心受压性能;有限元分析

中图分类号 TU366

文献标志码 A

Finite Element Analysis of Axial Compression Performance on Steel Tube-Recycled Concrete-Spliced Wood Composite Long Columns

LIU Yongjun¹, WANG Ziyi¹, TONG Zhou²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang, China, 110167)

Abstract: The axial compressive performance of steel tube-recycled concrete -spliced wood composite long columns was studied for the design and engineering application of this kind of components. Through the numerical simulation of the finite element software ABAQUS, the effects of recycled concrete strength, slenderness ratio and steel pipe wall thickness on the axial compressive properties of the composite long columns are analyzed, and the stress mechanism and stress distribution of the composite column are discussed. For every 10 MPa increase in the strength of recycled concrete, the ultimate bearing capacity of the specimens increased by 6.07%, 5.13%,

收稿日期:2022-05-08

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD1100403)

作者简介:刘永军(1966—),男,教授,博士,主要从事建筑结构抗火性能等方面研究。

5.90% and 6.53% respectively, but the ductility of the member decreases gradually, and no significant influence on the initial stiffness. However with the increase of slenderness ratio, the peak bearing capacity and initial stiffness decrease, and the ductility increases. When the wall thickness of steel pipe increases from 3 mm to 7 mm, the ultimate bearing capacity increases by 11.34%, 8.24%, 7.07% and 6.54% respectively for every 1 mm increase. And the ductility and initial stiffness increase too with the increase of wall thickness. So the steel tube-recycled concrete - spliced wood composite long column has good axial compressive mechanical properties, which can meet the needs of engineering.

Key words: spliced wood; recycled concrete; composite columns; axial compression performance; finite element method

近年来,低碳环保这一发展理念逐渐成为了世界关注的主题。木材作为建筑材料以其轻质高强、低碳环保、可再生等优势而备受瞩目,国内外积极地开展了关于木材及其组合结构的研究^[1]。2013年,胡夏闽等^[2]以剪力连接程度为变量设计了四根木-混凝土组合梁,并对其抗弯性能进行了分析试验,结果表明,剪力的连接程度越低,构件的抗弯性能越弱。2014年,李彤桐^[3]采用钢管加固木材形成组合结构,并对其进行力学性能试验;研究表明,钢管的套箍作用能够改善木材的天然缺陷,并且延缓裂缝的开展。2015年,T. G. Ghazijahani^[4]采用不同形状的木材填充在钢管混凝土中,通过轴心受压试验对该复合结构的力学性能进行分析,发现木材作为填充材料在减轻重量的同时具有提高承载力、延展性的效果。2017年,褚云朋等^[5]采取在木材外包裹薄壁方钢管的组合形式,对36根组合长柱进行了承载力试验研究。研究表明:填充材料后的复合长柱,其承载力较空心方钢管柱明显提高;柱的长细比越大,承载力提高越明显。2019年,H. Karampour等^[6]通过有限元模拟绘制了木材填充钢管组合柱的长细比曲线,并定义了短柱和细长柱的分类边界。2020年,高颖等^[7]提出了一种由H型钢和集成材料组成的钢-木组合柱,采用了轴向压缩试验对六个不同长度的试样进行了研究,提出了钢-木组合柱屈服时的承载力计算公式及钢-木组合柱的参数选

择。在2021年,李幅昌等^[8]通过ABAQUS有限元软件模拟钢管-木-混凝土短柱模型的轴压试验,结果表明:在钢管混凝土中加入木材后可以显著减轻结构自重,改善组合柱的延性性能。

由于林木的生长需要一定的周期,这就导致大直径天然木材的供应不足,依靠天然木料型材很难实现。此外,建筑物在更新换代过程中产生了大量的废弃混凝土,对社会和环境造成了恶劣的影响^[9]。为解决上述问题,笔者提出了钢管-再生混凝土-拼接木复合长柱的结构形式,即先通过螺栓将小直径木材连接形成拼接木,再将钢管再生混凝土柱中核心处的再生混凝土替换成拼接木构件。木材可以改进整个构件的延性以及抗震性能;拼接木外层的混凝土能够使钢材的强度得以充分利用,并在提升构件的抗火性能方面也有显著优势;最外层的钢管可以约束混凝土和木材,提高构件整体的承载能力。这种复合长柱适用于低层建筑或村镇建筑中。笔者将通过有限元软件ABAQUS对该复合长柱构件进行模拟研究,以期对该构件未来的设计和实际应用提供参考。

