

文章编号: 1001-4888(2017)06-0789-11

圆钢管型钢再生混凝土短柱轴心 受压试验及有限元分析*

马辉, 孙书伟, 刘云贺, 毛肇玮, 董静

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 西安 710048)

摘要: 为研究圆钢管型钢再生混凝土短柱的轴压性能, 本文对 9 根短柱进行了轴心受压试验, 分析了短柱的破坏形态及设计参数对其轴压性能的影响。结果表明: 短柱破坏形式为型钢先屈服然后钢管表面发生外鼓变形破坏, 核心再生混凝土主要发生剪切破坏和压溃破坏; 短柱轴压承载力随再生粗骨料取代率的增大而降低, 但仍表现出良好的变形能力; 增大钢管壁厚和型钢配钢率对短柱轴压性能是有利的。此外, 通过 ABAQUS 软件对该短柱轴压性能进行了有限元分析, 获取了短柱的整体变形图、应力云图及轴向荷载—应变曲线, 并与试验结果进行对比。结果表明: 有限元模拟结果与试验结果吻合较好。在此基础上, 本文对该短柱轴压性能进行了参数分析。分析表明: 短柱轴压承载力随再生混凝土强度的提高而增大, 但变形能力有所降低; 短柱轴压承载力随钢管及型钢强度的提高而增大, 对变形能力影响不明显。上述研究结论对圆钢管型钢再生混凝土短柱的推广应用具有积极意义。

关键词: 圆钢管型钢再生混凝土; 短柱; 轴压性能; 非线性; 有限元分析

中图分类号: TU323.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-167

0 引言

近年来, 国内外学者展开了关于再生混凝土结构及构件受力性能的研究^[1,2], 结果表明: 再生混凝土应用于组合结构中可以有效改善再生混凝土结构的力学性能, 以弥补其材料本身的不足。而型钢再生混凝土柱就是其中一种组合构件, 型钢再生混凝土柱相对于钢筋再生混凝土柱在承载力及延性等力学性能方面都有明显的优势^[3-5]。但由于型钢再生混凝土柱中配置了型钢、纵筋以及箍筋使其构造复杂且施工较为困难, 不便于实际工程应用。本课题组鉴于钢管再生混凝土具有良好的力学性能及施工简便的优点^[6], 提出了一种新型组合构件——圆钢管型钢再生混凝土组合柱。该新型构件既能消耗废弃混凝土, 又充分利用型钢再生混凝土和钢管再生混凝土的各自优点, 解决了型钢再生混凝土结构施工复杂和钢管再生混凝土易发生屈曲失稳破坏的缺点, 具有广阔的应用前景。

本文对圆钢管型钢再生混凝土短柱轴压性能进行了试验研究, 参数变量主要有再生粗骨料取代率、钢管径厚比及型钢配钢率, 重点分析了短柱的破坏形态和设计参数对短柱轴压性能的影响。在试验研究的基础上, 利用 ABAQUS 有限元软件对圆钢管型钢再生混凝土短柱的轴心受压全过程进行了非线性有限元模拟, 并进行了有限元参数分析, 研究结论可为该新型构件的推广应用提供技术参考。

* 收稿日期: 2016-09-07; 修回日期: 2016-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408485), 中国博士后科学基金资助项目(2015M572584), 住房和城乡建设部科学技术计划项目(2015-K2-011), 陕西省自然科学基金计划项目(2016JQ5024), 陕西省住房和城乡建设科学技术计划项目(2015-K129), 陕西省博士后科学基金项目(107-434016010), 西安理工大学科学研究计划项目(2016CX028)

通讯作者: 刘云贺(1968—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事工程结构抗震研究。Email: liuyunhe@163.com

1 试验概况

1.1 试件设计

试验设计制作了 9 个圆钢管型钢再生混凝土短柱试件,柱高为 600mm,柱截面直径均为 226mm,长细比为 10.6,试件具体尺寸及截面如图 1 所示。型钢采用焊接工字钢,钢管采用直焊缝焊接圆钢管,均采用 Q235 钢材。试验的参数参量为再生粗骨料取代率、径厚比和型钢配钢率,试件具体设计参数见表 1。试件型钢及钢管的材料性能如表 2 所示,再生混凝土强度等级为 C40,其中再生粗骨料来源于拆迁废弃混凝土,各项指标符合《再生骨料应用技术规程》(JGJ/T240—2011)要求;试验选用 42.5R 级普通硅酸盐水泥,天然粗骨料为人工碎石,细骨料为中粗河砂。表 3 为再生混凝土材料的配合比及物理力学性能指标。

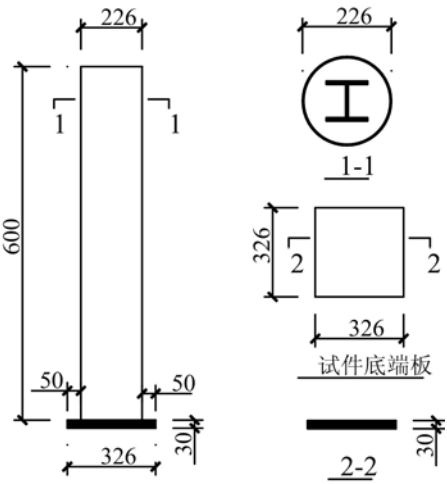


图 1 试件几何尺寸示意图

Fig.1 Geometry size of specimens

表 1 试件设计参数汇总

Tab.1 Design parameters of specimens

试件 编号	再生粗骨料 取代率 r	径厚比 D/t	型钢配钢率 ρ_a
CSJ1	0	113.0	5.5%
CSJ2	30%	113.0	5.5%
CSJ3	50%	113.0	5.5%
CSJ4	70%	113.0	5.5%
CSJ5	100%	113.0	5.5%
CSJ6	100%	150.7	5.5%
CSJ7	100%	75.3	5.5%
CSJ8	100%	113.0	4.5%
CSJ9	100%	113.0	6.5%

