

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200507.005

钢纤维-橡胶/混凝土抗剪性能试验

赵秋红^{*1,2}, 董硕¹, 朱涵^{1,2}

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350)

摘 要: 抗剪强度和剪切韧性是反映构件在复合受力状态下承载能力及耗能能力的重要指标。为研究钢纤维(SF)-橡胶/混凝土的剪切性能, 设计了 14 组 SF-橡胶/混凝土试件, 通过双面剪切试验, 研究了 SF 体积分数掺量、橡胶掺量和水胶比对 SF-橡胶/混凝土试件的抗剪性能及剪切破坏形态的影响。研究表明: SF 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的抗剪性能。SF 对 SF-橡胶/混凝土试件的抗剪性能起主导作用, SF-橡胶/混凝土试件的抗剪强度、峰值变形及剪切韧性相比普通混凝土及橡胶/混凝土试件均显著提高, 且增幅随 SF 掺量的增加而增大, 剪切破坏呈现出明显的延性特征。当 SF 体积分数为 1.5vol% 时, 橡胶掺量(等体积取代砂取代率)为 10% 的 SF-橡胶/混凝土试件的抗剪强度、峰值变形相比橡胶/混凝土分别提高了 78%、63%。橡胶对 SF-橡胶/混凝土试件的抗剪性能也起到辅助作用, SF-橡胶/混凝土试件的剪切韧性及延性相比 SF/混凝土试件进一步增加。采用水胶比优化设计后, 随着橡胶掺量的增加, SF-橡胶/混凝土的抗剪强度、峰值变形及峰值前剪切韧性可基本保持不变, 而峰值后韧性指标进一步增加, 增幅可高达 96%。根据试验结果, 考虑橡胶及 SF 掺量的影响提出了 SF-橡胶/混凝土的抗剪强度计算式。

关键词: 钢纤维-橡胶/混凝土; 双面剪切试验; 钢纤维掺量; 橡胶掺量; 抗剪强度; 剪切韧性

中图分类号: TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2020)12-3201-13

Experimental study on shear behavior of steel fiber-rubber/concrete

ZHAO QiuHong^{*1,2}, DONG Shuo¹, ZHU Han^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Coastal Civil Structure and Safety of China Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Shear strength and toughness are important indices for evaluating load-resisting capacity and energy absorption of members under complex loading conditions. In order to study the shear-resisting capacity of high-strength steel fiber(SF)-rubber/concrete, 14 sets of SF-rubber/concrete specimens were designed for double-shear experiments, in which influence of parameters including SF volume fraction, rubber volume substitution and water to binder ratio on the shear-resisting behavior and failure modes of SF-rubber/concrete were investigated. Research results show that the bridging action of SF and its positive synergy with rubber particles in SF-rubber/concrete can significantly improve the shear-resisting behavior of concrete. SF play a dominant role in shear-resisting behavior of SF-rubber/concrete specimens. The shear strength, deformation at peak load and shear toughness of SF-rubber/concrete specimens are significantly higher than the plain concrete and rubberized concrete specimens, which increase with the SF volume fraction, and the shear failure mode of SF-rubber/concrete is obviously ductile. When the SF volume fraction is 1.5vol% and the rubber content (volume substitution of sand) is 10%, the shear strength and deformation at peak load of SF-rubber/concrete specimens are 78% and 63% respectively, higher than those of the rubber concrete. Rubber particles also help to improve the shear-resisting behavior of SF-rubber/concrete. The shear toughness and ductility of SF-rubber/concrete are further increased compared with SF reinforced

收稿日期: 2020-02-22; 录用日期: 2020-04-15; 网络首发时间: 2020-05-07 15:00:52
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200507.005>
基金项目: 国家自然科学基金(51678406; 51878447); 天津市研究生科研创新项目(2019YJSB162)
通信作者: 赵秋红, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高层抗震、桥梁抗震、高性能结构及材料 E-mail: qzhao@tju.edu.cn
引用格式: 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 QiuHong, 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).

concrete. With the increase of rubber content, the shear strength, peak deformation and pre-peak shear toughness of SF-rubber/concrete can be unchanged after using the optimized water-binder ratio, while the post-peak toughness index can be further increased by 96%. Based on the test results, shear strength formula of SF-rubber/concrete was established considering the influence of SF volume fraction and rubber substitution.

