

文章编号:1007-9629(2022)09-0984-07

钢纤维再生混凝土的直剪力学性能

陈宇良^{1,2}, 姜锐¹, 陈宗平^{1,3,*}, 叶培欢¹

(1. 广西科技大学 土木建筑工程学院, 广西 柳州 545006; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641; 3. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西南宁 530004)

摘要:为研究直剪作用下钢纤维再生混凝土(SFRAC)的破坏机理,以试件尺寸、再生骨料取代率、钢纤维体积分数 V_f 为变化参数,设计了138个试件,并对其进行了直剪试验,得到了试件的直剪荷载-位移全过程曲线,分析了不同变化参数对SFRAC峰值剪力、抗压强度等直剪力学性能的影响规律,给出了不同试件尺寸下SFRAC峰值剪力的换算系数,提出了SFRAC抗剪强度公式.结果表明:随着试件尺寸的增大,SFRAC峰值剪力逐渐增大;随着再生骨料取代率的增加, $V_f=0\%$ 的试件峰值剪力先增大后减小, $V_f=1.0\%$ 的试件峰值剪力减小;钢纤维对再生混凝土抗剪能力提高幅度较大,对抗压强度提高幅度较小;提出的抗剪强度公式计算值与试验值吻合良好.

关键词:钢纤维;再生混凝土;尺寸效应;直剪;强度计算

中图分类号:TU528

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.09.014

Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete under Direct Shear

CHEN Yuliang^{1,2}, JIANG Rui¹, CHEN Zongping^{1,3,*}, YE Peihuan¹

(1. School of Civil Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China;
2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structure Safety of the Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete (SFRAC) under direct shear, 138 specimens were designed and tested with the change parameters of specimen size, substitution rate of recycled aggregate and steel fiber volume fraction (V_f). The whole process curves of direct shear load-displacement of specimen were obtained, and the influence rules of different variation parameters on peak shear force and compressive strength of steel SFRAC were analyzed. The conversion coefficient of SFRAC peak shear forces under different specimen sizes was obtained, and the shear strength formula of SFRAC was proposed. The results show that the peak shear force of SFRAC increases with the increase of specimen size. With the increase of V_f , the peak shear force of specimens with $V_f=0\%$ first increases and then decreases, and the peak shear forces of specimens with $V_f=1.0\%$ decreases. Steel fiber can improve the shear capacity of recycled concrete greatly, but it can only improve the compressive strength slightly. The calculated values of the proposed shear strength formula are in good agreement with the experimental values.

Key words: steel fiber; recycled aggregate concrete; size effect; direct shear; strength calculation

收稿日期:2021-07-16; 修订日期:2021-08-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51908141);中国博士后科学基金资助项目(2021M693854);广西水工程材料与结构重点实验室资助项目(GXHRI-WEMS-2020-05);广西科技大学博士基金资助项目(校科博18Z09)

第一作者:陈宇良(1987—),男,广西贵港人,广西科技大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail: ylchen@gxust.edu.cn

通讯作者:陈宗平(1975—),男,广西玉林人,广西大学教授,博士生导师,博士.E-mail: zpchen@gxu.edu.cn

再生粗骨料(RA)经过二次破碎后,力学性能略低于天然粗骨料(NA)^[1-3].将钢纤维(SF)加入再生混凝土(RAC)中,不仅能弥补RAC性能的不足,还能极大地改善其抗裂性能和抗冲击性能^[4-5].由于大体积混凝土力学性能的测试难度大,使用小尺寸试件表征大尺寸试件性能可解决这个问题^[6].因此,研究试件尺寸对钢纤维再生混凝土(SFRAC)性能的影响,对国内外环境的可持续发展意义重大.

