

方钢管-木-混凝土中长柱轴压性能有限元分析

李帼昌,夏秀斌,邱增美,李 晓

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁沈阳 110168)

摘 要 目的 为降低混凝土用量、减轻结构自重,将强度高、自重轻的木材内置于钢管混凝土柱中,形成新型方钢管-木-混凝土组合柱。方法 采用有限元分析软件 ABAQUS 建立方钢管-木-混凝土中长柱精细化模型,基于典型构件,分析其破坏机理及不同参数变化对构件轴压力学性能的影响规律。结果 受力全过程中,钢管承担大部分荷载,组合柱承载力随钢材强度增加而显著提升;混凝土强度提升对承载力无显著影响;随着长细比的增大,构件破坏模式由轴压破坏逐渐转变为压弯破坏,承载力降低;木材最佳配置率为 28.4%,延性是同尺寸钢管混凝土柱的 1.42 倍。结论 木材可显著提高方钢管-木-混凝土中长柱的延性,减轻结构自重。

关键词 钢管混凝土;木材;有限元分析;延性;承载力

中图分类号 TU 391

文献标志码 A

Finite Element Analysis of Axial Compression Performance on Square Steel Tube-timber-concrete Medium Long Column

LI Guochang, XIA Xiubin, QIU Zengmei, LI Xiao

(School of civil engineering, Shenyang Architecture University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to reduce the amount of concrete and the dead weight of the structure, the timber with high strength and light dead weight is embedded in the concrete-filled steel tube column to form a new square steel-timber-concrete composite column. In this paper, a refined model of square steel tube-timber-concrete medium-long column was established by finite element software ABAQUS. Based on typical components, the failure mechanism and the influence of different parameters on the axial pressure performance of components were analyzed. In the whole loading process, steel tube bears most of the load, and the bearing capacity of composite column increases significantly with the increase of steel strength. Concrete strength improvement has no significant effect on bearing capacity. With the increase of slenderness ratio, the failure mode changes from axial compression failure to flexural failure, and the bearing capacity decreases. The best placement rate of timber is 28.4%, and the ductility is 1.42 times that of CFST column of the

收稿日期:2022-03-23

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。

same size. Timber can significantly improve the ductility of square steel tube-timber-concrete medium long column and reduce the dead weight of the structure.

Key words:concrete filled steel tube;timber;finite element analysis;ductility;bearing capacity

钢管混凝土结构具有施工便利、受力性能良好等优势被广泛应用于大跨、高层建筑中^[1-2]。近年来,建筑业发展更加注重绿色节能、低碳环保、与自然和谐共生^[3-4]。二氧化碳伴随着混凝土生产而产生,对环境不利。积极寻找一种材料替代部分混凝土符合可持续发展的趋势。其中,木材作为一种可再生的建筑材料,具有自重轻、强度高且易于加工的优点^[5],其研究与应用已成为国内外学者关注的热点。

褚云朋等^[6]对36根钢管木长柱进行轴压试验,结果表明,组合柱在发生局部破坏后,仍能继续承担荷载,且承载力降低缓慢。程东辉等^[7]进行木混凝土组合柱与钢筋混凝土组合柱的对比试验,结果表明,与钢筋混凝土组合柱相比,木混凝土组合柱降低混凝土用量的同时对极限承载力无较大影响。杨会峰等^[8]对一种新型角钢混合连接木-混凝土梁柱组合节点进行试验,结果表明,这种梁柱组合节点具有良好的受力性能,在正弯矩作用下,同木梁-木柱节点相比,承载力和初始转动刚度都得到了显著提高。T. G. Ghazijahani等^[9]对内置不同截面形式木材的钢管混凝土柱进行轴压试验研究,结果表明,木与混凝土截面面积比值最高为1.5的试件承载力是空心钢试件的2倍,相对于钢管混凝土试件,其重量显著减少、延性有效提升。Qi Yunqiao等^[10]对12个试件包括裸木柱、空心钢管柱和CFRP约束钢管木组合柱进行轴压试验,试验结果表明,与空心钢管柱或裸木柱相比,CFRP约束钢管木组合柱具有更高的强度和延性。

综上,目前国内外学者已对木材与钢管、混凝土及纤维复合材料的组合进行了大量研究,但对于方钢管-木-混凝土组合柱的研究

较少,同时该组合柱对降低混凝土用量,减轻结构自重具有重要研究意义。基于此,笔者利用有限元分析软件ABAQUS对方钢管-木-混凝土中长柱的轴压力学性能展开深入研究,以为后续研究工作提供更多的参考和借鉴。

