

文章编号: 1001-4888(2023)05-0617-08

自密实橡胶混凝土循环受压应力-应变关系*

李娜¹, 罗松俭², 向万年¹, 叶春颖¹, 柯晓军¹

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西南宁 530004; 2. 广西建工第一建筑工程集团有限公司, 广西南宁 530001)

摘要: 为研究自密实橡胶混凝土循环受压力学性能,以橡胶类型(橡胶粉、橡胶颗粒)和橡胶掺量(15%、20%、30%)为变化参数,设计 7 组(每组 9 个,共计 63 个)试件进行单调压缩和循环受压试验。试验结果表明:与单调压缩曲线相比,循环受压全曲线包络线的上升段略微下凹,表现出压实效应;橡胶掺量越大,试件延性破坏特征越明显,强度和刚度的降幅越大,峰值应变越延后;相比其他类型试件,掺入橡胶粉的试件循环受压力学性能更优,延性和耗能能力更强;橡胶掺量不超过 20% 时,掺入橡胶粉的试件塑性应变相对较大,但峰值前应力退化较快。在试验基础上,提出了自密实橡胶混凝土循环受压应力-应变关系模型,本文研究结果可为结构分析与设计提供参考。

关键词: 橡胶混凝土; 自密实混凝土; 循环受压; 力学性能; 应力-应变关系

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-227

0 引言

橡胶混凝土是一种将橡胶粉或者橡胶颗粒以一定比例掺入普通混凝土中制备而成的轻质绿色建筑材料,具有较好的延性、抗冲击性能和耐久性^[1]。橡胶颗粒或橡胶粉的添加不仅弥补了普通混凝土的缺陷,还为减少自然资源开采、废旧橡胶处理提供了新方法^[2]。国内外学者对橡胶混凝土开展了大量研究工作:徐颖等^[3]通过循环加载试验进行了橡胶混凝土断裂损伤特性的研究,结果表明,橡胶混凝土总耗能随着橡胶掺量的增加而增加;Youssf 等^[4]对比普通混凝土柱和橡胶混凝土柱在反复荷载作用下的耗能情况,发现后者的能量耗散率是前者 1.5 倍;冯文贤等^[5]通过试验研究发现,在混凝土中加入橡胶粉可改善疲劳性能,延长疲劳寿命。鉴于橡胶混凝土优越的耗能和耐疲劳特性,部分学者建议将其应用于道路、桥梁和建筑的抗震耗能部位^[6]。但由于橡胶密度比水小,混凝土振捣过程中会造成橡胶上浮,使得橡胶在混凝土中分布不均匀,从而影响橡胶混凝土的使用性能^[7]。

自密实混凝土(Self-Compacting Concrete, SCC)是一种无需振捣,可在自身重力作用下密实成型的高性能混凝土,具有良好的流动性、均质性、填充性和抗离析性^[8]。将自密实混凝土的免振捣技术引入橡胶混凝土,制备出的自密实橡胶混凝土(Self-Compacting Rubber Concrete, SCRC)具有广阔的应用前景。

在循环或反复荷载作用下,混凝土力学性能会逐渐退化,进而降低结构安全性,因此,研究混凝土循环力学行为对结构抗震设计具有重要意义。目前,普通混凝土^[9-10]、纤维混凝土^[11]、碳化混凝土^[12]的单轴循环受压力学行为已经开展研究,并建立了相应的循环本构模型。但是,有关自密实橡胶混凝土循环受压力学行为的研究则较为缺乏。因此,本文将通过单调压缩试验和循环受压试验,研究橡胶类型及

* 收稿日期: 2022-09-14; 修回日期: 2023-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51668007)

通信作者: 柯晓军(1985-),男,博士,副教授。主要研究领域:绿色高性能混凝土及组合结构。Email: xj-ke@163.com

掺量对自密实橡胶混凝土循环受压力学性能的影响,并建立循环受压应力-应变关系模型,以便为其在结构工程的应用提供一定的理论基础。

1 试验概况

1.1 原材料

水泥为海螺牌P.O 42.5普通硅酸盐水泥;粗骨料为粒径5mm~20mm连续级配的碎石;细骨料为细度模数2.7的天然河砂;矿物掺合料为一级粉煤灰;外加剂为减水率 $\geq 20\%$ 的聚羧酸高效减水剂;拌合水为普通自来水;橡胶为40目(380 μm)橡胶粉和1mm~4mm连续级配的橡胶颗粒。