高丹盈等^[7]研究了试件尺寸对SF高强混凝土劈裂抗拉强度的影响,发现SF高强混凝土的劈裂强度尺寸效应换算系数与普通SFRAC接近.张学兵等^[8]研究了SF掺量对SFRAC抗压强度、劈裂强度和抗折强度的影响,发现SF掺量对劈裂强度和抗折强度影响显著,对抗压强度影响不大.毕继红等^[9]研究了SF掺量和分布对RAC的影响,发现SF掺量增加时,SF定向分布的RAC抗压强度持续增大,SF乱向分布的RAC抗压强度先增大后减小.赵秋红等^[10]通过双面剪切试验研究了SF对RAC

抗剪强度的影响,发现SF能提高RAC的抗剪性能.

综上,在SFRAC抗压、劈拉和抗折方面的研究较多,但对不同试件尺寸的SFRAC在直剪性能方面的研究尚未见报道.为此,为揭示SFRAC在直剪状态下的破坏机理,本文通过直剪试验,探讨了SFRAC在直剪状态下的力学性能变化规律,所得结论对完善国内外RAC方面的研究具有重要意义.

1 试验

1.1 原材料

水泥(C)为P·O 42.5普通硅酸盐水泥;骨料为砂(S)、普通碎石骨料(NA)和再生粗骨料(RA),RA为废弃RAC梁经过破碎、筛分得到,其粒径为5~20 mm,连续级配,根据GB/T 14685—2011《建设用卵石、碎石》,得到骨料的物理性质,结果见表1;SF为波纹型钢纤维,长度为37.0 mm,宽度为3.0 mm,厚度为0.9 mm,密度为7 850 kg/m³,延伸强度超过1 150 MPa.

表1 骨料的物理性质
Table 1 Physical properties of aggregates

Aggregate	Apparent density/(kg·m ⁻³)	Stacking density/(kg·m ⁻³)	Water absorption (by mass)/%	Water content (by mass)/%	Crushing value (by mass)/%
RA	2 599.60	1 321.30	5.35	1.55	25.63
NA	2 703.90	1 499.90	0.43	0.07	17.15
S	2 625.83	1 638.77		0.45	

1.2 试件制备

配合比设计以RA的取代率¹⁾ $r=0%$ 为基准,混凝土目标设计强度为C35.由于RA的吸水率和含水率与NA不同,导致RAC浇筑时骨料间的吸水率和

含水率有一定差别.为保证RAC的和易性,当 $r=100%$ 时,在RAC中加入25 kg/m³附加水;随着 r 的变化,试件的附加水量分别乘以相应的取代系数.试件的配合比见表2.

表2 试件的配合比
Table 2 Mix proportions of specimens

$r/\%$	m_w/m_c	Mix proportion/(kg·m ⁻³)				
		C	S	NA	RA	Water
0	0.43	498.00	541.00	1 153.00	0	215.00
30	0.45	498.00	541.00	807.00	346.00	222.95
50	0.46	498.00	541.00	577.00	577.00	227.87
70	0.47	498.00	541.00	346.00	807.00	232.79
100	0.48	498.00	541.00	0	1 153.00	240.00

试件尺寸为150mm×150mm×150mm,150mm×150mm×200mm,200mm×200mm×200mm,分别记为S1、S2、S3;RA取代率 $r=0%、30%、50%、70%、100%$;SF的体积分数 $V_f=0%、0.5%、1.0%$.以试件尺寸、RA取代率、SF体积分数为变化参数,设计并制作了用于直剪试验的SFRAC试件共31

组,每组3个试件,共93个试件;为了研究SFRAC抗压强度与抗剪强度之间的换算关系,同时制作了 $V_f=0%、1.0%$,试件尺寸和 r 的设置与直剪试验相同,制备了15组共45个SFRAC试件进行抗压试验.试件的命名制度为:S1-30-0.5为试件尺寸150mm×150mm×150mm、RA取代率为30%、SF体积分数

1) 文中涉及的取代率、比值等除特殊说明外均为质量分数或质量比.

为0.5%的试件,其他类推. $V_f=0\%$ 的试件记为RAC, $V_f=0.5\%$ 、 1.0% 的试件记为SFRAC.

