

# 纳米二氧化硅改性再生混凝土的单轴受压 动态力学性能

肖建庄<sup>1,2</sup>, 李 标<sup>1</sup>, 张凯建<sup>1</sup>, 苏亚武<sup>3</sup>, 潘玉珀<sup>3</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;  
3. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海, 200112)

**摘要:** 基于新提出的纳米二氧化硅水泥净浆二次改性再生骨料方法, 通过混凝土单轴受压动态力学试验, 获得了不同应变率( $10^{-5}\text{s}^{-1}$ 、 $10^{-3}\text{s}^{-1}$ 、 $10^{-1}\text{s}^{-1}$ )、不同改性方法(纳米二氧化硅水泥净浆二次改性、纳米二氧化硅粉煤灰复合改性、纳米二氧化硅预浸泡)的再生混凝土单轴受压应力-应变曲线, 分析对比了改性前后应力-应变曲线特征。结果表明, 新的改性方法能够有效改善再生混凝土力学性能, 准静态下峰值应力提升25.1%, 弹性模量增加85.8%。改性后再生混凝土的峰值应力和弹性模量动态增长因子降低, 而峰值应变动态增长因子提高。最后, 提出了改性后再生混凝土动态应力-应变本构模型, 对比结果显示, 模型预测曲线与试验曲线吻合较好, 能为工程设计和应用提供依据。

**关键词:** 再生混凝土(RAC); 纳米二氧化硅改性; 应力-应变曲线; 动态增长因子; 动态本构模型

中图分类号: TU375

文献标志码: A

## Dynamic Mechanical Properties of Nano-Silica Modified Recycled Aggregate Concrete under Uniaxial Compression

XIAO Jianzhuang<sup>1,2</sup>, LI Biao<sup>1</sup>, ZHANG Kaijian<sup>1</sup>, SU Yawu<sup>3</sup>, PAN Yupo<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd, Shanghai 200112, China)

**Abstract:** A novel method to modify recycled aggregate concrete (RAC) by nano-silica, two steps modification of

nano-silica, and cement slurry, was proposed in this paper. The stress-strain curves of RACs under uniaxial compression which were modified by three different methods at different strain rates ( $10^{-5}\text{s}^{-1}$ ,  $10^{-3}\text{s}^{-1}$ , and  $10^{-1}\text{s}^{-1}$ ) were obtained by conducting dynamic uniaxial compression test to explore the distinction between the curves before and after modification (two steps modification by nano-silica and cement slurry, combined modification by nano-silica and fly ash, pre-soaking modification by nano-silica). The results show that the novel modification method proposed could effectively promote the mechanical properties of RAC. Under the quasi-static condition, the peak stress and elastic modulus were increased by 25.1% and 85.8%, respectively. The dynamic increase factors (DIF) of the peak stress and elastic modulus of the modified RAC was decreased while the DIF of peak strain was increased. Finally, the dynamic stress-strain model of modified RAC was proposed, and the comparison results indicate that the predicted curves were in good agreement with the experimental curves, which can provide references for the engineering design and applications.

**Key words:** recycled aggregate concrete (RAC); modification of nano-silica; stress-strain curve; dynamic increase factor(DIF); dynamic constitutive model

近年来,再生混凝土技术的研究和应用已经得到了极大的发展。国内外学者对再生混凝土静、动态力学性能开展了试验和理论分析<sup>[1-5]</sup>。由于老砂浆的存在,再生粗骨料表现出了相对于天然骨料较

收稿日期: 2020-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(52078358, 52008304); 中国博士后科学基金面上资助(2019M661620)

第一作者: 肖建庄(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为再生混凝土材料与结构。  
E-mail: jzx@tongji.edu.cn

通信作者: 张凯建(1989—), 男, 博士后, 工学博士, 主要研究方向为再生混凝土材料性能。  
E-mail: kaijian.zhang@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

差的物理性能。再生混凝土的组成成分、界面过渡区更加复杂,因此力学性能表现较差,影响其在实际工程中的推广应用。同时,对再生混凝土动态本构关系的研究显示<sup>[6]</sup>:再生混凝土与普通混凝土一样拥有应变率敏感性,随着应变率的增加,应力-应变曲线形状相似,峰值应力、弹性模量增加,峰值应变无明显变化。

针对再生混凝土力学性能较差的问题,已有文献开展了纳米二氧化硅改性再生混凝土的研究<sup>[7-8]</sup>。纳米二氧化硅是一种本身具有较高火山灰活性材料,能够在混凝土中与氢氧化钠和水快速发生二次反应生成水化硅酸钠。同时,由于纳米级颗粒的表面张力和成团效应,使得纳米二氧化硅在混凝土中具有成核效应,能够促进水泥的水化<sup>[9]</sup>。一系列的反应能够修复再生混凝土表面老砂浆、强化界面过渡区和新砂浆,从而提升再生混凝土的力学性能。关于纳米二氧化硅改性后再生混凝土动态力学性能的研究工作较少,Li等<sup>[10]</sup>完成了纳米二氧化硅改性后再生混凝土在冲击荷载下力学性能的研究,研究显示纳米二氧化硅能够提升再生混凝土的抗冲击能力,但是降低了应变率敏感性。

本文提出了一种纳米二氧化硅水泥净浆二次改性再生粗骨料的方法(记为RAC-SC),结合作者在之前研究中提出的纳米二氧化硅复合改性再生混凝土方法<sup>[11-12]</sup>(记为RAC-SF),与现有文献中常用的纳米二氧化硅预浸泡改性再生粗骨料方法<sup>[13]</sup>(记为

RAC-S),设计了再生混凝土棱柱体试件。通过MTS 815.02电液伺服试验系统,测试改性前后再生混凝土单轴受压动态应力-应变全曲线,分析了特征参数(峰值应力、峰值应变、弹性模量),探究不同纳米二氧化硅改性方法对再生混凝土动态力学性能的影响。并以作者提出的再生混凝土静态本构模型为基础,提出改性前后再生混凝土动态本构模型。

## 1 试验设计

### 1.1 试验材料

水泥采用P. O 32.5海螺牌普通硅酸盐水泥,粉煤灰为I级粉煤灰,质量分数见表1;天然砂为河沙,II级砂,级配良好;天然粗骨料为天然碎石,再生粗骨料来自上海市再生资源加工厂。试验用粗、细骨料的基本物理性能见表2。试验采用的纳米二氧化硅分散液参数见表3,其拥有比粉末更加优秀的分散性,能够避免在使用过程中出现团聚效应影响水化。

