

文章编号: 1001-4888(2022)05-0711-11

纤维再生混凝土劈裂抗拉力学性能试验研究^{*}

林桂武¹, 刘凯格¹, 陈宇良^{1,2}, 徐鸿飞²

(1. 广西科技大学 土木建筑工程学院, 广西柳州 545006; 2. 柳州东方工程橡胶制品有限公司, 广西柳州 545006)

摘要: 为研究纤维再生混凝土(FRAC)的抗拉性能,以纤维类型和再生骨料取代率为变化参数,对 4 种纤维再生混凝土进行劈裂抗拉试验。试验观察了试件的破坏形态,获取了 FRAC 的荷载-位移曲线及抗拉强度等数据,并深入分析了变化参数对 FRAC 劈裂抗拉力学性能及耗能能力的影响规律。结果表明:与碳纤维、聚丙烯纤维和聚乙烯醇纤维相比,钢纤维的增韧效果更明显,且掺入钢纤维可有效提高再生混凝土的劈拉强度与耗能能力;掺入 0.3% 的碳纤维后,再生混凝土的抗拉强度和抗压比分别平均提高了 95.9% 和 71.8%;掺入聚乙烯醇纤维和聚丙烯纤维对再生混凝土改性效果不显著;随着取代率增加,纤维再生混凝土的劈裂抗拉强度及耗能能力均逐渐降低,抗压比先增大后减小。基于试验数据,文中还提出了 FRAC 劈拉强度的计算关系式。

关键词: 纤维;再生混凝土;劈拉强度;力学性能

中图分类号: TU528

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-21-229

0 引言

再生混凝土(RAC)作为一种绿色环保的建筑材料,不仅在一定程度上解决了建筑固废的处理问题,而且有助于天然资源的保护。再生骨料是由废弃建筑物等经过破碎、清洗、筛分后获得的,其常常携带有微裂缝及老水泥浆体,以至于再生混凝土的力学性能比普通混凝土要低^[1-3]。为改善其不足,可利用纤维的阻裂、增韧作用来提高再生混凝土的改性性能,因此,研究不同纤维对再生混凝土的改性效果,并得到改性效果较理想的纤维,可推动再生混凝土在实际工程的发展与应用。

目前,许多学者展开了不同纤维类型混凝土力学性能的相关研究^[4-6]。Li 等^[7]研究了碳纤维掺量对混凝土力学性能的影响,结果表明碳纤维混凝土的抗压强度和劈拉强度随碳纤维掺量的增大先增大后减小,并在碳纤维掺量为 0.3% 时达到峰值。杨虹等^[8]以碳纤维的体积掺量为变化参数对轻骨料混凝土进行抗压强度试验,发现碳纤维的体积掺量为 0.3% 时,混凝土抗压强度提高了 10.28%。高丹盈^[9]、Shi^[10]等对钢纤维再生混凝土试件进行了单轴受压试验研究,结果表明钢纤维掺量为 1.0% 时可显著增强再生混凝土的抗压强度、劈拉强度和韧性。赵建军等^[11]研究了聚乙烯醇纤维对混凝土力学性能的改性效果,发现掺入聚乙烯醇纤维可以明显提高混凝土的劈裂抗拉强度和抗折强度。孙呈凯等^[12]针对聚乙烯醇纤维再生混凝土的各项力学性能进行了正交试验,发现聚乙烯醇纤维体积掺量为 0.1% 时可有效提高再生混凝土的抗压及劈拉强度。牛荻涛^[13]、罗洪林^[14]等研究了聚丙烯纤维掺量对混凝土力学性能的影响,结果表明掺入体积掺量为 0.1% 的聚丙烯纤维可有效提高混凝土的劈拉强度和抗折强度。

^{*} 收稿日期: 2021-09-27; 修回日期: 2022-02-12

基金项目: 中国博士后科学基金(2021M693854);广西自然科学基金(2019GXNSFBA245030);广西水工程材料与结构重点实验室(GXHRI-WEMS-2020-05);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)

通信作者: 陈宇良(1987-),男,博士,副教授。主要从事可持续绿色建筑材料的研究及应用。Email: ylchen@gxust.edu.cn

综上所述,虽然现有研究在纤维改性再生混凝土劈裂抗拉性能方面已取得一定的研究成果,但由于不同纤维之间的物理性质存在较大差异,其在水泥基体内部的作用机理也不尽相同,所以,为进一步揭示不同类型纤维对再生混凝土劈裂抗拉性能的改性效果,本文在现有研究的基础上,选定钢纤维、碳纤维、聚丙烯纤维及聚乙烯醇纤维的较优掺量,通过这 4 种纤维再生混凝土的劈裂抗拉强度试验,研究纤维类型对再生混凝土劈拉性能的影响规律,以期得到对再生混凝土改性效果较优的纤维类型,以便为纤维再生混凝土的工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 原材料

外掺纤维类型包括波纹型钢纤维(SF)、碳纤维(CF)、聚丙烯纤维(PPF)、聚乙烯醇纤维(PVA),4 种纤维的物理性能见表 1,外观形貌如图 1 所示。再生粗骨料由废弃钢筋混凝土梁经破碎、筛分、清洗后得到,天然粗骨料为普通碎石,粗骨料粒径均为 5~20mm,连续级配,骨料的基本物理性能见表 2;水泥采用 P·O42.5 普通硅酸盐水泥;细骨料为普通河砂,细度模数为 2.38;拌合水为城市自来水。

表 1 纤维基本物理性能
Tab. 1 Basic physical properties of fibers

纤维名称	密度/(g·cm ⁻³)	直径/mm	长度/mm	长径比	断裂伸长率/%	弹性模量/GPa
SF	7.85	0.9	37	41.1	1.8	200
CF	1.76	0.07	10	142.9	2	205
PPF	0.91	0.03	12	400	26.8	4.09
PVA	1.29	0.04	18	450	6.9	40