根据CECS13—2009《纤维混凝土试验方法标准》,采用强制式搅拌机搅拌RAC,在投料前对搅拌机进行预湿处理.投料顺序按粗骨料、细骨料、水泥的顺序依次投入,干拌60s,待骨料搅拌均匀后,将SF连续均匀地投入搅拌机,继续干拌60s,最后连续均匀地加入水,搅拌120s.搅拌过程中无结团现象,SF在RAC中的分散情况良好,在标准养护条件下养护28d后进行试验.

1.3 加载装置及加载制度

基于文献[3]中的加载装置,对试件进行剪切试验,其中 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的试件沿长边方向进行试验,采用位移控制方式加载,加载速率为 0.02 mm/s .试件安装完成后,保持上下剪切盒水平,先施加竖向荷载,后施加水平荷载.试件的受力模型见图1.

2 结果与分析

2.1 典型破坏形态

直剪作用下试件的典型破坏形态见图2.由图2可见:不同RA取代率的RAC(S1-0-0、S1-100-0)破坏形态相似,均近似为1条倾斜角约为 $6^\circ \sim 7^\circ$ 的直线,界面边缘无明显微裂纹;试件尺寸为S1、S2和S3的

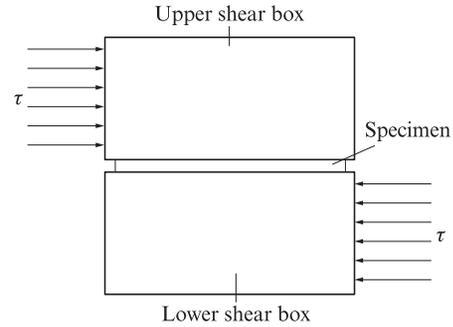


图1 试件的受力模型

Fig. 1 Mechanical model of specimen

SFRAC破坏形态近似为1条水平的破坏线,部分试块周围可见向两侧延伸的微裂纹,其中试件尺寸为S2的试件破坏程度比S1和S3更严重.

直剪试验的剪力传递机制见图3(图中波浪线表示连接上下剪切面的SF,包括竖向和斜向分布).由图3可见:对于RAC,剪力沿试件中心面传递,试件内部粗骨料和水泥基体共同抵抗剪力,当剪力达到峰值时,试件沿中心面发生脆性破坏,出现1条略倾斜的破坏线;对于SFRAC,剪力沿试件中心面传递,由于中心面SF的存在,使剪力沿SF传递到骨料和水泥基体上,故SF对SFRAC强度的提高由水泥基体强度和骨料粒径决定.达到峰值荷载后,SFRAC