1.2 试件设计与制作

为研究自密实橡胶混凝土的循环受压应力-应变全过程的力学行为,本文以橡胶类型和橡胶掺量为变量,设计了7组试件。其中,2类橡胶分别为橡胶颗粒、橡胶粉;根据Li等^[13]和Khaloo等^[14]的研究,当橡胶掺量低于10%时,对橡胶混凝土单调压缩力学性能影响较小,但超过30%后其性能迅速恶化,因此本试验选择3种橡胶掺量,即15%、20%和30%。首先,根据《自密实混凝土应用技术规程》(JGJ/T 283-2012)设计强度等级C40的基准自密实混凝土SCC;然后,采用等体积置换细骨料的方式将橡胶掺入基准自密实混凝土,分别得到自密实橡胶混凝土SCRCA(掺入橡胶粉)和自密实橡胶混凝土SCRCB(掺入橡胶颗粒),混凝土配合比见表1,试件编号中,A代表橡胶粉,B代表橡胶颗粒,之后的数字代表相应的掺量,如SCRCA15代表掺入橡胶粉且掺量为15%的自密实橡胶混凝土。

表1 混凝土配合比和拌合物测试结果

Tab. 1 Concrete mix ratio and test results of mixtures

试件 编号	橡胶 掺量	配合比/(kg/m ³)							塌落度 /mm	T ₅₀₀ /s
		水泥	粉煤灰	水	减水剂	碎石	河砂	橡胶		
SCC	0	350	150	205	3.8	940	800	0	630	5.0
SCRCA15	15%	350	150	205	3.8	940	680	53	610	6.6
SCRCA20	20%	350	150	205	3.8	940	640	70	590	7.9
SCRCA30	30%	350	150	205	3.8	940	560	105	570	8.6
SCRCB15	15%	350	150	205	3.8	940	680	50	615	6.2
SCRCB20	20%	350	150	205	3.8	940	640	66	600	7.3
SCRCB30	30%	350	150	205	3.8	940	560	99	585	8.3

标准的立方体(150mm×150mm×150mm)试件和圆柱体(150mm(直径)×300mm(高度))试件制备流程如下:首先,采用滚筒式搅拌机完成混凝土拌合;随后,测试拌合物的塌落扩展度和扩展时间T₅₀₀,检测其流动性和填充性是否满足要求,实测结果见表1;最后,将试件浇筑成型,并在标准养护条件下养护28d。每组配合比均制作9个试件,其中3个立方体试件用于测量立方体抗压强度,3个圆柱体试件用于测量单调压缩应力-应变曲线,3个圆柱体试件用于测量单轴循环受压应力-应变曲线。

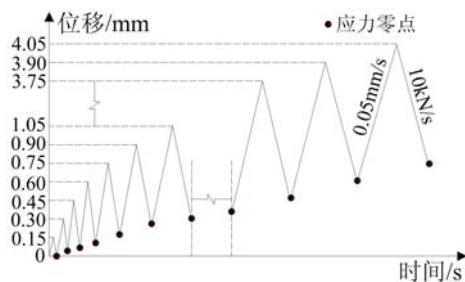


图1 循环加载制度

Fig. 1 Cyclic loading system

1.3 试验加载与测试

试验采用中国科学院武汉岩土力学研究所和SIMENS公司联合研发的RMT-201压力机进行加载。单调压缩试验加载采用位移控制模式,加载速率为0.05mm/s,持续加载至试件破坏。循环受压试验采用变幅逐级加载模式,加载采用位移控制模式,加载速率为0.05mm/s,每级位移增量为0.15mm,应变增量为 0.5×10^{-3} ;卸载采用力控模式,加载速率为10kN/s;每级加载至预定位移值后随即卸载至应力为零,然后再加载至下一级预定位移值,循环加载制度如图1所示。

2 试验结果及分析

2.1 循环受压全过程及破坏形态

图 2 为试件单轴循环受压全过程示意图。由图 2 可见,试件单轴循环受压曲线包括 5 个特征阶段及其他加卸载阶段,各阶段曲线特征及裂缝发展情况如下:

