

文章编号: 1001-4888(2023)05-0645-10

# 循环荷载作用下聚丙烯纤维再生混凝土受压性能试验研究\*

吴辉琴<sup>1</sup>, 朱真<sup>1</sup>, 陈宇良<sup>1</sup>, 梁海区<sup>2</sup>

(1. 广西科技大学 土木建筑工程学院, 广西柳州 545006; 2. 广西鱼峰混凝土有限公司, 广西柳州 545006)

**摘要:** 为研究循环荷载作用下聚丙烯纤维再生混凝土(PFRAC)的力学性能,以粗骨料取代率、纤维掺量、加载速率为变化参数,设计了 78 个圆柱体试件进行单轴循环受压试验。通过试验观察 PFRAC 的破坏形态,获取了应力-应变曲线、峰值应力、峰值应变、刚度退化等重要指标,研究了不同变化参数对其力学性能指标的影响规律,得到了循环荷载作用下聚丙烯纤维对再生混凝土的阻裂机理。结果表明:循环荷载作用下 PFRAC 主要发生斜向劈裂破坏;随着聚丙烯纤维掺量的增加,试件表面主裂缝宽度减小;循环荷载下 PFRAC 试件受压应力-应变曲线包络线与单调受压应力-应变曲线相似;聚丙烯纤维的加入可显著改善 PFRAC 循环荷载下的力学性能,随着纤维掺量的增加,峰值应力、弹性刚度比先增大后减小;纤维掺量为 0.9% 时的纤维改性效果最优,峰值应力和峰值刚度比分别提高了 4.4% 和 7.4%。

**关键词:** 再生混凝土; 聚丙烯纤维; 单轴循环受压试验; 应力-应变曲线; 刚度退化

**中图分类号:** TU528 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-238

## 0 引言

再生骨料混凝土(Recycled Aggregate Concrete,简称 RAC)技术是回收利用建筑垃圾的有效方法,该方法可以有效解决废弃混凝土的处理问题,实现建筑材料的可持续循环利用,有良好的应用前景<sup>[1-2]</sup>。李佳彬等<sup>[3]</sup>研究了再生混凝土的基本性能,结果表明再生粗骨料的基本性能与天然骨料相比存在一定差异,这表明 RAC 的材料性能有别于天然骨料混凝土<sup>[4-5]</sup>(Natural Aggregate Concrete,简称 NAC)。

为解决 RCA 因骨料问题引起的性能缺陷,国内外许多学者尝试在 RAC 中掺加不同纤维来改善其力学性能<sup>[6-9]</sup>,加入纤维可以提高混凝土的强度、韧性和能量吸收能力,还可以改善混凝土的延性<sup>[10]</sup>。其中聚丙烯纤维(Polypropylene Fiber,简称 PF)由于具有耐久性好、性价比高、耐腐蚀性好、稳定性高和疏水性好等优点<sup>[11]</sup>,已逐渐被应用于混凝土结构中<sup>[12-13]</sup>。Liu 等<sup>[14]</sup>发现混凝土中加入聚丙烯纤维可以提高混凝土的抗裂性能,优化混凝土中的孔径分布;徐礼华等<sup>[15]</sup>通过试验研究发现,混凝土中加入 PF 可显著改善混凝土的循环受压力学行为;Ahmed 等<sup>[16]</sup>对再生骨料高强聚丙烯纤维混凝土的性能进行了研究,发现 PF 的加入使再生混凝土的力学性能提高了 0.6%;Serrano 等<sup>[17]</sup>通过试验发现,高温下混凝土中加入聚丙烯纤维可以降低混凝土中的孔隙压力,提升混凝土在火灾中的强度,延缓裂缝的出现

\* 收稿日期: 2022-09-22; 修回日期: 2022-11-19

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2021M693854);柳州欧维姆机械股份有限公司博士后科研工作站科研项目(202123);广西科技大学博士基金项目(校科博 18209)

通信作者: 陈宇良(1987-),男,博士,副教授。主要从事再生混凝土结构、钢-混凝土组合结构研究。Email: ylchen@gxust.edu.cn

和混凝土爆炸性的剥落。

为探索 PFRAC 循环荷载作用下的受压机理,本文以 PFRAC 为研究对象,分析了 RCA 的取代率、PF 体积掺量和加载速率对其循环受压力学性能的影响,并探讨了 PFRAC 循环荷载作用下的刚度退化机理,以期对 RAC 理论研究提供参考。

## 1 试验概况


### 1.1 试验材料

试验采用的普通硅酸盐水泥种类为 P·O 42.5,细骨料采用细度模数为 2.38 的天然河砂,拌和用水采用城市自来水。粗骨料包括天然碎石骨料(Natural Coarse Aggregates,简称 NCA)和 RCA, RCA 来自实验室的废弃混凝土,由颚式破碎机破碎,然后经过筛选和清洗得到。参照《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685—2022)试验方法<sup>[18]</sup>,测得 NCA 和 RCA 的物理性能,具体数据见表 1。由表 1 可得: NCA 和 RCA 粒径为 5mm~20mm;RCA 的表观密度和体积密度比 NCA 低;而 RCA 的含水量、吸水率和压碎指数都比 NCA 高,这是由于 RCA 周围存在旧的砂浆黏附所致。PF 采用束状单丝形状,其主要物理性能见表 2。

