



# 约束再生混凝土足尺试件受压应力-应变全曲线试验研究

吴超焱, 彭有开, 吴徽

(北京建筑大学“工程结构与新材料”北京高等学校工程研究中心, 北京, 100044)

**摘要:**为研究箍筋约束再生混凝土的单轴受压应力-应变全曲线,对9个直径为500 mm、高度为1 500 mm的再生混凝土圆形柱进行试验,采用20 000 kN 伺服液压试验机进行位移控制加载。试验参数主要为纵筋率、箍筋间距与直径、加载应变速率。试验结果表明,箍筋间距、配箍率对试件延性影响较大。当加载应变速率由0.000 003/s增大到0.003 3/s时,试件的峰值应力增大1.14倍。分析表明,再生混凝土应力-应变全曲线与普通混凝土类似,但下降段较普通混凝土陡峭,脆性更为明显。

**关键词:**约束再生混凝土;足尺试件;应力-应变全曲线

中图分类号:TU375 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2016)01-0077-07

## Experimental study on complete stress-strain curve of full-scale specimen of confined recycled concrete under compression

Wu Chaoyao, Peng Youkai, Wu Hui

(Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Civil Engineering Structure and Renewable Material, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, 100044, P. R. China)

**Abstract:** To study the complete stress-strain curve of stirrup confined recycled concrete under uniaxial loading, we tested on nine circular column specimens of recycled concrete which have a diameter of 500 mm and a height of 1 500 mm. In this test, we used a servo-hydraulic test machine with a capacity of 20 000 kN for displacement and loading control. The main test parameters are longitudinal reinforcement ratio, the spacing and diameter of stirrup, and applied strain rate. The results show that the spacing of stirrup and stirrup ratio have great influence on the ductility of specimens. The peak stress of specimen increases 114% when the applied strain rate increases from 0.000003/s to 0.0033/s. The complete stress-strain curve of recycled concrete is similar to that of normal concrete but the descending branch is stiffer than that of normal concrete, which means that the recycled concrete is more brittle than normal concrete.

**Keywords:** confined recycled concrete; full-scale specimen; complete stress-strain curve

收稿日期:2015-08-20

基金项目:北京市教委市属高校创新能力提升计划项目(PXM2015\_014210\_000005);北京建筑大学博士科研启动基金项目(00331615007)

作者简介:吴超焱(1990-),男,主要从事再生混凝土力学性能研究,(E-mail)549780410@qq.com。

Received:2015-08-20

Foundation item:Beijing Municipal Commission of Education(No. PXM2015\_014210\_000005); Beijing University of Civil Engineering and Architecture(No. 00331615007)

Author brief:Wu Chaoyao(1990-),main research interest: mechanical properties of recycled concrete,(E-mail)549780410@qq.com。

为实现建筑业的可持续发展,再生混凝土作为一种绿色再生材料愈来愈得到人们的关注。受压应力-应变全曲线既是混凝土基本受压特性的综合性宏观反映,又是研究混凝土结构承载力和变形的主要依据,它对于分析构件极限状态时截面的应力分布、弹塑性全过程以及抗震结构延性和恢复力特性具有重要意义。目前,国内外学者对普通混凝土的应力-应变全曲线已做了大量研究<sup>[1-7]</sup>,对于再生混凝土应力-应变全曲线的研究,主要有再生混凝土单轴受压的力学性能<sup>[8-10]</sup>和 FRP、钢管约束再生混凝土本构关系研究<sup>[11-13]</sup>,而对于箍筋约束再生混凝土本构关系的研究却很少见,尤其缺乏采用足尺试件进行研究。本文采用 20 000 kN 液压试验机进行位移控制加载,对 9 个足尺的圆形截面配筋试件进行轴压试验,得到试件的单轴受压应力-应变全曲线,并与 Mander 等<sup>[14]</sup>建议的约束混凝土受压应力-应