表 2 钢材材料力学性能指标

Tab.2 Mechanical properties of steel materials

钢材类型	钢材屈服强度 f_y (MPa)	钢材极限强度 f_u (MPa)	弹性模量 E_s (MPa)
型钢	翼缘	262	315
	腹板	307	437
钢管	336	458	1.97×10 ⁵

表 3 再生混凝土配比及材料基本力学性能指标

Tab.3 Mix proportion and mechanical properties of recycled concrete

再生粗骨料 取代率 r	水灰比	水泥 (kg/m ³)	砂 (kg/m ³)	天然粗骨料 (kg/m ³)	再生粗骨料 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	立方体抗压强度 f_{cu} (MPa)	弹性模量 E_{rc} (MPa)
0	0.43	457	576	1171	0	195	45.0	2.710×10 ⁴
30%	0.43	457	576	819.5	351.3	195	44.7	2.705×10 ⁴
50%	0.43	457	576	585.5	585.5	195	44.1	2.696×10 ⁴
70%	0.43	457	576	351.3	819.7	195	43.1	2.680×10 ⁴
100%	0.43	457	576	0	1171	195	41.3	2.652×10 ⁴

1.2 测点布置及加载方案

本次试验在西安理工大学结构实验室 500 吨长柱试验机上进行,采用荷载一位移联合控制加载方案:试验前进行预加载,以消除各部分之间的接触间隙并检验加载装置是否正常工作,卸荷后采用分级单调加载,在荷载达到 $0.8P_u$ (预估峰值荷载)前按每级 $P_u/15$ 进行力控制加载,之后按 $1.0\text{mm}/\text{min}$ 的速率进行位移控制加载,直至试件的荷载一位移曲线进入水平段(无突然下降趋势),当曲线变化平稳且不宜继续加载时停止加载,试验结束。试件应变测点布置及试验加载装置如图 2 所示。

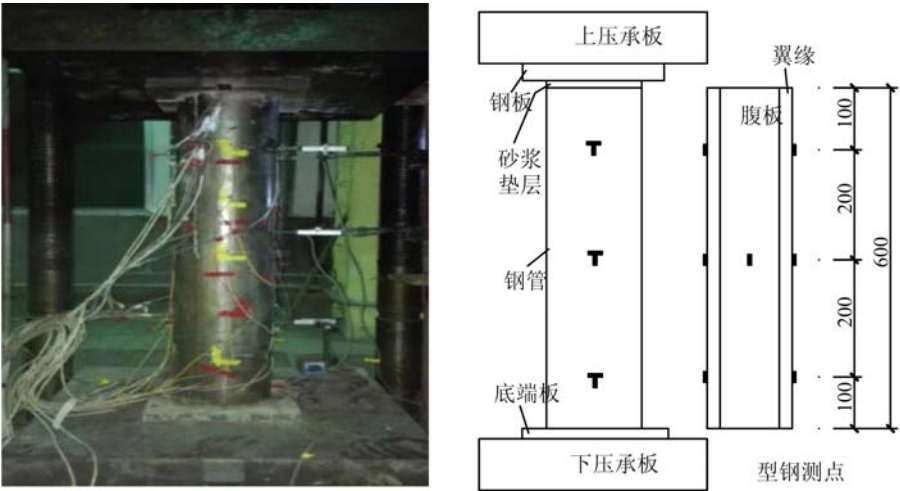


图 2 试验加载装置及试件应变测点布置

Fig. 2 Test loading set-up and strain measuring point of specimens

2 主要试验结果分析

2.1 破坏形态

在整个试验加载过程中,CSJ1-CSJ9 试件在轴心荷载作用下表现出较为相似的破坏过程及形态,CSJ1-CSJ9 试件破坏形态如图 3 所示。

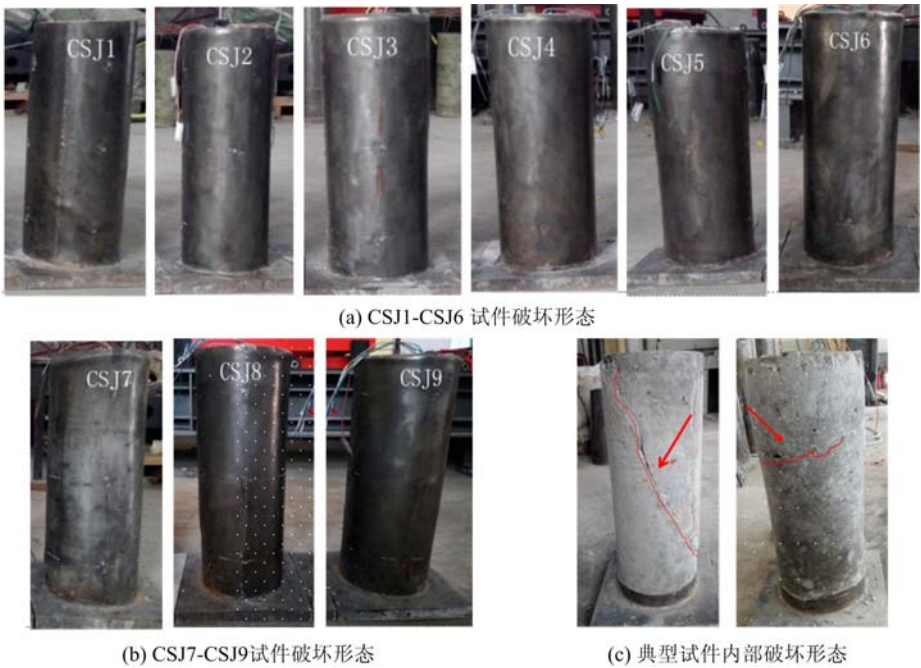


图 3 CSJ1-CSJ9 试件破坏形态

Fig. 3 Failure modes of CSJ1-CSJ9 specimens

以典型试件 CSJ5 为例进行说明:在加载初期,试件整体变形并不明显,试件应变呈线性变化增长;当荷载增大至峰值荷载的 75% 左右时,中部钢管表面出现略微鼓曲现象,整体轴压变形增大,试件刚度开始降低;在荷载到达峰值荷载的 85% 左右时,试件轴压变形及应变呈现明显的非线性变化关系,表明试件已进入弹塑性阶段,此时试件中部局部起鼓明显;随荷载继续增大,出现混凝土被压碎的声音;峰值荷载后,试件轴压承载力开始下降,纵向变形继续增大;当荷载下降至峰值荷载的 85% 左右时,试件承载力下降较为缓慢,荷载一位移曲线趋于平缓,试件表现出较好的延性变形能力;试件破坏后整体鼓曲变形并不明显,表现出局部鼓曲,且分布规律性并不明显,这表明型钢及再生混凝土组合作用能够有效防止钢管的外鼓屈曲变形,增强了构件的整体延性性能。