表 1 粗骨料物理性能  
Tab.1 Properties of coarse aggregate

骨料	含水量 /%	吸水率 /%	表观密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	体积密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	压碎指数 /%
NCA	0.07	0.43	2703.9	1499.9	17.15
RCA	1.55	5.35	2599.6	1321.3	25.63

表 2 纤维主要参数  
Tab.2 Major properties of fibers

纤维类型	直径/mm	长径比	密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	抗拉强度 /MPa	材料类型	纤维图片
PF	0.048	167	0.9	>400	单丝状	

### 1.2 试验设计与制作

#### 1.2.1 试验设计

试验考虑 3 种变化参数:RCA 的取代率( $r$ )为 0%、30%、50%、70%、100%;PF 掺量( $V_{PF}$ )为 0%、0.6%、0.9%、1.2%;加载速率( $v$ )为 0.001mm/s、0.002mm/s、0.005mm/s。根据以上参数设计了 13 组试件,每组 6 个(3 个单调受压及 3 个循环受压),共计 78 个直径 150mm、高 300mm 的圆柱体试件进行循环受压试验,试件具体设计参数见表 3。试件编号以 RCA 取代率、PF 掺量及加载速率命名,例如 R30P9V2 表示试件参数为  $r=30%$ 、 $V_{PF}=0.9%$ 、 $v=0.002$ mm/s。

表3 试件参数设计及基本力学性能

Tab. 3 Parameter design and basic mechanical properties of specimens

试件编号	取代率/%	加载速率 ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	纤维掺量 /%	轴心抗压 强度/MPa	峰值应力 /MPa	峰值应变 $\times 10^{-3}$	弹性模量 /GPa
R0P0V5	0	0.005	0.0	28.66	29.89	4.33	6.9
R100P0V5	100	0.005	0.0	35.79	36.65	4.26	8.6
R100P0V2	100	0.002	0.0	34.89	34.08	3.89	8.8
R100P6V1	100	0.001	0.6	38.99	37.99	4.35	8.7
R100P6V2	100	0.002	0.6	41.90	40.50	4.37	9.3
R100P12V1	100	0.001	1.2	39.28	41.01	4.52	9.1
R100P12V2	100	0.002	1.2	40.02	40.78	4.34	9.4
R0P9V2	0	0.002	0.9	40.00	38.46	3.97	9.7
R30P9V2	30	0.002	0.9	40.62	38.86	4.40	8.8
R50P9V2	50	0.002	0.9	41.16	43.48	4.16	10.5
R70P9V2	70	0.002	0.9	40.59	41.47	4.04	10.3
R100P9V2	100	0.002	0.9	41.91	42.30	4.54	8.6
R100P9V5	100	0.005	0.9	36.36	41.48	4.13	9.3

注： $r=100\%$ 、 $V_{PF}=0.9\%$ 、 $v=0.005\text{mm/s}$  的这一组试件由于加载速率过快，导致试件过早破坏而未完成 10 个循环，因此不进行对比分析。

### 1.2.2 配合比设计及试件制作

试验中由于 RCA 表面附着旧砂浆，导致 RCA 吸水率高于 NCA，为确保各组试件实际水胶比一致，在实际浇筑过程中需添加附加水，具体配合比详见表 4。

表4 RAC 配合比

Tab. 4 Mix proportion of RAC

取代率/%	混凝土材料/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )					
	水泥	砂	天然粗骨料	再生粗骨料	水	附加水
0	500	542	1153.0	0.0	215.0	0.0
30	500	542	807.1	345.9	215.0	7.5
50	500	542	576.5	576.5	215.0	12.5
70	500	542	345.9	807.1	215.0	17.5
100	500	542	0.0	1153.0	215.0	25.0

本文试验浇筑步骤参照《纤维混凝土试验方法标准》CECS 13:2009<sup>[19]</sup>。试验浇筑仪器为强制式搅拌机。浇筑时采用先干后湿的搅拌工艺，搅拌过程中 PF 分布均匀，骨料拌合良好。搅拌结束后将其入模、振捣、脱模，并自然养护至 28 天后进行循环受压试验。

### 1.3 加载装置和加载制度

试验采用图 1 所示的 RMT-301 试验机进行加载。加载时先对试件进行预加载，达到峰值荷载的 10% 后卸载至 0，之后进行正式加载。对于单调受压试验，采用位移控制加载；对于循环受压试验，采用荷载和位移混合控制：首先以位移控制加载，拟定速率为 0.001mm/s、0.002mm/s、0.005mm/s，然后以 2kN/s 的速率卸载，直至荷载为 0，共进行 10 次加卸载循环，每次循环的位移梯度增量为 0.5mm。循环试验加载制度示意图如图 2 所示。