1 材料的本构关系

1.1 木材的本构关系

木材本构关系比较复杂,通常将其简化成正交各向异性材料^[10],其本构模型见图1。木材选取南方松,其物理学参数取自

文献[11]。木材的密度为 0.681 g/cm^3 ,含水率为 18.2% ,木材的顺纹抗压强度为 31.9 MPa ,顺纹弹性模量 $E_L = 10\,490\text{ MPa}$ 。木材的弹性阶段采用 ABAQUS 中的工程常数 (Engineering Constants) 进行材料属性的定义。由木结构设计手册^[12], $E_T/E_L \approx 0.05$, $E_R/E_L \approx 0.1$, $G_{LT}/E_T \approx 0.06$, $G_{LR}/E_L \approx 0.075$, $G_{RT}/E_L \approx 0.018$,泊松比 μ_{ij} 取自文献[13]中提出的松木类泊松比建议值,木材的弹性参数见表1。塑性阶段则采用 Hill 屈服准则进行定义^[14],其中屈服强度系数取值为: $R_{11} = 1, R_{22} = R_{33} = 0.15, R_{12} = 0.25,$

$R_{13} = R_{23} = 0.07。$

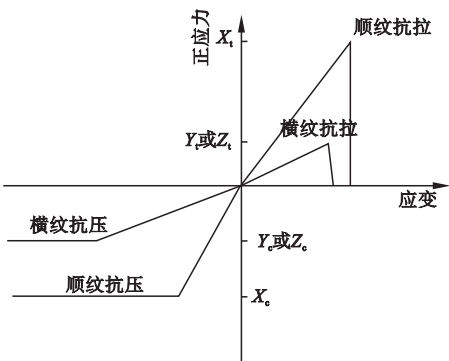


图1 木材的本构模型
Fig.1 Constitutive model of wood

表1 木材的弹性参数
Table 1 Elastic parameters of wood

E_L/MPa	E_R/MPa	E_T/MPa	μ_{LR}	μ_{TR}	μ_{LT}	G_{LR}/MPa	G_{LT}/MPa	G_{TR}/MPa
10 490	1049	524.5	0.38	0.3	0.558	786.8	629.4	188

注:L、R、T 分别表示木材的纵向、径向、弦向。

1.2 钢材的本构关系

选取常用的低碳软钢,钢材的本构关系采用理想弹塑性模型^[15],如图2所示。钢材的力学性能参数取自我国钢结构设计规范,钢材的弹性模量为 $2.05 \times 10^5\text{ MPa}$,屈服强度为 355 MPa ,泊松比为 $0.3。$

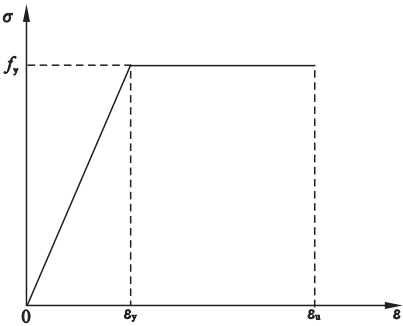


图2 钢材的应力-应变曲线
Fig.2 Stress-strain curve of steel

1.3 核心再生混凝土的本构关系

再生混凝土的各项力学参数取自张向冈^[16]对不同取代率的再生混凝土材性试验结果,再生混凝土弹性模量 $E_c = 3.37 \times 10^4\text{ MPa}$;本构关系则选用杨有福^[17]提出的

核心再生混凝土受压应力-应变模型:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & x \leq 1; \\ x/[\beta_0(x-1)^2 + x], & x > 1. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x = \varepsilon/\varepsilon_0$; $y = \sigma/\sigma_0$; $\sigma_0 = f_c^r$ 。

$$\varepsilon_0 = (\varepsilon_{cc} + 800 \xi_r^{0.2}) \cdot (1 + r/\theta) \times 10^{-6}. \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cc} = (1\,300 + 12.5 f_c^r) 10^{-6}. \quad (3)$$

$$\xi_r = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}^r} = \frac{\alpha f_y}{f_{ck}^r}. \quad (4)$$

$$\theta = 65.715 r^2 - 109.43 r + 48.989. \quad (5)$$

$$\beta_0 = 0.5 (2.36 \times 10^{-5})^{0.25 + (\xi_r - 0.5)^7} (f_c^r)^{0.5}. \quad (6)$$

