

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.01.012

# 基于 OpenSees 的圆钢管型钢再生混凝土组合柱轴压性能非线性分析

王德法, 孟泽翔, 马 辉, 郭婷婷

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 利用 OpenSees 有限元软件对 11 根圆钢管型钢再生混凝土轴压试验进行数值模拟, 选用基于柔度法的纤维模型将组合柱截面按照不同材料属性进行网格划分, 单元类型选用杆系单元中的非线性梁柱单元, 并将计算荷载-位移曲线与试验结果对比。在此基础上, 分析了再生骨料取代率、径厚比、配钢率及长细比参数对组合柱轴压性能的影响。结果表明, 径厚比、配钢率及长细比对组合柱承载力影响显著, 再生骨料取代率对组合柱承载力影响不大, 有限元计算承载力的相对误差基本在 10% 以内, 具有较高的计算精度。

**关键词:** 圆钢管型钢再生混凝土; OpenSees; 轴压柱; 纤维模型; 参数分析

**中图分类号:** TU323.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2020)01-0088-07

## Nonlinear analysis of axial compression performance of RAC-filled circular steel tube and profile steel composite columns based on OpenSees

WANG Defa, MENG Zexiang, MA Hui, GUO Tingting

(School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The OpenSees finite element software is used to numerically simulate the axial compression test of 11 recycled aggregate concrete(RAC) filled circular steel tube and profile steel composite columns. The fiber model based on the flexibility method is used to mesh the combined column sections according to different material properties. The element type selects the non-linear beam-column element in the rod element, and compares the calculated load-displacement curve with the test results. On this basis, the effects of recycled aggregate replacement rate, diameter-thickness ratio of circular steel tube, profile steel ratio and slenderness ratio on the bearing capacity of the combined columns were analyzed. The results show that diameter-thickness ratio of circular steel tube, profile steel ratio and slenderness ratio have significant influence on the bearing capacity of composite columns. The recycled aggregate replacement rate has little effect on the bearing capacity of composite columns. The relative error rate of finite element calculation bearing capacity is less than 10%, and it has a high calculation accuracy.

**Key words:** RAC-filled circular steel tube and profile steel; OpenSees; axial column; fiber model; parameter analysis

随着经济的快速发展,混凝土用量迅速增加,在产生大量建筑垃圾的同时还造成自然资源的大量开采,因此,再生混凝土材料在建筑行业迅速得到研究和发[1-4],此外,国内外学者对再生混凝土的受力性能也进行了广泛研究[5-7],结果表明,由于再生

骨料在破碎工艺中产生的微裂缝,导致其力学性能低于普通混凝土,这也是限制再生混凝土迅速发展的主要原因。针对以上问题,结合文献[8]的研究成果,将再生混凝土应用到圆钢管型钢组合构件中,可以提高试件承载力,该组合构件不仅可以充分发挥各个材料

收稿日期: 2019-11-23; 网络出版日期: 2020-04-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200421.1605.014.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408485); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JM-193)

第一作者: 王德法,男,教授,博士,研究方向为混凝土组合结构。E-mail:854244066@qq.com

的优势,还解决了型钢混凝土施工困难及钢管混凝土易发生屈曲失稳破坏的问题,具有良好的延性<sup>[9]</sup>。

文献[10]利用 ABAQUS 软件对圆钢管型钢组合柱轴压性能进行有限元分析,取得了较好的效果,但是在保证相同计算精度条件下,其建模工作量和计算量较大,遇到复杂构件很难计算收敛,无法换成更高效的算法,分析具有局限性。文献[11]利用 OpenSees 软件进行有限元分析过程中较好的平衡了以上问题。因此,本文选用 OpenSees 程序作为建模软件。OpenSees 程序作为一款内部代码完全开放的有限元分析平台,通过脚本编程语言 Tcl 进行建模,具有强大的非线性处理能力,保证了计算的精度与效率;并且程序中包含丰富的材料库、单元模型及算法供用户选择,具有极大的灵活性。

在本课题组对圆钢管型钢再生混凝土组合柱研究成果的基础上<sup>[12]</sup>,本文采用 OpenSees 有限元软件对 11 根试件轴压性能进行了非线性分析,计算所得荷载-位移曲线与试验曲线吻合较好,并且进一步验证了组合柱具有较高的承载力及延性,在实际工程中具有极大的推广价值。