图1 循环加载试验设备  
Fig.1 Test loading diagram

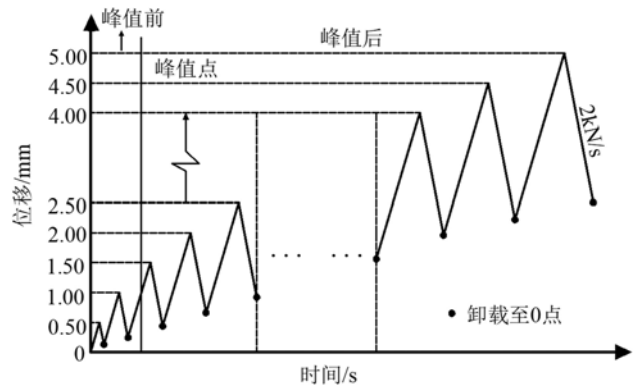


图2 循环试验加载制度示意图  
Fig.2 Loading system diagram of cyclic test

## 2 结果与讨论

### 2.1 破坏形态

图3为循环受压试件典型破坏形态图。由图3(a)可见,天然混凝土试件为竖向劈裂破坏,混凝土表面出现多条竖向裂缝,主裂缝宽度较小,且主裂缝周围存在许多小裂缝;图3(b)为再生混凝土试件,其主要破坏形式为斜向劈裂破坏,表面主裂缝宽度明显大于天然混凝土,且主裂缝周围的混凝土存在大块剥落现象。



图3 典型试件破坏形态图  
Fig.3 Typical failure pattern of specimens

掺入纤维后试件的破坏形式主要为斜向劈裂破坏。由图3(c)~(e)可见,随着再生骨料取代率的提高,PFRAC试件的裂缝宽度逐渐减小,斜向裂缝角度随着再生骨料取代率的增加而减小。与聚丙烯纤维混凝土<sup>[15]</sup>试件的破坏形态相比,PFRAC的主裂缝宽度更大、破坏更严重。对比图3(e)~(g)可知,R100P9V2的裂缝宽度最小,说明加入适量的纤维可以减小PFRAC开裂时的裂缝宽度。与钢纤维再生混凝土<sup>[6]</sup>相比,PFRAC的宏观裂缝宽度更大,试件中部呈外鼓状破坏形态,其表面含有较多的“鱼

鳞状”龟裂纹。这是由于 PF 在裂缝处的桥接作用,提高了混凝土基体的抗裂性和变形能力所致。作为微观尺度纤维,PF 的主要作用是抑制微观裂缝发展为宏观裂缝<sup>[11]</sup>,在抑制裂缝发展的过程中 PF 起到了一定的阻裂效果,但其弹性模量较小,受到较大荷载时易被拉断。当 PF 与钢纤维相比时,由于钢纤维是宏观尺度纤维,有着抗拉强度高、弹性模量大的优点,且钢纤维与混凝土基体之间存在明显的界面黏接滑移作用,受到荷载作用时不易被拉断,因此其主要作用是抑制试件宏观裂缝的发展<sup>[20]</sup>。

### 2.2 应力-应变曲线

图 4 为典型 PFRAC 试件在循环荷载作用下的应力-应变曲线。由图可见,RAC 的峰值应力大于 NAC,而 RAC 的应力-应变曲线在达到峰值点后迅速下降,且在加载结束时的残余应力较小。相同条件下,随着  $r$  的提高,试件的残余应力先增大后减小。

对于 PFRAC,其包络线与单调加载的曲线基本一致,在前两次加卸载循环中,试件的卸载曲线与再加载曲线重合度较高,加载阶段的弹性模量变化不大。在第二次加卸载循环过程中,曲线达到峰值点,在达到峰值点后 PFRAC 的应力-应变曲线下降较为平缓。与未掺纤维的 RAC 相比,加入 VPF 为 0.6%、0.9%、1.2% 时,RAC 峰值应力分别提高了 18.8%、24.1%、19.7%,峰值应变分别提高了 12.3%、16.7%、11.6%。其原因是纤维的黏结作用,在一定程度上提高了 RAC 的强度。