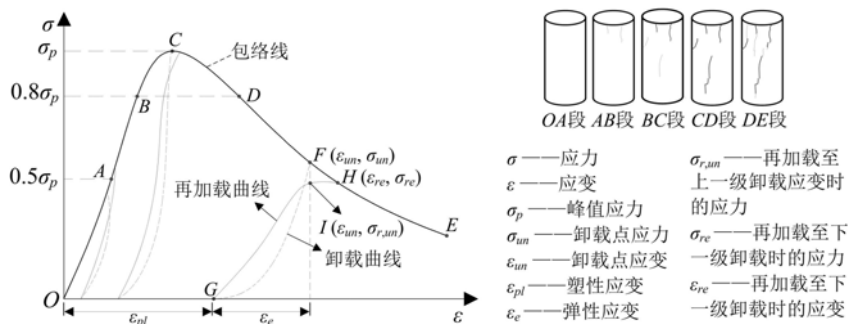


图 2 试件循环受压全过程

Fig. 2 Cyclic compressive process of specimen

(1) 压实阶段(OA 段): 曲线略微上扬, 呈现出下凹变化趋势, A 点应力约为峰值应力的 50%。掺入的橡胶相当于混凝土内部的孔隙, 外荷载作用下孔隙闭合, 塑性应变稳定增加, 表现出“压实效应”。卸载和再加载曲线接近重合, 试件基本无裂缝。

(2) 细观裂缝形成阶段(AB 段): 曲线呈非线性趋势, 水泥基体在粗骨料周围形成初始裂缝, 并发展成肉眼难以观察的细观裂缝。由于橡胶粉和橡胶颗粒强度较低, 周围易形成薄弱带, 自密实橡胶混凝土的细观裂缝开展更为细密。

(3) 宏观裂纹扩展阶段(BC 段): 曲线呈明显非线性特征, 在循环压力作用下, 部分细观裂缝连通并扩大形成宏观裂缝。

(4) 压溃发生阶段(CD 段): 曲线开始下降, D 点应力约为峰值应力的 80%。试件的骨料和砂浆界面脱离, 宏观裂缝进一步扩展延伸, 并交错连接形成主裂缝。

(5) 持续破坏阶段(DE 段): 曲线持续下降, E 点应力为峰值应力的 20%~35%。主裂缝逐渐变宽, 橡胶逐渐与水泥基体分离, 混凝土陆续剥落直至试件破坏。

(6) 卸载阶段(FG 段): 曲线下降至零, 弹性变形恢复, 裂缝略微闭合。

(7) 再加载阶段(GH 段): 在加载过程可分为 GI、IH 阶段。GI 段曲线再次上升至上一级卸载应变, 但无法达到卸载时的应力, 裂缝宽度基本与卸载时相同。IH 段曲线继续发展至下一级卸载应变, 裂缝宽度增加且数量增多。

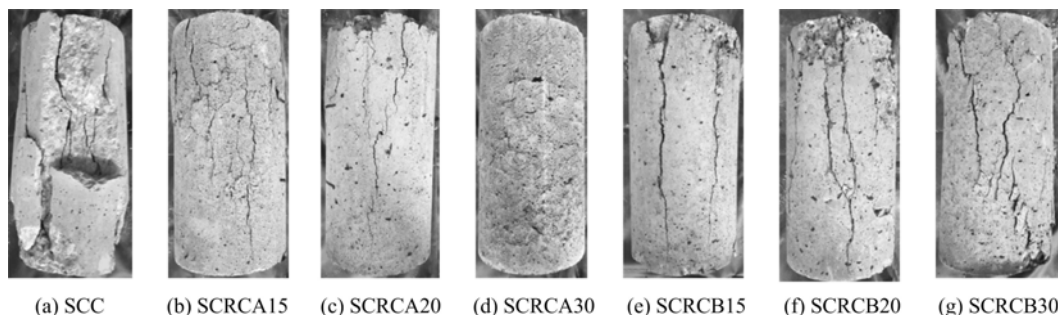


图 3 7 组试件的循环受压破坏形态

Fig. 3 Cyclic compressive failure modes of seven groups of specimen

图 3 所示为 7 组试件的循环受压破坏形态。由图 3 可知: 基准自密实混凝土试件出现贯通的斜向主裂缝, 底部四周几乎完全破裂崩落, 脆性破坏特征明显; 自密实橡胶混凝土试件破坏时相对完整, 细裂缝密集分布, 未见形成主裂缝, 表现为延性破坏; 橡胶掺量越大, 裂缝越细密, 分布越均匀, 延性特征越明

显;在掺量相同的情况下,由于橡胶粉分布更加均匀,使其自身耗能阻裂效果充分发挥,因此,掺入橡胶粉的试件破坏时裂缝更细密、长度更短。

2.2 循环受压应力-应变曲线

试件的单轴循环受压应力-应变全曲线(试验结果较完整的曲线)、包络线以及用于对比分析的单调压缩应力-应变曲线(试验平均曲线)如图4所示,实测峰值应力 σ_p 、峰值应变 ϵ_p ,弹性模量 E_c 、立方体抗压强度 f_{cu} 的特征点数据见表2。结合图4和表2可知:

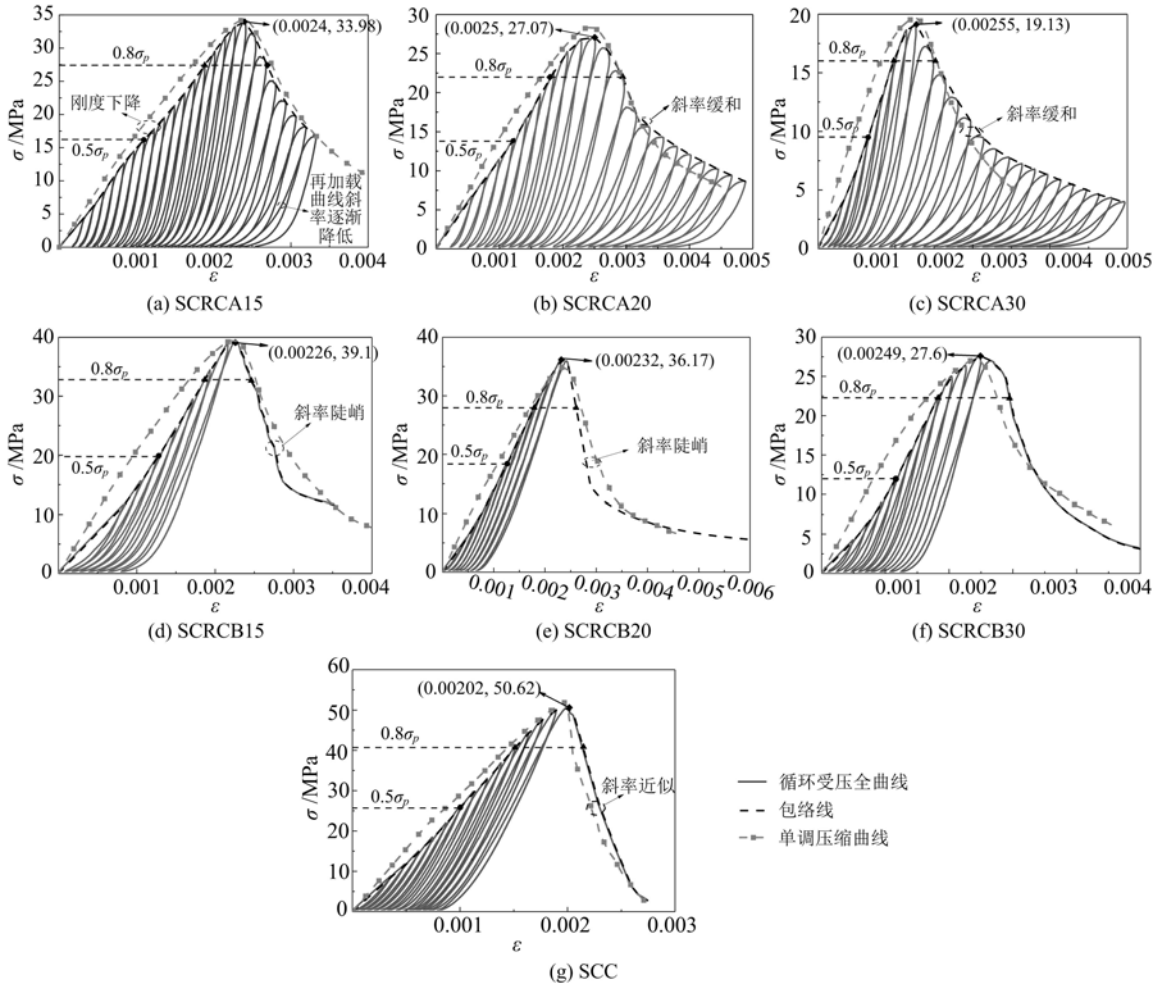


图4 单调、循环压缩曲线

Fig. 4 Monotonic and cyclic compression curves

(1)在达到峰值应力前,由于“压实效应”,包络线呈现下凹趋势,且位于单调压缩曲线的下方;接近峰值时,包络线斜率减缓,随后包络线与单调压缩曲线的峰值应力、峰值应变以及变化趋势都较为接近。

(2)随着橡胶掺量增加,峰值应变小幅增加,而峰值应力、弹性模量和立方体抗压强度显著下降,降幅为20%~50%,掺量达到30%时,掺入橡胶粉的试件降幅甚至超过50%。考虑到橡胶掺量较大时对自密实混凝土的强度和刚度的影响极为不利,建议橡胶粉的掺量宜低于20%,橡胶颗粒的掺量宜低于30%。