为进一步观察试件内部再生混凝土的破坏特征,试验结束后,将试件外部圆钢管剖开,观察其内部再生混凝土的破坏形态,CSJ1-CSJ4 和 CSJ8-CSJ9 试件发生明显剪切破坏,可看到明显剪切斜裂缝(如图 3(c)所示),并且柱端头处有部分混凝土压碎;此外,随着再生骨料取代率的增大,试件剪切破坏程度逐渐在降低,由整体剪切破坏发展成部分剪切破坏,且剪切斜裂缝均沿型钢弱轴方向产生,同时在上端头出现许多竖直的细裂缝;试件 CSJ5-CSJ7 则发生明显压溃破坏,柱体上分布有密集的竖向裂缝。整体上看,试件的整个破坏过程及形态较为相似,最终表现为型钢屈服,内部混凝土被压碎,外部钢管发生屈曲变形而破坏。

2.2 荷载一位移曲线

图 4 为圆钢管型钢再生混凝土短柱轴向荷载一位移曲线。由图 4 可知,各设计参数对短柱轴向荷载一位移曲线的影响规律如下:

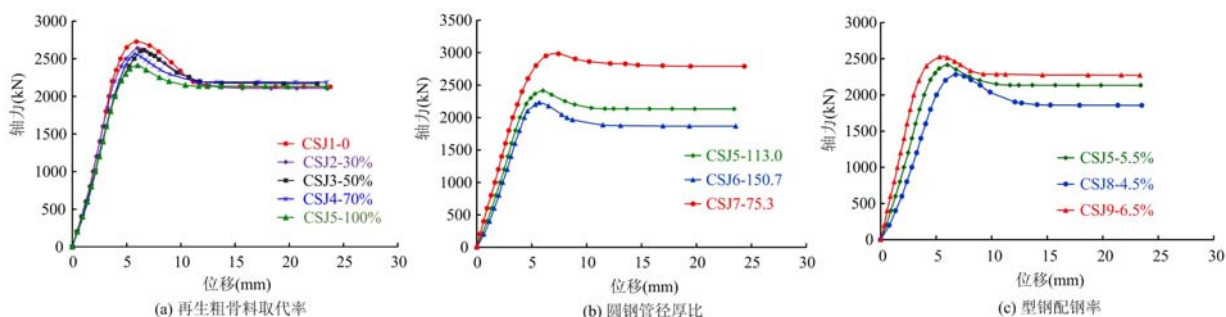


图 4 圆钢管型钢再生混凝土短柱轴向荷载一位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of recycled concrete filled circular steel tube-profile steel short columns

(1) 图 4(a)为不同再生粗骨料取代率下试件的荷载一位移曲线。由 4(a)图可知,在加载初期,试件处于弹性阶段,荷载与位移近似呈线性变化,各试件的荷载一位移曲线上段基本重合,试件前期轴压刚度基本相当,这可能是因为构件前期受力较小,内部再生混凝土的受力状态与普通混凝土相差不大所致;随荷载的增大,试件刚度逐渐表现出差异,随着取代率的增大,试件刚度及轴压承载力逐渐降低;峰值荷载过后,试件承载力开始下降,随着取代率的增大,曲线下降段越平缓,即试件表现出较好的变形能力。可能原因是圆钢管和型钢对再生混凝土的双重约束效应,使得微裂缝处压紧致密,提高了短柱整体变形能力。综上所述,随着取代率的提高,试件承载力有所降低,但降幅不大,试件表现出良好的延性变形能力;

(2) 图 4(b)为不同钢管径厚比下各试件的荷载一位移曲线。由图可知,随钢管壁厚的增大,试件轴压刚度和承载力明显增大,这主要是因为钢管壁厚的增加,使其对内部再生混凝土的约束作用增强,同时钢管自身承载力也随之提高;峰值荷载过后,试件承载力开始下降,径厚比较小的试件下降段曲线较为平缓,即构件延性变形能力随着径厚比的减小而有所增强。综上所述,试件的轴压刚度及延性随钢管径厚比的增大而逐渐降低,表明适当减小试件钢管径厚比,可以有效提高圆钢管型钢再生混凝土组合柱的轴压力学性能。

(3) 图 4(c)为不同型钢配钢率下各试件的荷载一位移曲线。由图可知,配钢率对试件的轴压性能影响显著,随型钢配钢率的增大,试件轴压刚度和承载力逐渐增加,达到峰值荷载后,曲线越趋于平缓,

试件延性变形能力增强,即增大型钢配钢率对于提高试件承载力及延性是有利的。

3 圆钢管型钢再生混凝土短柱有限元模型的建立

在试验研究的基础上,本文通过 ABAQUS 软件对圆钢管型钢再生混凝土短柱的轴压受力性能进行非线性有限元模拟。

3.1 材料本构关系

3.1.1 钢材本构关系

本次有限元模拟中钢材的本构模型选取经典的 Von Mises 屈服准则,采用理想弹塑性强化本构关系曲线。其应力—应变关系如图 5 所示,OA 为弹性阶段,AB 为屈服强化阶段; f_y 为屈服应力, ϵ_y 为屈服应变,相关数值均由钢材材性试验给出。