## 1 试验概况

### 1.1 试件主要参数

为了研究圆钢管型钢再生混凝土组合柱轴压力学性能,本试验共制作了 11 根试件,考虑的设计参数为 4 个,分别为再生骨料取代率  $r$ 、钢管径厚比  $D/t$ 、型钢配钢率  $\alpha$  和组合柱长细比  $l_0/i$ ,具体设计参数如表 1 所示,试件几何尺寸及截面形式分别如图 1 和图 2 所示。

表 1 试验参数  
Tab. 1 Test parameters

组合柱 编号	再生骨料取 代率 $r/\%$	长细 比 $l_0/i$	壁厚 $t/\text{mm}$	径厚 比 $D/t$	型钢配钢 率 $\alpha/\%$
CSJ1	0	10.62	2.0	113.0	5.5
CSJ2	30	10.62	2.0	113.0	5.5
CSJ3	50	10.62	2.0	113.0	5.5
CSJ4	70	10.62	2.0	113.0	5.5
CSJ5	100	10.62	2.0	113.0	5.5
CSJ6	100	10.62	1.5	150.7	5.5
CSJ7	100	10.62	3.0	75.3	5.5
CSJ8	100	10.62	2.0	113.0	4.5
CSJ9	100	10.62	2.0	113.0	6.5
CSJ10	100	21.24	2.0	113.0	5.5
CSJ11	100	31.86	2.0	113.0	5.5

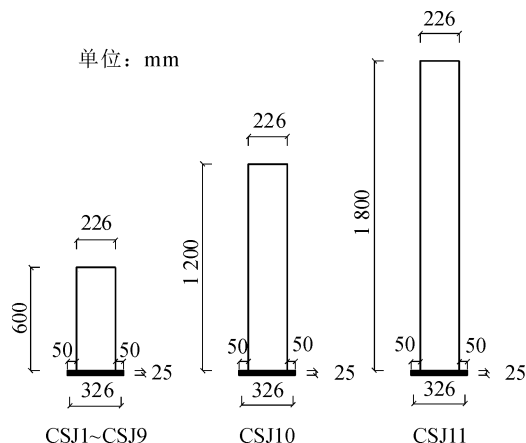


图 1 试件几何尺寸

Fig. 1 Geometry of specimen

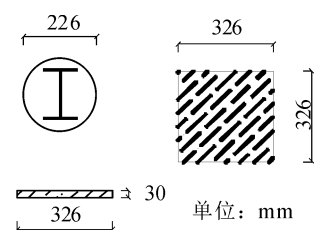


图 2 试件截面形式

Fig. 2 Sectional form of test piece

### 1.2 材性数据

本试验采用的再生混凝土强度等级均为 C40, 试验采用的再生粗骨料为单一来源,均采用混凝土强度等级为 C40 的拆迁废弃建筑物,经过破碎、筛分、清洗、晾干所得,其配比选用本课题组研究成果<sup>[12]</sup>。钢材均采用 Q235 钢材。再生混凝土与钢材的材性参数分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 再生混凝土力学性能指标

Tab. 2 Mechanical properties of recycled concrete

再生骨料取 代率 $r/\%$	立方体抗压强 度 $f_{cu}/\text{MPa}$	轴心抗压强 度 $f_{cu}/\text{MPa}$	弹性模量 $E_{cc}/\text{MPa}$
0	45.0	34.2	$2.71 \times 10^4$
30	44.7	34.0	$2.71 \times 10^4$
50	44.1	33.5	$2.70 \times 10^4$
70	43.1	32.8	$2.68 \times 10^4$
100	41.3	31.4	$2.65 \times 10^4$

表 3 钢材力学性能指标

Tab. 3 Mechanical properties of steel

钢材 类型	屈服强度 $f_y/\text{MPa}$	极限强度 $f_u/\text{MPa}$	弹性模量 $E_s/\text{MPa}$	屈服应 变 $\mu\epsilon$
圆钢管	262	315	$2.00 \times 10^5$	1 309.3
型钢腹板	307	437	$1.99 \times 10^5$	1 545.5
型钢翼缘	336	458	$1.97 \times 10^5$	1 702.6

## 2 有限元模拟过程

### 2.1 纤维模型

OpenSees 程序提供了多种截面恢复力模型,本文选用的纤维模型就是将构件截面划分为若干个纤维网格,每个纤维的位置及材料本构均可自己定义,同一截面符合平截面假定,并且忽略剪切变形及钢筋的粘结滑移,同时假定截面上每根纤维应变分布均匀并处于单轴应力应变状态,这样就可以通过纤维材料的应力应变关系推算出整个截面的应力与应变。每个纤维材料都具有独立的本构关系,保证计算具有较高的精度。其中再生混凝土和钢管选用 Circular Patch Command 划分,型钢选用 Patch Rect划分。具体如图 3 所示。