变全曲线进行对比分析,可为再生混凝土约束本构关系的深入研究提供参考。

## 1 试验设计

### 1.1 试件材料

再生骨料由河北省邯郸市全有生态建材有限公司生产,原材为废弃混凝土,废砖含量极少。再生粗骨料的粒径为 20 mm,试验前对再生粗骨料和天然骨料采用同一筛网筛分,均为连续级配。再生混凝土按照强度等级 C40 来设计,再生粗骨料取代率为 50%,配比见表 1。

按照《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228—2002)的要求,每种类型的钢筋留取 3 个试样,钢筋试样实测强度见表 2。实测混凝土同龄期抗压强度见表 3。

表 1 再生混凝土配合比

Table 1 Mix proportion of recycled concrete

kg · m<sup>-3</sup>

强度等级	水	水泥	天然石	天然砂	再生粗骨料	粉煤灰	外加剂
C40	178	341	508	700	508	114	3.3

表 2 钢筋力学性能

Table 2 Mechanical properties of reinforcement

钢筋型号	直径/mm	$f_y$ /MPa	$f_u$ /MPa
HPB300	10	386	661
HPB300	12	429	639
HPB300	16	443	623
HRB400	16	496	694
HRB400	25	453	609

说明:表中  $f_y$  为钢筋试样实测的屈服强度,  $f_u$  为钢筋试样实测的极限强度。因国内光圆钢筋基本都是经过冷拉处理,没有明显的屈服点,以残余应变为 0.2% 所对应的应力作为屈服强度。

### 1.2 试件设计

共设计 9 根再生混凝土圆柱,采用不间断轴向单调加载,以得到再生混凝土柱的应力-应变全曲线。圆形截面试件采用螺旋箍筋形式。截面试件尺寸与配筋等参数设置见图 1、表 3。

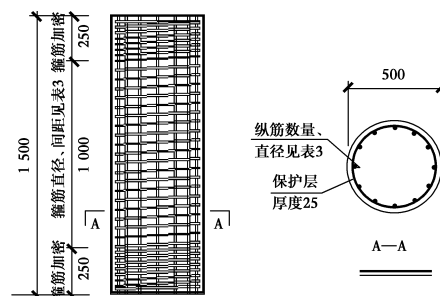


图 1 试件尺寸 (单位:mm)

Figure 1 Dimension of specimens

表 3 试件设计参数

Table 3 Parameters of specimens

截面形式	编号	纵筋	纵筋配筋率	箍筋	箍筋配筋率	$f_{cu}$ /MPa	加载应变率/s <sup>-1</sup>
圆形	C1	HRB400-12-D16	0.012 3	R12-50	0.021 2	42.9	0.000 003
圆形	C2	HRB400-12-D16	0.012 3	R12-50	0.021 2	39.5	0.003 3
圆形	C3	HRB400-12-D16	0.012 3	R12-100	0.010 1	37.4	0.003 3

续表 3

截面形式	编号	纵筋	纵筋配筋率	箍筋	箍筋配筋率	$f_{cu}/\text{MPa}$	加载应变率/ $\text{s}^{-1}$
圆形	C4	HRB400-12-D16	0.012 3	R10-100	0.007 3	40.6	0.003 3
圆形	C5	HRB400-12-D16	0.012 3	R10-30	0.024 3	43.3	0.003 3
圆形	C6	HRB400-12-D16	0.012 3	R16-100	0.017 6	40.6	0.003 3
圆形	C7	HRB400-11-D25	0.027 5	R12-50	0.021 2	45.6	0.003 3
圆形	C8	HRB400-24-D16	0.024 6	R12-50	0.021 2	39.5	0.003 3
圆形	C9	HRB400-36-D16	0.036 9	R12-50	0.021 2	45.6	0.003 3

说明:表中纵筋 HRB400-12-D16 表示 12 根直径为 16mm 的热轧带肋 400 级钢筋,箍筋 R12-50 表示直径 12 mm、间距 50 mm 的热轧光圆 335 级钢筋, $f_{cu}$  为再生混凝土试件实测立方体抗压强度。