Keywords: steel fiber-rubber/concrete; double shear test; steel fiber volume fraction; rubber particles volume substitution; shear-resisting capacity; shear toughness

混凝土材料的抗压强度高、抗拉强度低,当构件受力较复杂、局部承担的拉应力或剪应力过大导致主拉应力大于混凝土抗拉强度时,将产生裂缝,降低结构的适用性、安全性和耐久性。在混凝土中加入废弃轮胎制成的橡胶颗粒,制成橡胶/混凝土,能够显著增强抗裂性、韧性及耐久性,是一种绿色环保的新型建材。橡胶/混凝土在路面工程及非结构构件中得到了很好的应用,但由于橡胶的加入,其抗压强度尤其是抗剪强度往往明显降低,降幅有时高达 80%^[1-3],严重限制了该材料在结构构件中的应用及推广。

为扩大橡胶/混凝土的使用范围,进一步改善其力学性能,近年来国内外学者提出了钢纤维(SF)-橡胶/混凝土,即在橡胶/混凝土中加入 SF,利用 SF 的桥联作用达到增强增韧的效果。Noaman 等^[4]研究了 SF-橡胶/混凝土的抗压韧性,表明 SF 和橡胶颗粒之间存在相互作用,混凝土抗压韧性显著提高。Li 等^[5]发现与普通混凝土和橡胶混凝土相比, SF-橡胶/混凝土的轴压、弯曲强度和韧性显著提高;Fu 等^[6]对 SF-橡胶/混凝土的断裂韧性进行研究,结果表明橡胶和 SF 两者协同工作,橡胶对初始开裂韧性影响较大,而 SF 对不稳定开裂韧性影响较大;朱江等^[7]对 SF-橡胶/高强混凝土的抗压性能进行了研究,表明两者混掺能够充分发挥 SF 的约束、拉结及橡胶的增韧、增塑作用,显著改善了混凝土的力学性能。以上研究表明,混凝土中混掺橡胶和 SF 有望显著提高其强度、韧性和延性,两者分别在裂缝发展的不同阶段起主导作用,相互协同改善混凝土的破坏模式。目前有关 SF-橡胶/混凝土及橡胶/混凝土的研究多集中在抗压、抗弯、断裂性能等方面,而对于复合受力状态下的构件性能较重要的抗剪性能方面的研究尚鲜有公开报道。

国内外学者对普通混凝土(Plain concrete, PC)及 SF/混凝土的抗剪性能已进行了大量试验研究^[8-20]。Sonnenberg 等^[8]对 PC 试件进行直接剪切试验,研究表明混凝土直剪承载力与其单轴抗压强度成正比;张琦等^[9]研究了 PC 抗剪强度和剪切

变形,建立了抗剪强度和抗拉、抗压强度的关系。Ali R Khaloo 等^[15]研究了不同 SF 体积掺量下的混凝土试件的剪切性能,结果表明 SF 掺量对混凝土抗剪性能有显著的影响;朱海堂等^[18]通过对 SF/高强混凝土基本强度指标的试验和分析,考虑 SF 类型和掺量的影响,建立了 SF/高强混凝土抗剪强度与其立方体抗压强度的关系;邓明科等^[19]通过双面剪切试验,研究聚乙烯醇纤维掺量和抗压强度对高延性混凝土的破坏形态、抗剪强度及峰值剪切变形的影响,并提出了适用于高延性混凝土剪切韧性的评价方法。

为系统研究 SF-橡胶/混凝土的剪切性能,本文通过 14 组试件的双面剪切试验,研究 SF 掺量、橡胶掺量和水胶比对 SF-橡胶/混凝土的剪切破坏形态、抗剪强度、峰值剪切变形及剪切韧性的影响,根据试验结果建立考虑 SF 掺量及橡胶掺量的 SF-橡胶/混凝土剪切强度计算式。

1 试件概况

1.1 试验设计

本次试验采用的 SF-橡胶/混凝土材料组成为:普通硅酸盐水泥(P.O 42.5);中砂,级配良好,细度模数 2.64;5~20 mm 玄武岩碎石,连续级配;HSC 聚羧酸高性能减水剂,减水率大于 25%;橡胶颗粒平均粒径约 1 mm,密度约为 1 050 kg/m³;SF 采用冷拔钢丝端钩型 SF,其平均长度为 30 mm,长径比为 40,抗拉强度大于等于 1 000 MPa。

试件设计时以 SF 掺量、橡胶掺量和水胶比为主要研究对象, SF 体积掺量 V_f 分别采用 0vol%、0.5vol%、1.0vol%、1.5vol%;橡胶颗粒以等体积取代砂的方式掺加,取代率 ρ_r 分别为 0%、10%、20%。PC 试件按强度等级 C60 设计,水胶比为 0.34,大部分试件均采用该水胶比;此外还加入了 4 组采用优化后水胶比的橡胶/混凝土及 SF-橡胶/混凝土试件。设计了 6 组 SF-橡胶/混凝土试件、4 组橡胶/混凝土试件、3 组 SF/混凝土试件和 1 组 PC 对比试件,共 14 组,尺寸均为 100 mm×100 mm×300 mm,并在相同条件下分别浇筑一组尺寸为