表1 胶凝材料化学成分

Tab. 1 Chemical composition of cementitious material

材料	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	其他	%
粉煤灰	53.9	31.1	4.2	4.0	1.1	1.0	0.7	0.9	2.0	0.7	0.4	
水泥	21.1	4.3	2.5	65.9	0.1	1.5	2.3	0.1	0.5	0	1.7	

表2 试验用骨料基本物理性能

Tab. 2 Basic physical properties of test aggregate

骨料类型	堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	压碎指标/%	吸水率/%	含水率/%
天然粗骨料	1 450	2 675	3.54	1.27	0.85
再生粗骨料	1 220	2 553	14.3	6.92	2.50
天然砂		2 598			

表3 纳米SiO<sub>2</sub>分散液参数

Tab. 3 Properties of nano-silica solution

外观	粒径/nm	浓度/%	溶剂	PH值
透明液体	15±5	30	水	9-11

### 1.2 改性方法

#### 1.2.1 纳米二氧化硅水泥净浆二次改性(RAC-SC)

图1给出了基于预浸泡强化再生粗骨料的纳米二氧化硅水泥净浆二次改性方法与具体步骤。

表4为二次改性后再生粗骨料物理性能的变化,可知,改性后压碎指标和吸水率均降低。

#### 1.2.2 纳米二氧化硅粉煤灰复合改性(RAC-

SF)

纳米二氧化硅与粉煤灰复合改性再生混凝土的具体步骤如图2所示。

#### 1.2.3 纳米二氧化硅预浸泡改性(RAC-S)

使用纳米二氧化硅预浸泡方法强化再生粗骨料的具体步骤如图3所示。

改性后的再生粗骨料物理性能变化见表5,数据显示:经预浸泡处理的再生粗骨料的表观密度和压碎指标基本不变,但是吸水率降低了1.28%。

### 1.3 试件设计与制作

普通混凝土(NAC)为对照组,其他4组再生混凝土分别为普通再生混凝土(RAC)、使用纳米二氧

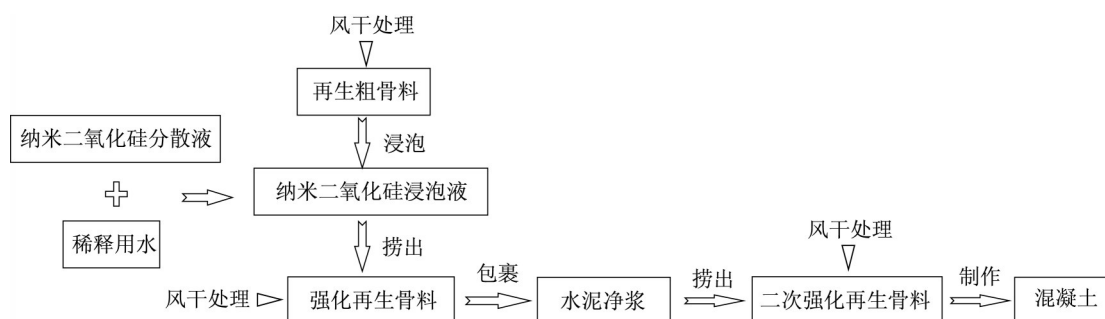


图1 纳米二氧化硅水泥净浆二次改性

Fig. 1 Two steps modification by nano-silica and cement slurry

表4 二次改性后再生粗骨料物理性能

Tab. 4 Physical properties of reclaimed coarse aggregate after two step modification

骨料类型	表观密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	压碎指标/%	吸水率/%
再生粗骨料	2 553	14.3	6.92
改性后再生粗骨料	2 555	14.0	6.22

化硅溶液预浸泡改性后的再生混凝土(RAC-S)、使用纳米二氧化硅水泥净浆二次改性后的再生混凝土

(RAC-SC)和使用纳米二氧化硅粉煤灰复合改性后的再生混凝土(RAC-SF)。尺寸设计为 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 300\text{mm}$ 。5组混凝土各制作9个试件,用于测试3组不同应变率( $10^{-5}\text{s}^{-1}$ 、 $10^{-3}\text{s}^{-1}$ 、 $10^{-1}\text{s}^{-1}$ )下的应力-应变曲线,每个应变率下设置3个相同的试块。

混凝土配合比见表6,再生粗骨料用量的确定采用体积取代法,取代率均为100%。试件浇筑完成养护24h后拆模,后放入水中养护90d。

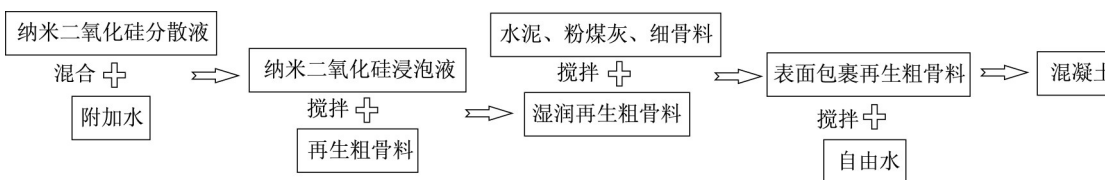


图2 纳米二氧化硅粉煤灰复合改性

Fig. 2 Combined modification by nano-silica and fly ash

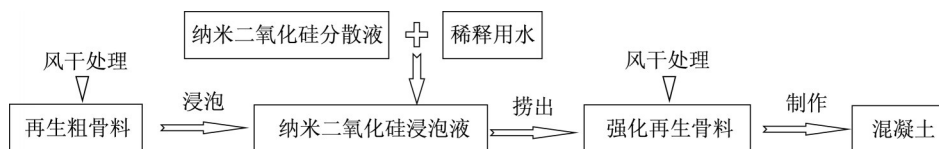


图3 纳米二氧化硅预浸泡改性

Fig. 3 Pre-soaking modification by nano-silica

表5 预浸泡后再生粗骨料物理性能

Tab. 5 Physical property change of recycled coarse aggregate after pre-soaking

骨料类型	表观密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	压碎指标/%	吸水率/%
再生粗骨料	2 553	14.3	6.92
改性后再生粗骨料	2 564	14.1	5.64

#### 1.4 试验加载测试方案

采用同济大学建筑结构实验室的MTS 815.02电液伺服试验系统进行混凝土单轴受压应力-应变曲线测试。所有试件在水中养护达到90d后取出,放置30d后进行测试(总龄期120d),采用的应变率为 $10^{-5}\text{s}^{-1}$ 、 $10^{-3}\text{s}^{-1}$ 和 $10^{-1}\text{s}^{-1}$ ,加载采用位移控制,3种应变率对应的加载速率分别为 $0.003\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.3\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$

和 $30\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.003\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 为准静态加载速率。