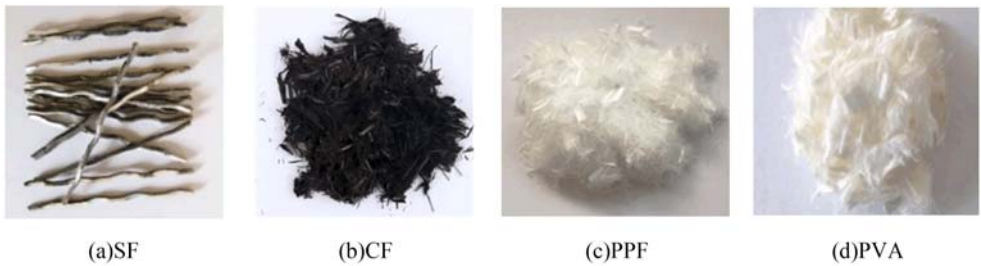


图 1 各类型纤维的外观形貌
Fig. 1 Appearance of all types fiber

表 2 粗骨料物理性能
Tab. 2 Physical properties of coarse aggregate

粗骨料类别	堆积密度/(kg·m ⁻³)	表观密度/(kg·m ⁻³)	含水率/%	压碎指标/%	级配/mm
天然骨料	1499	2703	0.07	17.15	5~20
再生骨料	1321	2599	1.6	25.63	5~20

1.2 试验设计

为研究不同纤维类型对再生混凝土的劈裂抗拉破坏机理,以再生粗骨料取代率 γ 与纤维类型为试验参数,再生粗骨料取代率考虑了 0%、50%和 100%,纤维类型考虑了 SF、CF、PPF 和 PVA 4 种典型纤维,根据 JGJ/T 221—2010《纤维混凝土应用技术规程》和文献[7—14],选取 4 种纤维的长度为 37mm、10mm、12mm 和 18mm(其对应的体积纤维掺量 V_f 分别为 1.0%、0.3%、0.1%和 0.1%),设计并制作了 15 组标准立方体试块(150mm×150mm×150mm),每组 3 个,共计 45 个。混凝土的目标设计强度等级为 C35,各组试件的设计参数见表 3。

表 3 试件的设计参数
Tab. 3 Design parameters of specimens

试件编号	纤维类型	纤维掺量 $V_f/\%$	取代率 $\gamma/\%$	试件编号	纤维类型	纤维掺量 $V_f/\%$	取代率 $\gamma/\%$
RAC-0	—	—	0	CF-100	CF	0.3	100
RAC-50	—	—	50	PPF-0	PPF	0.1	0
RAC-100	—	—	100	PPF-50	PPF	0.1	50
SF-0	SF	1.0	0	PPF-100	PPF	0.1	100
SF-50	SF	1.0	50	PVA-0	PVA	0.1	0
SF-100	SF	1.0	100	PVA-50	PVA	0.1	50
CF-0	CF	0.3	0	PVA-100	PVA	0.1	100
CF-50	CF	0.3	50	—	—	—	—

1.3 加载装置

加载装置采用图 2 所示的 RMT-301 试验机,试件加载方式为位控加载,加载速率为 0.02mm/s,当竖向裂缝贯穿试件后停止加载。

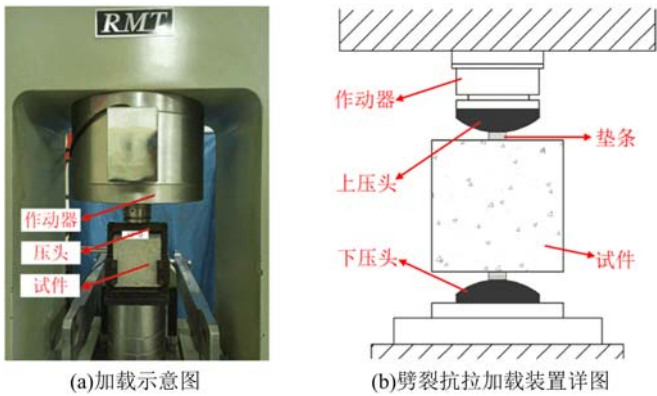


图 2 试验装置

Fig. 2 Test setup

2 试验结果

2.1 破坏形态

图 3 为不同纤维类型和再生骨料取代率下 FRAC 的典型劈裂破坏形态。由图可见,纤维再生混凝土试件在加载初期表面无明显裂缝,随着荷载的增加,试件内部的水平拉应力不断增大,且试件两侧中部率先产生微裂缝;当荷载接近于峰值荷载时,掺有 CF、PPF、PVA 的再生混凝土试件,在中部出现一条到两条竖向裂缝,裂缝宽度较大且发展迅速,贯穿整个试件;最终,纤维再生混凝土试件基本劈裂为两块而破坏,试验结束。掺有 SF 的试件未被立即劈裂成两半,这是由于掺入 SF 的试件内部裂缝发展较大时,跨越裂缝的 SF 有效地起到阻裂的作用,进而降低了裂缝扩展的速率。

由图 3 可见,纤维再生混凝土的破坏形态相似,主裂缝出现在试件中部,且呈“1”字形。掺入 CF、PPF、PVA 的再生混凝土试件发生脆性破坏且表面平整,碎块较少;掺入 SF 的阻裂增韧效果更显著,对再生混凝土的破坏具有延缓作用,试件表面裂缝间有较多的连接块体。与普通混凝土相比,纤维再生混凝土劈拉断裂面上主要是大部分粗骨料被拉断,新水泥砂浆、水泥砂浆与粗骨料的黏结界面出现小部分断裂。