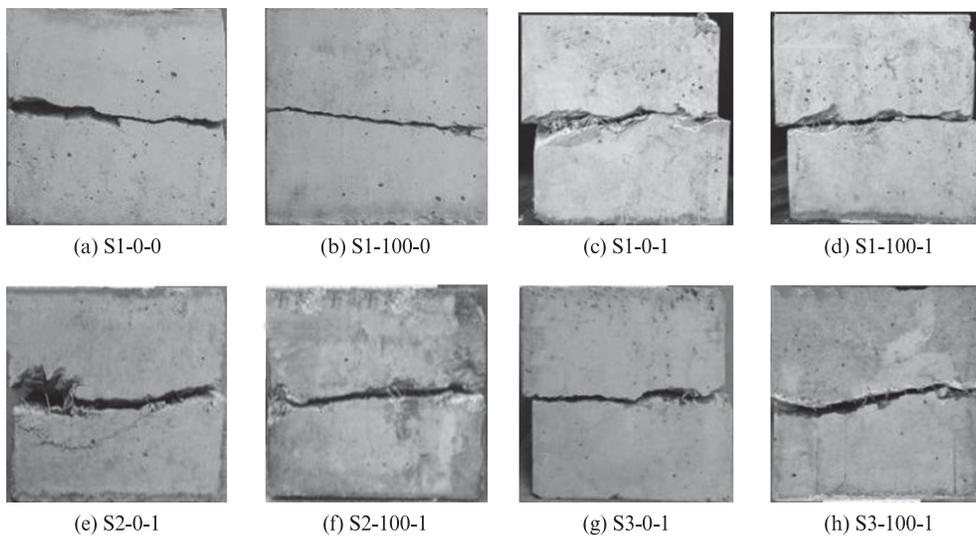


图2 直剪作用下试件的典型破坏形态

Fig. 2 Typical failure modes of specimens under direct shear

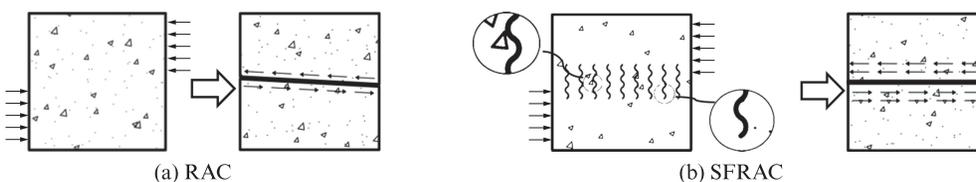


图3 直剪试验的剪力传递机制

Fig. 3 Shear stress transfer mechanism of direct shear test

发生脆性破坏,破坏速率较无SF的RAC稍慢。

2.2 剪力-位移全过程曲线

RAC和SFRAC的剪力-位移($F-s$)全过程曲线见图4。由图4可见:随着试件尺寸的增大,试件峰值剪力、剪切模量和峰值位移整体呈增大的趋势;随着再生粗骨料取代率的增大,试件峰值剪力呈先增大后减小的趋势,峰值位移呈逐渐增大的趋势。不同试件尺寸的SFRAC在剪切破坏过程中均经历了弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段、破坏阶段、SF拔出阶段以及界面摩擦阶段这6个阶段:(1)弹性阶段 此过程从开始加载至剪力约为峰值剪力的60%,随着位移的增加,剪力增加迅速,此时由内部所有部件共同抵抗剪力,产生可恢复变形;(2)弹塑性阶段 此过程剪力约为峰值剪力的60%~80%,随着位移的增加,剪力增长速率逐渐变慢,此时主要由黏结力和骨

料强度抵抗剪力,试件开始产生部分可恢复变形和部分不可恢复变形;(3)塑性阶段 此过程剪力约为峰值剪力的80%~100%,随着位移的增加,剪力增长速率缓慢,此时主要由骨料强度抵抗剪力,试件产生不可恢复变形;(4)破坏阶段 剪力由峰值荷载迅速降低到峰值剪力的60%,此过程水泥基体首先剪坏,接着RA剪断,然后NA剪断,最后试件破坏;(5)SF拔出阶段 此过程剪力约为峰值剪力的60%~15%,随着位移的增加,剪力降低速率逐渐变缓,此时纤维拉拔力与机械咬合力共同抵抗剪力,纤维开始从试件剪切面处逐渐拉出,剪切面强度较低的骨料和水泥基体随剪切位移逐渐增加而刮落,跟随剪切面移动;(6)界面摩擦阶段 此过程剪力约为峰值剪力的15%~5%,此时大部分SF从上下剪切面拔出,从主要由SF抵抗剪力转变为主要由剪切面摩擦抵抗剪力。