式中: f_c^r 为再生混凝土的圆柱体抗压强度, MPa; f_{ck}^r 为再生混凝土抗压强度标准值, MPa; α 为截面含钢率, %; A_s 为钢管横截面面积 mm^2 ; A_c 为核心混凝土横截面面积, mm^2 ; r 为再生混凝土取代率, %。

2 有限元模拟

2.1 模型参数

模拟中设计了13根钢管-再生混凝土-拼接木复合长柱模型,模型参数见表2,螺栓

与拼接木的连接方式见图3,构件截面形式见图4。试件截面直径均为300 mm,木柱直径为100 mm,螺栓直径为8 mm,再生混凝土取代率均为100%。其中,SCW5-45-t5 则表

示构件长细比为50,再生混凝土立方体抗压强度为45 MPa,钢管的壁厚 t 为5 mm的钢管-再生混凝土-拼接木复合长柱,以此类推。

表2 模型参数

Table 2 Model parameters

构件编号	L/mm	λ	d	f_{cu}	t/mm	N_u/kN
SCW5-25-t5	3 750	50	90	25	5	3 260.06
SCW5-35-t5	3 750	50	100	35	5	3 458.13
SCW5-45-t5	3 750	50	110	45	5	3 635.49
SCW5-55-t5	3 750	50	120	55	5	3 850.67
SCW5-65-t5	3 750	50	120	65	5	4 102.15
SCW3-45-t5	2 250	30	100	45	5	3 922.57
SCW4-45-t5	3 000	40	100	45	5	3 798.56
SCW6-45-t5	4 500	60	100	45	5	3 529.98
SCW7-45-t5	5 450	70	100	45	5	3 357.31
SCW5-45-t3	3 750	50	100	45	3	3 017.59
SCW5-45-t4	3 750	50	100	45	4	3 359.78
SCW5-45-t6	3 750	50	100	45	6	3 892.51
SCW5-45-t7	3 750	50	100	45	7	4 147.09

注: L 为构件长度; λ 为构件长细比; d 为拼接木的直径; f_{cu} 为再生混凝土立方体抗压强度; t 为钢管的壁厚; N_u 为构件的极限承载力。

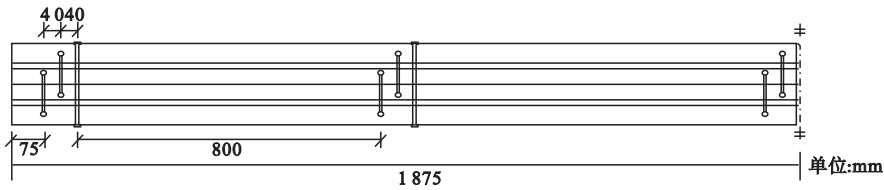


图3 螺栓与拼接木的连接方式

Fig. 3 Connection mode of bolt and spliced wood

钢管与再生混凝土界面的法向接触行为采用“硬接触”,切向采用库伦摩擦,摩擦系数为0.6^[18]。木材与混凝土之间的接触方式与混凝土和钢管界面的接触方式相似,仅修改摩擦系数为0.62^[19]。由于螺栓是构造措施,为便于计算,在模拟时忽略螺栓的影响,将木材与木材界面的接触方式简化为Tie绑定约束。在试验中,钢管与端板之间采用焊接的方式固定,接触面不产生相对错动,模拟中同样使用Tie绑定约束。再生混凝土与端板、拼接木与端板的法向接触行为均采用硬接触模拟。为模拟铰接约束,在端板上施加 $L/1000$ 偏心距的线荷载,下端板的边界条件释放 Y 方向的转动,上端板除

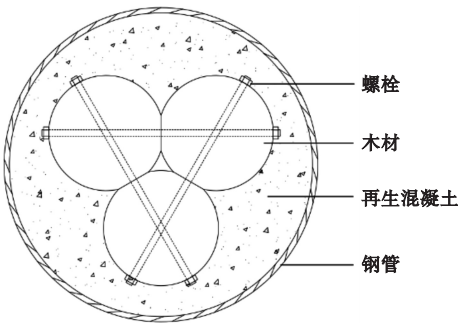


图4 钢管-再生混凝土-拼接木复合长柱截面

Fig. 4 Section of steel pipe-recycled concrete-spliced wood composite long column

