

# 强化后再生粗骨料混凝土单轴受压本构关系

李磊<sup>1</sup>, 徐培蓁<sup>1</sup>, 朱亚光<sup>1</sup>, 闫洪生<sup>2</sup>, 李会文<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 青岛鼎新恩同绿色建材科技有限公司, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 再生粗骨料混凝土应力-应变本构关系是再生粗骨料混凝土结构承载力计算和抗震设计重要问题之一, 对再生粗骨料混凝土在结构中的应用至关重要. 采用纳米 SiO<sub>2</sub> 浸泡和颗粒整形技术对再生粗骨料进行强化处理后, 制备水胶比为 0.5 的再生粗骨料混凝土, 通过立方体及棱柱体抗压强度试验, 分析了不同取代率对再生粗骨料混凝土力学性能的影响. 结果表明: 强化后再生粗骨料混凝土的泊松比及应力-应变全曲线与天然混凝土相似; 强化后再生粗骨料混凝土的抗压强度、弹性模量和峰值应力得到明显增强, 但仍低于天然混凝土; 颗粒整形法整体效果优于纳米 SiO<sub>2</sub> 浸泡法; 提出了强化后再生粗骨料混凝土的分段式本构关系方程, 拟合曲线与应力-应变全曲线吻合较好.

**关键词:** 再生粗骨料; 纳米 SiO<sub>2</sub>; 颗粒整形; 抗压强度; 本构关系

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)05-0717-08

## Constitutive relationship of strengthened recycled coarse aggregate concrete under uniaxial compression

LI Lei<sup>1</sup>, XU Peizhen<sup>1</sup>, ZHU Yaguang<sup>1</sup>, YAN Hongsheng<sup>2</sup>, LI Huiwen<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;

2. Qingdao Ding Xin En Tong Green Building Materials Technology Co., Ltd, Qingdao 266000, China)

**Abstract:** The stress-strain constitutive relation of recycled coarse aggregate concrete is one of the important problems in bearing capacity calculation and seismic design of recycled coarse aggregate concrete structure, which is critical to the application of recycled coarse aggregate concrete in the structure. The recycled coarse aggregate concrete with water-binder ratio of 0.5 was prepared by using nano-SiO<sub>2</sub> soaking and particle shaping technology to improve the properties of recycled coarse aggregate. The test research of cubic compressive strength and prismatic compressive strength were carried out, and the effects of different replacement rates on the mechanical properties of recycled coarse aggregate concrete were analyzed. Experimental results indicate that the poisson ratio and the stress-strain curve of enhanced recycled coarse aggregate concrete are similar to that of natural aggregate concrete. The compressive strength, elastic modulus and peak stress of enhanced recycled coarse aggregate concrete are obviously enhanced, but still lower than that of natural aggregate concrete. The overall effect of particle shaping method is better than that of nano-SiO<sub>2</sub> immersion method. The piecewise constitutive relation equations of recycled coarse aggregate concrete after strengthening are presented. The simulative results agree well with the stress-strain curves ones.

**Key words:** recycled coarse aggregate; nano-SiO<sub>2</sub>; particle shaping; compressive strength; constitutive relationship

将废弃混凝土破碎形成的再生粗骨料重新应用于工程是解决建筑垃圾问题的有效方法<sup>[1]</sup>, 但因再生粗骨料表面附着的砂浆强度低、孔隙率大<sup>[2]</sup>等缺点导致再生粗骨料混凝土性能要低于天然混凝土. 针对附着砂浆造成的问题, 已有的强化方法包括: 一是通过立式偏心研磨<sup>[3]</sup>、颗粒整形技术<sup>[4]</sup>以及酸液处理<sup>[5]</sup>等去除附着砂浆, 二是采用纳米 SiO<sub>2</sub> 浸泡<sup>[6]</sup>、硅烷浸泡<sup>[7]</sup>以及微生物矿化沉积<sup>[8]</sup>等

强化附着砂浆, 这两类方式对再生粗骨料性能提升都有较好效果.

国内外学者对强化后的再生混凝土抗压性能进行了广泛研究, 但对应力-应变本构关系研究较少. 在已有再生混凝土本构关系方面, BAIRA-GI<sup>[9]</sup>等人研究指出再生粗骨料混凝土与天然混凝土本构关系具有类似性. 肖建庄<sup>[10]</sup>认为再生粗骨料取代率的不同, 对再生混凝土性能影响显著.