100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块，以测定相应试件的抗压强度。试件采用标准养护 28 天，待达到龄期后进行试验。试验混凝土配合比如表 1 所示。

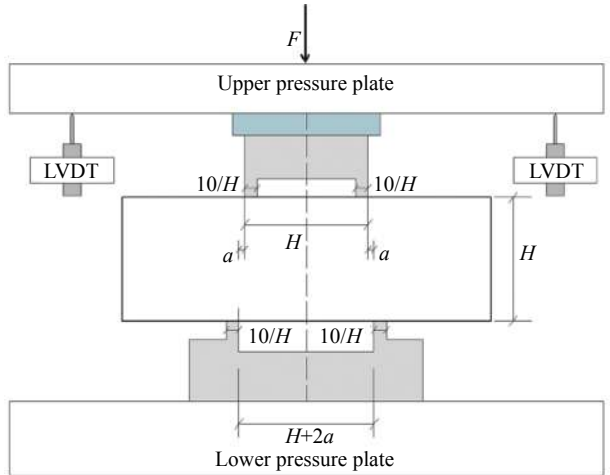
表 1 试验混凝土配合比
Table 1 Mix proportion of test concrete

Type	Specimen	Water-binder mass ratio	Volume fraction of steel fiber V_f /%	Volume substitution of rubber particles ρ_r /%	Water/ Cement/ kg		Fine aggre- gate/kg	Coarse aggre- gate/kg	Mass fraction of super plasticizer/%
PC	R-0-F-0.0	0.340	0.0	0	160	470	820	960	1
	R-10-F-0.0	0.340	0.0	10	160	470	738	960	1
	R-10-F-0.0-OP	0.285	0.0	10	155	544	738	960	1
	R-20-F-0.0	0.340	0.0	20	160	470	656	960	1
	R-20-F-0.0-OP	0.245	0.0	20	145	593	656	960	1
SF/ concrete	R-0-F-0.5	0.340	0.5	0	160	470	820	960	1
	R-0-F-1.0	0.340	1.0	0	160	470	820	960	1
	R-0-F-1.5	0.340	1.5	0	160	470	820	960	1
SF-rubber/ concrete	R-10-F-0.5	0.340	0.5	10	160	470	738	960	1
	R-10-F-1.0	0.340	1.0	10	160	470	738	960	1
	R-10-F-1.0-OP	0.285	1.0	10	155	544	738	960	1
	R-10-F-1.5	0.340	1.5	10	160	470	738	960	1
	R-20-F-1.0	0.340	1.0	20	160	470	656	960	1
	R-20-F-1.0-OP	0.245	1.0	20	145	593	656	960	1

Notes: PC—Plain concrete; In specimen denotation section, R—Rubber particles; R-0, R-10 and R-20—Rubber volume substitution ratios of 0%, 10% and 20%, respectively; F—Steel fiber, F-0.0, F-0.5, F-1.0, F-1.5—Steel fiber volume fraction ratios of 0vol%, 0.5vol%, 1.0vol% and 1.5vol%, respectively; OP—Optimized water-binder ratio.

1.2 试验方法

按照《纤维混凝土试验方法标准》^[21]设计并制作了双面剪切试验装置，如图 1 所示。采用 200 t 的 YAW-2000D 微机控制电液伺服压力机行加载。本次试验采用位移控制加载的方式，加载速率为 0.05 mm/min。将试件放置在试验装置中进行预加载，以消除试件与加载设备之间的间隙。



F —Shear load; H —Height of test specimen; a —Dislocation of upper and lower knife-edge; LVDT—Linear variable differential transformer

图 1 双面剪切试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of double-shear test device

预加载至 15 kN 时停止加载，随后卸载至 0，重复 3 次。预加载完成后，进行正式加载。试件安装及测试如图 2 所示。

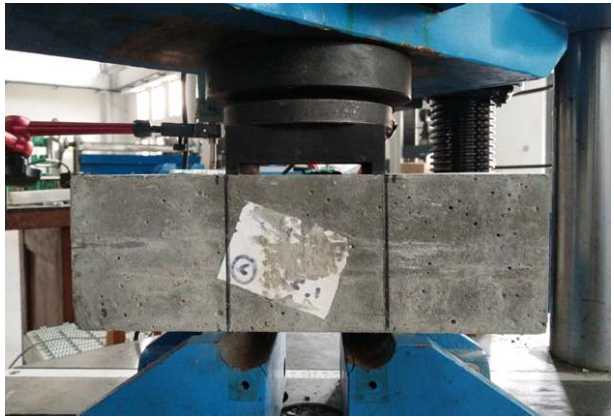


图 2 双面剪切装置

Fig. 2 Double-shear test set-up

2 试验结果及分析

2.1 SF-橡胶/混凝土试件剪切破坏形态

图 3 为典型试件的受剪破坏形态。对于普通混凝土 PC 试件及 SF 掺量为 0vol% 的橡胶/混凝土试件，其破坏过程如下：加载初期，荷载基本呈线性增长；随着荷载的增加，剪切面中部出现可