### 1.3 试验装置与加载

试件加载安装见图 2,采用 20 000 kN 液压试验机对试件施加轴向压力,加载过程采用位移控制,加载速率见表 3,当加载至箍筋断裂,承载力显著降低时,试验结束。轴力值由作动器输出,数据采集仪采集。位移传感器通过丝杆连接在试件预埋的螺栓上,测量试件受压时产生的轴向变形,测距为试件中间长度为 450 mm 的区段。4 个位移传感器两两对称布置于试件周围,试件的轴向压缩变形值为测量数据的平均值。

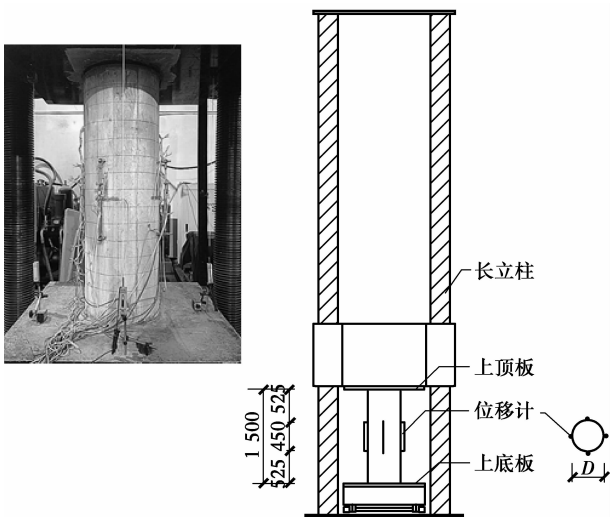


图 2 加载装置

Figure 2 Test set-up

声响。达到最大承载能力以后,竖向裂缝扩展,局部出现贯通,保护层开始剥落。随着试件承载能力的下降,保护层大量剥落,箍筋开始外鼓,最后屈服断裂,纵筋也出现屈服外鼓现象。对于箍筋较密试件,混凝土压碎现象比较明显。对于配箍较疏试件,出现倾斜破坏带,其倾角为  $45^\circ \sim 60^\circ$ 。图 3(a)~图 3(i)为试验结束后,清理完量测仪器以及表层松动混凝土的各试件最终破坏形态。

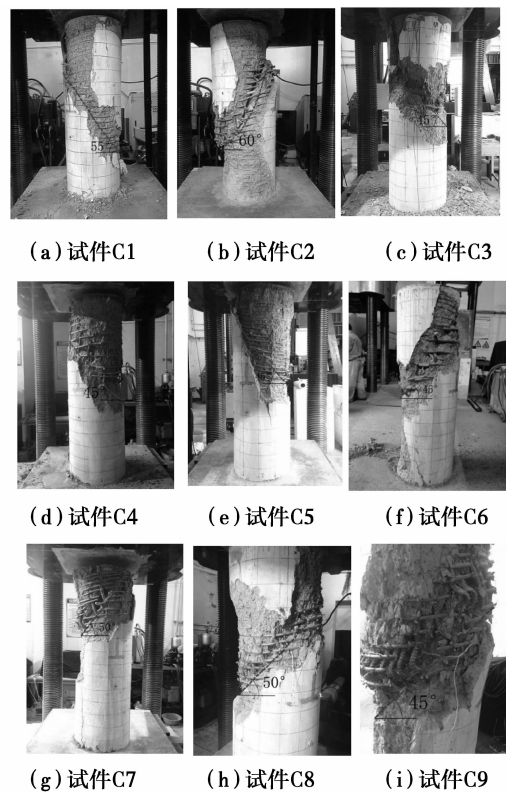


图 3 各试件最终破坏形态

Figure 3 Final failure of specimens

## 2 试验现象与破坏形态

随着轴向变形增大,试件达到最大承载能力之前,保护层开始松动并出现竖向裂缝,可听到开裂的

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 应力-应变全曲线

通过试验实测的荷载位移数据,利用公式(1)进行转化得到各试件加载过程中的应力-应变全曲线,其曲线如图 4 所示。由于试件制作时混凝土保护层取得较厚,试件加载达到最大承载力时,混凝土保护层剥落,承载力出现下降,导致试件 C2 和试件 C9 曲线下降段出现突降的原因。