1 有限元模型设计

1.1 材料本构关系

钢材采用韩林海^[1]提出的二折线本构模型,混凝土采用塑性损伤模型,其本构关系选取刘威^[11]提出的方钢管内核心混凝土的应力-应变关系。

不同于钢管与混凝土,木材是一种各向异性的材料,其中顺木纹抗压强度最高^[12-15]。为充分发挥木材的受力性能,采用S. C. Bazan^[16]和A. H. Buchanan^[17]提出的顺纹双折线本构模型。参考《木结构设计手册》^[18],选取东北落叶松作为模拟对象,其物理性质见表1,通过设定有限元软件ABAQUS中的参数来实现木材在弹塑性阶段的力学性能。

表1 落叶松物理性质

Table 1 Physical properties of larch

气干密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	顺纹抗压强/ MPa	抗弯强度/ MPa	抗弯弹性 模量/GPa
641	57.6	113.3	14.5

1.2 相互作用与边界关系

模型中钢管、混凝土、木材及刚性端板的单元类型均为C3D8R。各部分接触关系如图1(a)所示,钢管与混凝土的切线方向采用库伦摩擦,摩擦系数为0.6^[11];根据《机械设计手册》将木与混凝土之间的摩擦定义为各向同性库伦摩擦,摩擦系数为0.62^[19]。

下端板限制其在三个方向上的位移以及以Y和Z为中心方向上的转动,上端板限制

其在 X 和 Y 方向上的平移以及以 Y 和 Z 为中心方向上的转动,并在 Z 方向上施加位移荷载控制。加载方式采用柱端轴心加载,考虑初始缺陷将其简化为设置在偏离中心距离 $L/1000$ 的线荷载, L 为柱高,边界条件如图 1(b) 所示。

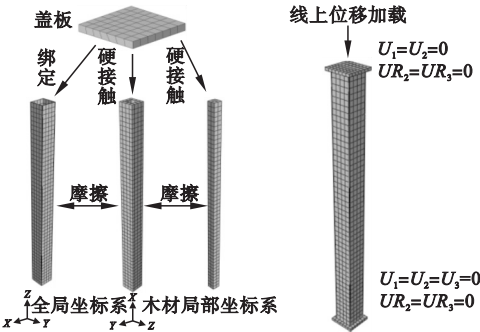


图 1 接触关系和边界条件

Fig. 1 Contact relationship and boundary conditions of model

1.3 模型参数

共设计 6 组 17 根方钢管-木-混凝土中长柱。截面形式如图 2 所示,改变的参数为

钢材屈服强度、混凝土抗压强度、木材配置率及长细比。模型具体参数见表 2,其中 TCFST 代表方钢管-木-混凝土中长柱,CFST 代表钢管混凝土中长柱。

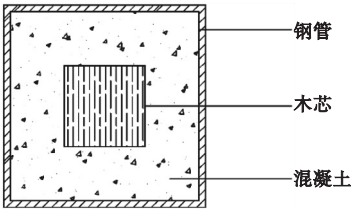


图 2 方钢管-木-混凝土组合柱截面示意图

Fig. 2 Section from of steel tube-timber-concrete composite column

2 有限元结果与分析

2.1 构件受力全过程分析

选取模型 TCFST-3 作为典型构件对方钢管-木-混凝土中长柱的受力全过程进行分析,图 3 为 TCFST-3 构件荷载-侧向挠度曲线及各组分担荷载-侧向挠度曲线。通过定义 4 个特征点(A、B、C、D)确定三个工作阶段:

表 2 模型参数

Table 2 Model parameters

构件编号	$B \times t \times L/\text{mm}$	b/mm	$\alpha/\%$	A_t/mm^2	f_y/MPa	f_{cu}/MPa	λ	N_u/kN
CFST	150 × 5 × 450	0	0	0	550	60	46.19	2174.83
TCFST-1	150 × 5 × 2 000	80	28.4	6 400	355	60	46.19	1 547.84
TCFST-2	150 × 5 × 2 000	80	28.4	6 400	460	60	46.19	1 878.81
TCFST-3	150 × 5 × 2 000	80	28.4	6 400	550	60	46.19	2 123.28
TCFST-4	150 × 5 × 2 000	80	28.4	6 400	690	60	46.19	2 648.37
TCFST-5	150 × 5 × 2 000	80	28.4	6 400	550	50	46.19	2 044.44
TCFST-6	150 × 5 × 2 000	80	28.4	6 400	550	60	46.19	2 123.28
TCFST-7	150 × 5 × 2 000	80	28.4	6 400	550	70	46.19	2 228.34
TCFST-8	150 × 5 × 2 000	80	28.4	6 400	550	80	46.19	2 260.47
TCFST-9	150 × 5 × 2 000	40	7.1	1 600	550	60	46.19	2 116.52
TCFST-10	150 × 5 × 2 000	60	16.0	3 600	550	60	46.19	2 118.11
TCFST-11	150 × 5 × 2 000	80	28.4	6 400	550	60	46.19	2 123.28
TCFST-12	150 × 5 × 2 000	100	44.4	10 000	550	60	46.19	2 193.24
TCFST-13	150 × 5 × 1 000	80	28.4	6 400	550	60	23.09	2 470.64
TCFST-14	150 × 5 × 1 500	80	28.4	6 400	550	60	34.64	2 263.66
TCFST-15	150 × 5 × 2 000	80	28.4	6 400	550	60	46.19	2 123.28
TCFST-16	150 × 5 × 2 500	80	28.4	6 400	550	60	57.74	1 997.74