(3)掺入橡胶颗粒的试件与基准自密实混凝土试件类似,峰值后仅剩单调的卸载曲线,而掺入橡胶粉的试件循环受压曲线更完整。其原因是橡胶掺量一定的情况下,橡胶粉在混凝土中的分布相对均匀,因此能够更好地改善混凝土的脆性。

(4)滞回环面积能够衡量试件的耗能能力,从整体上看,掺入橡胶粉的试件加卸载滞回环面积最大,掺入橡胶颗粒的试件次之,基准自密实混凝土试件最小,表明掺入橡胶能够提高混凝土的耗能能力,其中,橡胶粉的提高作用最为显著。

表 2 单调、循环压缩试验结果

Tab. 2 Monotonic and cyclic compression test results

试件编号	$\epsilon_p \times 10^{-6}$				σ_p / MPa				E_c / GPa		f_{cu} / MPa	
	M	C	C/M	增幅	M	C	C/M	增幅	试验值	降幅	试验值	降幅
SCC	1977	2016	1.02	0	51.92	50.62	0.97	0	31.14	0	49.09	0
SCRCA15	2384	2400	1.01	20%	34.32	33.98	0.99	33%	17.53	40%	34.64	29%
SCRCA20	2448	2504	1.02	24%	28.43	27.07	0.95	46%	14.54	47%	29.77	39%
SCRCA30	2558	2545	0.99	28%	19.64	19.13	0.97	62%	11.05	57%	22.51	54%
SCRCB15	2236	2259	1.01	12%	39.61	39.10	0.99	23%	21.33	28%	39.63	19%
SCRCB20	2351	2318	0.99	17%	34.87	36.17	1.04	31%	18.43	36%	34.60	30%
SCRCB30	2441	2491	1.02	23%	27.21	27.60	1.01	47%	14.73	47%	28.97	41%

注：M、C 分别表示单调压缩、循环受压；增幅、降幅均表示自密实橡胶混凝土特征点数据相对基准自密实混凝土的变化。

2.3 塑性应变分析

试件在循环轴压荷载作用下，卸载至应力为零时相应的残余应变，称为塑性应变 ϵ_{pl} (见图 2)，塑性应变是反映混凝土在循环荷载作用下变形能力的重要指标。图 5(a) 给出了试件标准化塑性应变 ϵ_{pl}/ϵ_p 与标准化卸载点应变 ϵ_{un}/ϵ_p 的关系曲线，其中 ϵ_{un} 为卸载点应变。由图 5(a) 可知，塑性应变随卸载点应变的增大而增大，且变化趋势符合幂函数的特性。当橡胶掺量一定、且不超过 20% 时，由于橡胶粉几乎不能受力，其与混凝土本身的孔隙一样极易被压实，而橡胶颗粒相对较大，卸载后橡胶颗粒具有一定回弹力，其自身的恢复会带动部分混凝土孔隙的恢复，故掺入橡胶粉的试件塑性变形能力较好，而掺入橡胶颗粒的试件，塑性变形能力不如基准自密实混凝土，橡胶颗粒未能起到改善塑性变形能力的作用。当橡胶掺量增加到 30% 时，2 种橡胶的掺入对试件塑性变形能力的作用与上述结论相反，说明橡胶掺量对塑性应变的影响存在差异，且离散性较大。