$$\sigma = N/A; \epsilon = \Delta l/l \quad (1)$$

式中: $N$  为试件的轴向荷载; $A$  为试件全截面面积; $\Delta l$  为试件加载过程中量测段的压缩位移; $l$  为试件量测段高度 450 mm。

根据各试件的应力-应变全曲线可得到各自的峰值应力、峰值应变以及第一根箍筋断裂时的应变,具体数值见表 4。

表 4 试件试验结果

Table 4 Experimental results of specimens

试件编号	峰值应力 $\sigma_c$ /MPa	峰值应变 $\epsilon_c$	第一根箍筋断裂时应变 $\epsilon_{cu}$	延性比 $\beta^{[15]}$
C1	51.0	0.003 9	0.019 7	1.995
C2	58.1	0.004 3	0.019 5	1.403
C3	49.0	0.002 5	0.016 5	1.674
C4	48.4	0.002 9	0.014 9	1.459
C5	55.5	0.004 8	0.019 8	1.561
C6	55.1	0.002 9	0.013 8	1.650
C7	62.5	0.003 3	0.017 7	1.692
C8	63.2	0.004 4	0.013 7	1.396
C9	69.7	0.003 7	0.014 9	1.560

说明:表中延性比  $\beta = \epsilon_{0.85} / \epsilon_c$ ,  $\epsilon_{0.85}$  为下降段对应于 85% 抗压强度处的应变