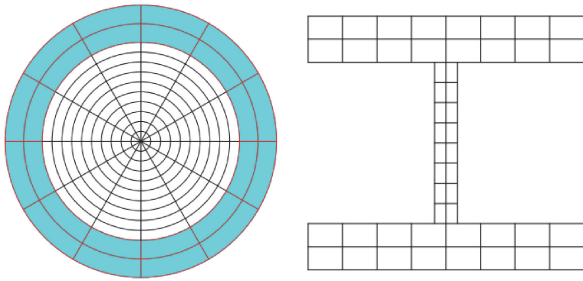


图 3 纤维截面划分

Fig. 3 Division of fiber section

### 2.2 单元类型

本文选用的单元类型为杆系单元中基于柔度法的非线性梁柱单元,该单元采用 Gauss-Lobatto 积分法,将单元划分为若干个积分区段,根据控制截面各自的截面抗力和截面刚度矩阵,按照数值积分方法沿杆长计算整个单元的抗力和刚度矩阵<sup>[13]</sup>。

### 2.3 再生混凝土本构选取

再生混凝土采用的是基于混凝土单轴本构 Concrete02 Material 修正后的 Kent-Park 模型,如图 4 所示,Concrete02 材料考虑混凝土受拉特性,模型分为曲线上升段、直线下降段及平直段。修正后的 Kent-Park 模型引入了强化系数  $K$ ,具有较好的模拟效果。具体方法为:

$$\sigma_c = \begin{cases} Kf'_c \left[ \frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left( \frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] & (\epsilon_c < \epsilon_0) \\ Kf'_c [1 - Z(\epsilon_c - \epsilon_0)] & (\epsilon_0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{20}) \\ 0.2Kf'_c & (\epsilon_c > \epsilon_{20}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\epsilon_0 = 0.002K$$

$$Z = \frac{0.5}{3 + 0.29f'_c - 0.002K}$$

式中:  $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度;  $f_t$  为混凝土抗

拉强度;  $\sigma_c$ 、 $\epsilon_c$  为混凝土应力、应变;  $\sigma_0$ 、 $\epsilon_0$  为混凝土峰值应力、应变;  $K$  为强化系数,针对型钢约束取  $1.2^{[11]}$ ;  $\sigma_{20}$ 、 $\epsilon_{20}$  为应力下降至 20% 处对应的应力、应变;  $Z$  为软化斜率系数。

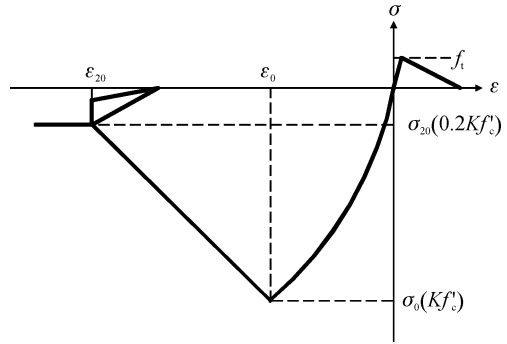


图 4 Concrete02 本构模型

Fig. 4 Concrete02 constitutive model

在此基础上,本文还结合韩林海<sup>[14]</sup>提出的适用于圆钢管混凝土的核心混凝土纵向应力-应变关系模型及肖建庄<sup>[15]</sup>等提出的再生混凝土的应力-应变关系模型对本构模型进行进一步修正。以 CSJ5 试件为例,最终  $\epsilon_0$  取  $-0.0037$ ,  $f_t$  取极限强度的  $1/10$ ,混凝土受拉软化刚度建议取  $0.1E_0$ 。

### 2.4 钢管及型钢本构选取

钢管和型钢采用程序中的 Steel02 Material 模型,该模型由 Menegotto 和 Pinto 提出,如图 5 所示,模型考虑等向应变硬化的影响,为双折线模型,并可反映钢材的 Bauschinger 效应,本构模型为:

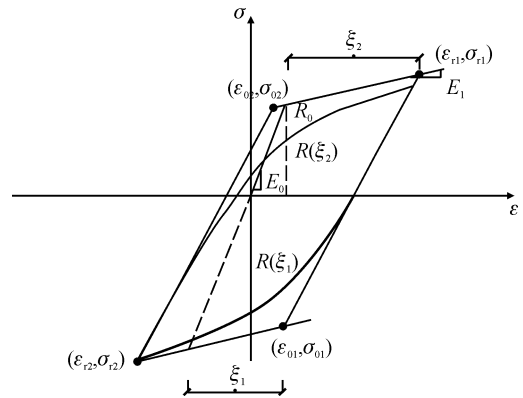


图 5 钢材本构模型

Fig. 5 Constitutive model of steel

$$\sigma_{eq} = b\epsilon_{eq} + \frac{(1-b)\epsilon_{eq}}{(1 + \epsilon_{eq}^R)^{1/R}} \quad (2)$$

$$\sigma_{eq} = \frac{\sigma - \sigma_r}{\sigma_0 - \sigma_r}$$

$$\epsilon_{eq} = \frac{\epsilon - \epsilon_r}{\epsilon_0 - \epsilon_r}$$

$$R = R_0 - \frac{a_1 \xi}{a_2 + \xi}$$

式中:  $\sigma_{eq}$ 、 $\epsilon_{eq}$  为归一化的应力和应变;  $\sigma_r$ 、 $\epsilon_r$  为反向加载点处钢管和型钢的应力、应变;  $b$  为钢筋的硬化率,即硬化刚度  $E_1$  与初始模量  $E_0$  的比值,本文弹性模量取试验值,  $b$  结合试验结果取 0.001;  $\sigma_0$ 、 $\epsilon_0$  为屈服点处钢管和型钢的应力、应变,本文屈服强度取试验值;  $R$  为影响过渡曲线的曲率参数;  $R_0$  为弹塑性阶段控制系数,取值范围为 10~20;  $a_1$  和  $a_2$  为等向硬化系数;  $\xi$  为循环半周期所发生的塑性应变。

### 3 计算结果验证

分别将 11 根组合柱有限元计算所得的荷载-位

移( $P-\Delta$ )曲线与试验结果进行对比,发现有限元计算结果与试验结果基本一致,但也存在一些差异,主要表现为加载前期有限元计算的荷载-位移曲线斜率比试验结果要大,这是因为在进行有限元计算时,未考虑型钢与再生混凝土之间的粘结滑移,同时,轴压试验过程中也可能产生一定的误差,从而导致有限元计算的曲线刚度总体上比试验结果偏大。其中,仅有试件 CSJ11 的规律性与其对比结果有所差异,主要是因为长细比较大的试件稳定性较差,易发生失稳破坏,导致在未达到理想承载力情况下就发生破坏。对比结果如图 6 所示。