加载试验开始之前,使用砂纸将试件上下2个表面进行打磨,使上下表面尽可能平整,减少应力集中导致的受力不均。同时打磨试件两侧平面使引伸计和试件接触稳定。加载的程序分为预加载和正式加载,在预加载过程中使用力控制,预加载荷载设置为5kN,可以降低试件端部松动对试验结果的影响。



表6 混凝土配合比

Tab. 6 Mix proportion of concrete

序号	编号	kg·m <sup>-3</sup>							
		水		水泥	胶凝材料		细骨料	粗骨料	
		自由水	附加水		纳米二氧化硅	粉煤灰		天然粗骨料	再生粗骨料
1	NAC	175	0	350	0	0	770	1040	0
2	RAC	175	68.7	350	0	0	770	0	993
3	RAC-S	175	61.8	350	0	0	770	0	993
4	RAC-SC	175	55.9	350	0	0	770	0	993
5	RAC-SF	175	68.7	238	7	105	770	0	993

当荷载稳定在5 kN时开始正式加载。正式加载采用位移控制,加载速度根据不同的应变率要求进行设置,最大位移设置为3 mm。为了采集到足够的数据,针对不同的应变率设置不同的采集频率,对应3个应变率由低到高分别设置1 Hz、100 Hz、5 000 Hz。此外,通过数码相机记录试件加载过程中裂缝的开展情况和加载结束时试件的破坏形态。

## 2 再生混凝土动态力学性能

### 2.1 试件破坏模式

图4给出了 $10^{-5}\text{s}^{-1}$ 、 $10^{-3}\text{s}^{-1}$ 和 $10^{-1}\text{s}^{-1}$ 这三种应变率下试件的破坏模式。对比不同应变率下的破坏图可以发现,随着应变率的增加,NAC试件侧面裂纹由斜向中部的方向逐渐发展为平行试件轴向方向,如

图4 a所示。随着单轴受压荷载应变率的增加,破坏形态表现出一种由剪切引起的受压破坏逐渐转变为受压引起的试件内部劈裂受拉破坏的趋势。图4 b显示,RAC试件破坏点均发生在试件中部位置,多为剪切受压破坏。裂缝大多在骨料与砂浆的界面出现并沿平行于试件轴向方向发展,随着应变率的增大有更多的裂纹穿过骨料。RAC-S的破坏模式与NAC和RAC相似,裂缝多从骨料和砂浆的界面开展,裂纹沿试件轴向发展,在试件中部发生剪切受压破坏(图4 c)。RAC-SC试件大部分的裂纹都是沿着平行于试件轴向的方向开展,在试件中部集中发生剪切受压破坏(图4 d)。RAC-SF的破坏形态与文中其他混凝土类似。裂缝主要沿平行于试件的轴向方向开展,裂缝多汇集于试件中部,在试件中部发生剪切受压破坏(图4 e)。

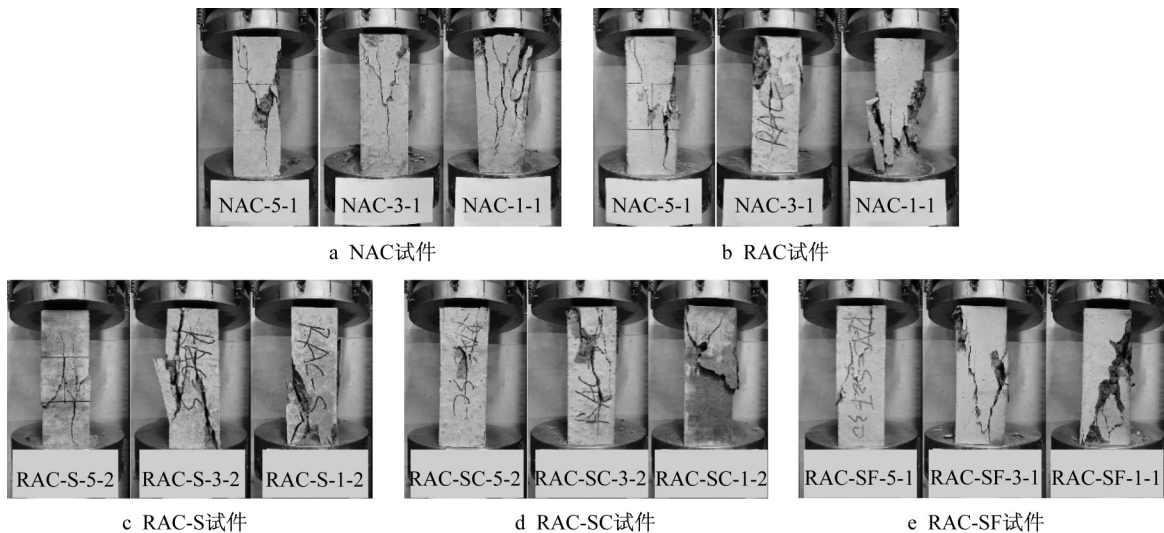


图4 不同应变率下试件的破坏模式

Fig. 4 Failure modes of specimens at different strain rates

### 2.2 试验应力-应变曲线

图5为不同应变率下混凝土的应力-应变均值曲线,可以看到,不同应变率下的应力-应变曲线形状十分相似。随着应变率的增加,上升段斜率均明显增加,峰值应力增大,峰值应变变化不明显。