2.2 模型的建立

端板采用 C3D8R 实体单元,再生混凝土、木材以及钢管采用 C3D6 六结点母性三棱柱单元。

了释放 Y 方向的转动,还要释放 Z 方向的平动。模型的网格划分和边界条件如图 5 所示。

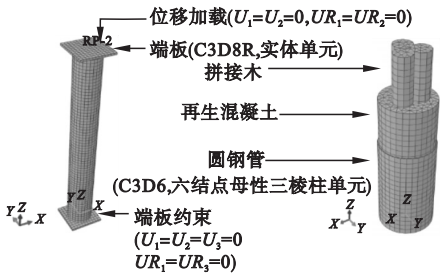


图 5 有限元计算模型

Fig. 5 The finite element analysis mode

3 模拟结果分析

3.1 复合长柱受力全过程分析

选取构件 SCW5-45-t5 的柱顶荷载-位移曲线为例,如图 6 所示。

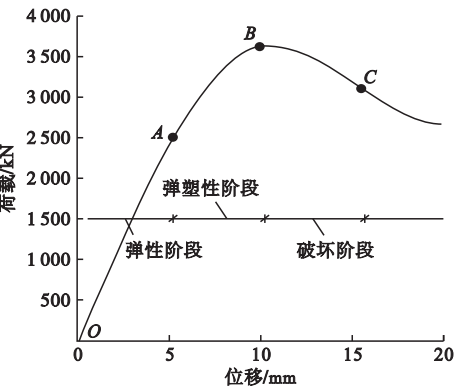


图 6 构件 SCW5-45-t5 柱顶荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curve of column top of SCW5-45-t5 members

构件在受力之初,钢管正处于弹性阶段,再生混凝土和拼接木也均各自承担荷载,曲线在 OA 段呈现线性增长的趋势。

随着荷载的持续增长,曲线在 AB 段的增长幅度较 OA 段有所减缓。此时,拼接木仍然处在弹性阶段,混凝土逐渐产生横向应变,钢管则约束混凝土处于三向受压状态。 B 点时,构件所承担的荷载达到峰值。

加载至 C 点时,荷载下降至极限荷载的 85%,钢管的约束作用逐渐消失,构件达到极限应力状态。

3.2 截面应力云图分析

图 7 为 SCW5-45-t5 构件中拼接木的 1/3 截面处顺纹抗压应力云图。在受力阶段到达 A 点时,拼接木的应力分布比较均匀,构件最小的纵向应力为 13.25 MPa,最大的纵向应力为 14.85 MPa。当构件的应力状态到达 B 点时,复合长柱构件已经达到了它的峰值应力,而拼接木仍处于弹性阶段,其平均应力增大到了木材顺纹抗压强度的 78.4%。 B 点后,木材也进入了它的弹塑性阶段。当到达 C 点时,木材的应力变化趋势为自中部区域向四周区域递减,最大值为木材顺纹抗压应力的 86.5%。可见,由于木材的弹性阶段较长,当混凝土和钢管均已进入承载能力大幅衰减的阶段时,木材以其良好的顺纹抗压性能,为整个构件受力过程的破坏阶段提供了稳定的支撑。

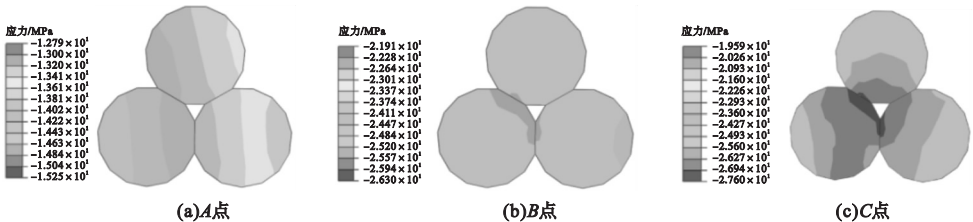


图 7 SCW5-45-t5 构件拼接木 1/3 截面 S11(顺纹)应力云图

Fig. 7 Stress contour plots of S11 (along grain) in the 1/3 section of spliced wood of SCW5-45-t5 member

图 8 为 SCW5-45-t5 构件中混凝土的 1/3 截面纵向应力云图。在受力阶段到达 A 点时,截面整体的应力分布较均匀,应力均值

为 $0.58 f_c$ (f_c 为混凝土轴心抗压强度标准值)。在 A 点之后,由于荷载不断增加,再生混凝土构件出现了明显的受拉区和受压区。

到达 B 点时,复合长柱构件荷载达到了它的峰值,混凝土沿径向扩张的同时受到了外层钢管的约束作用,使混凝土的应力有了很大的提升,右侧受拉区的应力均值为 $0.71 f_c$,左侧受压区域应力均值 $1.12 f_c$ 。在达到 C 点时,拼接木作用效果较为显著,混凝土与拼