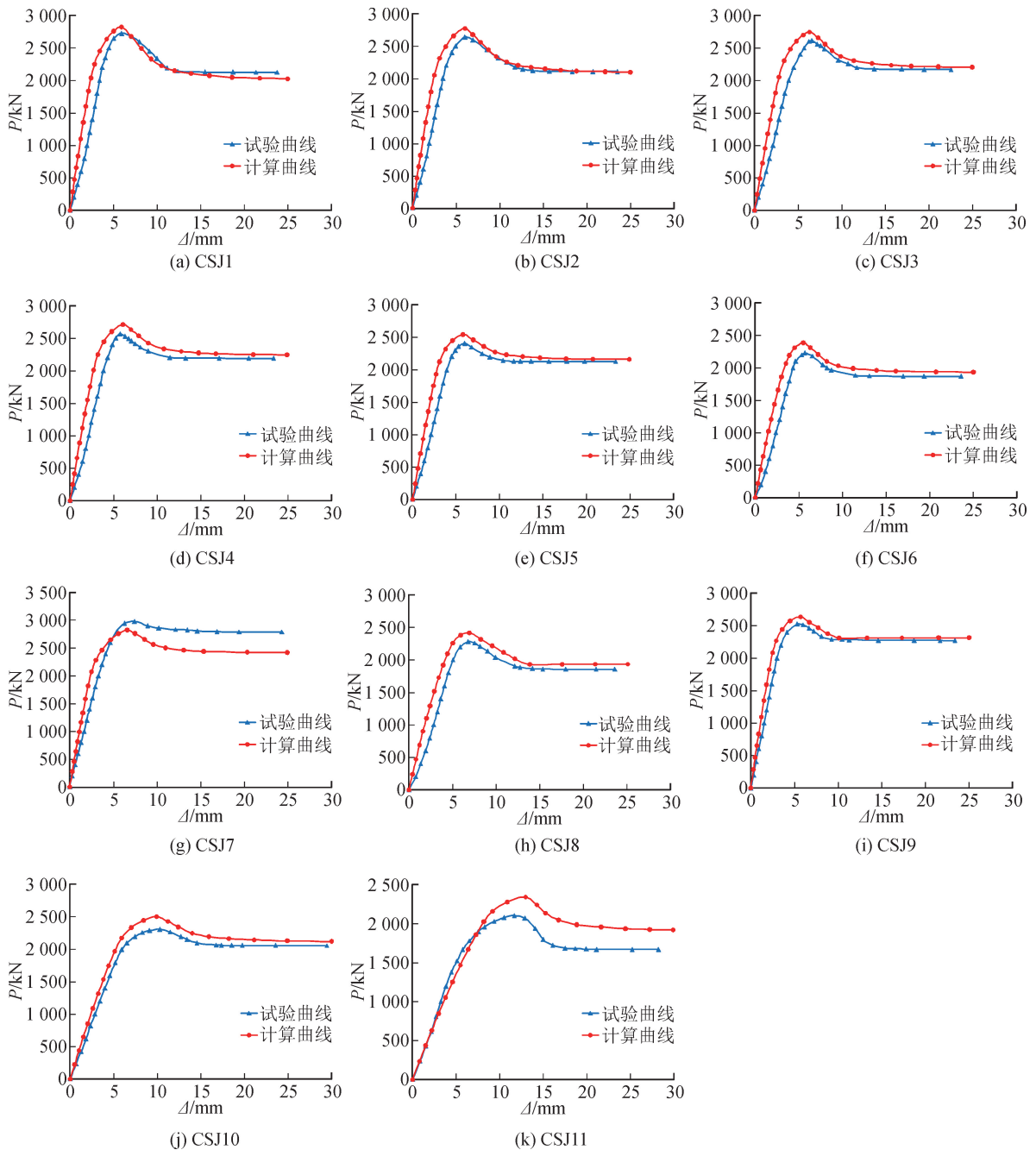


图 6 计算结果与试验结果对比

Fig. 6 Comparison between calculation results and test results

表4为圆钢管型钢再生混凝土组合柱极限承载力试验值与有限元计算值的对比。组合柱极限承载力的计算值与试验值相对误差基本小于10%，计算值和试验值吻合较好，进一步说明利用OpenSees软件对轴压组合柱进行模拟精度较高。

表4 试验值与计算值极限承载力对比

Tab.4 Comparison of ultimate bearing capacity between test value and calculation value

试件编号	试验值/kN	计算值/kN	相对误差/%
CSJ1	2 727.21	2 825.04	3.59
CSJ2	2 641.51	2 771.85	4.93
CSJ3	2 613.54	2 746.50	5.09
CSJ4	2 563.46	2 705.72	5.55
CSJ5	2 412.67	2 549.26	5.66
CSJ6	2 230.34	2 386.89	7.02
CSJ7	2 983.50	2 826.80	5.25
CSJ8	2 281.01	2 416.94	5.96
CSJ9	2 525.02	2 639.03	4.52
CSJ10	2 313.40	2 507.32	8.38
CSJ11	2 104.80	2 341.88	11.26

## 4 参数扩展分析

### 4.1 再生骨料取代率

如图7所示，试件的峰值荷载随着再生骨料取代率的提高而降低，主要是因为再生粗骨料在生产过程中会产生先天的裂缝，使得试件在轴心受压时，其承载力会明显下降；此外，随着再生粗骨料取代率的降低，试件在峰值荷载过后，荷载-位移曲线斜率下降较为迅速，这是因为天然混凝土刚度退化较快，再生混凝土试件内部再生粗骨料间存在较多的间隙，使得取代率越高的试件，延性也就越好。

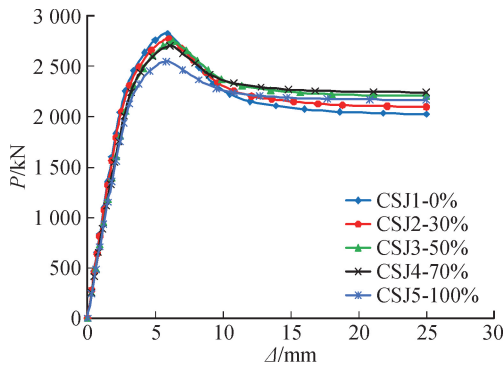


图7 取代率对荷载-位移曲线的影响

Fig.7 Effect of recycled aggregate replacement rate on bearing capacity of specimens