2.2 荷载-位移曲线

图 4 为 FRAC 对应的荷载-位移(F-s)曲线。由图可见,纤维再生混凝土试件的荷载-位移曲线大致

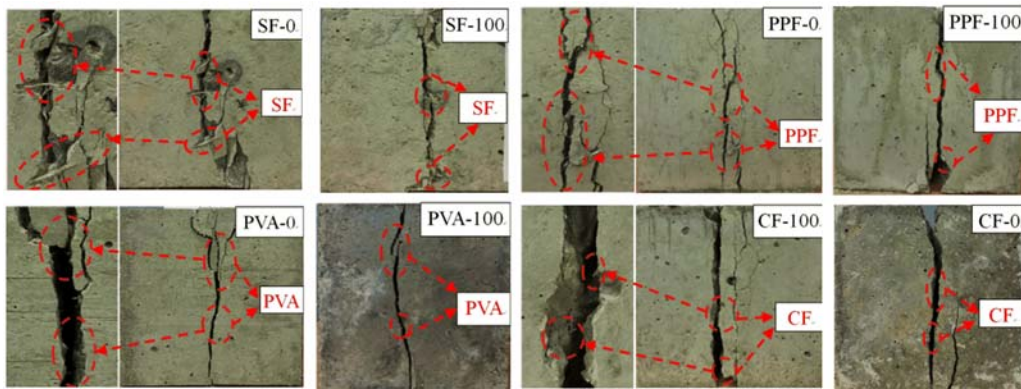


图 3 典型劈拉破坏形态

Fig. 3 Typical splitting tensile failure patterns

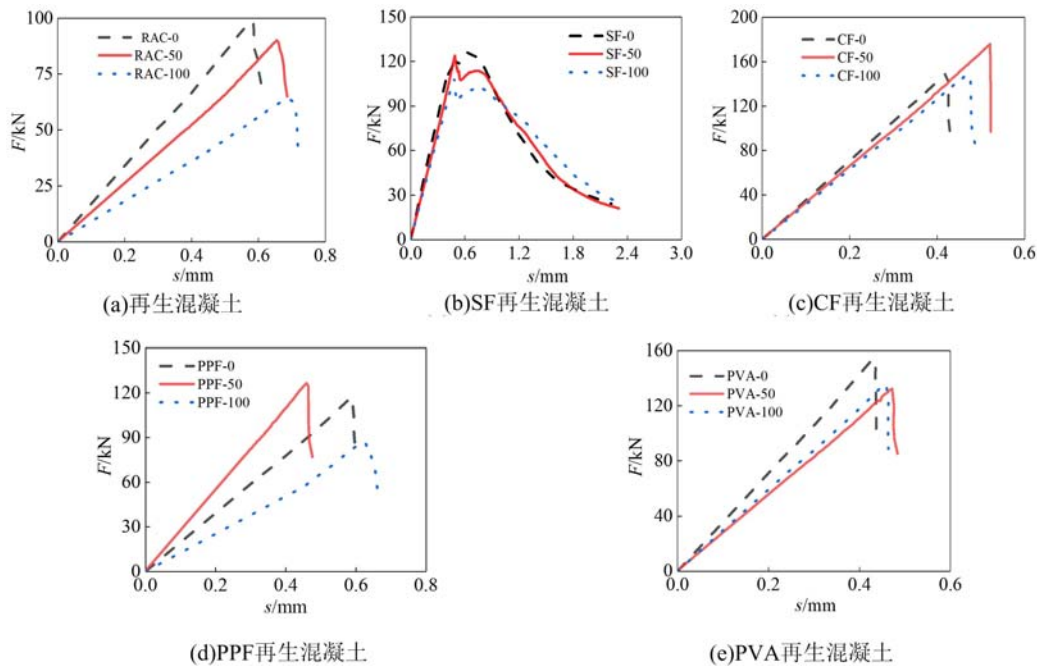


图 4 纤维再生混凝土荷载-位移曲线

Fig. 4 Splitting tensile load-displacement curves of fiber recycle aggregate concrete

分为 2 个阶段。

第 1 阶段为上升段,试件在弹性阶段时荷载-位移曲线接近直线增长,荷载主要由试件内部的胶结力和混凝土基体对纤维的包裹力共同承担。在受拉初期,呈三维乱向分布的 CF、PPF 及 PVA 可较好地抑制微观裂缝的开展,而由于 SF 尺寸与微裂缝相差较远,掺有 SF 试件内部的微裂缝随着荷载的增加不断延伸、扩展,并在孔隙及界面薄弱处产生新的细小裂缝。当荷载接近峰值强度时,CF、PPF 及 PVA 的阻裂作用逐渐减弱,试件内部的细微裂缝相互连通并逐渐在试件中部演化为竖向贯穿裂缝,荷载-位移曲线开始进入第 2 阶段。

第 2 阶段为下降段,在该阶段纤维再生混凝土的荷载-位移曲线斜率变化不同。掺有 SF 试件的荷载-位移曲线下降段斜率较小,这主要是由于掺有 SF 的试件加载至峰值荷载后,其断裂面处的 SF 承担拉应力,SF 被拉长、拉直,直至被拔出;而掺有 CF、PPF、PVA 的试件在劈拉作用下基本被劈成两半,纤维细而短没能起到很好的阻裂作用,以致其荷载-位移曲线的斜率在达到峰值荷载后迅速下降。

图 4 中,再生混凝土和掺入 PVA 再生混凝土的荷载-位移曲线上上升段斜率及峰值荷载随着再生粗骨料取代率的增加而逐渐减小,其原因一方面是再生骨料的原生缺陷会对混凝土的劈裂抗拉性能产生负面影响,另一方面,由于再生骨料表面附着有较多老砂浆,所以在水化过程中,因新、老砂浆收缩不一

致而产生的裂缝会影响混凝土的劈裂抗拉性能。掺入 SF、CF 后,试件荷载-位移曲线的上升段斜率受再生骨料取代率的影响较小,表明该阶段 SF 和 CF 可有效改善再生骨料取代率对试件抗拉刚度的影响。掺入 PPF 再生混凝土的荷载-位移曲线上上升段斜率随取代率增加先增大后减小,其原因是混凝土中的水胶比随着再生粗骨料在搅拌过程中吸收一部分水分而降低,进而引起混凝土强度的增长,但当再生粗骨料取代率较小时,其产生负面作用逐渐增强,所以试件承担荷载的能力减小。