注: B 为钢管宽度; t 为钢管壁厚; L 为钢管长度; b 为方木芯边长; α 为木材配置率 = 木材截面面积/构件总截面面积; A_t 为木材截面面积; f_y 为钢材屈服强度; f_{cu} 为混凝土抗压强度; λ 为长细比。

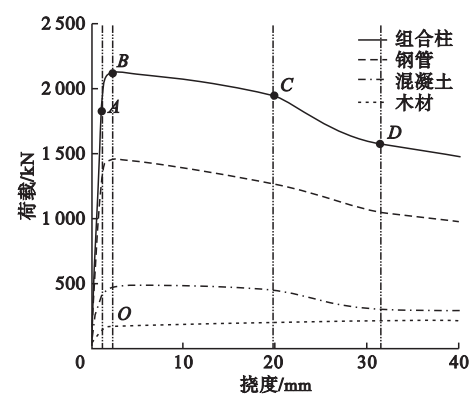


图3 典型构件中截面荷载-挠度曲线

Fig. 3 Load-deflection curve of a typical member's section

弹性阶段、弹塑性阶段及下降阶段,对构件全过程分析如下。

弹性阶段(OA):定义钢材的屈服点为特征点A。A点之前,钢管、混凝土、木材之间无相互作用,各自分担的荷载比例为8.5:2.8:1,此时构件所承受荷载约为峰值荷载的86.1%。

弹塑性阶段(AB):随着荷载的增加,混凝土的横向变形逐渐超过钢管的横向变形,此时钢管对混凝土产生约束作用,钢管与混凝土、混凝土与木材之间的接触应力不断提高。由于钢管对混凝土产生套箍效应,并间接约束内部木材,故构件承载能力在此阶段得到显著提升,在特征点B时达到了极限承载力。此时钢管、混凝土、木材分担的荷载比例为7.6:2.6:1。

下降段(BD):峰值点后,构件侧向位移发展迅速,二阶效应加剧,钢管的约束作用减弱,承载力持续下降。特征点C时混凝土发生破坏,此时混凝土压应变已达到本构中极限压应力对应的应变,承担荷载不再上升,木材承担荷载仍逐渐增大。特征点D表示木材开始发生破坏的时刻,此时木材达到顺纹极限抗压强度,随着加载的继续,在混凝土的包裹下木材受压密实,因此木材承载力下降缓慢。加载后期构件变形持续增大,但其承载力保持稳定,整体表现出良好的延性。

各个特征点处三种材料承担荷载比例如图4所示,受力全过程中钢管分担荷载占比约为2/3,钢管承担主要荷载。在钢管的约束下,混凝土开裂得到有效抑制,承担的荷载逐渐递增,直至发生破坏为止。木材在整个受力过程中,由于钢管与混凝土的约束作用,木材分担荷载从8%持续提高至13%,具有良好承载能力,木材在加载后期对方钢管-木-混凝土中长柱承载力具有显著贡献。

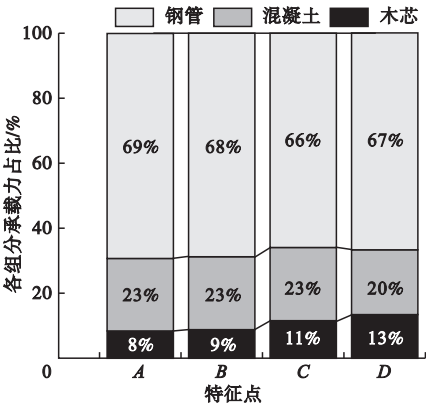


图4 各特征点处荷载分配情况

Fig. 4 Load distribution at each characteristic point

2.2 应力分析

2.2.1 钢管

典型构件中钢管在各特征点处的 Mises 应力云图如图5所示。A点时,钢管达到屈服,此时钢管处于全截面受压的状态,左侧 Mises 应力达到550.2 MPa,已超过钢管屈服强度,钢管中部与端部应力相差较小;B点时,钢管左右两侧应力分布不均,左侧纵向应力进一步发展,但构件的两端和右侧仍未达到屈服状态;C点时,由于构件发生较大侧向变形,钢管在弯曲平面内已经产生明显的受压侧和受拉侧,此时钢管受压侧(右侧)应力进一步提高,受拉侧(左侧)应力较小;D点时,内部木材和混凝土均已发生破坏,但在进一步受压致密实后,钢管仍持续保持较大应力,应力较大区域集中在钢管中部,该部位挠度最大。

