

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2023.01.009

钢纤维橡胶自密实混凝土静态力学性能研究

叶建峰^{1,2}, 庄金平^{1,2}, 颜桂云^{1,2}, 潘晨阳^{1,2}

(1.福建省土木工程新技术与信息化重点实验室,福州 350118;2.福建工程学院
土木工程学院,福州 350118)

摘要:钢纤维的桥联作用及其与橡胶颗粒的协同作用可显著改善混凝土性能,而针对钢纤维橡胶自密实混凝土的静态力学性能及其本构关系的研究较少。通过在 10%、20%、30% 橡胶颗粒掺量的橡胶自密实混凝土中分别外掺体积掺量为 0.5%、1.0%、1.5% 的钢纤维,制备出钢纤维橡胶自密实混凝土试件,进行棱柱体轴心抗压试验,探讨钢纤维掺量、橡胶颗粒掺量对试件的典型力学特征量的影响,建立钢纤维橡胶自密实混凝土轴心抗压强度的本构关系。结果表明:钢纤维橡胶自密实混凝土试件呈现延性破坏的同时,其完整性也较好;随着橡胶颗粒掺量的提高,试件轴心抗压强度逐渐降低;当钢纤维橡胶自密实混凝土中的橡胶颗粒掺量较高时(20%、30%),钢纤维对橡胶自密实混凝土轴心抗压强度无明显的增强效果;橡胶颗粒的掺入提高了试件的峰值应变,当橡胶颗粒掺量为 10% 时,达到最大值,增长幅度为 10%;不同的钢纤维掺入量对钢纤维橡胶混凝土的峰值应变普遍有增强效果,但没有呈现出明显的规律性;轴心抗压本构关系能反映钢纤维橡胶自密实混凝土力学性能。

关键词:钢纤维橡胶自密实混凝土;橡胶颗粒;钢纤维;静态力学性能;轴心抗压强度;本构关系
中图分类号: TU755 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-582X(2023)01-084-011

Research on static mechanical properties of self-compacting concrete mixed with steel fiber and rubber

YE Jianfeng^{1,2}, ZHUANG Jingping^{1,2}, YAN Guiyun^{1,2}, PAN Chenyang^{1,2}

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Informatization in Civil Engineering, Fuzhou 350118, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, P. R. China)

Abstract: The bridging effect of steel fiber and its synergistic effect with rubber particles can significantly improve the performance of concrete, but there are few studies on the static mechanical properties and constitutive relationship of self-compacting concrete mixed with steel fiber and rubber. To prepare self-compacting concrete specimens with steel fiber and rubber, the rubber concrete with 10%, 20%, and 30%

收稿日期: 2022-08-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678152);福建省高校新世纪人才计划资助项目(GY-Z17069);福建工程学院科研启动基金资助项目(GY-Z13119)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51678152), Program for New Century Excellent Talents in Fujian Province of Institutions (GY-Z17069), Scientific Research Foundation of Fujian University of Technology (GY-Z13119).

作者简介: 叶建峰(1972—),男,副教授,硕士,主要从事建筑材料与岩土工程数值分析研究,(E-mail)yjfbt@fjut.edu.cn。

通信作者: 庄金平,男,教授,博士,(E-mail)yixiong1978@163.com。

rubber powder content were mixed with the steel fiber content of 0.5%, 1.0%, 1.5%, respectively. Prismatic axial compression tests were carried out to investigate the effects of steel fiber content and rubber powder content on the typical mechanical characteristics of specimens and the constitutive relationship of the axial compressive strength of the self-compacting concrete mixed with steel fiber and rubber was put forward. The results show that the failure of self-compacting concrete specimen mixed with steel fiber and rubber presents ductile failure, while its integrity is good. With the increase of rubber powder content, the axial compressive strength of the specimen gradually decreases. When the rubber powder content is high (20%, 30%), steel fiber has no obvious enhancement effect on the axial compressive strength of self-compacting concrete with rubber. The addition of rubber powder increases the peak strain of the specimen. The peak strain of the specimen reaches the maximum (an increase of 10%) when the amount of rubber powder is 10%. Different amounts of steel fiber can generally enhance the peak strain of self-compacting concrete mixed with steel fiber and rubber, but it does not show obvious regularity. The axial compressive constitutive relationship can reflect the mechanical properties of self-compacting concrete mixed with steel fiber and rubber powder.

Keywords: self-compacting concrete mixed with steel fiber and rubber; rubber powder; steel fiber; static mechanical properties; axial compressive strength; constitutive relation

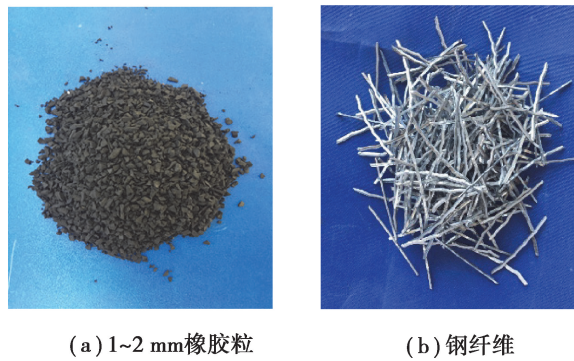
由于废旧橡胶在自然条件下是一种难以降解的高分子材料,肆意堆放将破坏生态环境,构成严重的“黑色污染”,寻求废旧橡胶的无害化处理迫在眉睫。自 20 世纪 90 年代起,许多发达国家为了处理日益增多的废旧橡胶轮胎,将其磨成橡胶粉或颗粒,再与水泥混凝土混合,制成橡胶混凝土,形成一种新型环保的土木工程材料。研究表明,在混凝土中掺入橡胶集料,能改善混凝土的性能使其具有轻质高弹、耐磨减震、冲击韧性好、抗裂性好等优点^[1-4],但掺入橡胶集料会导致混凝土强度降低的问题阻碍了橡胶混凝土在工程实践中的应用^[5-8]。钢纤维对混凝土具有阻裂、增强增韧的作用^[9-11],通过在橡胶混凝土中掺入适量的钢纤维,可以提高橡胶混凝土的抗裂性能和强度,提高其工程运用的可行性,尤其是在道路工程中的运用。目前,已有研究针对橡胶掺量和钢纤维掺量,进行钢纤维橡胶混凝土的抗压、抗折以及轴心受压应力-应变关系研究,结果表明,掺入钢纤维能改善橡胶混凝土强度低的问题,还能进一步提高混凝土的韧性^[12-16]。