### 2.3 改性效果对比分析

#### 2.3.1 不同改性方法对峰值应力的影响

图6给出了改性后再生混凝土在不同应变率下的峰值应力,可知,NAC、RAC以及不同方法改性后的再生混凝土峰值应力与应变率成正比关系。

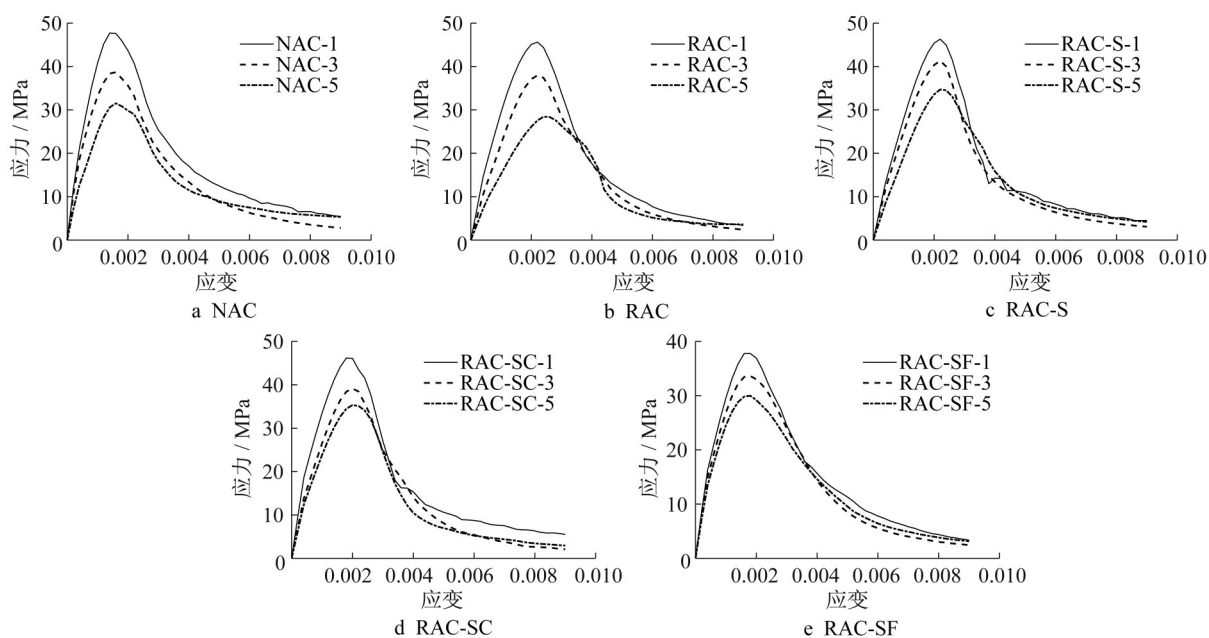


图5 试验混凝土在各级应变率下的应力-应变均值曲线

Fig. 5 Mean stress-strain curves of concrete at different strain rates

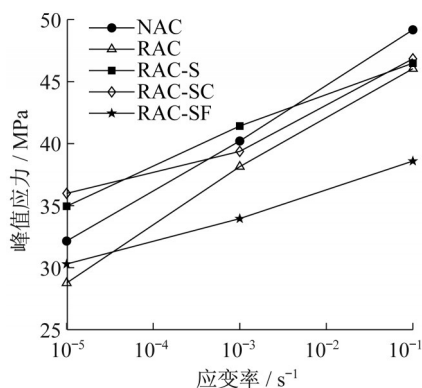


图6 应变率对混凝土峰值应力的影响

Fig. 6 Influence of strain rate on peak stress of concrete

在应变率为  $10^{-5}\text{s}^{-1}$  时, RAC 的平均峰值应力为 28.76MPa (变异系数为 0.16), 比 NAC 降低 3.39MPa。与 RAC 相比, RAC-S、RAC-SC、RAC-SF 的峰值应力分别提高了 21.5%、25.1% 和 5.3%, 峰值应力变异系数为 0.03、0.05 和 0.01, 可见本文所采用的改性方法均有显著效果。对于 RAC-SC, 由于采用的纳米二氧化硅和水泥净浆会修复其中的微裂纹和纳米微米级孔隙, 改善了再生混凝土的界面性能, 因此准静态加载下的峰值应力有所提升。但是对于 RAC-SF, 由于粉煤灰特殊的水化性质改变了混凝土中砂浆基体和界面过渡区结构, 降低了动态加载下的应变率效应, 故对峰值应力的提升有限。在应变率为  $10^{-3}\text{s}^{-1}$  时, 与 RAC 相比,

RAC-S、RAC-SC 的峰值应力分别提高了 8.6%、3.2%, RAC-SF 的峰值应力降低 11.0%。在应变率为  $10^{-1}\text{s}^{-1}$  时, RAC 与 NAC 的应变率敏感性基本一致。与 RAC 相比, RAC-S、RAC-SC 的峰值应力提升进一步减小, 分别为 1.0%、1.7%, RAC-SF 的峰值应力降低 14.0%。应变率为  $10^{-3}\text{s}^{-1}$  和  $10^{-5}\text{s}^{-1}$  时, 与 RAC 相比, RAC-S、RAC-SC、RAC-SF 的强度变异系数下降不明显。

综上, 在不同应变率下再生混凝土的峰值应力均低于普通混凝土。3 种纳米二氧化硅改性再生混凝土的方法均能在准静态下有效提升再生混凝土的峰值应力, 降低变异系数, 其中纳米二氧化硅与水泥净浆二次强化再生粗骨料的效果最好, 纳米二氧化硅预浸泡强化再生粗骨料效果次之。

### 2.3.2 不同改性方法对峰值应变的影响

图 7 给出了改性后再生混凝土在不同应变率下的峰值应变, 结果表明, 随着应变率的增加, RAC-SF 的平均峰值应变先增大后减小, 其他组逐渐降低。

在应变率为  $10^{-5}\text{s}^{-1}$  时, RAC 的平均峰值应变为  $2.57 \times 10^{-3}$  (变异系数为 0.10), 为所有试件中的最大值。与 RAC 相比, RAC-S、RAC-SC、RAC-SF 的峰值应变分别降低了 10.2%、18.2% 和 31.8%, 变异系数为 0.04、0.10 和 0.10, 可见本文所采用的改性方法均可显著降低峰值应变的平均值。在应变率为  $10^{-3}\text{s}^{-1}$  时, 与 RAC 相比, RAC-S 的平均峰值应变与

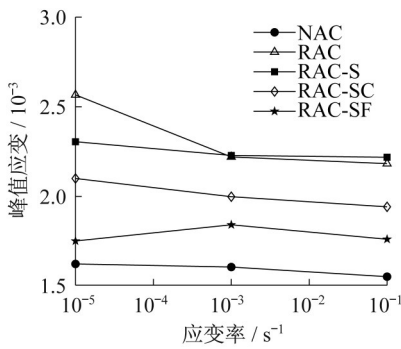


图 7 应变率对混凝土峰值应变的影响

Fig. 7 Influence of strain rate on peak strain of concrete

RAC 相当,为  $2.23 \times 10^{-3}$ ,而 RAC-SC 和 RAC-SF 的峰值应变分别降低 10.0% 和 17.1%,但变异系数变化不明显。在应变率为  $10^{-1} \text{s}^{-1}$  时,不同混凝土的峰值应变变化情况与应变率为  $10^{-3} \text{s}^{-1}$  的情况相似。与 RAC 相比,RAC-S 的平均峰值应变增加 1.6%,而 RAC-SC 和 RAC-SF 的峰值应变分别降低 11.0% 和 19.3%。

综上,应变率为  $10^{-3} \text{s}^{-1}$  和  $10^{-1} \text{s}^{-1}$  时,纳米二氧化硅预浸泡的过程对再生混凝土的峰值应变影响较小。纳米二氧化硅与水泥净浆二次强化再生粗骨料的方法对老砂浆的强化起到了减小混凝土峰值应变的作用。