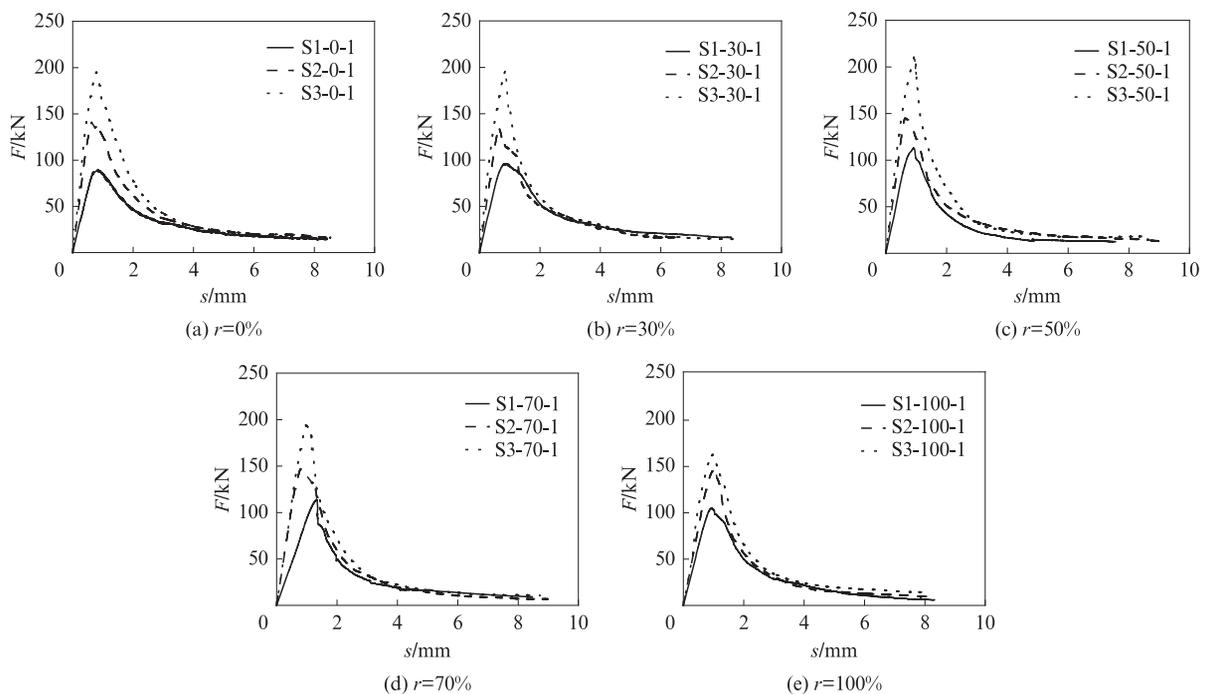


图4 RAC和SFRAC的剪力-位移全过程曲线

Fig. 4 $F-s$ whole process curves of RAC and SFRAC

2.3 峰值剪力

不同试件尺寸下RAC和SFRAC的峰值剪力 F_u 见图5。由图5可见:随着试件尺寸的增大,RAC和SFRAC的峰值剪力均呈逐渐增大的趋势;对于 $V_f=0\%$ 的RAC,随着RA取代率的增加,试件的峰值剪力逐渐减小,这是由于RA经过二次破碎,表面存在水泥基体,内部含有微裂纹,使其强度略低于天然粗骨料;对于 $V_f=1.0\%$ 的SFRAC,随着RA取代率的增加,S1和S3的峰值剪力呈先增大后减小的

趋势;相同试件尺寸下,SFRAC的平均峰值剪力比RAC提高了18.78%。当RA取代率为0%~50%时,RA表面附着水泥基体,RA与SF的接触面比NA粗糙,相同粒径范围内RA低级配的骨料多于NA,NA高级配的骨料多于RA,SF与RAC能发挥出更强的协同作用,使试件的峰值剪力随之增大。当RA取代率为50%~100%时,由于RA的缺陷,损伤累积使峰值剪力降低的幅度大于RA表面粗糙对峰值剪力提高的幅度,峰值剪力随之降低。