2.3 特征点参数

各组试件的峰值荷载 $F_{\max}$ 、峰值位移 $S_{\max}$ 、劈拉强度 f_t 、抗压强度 f_c 、拉压比 f_t/f_c 等特征点参数详见表 4,表中特征点取同组试件的平均值,少数试验组因浇筑质量或加载失败等因素存在个别试件的试验结果离散型较大,在取平均时将其剔除。

表 4 特征点参数
Tab. 4 Characteristic point parameters

试件编号	$F_{\max}/\text{kN}$	$S_{\max}/\text{mm}$	f_t/MPa	f_c/MPa	f_t/f_c
RAC-0	99.43	0.610	2.81	45.05	0.062
RAC-50	98.20	0.602	2.78	38.30	0.073
RAC-100	68.57	0.631	1.94	38.18	0.051
SF-0	132.05	0.618	3.74	43.95	0.085
SF-50	128.89	0.484	3.65	34.88	0.105
SF-100	119.78	0.502	3.39	37.34	0.091
CF-0	165.12	0.480	4.67	42.23	0.111
CF-50	175.74	0.522	4.97	42.87	0.116
CF-100	151.2	0.479	4.28	43.90	0.097
PPF-0	111.65	0.589	3.16	43.63	0.072
PPF-50	132.10	0.508	3.74	32.95	0.114
PPF-100	88.26	0.576	2.50	44.72	0.056
PVA-0	153.51	0.448	4.35	56.18	0.077
PVA-50	119.45	0.489	3.38	53.83	0.063
PVA-100	136.08	0.458	3.85	50.12	0.077

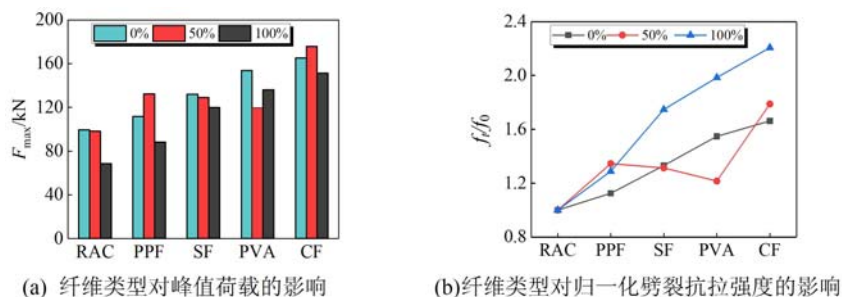
3 影响因素分析

3.1 纤维类型的影响

3.1.1 纤维类型对峰值荷载及劈裂抗拉强度的影响

图 5 给出了不同纤维类型对峰值荷载及归一化劈裂抗拉强度的影响,图中, f_t/f_0 为纤维再生混凝土劈拉强度 f_t 与相同取代率下再生混凝土的劈拉强度 f_0 的比值。由图 5(a)可见,掺入纤维可提高普通混凝土的峰值荷载,且掺入纤维再生混凝土的峰值荷载均高于相同取代率下的再生混凝土。其中,掺有 CF 试件的峰值荷载最大,与 50%、100%取代率再生混凝土的峰值荷载相比分别提高了 78.8%、120.6%;掺有 PVA、SF 试件的峰值荷载与再生混凝土相比平均提高幅度为 53.18%、49.15%;掺有 PPF 试件的峰值荷载与 100%取代率再生混凝土相比提高约 28.9%。由图 5(b)可见,掺入纤维可有效提高再生混凝土的劈裂抗拉强度,其中掺入 CF 对再生混凝土增强效果最明显。其主要原因是 CF 具有细小、表面平滑的特点,其掺入到再生混凝土后容易分散均匀,水泥砂浆的孔隙率降低,从而使混凝土内部更加密实。掺入 PVA 有利于提高再生混凝土的劈裂抗拉强度,比 SF 的增强效果高 10.7%,其中 100%取代率再生混凝土中掺入 PVA 与 SF 相比可提高抗拉强度约 13.6%。这一方面是由于 PVA 属于细长纤维,跨越微裂缝的 PVA 发挥了其阻裂的作用,抑制了弹性阶段微裂纹的扩张;另一方面是因为具有亲水性的 PVA 表面可形成水膜,使周围的水泥水化反应更充分,反应后的水化产物增加了水泥

砂浆与 PVA 之间的黏结力导致的。



* * 图 5 纤维类型对峰值荷载及归一化劈裂抗拉强度的影响

Fig. 5 Effect of fiber type on peak load and normalized splitting tensile strength

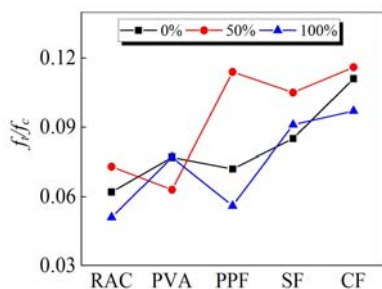


图 6 纤维类型对拉压比的影响

Fig. 6 Effect of fiber type on tension-compression ratio

3.1.2 纤维类型对拉压比的影响

拉压比是劈拉强度与抗压强度之比,其值随着再生混凝土中掺入纤维类型的不同而变化,纤维类型对拉压比的影响如图 6 所示。由图可知,当再生粗骨料取代率为 0% 时,普通混凝土的拉压比为 0.062,掺入纤维普通混凝土的拉压比为 0.072~0.111;当再生粗骨料取代率为 50%、100% 时,再生混凝土的拉压比为 0.073、0.051,掺入纤维再生混凝土的拉压比分别为 0.063~0.116、0.056~0.097;由图 6 还可见,掺入纤维可有效提高普通混凝土和再生混凝土的拉压比。与 50%、100% 取代率再生混凝土相比,相同取代率下纤维再生混凝土的拉压比提高 43.8%~58.9%、9.8%~90.2%,这是由于纤维