自密实混凝土具有免振捣或少振捣的特点,可以克服橡胶颗粒上浮的现象,但对于钢纤维橡胶自密实混凝土的研究尚较为少见。以普通自密实混凝土为基础,通过等体积替代砂率分别掺入 10%、20%、30% 的橡胶颗粒及外掺体积率分别为 0.5%、1.0%、1.5% 的钢纤维,配制出钢纤维橡胶自密实混凝土。通过对试件进行静态轴心抗压试验,根据试件破坏现象进行了观测和分析,得到钢纤维橡胶自密实混凝土的应力应变曲线,研究了钢纤维和橡胶颗粒的掺量对其力学性能的影响,最后提出钢纤维橡胶自密实混凝土轴心抗压的本构关系。

1 试验概况

1.1 原材料

水泥:选用强度等级为 P.O.42.5 健福牌普通硅酸盐水泥,密度为 3.1 g/cm^3 ;中砂,表观密度为 2.65 g/cm^3 ;粒径 9~15 mm 的反击破碎石,密度为 2.75 g/cm^3 ;II 级粉煤灰,表观密度为 2.35 g/cm^3 ;废旧橡胶轮胎切割橡胶颗粒,粒径为 1~2 mm,如图 1(a)所示;矩形、剪切波浪形钢纤维,如图 1(b)所示;聚羧酸高效减水剂,密度 1.1 g/cm^3 。



(a) 1~2 mm橡胶粒

(b) 钢纤维

图 1 橡胶与钢纤维材料

Fig. 1 Rubber powder and steel fiber

1.2 试件配制

根据《自密实混凝土应用技术规程》(JGJ/T 283—2012)^[17]与《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)^[18],确定强度等级为 C50 的基准自密实混凝土配合比。保持粉煤灰、水泥、石子、水灰比不变的基础上,将 NaOH 浸泡后橡胶颗粒等体积取代砂子,替代率分别为 10%、20%、30%,同时外掺体积率分别为 0.5%、1%、1.5%的剪切波浪型钢纤维,并略微调整减水剂用量至钢纤维橡胶自密实混凝土的流动性良好。为确保橡胶颗粒和钢纤维的均匀性,先将砂子、橡胶颗粒、钢纤维、水泥、石子、水泥、粉煤灰依次倒入双轴搅拌机干拌,搅拌时间为 60 s;将减水剂融入水中,搅拌中均匀缓慢的加入,加水完成后最后再搅拌 120 s。设计 16 组,每组 3 个试件共计 48 个 150 mm×150 mm×300 mm 的棱柱体进行轴心抗压试验,留设 150 mm×150 mm×150 mm 立方体试件确定自密实混凝土强度等级,各组配合比如表 1 所示。

1.3 加载方法

采用万测公司生产的 HCT306B 微机控制电液伺服压力试验机进行加载,先以 1 kN/s 的速度加载至峰值荷载预测值的 80%后,再以 0.1 mm/min 的速度位移控制加载方式加载直至试验结束。

表 1 各组试件配合比

Table 1 Mix ratio of each group of specimens

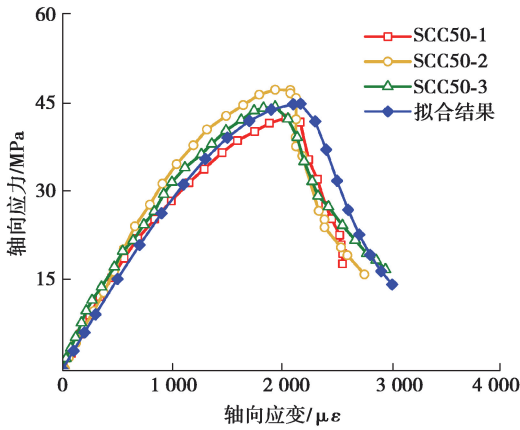
试件编号	材料用量/(kg·m ⁻³)								峰值应变 /10 ⁻³	峰值应力 /MPa	弹性模量 /10 ⁴ MPa
	水泥	粉煤灰	水	石子	砂	橡胶	钢纤维	减水剂			
SCC50	382	163	158	940	800	0	0	9.82	1984	44.75	3.48
SF0.5	382	163	158	940	800	0	39	9.82	2472	47.42	3.17
SF1.0	382	163	158	940	800	0	78	9.82	2137	50.48	2.2
SF1.5	382	163	158	940	800	0	117	9.82	2201	54.73	2.7
RR10	382	163	158	940	765	35	0	9.82	2319	29.29	2.36
SF0.5-RR10	382	163	158	940	765	35	39	9.82	2521	33.45	2.02
SF1.0-RR10	382	163	158	940	765	35	78	9.82	2471	39.67	2.02
SF1.5-RR10	382	163	158	940	765	35	117	9.82	2259	37.06	2.87
RR20	382	163	158	940	730	70	0	9.82	2161	26.32	2.52
SF0.5-RR20	382	163	158	940	730	70	39	9.82	1961	26.99	2.12
SF1.0-RR20	382	163	158	940	730	70	78	9.82	2335	26.34	1.98
SF1.5-RR20	382	163	158	940	730	70	117	9.82	2445	25.87	1.95
RR30	382	163	158	940	695	105	0	9.82	1985	27.25	1.89
SF0.5-RR30	382	163	158	940	695	105	39	9.82	2159	24.1	1.87
SF1.0-RR30	382	163	158	940	695	105	78	9.82	2190	25.32	1.85
SF1.5-RR30	382	163	158	940	695	105	117	9.82	2453	23.23	1.78

注:SF 代表钢纤维;RR 代表橡胶颗粒;SF 和 RR 后的数字代表相应掺量百分比的数字部分,例如,SF0.5-RR20 中 SF0.5 表示钢纤维掺量为 0.5%;RR20 代表橡胶掺量为 20%。