由图8可知，再生粗骨料取代率的改变对组合柱极限承载力影响不大。取代率由0%增至30%，

承载力降低了1.9%；取代率由30%增至50%，承载力降低了0.9%；取代率由50%增至70%，承载力降低了1.5%；取代率由70%增至100%，承载力降低了5.8%。主要原因是取代率较大的试件其核心再生混凝土会较早产生裂缝，更早发生压溃现象，从而导致试件整体极限承载力降低<sup>[12,15]</sup>。

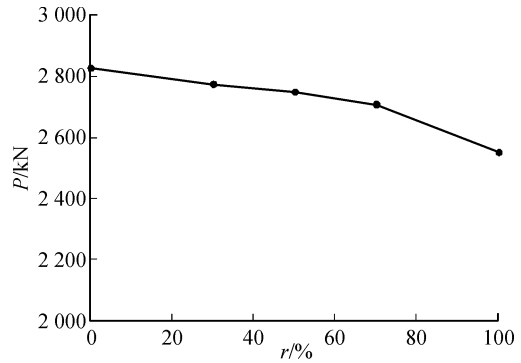


图8 取代率对承载力的影响

Fig.8 Effect of replacement rate on bearing capacity

### 4.2 径厚比

在试验设计参数基础上，添加径厚比226.0、56.5、45.2进行参数扩展分析。其他条件相同时，不同径厚比的轴压组合柱的荷载-位移曲线及对承载力的影响分别如图9和图10所示。由图可知，组合柱的极限承载力及初始刚度随着壁厚的增加而显著提高；峰值以后随着壁厚的增加，在曲线下降阶段有所减缓，试件延性也有所提高。径厚比由45.2增至56.5，承载力下降了5.3%；径厚比由56.5增至75.3，承载力下降了5.1%；径厚比由75.3增至113.0，承载力下降了9.8%；径厚比由113.0增至150.7，承载力下降了6.4%；径厚比由150.7增至226.0，承载力下降了3.3%。因此，降低试件的径厚比即增加钢管的壁厚，可显著提高试件的极限承载力；其次，钢管壁厚越大，内部混凝土三向受力越稳定，屈服现象延迟，提高了试件的延性。

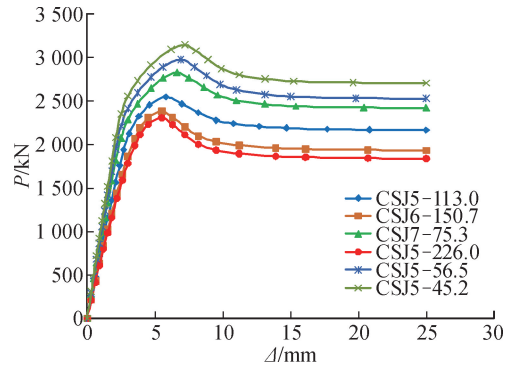


图9 径厚比对荷载-位移曲线的影响

Fig.9 Effect of diameter-thickness ratio of circular steel tube on bearing capacity of specimens



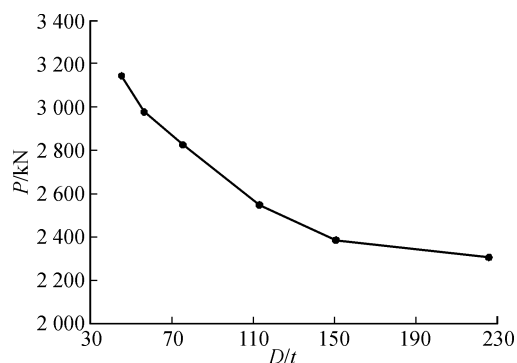


图 10 径厚比对承载力的影响

Fig. 10 Effect of diameter-thickness ratio on bearing capacity

### 4.3 配钢率

在试验设计参数基础上,添加配钢率 7.5%、8.5%、9.5%进行参数扩展分析。其他条件相同时,不同配钢率的轴压组合柱的荷载-位移曲线及对承载力的影响分别如图 11 和图 12 所示。