2.3.3 不同改性方法对弹性模量的影响

图 8 给出了改性后再生混凝土在不同应变率下的弹性模量,随着应变率的增加,各组混凝土的弹性模量均有明显的增长趋势,弹性模量与应变率呈正相关关系。

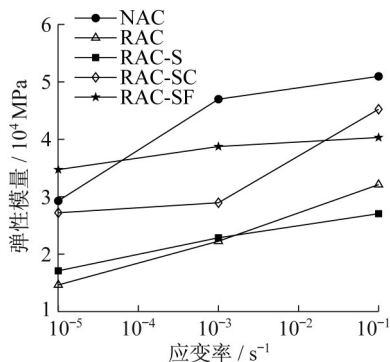


图 8 应变率对混凝土弹性模量的影响

Fig. 8 Influence of strain rate on elastic modulus of concrete

在应变率为  $10^{-5} \text{s}^{-1}$  时,RAC 的弹性模量为  $1.46 \times 10^4 \text{MPa}$ (变异系数为 0.21),为所有试件中的

最小值,NAC 弹性模量为  $2.93 \times 10^4 \text{MPa}$ ,比 RAC 提高了 100%。与 RAC 相比,RAC-S、RAC-SC 和 RAC-SF 的弹性模量分别提高 16.8%、85.8% 和 137.2%,与峰值应力情况相似,纳米二氧化硅和水泥净浆改性改善了再生混凝土的界面性能,提高了准静态加载下的弹性模量。在应变率为  $10^{-3} \text{s}^{-1}$  时,RAC 的弹性模量为  $2.23 \times 10^4 \text{MPa}$ (变异系数为 0.35),为所有试件中的最小值。NAC 的弹性模量为  $4.70 \times 10^4 \text{MPa}$ ,为所有试件中的最大值。与 RAC 相比,RAC-S、RAC-SC 和 RAC-SF 的弹性模量分别增长 2.7%、30.1% 和 74.1%,变异系数降低,分别为 0.21、0.30 和 0.32。在应变率为  $10^{-1} \text{s}^{-1}$  时,与 RAC(变异系数为 0.38)相比,RAC-S 的弹性模量为  $2.70 \times 10^4 \text{MPa}$ ,降低 15.8%,而 RAC-SC 和 RAC-SF 的弹性模量分别增长 40.9% 和 25.6%。此外,RAC-S、RAC-SC 和 RAC-SF 的弹性模量变异系数降低,分别为 0.20、0.13 和 0.26。

综上,纳米二氧化硅预浸泡的过程对再生混凝土的弹性模量影响较小,其他 2 种改性方法均能在不同应变率下显著提升再生混凝土的弹性模量。3 种改性方法在应变率为  $10^{-3} \text{s}^{-1}$  和  $10^{-1} \text{s}^{-1}$  时,可降低再生混凝土弹性模量的变异系数。

2.4 应变率效应分析

2.4.1 应变率对峰值应力动态增长因子的影响

图 9 为应变率对各组混凝土峰值应力动态增长因子  $D_f$  的影响对比。5 组混凝土中,RAC 对应变率的敏感性最强,在应变率为  $10^{-3} \text{s}^{-1}$  时, $D_f$  为 1.33;在应变率为  $10^{-1} \text{s}^{-1}$  时, $D_f$  为 1.60。NAC 的应变率敏感性比 RAC 稍弱,在应变率分别为  $10^{-3} \text{s}^{-1}$  和  $10^{-1} \text{s}^{-1}$  时,峰值应力分别增加了 25.1% 和 53.0%。

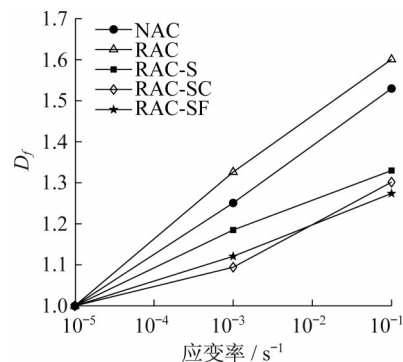


图 9 应变率对混凝土峰值应力动态增长因子的影响

Fig. 9 Effect of strain rate on  $D_f$  of concrete

RAC-S、RAC-SC 和 RAC-SF 的  $D_f$  明显低于 NAC 和 RAC,  $10^{-3} \text{s}^{-1}$  应变率下分别为 1.18、1.09 和



1.12;  $10^{-1}\text{s}^{-1}$  应变率下分别为 1.33、1.30 和 1.27。可知, RAC-S 的  $D_i$  在 2 个应变率下均大于其他 2 组, RAC-SC 的  $D_i$  在应变率为  $10^{-3}\text{s}^{-1}$  时小于 RAC-SF, 但是在应变率为  $10^{-1}\text{s}^{-1}$  时却大于 RAC-SF。

3 种改性方法均降低了再生混凝土峰值应力的应变率敏感性。在纳米二氧化硅的基础上, 附加水泥净浆处理或者添加粉煤灰将改变再生混凝土的微观孔隙结构, 进而降低再生混凝土峰值应力的应变率敏感性。

#### 2.4.2 应变率对峰值应变动态增长因子的影响

图 10 为应变率对各组混凝土平均峰值应变动态增长因子  $D_\epsilon$  的影响对比。与 RAC 相比, 改性后再生混凝土的  $D_\epsilon$  增加, 例如应变率为  $10^{-3}\text{s}^{-1}$  时, RAC 的  $D_\epsilon$  为 0.86, RAC-S、RAC-SC 和 RAC-SF 的  $D_\epsilon$  分别为 0.97、0.95 和 1.05; 应变率为  $10^{-1}\text{s}^{-1}$  时, RAC 的  $D_\epsilon$  为 0.85, RAC-S、RAC-SC 和 RAC-SF 的  $D_\epsilon$  分别为 0.96、0.92 和 1.01。此外 RAC-SF 的  $D_\epsilon$  大于 NAC。

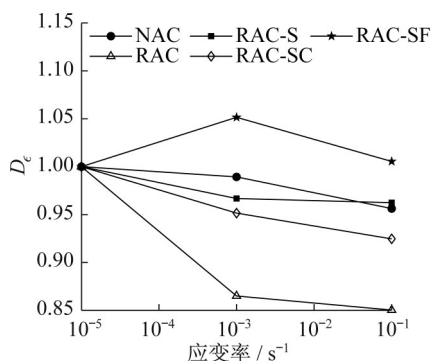


图 10 应变率对混凝土平均峰值应变动态增长因子的影响  
Fig. 10 Effect of strain rate on  $D_\epsilon$  of concrete