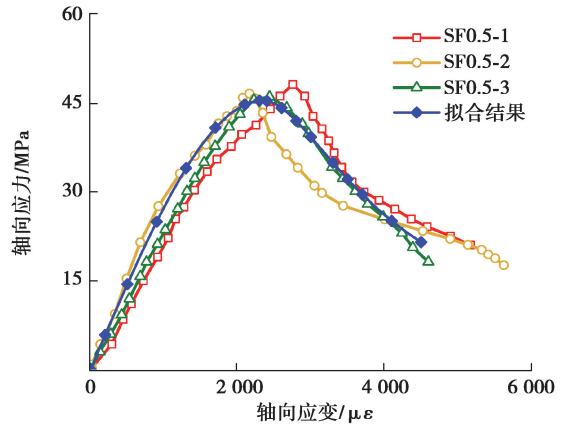
2 试验结果及分析

2.1 应力-应变曲线

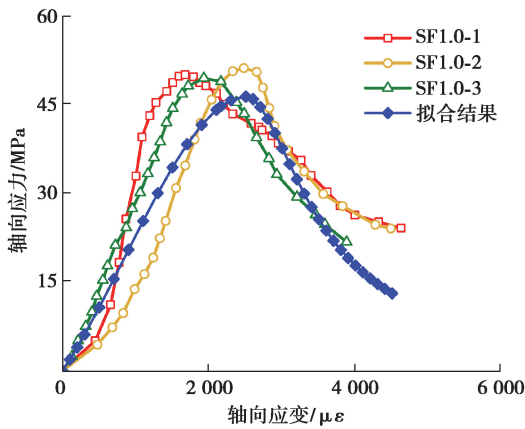
各棱柱体试件 28 d 轴心受压应力-应变曲线如图 2 所示,每组试件的 3 个相同试件测得的应力-应变曲线较为接近,离散性较小,说明试验数据是可靠的。可以看出,各组试件的应力-应变曲线在形状上较为相似,包含了弹性段、裂缝开展段、下降段;随着橡胶的掺量的增加,应力-应变曲线的峰值应力明显降低,随着钢纤维的掺入曲线下降段也有变缓和变长的趋势。各组试件应力-应变曲线典型特征量包括峰值应力及其对应的峰值应变、弹性模量如表 1 所示。