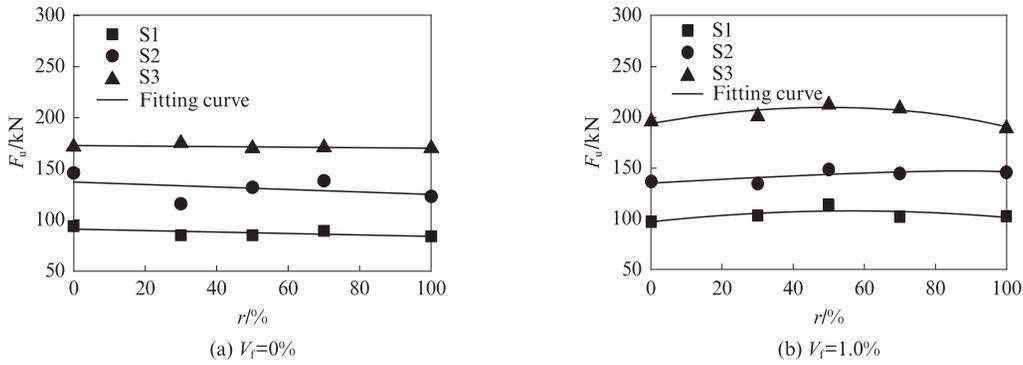


图5 不同试件尺寸下RAC和SFRAC的峰值剪力
Fig. 5 F_u of RAC and SFRAC under different sizes

2.4 抗压强度

RAC和SFRAC的抗压强度 σ_c 见图6.由图6可见:试件尺寸为S1时,相同RA取代率下, $V_f=1.0\%$ 的SFRAC平均抗压强度比 $V_f=0\%$ 的RAC提高了6.00%;对于 $V_f=1.0\%$ 的SFRAC试件,随着RA取代率的增加,试件尺寸为S1、S2的SFRAC抗压强度整体呈现出逐渐减小的趋势.

2.5 尺寸换算系数

由于相同试件尺寸的SFRAC峰值剪力随RA取代率变化不大,将其取平均值,得到试件尺寸为S1、S2、S3的SFRAC平均峰值剪力 F_{u1} 、 F_{u2} 、 F_{u3} 分别为103.80、142.18、201.51 kN.由试件尺寸可知,S2与S1、S3与S2的剪切面面积比均约为1.33,S3与S1的剪切面面积比为1.78,S3和S1的剪切面均为正方形,3种试件尺寸的剪切面面积呈线性关系.试件尺寸效应下,S2与S1、S3与S2、S3与S1的峰值剪力换算系数 α_1 、 α_2 、 α_3 (即其平均峰值剪力的比值)分别为1.37、1.42、1.94.相同面积比的条件下, $\alpha_1 < \alpha_2$.这是由于S2的剪切面为长方形,长边方向沿剪切方向,随着SFRAC水平位移的增加,在垂直于剪切方向 α 、 β 面

上的SF与再生混凝土各部件承受剪力时,剪力沿 α 面向 β 面逐渐削弱,而沿 α 面方向上增加尺寸,无此削弱作用,故峰值剪力换算系数 $\alpha_2 > \alpha_1$.S3与S1的峰值剪力换算系数 α_3 略大于两者剪切面面积比,其比值关系为1.09.

SFRAC的剪力传递方式见图7.由图7可见:SFRAC在试件内部分布方式为乱向分布(见图7(a)),直剪试验中发挥作用的纤维主要为连接上下剪切面的纤维,包括垂直于剪切面和倾斜于剪切面的纤维,图中仅用垂直方向表示.