2.2.2 混凝土

典型构件中混凝土在各特征点处的纵向

应力云图如图 6 所示。A 点时,混凝土处于全截面受压的状态,混凝土中部纵向应力较小,两端纵向压应力最大;B 点时,混凝土中截面应力分布不均匀,左侧纵向压应力较大,右侧纵向压应力较小,同时角部出现应力集中的现象;C 点时,混凝土在钢管与木材的约束作用下,抗压强度提升至最大值,构件侧向挠度进一步发展,出现拉应力。受压侧纵向压应力和受拉侧纵向拉应力分布从 1/2 柱高处向两端不断发展;在 D 点时,截面纵向应力分布,从截面外边缘向截面内部发展,受拉侧纵向拉应力增大,最大纵向压应力出现下降。

2.2.3 木 材

典型构件中木材在各特征点处的纵向应力云图如图 7 所示。A 点时,木材处于全截

面受压状态,两端纵向应力较大;B 点时,木材截面应力分布相对均匀,出现侧向挠曲现象,但左右两侧应力相差不大;C 点时,侧向挠度发展明显,木材的纵向应力持续增长,截面应力分布显著不均匀,左侧纵向压应力较大,右侧纵向压应力较小;D 点时,在钢管和混凝土的约束下,木材最大纵向压应力已超过其抗压强度,木材与混凝土接触的角部出现应力集中现象,纵向应力已达到最大值,木材仍未出现受拉区,一直保持受压状态。D 点过后,最大纵向应力开始持续下降,表明木材已经发生破坏。