#### 2.4.3 应变率对弹性模量动态增长因子的影响

图 11 为应变率对各组混凝土平均弹性模量动态增长因子  $D_E$  的影响对比。NAC 和 RAC 的弹性模量对应变率的敏感性较强, 在应变率为  $10^{-3}\text{s}^{-1}$  时, NAC 的  $D_E$  为 1.60, 应变率为  $10^{-1}\text{s}^{-1}$  时,  $D_E$  为 1.74。应变率为  $10^{-3}\text{s}^{-1}$  时, RAC 对应变率的敏感性略低于 NAC,  $D_E$  为 1.52, 而应变率为  $10^{-1}\text{s}^{-1}$  时,  $D_E$  增加到 2.19。

RAC-S、RAC-SC 与 RAC-SF 的弹性模量虽然随着应变率的增加而增加, 但是从  $D_E$  趋势中可以看出, 其弹性模量动态增长因子低于 NAC 与 RAC 的对应值。在 3 组混凝土中, 应变率为  $10^{-3}\text{s}^{-1}$  时, RAC-S 的弹性模量动态增长因子为 1.34, RAC-SC 与 RAC-SF 相近, 分别为 1.06 和 1.12; 在应变率为

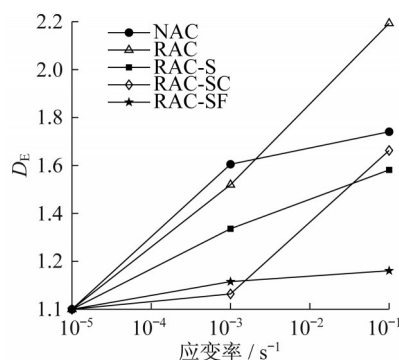


图 11 应变率对混凝土平均弹性模量动态增长因子的影响  
Fig. 11 Effect of strain rate on  $D_E$  of concrete

$10^{-1}\text{s}^{-1}$  时, RAC-S 和 RAC-SC 的  $D_E$  分别为 1.58 和 1.66, RAC-SF 的  $D_E$  随着应变率的增大有增加的趋势, 但是增加的幅度非常微小, 这主要是由于粉煤灰的加入改变了再生混凝土的微观孔隙结构, 降低了应变率敏感性。

### 3 改性再生混凝土动态本构模型

Xiao 等<sup>[6]</sup>提出了考虑再生粗骨料取代率的再生混凝土单轴受压本构模型, 但是并未涉及改性及动态响应特征。结合前文分析得到的峰值应力、峰值应变率敏感性结论, 进一步考虑应变率对再生混凝土受力变形特征的影响, 提出以准静态峰值应力和峰值应变为参数的改性再生混凝土动态单轴受压应力-应变本构模型。

#### 3.1 模型预测与对比

Xiao 等<sup>[6,14]</sup>分别在 2005 年和 2018 年总结了再生混凝土的单轴受压应力-应变关系, 分别记为模型 2005(式(1)、式(2)、式(3))和模型 2018(式(4)、式(5)、式(6))。

模型 2005<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \begin{cases} a\eta + (3-2a)\eta^2 + (a-2)\eta^3, & 0 \leq \eta < 1 \\ \frac{\eta}{b(\eta-1)^2 + \eta}, & \eta \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

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

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

式中:  $\sigma_c$  为受压应力;  $f_{cm}$  为轴心抗压强度均值;  $\eta = \epsilon_c / \epsilon_{cp}$ ,  $\epsilon_c$  为受压应变,  $\epsilon_{cp}$  为峰值应变;  $a$ 、 $b$  为拟合系数;  $r$  为再生粗骨料取代率。

模型 2018<sup>[14]</sup>:

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_c \epsilon_c \quad (4)$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c m}{m - 1 + \eta^m}, & 0 \leq \eta < 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (\eta - 1)^2 + \eta}, & \eta > 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$\alpha_c = 0.157 \sigma_{cp}^{0.785} - 0.905 \quad (6)$$

式中： $d_c$ 为损伤因子； $E_c$ 为弹性模量；

$\rho_c = \sigma_{cp} / (E_c \epsilon_{cp})$ ； $m = E_c \epsilon_{cp} / (E_c \epsilon_{cp} - \sigma_{cp})$ ； $\sigma_{cp}$ 为峰值应力； $\alpha_c$ 为下降段形状系数，由式(6)确定。

将试验测得的不同应变率下的峰值应力、峰值应变和弹性模量等数据代入上述模型，预测曲线和试验测试曲线对比见图12。

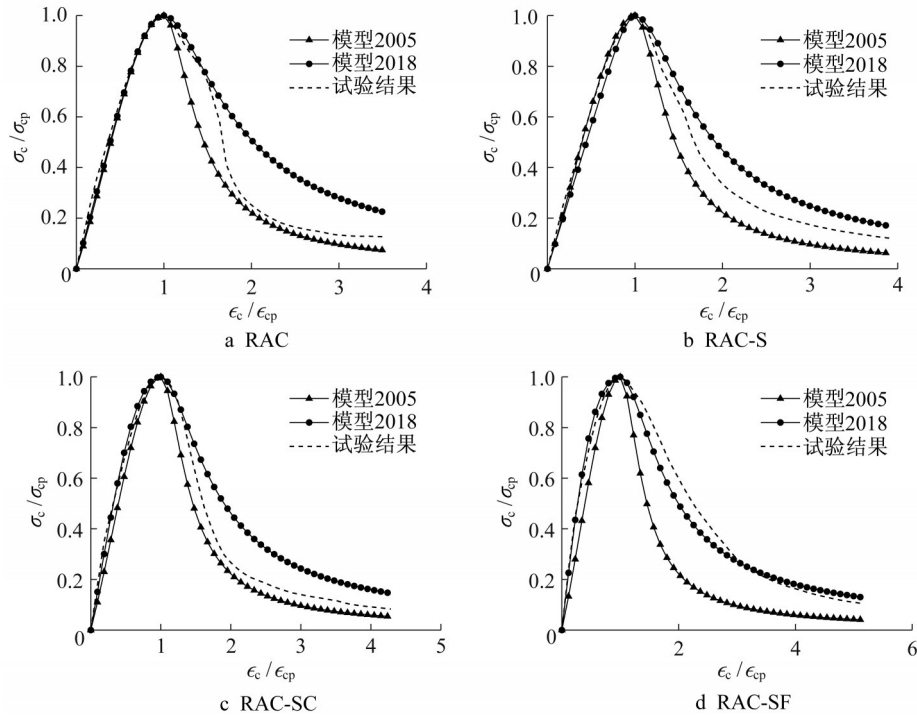


图12 预测曲线与试验曲线的对比

Fig. 12 Comparison of predicted curves and tested curves

由模型预测曲线与试验曲线的对比可知,对于应力-应变曲线的上升段,2种模型的预测曲线与实验结果比较吻合。对于下降段,不同模型的预测效果不同,模型2018的预测结果比模型2005更为平缓。对于RAC,图12a显示模型2018对下降段的初始预测要好于模型2005;对于RAC-S,图12b显示模型2005与模型2018的预测效果相当;RAC-SC的情况与RAC类似,模型2018对下降段的初始预测要好于模型2005,如图12c所示;对于RAC-SF,可以看出,模型2018对下降段的预测要好于模型2005,如图12d所示。