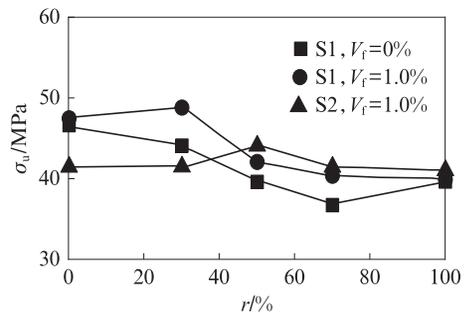


图6 RAC和SFRAC的抗压强度
Fig. 6 Compressive strength of RAC and SFRAC

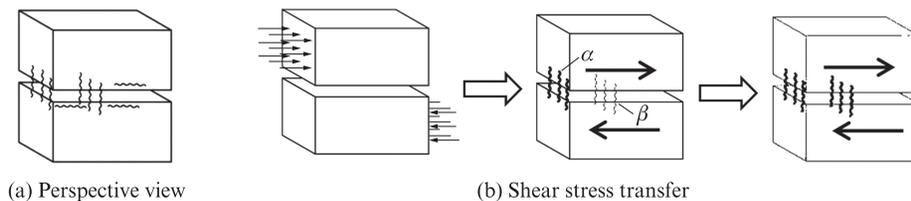


图7 SFRAC的剪力传递方式
Fig. 7 Shear stress transfer mode of SFRAC

3 抗剪强度计算

本节试件尺寸均为150 mm×150 mm×150 mm的标准立方体.SFRAC立方体抗剪强度 $\tau_{cu,k}$ 主要由RAC立方体抗剪强度 $\tau_{cv,k}$ 和SF抗剪强度 τ_f 组成.其

计算式为:

$$\tau_{cu,k} = \frac{F_u}{S} = \tau_{cv,k} + \tau_f \tag{1}$$

$$f_{cu,k} = k\tau_{cv,k} \tag{2}$$

$$\tau_{cu,k} = \frac{1}{k} f_{cu,k} + \tau_f \tag{3}$$

式中: S 为剪切面面积; $f_{cu,k}$ 为立方体抗压强度; k 为立方体抗剪强度与立方体抗压强度的换算系数。

将RAC的立方体抗压强度 $f_{cu,k}$ 、立方体抗剪强度 $\tau_{cv,k}$ 进行均值化处理,得到 $f_{cu,k}$ 、 $\tau_{cv,k}$ 分别为41.33、3.88 MPa,由此可得RAC的立方体抗压强度与立方体抗剪强度的换算系数 k 为10.65。

由文献[11]中SF抗剪强度与其体积分数的关系,得到SF标准立方体剪切强度 $\tau_f = 5.5228V_f^{0.4112}$,并由此得到 $\tau_{cu,k}$ 为:

$$\tau_{cu,k} = \frac{1}{10.65} f_{cu,k} + 5.5228V_f^{0.4112} \quad (4)$$

采用式(4)计算得到RAC和SFRAC的抗剪强度,并将其与试验值进行对比,结果见图8。由图8可见:不同RA取代率下,试件的抗剪强度计算值与试验值最大误差不超过9%;不同SF体积分数下,试件的抗剪强度计算值与试验值最大误差不超过9%,其中 $V_f=0\%$ 、 1.0% 的试件抗剪强度误差不超过0.05%。由此可见,试件的抗剪强度计算值与试验值吻合良好。

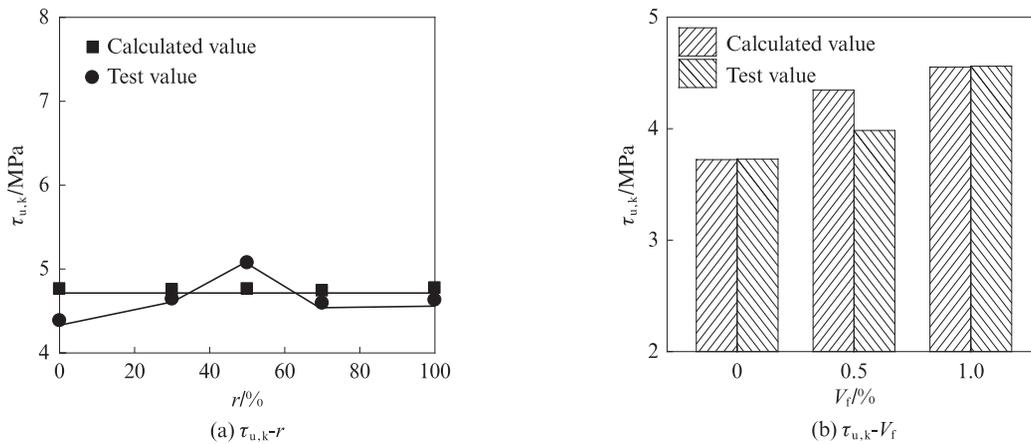


图8 RAC和SFRAC抗剪强度计算值与试验值对比

Fig. 8 Comparison of calculated values and tested values for shear strength of RAC and SFRAC