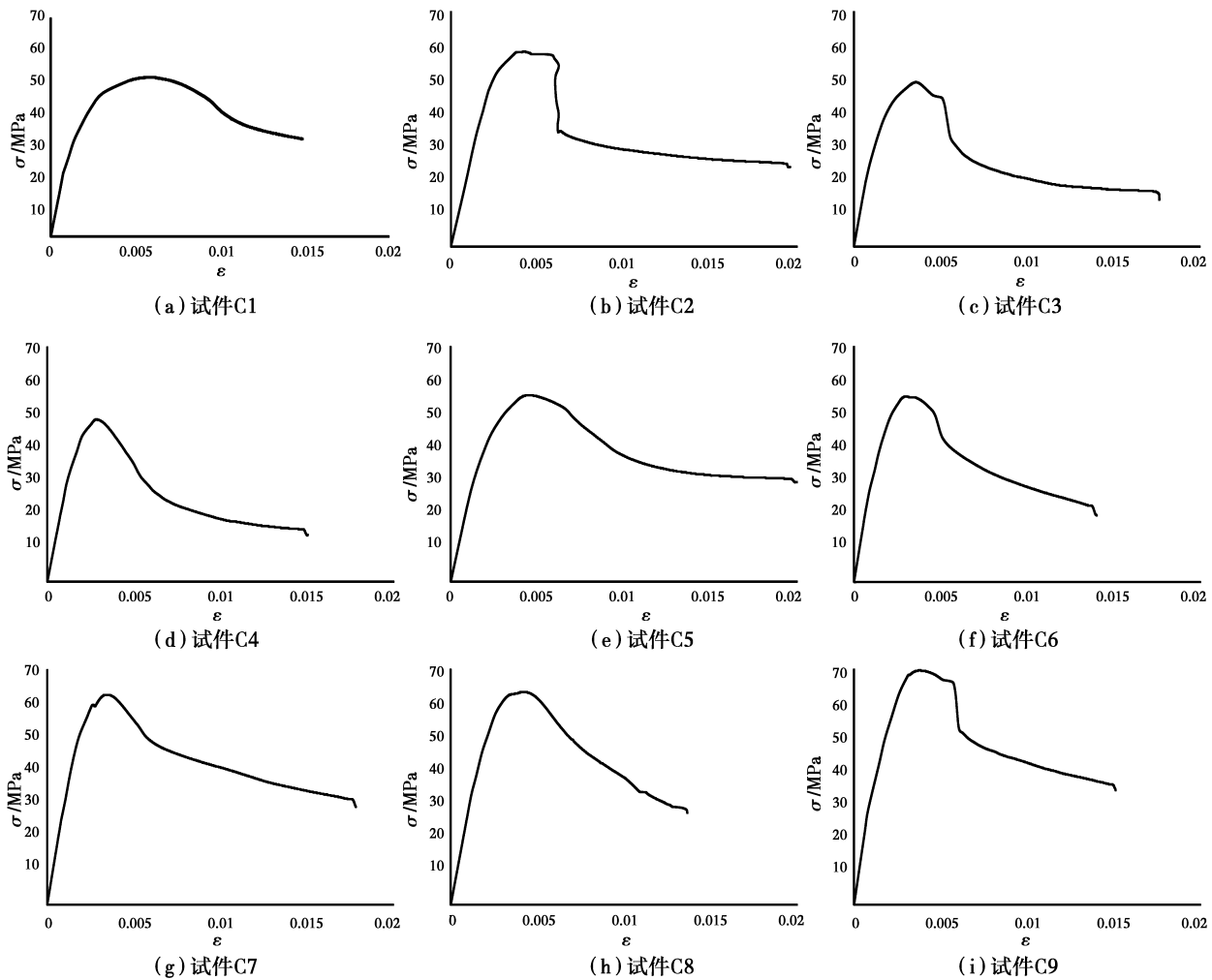


图 4 各试件应力-应变全曲线

Figure 4 Stress-strain curves of specimens

### 3.2 结果对比分析

图5给出了不同试验参数变化对试件应力-应变全曲线的影响。1) 箍筋直径的影响。随着箍筋直径的增加, 峰值应力、延性比  $\beta$  增大, 但趋势不太明显, 见图5(a)。2) 纵筋数量的影响。随着纵筋数量的增加, 即纵筋配筋率的提高, 试件峰值应力、延性比  $\beta$  有所提高。纵筋和箍筋共同形成骨架, 对混凝土约束作用加强, 见图5(b)。3) 纵筋直径的影响。在相似纵筋配筋率情况下, 随着纵筋直径的增加, 试

件峰值应力变化不太, 见图5(c)。4) 箍筋间距的影响。在相似箍筋配筋率情况下, 随着箍筋间距的增加, 试件峰值应力变化不太, 但延性比  $\beta$  减小, 见图5(d)。5) 箍筋配筋率的影响。在其他参数一样的条件下, 配筋率越高, 峰值应力、延性比  $\beta$  越大, 见图5(e)。6) 加载速率的影响。相同条件下, 加载速率越大, 延性比  $\beta$  越小, 对峰值应力的增加也有一定的影响, 见图5(f)。