收稿日期: 2020-04-17

修改稿日期: 2020-09-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51578342)

第一作者: 李磊(1995—), 男, 硕士生, 研究方向为建筑废弃物资源化利用. E-mail: 847053436@qq.com

通信作者: 徐培蓁(1974—), 女, 博士, 教授, 主要从事结构抗震、工程振动控制及建筑废弃物资源化利用等科研工作. E-mail: xpzygl@163.com

徐明<sup>[11]</sup>等发现高温后再生混凝土的本构关系与天然混凝土具有相似性,并建立了本构方程.陈宗平<sup>[12]</sup>等发现再生混凝土本构曲线下降段较为陡峭,不同取代率下泊松比变化不明显.LUO<sup>[13]</sup>等发现碳化处理再生粗骨料后混凝土本构关系与天然混凝土的更加接近.以往试验大多采用单一强化方式,为研究去除和强化附着砂浆两类处理方式对混凝土力学性能及本构关系的影响,分别采用颗粒整形技术和纳米 SiO<sub>2</sub> 浸泡法强化再生粗骨料,制备水胶比为 0.5 的混凝土进行抗压强度试验,利用 Origin 软件对单轴抗压试验数据进行拟合,提出了不同强化方式下再生粗骨料混凝土单轴受压本构方程.

## 1 再生粗骨料的强化

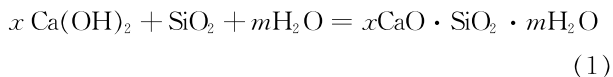
### 1.1 再生粗骨料

所用再生粗骨料由实验室废弃混凝土试块破碎筛分(粒径为 4.75~26.5 mm)得到,选取粒径为 4.75~26.5 mm 碎石为天然粗骨料,基本性能指标见表 1.可以看出简单破碎粗骨料的表观密度和堆积密度都低于天然粗骨料,吸水率及压碎指标相比天然骨料的差别较大,分别高 294.1%和 55.6%,说明再生粗骨料附着砂浆和内部微裂缝对其性能影响较大.

### 1.2 强化再生粗骨料

#### 1.2.1 纳米 SiO<sub>2</sub> 强化

采用型号为 HTSi-11L 的纳米 SiO<sub>2</sub> 溶液,其改善再生粗骨料的机理是纳米 SiO<sub>2</sub> 与附着砂浆中的 Ca(OH)<sub>2</sub> 发生反应(见公式 1),生成 C-S-H 凝胶,填充裂缝和改善孔隙结构<sup>[14]</sup>,且纳米材料本身也具有填充效应,从而提高再生粗骨料性能.



选取三种浓度(1%、2%、3%)的纳米 SiO<sub>2</sub> 溶液和三种浸泡时间(24 h、48 h、72 h)对再生粗骨料进行浸泡处理.由图 1、2 可以看出吸水率与压碎指标随浓度和时间增加而降低,浓度为 2%和 3%,时间为 48 h 和 72 h 时,相差不大.考虑效率及经济性选定浸泡浓度为 2%,浸泡时间为 48 h,纳米 SiO<sub>2</sub> 强化后再生粗骨料性能见表 1.

#### 1.2.2 颗粒整形强化

颗粒整形技术是通过高速运转的再生粗骨料相互摩擦,打磨掉附着砂浆和突出棱角<sup>[4]</sup>,使其圆润、光滑.将简单破碎粗骨料经整形机处理后为一次颗粒整形,将一次颗粒整形粗骨料重复上述

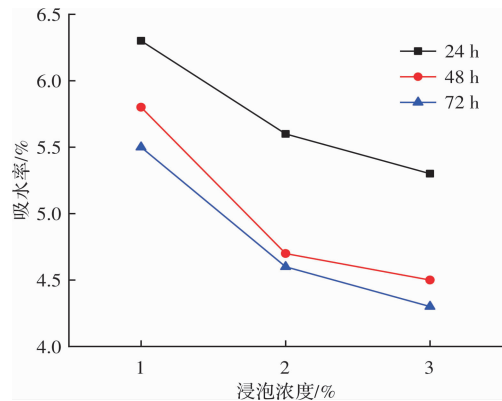


图 1 吸水率

Fig. 1 Water absorption

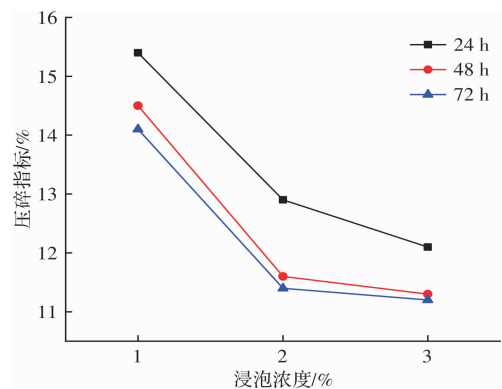


图 2 压碎指标

Fig. 2 Crushing index

步骤后为二次颗粒整形.由于二次颗粒整形后再生粗骨料附着砂浆较少,且再次进行颗粒整形会使骨料自身损伤较大,因此本试验仅进行了一次、二次颗粒整形.颗粒整形强化后再生粗骨料性能见表 1.