3.1.2 再生混凝土本构关系

选择合适的再生混凝土的本构关系是实现圆钢管型钢再生混凝土短柱轴压性能有限元模拟的关键。研究表明^[8],再生混凝土的材料力学性能与普通混凝土之间存在差异,力学性能普遍降低,故直接采用普通混凝土的本构关系模型显然不能适用于再生混凝土材料。本试验再生混凝土材性实测结果表明,再生混凝土的弹性模量及其抗压强度随再生粗骨料取代率的增大而降低,该规律与同济大学肖建庄教授^[9]的研究结论相似。鉴于此,本文采用文献^[9]中再生混凝土单轴受压应力—应变关系曲线作为再生混凝土的本构关系模型,其数学方程表达式如下:

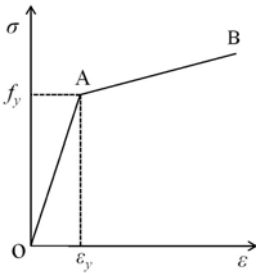


图 5 钢材应力—应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of steel

$$y = \begin{cases} ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3 & 0 \leq x < 1 \\ \frac{x}{b(x - 1)^2 + x} & x \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x = \epsilon/\epsilon_0$, $y = \sigma/f_c$, ϵ_0 和 f_c 分别为再生混凝土的峰值应变和轴心抗压强度; a 、 b 为相关参数,其取值大小与再生粗骨料取代率有关,表达式如下:

$$a = 2.2(0.748r^2 - 1.231r + 0.975) \quad (2)$$

$$b = 0.8(7.6483r + 1.142) \quad (3)$$

参数 a 为应力—应变曲线初始切线的斜率,反映再生混凝土的初始弹模, a 值越小,表明材料脆性越大;参数 b 与曲线下降段面积有关, b 值越大,面积越小,再生混凝土延性变形越差。表 4 为试件再生混凝土不同取代率下 a 、 b 取值。

表 4 不同取代率下再生混凝土材料参数 a 和 b 取值

Tab. 4 Values of parameters a and b of recycled concrete under different replacement rate

再生粗骨料 取代率 r	0	30%	50%	70%	100%
a	2.145	1.481	1.202	1.056	1.082
b	0.914	2.749	3.973	5.197	7.032

3.2 单元类型及网格划分

圆钢管型钢再生混凝土短柱有限元模型如图 6 所示。圆钢管型钢再生混凝土短柱中加载板、型钢及核心再生混凝土部分采用八节点线性六面体实体单元(C3D8R)进行划分;圆钢管按 Simpson 厚度积分规则,沿厚度方向选取 9 个积分点,采用减缩积分格式的四结点曲面薄壳单元(S4R)进行划分。模型网格采用结构化网格划分技术进行。

3.3 相互作用的定义

现有研究表明^[10,11],在轴向荷载作用下,构件中钢管及型钢与再生混凝土之间会产生相对滑移,对

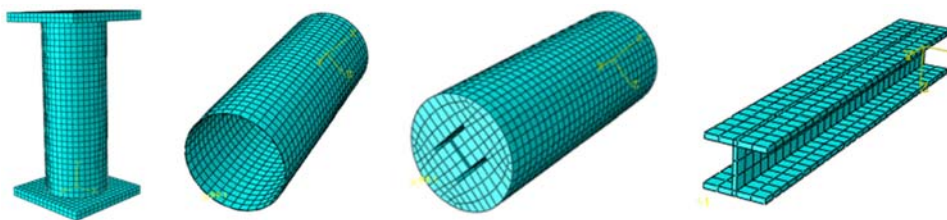


图 6 圆钢管型钢再生混凝土短柱的有限元模型单元网格划分

Fig. 6 Mesh division of finite element model of recycled concrete filled circular steel tube-profile steel short columns

整个构件的受力性能产生一定的影响。在有限元分析中,应该考虑上述黏结滑移以提高构件计算精度,但有部分学者在未考虑黏结滑移的情况下,有限元计算结果仍能够满足计算要求^[12],同时还可以提高运行效率。另外,由于目前关于型钢及钢管与再生混凝土之间的黏结滑移研究较少,缺少统一认识的本构关系,因此,在有限元分析中考虑钢管及型钢与再生混凝土界面间的黏结滑移存在一定困难。综上所述,为便于数值计算,本文在建立圆钢管型钢再生混凝土短柱有限元模型时不考虑钢与再生混凝土界面间的黏结滑移,即型钢及钢管与再生混凝土之间直接采用绑定约束模拟其相互作用,轴向力通过加载端板可以直接传递至短柱上端界面。

3.4 边界条件及加载方式

在圆钢管型钢再生混凝土短柱轴压试验中,为保证轴向荷载能够均匀施加,在短柱上端设置有 30mm 厚垫块,压力试验机施加的轴向力通过刚性垫块传递到试件。有限元模拟中对柱下端板施加载理想铰接约束,为便于轴向荷载的施加,在加载板中心上部建立参考点,参考点与加载板之间建立刚体约束,轴向荷载以集中力的形式施加于参考点,以保证轴向荷载能够均匀传递至短柱上端界面。本文选用牛顿迭代法对上述模型进行计算。

4 圆钢管型钢再生混凝土短柱轴压性能有限元计算结果分析

4.1 受力变形及应力特征

通过有限元模拟,获取了试件的整体变形图及应力分布云图,鉴于各试件的受力变形过程较为相似,本文以典型 CSJ5 试件的整体变形和应力、应变分布云图为例进行说明,如图 7~图 10 所示。