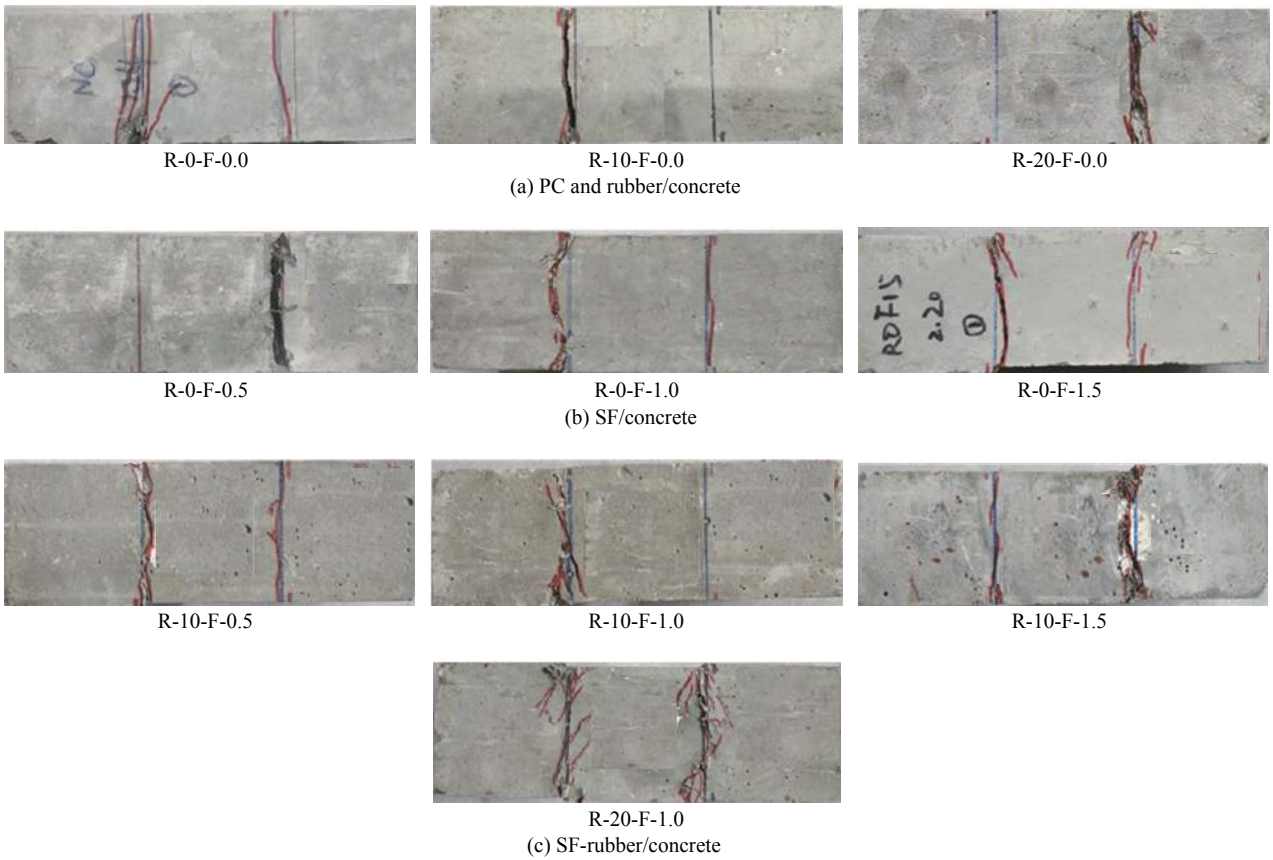


图3 不同成分配比的钢纤维 (SF)-橡胶/混凝土试件的受剪破坏形态

Fig.3 Shear failure modes of steel fiber (SF)-rubber/concrete specimens with different mix ratios

见细微剪切裂缝，并迅速向加载点和支座处两侧延伸，试件随之突然丧失承载力发生脆性剪切破坏，破坏前无明显征兆；试件破坏时丧失完整性，沿剪切面被分割成2、3个独立块体，试件剪切面近似成一平面，断裂面跨越剪切面的粗骨料，形成凹凸不平的剪切带。