表 1 粗骨料物理指标

Tab. 1 Physical index of coarse aggregate

骨料类型	吸水率 /%	压碎指标 /%	表观密度 /kg · m <sup>-3</sup>	堆积密度 /kg · m <sup>-3</sup>
天然粗骨料	1.7	10.8	2 610	1 392
简单破碎	6.7	16.8	2 600	1 279
纳米 SiO <sub>2</sub> 强化	4.7	11.6	2 650	1 335
一次颗粒整形	4.2	11.2	2 635	1 431
二次颗粒整形	3.6	8.3	2 655	1 484

#### 1.2.3 强化结果分析

由表 1 的数据可以看出,经过强化后的再生粗骨料各项物理性能均能得到显著提高;纳米 SiO<sub>2</sub> 浸泡效果与一次颗粒整形大体相当;二次颗粒整形效果明显高于纳米 SiO<sub>2</sub> 浸泡和一次颗粒整形;二次颗粒整形效果较纳米 SiO<sub>2</sub> 浸泡吸水率低 30.6%、

压碎指标低 39.8%、表观密度和堆积密度分别高 5 kg/m<sup>3</sup> 和 149 kg/m<sup>3</sup>, 由此可见去除附着砂浆的颗粒整形法要优于强化附着砂浆的纳米 SiO<sub>2</sub> 强化法; 二次颗粒整形强化后再生粗骨料性能仅吸水率劣于天然粗骨料. 后续试验中颗粒整形再生粗骨料全部为二次颗粒整形粗骨料.

2 原材料与试验设计

2.1 原材料

试验中所用水泥为山水牌 42.5R 普通硅酸盐水泥, 拌和水均为自来水, 细骨料采用天然河砂, 粗骨料为第 1 节所介绍粗骨料.

2.2 混凝土配合比

采用四种粗骨料制备混凝土试块: 天然粗骨料混凝土 (NAC)、简单破碎再生粗骨料混凝土 (RAC)、纳米 SiO<sub>2</sub> 强化再生粗骨料混凝土 (NS-RAC) 及颗粒整形强化再生粗骨料混凝土 (PS-RAC). 再生粗骨料取代率分别取为: 30%、50%、70% 及 100%, 共 13 组试件, 每组 6 个棱柱体 (100 mm×100 mm×300 mm) 和 3 个立方体 (100 mm×100 mm×100 mm). 水胶比为 0.5, 砂率为 40%, 实际用水量考虑了再生骨料 10 min 吸水量和骨料实际含水量的附加用水量<sup>[15]</sup>. 混凝土配合比见表 2.

表 2 混凝土配合比  
Tab. 2 Mix proportion of concrete

kg/m <sup>3</sup>						
试件编号	水泥	水	天然粗骨料	再生粗骨料	砂	附加用水量
N	380	190	1 131.6	0	754.4	32.4
R30	380	190	792.1	339.5	754.4	46.4
R50	380	190	565.8	565.8	754.4	55.6
R70	380	190	339.5	792.1	754.4	64.9
R100	380	190	0	1 131.6	754.4	78.8
PS30	380	190	792.1	339.5	754.4	35.8
PS50	380	190	565.8	565.8	754.4	38.1
PS70	380	190	339.5	792.1	754.4	40.4
PS100	380	190	0	1 131.6	754.4	43.8
NS30	380	190	792.1	339.5	754.4	39.6
NS50	380	190	565.8	565.8	754.4	44.3
NS70	380	190	339.5	792.1	754.4	49.1
NS100	380	190	0	1 131.6	754.4	56.2

2.3 试验方法

用坍落度法测试天然与再生新拌混凝土的工作性能, 各组新拌混凝土坍落度值均在 100~120 mm 之间. 立方体抗压强度试验和单轴抗压试验分别在 YAW-3000D 混凝土压力试验机与 YAW-5000A 电液伺服压力试验机上进行. 为了采集到混凝土应力-应变全曲线下降段的数据, 采用如图 3 的刚性辅助架以增加试验机刚度, 先进行预压以保证试块处于轴压状态. 试验数据由 DH3816N 应变采集系统自动采集, 传感器为 100 t 压力传感器, 电阻应变计横、纵向量测标距分别为 50 mm 和 100 mm, 粘贴位置如图 4 所示.