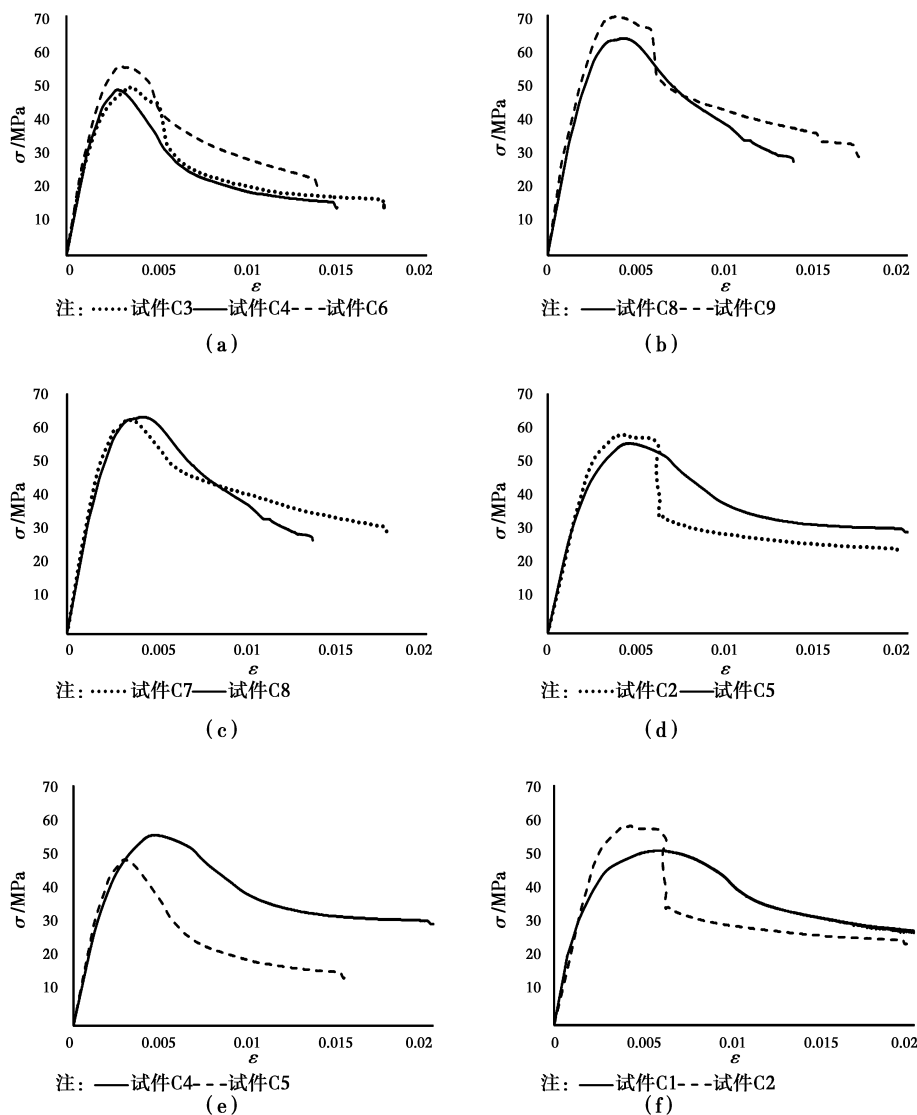


图5 不同试验参数变化对应力-应变全曲线的影响

Figure 5 Effects of different experimental parameters on stress-strain curves

### 3.3 实验曲线与 Mander 模型曲线的比较

参考 Mander 模型给出的本构关系, 得出相同参数设置下再生混凝土试件的理论曲线。进行无量纲化处理, 横坐标用  $\epsilon/\epsilon_p$  表示 (其中  $\epsilon_p$  为峰值应变), 纵坐标用  $\sigma/\sigma_p$  表示 (其中  $\sigma_p$  为峰值应力)。由

图6可见, 与天然骨料混凝土相比, 再生混凝土的变化过程相似, 上升段基本相同, 但在峰值点以后的下降段开始, 再生混凝土明显下降的比天然骨料混凝土快, 由此也能说明再生粗骨料存在的缺陷, 其脆性性质也较天然骨料更加显著。