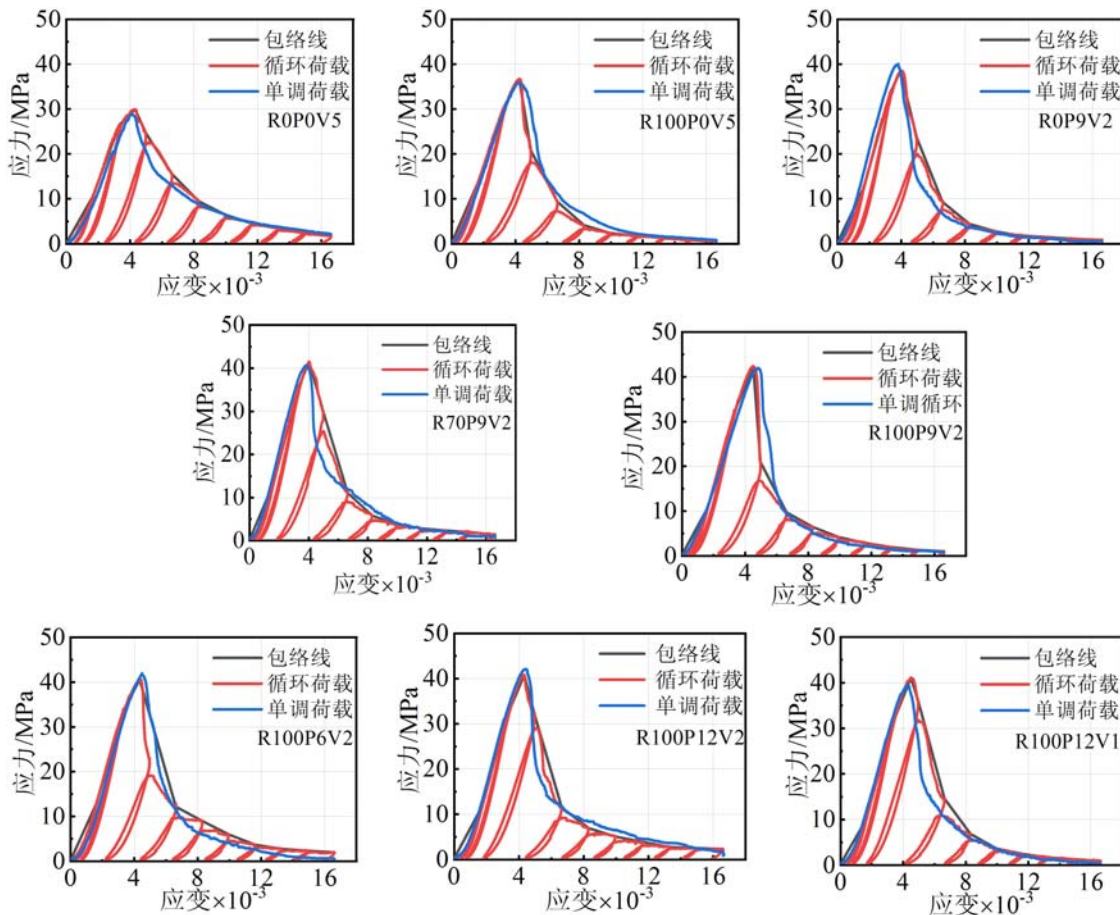


图 4 循环受压应力-应变曲线

Fig. 4 Cyclic compressive stress-strain curve

### 2.3 循环受压全过程分析

图 5 为 PFRAC 循环受压全过程示意图。由图可见,PFRAC 试件的循环受压全过程分为 6 个阶段<sup>[6,15]</sup>:①OA 段为弹性阶段,混凝土应力-应变曲线趋于一条直线,其斜率为试件弹性模量值,此阶段试件表面未出现裂纹。②AB 段为初始裂纹发展阶段,此阶段曲线斜率变小,混凝土达到屈服点,试件内部微裂纹开始发展延伸,PF 开始发挥作用。随着荷载的不断增大,观察到试件表面出现肉眼可见的裂纹,且裂纹宽度逐渐增大。③BC 段为宏观裂缝发展阶段,试件承载力稍有上升,达到峰值应力后开始

逐渐降低。PFRAC 所受到的压应力值超过峰值应力的 80%，试件表面的裂纹逐渐扩展成明显的竖向宏观裂缝。裂缝周围 PF 的桥接作用十分明显，伴随着裂缝宽度的增大，纤维承受的拉力增大，有被拔出的趋势。④CD 段为塑性阶段，试件表面裂缝开始大量出现并快速发展，形成贯通的斜裂缝。加载过程中伴有持续密集的骨料断裂的噼啪声，此阶段体现出加入 PF 有明显的阻裂效果。⑤DE 段为持续破坏阶段，试件开裂处有混凝土剥落，随着荷载的持续作用，裂缝宽度不断增加。⑥EF 段为稳定阶段，试件表面宏观裂缝不再扩展，曲线趋于平缓，试件最终发生破坏。

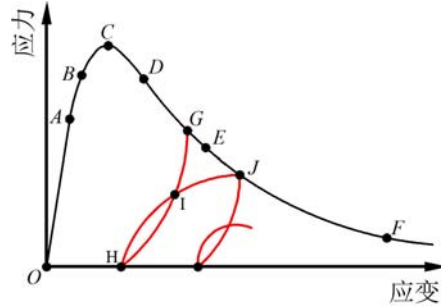


图 5 PFRAC 试件循环受压全过程示意图

Fig. 5 The whole process diagram of PFRAC specimens under cyclic compression

### 3 影响因素分析

#### 3.1 RCA 取代率的影响

图 6(a) 为  $V_{PF}=0.9\%$ 、 $v=0.002\text{mm/s}$  时 RCA 各取代率下峰值应力之间的关系。由图可见，随着  $r$  的增加，PFRAC 试件循环受压峰值应力整体呈上升趋势。这是因为 RCA 表面较为粗糙，增大了界面摩擦力，所以开裂时的骨料咬合力增大，从而提高了混凝土的峰值应力。当  $r$  不大于 50% 时，PFRAC 的峰值应力随  $r$  的增加而增大，且  $r=50\%$  时的峰值应力增幅最大，与  $r=0\%$  相比提高了 13%；当  $r$  超过 50% 时，PFRAC 的峰值应力下降，主要原因在于 RCA 在制备过程中，需要将其破碎，使其表面存在微裂缝，形成薄弱界面，造成了混凝土强度的损伤，且 RCA 表面附着的旧砂浆会增大混凝土内部的孔隙率<sup>[21]</sup>。随着  $r$  的增加，混凝土的薄弱界面和孔隙率增多，导致混凝土的峰值应力降低。