的掺入改善了再生混凝土的变形性能,并不同程度上提高了再生混凝土的劈裂抗拉强度,且抗拉强度比抗压强度提高程度大,因此,掺入纤维对再生混凝土拉压比的增强效果明显。其中,掺有 CF 试件的拉压比相较于 100% 取代率再生混凝土提高程度约 90.2%,其原因是由于 CF 具有较高的弹性模量,其与基体的弹性模量比值大,当 CF 与基体共同受力时,荷载更加容易从基体向 CF 传递,从而 CF 有效地抑制了早期试件内部微裂缝的发展。

3.2 取代率的影响

3.2.1 取代率对峰值荷载的影响

图 7 为不同取代率对 FRAC 峰值荷载的影响。由图 7 可见,随着取代率增加,纤维再生混凝土的劈裂抗拉强度均大于再生混凝土。当再生粗骨料取代率为 50% 时,纤维再生混凝土的峰值荷载基本无变化,较普通纤维混凝土减小 1.09%;当再生粗骨料取代率为 100% 时,纤维再生混凝土的峰值荷载比普通纤维混凝土减小 12.0%。可见,纤维混凝土内部的天然骨料被再生粗骨料完全取代时,其劈裂抗拉强度降低程度较大,其原因是再生粗骨料孔隙率较大,本身存在一定的微裂缝,且二次破碎后再生骨料内部会产生损伤,损伤随着再生粗骨料的增加不断积累,从而使得再生粗骨料的弱化作用高于纤维对再生混凝土劈拉强度的强化作用。由图 7 还可以看出,掺入 CF、SF 对再生混凝土劈裂抗拉强度的增强作用高于再生粗骨料的弱化作用,所以取代率对掺有 SF、CF 试件的劈裂抗拉强度影响较小。

3.2.2 取代率对拉压比的影响

图 8 为取代率对 FRAC 拉压比的影响。由图 8 可见,当再生粗骨料取代率低于 50% 时,纤维再生混凝土的拉压比基本呈上升的趋势,比普通纤维混凝土提高 15.6%。这主要是因为再生粗骨料吸水率大,随着其取代率的增加,各试件相应吸收的水分也较多,相当于混凝土中的实际水胶比也在不断地下降^[15],混凝土中水胶比的降低会引起混凝土劈裂抗拉强度提高幅度高于抗压强度,从而拉压比增加。其中,掺有 PPF 试件的拉压比增大幅度最大;而掺有 PVA 试件的拉压比较普通 PVA 混凝土降低了 18.2%。当再生粗骨料取代率从 50% 增加到 100% 时,纤维再生混凝土的拉压比下降了 20.5%。其原

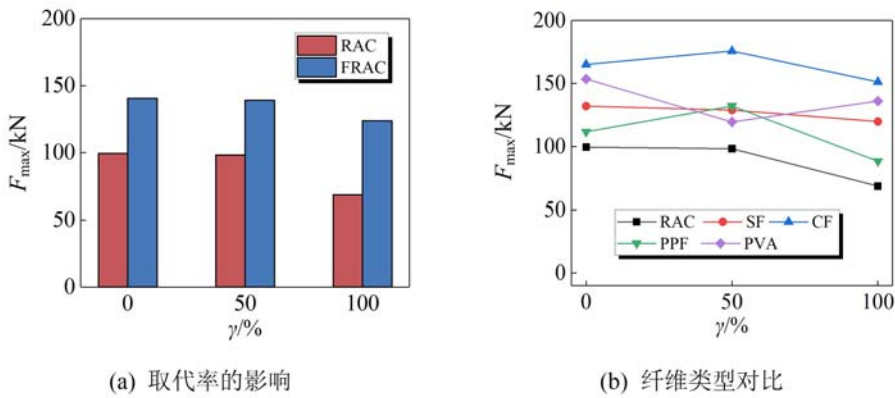


图 7 取代率对峰值荷载的影响

Fig. 7 Effect of replacement rate on tension-compression ratio

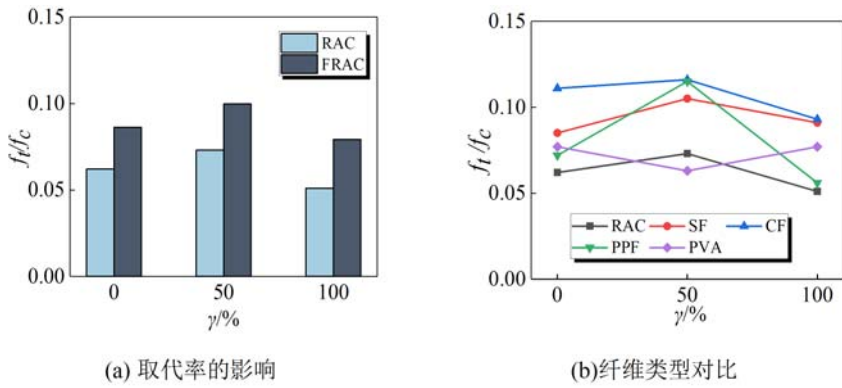


图 8 取代率对拉压比的影响

Fig. 8 Effect of replacement rate on tension-compression ratio

因是由于再生粗骨料二次破碎时内部产生较多的孔隙和细小裂缝,粗骨料表面附着的旧砂浆与新混凝土砂浆容易形成薄弱界面,导致试件受力时内部裂缝发展较快,最终试件产生破坏^[16]。

4 耗能分析

从图 4 的纤维再生混凝土荷载-位移曲线可看到 SF 下降段较为缓和,而 CF、PPF 和 PVA 下降段陡峭,因此,本文选取图 9 所示荷载-位移($F-s$)曲线上升段的积分面积作为试件破坏的耗能(SE)^[17,18]。