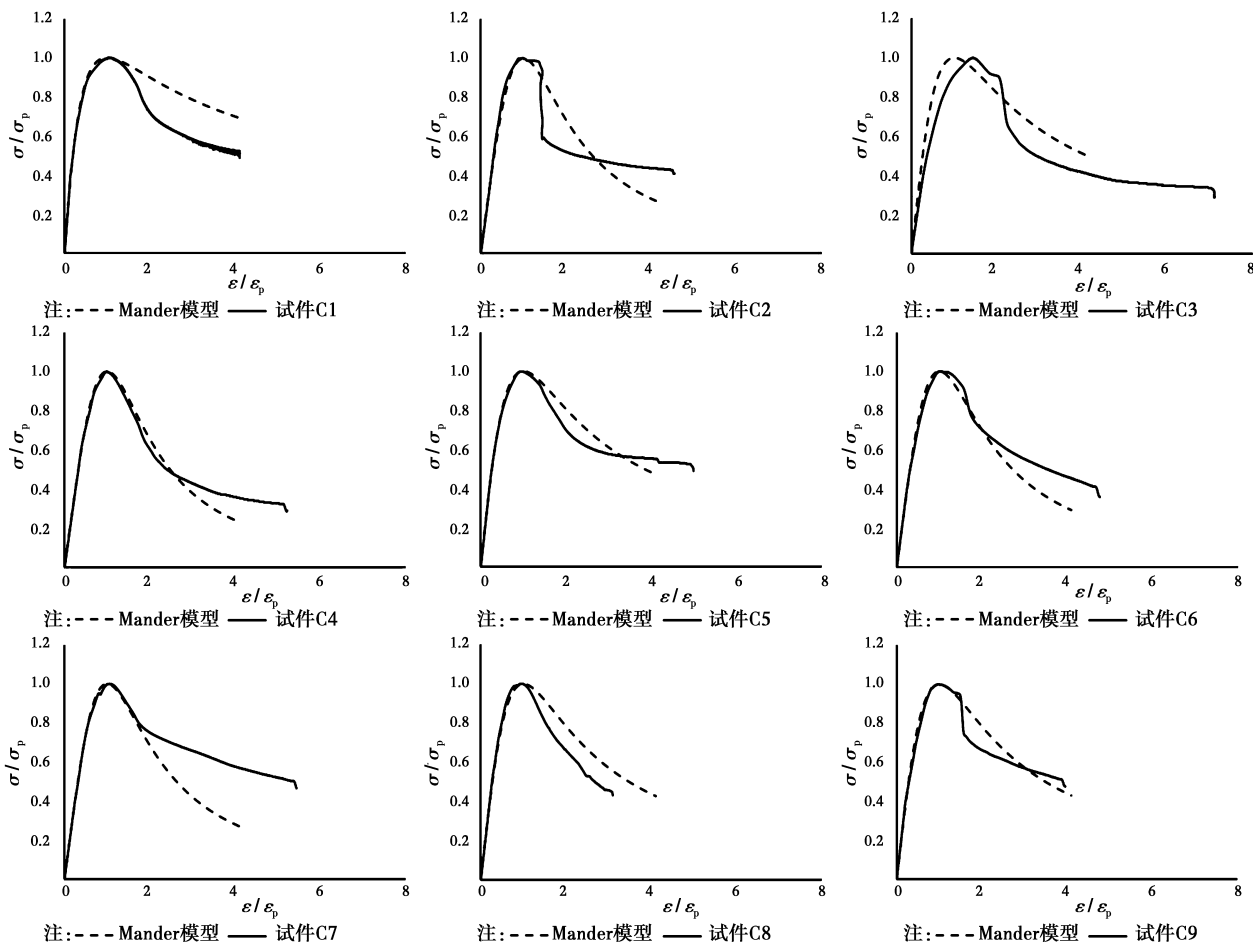


图 6 实验曲线与 Mander 模型曲线对比

Figure 6 Comparison between stress-strain curve obtained by Mander model and experimental stress-strain curve

## 4 结 论

基于 9 个再生混凝土试件的轴向加载试验,通过试验结果对比分析得出如下结论。

1) 在纵筋配筋率相同情况下,减少纵筋直径,增加纵筋数量,能提高试件的延性。

2) 在箍筋配筋率相同情况下,减少箍筋间距,能提高试件的延性。

3) 在相同条件下,提高箍筋配筋率,可以显著提高试件的峰值应力和延性。

4) 通过采用 Mander 模型得出的理论曲线与实验曲线进行对比,曲线变化基本类似,分上升段和下降段,上升段基本重合,但实测的下降段曲线较理论曲线陡峭,说明再生混凝土脆性较为显著。

### 参考文献:

[1] Scott B D, Park R, Priestley M J N. Stress-Strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates[J]. ACI Journal, 1982, 79

(1):13-27.