对于 SF/混凝土试件和 SF-橡胶/混凝土试件，其破坏过程如下：加载初期，荷载基本呈线性增长；荷载增加到一定程度时，剪切面首先出现一条竖向细裂纹；荷载继续增加，第一条裂纹两侧逐渐出现更多细微裂纹，并在剪切面两侧缓慢发展，交叉、蔓延形成一条沿剪切破坏面的裂缝带；荷载增大至峰值时，跨越裂缝处的 SF 开始逐渐被拔出或拉断，可以听到 SF 从基体中被拔出的声音，裂缝间可见外露的 SF；随后一侧剪切面裂缝迅速增宽，剪切面处搓动明显，加载处和支座处局部挤压变形明显增大，荷载开始缓慢下降直至试件破坏。

由图3可见，对于 SF-橡胶/混凝土试件，随着 SF 掺量的增加，主裂缝间 SF 数量增多，主裂缝两侧微裂缝增多，剪切面错动更明显；破坏时，

试件未被分割成独立块体，仍能靠 SF 的桥联作用保持完整性，表现出较好的剪切变形韧性。另一方面，SF-橡胶/混凝土试件中橡胶掺量越大，主裂缝两侧微裂缝越细密，裂缝带范围越大。这主要是由于橡胶颗粒与周边水泥浆基体不能有效粘结，剪力作用下易分离产生微裂纹，但橡胶颗粒弹性模量较低，起到减震器的作用，减小了微裂纹尖端的应力集中，从而延缓了裂缝聚结，形成较多的细密裂缝，裂缝带扩展范围增大，使更多周边 SF 发挥了桥联作用。因此，相比 SF/混凝土试件，SF-橡胶/混凝土试件表现出了更好的剪切变形韧性。

2.2 SF-橡胶/混凝土试件剪切荷载-剪切变形性能

图4为试验测得的试件剪切荷载-变形曲线。每组3个试件，除极个别数据误差较大外，每组曲线规律较统一，离散性较小。

图4(a)和图4(b)分别为未采用及采用水胶比优化设计的橡胶/混凝土试件的剪切荷载-变形曲线。可见，PC 及橡胶/混凝土材料的剪切荷载-变形曲线基本呈线性，承载力达到峰值后曲线迅速