根据实耗能的计算原理,得到纤维再生混凝土的耗能值见表 5。

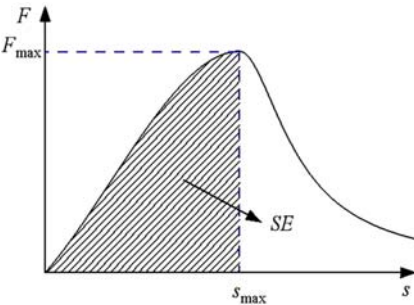


图 9 耗能计算示意图

Fig. 9 Schematic diagram of energy consumption calculation

表 5 FRAC 的耗能

Tab. 5 Energy consumption of FRAC

试件编号	SE /J	试件编号	SE /J
RAC-0	29.70	CF-100	36.07
RAC-50	28.81	PPF-0	47.01
RAC-100	20.93	PPF-50	33.32
SF-0	46.96	PPF-100	25.14
SF-50	32.12	PVA-0	32.94
SF-100	45.67	PVA-50	28.41
CF-0	39.91	PVA-100	31.04
CF-50	44.98	—	—

4.1 纤维类型对耗能的影响

掺入不同的纤维类型对 FRAC 耗能的影响如图 10 所示。从图 10 可以看出,掺入纤维可提高再生

混凝土的耗能能力。其中掺有 SF、CF 试件的破坏能较 100% 取代率再生混凝土相比可提高 118.2%、72.3%，主要是因为 CF 和 SF 均具有高弹性模量的特点，跨越裂缝或靠近尖端裂缝的纤维更有利将应力传递给基体，从而裂缝尖端处的应力集中程度减小，裂缝扩展速度下降。掺有 PVA 的再生纤维混凝土对 100% 取代率下再生混凝土的耗能能力改善程度最大为 48.3%。当取代率为 0% 时，掺有 PPF 混凝土的破坏能比普通混凝土提高 58.3%，相较于 50%、100% 取代率再生混凝土，掺有 PPF 试件的耗能能力分别提高 15.7%、20.1%，可见由于 PPF 对再生混凝土的增强、阻裂作用可有效弥补再生粗骨料本身的不足，掺入 PPF 的再生混凝土随着取代率增加耗能能力也有所增强。

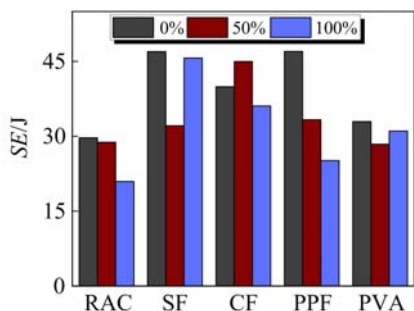


图 10 纤维类型对耗能的影响

Fig. 10 Effect of fiber type on energy dissipation

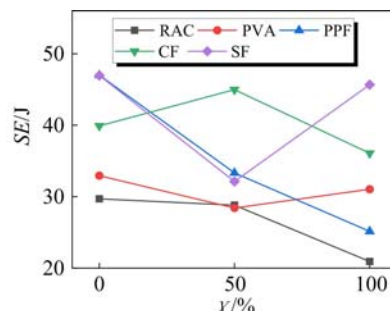


图 11 取代率对耗能的影响

Fig. 11 Effect of replacement rate on energy dissipation

4.2 取代率对耗能的影响

FRAC 的耗能随着取代率的变化关系如图 11 所示。由图 11 可以看出，掺有 CF 再生混凝土的耗能能力随着取代率的增加先增加后降低，其原因是由于粗骨料内部吸收水量增多，再生混凝土水灰比降低，从而使 CF 与基体间的黏结更为紧密且强度提高；但随着再生粗骨料的不断增多，再生粗骨料之间及骨料与新水泥砂浆界面的黏结强度较低，其薄弱面随着数量的增多逐渐增加，导致试件受拉时更容易发生破坏。当再生粗骨料取代率为 50% 时，掺有 SF、PVA 再生混凝土的耗能能力比纤维普通混凝土分别减小 31.6%、13.8%；当再生粗骨料取代率为 100% 时，掺有 SF、PVA 再生混凝土的耗能能力比纤维普通混凝土分别减小 2.75%、5.77%，其原因一方面是由于再生骨料内部存在微裂纹，且表面的旧水泥基体与混凝土内部的新砂浆易形成薄弱黏结面，薄弱面及微裂缝增多，从而使再生混凝土的抗拉强度降低，峰值荷载前的耗能减少；另一方面，再生混凝土内部部分的拉应力可通过掺入的纤维承担或传递给水泥石体，抑制微裂纹的产生与扩展，进而提高再生混凝土的耗能能力。掺入 PPF 再生混凝土的耗能能力随着再生粗骨料取代率的增加不断降低，其原因是再生粗骨料内部的微裂缝随着其数量增加不断增多，从而使得试件受拉时应力集中现象明显。

5 不同纤维再生混凝土的劈裂抗拉强度计算

纤维再生混凝土劈裂抗拉试验结果表明，再生混凝土中纤维的掺入对其劈拉强度提高较明显，而纤维再生混凝土的劈拉强度随取代率增加呈减小趋势，因此，本文根据试验数据，拟合得到了纤维再生混凝土劈拉强度的计算公式如式(1)、式(2)、式(3)和式(4)所示。纤维再生混凝土的劈拉强度拟合曲线如图 12 所示。

$$f_{sft} = (-0.1\gamma^2 + 1)f_i, R^2 = 1 \quad (1)$$

$$f_{cft} = (-0.42\gamma^2 + 0.34\gamma + 1)f_i, R^2 = 1 \quad (2)$$

$$f_{ppft} = (-1.15\gamma^2 + 0.94\gamma + 1)f_i, R^2 = 1 \quad (3)$$

$$f_{pft} = (0.66\gamma^2 - 0.78\gamma + 1)f_i, R^2 = 1 \quad (4)$$

式中： f_{sft} 为 SF 再生混凝土的劈裂抗拉强度，MPa； f_{cft} 为 CF 再生混凝土的劈裂抗拉强度，MPa； f_{ppft} 为 PPF 再生混凝土的劈裂抗拉强度，MPa； f_{pft} 为 PVA 再生混凝土的劈裂抗拉强度，MPa； f_i 为普通纤维混凝土的劈裂抗拉强度，MPa。