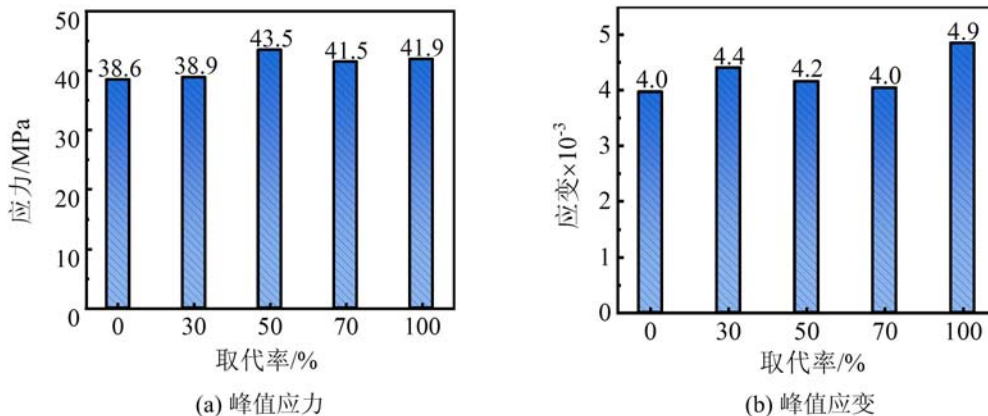


图 6 RCA 取代率对峰值点的影响

Fig. 6 Effect of replacement rate of RCA on peak point

图 6(b) 为  $V_{PF}=0.9\%$ 、 $v=0.002\text{mm/s}$  时，RAC 各取代率下峰值应变之间的关系。由图可见，与  $r=0\%$  时的峰值应变相比， $r=70\%$  时增幅最小，为 1.8%， $r=100\%$  时增幅最大，为 20%。随着  $r$  的增加，RAC 的峰值应变呈先下降后上升的趋势，其主要原因在于：与 NCA 相比，RCA 经过破碎，表面存在水泥基体及微裂纹，与新水泥基体之间的界面较为薄弱，导致试件的变形能力下降，但 RCA 附着的旧砂浆也增加了混凝土内部胶凝体的含量，而胶凝体含量的增加会提高混凝土的变形能力<sup>[22]</sup>。综合来说，在循环荷载作用下，随着  $r$  的增大，试件的峰值应变呈下降趋势，在  $r$  小于 70% 时，RCA 本身的缺陷

带来的负面影响较大； $r$  大于 70% 时，胶凝体带来的正面影响占比较大。

### 3.2 PF 掺量的影响

当  $r=100\%$  时，PF 掺量对 PFRAC 试件峰值应力的影响如图 7 柱状图所示。由图可见，在  $v=0.002\text{mm/s}$  时，随着 PF 掺量的增加，试件的峰值应力先上升后下降。PF 的加入能有效延缓微裂缝的生成，提高混凝土的物理性能。当  $V_{PF}=0.9\%$  时，试件的峰值应力最大，与  $V_{PF}=0.6\%$  时相比提高了 4.4%。但当  $V_{PF}=1.2\%$  时，试件的峰值应力有所降低。这是由于混凝土中加入过量的 PF 会引入过多的气泡，从而导致混凝土内部的孔隙率增加，且过多的纤维会增加纤维团簇的概率，破坏 RAC 的内部骨架，导致界面薄弱区增加，使混凝土内部黏结力下降，桥接作用减弱，最终表现为峰值应力降低。

当  $r=100\%$  时，PF 掺量对 PFRAC 试件峰值应变的影响如图 7 折线图所示。由图可见，PF 掺量对 PFRAC 试件的峰值应变影响不大。在  $v=0.002\text{mm/s}$  时，随着 PF 体积掺量的提高，PFRAC 峰值应变呈先上升后下降趋势。这是由于随着纤维体积的增加，纤维在混凝土内部桥接阻裂能力增大，延缓了裂缝的发展，提高了 PFRAC 的峰值应变所致。但加入过量的纤维，会增大混凝土内部的孔隙率和纤维团簇等负面影响，从而导致峰值应变降低。