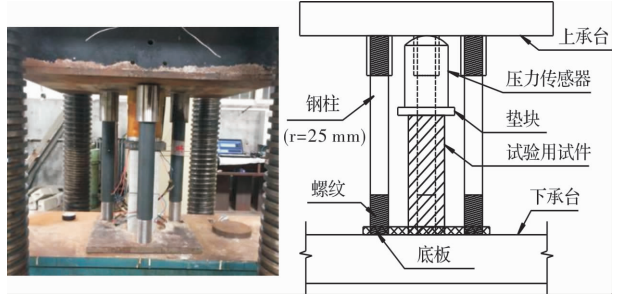


图 3 轴心受压试验装置  
Fig. 3 Uniaxial compression test equipment

3 试验结果与分析

3.1 抗压强度

表 3 为各组混凝土试件经试验测得的轴心抗压

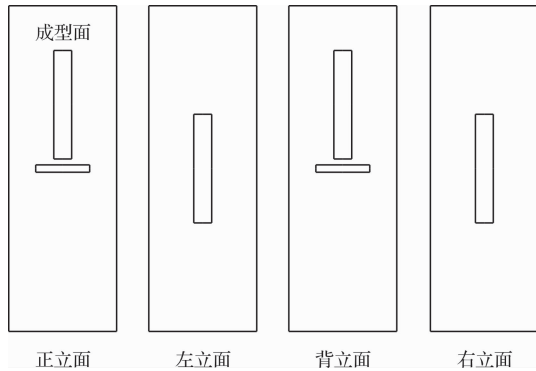


图4 应变计粘贴示意图

Fig. 4 Schematic diagram of strain

强度( $f_c$ )与立方体抗压强度( $f_{cu}$ ),对两者进行比较,得到 $f_c$ 与 $f_{cu}$ 的比值关系。各类混凝土不同取代率下强度比值波动不大,强化再生粗骨料的NSRAC和PSRAC的 $f_c$ 和 $f_{cu}$ 较RAC的都有所增加,但仍低于NAC;RAC和NSRAC均低于NAC的 $f_c$ 和 $f_{cu}$ 平均比值,而PSRAC的 $f_c/f_{cu}$ 平均比值为0.813,要高于NAC的0.757。由各组混凝土 $f_c$ 和 $f_{cu}$ 平均比值关系,可以对 $f_c$ 和 $f_{cu}$ 进行相互推算。对比NSRAC与PSRAC的 $f_c$ 和 $f_{cu}$ 发现,PSRAC要稍好于NSRAC,说明粗骨料性能直接影响混凝土抗压强度。

表3 各组轴心抗压强度和立方体抗压强度的对比

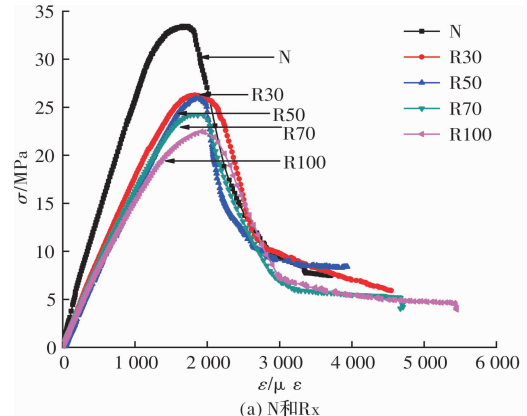
Tab. 3 Comparison of uniaxial compressive strength and cube compressive strength in each group

试件编号	$f_c$ /MPa	$f_{cu}$ /MPa	$f_c / f_{cu}$	平均比值
N	31.7	41.9	0.757	0.757
R30	25.0	34.2	0.731	0.721
R50	24.6	33.0	0.745	
R70	23.0	32.2	0.714	
R100	21.4	30.9	0.693	
NS30	30.1	40.4	0.745	0.713
NS50	27.8	39.3	0.707	
NS70	26.2	38.1	0.688	
NS100	26.5	37.2	0.712	
PS30	31.4	38.1	0.82	0.813
PS50	30.9	37.8	0.82	
PS70	30.1	37.4	0.80	
PS100	29.3	36.3	0.81	

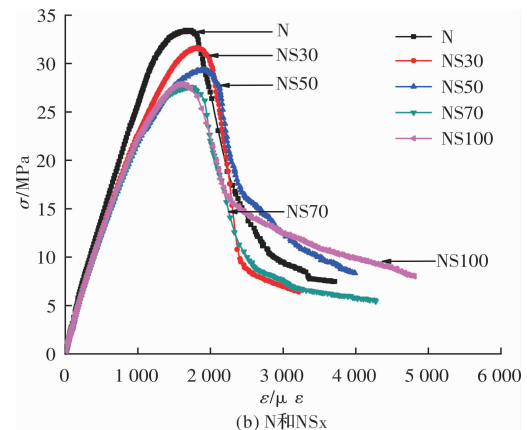
### 3.2 应力-应变全曲线

棱柱体单轴受压破坏试验得到应力-应变全曲线如图5所示。可以看出,同一类再生粗骨料下不

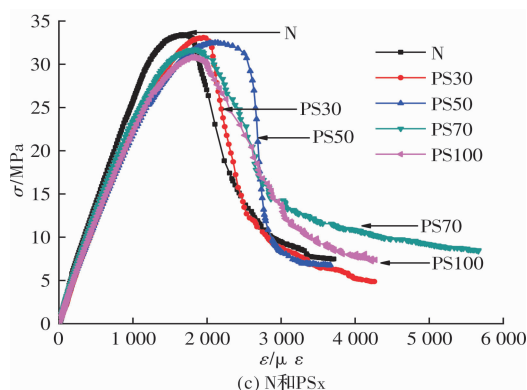
同取代率的混凝土本构曲线上升段大体相同;峰值点后下降段的发展趋势相似,RAC、NSRAC及PSRAC下降段较NAC更为陡峭,说明再生混凝土粗骨料内部损伤较大,裂缝发展更迅速,显现出更大脆性。