由此可得,方钢管-木-混凝土长柱的破坏是由钢管屈服和混凝土土压碎引起的失稳破坏。

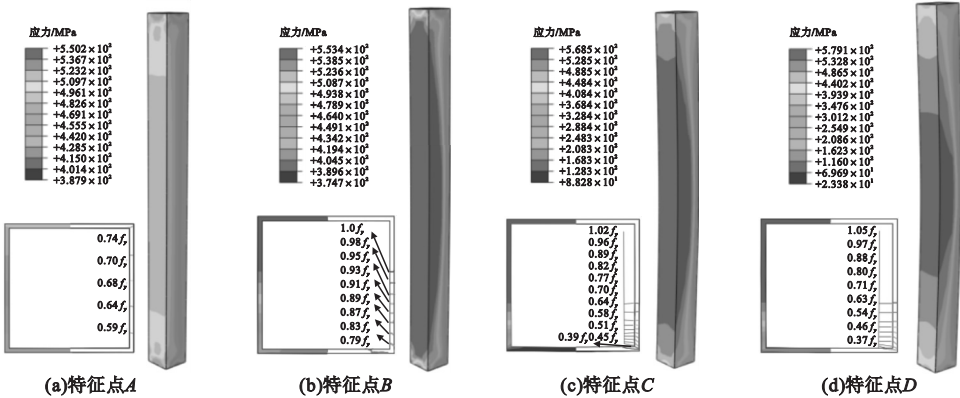


图 5 钢管 Mises 应力云图
Fig. 5 Mises stress pattern of steel pipe

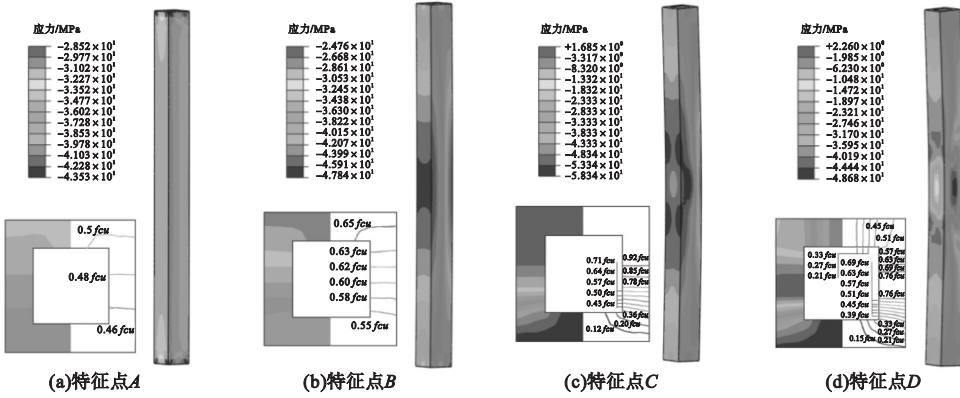


图 6 混凝土纵向应力云图
Fig. 6 Longitudinal stress cloud of concrete

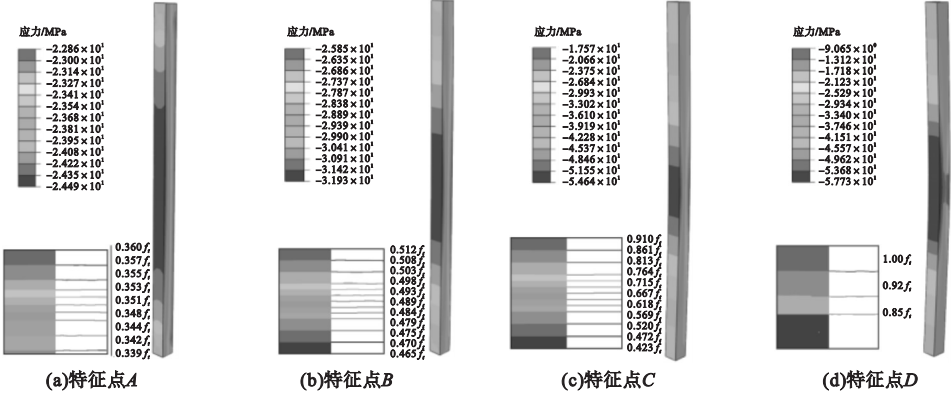


图7 木材纵向应力云图

Fig. 7 Longitudinal stress cloud of timber

2.3 接触作用

图8是典型构件截面外钢管与混凝土之间的接触应力曲线。从图中可以看出,在构件加载初期,即A点之前,钢管与混凝土均处于弹性阶段,未发生相互作用,接触应力较小;AB段时,混凝土的横向变形逐渐超过钢管的横向变形,接触力开始迅速增加,此时钢管角部接触应力较大,钢管平板处接触应力不明显;BC段时,钢管持续对混凝土产生有效的约束作用,曲线不断上升,直至达到C点,混凝土发生破坏;C点过后,由于混凝土的破坏,各位置处的接触应力开始下降,混凝土被压密实后,钢管与混凝土再次接触,曲线二次上升;D点是木材发生破坏的时刻,此时混凝土内部应力减弱,因此钢管与混凝土的接触应力曲线走势平缓。由整个过程分析可

知,受拉侧角部d点为接触应力最大点;受压侧上角部b点与平板处a点接触应力次之;侧向c点接触应力最小。

图9是典型构件中截面木材与混凝土之间的接触应力曲线。从图中可以看出,木材与混凝土加载初期接触应力较小,进入C点后才产生较大的接触应力;C点混凝土破坏后,各位置处的接触应力同样开始下降,待混凝土受压密实后,曲线二次上升。受压侧平板处a点、受压侧角部b点、受拉侧角部d点,接触应力明显上升;进入D点木材开始破坏,接触应力走势转为平缓。此时受拉侧下角部d点为接触应力最大点;D点过后混凝土与木材仍有较大的接触应力,说明木材的残余承载力较强。

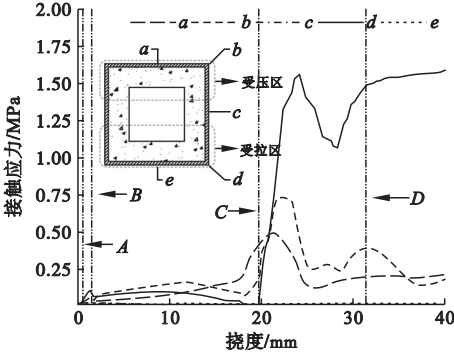


图8 钢管与混凝土中截面接触应力-侧向挠度曲线
Fig. 8 Contact stress-lateral deflection curve of the section between steel tube and concrete

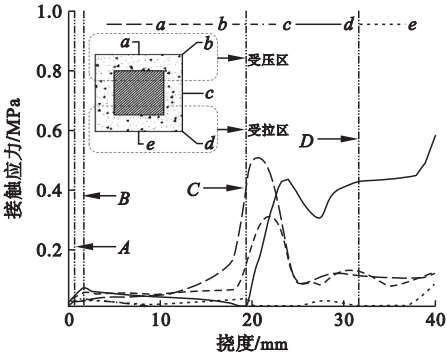


图9 混凝土与木材中截面接触应力-侧向挠度曲线
Fig. 9 Contact stress-lateral deflection curves of the sections between concrete and timber