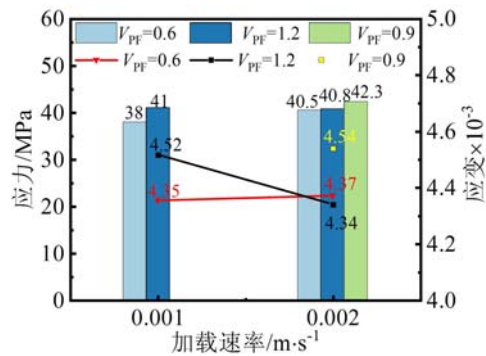


图 7 PF 掺量对峰值点的影响

Fig. 7 Effect of PF volume fraction on peak point

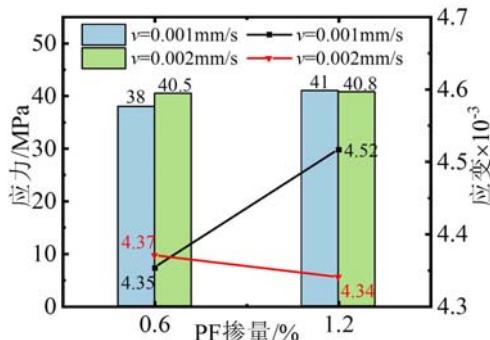


图 8 加载速率对峰值点的影响

Fig. 8 Effect of loading rate on peak point

### 3.3 加载速率的影响

图 8 给出了  $r=100\%$  时加载速率对试件峰值点的影响。由图可见，加载速率对 PFRAC 的峰值应力和峰值应变影响不大。一方面是因为试验所采取的加载速率均属于低应变速率，且 2 种加载速率变化幅度不大，混凝土内部裂缝在出现后均可沿界面薄弱区充分扩展，试件材性得以充分发挥；另一方面是因为 PF 的掺入可显著改善 RAC 的变形性能，在一定程度上消除加载速率造成的影响，最终表现为不同加载速率下 PFRAC 峰值应力和峰值应变变化不大。

### 3.4 刚度退化

为了研究循环荷载作用下混凝土的刚度退化过程，参考了徐礼华等<sup>[15]</sup>关于混凝土刚度比( $E_{uml}/E_0$ )的定义， $E_{uml}$  为每个荷载循环的卸载刚度，计算公式见本文式(1)； $E_0$  为混凝土的初始割线刚度。为了简化计算，假定卸载点与塑性应变点之间的直线为卸载刚度。

$$E_{uml} = \frac{\sigma_{uml} - \sigma_{pl}}{\epsilon_{uml} - \epsilon_{pl}} \quad (1)$$

式中： $\sigma_{uml}$ 、 $\epsilon_{uml}$  分别为受压混凝土从骨架线开始卸载时的应力和应变； $\sigma_{pl}$ 、 $\epsilon_{pl}$  分别为受压混凝土卸载至零的应力和残余应变。

图 9 为混凝土的刚度比率与卸载点应变之间的关系曲线。由图可见，曲线可以分为 2 个阶段：(1) 上升阶段，刚度比随着卸载点应变的增大而增大，且在第二个循环达到峰值。这是由于骨料内部不可避免地存在初始孔隙和微裂缝，随着荷载的增大，初始孔隙和微裂缝先发生闭合，从而使得试件刚度增大。(2) 下降阶段，随着卸载点应变的增大，刚度比减小。第二至第四个循环，刚度退化速度较快；第四至第十个循环，刚度退化速度缓慢，曲线趋于水平。这是因为经前两次循环荷载作用，试件的内部孔

隙被压实,孔隙率达到最低,在持续荷载作用下,混凝土内部出现裂缝并不断扩展,使得试件刚度退化。

图 9(a)为  $r=100\%$ 、 $v=0.002\text{m/s}$  时,PF 掺量对 PFRAC 刚度退化过程的影响规律图。由图可见,随着 PF 掺量的增加,PFRAC 的刚度比率增大,刚度退化过程更缓慢。这是由于 PFRAC 在发生破坏时,纤维发挥了桥接作用,延缓了试件内部裂缝的扩展,PF 掺量越大,阻裂作用越明显,刚度退化越慢。但纤维的过多掺入会有更明显的纤维团簇现象,从而降低了纤维在混凝土中的桥接作用,导致试件的抗压强度减小,刚度比率变小。因此,与其他 2 个试件相比, $V_{\text{PF}}=1.2\%$  时试件的曲线在第四、第五、第八次加载循环下的刚度比率略有降低。

图 9(b)为相同  $V_{\text{PF}}$  和  $v$  的情况下,RCA 取代率对 PFRAC 刚度退化过程的影响规律图。由图可见,普通纤维混凝土的弹性刚度退化值明显低于再生纤维混凝土,说明加入 RCA 可以延缓试件的刚度退化。对于 PFRAC,当  $r=100\%$  时,曲线增幅最大,试件刚度退化缓慢;当  $r=70\%$  时,弹性刚度比值最小。这是由于 RCA 自身缺陷导致强度降低所产生的不利因素,与其表面黏附的砂浆可能含有未水化的水泥<sup>[23]</sup>导致强度增大所产生的有利因素两者的协同作用,随着  $r$  的不同,2 种因素在试件中所发挥的主导地位不同,造成了试件刚度退化的波动。