(a) N和Rx



(b) N和NSx



(c) N和PSx

图5 应力-应变全曲线

Fig. 5 Stress-strain curve

### 3.3 峰值应力和峰值应变

由图6可知峰值应力由大到小排列为NAC>PSRAC>NSRAC>RAC,且随再生粗骨料取代率增加,再生混凝土峰值应力随之减小。PASRAC与NSRAC相对RAC峰值应力明显增大,PSRAC峰值应力与NAC的相差不大,且均高于NSRAC,说明去除粗骨料附着砂浆的PSRAC性能优于强化粗骨料附着砂浆的NSRAC;对峰值应变进行分析

可以发现, RAC 峰值应变基本呈现上升趋势, 而 PSRAC 和 NSRAC 峰值应变先增大后减小, 且 PSRAC 均高于 NSRAC 的峰值应变; 在相同取代率下对比不同混凝土峰值应变, 没有发现特定规律。

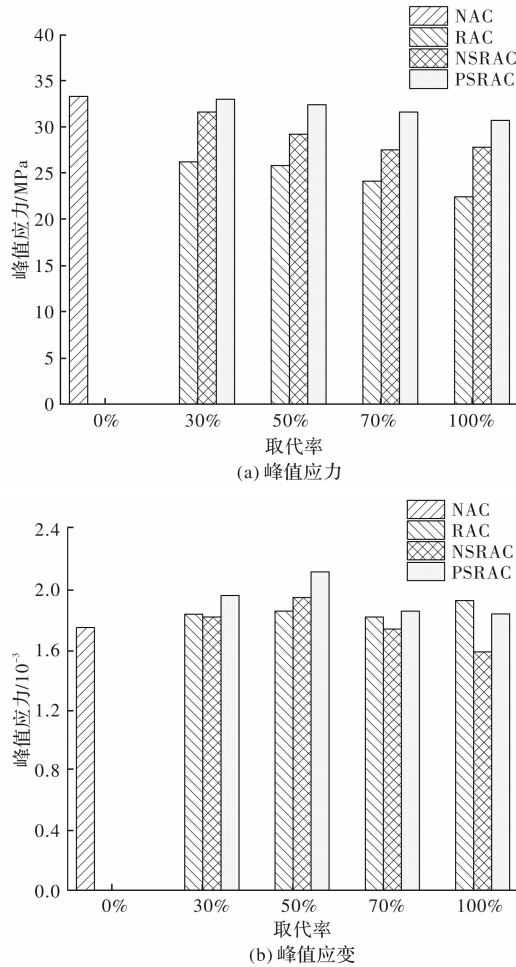


图6 不同取代率下试件的峰值应力和峰值应变

Fig. 6 Peak stress and peak strain of specimens with different replacement rates

### 3.4 弹性模量

采用公式<sup>[16]</sup>计算弹性模量, 从图7中可以看出 RAC 明显低于 NAC 的弹性模量, PSRAC 和 NSRAC 较 RAC 的弹性模量有所增大, 但仍低于 NAC 的弹性模量。PSRAC 和 NSRAC 弹性模量相差不大。随再生骨料取代率增大, 各组混凝土弹性模量变化不明显。

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{0.4\sigma_c - \sigma_{0.5}}{\epsilon_{0.4\sigma_c} - \epsilon_{0.5}} \quad (2)$$

式中:  $E$  为弹性模量, MPa;  $\sigma_c$  为峰值应力, MPa;  $\sigma_{0.4\sigma_c}$  为  $0.4\sigma_c$  对应的应变;  $\sigma_{0.5}$  为试验中与  $0.5\text{MPa}$  最接近的应力, MPa;  $\epsilon_{0.5}$  为  $\sigma_{0.5}$  对应的应变。

### 3.5 泊松比

泊松比采用各试件横向变形稳定后横向、纵

向应变的比值。图8为不同取代率下各混凝土泊松比的值, 可以看出 RAC、NSRAC 及 PSRAC 和 NAC 泊松比相似, 均分布在  $0.14 \sim 0.24$  之间, 符合国家规范<sup>[17]</sup>提出的泊松比可按  $0.2$  计算。