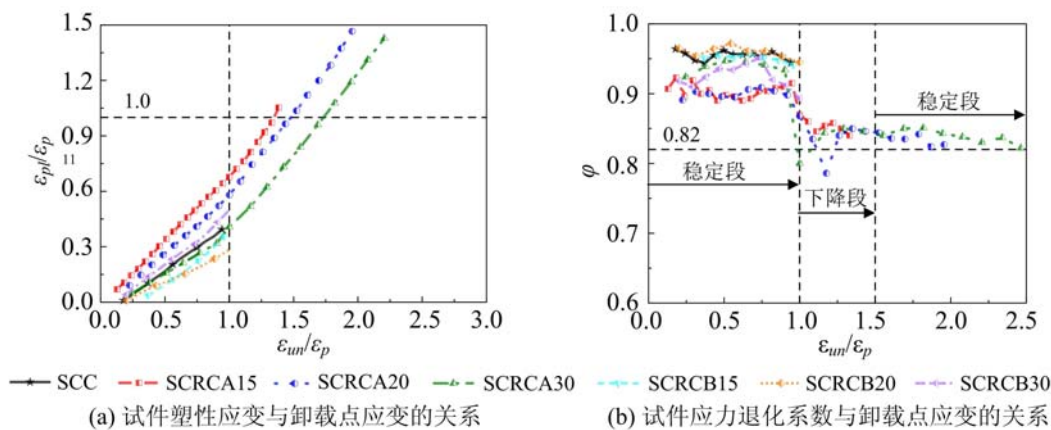


图 5 塑性应变和应力退化系数

Fig. 5 Plastic strain and stress degradation coefficient

根据图 5(a) 中塑性应变的变化趋势以及 Bahn 等^[15]和邓宗才等^[16]的研究成果，采用幂函数建立塑性应变与卸载点应变的关系。考虑到橡胶掺量对塑性应变的影响具有离散性，本文在试验数据的基础上，拟合出如式(1)所示的幂函数来分别描述 3 类混凝土塑性应变与卸载点应变的关系。

$$\epsilon_{pl}/\epsilon_p = \begin{cases} 0.44(\epsilon_{un}/\epsilon_p)^{1.437} & (\text{SCC}, R^2 = 0.99) \\ 0.59(\epsilon_{un}/\epsilon_p)^{1.225} & (\text{SCRCA}, R^2 = 0.97) \\ 0.45(\epsilon_{un}/\epsilon_p)^{1.596} & (\text{SCRCB}, R^2 = 0.99) \end{cases} \quad (1)$$

2.4 应力退化

由图 4 可知,试件在单轴循环受压加卸载过程中存在应力退化现象,即再加载曲线达到上一级卸载应变时,应力无法达到卸载应力。定义应力退化系数 $\varphi = \sigma_{r,un}/\sigma_{un}$,其中 σ_{un} 为卸载点应力; $\sigma_{r,un}$ 为再加载曲线达到上一级卸载应变 ϵ_{un} 时的应力(见图 2)。图 5(b)为试件应力退化系数与卸载点应变的关系曲线,由图可知,应力退化过程可以划分成 3 段:第一段为稳定段,加载初期,由于“压实效应”的存在,应力退化系数基本稳定不变;第二段为下降段,峰值应变附近,由于裂缝扩展,应力退化系数快速下降;第三段为稳定段,在 $\epsilon_{un}/\epsilon_p \geq 1.5$ 时,随卸载点应变的增加,由于橡胶的缓和作用,裂缝基本呈稳定扩展趋势,应力退化系数的变化不再明显,且稳定在 0.82 左右。

分析橡胶类型和橡胶掺量对应力退化的影响可知:峰值应变前,当橡胶掺量不超过 20% 时,相同类型试件的应力退化系数基本相近且保持不变,基准自密实混凝土试件、掺入橡胶颗粒的试件的应力退化系数基本接近,并高于掺入橡胶粉的试件;当橡胶掺量增加到 30% 时,掺入橡胶粉的试件应力退化系数上升,掺入橡胶颗粒的试件应力退化系数下降;峰值应变后,橡胶掺量对掺入橡胶粉试件的应力退化基本没有影响,由于基准自密实混凝土试件和掺入橡胶颗粒的试件峰值应变后仅存在单调卸载曲线,故不做分析。

由上段的分析可知,橡胶类型和掺量对自密实橡胶混凝土应力退化系数的影响无明显规律。对 2 类自密实橡胶混凝土应力退化曲线进行简化分析,将第一段和第二段合并,近似采用斜直线来表示,将第三段近似采用平直线来表示。取 $\epsilon_{un}/\epsilon_p = 1.5$ 为两者的分界点,拟合出如式(2)所示的线性分段函数来描述应力退化系数与卸载点应变的关系:

$$\varphi = \begin{cases} 1 - 0.12\epsilon_{un}/\epsilon_p & (0 < \epsilon_{un}/\epsilon_p \leq 1.5) \\ 0.82 & (\epsilon_{un}/\epsilon_p > 1.5) \end{cases} \quad (2)$$