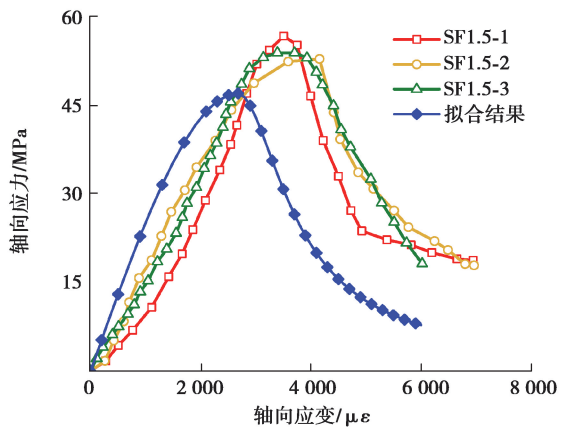
(a) SCC50



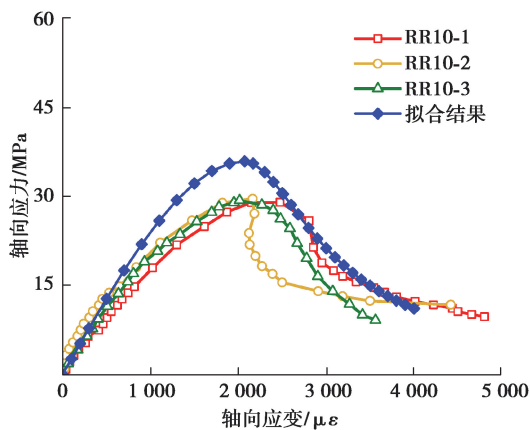
(b) SF0.5



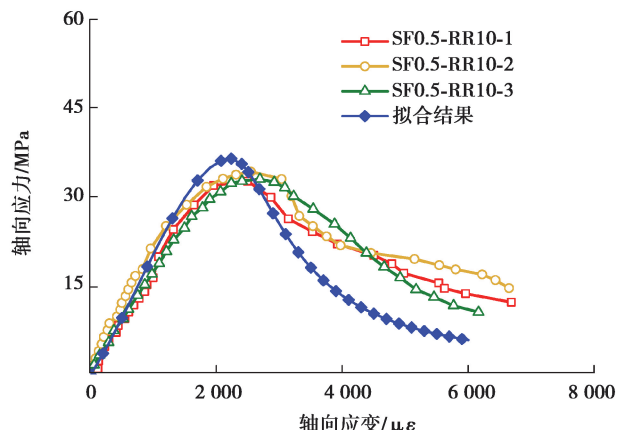
(c) SF1.0



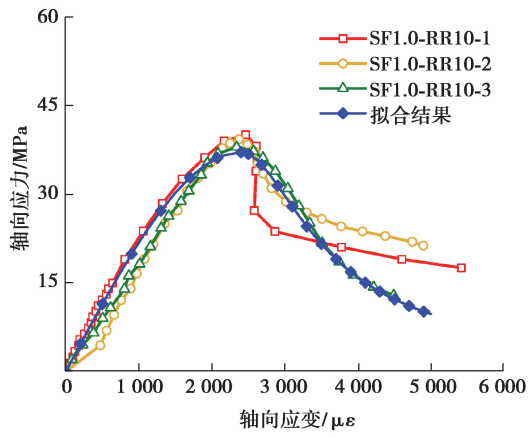
(d) SF1.5



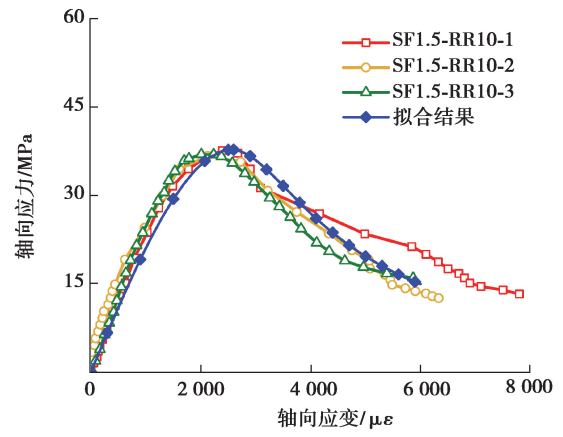
(e) RR10



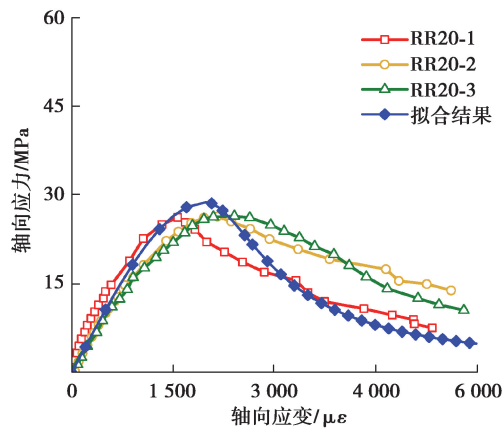
(f) SF0.5-RR10



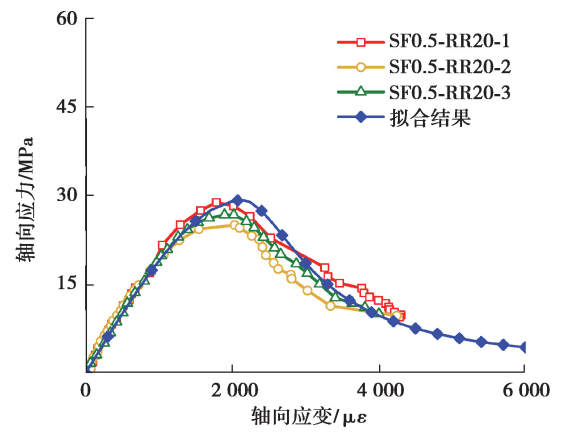
(g) SF1.0-RR10



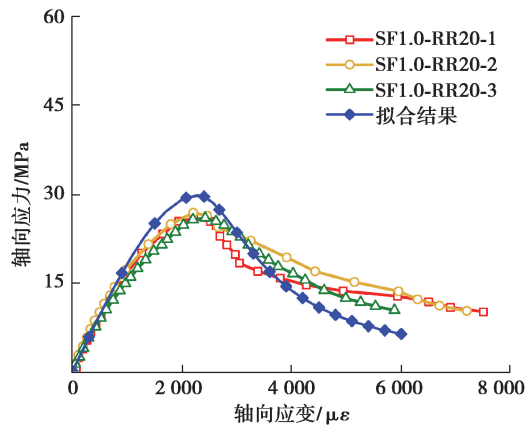
(h) SF1.5-RR10



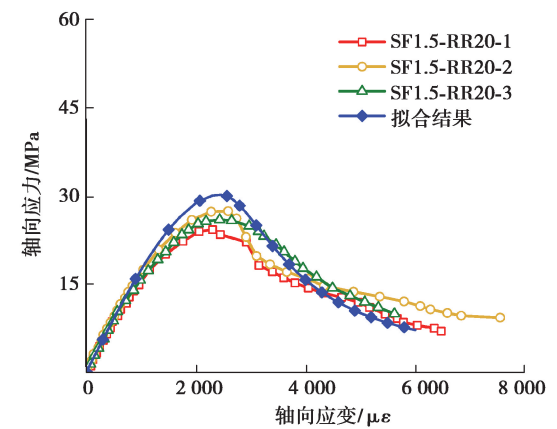
(i) RR20



(j) SF0.5-RR20



(k) SF1.0-RR20



(l) SF1.5-RR20

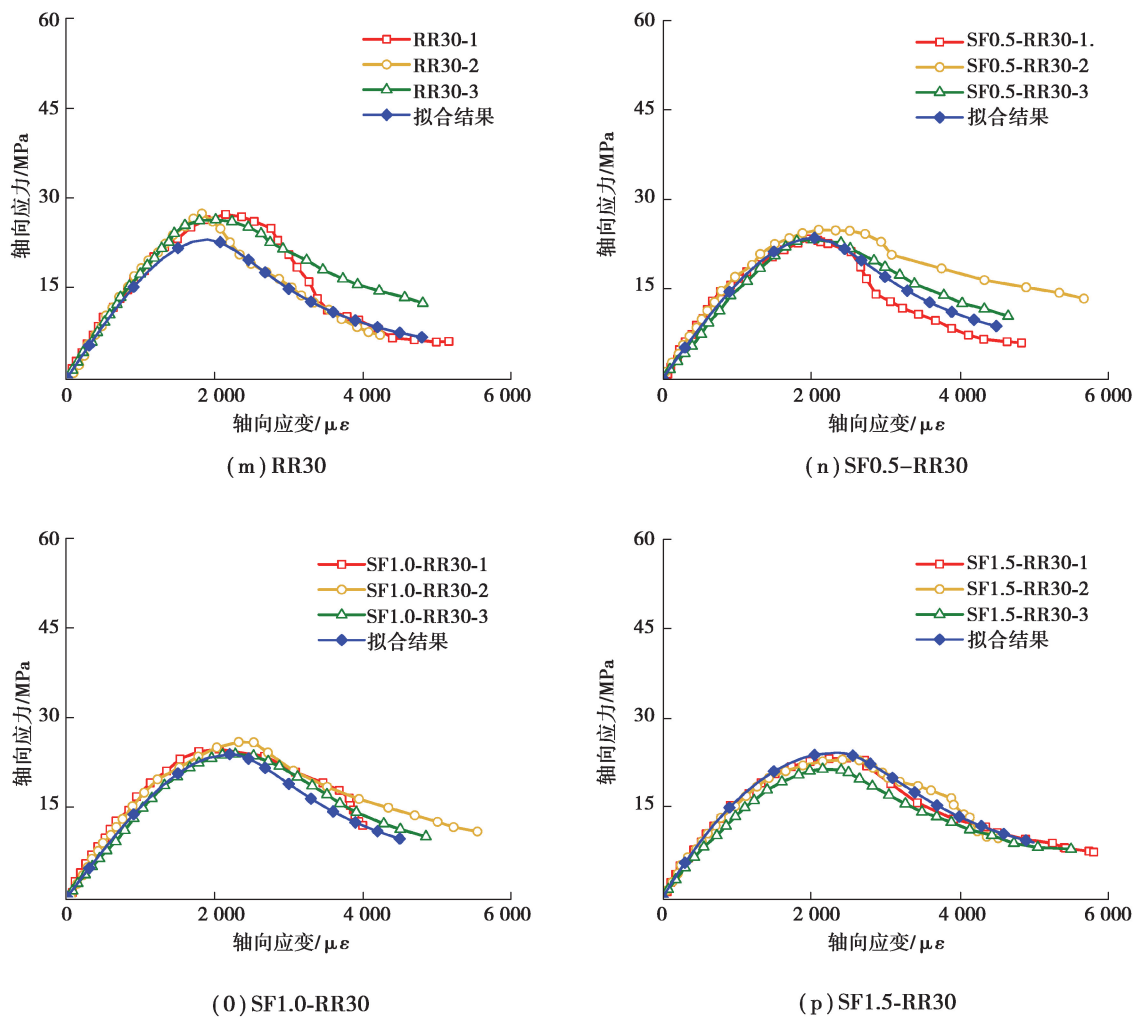


图 2 钢纤维橡胶自密实混凝土应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of steel fiber rubber self-compacting concrete