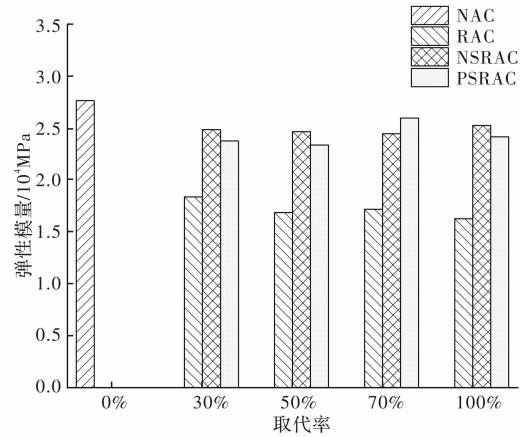


图7 不同取代率下各混凝土弹性模量

Fig. 7 Elastic modulus of specimens with different replacement rates

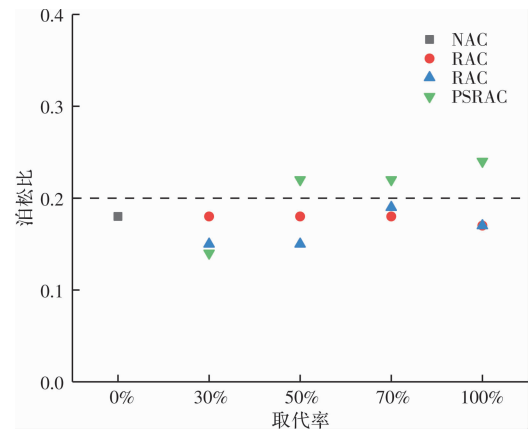


图8 不同取代率下各混凝土泊松比

Fig. 8 Poisson ratio of specimens with different replacement rates

### 3.6 应力-应变全曲线回归分析

取  $x = \epsilon/\epsilon_p$ ,  $y = \sigma/\sigma_p$  作为应力-应变全曲线横、纵坐标, 其中  $\sigma_p$ 、 $\epsilon_p$  为试件的峰值应力和峰值应变, 处理后曲线见图9。可以发现 NAC、RAC、NSRAC 和 PSRAC 的应力-应变曲线几何特性相似, 上升段相差不大, 但不同取代率下降段陡峭程度不同, 表现出一定的离散性, 说明随取代率不同, 再生混凝土脆性变化有所不同。以往研究表明, 过镇海<sup>[18]</sup>提出的分段式函数(见公式3)拟合天然和再生混凝土应力-应变曲线与试验结果吻合度较好, 因此采用该方法进行强化后再生粗骨料混凝土本构曲线的研究。基于最小二乘法将试验数据进行拟合处理, 得出参数  $a$ 、 $b$ , 参数  $a$



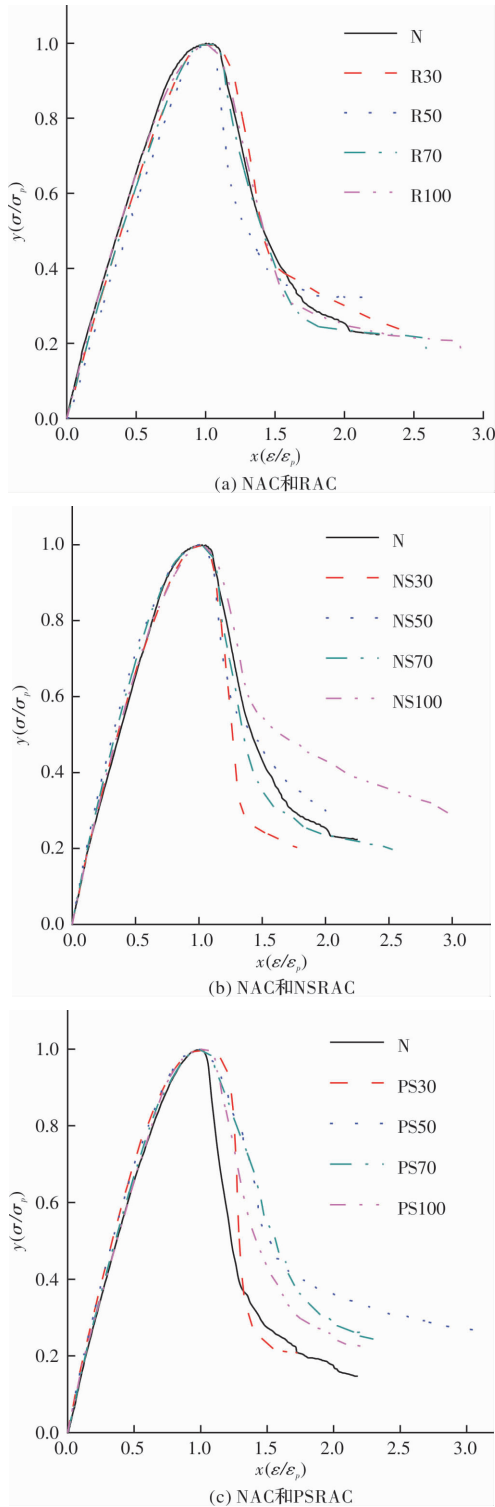


图 9 无量纲应力-应变曲线

Fig. 9 Dimensionless stress-strain curves

表示初始切线模量与峰值割线模量的比值, 参数  $b$  表示下降段与  $x$  轴所围面积,  $b$  值越小, 试件脆性越小、塑性越大. 图 10 为无量纲化处理后的混凝土应力-应变全曲线与拟合后曲线对比图.