### 3.2 动态本构模型

基于试验数据,观察发现试验所得动态增长因子与应变率的对数有明显的线性相关性,参考现有文献<sup>[15]</sup>,对试验得到的动态增长因子与应变率的对数进行线性拟合,得到动态增长因子的预测公式,见表7。由于峰值应变的动态增长因子与应变率的线性关系不明显,且其变化趋势随应变率增加逐渐平

缓,因此,本文暂不考虑峰值应变的变化<sup>[15]</sup>。

表7 再生混凝土动态增长因子

Tab. 7 Dynamic increase factor of recycled aggregate concrete

再生混凝土类别	$D_f$	$R^2$	$D_E$	$R^2$
RAC	1.76+0.15lgε	0.998	2.46+0.30lgε	0.994
RAC-S	1.42+0.08lgε	0.995	1.74+0.15lgε	0.992
RAC-SC	1.36+0.08lgε	0.953	1.74+0.17lgε	0.783
RAC-SF	1.34+0.07lgε	0.995	1.21+0.04lgε	0.937

选取模型2018用来描述改性再生混凝土的动态本构关系,非准静态应变率下的峰值应力和弹性模量按照表7建立的关系确定,通过试验数据拟合得到改性再生混凝土的下降段系数,取值见表8。

表8 下降段修正系数

Tab. 8 Modified factor of descending branch

应变率/s <sup>-1</sup>	RAC-S	RAC-SC	RAC-SF
10 <sup>-5</sup>	3.61	4.65	1.50
10 <sup>-3</sup>	6.32	4.67	1.99
10 <sup>-1</sup>	6.35	4.51	2.32



将修正后的降段系数代入模型2018,预测曲线和试验测试曲线对比见图13-15。可知模型修正后可以很好地描述改性再生混凝土在不同应变率下的应力-应变关系。

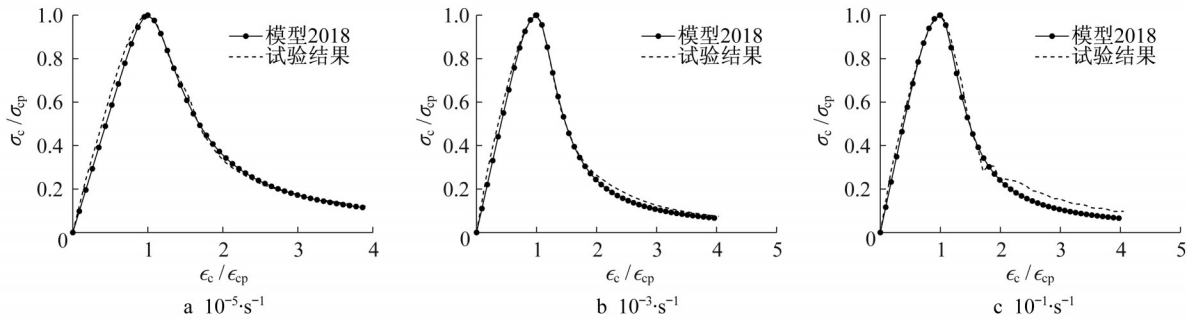


图13 修正模型预测曲线与RAC-S试验曲线的对比

Fig. 13 Comparison between predicted curve of modified model and tested curve of RAC-S

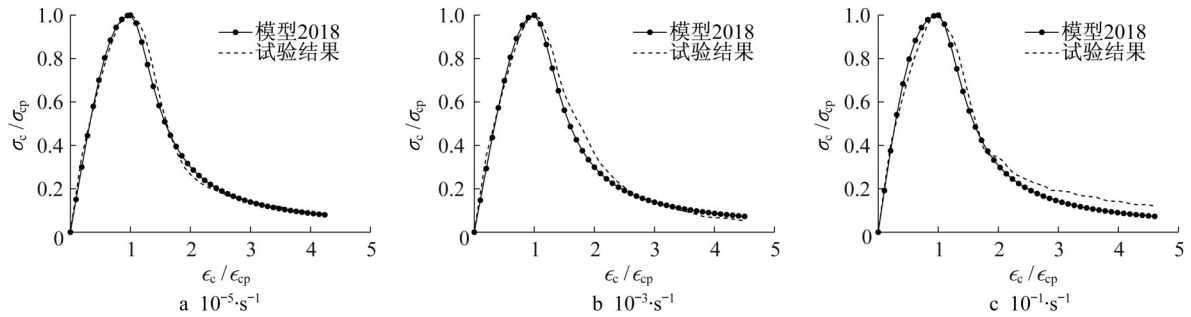


图14 修正模型预测曲线与RAC-SC试验曲线的对比

Fig. 14 Comparison between predicted curve of modified model and tested curve of RAC-SC

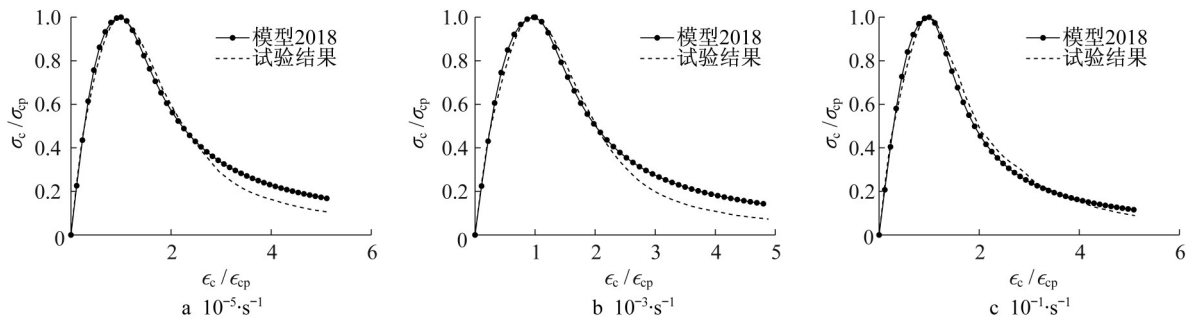


图15 修正模型预测曲线与RAC-SF试验曲线的对比

Fig. 15 Comparison between the predicted curve of modified model and tested curve of RAC-SF