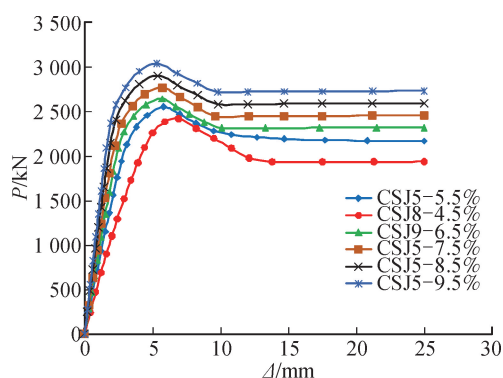


图 11 配钢率对荷载-位移曲线的影响

Fig. 11 Effect of profile steel ratio on bearing capacity of specimens

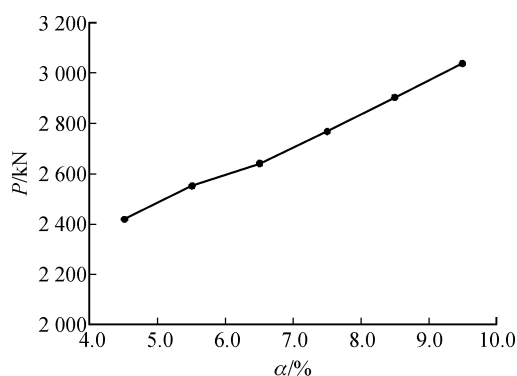


图 12 配钢率对承载力的影响

Fig. 12 Effect of profile steel ratio on bearing capacity

由图可知,组合柱的极限承载力及初始刚度随着配钢率的增加而显著提高;峰值以后随着配钢率的增加,在曲线下降阶段有所减缓,试件延性也有所提高。配钢率由 4.5% 增至 5.5%,承载力提高了

5.5%;配钢率由 5.5% 增至 6.5%,承载力提高了 3.5%;配钢率由 6.5% 增至 7.5%,承载力提高了 4.8%;配钢率由 7.5% 增至 8.5%,承载力提高了 4.9%;配钢率由 8.5% 增至 9.5%,承载力提高了 4.7%。因此,随着配钢率的增加,一方面会提高试件的极限承载力,另一方面能更好地约束内部核心再生混凝土,延缓再生混凝土产生裂缝甚至压溃。

### 4.4 长细比

在试验设计参数基础上,添加长细比 15.93、28.32 进行参数扩展分析。其他条件相同时,不同长细比的轴压组合柱的荷载-位移曲线及对承载力的影响分别如图 13 和图 14 所示。由图可知,组合柱的极限承载力及初始刚度随着长细比的增加而显著降低。长细比由 10.62 增至 15.93,承载力变化不明显;长细比由 15.93 增至 21.24,承载力下降了 1.6%;长细比由 21.24 增至 28.32,承载力下降了 2.2%;长细比由 28.32 增至 31.86,承载力下降了 4.5%。因此,长细比较小试件破坏主要因为材料发生破坏,随着长细比增加,试件稳定性降低,抗弯能力下降,试件破坏主要由结构失稳导致,承载力下降也较明显。