图 7 典型 CSJ5 试件整体变形比较

Fig. 7 Comparison on deformation of CSJ5 specimen

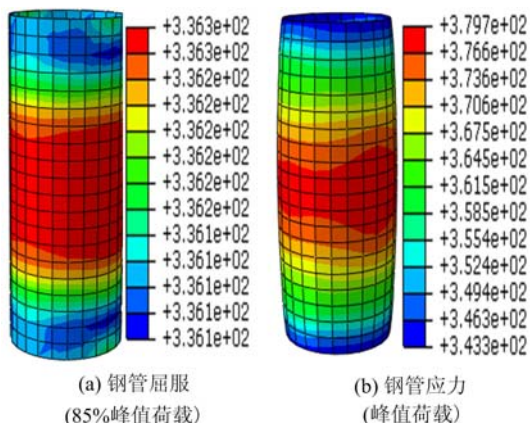


图 8 CSJ5 试件钢管应力云图

Fig. 8 Steel tube stress nephogram of CSJ5 specimen

由图 7 可知,有限元模拟的试件整体变形与试验整体变形存在一定的区别,有限元模拟中试件中部外鼓明显,而试验变形外鼓位置位于中上部,这主要是由于试验中试件上端刚性约束不足,导致试件中部上部受力较大而造成的。总体上看,有限元模拟基本反映了该构件在轴向荷载下的变形特征。

由图 7~图 10 可知,在加载初期,短柱处于弹性受力阶段,应变随荷载的增加近似呈线性变化;随

荷载的增加,短柱各部分应力逐渐增大,其中钢管及型钢的应力增长较快,但此时试件整体变形不明显;

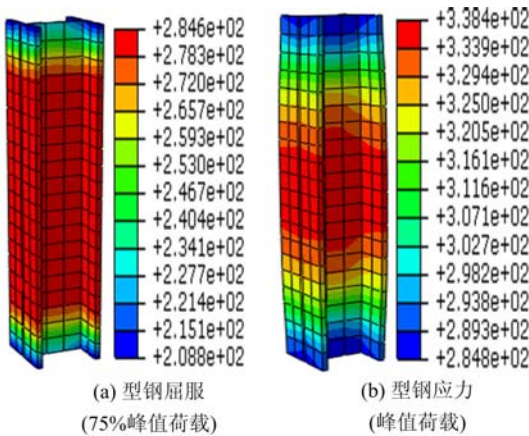


图 9 CSJ5 试件型钢应力云图
Fig. 9 Profile steel stress nephogram
of CSJ5 specimen

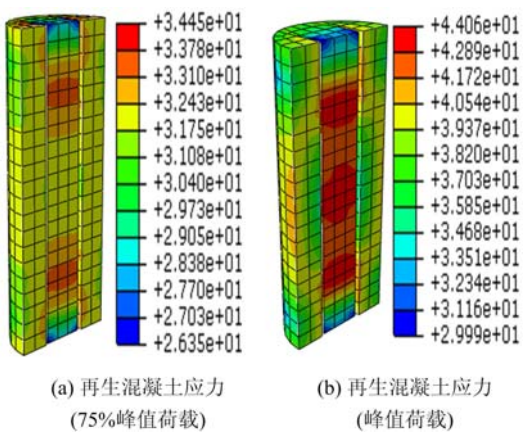


图 10 CSJ5 试件再生混凝土应力云图
Fig. 10 Recycled concrete stress nephogram
of CSJ5 specimen

当荷载增大至峰值荷载的 75%左右时,试件各部分应力分布发生明显变化,型钢先于钢管进入屈服状态,短柱中部出现略微的鼓曲现象,试件刚度下降,此时应变随荷载的增加呈非线性变化;当轴向力达到峰值荷载的 85%左右时,钢管开始进入屈服状态,短柱中部出现的鼓曲现象明显;随荷载增大至峰值荷载,试件整体变形明显,型钢和钢管在变形部位均已屈服,随后构件承载力逐渐下降,当下将至极限荷载的 85%左右时,试件的荷载一位移曲线趋于平缓。总体上看,上述有限元模拟较好地反映了圆钢管型钢再生混凝土柱在轴心荷载作用下的受力过程和变形特征。

4.2 荷载—应变曲线

图 11 为圆钢管型钢再生混凝土短柱轴向荷载—应变($N-\epsilon$)曲线比较。由图 11 可知,计算曲线与试验曲线吻合较好,表明上述有限元模型可用于模拟圆钢管型钢再生混凝土短柱轴压性能。总体上看,在峰值荷载前,曲线具有较长的线性段,构件表现出较好的受力性能;当达到峰值荷载后,试件承载力下降较快,但降幅不大;随轴向位移的增大,曲线基本趋于水平,表明试件具有较好的延性变形能力,体现了该组合柱的力学性能优势。

表 5 短柱轴压承载力有限元计算值与试验值的比较

Tab. 5 Comparison on finite element calculation values and experimental values of axial bearing capacity of short columns

试件编号	计算值 N_c (kN)	试验值 N_c (kN)	相对误差(%)
CSJ1	2807.90	2727.21	3.0
CSJ2	2757.96	2641.51	4.4
CSJ3	2674.14	2613.54	2.3
CSJ4	2669.37	2563.46	4.1
CSJ5	2593.99	2412.67	7.5
CSJ6	2423.27	2230.34	8.7
CSJ7	2799.01	2983.50	6.2
CSJ8	2484.03	2281.01	8.9
CSJ9	2714.35	2525.02	7.5

4.3 轴压承载力计算值与试验值的比较

表 5 为圆钢管型钢再生混凝土短柱轴压承载力有限元计算值与试验值的比较。由表 5 可知,试件的计算值与试验值相对误差均小于 10%,且相对误差平均值为 5.8%,满足计算要求。与试验值相比,