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

参数  $a$ 、 $b$  以及拟合优度相关系数  $R^2$  列于表 4 中, 全曲线上上升段拟合相关系数  $R^2$  均大于 0.99, 拟合度较高; 下降段拟合相关系数稍低, 但均高于 0.85, 可以看出用分段式函数进行强化后再生粗骨料混凝土单轴受压应力-应变全曲线的拟合效果较好.

表 4 各组混凝土应力-应变全曲线方程拟合系数

Tab. 4 Fitting coefficient of stress-strain curve equation

试件编号	参数 $a$	$R^2$	参数 $b$	$R^2$
N	1.351	0.999 17	6.831	0.992 3
R30	1.091	0.998 49	5.614	0.966 71
R50	0.729	0.992 38	13.328	0.890 59
R70	1.120	0.997 68	8.517	0.992 26
R100	1.341	0.999 11	7.822	0.975 06
NS30	1.374	0.998 08	15.104	0.961 97
NS50	1.751	0.999 68	8.554	0.933 85
NS70	1.603	0.999 76	9.008	0.987 13
NS100	1.416	0.998 49	3.812	0.924 08
PS30	1.310 8	0.999 45	15.733 1	0.945 99
PS50	1.633	0.999 89	15.276 7	0.861 5
PS70	1.608 98	0.999 75	3.419 7	0.886 61
PS100	1.419 73	0.999 79	5.007 95	0.996 29

## 4 结论

(1) 强化后再生粗骨料的吸水率、压碎指标、表观密度及堆积密度均有提高, 结合混凝土的抗压强度、峰值应力及弹性模量发现颗粒整形法要优于纳米  $\text{SiO}_2$  浸泡法.

(2) 各组混凝土单轴受压应力-应变全曲线的几何形态基本相同, NSRAC 与 PSRAC 上升段斜率和峰值应力明显高于 RAC, 但仍低于 NAC, 说明两种强化方式都提高了再生粗骨料混凝土的弹性模量和峰值应力.

(3) 不同粗骨料混凝土的泊松比相差不大, 其值大致分布在 0.2 左右.

(4) 采用过镇海提出的分段式函数拟合单轴抗压应力-应变全曲线, 上升段相关系数在 0.99 以上, 下降段相关系数在 0.85 以上, 拟合结果与试验结果基本吻合.