3 参数分析

3.1 钢材屈服强度

图 10 为不同钢材屈服强度构件的中截面荷载-挠度曲线图。从图中可以看出,在达到极限荷载前,曲线基本重合,表明钢材强度对方钢管-木-混凝土中长柱的轴向刚度无影响;随着钢材强度的提升,极限荷载对应的轴向位移显著减小,钢材强度从 Q355 提升到 Q690, 极限承载力分别提升了 22.7%、42.9%、72.9%,随钢材屈服强度增加,承载力显著提升;加载后期,曲线下降段走势基本相同,但残余承载力差别明显。因此提高钢材强度可有效提升构件的轴压性能。

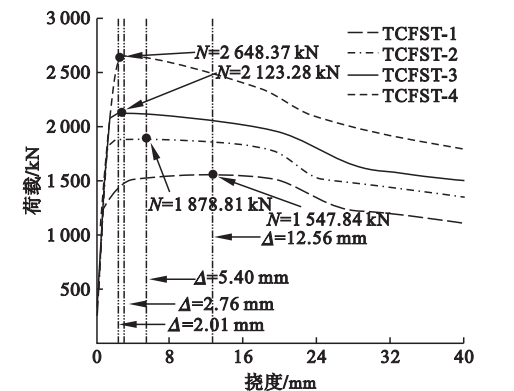


图 10 不同钢材屈服强度中截面荷载-挠度曲线
Fig. 10 Section load deflection curve in different steel yield strength

3.2 混凝土抗压强度

图 11 为不同混凝土强度构件的中截面

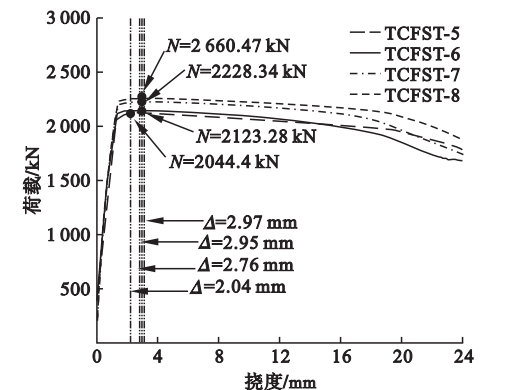


图 11 不同混凝土强度中截面荷载-挠度曲线
Fig. 11 Section load deflection curve in different concrete strength

荷载-挠度曲线图。从图中可以看出,混凝土强度的改变对轴向刚度无显著影响,且极限承载力相近。长柱的极限承载力和其抗弯刚度有直接关系,而混凝土强度小范围变化对其弹性模量的影响较小,进而对长柱的抗弯刚度影响较小。因此提升混凝土强度不能有效提升构件轴压性能。

3.3 木材配置率

图 12 为不同木芯截面尺寸构件的中截面荷载-挠度曲线图。从图中可以看出,木材配置率的改变对曲线初始刚度几乎没有影响。木芯边长每增加 20 mm,极限承载力分别提升了 0.9%、1.0%、1.3%,增幅较小。与钢管混凝土柱相比,木材配置率最高为 44.4% 的构件,质量减少了 24.8%,有效减轻了结构自重。表明方钢管-木-混凝土中长柱降低混凝土用量的同时对极限承载力影响较小。因此增加构件中木材配置率可有效减轻构件自重。

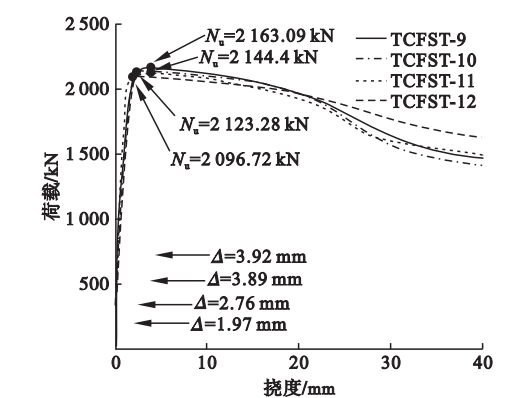


图 12 不同木芯截面尺寸中截面荷载-挠度曲线
Fig. 12 Section load deflection curve in different section sizes of timber core