2.2 试验结果分析

2.2.1 试验现象分析

各试件加载过程中破坏现象总体较为相似。在加载初期混凝土试件表面未产生裂纹;荷载达到峰值荷载 80% 时,混凝土试件表面有少量混凝土碎屑剥落,但未出现明显的裂缝;超过峰值应力后,裂纹首先在接近混凝土试件中央的部位出现,伴随着明显的劈裂声后裂纹以“八字形”迅速向混凝土试件的四个角端蔓延,混凝土试件中部出现向外鼓胀的现象,裂缝的宽度逐渐增加,混凝土试件碎块部分向外剥落,斜裂纹贯穿整个截面,最终形成“X”型破坏形态。图 3 给出了典型的破坏形态。

普通自密实混凝土棱柱体试件脆性破坏较明显,如图 3(a) 所示,以 SCC50 为例,除了“八字形”的裂纹外,混凝土棱柱体试件边缘出现了较长的从上到下的近乎贯通的大裂缝,强度下降迅速,除了明显的裂缝数量的增多,宽度的增大外,迅速出现“八字形”及上下贯通形的裂纹,且破坏时伴随较大的崩裂声。

与普通自密实混凝土相比,钢纤维自密实混凝土的破坏形式由脆性破坏转变为近似延性破坏的形式,如图 3(b) 所示。以 SF0.5 为例,钢纤维自密实混凝土的弹性阶段较长;破坏阶段,无明显的崩裂声,裂纹出现较晚,有较少的细小裂纹,且在裂纹扩展速度方面明显要比普通自密实混凝土缓慢;破坏后,试件表面的裂缝数量较多但未完全断裂,且无碎块,混凝土试件基本上保持原来的外形,只呈现较少的脱皮现象。

橡胶自密实混凝土棱柱体试件相较于基准自密实混凝土棱柱体试件,混凝土试件表面裂纹较多,试件的完整性较好,如图 3(c) 所示。以 RR10 为例,橡胶自密实混凝土试件的强度较普通自密实混凝土试件明显降低,随着加载的进行,混凝土试件表面的竖向细小裂纹数量明显增多,当达到峰值荷载后,裂纹由于橡胶的存

在无法贯通,但“八字形”主裂纹弧度较大,随着橡胶掺量及粒径的增加,这种现象更为明显,表现出与普通自密实混凝土不同的破坏模式。

钢纤维橡胶自密实混凝土试件破坏形式如图 3(d)所示。以 SF0.5-RR10 为例,相较于普通自密实混凝土试件,钢纤维橡胶自密实混凝土试件的破坏呈现延性破坏的同时,其完整性也较好。此外,在峰值荷载以前,混凝土试件表面对角线部位出现细小裂纹,当达到峰值荷载后,裂纹也主要集中于对角线区域,且出现脱皮现象,由于内部钢纤维的拉力作用,无贯通性裂纹。

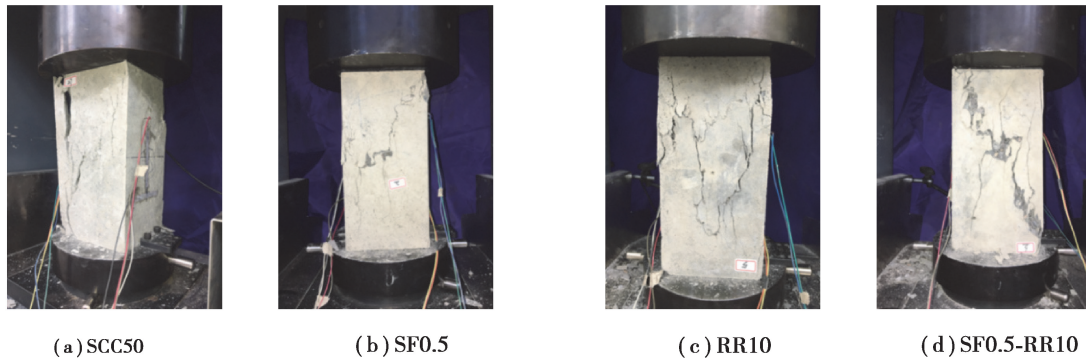


图 3 试件的典型破坏形态

Fig. 3 Typical failure mode of the specimen

2.2.2 各因素对自密实混凝土轴心抗压强度的影响

1) 橡胶掺量对自密实混凝土轴心抗压强度的影响

图 4 为橡胶掺量对自密实混凝土轴心抗压强度的影响。随着橡胶掺量的增加(0%~30%),轴心抗压强度呈逐渐降低的趋势。在钢纤维掺量为 0.5% 情况下掺入 10%、20%、30% 橡胶时,试件轴心抗压强度分别减少了 29.4%、43.1% 和 49.2%;在钢纤维掺量为 1.0% 情况下掺入 10%、20%、30% 橡胶时,试件的轴心抗压强度分别减少了 21.4%、47.8%、49.8%;在钢纤维掺量为 1.5% 情况下掺入 10%、20%、30% 橡胶时,试件轴心抗压强度分别减少了 32.3%、52.7%、57.6%。普通自密实混凝土橡胶掺量在 20%、30% 时,橡胶自密实混凝土试件的轴心抗压降低了 41.2%、39.1%。综上所述,当橡胶掺量为 20%、30% 时,试件的轴心抗压强度下降幅度均较大,而当橡胶掺量为 10% 时,试件的轴心抗压强度下降幅度较小。