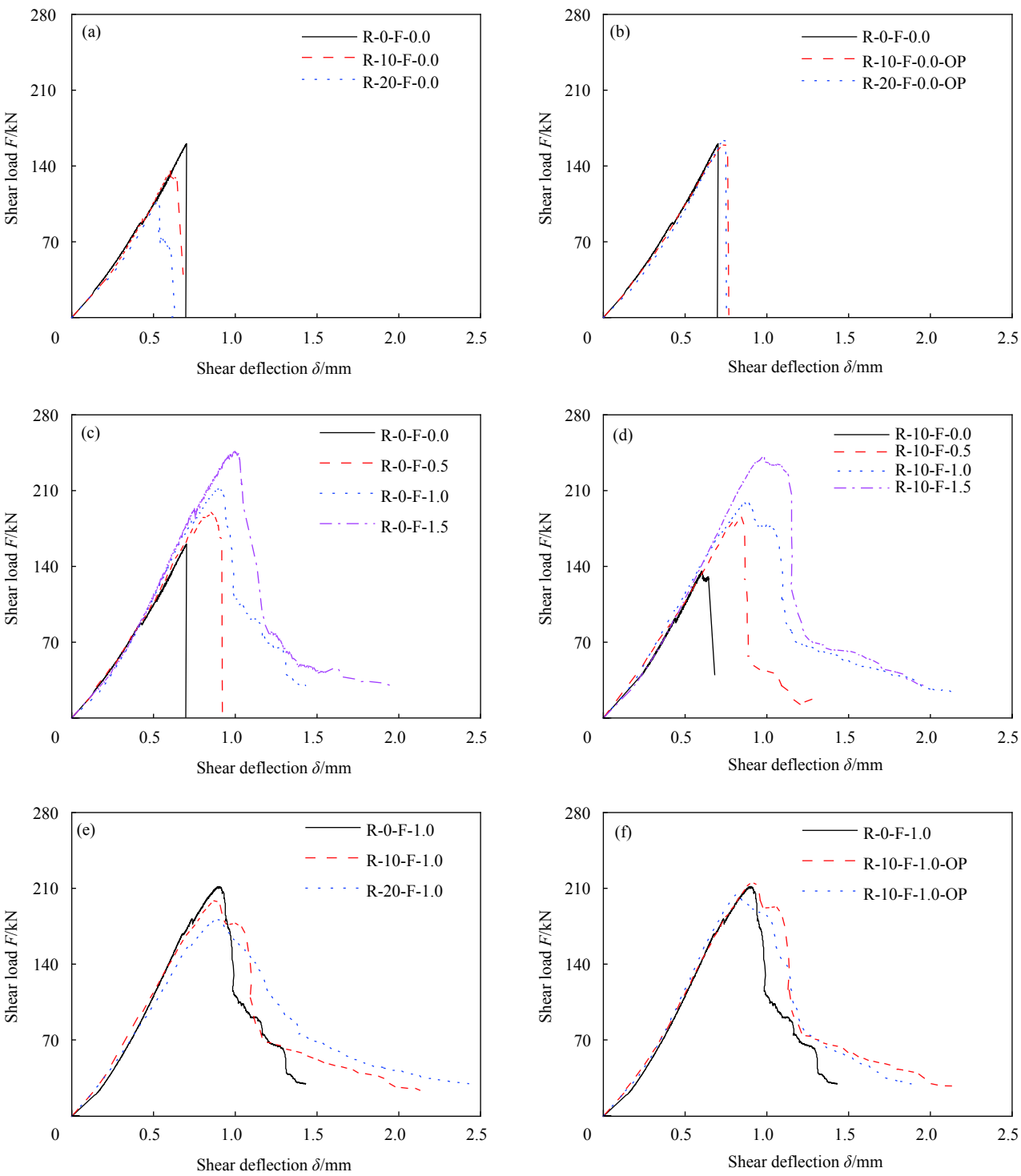


图 4 SF-橡胶/混凝土试件剪切荷载-变形曲线

Fig. 4 Shear load-deformation curves of each group of SF-rubber/concrete specimens

下降，与试验中观察到的剪切面出现裂缝后迅速开展、试件随即丧失承载力的现象较一致，表现出典型的脆性破坏特征。同时，随着橡胶掺量的增加，未采用水胶比优化设计的橡胶/混凝土试件峰值荷载下降显著，而采用水胶比优化设计的橡胶/

混凝土试件峰值荷载可基本保持不变，达到了与 PC 等强的效果。

图 4(c) 和图 4(d) 分别为 SF/混凝土试件及橡胶颗粒掺量为 10%、未采用水胶比优化设计 SF-橡胶/混凝土试件的剪切荷载-变形曲线。可见，SF/

混凝土及 SF-橡胶/混凝土材料的剪切荷载-变形曲线的初期也基本呈线性增长，而随着荷载的增加逐渐呈现出非线性增长的趋势。到达峰值后，曲线稳定下降，与 PC 及橡胶/混凝土试件的承载力迅速下降现象不同。这主要是由于开裂后，剪切裂缝间的 SF 开始承担部分剪力，并随着荷载增加，更多 SF 参与承载；此后剪切裂缝逐渐变宽，水泥基体内部纤维滑动和材料损伤累积加剧，承载力下降，SF 在此过程中逐渐被拔出或拉断并吸收能量，试件呈现出延性破坏的特征。值得注意的是，当 SF 掺量为 1.0vol% 及 1.5vol% 时，SF-橡胶/混凝土试件 (R-10-F-1.0、R-10-F-1.5) 在峰值荷载附近出现平台段，表现出更高的剪切韧性，验证了橡胶颗粒及 SF 的正向协同作用。

图 4(e) 和图 4(f) 为未采用及采用水胶比优化设计、SF 掺量为 1.0vol% 的 SF-橡胶/混凝土试件的剪切荷载-变形曲线。可见，随着橡胶掺量的增加，相比 SF/混凝土试件 (R-0-F-1.0)，未采用水胶比优化设计的 SF-橡胶/混凝土试件剪切荷载-变形曲线的下降趋势进一步变缓，体现出更好的延性及剪切韧性，但其峰值荷载略有下降；采用水胶比优化设计的 SF-橡胶/混凝土试件峰值荷载的下降则明显得到抑制，基本达到与 SF/混凝土等强的效果，且其曲线下下降趋势同样变缓，从另一个方面验证了橡胶颗粒及 SF 的正向协同作用。