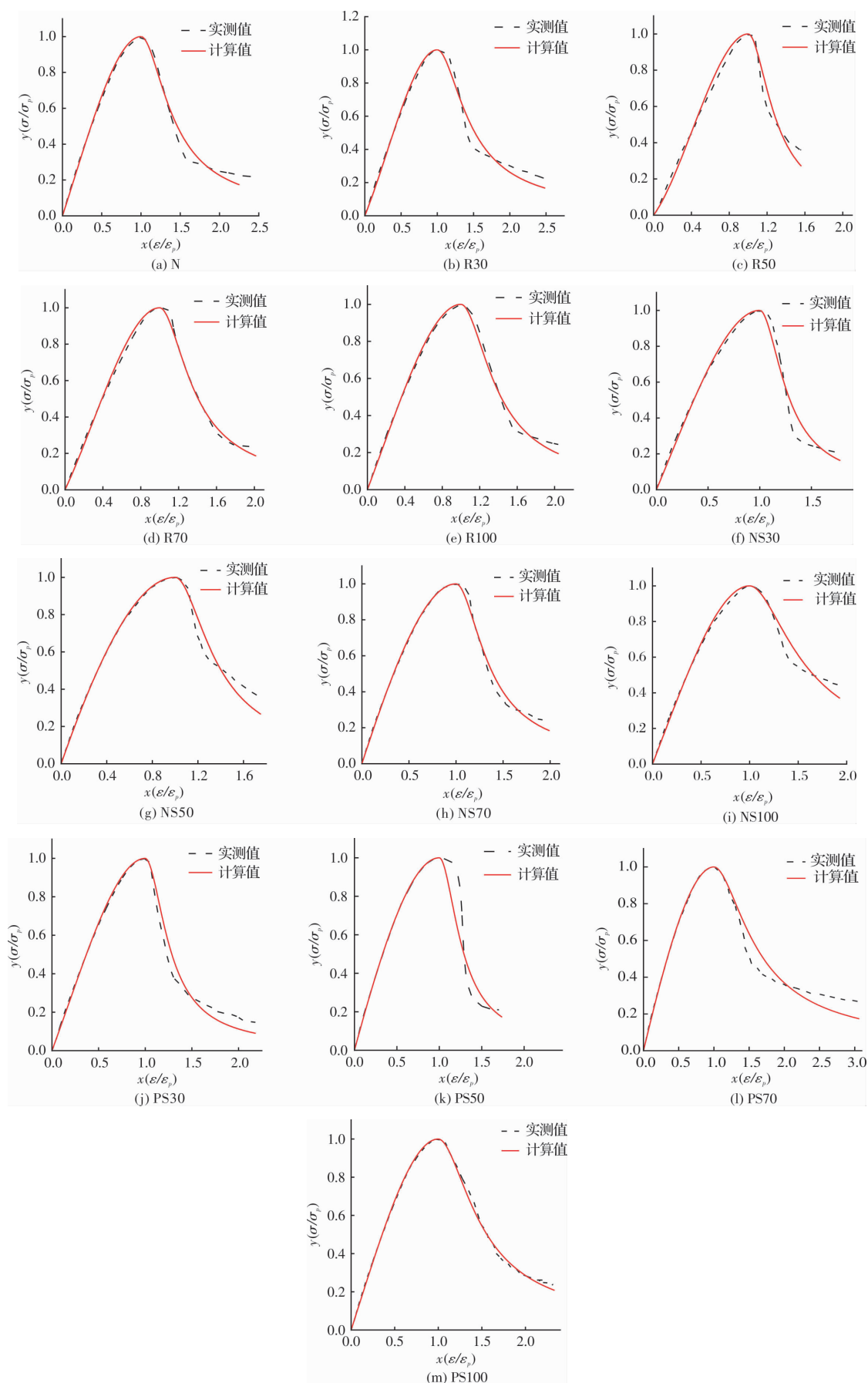


图 10 实测与计算应力-应变全曲线对比

Fig. 10 Comparison of test and calculated full stress-strain curves

## 参考文献 References

- [1] 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 Press, 2008.
- [2] SÁEZ del Bosque, I, F, ZHU W, HOWIND T, et al. Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate[J]. Cement & Concrete Composites, 2017, 4(11): 25-34.
- [3] 石倉武, 最首貞典, 助清満昭, 等. 高品質再生骨材製造技術の開発[J]. コンクリート工学, 1999, 37(7): 16-23.
- [4] 郭远新, 李秋义, 汪卫琴, 等. 再生粗骨料品质提升技术研究[J]. 混凝土, 2015(6): 134-138.  
GUO Yuanxin, LI Qiuyi, WANG Weiqin, et al. Research on recycled coarse aggregate quality of enhancement technology[J]. Concrete[3], 2015(6): 134-138.
- [5] TAM V W Y, TAM C M, LE K N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 50(1): 82-101.
- [6] ZENG W, ZHAO Y, ZHENG H, et al. Improvement in corrosion resistance of recycled aggregate concrete by nano silica suspension modification on recycled aggregates[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 106: 103476.
- [7] ZHU Y G, KOU S C, POON C S, et al. Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 35(1): 32-38.
- [8] ZHU Y, LI Q, XU P, et al. Properties of concrete prepared with recycled aggregates treated by bio-deposition adding oxygen release compound[J]. Materials, 2019, 12(13): 2147.
- [9] BAIRAGI N K, RAVANDE K, PAREEK V K. Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates[J]. Resources, Conservation and Recycling, 1993, 9(1/2): 109-126.
- [10] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007(11): 1445-1449.  
XIAO Jianzhuang. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007(11): 1445-1449.
- [11] 徐明, 王韬, 陈忠范. 高温后再生混凝土单轴受压应力-应变关系试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(2): 158-164.  
XU Ming, WANG Tao, CHEN Zhongfan. Experimental research on uniaxial compressive stress-strain relationship of recycled concrete after high temperature [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(2): 158-164.
- [12] 陈宗平, 徐金俊, 郑华海, 等. 再生混凝土基本力学性能试验及应力应变本构关系[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 24-32.  
CHEN Zongping, XU Jinjun, ZHENG Huahai, et al. Basic mechanical properties test and stress-strain constitutive relations of recycled coarse aggregate concrete [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1): 24-32.
- [13] LUO S, YE S, XIAO J, et al. Carbonated recycled coarse aggregate and uniaxial compressive stress-strain relation of recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 188: 956-965.
- [14] 范玉辉, 牛海成, 张向冈. 纳米 SiO<sub>2</sub> 改性再生混凝土试验研究[J]. 混凝土, 2017(7): 92-95.  
FAN Yuhui, NIU Haicheng, ZHANG Xianggang. Experimental study on the modification of recycled aggregate concrete by nano-SiO<sub>2</sub> [J]. 2017(7): 92-95.
- [15] 肖建庄, 陈祥磊, 李标, 等. 纳米 SiO<sub>2</sub> 和粉煤灰复掺对再生混凝土性能的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(1): 26-32.  
XIAO Jianzhuang, CHEN Xianglei, LI Biao, et al. Effect of mixed nano-SiO<sub>2</sub> and fly ash on properties of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(1): 26-32.
- [16] 梁兴文. 混凝土结构设计原理[M]. 第2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
LIANG Xingwen. Design principle of concrete structure [M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2011.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范 GB 50010-2010. [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010-2010. [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [18] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系: 原理和应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.  
GUO Zhenhai. The strength and constitutive relation of concrete: Principle and application [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2004.

(编辑 桂智刚)