3.4 长细比

图 13 为不同长细比构件的中截面荷载-挠度曲线图。从图中可以看出,长细比对组合柱的各方面力学性能的影响比较显著。随着长细比的增加,构件初始刚度降低。

采用 ABAQUS 提供的单元删除方法模拟混凝土破坏发展趋势如图 14 所示。当长细比为 23.09、34.64 时,从图 14(a) 可以看

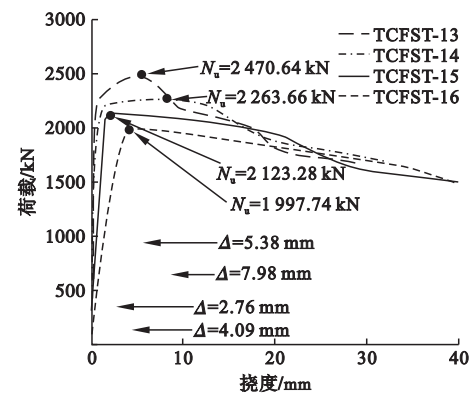


图 13 不同长细比中截面荷载-挠度曲线
Fig. 13 Load deflection curves of sections with different slenderness ratios

出混凝土破坏的发展趋势为纵向发展为主导,侧向弯曲变形发展较缓,表现为轴压破坏;当长细比为 46.19、57.74 时,从图 14(b)可以看出,混凝土破坏的发展趋势为横向发展为主导,侧向弯曲变形发展迅速,在轴力和弯矩作用下,表现为压弯破坏。所以随着长细比的增大,构件破坏形态从轴压破坏逐渐转变为压弯破坏。同时长细比每增加 11.55,极限承载力分别降低 5.9%、10.7%、15.0%,影响显著。

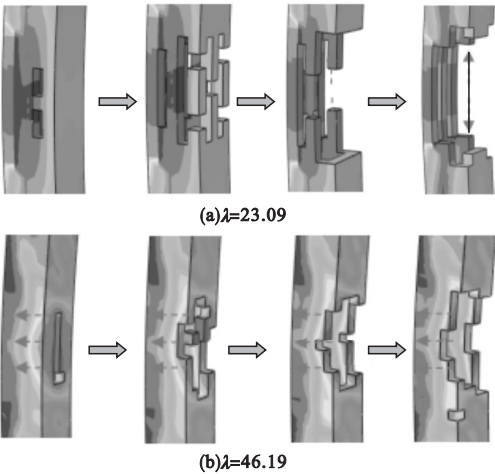


图 14 不同长细比构件混凝土破坏发展趋势
Fig. 14 Failure development trend of concrete members with different slenderness ratios

4 延性分析

采用参考文献[10]给出的延性指标对

方钢管-木-混凝土轴压长柱的延性进行评价,具体计算方法如公式(1)所示。

$$DI = \frac{\delta_{0.85}}{\delta_{y1}} \tag{1}$$

式中: $\delta_{0.85}$ 是当峰值后荷载下降到峰值荷载 85% 时的轴向位移; δ_{y1} 是 1.33 倍的 $\delta_{0.75}$ 对应的轴向位移, $\delta_{0.75}$ 是峰值前荷载达到峰值荷载 75% 时的轴向位移。

图 15 为不同长细比构件的延性系数。由图可见,四条木材配置率分别为 7.1%、16.0%、28.4%、44.4% 的曲线皆先上升后下降,在木材配置率为 28.4% 时达到峰值点,延性最佳,是同尺寸普通钢管混凝土柱的 1.42 倍。故木材可显著提高方钢管-木-混凝土中长柱的延性。

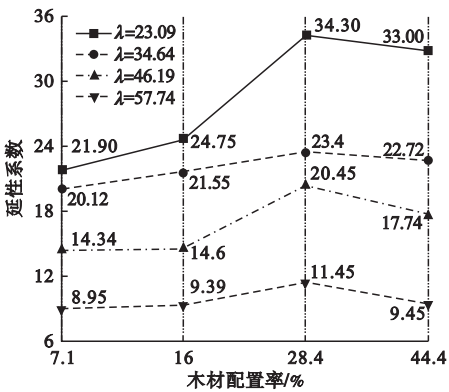


图 15 不同长细比构件的延性系数
Fig. 15 Ductility coefficient of member with different slenderness ratio

5 结 论

- (1)随着长细比的增加,方钢管-木-混凝土中长柱从轴压破坏逐渐转变为压弯破坏,极限承载力降低。
- (2)受力全过程中,钢管承担大部分荷载,方钢管-木-混凝土中长柱承载力随钢材强度增加显著提升;混凝土强度提升对承载力无显著影响。
- (3)木材可有效减轻结构自重,最高配置率为 44.4% 的组合柱,重量比钢管混凝土柱减少了 24.8%。