2) 钢纤维掺量对自密实混凝土轴心抗压强度的影响

图 5 为钢纤维掺量对橡胶钢纤维自密实混凝土的影响。在基准普通自密实混凝土中分别加入 0.5%、1.0%、1.5% 的钢纤维,试件轴心抗压强度较普通自密实混凝土试件分别提高了 5.6%、8.9%、18.2%,呈现随着钢纤维掺量逐渐增加而增大的趋势;在橡胶掺量为 10% 情况下掺入 0.5%、1.0%、1.5% 钢纤维后,试件轴心抗压强度分别增长了 12.4%、26.2%、21.0%,呈现随着钢纤维掺量的增加,轴心抗压强度先增大后减小的趋势,其中在试验范围内钢纤维掺量为 1.0% 时,轴心抗压强度达到最大值为 39.67 MPa;在橡胶掺量为 20% 情况下掺入 0.5%、1.0%、1.5% 钢纤维后,试件轴心抗压强度变化程度不明显,分别为 26.9、26.34、25.87 MPa;在橡胶掺量为 30% 情况下掺入 0.5%、1.0%、1.5% 钢纤维后,轴心抗压强度出现了一定程度的下降,分别为 12.2%、9.2%、15.4%。综上所述,在普通自密实混凝土及橡胶掺量较少(10%)的自密实混凝土中加入钢纤维时,试件的轴心抗压强度有所提高,但当自密实混凝土中的橡胶掺量较高时(20%、30%),钢纤维对橡胶自密实混凝土轴心抗压强度无明显的增强效果,甚至会出现小幅下降的现象。

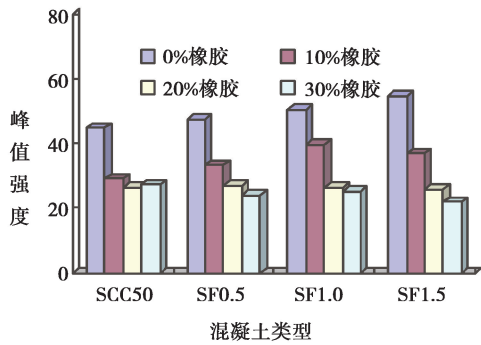


图 4 橡胶掺量对试件轴心抗压强度的影响

Fig. 4 The influence of rubber content on the axial compressive strength of the specimen

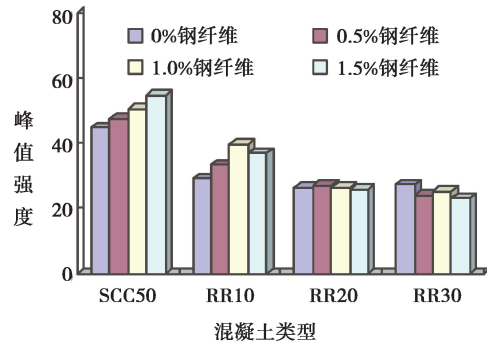


图 5 钢纤维掺量对试件轴心抗压强度的影响

Fig. 5 The influence of steel fiber content on the axial compressive strength of the specimen

2.2.3 各因素对橡胶混凝土弹性模量的影响

1) 橡胶掺量对橡胶自密实混凝土弹性模量的影响

图 6 为橡胶掺量对钢纤维橡胶自密实混凝土的弹性模量的影响。可以看出,随着橡胶掺量的逐渐增加,钢纤维橡胶自密实混凝土的弹性模量基本呈现逐渐减小的趋势。仅橡胶掺量为 0%、10%、20%、30%时的弹性模量分别为 3.48×10^4 、 2.36×10^4 、 2.52×10^4 、 1.89×10^4 MPa; 钢纤维掺量为 0.5%, 橡胶掺量为 0%、10%、20%、30%时,试件弹性模量分别为 3.17×10^4 、 2.02×10^4 、 2.12×10^4 、 1.87×10^4 MPa; 钢纤维掺量为 1.0%, 橡胶掺量为 0%、10%、20%、30%时,试件弹性模量分别为 2.2×10^4 、 2.02×10^4 、 1.98×10^4 、 1.85×10^4 MPa; 钢纤维掺量为 1.5%, 橡胶掺量为 0%、10%、20%、30%时,试件的弹性模量分别为 2.7×10^4 、 2.87×10^4 、 1.95×10^4 、 1.78×10^4 MPa。综上所述,无论普通自密实混凝土还是钢纤维自密实混凝土,橡胶的掺入使试件的弹性模量有明显的减小,而随着橡胶掺量的增多,各试件的弹性模量逐渐降低。

2) 钢纤维掺量对自密实混凝土弹性模量的影响

图 7 为钢纤维掺量对钢纤维橡胶自密实混凝土的弹性模量的影响。当普通自密实混凝土中掺入 0.5%、1.0%、1.5%的钢纤维时,试件的弹性模量较普通自密实混凝土降低了 8.9%、36.8%、22.4%; 当在掺量为 10%的橡胶自密实混凝土中掺入 0.5%、1.0%的钢纤维时,试件的弹性模量分别降低了 14.4%、14.4%; 当加入钢纤维掺量为 1.5%时,试件的弹性模量增加了 17.7%, 呈现先减小后增大的趋势; 当在掺量为 20%的橡胶自密实混凝土中掺入 0.5%、1.0%、1.5%的钢纤维时,试件的弹性模量分别降低了 15.9%、21.4%、22.6%; 当在掺量为 30%的橡胶自密实混凝土中掺入 0.5%、1.0%、1.5%的钢纤维时,试件的弹性模量分别降低了 1.1%、2.1%、5.8%。综上所述,随着钢纤维掺量的增加,混凝土的弹性模量总体上呈降低的趋势,但降低的幅度有减小的趋势。