接木接触区域的环状应力平均维持在 $0.86 f_c$,而其他区域的应力则下降至 $0.53 f_c$,说明在钢管混凝土中填充拼接木,有延缓构件失效的作用,钢管屈曲后,即使其无法给混凝土提供充足的约束力,中心区域的再生混凝土也可在拼接木的作用下补偿一定的强度缺失。

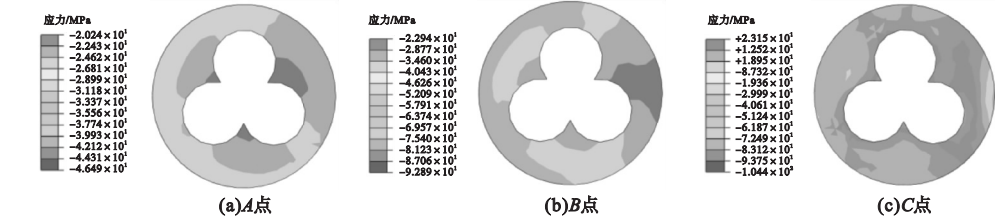


图 8 SCW5-45-t5 构件再生混凝土 1/3 截面 S33(纵向)应力云图

Fig. 8 Stress contour plots of S33 (longitudinal) in the 1/3 section of recycled concrete of SCW5-45-t5 member

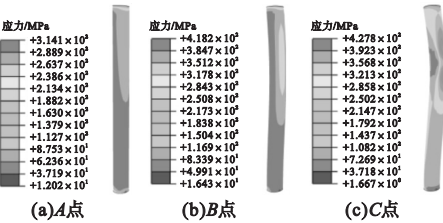


图 9 SCW5-45-t5 构件钢管的 Mises 应力云图

Fig. 9 Mises stress contour plots of steel pipe of SCW5-45-t5 member

图 9 为 SCW5-45-t5 构件中钢管的 Mises 应力分布图。当构件的应力状态到达 A 点时,钢管受拉侧与受压侧应力分区不明显,荷载沿高度分布较为均匀,应力均值为钢管屈服应力的 74.6% 。当应力状态至 B 点

时,混凝土的横向变形超过了钢管的环向变形,使得钢管开始发挥约束作用,此时右侧受拉区的应力明显低于左侧钢管受压区的应力。受拉区应力的最小值约为钢管屈服强度的 81.6% 。 C 点时,钢管上的 Mises 应力开始重分布,应力开始集中在左侧受压区钢管长度 $1/3$ 处,而应力的最小值也集中在右侧受拉区钢管 $1/2$ 内,最终模型在 $1/3$ 处产生弹塑性失稳破坏。

4 复合长柱参数分析

4.1 再生混凝土强度的影响

钢管-混凝土-拼接木复合长柱构件的柱顶荷载-位移曲线见图10(a),在再生混凝土

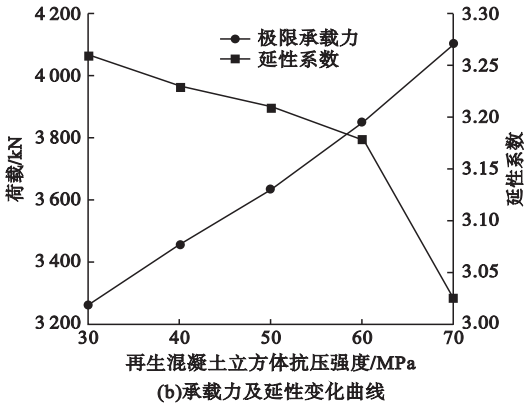
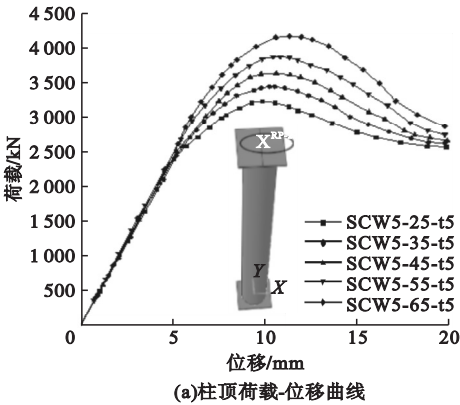