图 9(c)为不同加载速率对 PFRAC 刚度退化过程的影响规律图。由图可见,相同条件下,加载速率越大,最终的刚度退化率越低。在第四个循环之前,加载速率小的刚度比率较大;从第五个循环开始,随着循环次数的增加,刚度退化速度随着加载速率的增大而减小,曲线趋于平缓。这是由于加载速率越大,试件达到峰值应变的时间越短,从而导致相同时间下试件更早地进入破坏阶段,卸载点的应力应变值相对于加载速率低的时候小,从而导致刚度退化率降低。

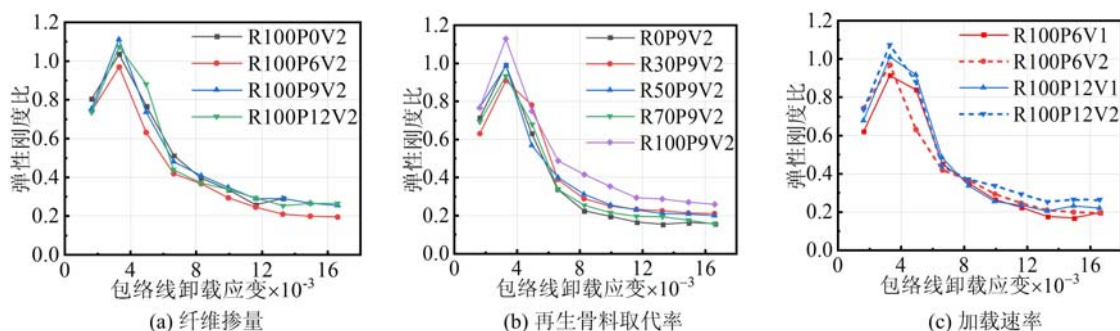


图 9 刚度退化过程

Fig. 9 The stiffness degradation process

## 4 结论

(1) PF 在循环受压各个阶段都展现出良好的阻裂效果,可以有效地抑制裂缝的生成和延缓裂缝的扩展。循环荷载作用下 PFRAC 的破坏形态为斜向劈裂破坏,且随着 PF 体积掺量的增加,试件表面主裂缝宽度先减小后增大。

(2) PFRAC 循环加载的包络曲线与单调加载曲线基本一致。PF 的掺入在一定程度上会提高 RAC 的峰值应力和应变,对于 PFRAC,当  $V_{\text{PF}}=0.9\%$  时,峰值应力提高幅度最大为 24.1%,峰值应变提高幅度最大为 16.7%。

(3) RCA 取代率为 50% 时的 PFRAC 的峰值应力最大,相比于取代率为 0% 时提高了 13%;PF 体积掺量为 0.9% 时,峰值应力的改性效果最优;加载速率对 PFRAC 的强度影响不大。

(4) PF 能改善循环荷载下 RAC 的力学行为,随着 PF 体积掺量的增加,PFRAC 刚度退化更缓慢;与普通聚丙烯纤维混凝土相比,PFRAC 的刚度比较大;加载速率越大,PFRAC 的刚度退化率越小。

## 参考文献:

- [1] Chen Y L, Chen Z P, Xu J J, et al. Performance evaluation of recycled aggregate concrete under multiaxial compression[J]. Construction and Building Materials, 2019, 229:116935.