至此,改性再生混凝土在不同应变率下的应力-应变模型已经建立,静态应力-应变模型表达式见式(4)、(5)、(6)。在动态应力-应变模型中,峰值应力和弹性模量动态增长因子按表7建立的关系确定,然后根据式(7)和(8)确定动态峰值应力 $\sigma_{d,cp}$ 和动态弹性模量 $E_{d,c}$ ,下降段形状系数按表8确定,代入静态应力-应变模型得到动态应力-应变曲线预测模型。

$$\sigma_{d,cp} = D_f \cdot \sigma_{cp} \quad (7)$$

$$E_{d,c} = D_E \cdot E_c \quad (8)$$

## 4 结语

提出了一种纳米二氧化硅改性再生粗骨料的方法,通过混凝土单轴受压动态力学试验,获得了改性后再生混凝土的应力-应变曲线,在本文的研究条件下,得到以下主要结论:

(1)提出的纳米二氧化硅水泥净浆二次改性方法能够有效提高再生混凝土的力学性能,与RAC相比,准静态下峰值应力提升25.1%,峰值应变减小18.2%,弹性模量增加85.8%;应变率为 $10^{-3} \text{s}^{-1}$ 时,峰

值应力提升3.2%,峰值应变减小10.0%,弹性模量增加30.1%;应变率为 $10^{-1}\text{s}^{-1}$ 时,峰值应力提升1.7%,峰值应变减小11.0%,弹性模量增加40.9%。

(2)与再生混凝土相比,在相同应变率下,纳米二氧化硅改性后再生混凝土峰值应力的动态增长因子 $D_f$ 降低,弹性模量的动态增长因子 $D_E$ 降低,而峰值应变的动态增长因子 $D_\epsilon$ 提高。 $10^{-1}\text{s}^{-1}$ 应变率下RAC的 $D_f$ 为1.60, $D_E$ 为2.19, $D_\epsilon$ 为0.85;RAC-SC的 $D_f$ 为1.30, $D_E$ 为1.66, $D_\epsilon$ 为0.92。

(3)以再生混凝土静态本构模型为基础,结合动态增长因子,对下降段进行修正,建立了考虑应变率效应的再生混凝土的动态本构模型,能够准确描述改性后再生混凝土在不同应变率下的单轴受压应力-应变曲线特征。

(4)本文得到的不同应变率下改性再生混凝土的峰值应力、峰值应变、弹性模量等特征指标规律以及建立的纳米二氧化硅改性后再生混凝土的应力-应变模型,是基于本文特定条件下得到的试验结果提出的。此外,本文中的最大应变率为 $10^{-1}\text{s}^{-1}$ ,对于高于此应变率的情况,以及混凝土强度等级、试件尺寸等的影响,模型的通用性还需要进一步的研究进行验证。

#### 作者贡献申明:

肖建庄:研究思路、论文撰写与修改、数据校核。

李 标:试验操作、论文撰写。

张凯建:试验操作、论文撰写与修改、数据计算。

苏亚武:论文修改与数据分析。

潘玉珀:论文修改与数据应用。

#### 参考文献:

- [1] XIAO J Z. Recycled aggregate concrete structures [M]. Berlin: Springer, 2018.
- [2] FRONDISTOU-YANNAS S. Waste concrete as aggregate for new concrete [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1977, 74(8): 373.
- [3] KOU S C, CHI S P, CHAN D. Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(9): 709.
- [4] 肖建庄,李佳彬,孙振平,等.再生混凝土的抗压强度研究[J].同济大学学报(自然科学版),2004(12):1558.
- [5] XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, SUN Zhenping, *et al.* Study on compressive strength of recycled aggregate concrete [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2004 (12): 1558.
- [6] TANG Z, LI W, TAM V W Y, *et al.* Investigation on dynamic mechanical properties of fly ash/slag-based geopolymetric recycled aggregate concrete [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 185: 107776.
- [7] XIAO J Z, LI J, ZHANG C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(6): 1187.
- [8] LI W G, LONG C, TAM V W Y, *et al.* Effects of nanoparticles on failure process and microstructural properties of recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 142: 42.
- [9] WANG Y G, LI S P, PETER H, *et al.* Mechanical properties and microstructure of basalt fibre and nano-silica reinforced recycled concrete after exposure to elevated temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2020, 247: 118561.
- [10] SINGH N B, KALRA M, SAXENA S K. Nanoscience of cement and concrete [J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(4):5478.
- [11] LI W G, LUO Z Y, LONG C, *et al.* Effects of nanoparticle on the dynamic behaviors of recycled aggregate concrete under impact loading [J]. Materials & Design, 2016, 112: 58.
- [12] 肖建庄,李标,杨钱荣,等.复合改性再生混凝土抗氯离子渗透性能[J].混凝土与水泥制品,2019(10):1.
- [13] XIAO Jianzhuang, LI Biao, YANG Qianrong, *et al.* Chloride penetration resistance of composite modified recycled aggregate concrete [J]. Concrete and Cement Products, 2019(10): 1.
- [14] 肖建庄,陈祥磊,李标,等.纳米 $\text{SiO}_2$ 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(1):26.
- [15] XIAO Jianzhuang, CHEN Xianglei, LI Biao, *et al.* Effects of nano- $\text{SiO}_2$  and fly ash on the chloride penetration resistance of composite modified recycled aggregate concrete [J]. Journal of Building Science and Engineering, 2020(1): 26.
- [16] SHAIKH F, CHAVDA V, MINHAJ N, *et al.* Effect of mixing methods of nano silica on properties of recycled aggregate concrete [J]. Structural Concrete, 2018, 19(2): 387.
- [17] XIAO J Z, ZHANG K J, AKBARNEZHAD A. Variability of stress-strain relationship for recycled aggregate concrete under uniaxial compression loading [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 181: 753.
- [18] 李龙,肖建庄,黄凯文.再生混凝土力学性能的应变率敏感性数值模拟[J].东南大学学报(自然科学版),2017,47(4):776.
- [19] LI Long, XIAO Jianzhuang, HUANG Kaiwen. Numerical simulation on strain-rate sensitivity of mechanical properties of recycled aggregate concrete [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(4): 776.