图 10 再生混凝土强度的影响

Fig. 10 Effect of recycled concrete strength

强度的影响下力学性能关系曲线如图10(b),模拟结果见表3。

由图10(a)可知,改变混凝土强度对于复合长柱构件的初始刚度影响不大。由表3数据和图10(b)可知,在再生混凝土强度增加的同时,构件的极限承载力随之呈近似线

性增加。再生混凝土立方体抗压强度每增加10 MPa,复合长柱的极限承载力分别提升6.07%、5.13%、5.90%、6.53%。复合长柱的延性随着再生混凝土强度的增加逐渐减小,且当再生混凝土立方体抗压强度超过55 MPa时,构件延性下降幅度较大。

表3 再生混凝土强度不同时构件的模拟结果对比

构件编号	屈服点		峰值点		破坏点		延性系数
	F_y/kN	S_y/mm	F_m/kN	S_m/mm	F_u/kN	S_u/mm	
SCW5-25-t5	2 282.04	4.58	3 260.06	9.35	2 771.05	14.96	3.26
SCW5-35-t5	2 420.69	4.74	3 458.13	9.68	2 939.41	15.30	3.23
SCW5-45-t5	2 544.84	4.79	3 635.49	9.50	3 090.17	15.40	3.21
SCW5-55-t5	2 695.47	5.04	3 850.67	10.08	3 273.07	16.04	3.18
SCW5-65-t5	2 871.50	5.33	4 102.15	10.78	3 486.83	16.19	3.03

4.2 构件长细比的影响

钢管-混凝土-拼接木复合长柱构件以长细比为变量时的柱顶荷载-位移曲线如图11(a)所示,力学性能关系曲线如图11(b),模拟结果见表4。由图11(a)可知,构件的初始刚度随长细比的增加而不断减小。由表4和图11(b)可知,构件极限承载力随长细比

的增加而呈线性下降,构件的长细比每增加10,其极限承载力依次降低3.16%、4.29%、2.9%、4.89%,对应的峰值位移则随之明显增加。在此过程中,构件的延性随之提升,且幅度逐渐增大,构件的延性分别提高6.42%、7.71%、9.03%、18.57%。

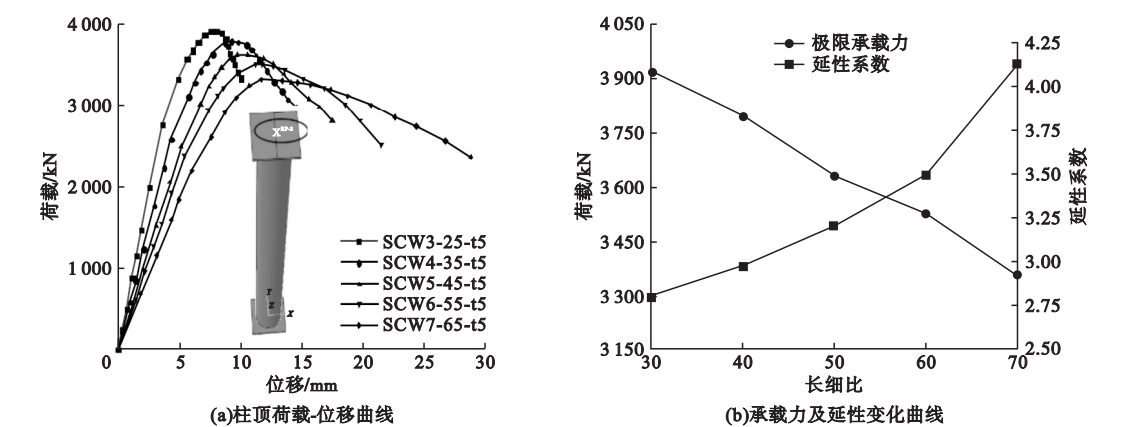


图11 构件长细比的影响

Fig. 11 Effect of slenderness ratio

表4 长细比不同时构件的模拟结果对比

构件编号	屈服点		峰值点		破坏点		延性系数
	F_y/kN	S_y/mm	F_m/kN	S_m/mm	F_u/kN	S_u/mm	
SCW3-45-t5	2 745.80	3.51	3 922.57	7.85	3 334.18	9.82	2.80
SCW4-45-t5	2 658.99	4.20	3 798.56	9.21	3 228.78	12.56	2.98
SCW5-45-t5	2 544.84	4.79	3 635.49	9.50	3 090.17	15.40	3.21
SCW6-45-t5	2 471.00	5.21	3 529.98	10.74	3 000.48	18.23	3.50
SCW7-45-t5	2 350.11	5.79	3 357.31	11.33	2 853.71	24.03	4.15