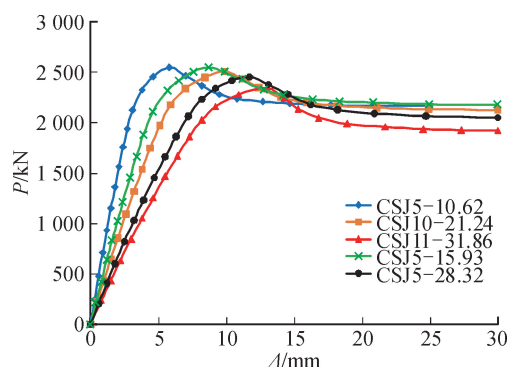


图 13 长细比对荷载-位移曲线的影响

Fig. 13 Effect of slenderness ratio on bearing capacity of specimens

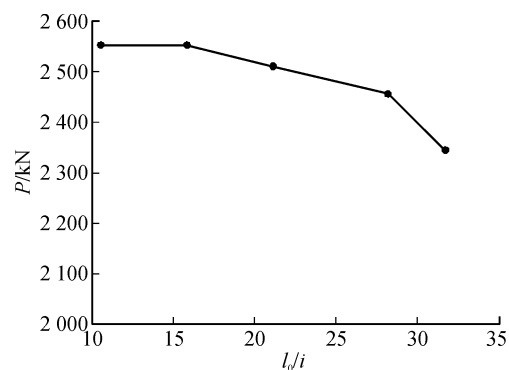


图 14 长细比对承载力的影响

Fig. 14 Effect of slenderness ratio on bearing capacity

## 5 结 论

1) 计算结果表明,各参数的荷载-位移曲线与试验结果吻合较好,验证了 OpenSees 程序模拟组合柱轴心受压试验的准确性。

2) 有限元计算的荷载-位移曲线与试验结果存在偏差,主要是因为计算过程中未考虑型钢与再生混凝土的粘结滑移以及存在混凝土损伤和试验误差所致。

3) 再生骨料取代率对组合柱承载力影响不明显。随着取代率的增加,承载力逐渐降低,但是取代率 100% 的组合柱具有较好的延性。

4) 组合柱承载力随着径厚比和长细比的增加显著降低。因此,在实际工程中可以结合具体需求适当增加壁厚,采用合理的长细比。

5) 组合柱承载力随着配钢率的增加而增大,主要是因为随着配钢率的增加,型钢截面面积增大,对内部再生混凝土约束能力增强,有利于提高组合柱承载力。

### 参考文献:

- [1] 肖建庄,李佳彬,兰阳. 再生混凝土技术研究最新进展与评述[J]. 混凝土, 2003, (10): 17-20,57.  
XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, LAN Yang. Research on recycled aggregate concrete; a review [J]. Concrete, 2003, (10): 17-20,57.
- [2] 侯星宇. 再生混凝土研究综述[J]. 混凝土, 2011, (7): 97-98,103.  
HOU Xingyu. Overview of recycled concrete research [J]. Concrete, 2011, (7):97-98,103.
- [3] 朱红兵,赵耀,雷学文,等. 再生混凝土研究现状及研究建议[J]. 公路工程, 2013, 38(1):98-102.  
ZHU Hongbing, ZHAO Yao, LEI Xuewen, et al. Current situation and suggestion on recycled concrete research [J]. Highway Engineering, 2013, 38 (1): 98-102.
- [4] 马辉,毛肇玮,薛建阳,等. 型钢再生混凝土组合结构受力性能研究现状及展望[J]. 西安理工大学学报, 2016, 32(2):149-157.  
MA Hui, MAO Zhaowei, XUE Jianyang, et al. A review on mechanical performance of steel reinforced recycled concrete composite structures [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2016, 32(2):149-157.
- [5] HAN B C, YUN H D, CHUNG S Y. Shear capacity of reinforced concrete beams made with recycled aggregate [J]. ACI Special Publication, 2001, 200:503-516.
- [6] LI J S, XIAO H N, ZHOU Y. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23 (3):1287-1291.
- [7] 王玉银,陈杰,纵斌,等. 钢管再生混凝土与钢筋再生混凝土轴压短柱力学性能对比试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32 (12): 170-177.  
WANG Yuyin, CHEN Jie, ZONG Bin, et al. Mechanical behavior of axially loaded recycled aggregate concrete filled steel tubular stubs and reinforced recycled aggregate concrete stubs[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32 (12): 170-177.
- [8] 王清湘,赵大洲,关萍. 钢管-钢管高强混凝土轴压组合柱受力性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24 (6): 44-49.  
WANG Qingxiang, ZHAO Dazhou, GUAN Ping. Study on the mechanical properties of axially loaded steel tubular columns filled with steel-reinforced high-strength concrete [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24 (6): 44-49.
- [9] 郭婷婷. 圆钢管型钢再生混凝土组合柱轴压力学性能研究[D]. 西安:西安理工大学, 2017.  
GUO Tingting. Research on axial compression performance of recycled concrete filled circular steel tube-profile steel composite columns[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [10] 马辉,孙书伟,刘云贺,等. 圆钢管型钢再生混凝土短柱轴心受压试验及有限元分析[J]. 实验力学, 2017, 32(6): 789-799.  
MA Hui, SUN Shuwei, LIU Yunhe, et al. Experimental study and finite element analysis of axial compression behavior of circular tube steel reinforced recycled concrete short column[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(6):789-799.
- [11] 孟刚. 型钢再生混凝土组合柱正截面受力性能的有限元分析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2013.  
MENG Gang. Finite-element analysis of mechanical behaviors of normal cross-section of steel recycled concrete composite columns[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [12] MA H, DONG J, LIU Y H, et al. Compressive behaviour of composite columns composed of RAC-filled circular steel tube and profile steel under axial loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 143:72-82.
- [13] 刘平,康洪震,陈星辰,等. 基于 OpenSEES 的钢管混凝土组合柱抗震性能数值分析[J]. 河北联合大学学报(自然科学版), 2013, 35(2):145-151.  
LIU Ping, KANG Hongzhen, CHEN Xingchen, et al. Numerical analysis on seismic behavior of concrete-filled steel tube composite columns based on OpenSEES[J]. Journal of Hebei United University (Natural Science Edition), 2013, 35(2):145-151.
- [14] 韩林海. 钢管混凝土结构:理论与实践 [M]. 第二版. 北京:科学出版社, 2007.
- [15] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.

(责任编辑 周 蓓)