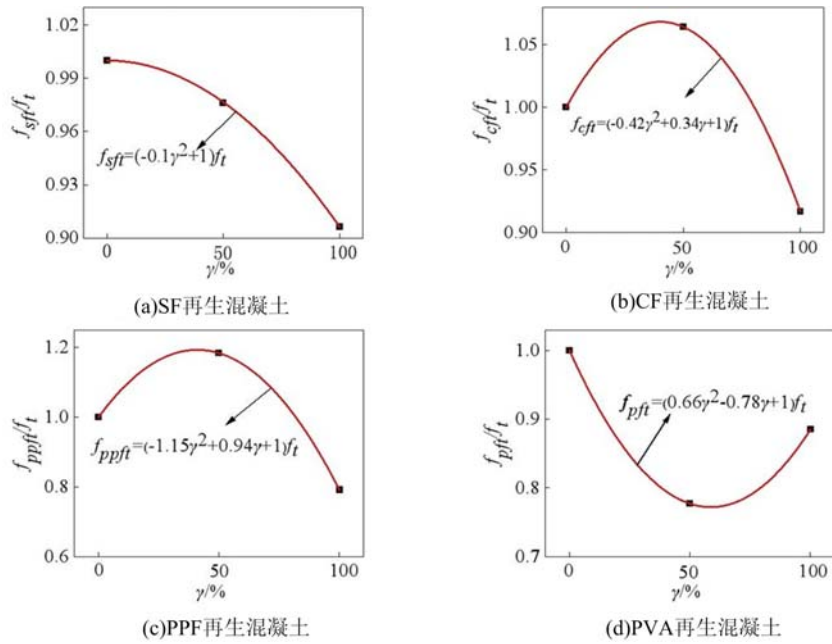


图 12 纤维再生混凝土的劈裂抗拉强度拟合曲线

Fig. 12 Fitting curves of split tensile strength of fiber recycled concrete

纤维再生混凝土劈裂抗拉强度的试验结果与由式(1)~(4)得到的计算结果见表 6,可见纤维再生混凝土劈裂抗拉强度的计算值与试验值吻合较好。

表 6 试件劈裂抗拉试验值与公式计算值对比结果

Tab. 6 The results of comparison on splitting tensile test value and formula calculated value of the specimens

试件编号	f_t/MPa	f_{ft}/MPa	f_{ft}/f_t	f_{ft}/f_t 平均值	试件编号	f_t/MPa	f_{ft}/MPa	f_{ft}/f_t	f_{ft}/f_t 平均值
SF-0	3.74	3.74	1.00	1.0	PPF-0	3.16	3.16	1.00	1.0
SF-50	3.65	3.64	1.00		PPF-50	3.74	3.74	1.00	
SF-100	3.39	3.36	0.99		PPF-100	2.50	2.49	1.00	
CF-0	4.67	4.67	1.00		PVA-0	4.35	4.35	1.00	
CF-50	4.97	4.97	1.00	1.0	PVA-50	3.38	3.37	1.00	1.0
CF-100	4.28	4.30	1.00		PVA-100	3.85	3.82	0.99	

6 结论

(1) 纤维再生混凝土试件均呈竖向劈裂破坏形态,试件破坏面上的断裂骨料数量随着再生粗骨料取代率的增大逐渐增多。

(2) 与 SF、PPF、PVA 相比,CF 对再生混凝土的劈裂抗拉强度及拉压比改性效果更优,平均提高了约 95.9%、71.8%;再生粗骨料取代率对 SF 再生混凝土的劈裂抗拉强度影响不大。

(3) PPF、PVA 和 CF 再生混凝土试件的荷载-位移曲线下降段陡峭,表现出明显的脆性特征;SF 再生混凝土试件的荷载-位移曲线下降段较为缓和,表现出较好的延性性能。

(4) SF 和 CF 可有效提高再生混凝土的耗能能力,比 100%取代率再生混凝土分别提高 118.2%、72.3%。掺入 PVA 和 SF 再生混凝土的耗能能力受取代率的影响较小,掺入 PPF 再生混凝土的耗能能力随取代率增加平均降低约 37.82%。

(5) 根据纤维再生混凝土劈裂抗拉强度测试结果,提出了不同纤维再生混凝土的劈裂抗拉强度计算公式,计算结果与试验值吻合良好。

参考文献:

- [1] 陈宇良, 姜锐, 陈宗平, 等. 直剪状态下再生混凝土的变形性能及损伤分析[J]. 材料导报, 2021, 35(19):19015—19021 (CHEN Yuliang, JIANG Rui, CHEN Zongping, et al. Deformation performance and damage analysis of recycled concrete under direct shear condition[J]. Materials Reports, 2021, 35(19):19015—19021 (in Chinese))
- [2] 周伯贤, 张磊, 贺玲凤. 两种再生粗骨料混凝土单轴受压性能研究[J]. 实验力学, 2017, 32(1):43—48 (ZHOU Boxian, ZHANG Lei, HE Lingfeng. Experimental investigation on properties of concrete with two kinds of recycled coarse aggregate subjected to uniaxial compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(1):43—48 (in Chinese))
- [3] 叶中豹, 李永池, 赵凯, 等. 一种低应变率下钢纤维混凝土本构关系[J]. 实验力学, 2019, 34(2):284—288 (YE Zhongbao, LI Yongchi, ZHAO Kai, et al. A constitutive relation of steel fiber reinforced concrete under low strain rate[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(2):284—288 (in Chinese))
- [4] 王振山, 李亚坤, 韦俊, 等. 玄武岩纤维混凝土氯盐侵蚀行为及力学性能试验研究[J]. 实验力学, 2020, 35(6):1060—1070 (WANG Zhenshan, LI Yakun, WEI Jun, et al. Experimental study on corrosion behavior and mechanical properties of basalt fiber concrete by chlorine attack[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(6):1060—1070 (in Chinese))
- [5] Barhum R, Mechtcherine V. Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour of textile-reinforced concrete under tensile loading[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 92:56—71.
- [6] 陈宇良, 吉云鹏, 陈宗平, 等. 钢纤维再生混凝土三轴受压力学性能试验研究[J]. 复合材料学报, 2022, 39(8):4005—4016 (CHEN Yuliang, JI Yunpeng, CHEN Zongping, et al. Experiment on mechanical properties of steel fiber recycled aggregate concrete under triaxial compression[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(8):4005—4016 (in Chinese))
- [7] Li M, He H, Senetakis K. Behavior of carbon fiber-reinforced recycled concrete aggregate[J]. Geosynthetics International, 2017, 24(5):480—490.
- [8] 杨虹, 王海龙, 王红珊, 等. 碳纤维轻骨料混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(11):108—112, 46 (YANG Hong, WANG Hailong, WANG Hongshan, et al. Experimental study on mechanical properties of carbon fiber light-weight aggregate concrete[J]. Building Structure, 2021, 51(11):108—112, 46 (in Chinese))
- [9] 高丹盈, 朱倩, 刘杰. 单轴受压下钢纤维再生骨料混凝土本构模型[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(2):396—406 (GAO Danying, ZHU Qian, LIU Jie. Constitutive model of SFRAC under uniaxial compression[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(2):396—406 (in Chinese))
- [10] Shi X J, Park P, Rew Y, et al. Constitutive behaviors of steel fiber reinforced concrete under uniaxial compression and tension-ScienceDirect[J]. Construction and Building Materials, 2020, 233:117316.
- [11] 赵建军, 闫长旺, 刘曙光, 等. PVA 纤维混凝土力学性能试验研究与分析[J]. 武汉理工大学学报, 2017, 39(8):65—69 (ZHAO Jianjun, YAN Changwang, LIU Shuguang, et al. Research and analysis of mechanical properties for PVA fiber reinforced concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2017, 39(8):65—69 (in Chinese))
- [12] 孙呈凯, 金宝宏, 李家俊, 等. PVA 纤维再生混凝土力学性能正交试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(4):1569—1575 (SUN Chengkai, JIN Baohong, LI Jiajun, et al. Research on mechanical properties of PVA fiber recycled concrete orthogonal experiment[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2018, 43(4):1569—1575 (in Chinese))
- [13] 牛荻涛, 申洋, 张婷, 等. 纤维掺量对聚丙烯纤维再生砖混凝土力学性能的影响[J]. 工业建筑, 2021, 51(7):151—155 (NIU Ditao, SHEN Yang, ZHANG Ting, et al. Influence of the polypropylene content on mechanical properties of recycled brick concrete [J]. Industrial Construction, 2021, 51(7):151—155 (in Chinese))
- [14] 罗洪林, 杨鼎宜, 周兴宇, 等. 聚丙烯纤维长径比对混凝土力学性能的影响研究[J]. 混凝土, 2019(9):25—30 (LUO Honglin, YANG Dingyi, ZHOU Xingyu, et al. Study on effect of length-to-diameter ratio of polypropylene fiber on mechanical properties of concrete[J]. Concrete, 2019(9):25—30 (in Chinese))
- [15] 陈宇良, 刘杰, 吴辉琴, 等. 直剪作用下再生混凝土力学性能及强度指标换算[J]. 复合材料学报, 2021, 38(11):3962—3970 (CHEN Yuliang, LIU Jie, WU Huiqin, et al. Mechanical properties and strength index

- conversion of recycled aggregate concrete under direct shear[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(11): 3962—3970 (in Chinese))
- [16] 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. The 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))
- [17] Khan M, Ali M. Effectiveness of hair and wave polypropylene fibers for concrete roads[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 166: 581—591.
- [18] Zia A, Ali M. Behavior of fiber reinforced concrete for controlling the rate of cracking in canal-lining[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 155: 726—739.

Study on splitting tensile mechanical properties of different fiberrecycled concrete

LIN Guiwu¹, LIU Kaige¹, CHEN Yuliang^{1,2}, XU Hongfei²

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

2. Liuzhou Orient Engineering Rubber Products Co., Ltd., Liuzhou 545006, Guangxi, China)

Abstract: In order to study the tensile properties of fiber recycled concrete (FRAC), the fiber type and recycled aggregate replacement rate were set into variable parameters to conduct splitting tensile test on 4 kinds of fiber recycled concrete. The failure modes of specimens were observed in the test, important data were obtained such as load-displacement curves and the tensile strength of FRAC, and the influence of variable parameters on the mechanical properties of the splitting tensile and energy consuming capacity of FRAC was deeply analyzed. Test results show that the toughening effect of steel fiber on recycled concrete is the most obvious compared with carbon fiber, polypropylene fiber and polyvinyl alcohol fiber, the energy consuming capacity and the splitting tensile strength of recycled concrete improve effectively with the incorporation of steel fiber. After the 0.3% carbon fiber is added, the tensile strength and the tension-compression ratio of recycled concrete increase on average by 95.9% and 71.8%. The incorporation of polyvinyl alcohol fibers or polypropylene fibers do not significantly modify recycled concrete. As the replacement rate gradually increases, the splitting tensile strength and energy consuming capacity of fiber recycled concrete gradually decrease, and the tension-compression ratio first increases and then decreases. Based on the test data, the calculation formulas of splitting tensile strength on FRAC are proposed.

Keywords: fiber; recycled concrete; splitting tensile strength; mechanical property