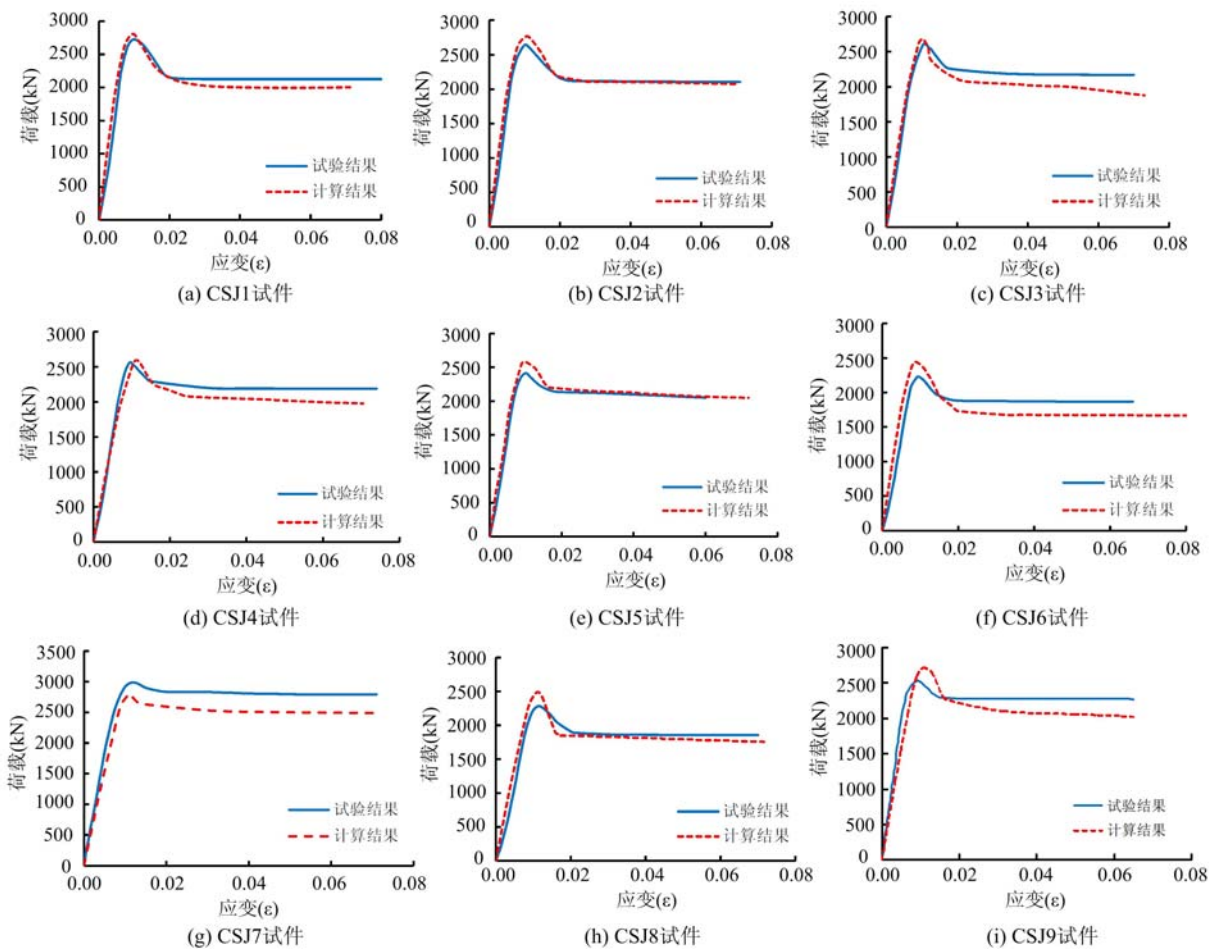


图 11 圆钢管型钢再生混凝土短柱轴向荷载—应变曲线比较

Fig. 11 Comparison of axial load-strain curves of recycled concrete filled circular steel tube-profile steel short columns 大部分有限元计算值普遍偏高,可能原因如下:一方面,在模拟过程中对柱下端施加理想铰接约束,短柱处于理想轴心受力状态;而实际试验中,柱下端处于铰接与固接约束之间,并非理想的铰接约束,因此对构件轴压承载力具有一定影响。另一方面,在模拟中忽略了型钢及钢管与再生混凝土之间的相对滑移,型钢及钢管与内部再生混凝土之间直接采用绑定约束,这与构件的实际受力变形之间存在差异,从而导致构件承载力偏高。

4.4 试验参数对短柱轴压性能有限元结果的影响

图 12 为试验设计参数对该短柱轴压性能的影响,构件轴压承载力采用有限元计算值。由图 12 和表 5 可知:

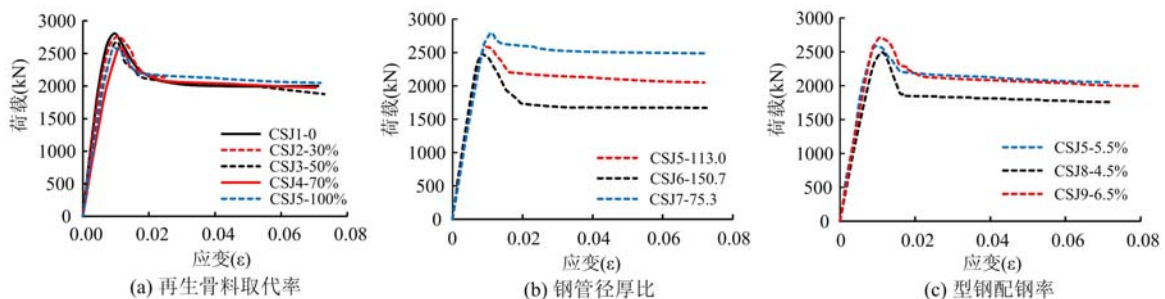


图 12 试验参数对试件轴压承载力的影响

Fig. 12 Influence of experimental parameters on the finite element calculation results of specimens

(1) 再生骨料取代率对于试件的轴压承载力影响不大,虽然试件承载力随再生骨料取代率的增大

呈逐渐降低趋势,但降幅均小于 10%,最大降幅仅有 7.6%,且不同再生粗骨料取代率下短柱的荷载—应变曲线下降段趋于水平直线,即取代率对其变形能力影响不大,表明该组合柱具有良好的延性变形能力;