2.3 SF-橡胶/混凝土试件抗剪强度和峰值变形

表 2 为试验测得的 14 组试件的峰值承载力、

抗剪强度和峰值剪切变形及相应的立方体抗压强度试验结果。试件抗剪强度 f_v 是通过试件加载时的峰值承载力除以试件两个破坏截面的面积来得到。可见，除未采用水胶比优化设计的橡胶/混凝土试件外，其余试件的立方体抗压强度到达 C60 强度等级，为高强混凝土。各试件抗剪强度的变化趋势与立方体抗压强度一致。未采用水胶比优化设计时，橡胶/混凝土试件的立方体抗压及抗剪强度下降明显；进一步加入 SF 后，SF-橡胶/混凝土试件立方体抗压强度的下降明显得到抑制，而抗剪强度得到显著提升。当橡胶颗粒掺量为 10% 时，未采用水胶比优化设计的橡胶/混凝土试件立方体抗压强度相比 PC 试件下降 17.5%，抗剪强度下降 18.9%；加入 1.0vol% SF 后，SF-橡胶/混凝土试件的立方体抗压强度相比 PC 试件下降仅为 11.8%，而抗剪强度提高 23.8%。采用水胶比优化设计时，橡胶/混凝土试件的立方体抗压强度及抗剪强度下降得到有效抑制，基本达到了等强；加入 SF 后，SF-橡胶/混凝土试件立方体抗压强度略有增加，而抗剪强度进一步得到提升。当橡胶颗粒掺量为 10% 时，采用水胶比优化设计后的橡胶/混凝土试件抗压强度相比 PC 试件下降仅为 0.07%，抗剪强度下降仅为 0.38%；加入 1.0vol% SF 后，SF-橡胶/混凝土试件立方体抗压强度相比 PC 试件提高 8.76%，而抗剪强度提高 34.5%。由此可见，采用水胶比优化设计的 SF-橡胶/混凝土试件不仅可以保持混凝土材料的抗压强度，有利于构件等强

表 2 SF-橡胶/混凝土试件抗剪强度和峰值剪切变形试验结果

Table 2 SF-rubber/concrete specimens test results of shear strength and deformation at peak load

Specimen type	Specimen	f_{cu} /MPa	f_v /MPa	F_{max} /kN	Δ_p /mm
PC	R-0-F-0.0	68.70	8.03	160.67	0.702
	R-10-F-0.0	58.47	6.76	135.28	0.599
	R-10-F-0.0-OP	68.23	8.00	160.00	0.737
	R-20-F-0.0	46.50	5.53	110.69	0.529
	R-20-F-0.0-OP	65.65	8.20	163.92	0.729
SF/concrete	R-0-F-0.5	72.08	9.53	190.64	0.867
	R-0-F-1.0	74.71	10.59	211.84	0.901
	R-0-F-1.5	78.90	12.35	246.92	1.000
SF-rubber/concrete	R-10-F-0.5	60.23	9.29	185.74	0.834
	R-10-F-1.0	61.43	9.94	198.87	0.876
	R-10-F-1.0-OP	74.72	10.80	216.00	0.914
	R-10-F-1.5	65.72	12.03	240.67	0.978
	R-20-F-1.0	48.93	9.07	181.39	0.909
	R-20-F-1.0-OP	70.56	10.27	205.36	0.882

Notes: f_{cu} —Cube compressive strength; f_v —Shear strength; F_{max} —Maximum shear load; Δ_p —Deformation at peak load.

设计，而且进一步显著提升了材料的抗剪强度。

图5为未采用水胶比优化设计时，SF掺量对SF/混凝土试件及橡胶掺量为10%的SF-橡胶/混凝土试件剪切强度和峰值变形的影响。可见，随着SF掺量的增加，SF/混凝土试件及SF-橡胶/混凝土试件的抗剪强度和峰值剪切变形明显提高，且SF-橡胶/混凝土试件的增长更明显。当SF掺量为1.5vol%时，SF/混凝土试件的抗剪强度和峰值剪切变形相比PC试件分别提高了54%和42%，而SF-橡胶/混凝土试件的抗剪强度和峰值剪切变形相比橡胶/混凝土试件则分别提高了78%和63%。这体现出SF对SF/混凝土及SF-橡胶/混凝土试件的抗剪性能起到主导作用，可有效阻止试件内部裂缝的产生和发展，且SF和橡胶颗粒的正向协同作用更有利于SF参与承载，更显著提高了SF-橡胶/混凝土试件的抗剪强度及变形能力。

图6为未采用水胶比优化设计时，橡胶掺量对

橡胶/混凝土试件及SF掺量为1.0vol%的SF-橡胶/混凝土试件抗剪强度和峰值变形的影响。可见，随着橡胶掺量的增加，橡胶/混凝土试件的抗剪强度和峰值剪切变形均下降，相比PC试件降幅高达31%及25%；SF-橡胶/混凝土试件的抗剪强度相比SF/混凝土试件亦有所下降，但幅度在14%以内，且其峰值剪切变形无明显下降。这体现出橡胶颗粒的加入对普通混凝土的抗剪强度及变形能力均造成明显影响，主要由于橡胶颗粒本身强度较低且其周围形成薄弱带。橡胶颗粒对纤维混凝土抗剪强度的影响明显减弱，变形能力几乎无影响，这说明SF可部分弥补橡胶颗粒造成的不利影响。