3 循环受压应力-应变关系

3.1 循环受压应力-应变包络线

由第 2.2 节可知,自密实橡胶混凝土循环受压应力-应变包络线与单调压缩应力-应变曲线相似,因此,本文在普通混凝土本构模型^[17]基础上,考虑橡胶掺量与类型的影响,提出适用于自密实橡胶混凝土的循环受压应力-应变包络线,表达式如下:

$$y = \begin{cases} \alpha_c x + (3 - 2\alpha_c)x^2 + (a_c - 2) & (x \leq 1) \\ x/[\alpha_d(x-1)^2 + x] & (x > 1) \end{cases} \quad (3)$$

$$x = \epsilon/\epsilon_c, \quad y = \sigma/f_c \quad (4)$$

$$\alpha_c = 4\gamma^2 - 0.2\gamma + 0.62 \quad (R^2 = 0.98) \quad (5)$$

$$\alpha_d = \begin{cases} -28.61\gamma + 12.43 & (\text{SCRCA}, R^2 = 0.88) \\ -9.7\gamma + 13.69 & (\text{SCR CB SCC}, R^2 = 0.99) \end{cases} \quad (6)$$

式中: γ 为橡胶掺量, $0 \leq \gamma \leq 0.3$; f_c 为单轴抗压强度; ϵ_c 为单轴抗压强度对应的应变; y 、 x 分别为标准化应力、标准化应变; α_c 、 α_d 分别为应力-应变曲线上上升段、下降段形状参数,由试验数据拟合获得。

3.2 卸载曲线与再加载曲线

在试验数据基础上,对自密实橡胶混凝土循环受压卸载曲线采用幂函数进行拟合,表达式如下:

$$\sigma/\sigma_{un} = [(\epsilon - \epsilon_{pl})/(\epsilon_{un} - \epsilon_{pl})]^n \quad (7)$$

$$n = \begin{cases} 1 + 0.636(\epsilon_{un}/\epsilon_p)^{-0.176} & (\text{SCC}, R^2 = 0.97) \\ 1 + 1.916(\epsilon_{un}/\epsilon_p)^{0.396} & (\text{SCRCA}, R^2 = 0.94) \\ 1 + 1.012(\epsilon_{un}/\epsilon_p)^{-0.106} & (\text{SCR CB}, R^2 = 0.84) \end{cases} \quad (8)$$

式中: n 为卸载曲率控制参数,是在考虑橡胶类型影响的基础上,根据试验数据拟合为标准化卸载点应变 ϵ_{un}/ϵ_p 的幂函数。

由 2.1 节可知,再加载曲线分为 2 段,且 2 段曲线的变化规律有所不同,因此,在试验数据基础上,对自密实橡胶混凝土循环受压再加载曲线采用分段函数进行拟合,表达式如下:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_{r,im} [(\varepsilon - \varepsilon_{pl}) / (\varepsilon_{im} - \varepsilon_{pl})] & (\varepsilon \leq \varepsilon_{im}) \\ (\sigma_{re} - \sigma_{r,im})(\varepsilon - \varepsilon_{im}) / (\varepsilon_{re} - \varepsilon_{im}) + \sigma_{r,im} & (\varepsilon > \varepsilon_{im}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: σ_{re} 、 ε_{re} 分别为再加载至下一级卸载时的应力、应变。

4 结论

(1) 与基准自密实混凝土试件相比,自密实橡胶混凝土试件循环受压破坏呈明显延性特征,表面裂缝更为细密且完整性好。掺入橡胶粉的试件延性更高,耗能能力更强。

(2) 自密实橡胶混凝土试件单轴循环压缩应力-应变包络线略微下凹,表现出“压实效应”。随着橡胶掺量的增加,自密实橡胶混凝土强度和刚度显著下降,建议橡胶粉、橡胶颗粒的掺量宜分别低于 20% 和 30%。

(3) 橡胶掺量对塑性应变的影响具有离散性,橡胶类型和橡胶掺量对自密实橡胶混凝土应力退化的影响无明显规律。

(4) 基于试验结果提出的自密实橡胶混凝土单轴循环受压应力-应变包络线、卸载曲线和再加载曲线的计算模型可以为结构分析与设计提供参考,但模型仍有必要通过成批测试大量试件进一步完善。

参考文献:

- [1] Roychand R, Gravina R J, Zhuge Y, et al. A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 237:117651.
- [2] 肖翔, 黄维, 申茂宇, 等. 钢管约束橡胶集料混凝土短柱轴压试验研究[J]. *实验力学*, 2021, 36(6):771-782 (XIAO Xiang, HUANG Wei, SHEN Maoyu, et al. Experimental study on rubberized concrete confined by steel tubular short column under axial compression[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2021, 36(6):771-782 (in Chinese))
- [3] 徐颖, 卜静武, 刘雨夕, 等. 循环荷载下橡胶混凝土的断裂特性[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(1):142-148 (XU Ying, BU Jingwu, LIU Yuxi, et al. Fracture behavior of rubber concrete under cyclic loading [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(1):142-148 (in Chinese))
- [4] Youssf O, ElGawady M A, Mills J E. Experimental investigation of crumb rubber concrete columns under seismic loading[J]. *Structures*, 2015, 3:13-27.
- [5] 冯文贤, 刘锋, 郑万虎, 等. 橡胶混凝土疲劳性能的试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(4):469-473 (FENG Wenxian, LIU Feng, ZHENG Wanhui, et al. Test of fatigue performance of rubberized concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15(4):469-473 (in Chinese))
- [6] 夏叶飞, 郑业勇, 张为民, 等. 橡胶粉对 PVA-ECC 力学性能影响研究[J]. *实验力学*, 2018, 33(6):987-993 (XIA Yefei, ZHENG Yeyong, ZHANG Weimin, et al. Study on the effect of rubber powder on mechanical properties of PVA-ECC[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(6):987-993 (in Chinese))
- [7] Zhu H, Rong B, Xie R, et al. Experimental investigation on the floating of rubber particles of crumb rubber concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 164:644-654.
- [8] Topçu İ B, Bilir T. Experimental investigation of some fresh and hardened properties of rubberized self-compacting concrete[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(8):3056-3065.
- [9] Breccolotti M, Bonfigli M F, D'Alessandro A, et al. Constitutive modeling of plain concrete subjected to cyclic uniaxial compressive loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 94:172-180.
- [10] Xue X, Yang X. A damage model for concrete under cyclic actions[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2014, 23(2):155-177.
- [11] 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. Research on stress-strain relationship of polypropylene fiber concrete under cyclic loading [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(4):1-12 (in Chinese))
- [12] 梁岩, 罗小勇, 史艳. 反复荷载下碳化混凝土力学性能及本构关系研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(9):43-50 (LIANG Yan, LUO Xiaoyong, SHI Yan. Study on carbonated concrete mechanical property and constitutive relation under cyclic load[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2016, 43(9):43-50

(in Chinese))

- [13] Li L, Ruan S, Zeng L. Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 70:291–308.
- [14] Khaloo A R, Dehestani M, Rahmatabadi P. Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles[J]. *Waste Management*, 2008, 28(12):2472–2482.
- [15] Bahn B Y, Hsu T T C. Stress-strain behavior of concrete under cyclic loading[J]. *ACI Materials Journal*, 1998, 95(2):178–193.
- [16] 邓宗才, 孙成栋. 钢纤维混凝土在低周反复荷载下力学性能的研究[J]. *工程力学*, 2001, 18(3):105–110 (DENG Zongcai, SUN Chengdong. On properties of steel fiber reinforced concrete under cyclic loading[J]. *Engineering Mechanics*, 2001, 18(3):105–110 (in Chinese))
- [17] 过镇海, 张秀琴, 张达成, 等. 混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 1982(1):1–12 (GUO Zhenhai, ZHANG Xiuqin, ZHANG Dacheng, et al. Experimental study on stress-strain curve of concrete[J]. *Journal of Building Structures*, 1982(1):1–12 (in Chinese))

Stress-strain relations of self-compacting rubber concrete under cyclic compression

LI Na¹, LUO Songjian², XIANG Wannian¹, YE Chunying¹, KE Xiaojun¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China;

2. The First Construction Engineering Group Co., Ltd. of Guangxi Construction, Nanning 530001, Guangxi, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of self-compacting rubber concrete under cyclic compression, seven groups (9 specimens in each group, totalling 63) of specimens were designed for monotonic compression and cyclic compression tests with rubber type (rubber powder, rubber granules) and rubber admixture (15%, 20%, 30%) as the variation parameters. The results show that compared with the monotonic compression curve, the rising section of the envelope curve of the cyclic compression stress-strain curve was slightly concave, showing the compaction effect. With the increase in rubber content, the ductile failure characteristics of the specimens were more obvious, the strength and stiffness decreased more, and the peak strain was gradually delayed. Compared with other types of specimens, the cyclic compressive mechanical properties of the specimens mixed with rubber powder were better, and the ductility and energy dissipation capacity were enhanced; When the rubber content was not more than 20%, the plastic strain of the specimen mixed with rubber powder was relatively large, but the stress degradation before the peak was faster. The stress-strain relationship model of self-compacting rubber concrete under cyclic compression was proposed on the basis of experiments, and the research results of this paper can provide reference for the design and analysis of self-compacting rubber concrete structures.

Keywords: rubber concrete; self-compacting concrete; cyclic compression; mechanical properties; stress-strain relationship