(2) 随径厚比的减小,短柱的轴压承载力逐渐提高,钢管壁厚为 3mm 的试件 CSJ7 与钢管壁厚为 2mm 的试件 CSJ5 和 1.5mm 的试件 CSJ6 相比,承载力分别提高了 7.9%和 15.5%;但径厚比对试件在弹性段的刚度影响不大,随径厚比的增大,试件达到峰值荷载后的相对剩余承载力相差较大,钢管壁厚为 3mm 的试件的最终剩余承载力能保持在峰值荷载的 85%左右,而钢管壁厚为 1.5mm 的试件的最终剩余承载力仅能保持在峰值荷载的 70%左右,即随径厚比的增大,试件剩余承载力越低,其刚度退化越为严重;

(3) 配钢率对圆钢管型钢再生混凝土短柱试件的轴压承载力有较大影响,随型钢配钢率的增大,轴压承载力逐渐增大,配钢率为 6.5%的试件 CSJ-9 比配钢率为 4.5%的试件 CSJ8 承载力提高了 10.7%;由曲线的上升及下降段可以看出,试件在弹性段的刚度随配钢率的增大有所提高,配钢率较低的试件在峰值荷载后刚度退化较为严重。

综上所述,再生骨料取代率对圆钢管型钢再生混凝土短柱的轴压受力性能影响不明显;增大钢管壁厚和型钢配钢率对该柱的受力性能是有利的。

5 圆钢管型钢再生混凝土短柱轴压性能有限元参数分析

在上述有限元分析的基础上,本文以 CSJ5 试件为基础对该短柱轴压性能进行了参数扩展分析,参数见表 6,其他参数与 CSJ5 试件相同,钢管壁厚为 2.0mm,再生粗骨料取代率均为 100%。图 13 为短柱轴压性能有限元参数扩展分析获取的短柱轴向荷载—应变曲线。表 6 为圆钢管型钢再生混凝土短柱有限元参数扩展分析的轴压承载力计算结果。

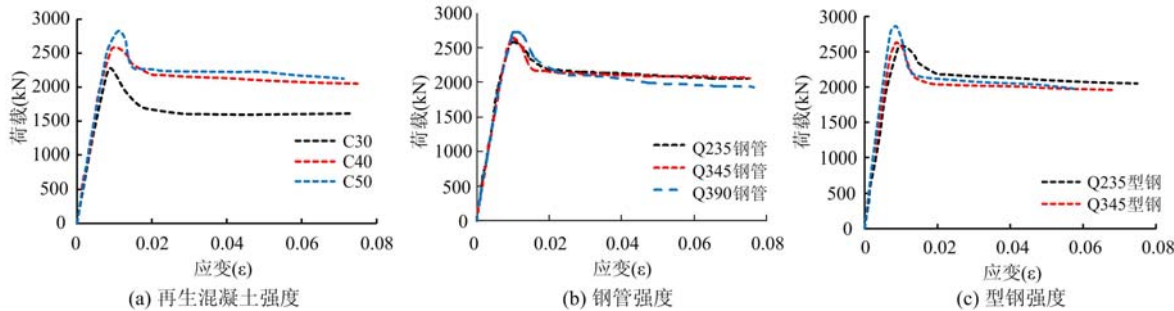


图 13 短柱有限元参数扩展分析荷载—应变曲线

Fig. 13 Load-strain curves of finite element parameter expansion analysis on short columns

表 6 圆钢管型钢再生混凝土短柱有限元参数扩展分析计算结果

Tab. 6 Calculation result of finite element parameter expansion analysis on columns

试件 编号	再生混凝土 强度等级	钢管 强度	型钢 强度	轴压承载力 N(kN)
CSJ-5-1	C30	Q235	Q235	2275.23
CSJ-5-2	C40	Q235	Q235	2583.99
CSJ-5-3	C50	Q235	Q235	2821.06
CSJ-5-4	C40	Q345	Q235	2644.07
CSJ-5-5	C40	Q390	Q235	2735.14
CSJ-5-6	C40	Q235	Q345	2630.89
CSJ-5-7	C40	Q235	Q390	2863.75

由图 13 和表 6 可知,有限元分析参数对圆钢管型钢再生混凝土短柱轴压性能的影响主要如下:

(1) 再生混凝土强度对短柱轴压承载力影响较大,随再生混凝土强度的提高,试件承载力逐渐增

大,试件 CSJ5-2 和试件 CSJ5-3 与试件 CSJ5-1 相比,承载力分别提高了 13.6%和 24.0%;另外,再生混凝土强度越高,构件曲线上升段刚度越大;峰值荷载后,随再生混凝土强度的提高,构件刚度退化越明显,即构件曲线下降段随再生混凝土强度的提高而略越加陡峭,表明构件变形能力随再生混凝土强度的提高而降低;

(2) 钢管强度对试件弹性段刚度影响不大,上升段曲线呈一致的线性;试件轴压承载力随钢管强度的增大而提高但增幅不大;峰值荷载后,试件的整体刚度退化不大,均保持了较高的剩余承载能力和较好的延性性能;

(3) 随型钢强度的提高,试件的初始刚度基本一致,但随荷载的继续增大,刚度表现出较大差异,型钢强度较高试件的刚度明显大于型钢强度较低试件的刚度;短柱的轴压承载力随型钢强度的提高而增大;曲线下降段随型钢强度提高而略为陡峭,表明型钢强度对构件变形能力影响不明显。

6 结论

本文采用试验研究与有限元模拟相结合的方法对圆钢管型钢再生混凝土短柱的轴压性能进行了分析,主要得到以下结论:

(1) 在考虑的设计参数范围内,轴压荷载作用下圆钢管型钢再生混凝土短柱主要是由于型钢首先屈服,内部再生混凝土发生压溃破坏或剪切破坏,最后钢管外鼓屈曲而发生破坏;

(2) 圆钢管型钢再生混凝土短柱有限元计算结果与试验结果吻合较好,表明采用 ABAQUS 软件对该短柱轴压性能进行数值模拟是可行的;