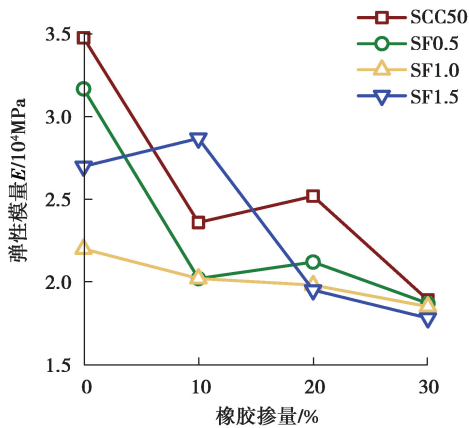


图 6 橡胶掺量对试件弹性模量的影响

Fig. 6 Effect of rubber content on the elastic modulus of the specimen

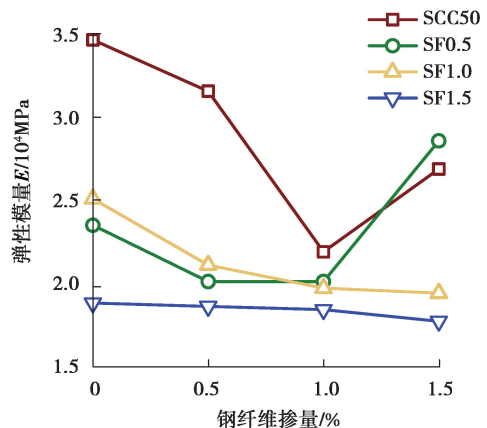


图 7 钢纤维掺量对试件弹性模量的影响

Fig. 7 Effect of steel fiber content on the elastic modulus of the specimen

2.2.4 各因素对自密实混凝土峰值应变的影响

1) 橡胶掺量对自密实混凝土峰值应变的影响

图 8 为橡胶掺量对钢纤维橡胶自密实混凝土峰值应变的影响规律图。当自密实混凝土中掺入 10%、20%、30% 橡胶时,橡胶自密实混凝土的峰值应变较基准自密实混凝土分别增加了 14.4%、8.2%、1.1%,呈现先随橡胶掺量的增加先增大后减小的趋势,在试验范围内,当掺入 10% 橡胶时,峰值应变达到最大值,为 2 318.65 $\mu\epsilon$ 。在钢纤维掺量为 0.5% 的情况下,随橡胶掺量的增加钢纤维橡胶自密实混凝土的峰值应变呈现先增大后减小的趋势,当掺入 10% 的橡胶时,峰值应变增加了 1.96%,当掺入 20%、30% 橡胶后分别减小了 20.6%、12.7%,在掺入 10% 橡胶时,峰值应变达到最大值 2 521.18 $\mu\epsilon$;在钢纤维掺量为 1.0% 情况下掺入 10%、20%、30% 橡胶时,钢纤维橡胶自密实混凝土的峰值应变较基准钢纤维自密实混凝土分别增加了 13.5%、8.5%、2.4%,呈现先随橡胶掺量的增加先增大后减小的趋势,在试验范围内,当掺入 10% 橡胶时,峰值应变达到最大值,为 2 471.18 $\mu\epsilon$;在钢纤维掺量为 1.5% 情况下掺入 10%、20%、30% 橡胶时,钢纤维橡胶自密实混凝土的峰值应变较基准钢纤维自密实混凝土分别增加了 7.49%、10%、10.3%,呈现逐渐增大的趋势,峰值应变最大为 2 453.45 $\mu\epsilon$ 。可以看出,橡胶的掺入总体上提高了钢纤维自密实混凝土的峰值应变。

2) 钢纤维掺量对自密实混凝土峰值应变的影响

图 9 为钢纤维掺量对钢纤维橡胶自密实混凝土的峰值应变的影响规律图。当在普通自密实混凝土中掺入 0%、0.5%、1.0%、1.5% 的钢纤维时,试件的峰值应变分别为 1 983.78、2 471.85、2 137.38、2 200.52 $\mu\epsilon$;当在 10% 掺量橡胶自密实混凝土中掺入 0%、0.5%、1.0%、1.5% 的钢纤维时,试件的峰值应变分别为 2 318.65、2 521.18、2 471.18、2 259.21 $\mu\epsilon$;当在 20% 掺量橡胶自密实混凝土中掺入 0%、0.5%、1.0%、1.5% 的钢纤维时,试件的峰值应变分别为 2 160.92、1 960.67、2 335.4、2 445.45 $\mu\epsilon$;当在 30% 掺量橡胶自密实混凝土中掺入 0%、0.5%、1.0%、1.5% 的钢纤维时,试件的峰值应变分别为 1 985.42、2 158.97、2 190.18、2 453.45 $\mu\epsilon$ 。可以看出,钢纤维的掺入量对钢纤维橡胶混凝土的峰值应变普遍有增强的效果,但没有呈现出明显的规律性。

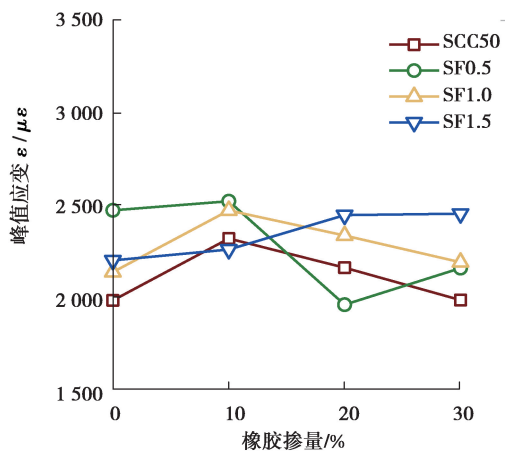


图 8 橡胶掺量对试件峰值应变的影响

Fig. 8 Effect of rubber content on the peak strain of the specimen

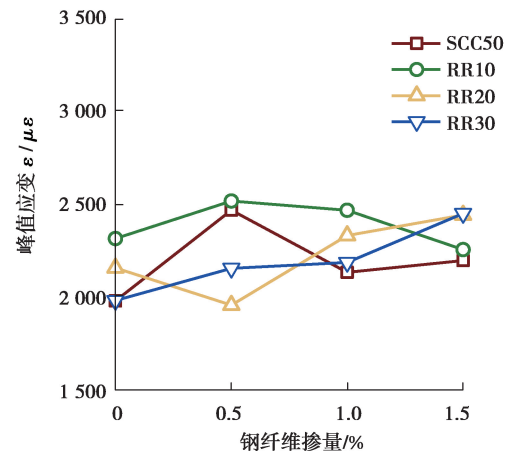


图 9 钢纤维掺量对试件峰值应变的影响

Fig. 9 Effect of steel fiber content on the peak strain of the specimen

2.3 钢纤维橡胶自密实混凝土应力-应变本构关系模型

目前,关于混凝土受压应力-应变关系的形式较多,其中文献[16]提出的分段式应力-应变关系如式(2)~式(4)所示,是现行混凝土结构设计规范所采用的形式。

$$x = \epsilon / \epsilon_c,$$

$$y = \sigma / f_c, \quad (2)$$

上升段

$$y = ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3, \quad (3)$$

下降段:

$$y = x / [b(x - 1)^2 + x]. \quad (4)$$

根据各试验结果进行统计分析,获得式(2)~式(4)中各参数的解析表达式如下

$$a = 1.5, b = 7e^{-3.3\rho_r} (1 + 3.3\rho_s), \quad (5)$$

$$f_c = f_{c0} e^{-2.2\rho_r} (1 + 3.3\rho_s), \quad (6)$$

$$\epsilon_c = 2000 (f_c/30) 0.2(1 + 15\rho_s), \quad (7)$$

式中: ρ_r 为橡胶掺量,其掺量适用范围为 0~30%; ρ_s 为钢纤维掺量,其掺量适用范围为 0~1.5%; f_{c0} 为基准自密实混凝土棱柱体抗压强度。由预算公式计算的曲线如图 2 所示,预测曲线与试验曲线总体上吻合良好。