4.3 钢管壁厚的影响

钢管-混凝土-拼接木复合长柱构件以钢管壁厚为变量时的模拟结果见表 5,柱顶荷载-位移曲线如图 12(a)所示,力学性能关系曲线如图 12(b)所示。由图 12(a)可知,复合构件的初始刚度随钢管壁厚的增加逐步提高,其原因是构件含钢率增加,钢管抵抗核心混凝土横向变形的能力就越强,混凝土开裂

也就受到更大的约束,所以构件的初始刚度会越来越大。

由图 12(b)和表 5 可知,构件极限承载力随钢管壁厚的增加呈线性增加,钢管的壁厚每增加 1 mm,其极限承载力分别提升 11.34%、8.24%、7.07%、6.54%。其延性随壁厚的增加而提升,但当厚度大于 6 mm 时,提升效果减弱。

表 5 钢管壁厚不同时构件的模拟结果对比

Table 5 Simulation results of components with different wall thickness of steel pipe

构件编号	屈服点		峰值点		破坏点		延性系数
	F_y/kN	S_y/mm	F_m/kN	S_m/mm	F_u/kN	S_u/mm	
SCW5-45-t3	2 112.31	5.69	3 017.59	9.62	2 564.95	16.01	2.81
SCW5-45-t4	2 351.85	5.30	3 359.78	9.66	2 855.81	16.23	3.06
SCW5-45-t5	2 544.84	4.79	3 635.49	9.50	3 090.17	15.40	3.21
SCW5-45-t6	2 724.76	4.31	3 892.51	9.89	3 308.63	14.70	3.42
SCW5-45-t7	2 902.96	4.06	4 147.09	9.64	3 525.03	14.21	3.50

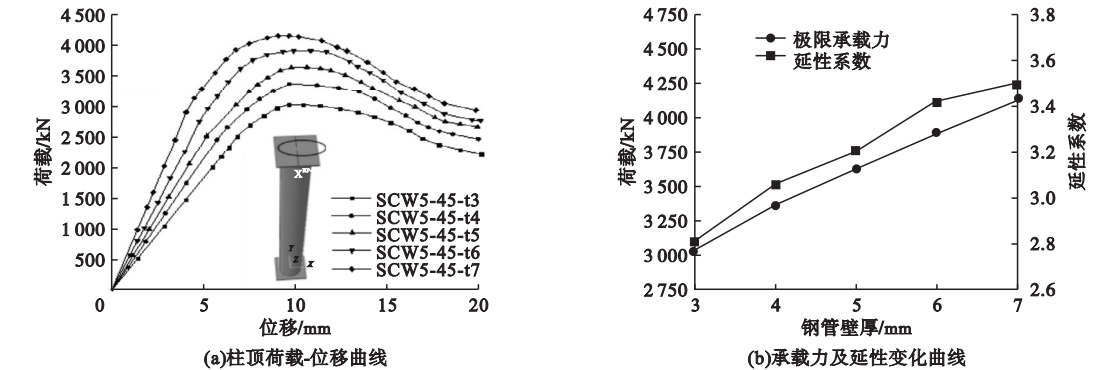


图 12 钢管壁厚的影响

Fig. 12 Effect of steel tube wall thickness

5 结 论

- (1)建立了钢管-再生混凝土-拼接木复合长柱构件有限元模型,并验证了该模型可有效模拟复合长柱的轴压性能。
- (2)通过对构件的受力机理以及应力云图分析,可以发现拼接木的弹性阶段较长,在破坏阶段,拼接木可为构件提供相对稳定的承载力;将拼接木填充在钢管再生混凝土柱核心处后,可以使中心区域的再生混凝土在其作用下补偿一定的强度缺失,可以延缓构件的弯曲破坏。
- (3)通过提高再生混凝土强度可有效提

升构件的承载能力,但构件的延性有所降低;提高长细比会降低构件的极限承载力和初始刚度,提高构件的延性;增加钢管壁厚对构件的极限承载力、初始刚度和延性均有一定幅度的提高。

参考文献

[1] 刘伟庆,杨会峰.现代木结构研究进展[J].建筑结构学报,2019,40(2):16-43.
(LIU Weiqing, YANG Huifeng. Research progress on modern timber structures [J]. Journal of building structures, 2019, 40(2): 16-43.)