4 结论

(1)不同试件尺寸钢纤维再生混凝土(SFRAC)的直剪破坏形态相似,钢纤维体积分数 V_f 为1.0%、试件尺寸为150 mm×150 mm×200 mm的SFRAC破坏程度最严重。

(2)随着试件尺寸的增大,再生混凝土(RAC)和SFRAC的峰值剪力显著提高.随着再生骨料(RA)取代率的增加, $V_f=1.0\%$ 的SFRAC峰值剪力呈先增大后减小的趋势,抗压强度逐渐减小; $V_f=0\%$ 的RAC峰值剪力、抗压强度均逐渐减小。

(3)钢纤维对再生混凝土抗剪能力提高幅度较大,对抗压强度提高幅度较小。 $V_f=1.0\%$ 的SFRAC平均峰值剪力比 $V_f=0\%$ 的RAC提高了18.78%,平均抗压强度提高了6.00%。

(4)本文提出的SFRAC抗剪强度公式计算值与试验值吻合良好。

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] 朋改非,黄艳竹,张九峰.骨料缺陷对再生混凝土力学性能的影响[J].建筑材料学报,2012,15(1):80-84.
PENG Gaifei, HUANG Yanzhu, ZHANG Jiufeng. Influence of defects in recycled aggregate on mechanical properties of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15 (1):80-84.(in Chinese).

[3] 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)

[4] 潘慧敏,马云朝.钢纤维混凝土抗冲击性能及其阻裂增韧机理[J].建筑材料学报,2017,20(6):956-961.
PAN Huimin, MA Yunzhao. Impact resistance of steel fiber reinforced concrete and its mechanism of crack resistance and toughening[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(6) : 956-961.(in Chinese)

[5] OMARY S, GHORBEL E, WARDEH G. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties[J]. Construction and Building Materials, 2016, 108:163-174.

- [6] 江晨晖,周堂贵,王利强,等. 钢纤维增强超高性能混凝土抗压强度尺寸效应研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020, 4(8):43-47. JIANG Chenhui, ZHOU Tanggui, WANG Liqiang, et al. Size effects of compressive strength of ultra-high performance steel fiber reinforced concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2020, 4(8):43-47.(in Chinese)
- [7] 高丹盈,赵军,汤寄予. 钢纤维高强混凝土劈拉强度尺寸效应试验研究[J]. 建筑材料学报, 2004, 4(3):295-298. GAO Danying, ZHAO Jun, TANG Jiyu. Experimental study on the dimensional effect of steel fiber reinforced high-strength concrete under splitting tension[J]. Journal of Building Materials, 2004, 4(3):295-298.(in Chinese)
- [8] 张学兵,匡成钢,方志,等. 钢纤维粉煤灰再生混凝土强度正交试验研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(4):677-684, 694. ZHANG Xuebing, KUANG Chenggang, FANG Zhi, et al. Orthogonal experimental study on strength of steel fiber reinforced fly ash recycled concrete[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(4):677-684, 694.(in Chinese)
- [9] 毕继红,赵云,鲍春,等. 不同体积掺量的钢纤维在混凝土中的分布研究[J]. 湖南大学学报, 2021, 48(3):99-108. BI Jihong, ZHAO Yun, BAO Chun, et al. Research on distribution of steel fiber with different volume content in concrete [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2021, 48(3):99-108.(in Chinese)
- [10] 赵秋红,董硕,朱涵. 钢纤维-橡胶/混凝土抗剪性能试验[J]. 复合材料学报, 2020, 37(12):3201-3213. ZHAO Qiu hong, DONG Shuo, ZHU Han. Experimental study on shear behavior of steel fiber-rubber/concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(12):3201-3213.(in Chinese)
- [11] SIMALTI A, SINGH A P. Comparative study on direct shear behavior of manufactured and recycled shredded tyre steel fiber reinforced self-consolidating concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 29:101169.