3 结 论

1) 钢纤维橡胶自密实混凝土试件的破坏呈现出延性特征,破坏的同时完整性也较好,虽出现脱皮现象,但没有出现贯通性裂纹。

2) 随着橡胶掺量的提高,试件轴心抗压强度逐渐降低,当橡胶的掺入量为 20%、30% 时,无论是普通自密实混凝土还是各掺量的钢纤维自密实混凝土的轴心抗压强度下降幅度均较大,而当橡胶掺量为 10% 时,各试件的轴心抗压强度下降较小。

3) 在橡胶掺量较少(10%)的自密实混凝土中加入钢纤维时,试件的轴心抗压强度有少量的提高,随着钢纤维掺量的提高,强度也逐渐增大,但当橡胶掺量较高时(20%、30%),钢纤维对橡胶自密实混凝土轴心抗压强度无明显的增强效果,甚至会出现较小的下降现象。

4) 随着橡胶掺量的增多,各试件的弹性模量逐渐降低;钢纤维的掺入降低了普通自密实混凝土的弹性模量,但随着钢纤维掺量提高,弹性模量降低幅度减小。

5) 橡胶的掺入提高了自密实混凝土的峰值应变,在试验范围内当橡胶掺量为 10% 时,峰值应变的增加量最大,峰值应变的最大增大量在 10%;钢纤维的掺入量对钢纤维橡胶混凝土的峰值应变普遍有增强的效果。

6) 建立的钢纤维橡胶自密实混凝土受压应力-应变曲线计算公式所得曲线与实测曲线吻合较好。

参考文献:

- [1] Copetti C M. Evaluation of tire rubber surface pre-treatment and silica fume on physical-mechanical behavior and microstructural properties of concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256: 120670.
- [2] 亢景付,任海波,张平祖. 橡胶混凝土的抗裂性能和弯曲变形性能[J]. 复合材料学报, 2006, 23(6): 158-162.
Kang J F, Ren H B, Zhang P Z. Cracking-resistance and flexural property of rubberized concrete[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2006, 23(6): 158-162.(in Chinese)
- [3] Xue J. Rubberized concrete: a green structural material with enhanced energy-dissipation capability[J]. Construction and Building Materials, 2013, 42: 196-204.
- [4] 郝负洪,樊磊,韩燕,等. 冲击荷载作用下橡胶混凝土的损伤研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(17): 73-80.
Hao Y H, Fan L, Han Y, et al. Damage of rubber concrete under impact loads[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(17): 73-80.(in Chinese)
- [5] Gupta T. Impact resistance of concrete containing waste rubber fiber and silica fume[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 83: 76-87.
- [6] AbdelAleem B H, Ismail M K, Hassan A A A. Properties of self-consolidating rubberised concrete reinforced with synthetic fibres[J]. Magazine of Concrete Research, 2017, 69(10): 526-540.
- [7] Topçu I B. The properties of rubberized concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(2): 304-310.
- [8] 王德奎. 橡胶自密实混凝土性能分析及质量控制[D]. 福州:福建工程学院, 2018.
Wang D K. Performance analysis and quality control of rubber self-compacting concrete[D]. Fuzhou: Fujian Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [9] 白敏,牛荻涛,姜磊,等. 钢纤维改善混凝土力学性能和微观结构的研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(10): 2084-2089.
Bai M, Niu D T, Jiang L, et al. Research on improving the mechanical properties and microstructure of concrete with steel fiber[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(10): 2084-2089.(in Chinese)
- [10] 薛刚,侯帅,牛建刚. 塑钢纤维橡胶混凝土路用性能试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(12): 98-102, 108.
Xue G, Hou S, Niu J G. Experimental research on pavement performance of rubber concrete incorporated with plastic-

- steel fiber[J]. Building Structure, 2019, 49(12): 98-102, 108.(in Chinese)
- [11] 王怀亮. 钢纤维高性能轻骨料混凝土多轴强度和变形特性研究[J]. 工程力学, 2019, 36(8): 122-132.
Wang H L. Strength and deformation properties of high performance steel fiber reinforced lightweight concrete under multiaxial compression[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(8): 122-132.(in Chinese)
- [12] Kang W H, Ramesh R B, Mirza O, et al. Reliability based design of RC beams with recycled aggregate and steel fibres[J]. Structures, 2017, 11: 135-145.
- [13] Ismail M K, Hassan A A. Shear behaviour of large-scale rubberized concrete beams reinforced with steel fibres[J]. Construction and Building Materials, 2017, 140: 43-57.
- [14] 李小慧. 纤维橡胶混凝土基本力学及耐久性能研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(7): 118-122, 137.
Li X H. Research on mechanical properties and durability of fiber-rubber concrete[J]. Building Science, 2016, 32(7): 118-122, 137.(in Chinese)
- [15] 彭焜, 周金枝, 吴维熙. 钢纤维掺量对橡胶混凝土力学性能影响[J]. 湖北工业大学学报, 2019, 34(5): 118-120.
Peng K, Zhou J Z, Wu W X. Effect of steel fiber content on mechanical properties of rubber concrete[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2019, 34(5): 118-120.(in Chinese)
- [16] 薛刚, 武春风, 胡小龙. 塑钢纤维-橡胶混凝土应力-应变关系试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(11): 3796-3802.
Xue G, Wu C F, Hu X L. Experiment study on stress-strain relationship of plastic fiber reinforced concrete rubber [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(11): 3796-3802.(in Chinese)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 自密实混凝土应用技术规程: JGJ/T283-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical regulations for the application of self-compacting concrete: JGJ/T283-2012[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.(in Chinese)
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ55-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design specification for ordinary concrete mixture: JGJ55-2011[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011.(in Chinese)

(编辑 陈移峰)