[2] 胡夏闽,李巧,彭虹毅,等.木-混凝土组合梁静力试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(增刊1):371-376.
(HU Xiamin, LI Qiao, PENG Hongyi, et al.

- Experimental study on wood-concrete composite beams [J]. Journal of building structures, 2013, 34(S1): 371–376.)
- [3] 李彤桐,王超凡,洪浩凯,等.薄壁钢木组合梁承载力实验研究[J].山西建筑,2016,42(13):35–36.
(LI Tongtong, WANG Chaofan, HONG Haokai, et al. Experimental research on the bearing capacity of steel-wood composite beams [J]. Shanxi architecture, 2016, 42(13): 35–36.)
- [4] GHAZIJAHANI T G, JIAO H, HOLLOWAY D. Concrete-filled circular steel tubes with a timber infill under axial compression [J]. Construction and building materials, 2017, 94(2): 791–799.
- [5] 褚云朋,姚勇,杨东升,等.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,2017,47(4):75–80.
(CHU Yunpeng, YAO Yong, YANG Dongsheng, et al. Experimental study on axial compression behavior of cold-formed thin-walled square steel tube-timber composite long columns [J]. Building structure, 2017, 47(4): 75–80.)
- [6] KARAMPUR H, BOURGES M, GILBERT B P, et al. Compressive behaviour of novel timber-filled steel tubular (TFST) columns [J]. Construction and building materials, 2019, 238: 117734.
- [7] HU Q, GAO Y, MENG X, et al. Axial compression of steel-timber composite column consisting of H-shaped steel and glulam [J]. Engineering structures, 2020, 216(5): 110561.
- [8] 李岷昌,岳祥虎,杨志坚.钢管-木-混凝土轴压短柱有限元分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(2):193–201.
(LI Guochang, YUE Xianghu, YANG Zhijian. Finite element analysis of steel tube-wood-concrete short columns under axial compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(2): 193–201.)
- [9] XIAO J, LI W, FAN Y, et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011) [J]. Construction and building materials, 2012, 31: 364–383.
- [10] BECHTEL S C, NORIS C B. Strength of wood beam and rectangular cross section as affected by span-depth ration [R]. USA: Forest Products Laboratory, 1952.
- [11] 王正昌,许清风,韩重庆,等.一麻五灰传统保护处理圆木柱的耐火极限试验研究[J].建筑结构,2017,47(17):14–19.
(WANG Zhengchang, XU Qingfeng, HAN Chongqing, et al. Experimental study on fire endurance of round timber column with traditional craftwork with one hemp fiber and five plastering application [J]. Building structure, 2017, 47(17): 14–19.)
- [12] 龙卫国.木结构设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
(LONG Weiguo. Wood structure design manual [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.)
- [13] 王正昌.传统木结构典型构件火灾性能试验研究[D].南京:东南大学,2018.
(WANG Zhengchang. Experimental study on fire performance of typical components of traditional timber structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.)
- [14] 孙洪业,白立斌,李登辉. H型钢-木组合梁受弯性能数值模拟及参数分析[J].建筑结构,2017,47(13):51–56.
(SUN Hongye, BAI Libin, LI Denghui. Numerical simulation and parameter analysis of flexural behavior of H-shape steel-wood composite beams [J]. Building structure, 2017, 47(13): 51–56.)
- [15] 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 structure: Theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2007.)
- [16] 张向冈,陈宗平,薛建阳,等.钢管再生混凝土轴压长柱试验研究及力学性能分析[J].建筑结构学报,2012,33(9):12–20.
(ZHANG Xianggang, CHEN Zongping, XUE Jianyang, et al. Experimental study and mechanical behavior analysis of recycled aggregate concrete filled steel tubular long columns under axial compression [J]. Journal of building structures, 2012, 33(9): 12–20.)
- [17] 杨有福.钢管再生混凝土构件荷载-变形关系的理论分析[J].工业建筑,2007,37(12):1–6,124.
(YANG Youfu. Theoretical research on load-deformation relations of recycled aggregate concrete-filled steel tubular members [J]. Industrial construction, 2007, 37(12): 1–6, 124.)
- [18] 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.
- [19] 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. Shear property of timber-concrete composite structure with nail type connectors [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2017.)

(责任编辑:王国业 英文审校:唐玉兰)