(3) 短柱轴压承载力随再生骨料取代率的增加而略有降低,仍具有良好的变形能力;短柱轴压承载力及变形能力均随钢管壁厚和型钢配钢率的增大而提高,对其轴压性能是有利的;

(4) 短柱轴压承载力随再生混凝土强度的提高而提高,但其变形能力降低;提高钢管强度和型钢强度对短柱轴压承载力有利,但对其变形能力影响不明显;

(5) 圆钢管型钢再生混凝土短柱具有较高的承载力和良好的延性变形能力,故经过合理设计的圆钢管型钢再生混凝土柱可应用于实际工程。

参考文献:

- [1] Mohanraj E, Kandasamy S, Malathy R. Behavior of steel tubular stub and slender columns filled with concrete using recycled aggregates[J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2011, 53(2):31—38.
- [2] 薛建阳, 马辉. 低周反复荷载下型钢再生混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(12):123—130 (XUE Jianyang, MA Hui. Experimental study on seismic performance of steel reinforced recycled concrete short column under low-cyclic reversed loading[J]. Engineer Mechanics, 2013, 30(12):123—130 (in Chinese))
- [3] 马辉, 薛建阳, 王振山. 型钢再生混凝土组合柱滞回特性及耗能能力分析[J]. 地震工程与工程震动, 2014, 34(6):198—206 (MA Hui, XUE Jianyang, WANG Zhenshan. Analysis of hysteresis characteristics and energy dissipation capacity of steel reinforced recycled concrete columns[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(6):198—206 (in Chinese))
- [4] 薛建阳, 崔卫光, 陈宗平, 等. 型钢再生混凝土组合柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(7):73—76 (XUE Jianyang, CUI Weiguang, CHEN Zongping, et al. Experimental study on axial compressive behaviors of steel reinforced recycled aggregate concrete composite columns [J]. Building Structure, 2013, 43(7): 73—76 (in Chinese))
- [5] 马辉, 薛建阳, 刘云贺, 等. 型钢再生混凝土组合柱水平承载力试验及计算方法研究[J]. 实验力学, 2015, 30(4):455—468 (MA Hui, XUE Jianyang, LIU Yunhe, et al. Analysis on the calculation methods of the horizontal bearing capacity for steel reinforced recycled concrete composite columns[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(4):455—468 (in Chinese))
- [6] Konno K, Sato Y, makuta Y, et al. Property of recycled concrete column encased by steel tube subjected to axial compression[J]. Transaction of the Japan Concrete Institute, 1997, 19(2):231—238.
- [7] 李佳彬, 肖建庄, 孙振平. 再生粗骨料的基本特性及其对再生混凝土基本性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2004,

- 7(4):390—395 (LI Jiabin, XIAO Jianzhuang, SUN Zhenping. Properties of recycled coarse aggregate and its influence on recycled concrete[J]. Journal of Building Materials, 2004, 7(4):390—395 (in Chinese))
- [8] 肖建庄, 李佳彬, 孙振平. 再生混凝土抗压强度研究[J]. 同济大学学报, 2004, 32(12):1558—1561 (XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, SUN Zhenping. Study on compressive strength of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Tongji University, 2004, 32(12):1558—1561 (in Chinese))
- [9] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008 (XIAO Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing: China Building Industry Publishing, 2008 (in Chinese))
- [10] 陈宗平, 徐金俊, 薛建阳, 等. 钢管再生混凝土黏结滑移推出试验及黏结强度计算[J]. 土木工程学报, 2013, 46(3):49—58 (CHEN Zongping, JIN Jinjun, XUE Jianyang, et al. Push-out test on the interface bond-slip behavior and calculation on bond strength between steel tube and recycled aggregate concrete in RACFST structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(3):49—58 (in Chinese))
- [11] 陈宗平, 郑华海, 薛建阳, 等. 型钢再生混凝土黏结滑移推出试验及黏结强度分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(5):130—138 (CHEN Zongping, ZHENG Huahai, XUE Jianyang, et al. Push-out test on interface bond slip behavior and analysis on bond strength between steel and recycled coarse aggregate concrete[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(5):130—138 (in Chinese))
- [12] 杨勇. 型钢混凝土黏结滑移理论及其工程应用[M]. 西安建筑科技大学, 2003 (YANG Yong. Study on the basic theory and its application of bond-slip between steel shape and concrete in SRC structures[M]. School of Civil Engineering Xi'an University of Architecture & Technology, 2003 (in Chinese))

Experimental Study and Finite Element Analysis of Axial Compression Behavior of Circular Tube Steel Reinforced Recycled Concrete Short Column

MA Hui, SUN Shu-wei, LIU Yun-he, MAO Zhao-wei, DONG Jing

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

Abstract: In order to study the axial compression performance of circular tube steel reinforced recycled concrete short column, 9 short column specimens were designed for compression experiment. The failure pattern and influence of design parameters on axial compression performance of composite short column are analyzed. Experimental results indicate that the failure pattern of short column is steel tube yields first and then steel tube external surface bulges outwards. In addition, shear failure and crush failure are the main failure patterns of core recycled concrete. The axial compression bearing capacity of short column decreases with the increase of recycled coarse aggregate replacement ratio, while short column still exhibits good deformation ability. Increasing tube wall thickness and the steel ratio of section steel is beneficial to axial compression performance of short column. Finite element analysis of short column axial compression performance was carried out by using ABAQUS software; short column overall deformation, its stress nephogram and axial load-strain curve were obtained and compared with experimental results. Results show that finite element simulation results are in good agreement with experimental results. On this basis, parameters of short column axial compression performance were also analyzed. Analytical results show that short column axial bearing capacity increases with the increase of recycled concrete strength, but the deformation decreases a little. With the increase of steel tube strength and section steel strength, short column axial bearing capacity increases and its deformation varies little. Above conclusions can be helpful for the engineering application of circular tube steel reinforced recycled concrete short column.

Keywords: circular tube steel reinforced recycled concrete; short column; axial compression behavior; nonlinear; finite element analysis