[2] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Observed stress-strain behavior of confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering. ASCE, 1988, 114 (8): 1827-1849.

[3] Cusson D, Paultre P. High-strength concrete columns confined by rectangular ties[J]. Journal of Structural Engineering [J]. ASCE, 1994, 120(3):783-804.

[4] Li B, Park R, Tanaka H. Stress-Strain behavior of high-strength concrete confined by ultra-high-and normal-strength transverse reinforcements [J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(3):395-406.

[5] Yan X, Hui W. Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2000, 12(2): 139-146.

[6] 赵作周,张石昂,贺小岗,等. 箍筋约束高强混凝土受压应力-应变本构关系[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(5): 96-103.

Zhao Z Z, Zhang S A, He X G, et al. Stress-strain relationship of stirrup-confined high-strength concrete

- [J]. Journal of Building Structural, 2014, 35(5): 96-103. (in Chinese)
- [7] 宋佳,李振宝,王元清,等. 考虑尺寸效应影响的箍筋约束混凝土应力-应变本构关系模型[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(8): 99-107.  
Song J, Li Z B, Wang Y Q, et al. Stress-Strain constitutive model of concrete confined by hoops with considering size effect [J]. Journal of Building Structural, 2015, 36(8): 99-107. (in Chinese)
- [8] 吴淑海,李晓文,肖慧,等. C30 再生混凝土变形性能及应力-应变曲线试验研究[J]. 混凝土, 2009(12): 21-25.  
Wu S H, Li X W, Xiao H, et al. Experimental research on deformation properties and stress-strain curve of C30 recycled concrete[J]. Concrete, 2009, (12): 21-25. (in Chinese)
- [9] 王雪婷,杨德健. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验[J]. 天津城市建设学院学报, 2010, 16(3): 175-178.  
Wang X T, Yang D J. Experimental Investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial [J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2010, 16(3): 175-178. (in Chinese)
- [10] Xiao J Z, Huang Y J, Yang J, et al. Mechanical properties of confined recycled concrete under axial compression[J]. Construction and Building Materials, 2012, 26: 591-603.
- [11] Zhao J L, Yu T, Teng J G, et al. Stress-strain behavior of FRP-confined recycled aggregate concrete [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2015, 19(3): 1-11.
- [12] 曾岚,李丽娟,陈光明,等. GFRP-再生混凝土-钢管组合柱轴压力学性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(2): 21-27  
Zeng L, Li L J, Chen G M, et al. Experimental study on mechanical behavior of GFRP-recycled concrete-steel tubular columns under axial compression [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(2): 21-27. (in Chinese)
- [13] 牛海成,曹万林,董宏英,等. 钢管高强再生混凝土柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(6): 128-136  
Niu H C, Cao W L, Dong H Y, et al. Experimental research on high-strength recycled concrete-filled steel tube columns subjected to axial compression [J]. Journal of Building Structural, 2015, 36(6): 128-136. (in Chinese)
- [14] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1988, (8): 1804-1826.
- [15] 关萍,王清湘,赵国藩. 高强约束混凝土应力-应变本构关系的试验研究[J]. 工业建筑, 1997, 27(11): 26-29.  
Guan P, Wang Q X, Zhao G F. Study on the tests of stress-strain relationship of confined high strength concrete [J]. Industrial Construction, 1997, 27(11): 26-29. (in Chinese)

(编辑 胡玲)