- [2] 肖建庄,王春晖,郑振鹏,等.再生骨料混凝土结构抗震设计关键问题[J].土木工程学报,2020,53(11):46—54 (XIAO Jianzhuang, WANG Chunhui, ZHENG Zhenpeng, et al. Key problems for seismic design of recycled aggregate concrete structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(11):46—54 (in Chinese))
- [3] 李佳彬,肖建庄,孙振平.再生粗骨料特性及其对再生混凝土性能的影响[J].建筑材料学报,2004(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(4):390—395 (in Chinese))
- [4] 陈宇良,晏方,张绍松,等.再生混凝土直剪力学性能试验及其本构关系[J].实验力学,2022,37(3):341—350 (CHEN Yuliang, YAN Fang, ZHANG Shaosong, et al. Direct shear mechanical properties test and constitutive relations of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2022, 37(3):341—350 (in Chinese))
- [5] 张海燕,胡忠豪,吴波.粗骨料的分类及对再生混凝土抗压强度的影响[J].工业建筑,2018,48(1):138—144 (ZHANG Haiyan, HU Zhonghao, WU Bo. Classification of coarse aggregates and its effect on compressive strength of recycled aggregate concrete[J]. Industrial Construction, 2018, 48(1):138—144 (in Chinese))
- [6] 陈宇良,李浩,叶培欢,等.循环荷载作用下钢纤维再生混凝土力学性能试验[J].复合材料学报,2022,39(11):5574—5585 (CHEN Yuliang, LI Hao, YE Peihuan, et al. Experimental study on mechanical behavior of steel fiber recycled concrete under cyclic compression[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11):5574—5585 (in Chinese))
- [7] Changqing Wang, Yuyue Zhang, Zhiming Ma, et al. Hysteretic deteriorating behaviors of fiber-reinforced recycled aggregate concrete composites subjected to cyclic compressive loadings[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 49:104087.
- [8] 陈宇良,姜锐,陈宗平,等.钢纤维再生混凝土的直剪力学性能[J].建筑材料学报,2022,25(9):984—990 (CHEN Yuliang, JIANG Rui, CHEN Zongping, et al. Experimental study on mechanical properties of steel fiber recycled concrete in direct shear[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(9):984—990 (in Chinese))
- [9] Ali B, Qureshi L A. Influence of glass fibers on mechanical and durability performance of concrete with recycled aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2019, 228:116783.
- [10] Kasagani H, Rao C B K. Effect of graded fibers on stress strain behaviour of Glass Fiber Reinforced Concrete in tension[J]. Construction and Building Materials, 2018, 183:592—604.
- [11] Kai Cui, Lihua Xu, Xuefeng Li, et al. Fatigue life analysis of polypropylene fiber reinforced concrete under axial constant-amplitude cyclic compression[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 319:128610.
- [12] Tam V W Y, Soomro M, Evangelista A C J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000-2017) [J]. Construction and Building Materials, 2018, 172:272—292.
- [13] 贺晶晶,师俊平,王学志.纤维混杂效应对混凝土弯曲韧性的改善[J].实验力学,2017,32(1):113—122 (HE Jingjing, SHI Junping, WANG Xuezhi. On the effect of fiber hybrid effect on the improvement of concrete flexural toughness[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(1):113—122 (in Chinese))
- [14] Liu Y, Wang L, Cao K, et al. Review on the durability of polypropylene fibre-reinforced concrete[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021:1—13.
- [15] 徐礼华,黄彪,李彪,等.循环荷载作用下聚丙烯纤维混凝土受压应力-应变关系研究[J].土木工程学报,2019,52(4):1—12 (XU Lihua, HUANG Biao, LI Biao, et al. Study on the stress-strain relation of polypropylene fiber reinforced concrete under cyclic compression[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(4):1—12 (in Chinese))
- [16] Ahmed T W, Ali A A M, Zidan R S. Properties of high strength polypropylene fiber concrete containing recycled aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2020, 241:118010.
- [17] Serrano R, Cobo A, Prieto M I, et al. Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers[J]. Construction and Building Materials, 2016, 122:302—309.
- [18] GB/T 14685—2022, 建设用卵石、碎石[S].北京:中国标准出版社,2022 (GB/T 14685—2022, Pebble and crushed stone for construction[S]. Beijing: China Standards Press, 2022 (in Chinese))
- [19] CECS 13:2009, 纤维混凝土试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,2010 (CECS 13:2009, Standard test methods for fiber reinforced concrete [S]. Beijing: China Planning Press, 2010 (in Chinese))

- [20] 岳健广, 夏月飞, 方华. 钢纤维混凝土断裂破坏机理及受拉损伤本构试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(2): 93–106 (YUE Jianguang, XIA Yuefei, FANG Hua. Experimental study on fracture mechanism and tension damage constitutive relationship of steel fiber reinforced concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(2):93–106 (in Chinese))
- [21] 陈春红, 刘荣桂, 朱平华, 等. 黏附砂浆含量对再生混凝土抗氯离子侵蚀性能影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6):1216–1223 (CHEN Chunhong, LIU Ronggui, ZHU Pinghua. Effect of attached mortar content on chloride ion erosion resistance of recycled concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6):1216–1223 (in Chinese))
- [22] 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 (in Chinese))
- [23] Kim J. Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: an overview[J]. Construction and Building Materials, 2022, 328:127071.

## Experimental study on the compressive performance of recycled polypropylene fiber concrete under cyclic loading

WU Huiqin<sup>1</sup>, ZHU Zhen<sup>1</sup>, CHEN Yuliang<sup>1</sup>, LIANG Haiqu<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China;

2. Guangxi Yufeng Concrete Co., Ltd., Liuzhou 545006, Guangxi, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical properties of polypropylene fiber recycled aggregate concrete (PFRAC) under cyclic loading, designed the uniaxial cyclic loading test of 78 cylindrical specimens was designed with coarse aggregate replacement rate, fiber volume fraction, and loading rate as variation parameters. The failure mode of PFRAC was observed, and the stress-strain curve, peak stress, peak strain, stiffness degradation, and other important indexes were obtained. The influence of different parameters on the mechanical properties of PFRAC was studied, and the crack resistance mechanism of polypropylene fiber to recycled concrete under cyclic loading was obtained. The experimental results show that PFRAC specimens under cyclic loading primarily exhibit diagonal splitting failure, and that the main crack width of the specimen surface decreases as the polypropylene fiber volume fraction increases. The stress-strain curve envelope of PFRAC specimens compressed under cyclic loading agrees well with those under monotonic loading. The addition of polypropylene fibers significantly improved the mechanical properties of PFRAC under cyclic loading, and the peak stress and elastic stiffness ratio increased and then decreased with the increase of fiber volume fraction. When the fiber volume fraction is 0.9%, the fiber modification effect is the best, and the peak stress and peak stiffness ratios increased by 4.4% and 7.4%.

**Keywords:** recycled aggregate concrete; polypropylene fiber; uniaxial cyclic compression; stress-strain curve; stiffness degradation