(4)木材可显著提高方钢管-木-混凝土中长柱的延性,木材最佳配置率为28.4%,延性为同尺寸方钢管混凝土柱的1.42倍。

参考文献

- [1] 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 tube structure: theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2007.)
- [2] 韩林海,牟延敏,王法承,等. 钢管混凝土混合结构设计原理及其在桥梁工程中的应用[J]. 土木工程学报,2020,53(5):1-24.
(HAN Linhai, MU Tingmin, WANG Facheng, et al. Design principle of concrete-filled steel tube mixed structure and its application in bridge engineering [J]. Journal of soil and wood engineering, 2020, 53(5): 1-24.)
- [3] 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 of modern timber structures [J]. Journal of building structures, 2019, 40(2): 16-43.)
- [4] 蒋海燕,宋晓滨,顾祥林,等. 碳纤维布增强钢-木屈曲约束支撑低周反复加载试验研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(8):136-143.
(JIANG Haiyan, SONG Xiaobin, GU Xianglin, et al. experimental study on low cyclic loading of CFRP reinforced steel-wood buckling brace [J]. Journal of building structures, 2021, 42(8): 136-143.)
- [5] 薛建阳,任国旗,袁振,等. 填充正交胶合木剪力墙板的胶合木框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2022,43(11):140-150.
(XUE Jianyang, REN Guoqi, YUAN Zhen, et al. Experimental study on seismic performance of Glulam frame filled with orthogonal Glulam shear panels [J]. Journal of building structures, 2022, 43(11): 140-150.)
- [6] 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,2017,47(4):75-80.
(CHU Yunpeng, YAO Yong, YANG Dongsheng. Experimental study on axial compression behavior of cold-formed thin-walled square steel tube-timber composite long column [J]. Building structure, 2017, 47(4): 75-80.)
- [7] 程东辉,王翔旭,杜园元. 木塑-混凝土组合柱轴心受压试验及有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(1):26-34.
(CHENG Donghui, WANG Xiangxu, DU Yuanyuan. Axial compression test and finite element analysis of wood plastic-concrete composite columns [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33(1): 26-34.)
- [8] 杨会峰,唐立秋,陈洋,等. 木-混凝土梁柱组合节点的受力性能试验研究与理论分析[J]. 建筑结构学报,2021,42(1):113-124.
(YANG Huifeng, TANG Liqiu, CHEN Yang, et al. Experimental study and theoretical analysis on mechanical behavior of timber-concrete beam-to-column joints [J]. Journal of building structures, 2021, 42(1): 113-124.)
- [9] 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.
- [10] QI Yunqiao, ZHAO Yuanyang, BEN Mou. Experimental study on axial compressive behavior of CFRP confined square timber filled steel tube stub columns [J]. Structures, 2020, 24(20): 823-834.
- [11] 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. Research on mechanism of concrete-filled steel tubes subjected to local compression [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.)
- [12] 王明谦,顾祥林,宋晓滨,等. 木材非线性受力行为的表征方法研究进展[J]. 建筑结构学报,2021,42(10):76-86.
(WANG Mingqian, GU Xianglin, SONG Xiaobin, et al. Research progress on characterization methods of nonlinear stress behavior of wood [J]. Journal of building structures, 2021, 42(10): 76-86.)
- [13] 薛建阳,吴晨伟,张雨森. 殿堂式木结构古建筑屋盖梁架体系动力特性及地震响应分析[J]. 建筑结构学报,2021,42(10):87-95.
(XUE Jianyang, WU Chenwei, ZHANG Yusen. Dynamic characteristics and seismic response analysis of roof beam frame system of ancient wood-framed buildings [J]. Journal of architectural structures, 2021, 42(10): 87-95.)
- [14] 姜绍飞,乔泽惠,吴铭昊,等. 考虑环境与荷载长期共同作用的木材本构模型研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(8):160-168.
(JIANG Shaofei, QIAO Zehui, WU Minghao, et al. Study on wood constitutive model considering the long-term interaction of environment and load [J]. Journal of building structures, 2021, 42(8): 160-168.)
- [15] 李嗣昌,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.)
- [16] BACHTEL S C, NORRIS C B. Strength of wood beam and rectangular cross section as affected by span-depth ratio [J]. USDA forest service for prod. rep, 1952, 12(3): 42-45.
- [17] BUCHANAN A H. Bending strength of lumber [J]. Journal of structural engineering, 1990, 116(5): 1213-1229.
- [18] 龙卫国,杨学兵. 木结构设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
(LONG Weiguo, YANG Xuebing. Wooden structure design manual [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005.)
- [19] 徐灏. 机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,1991.
(XU Hao. Mechanical design manual [M]. Beijing: China Machine Press, 1991.)

(责任编辑:王国业 英文审校:唐玉兰)