图7为采用水胶比优化设计后，橡胶掺量对橡胶/混凝土试件及SF掺量为1.0vol%的SF-橡胶/混凝土试件抗剪强度和峰值变形的影响。可见，采用水胶比优化设计后，随着橡胶掺量的增加，

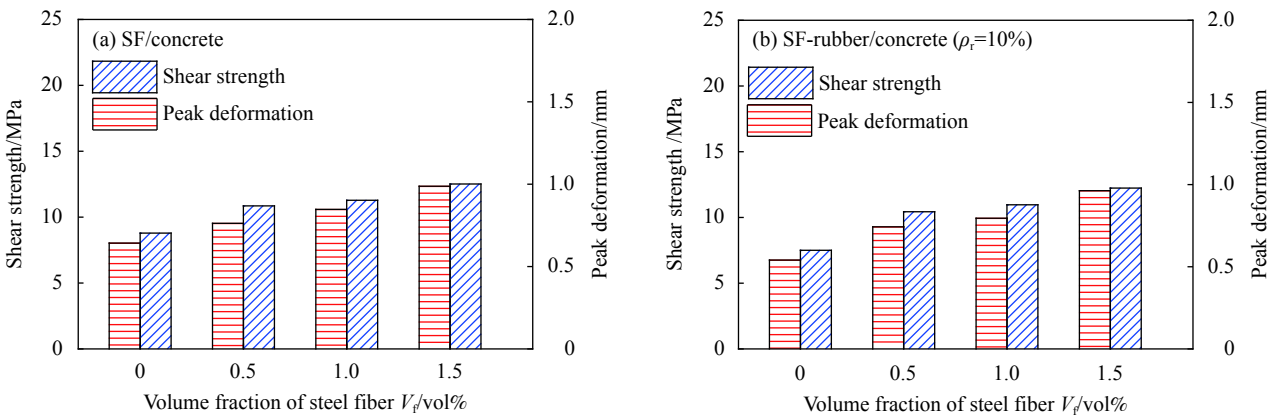


图5 SF掺量对SF-橡胶/混凝土试件剪切强度与峰值变形的影响

Fig. 5 Shear strength and peak deformation of SF-rubber/concrete specimens influenced by volume fraction of SF

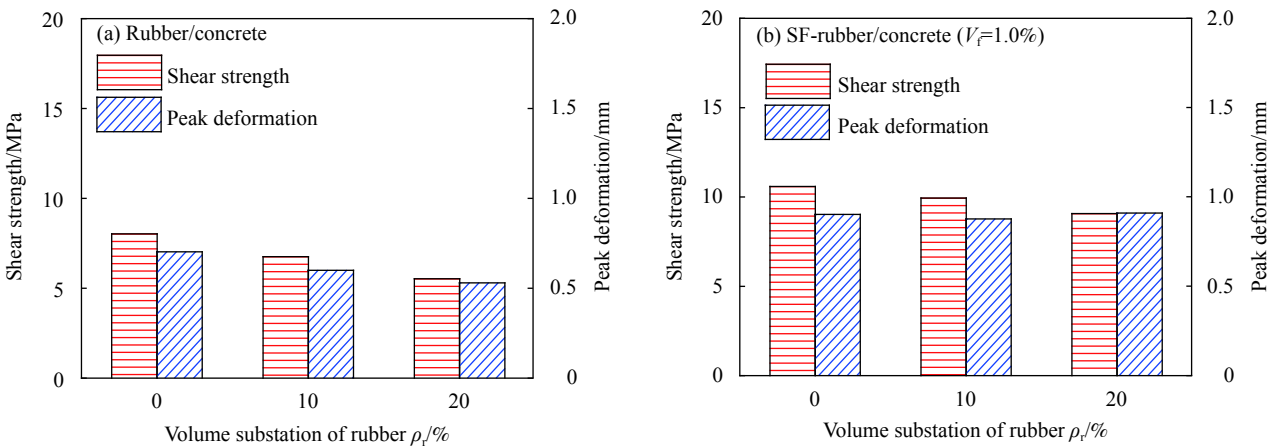


图6 橡胶掺量对SF-橡胶/混凝土试件剪切强度与峰值变形的影响

Fig. 6 Shear strength and peak deformation of SF-rubber/concrete specimens influenced by volume substitution of rubber

橡胶/混凝土试件与 SF-橡胶/混凝土试件的抗剪强度基本不变, 且峰值剪切变形稍有增加。这说明优化水胶比设计可完全弥补橡胶颗粒对橡胶/混凝土及 SF-橡胶/混凝土试件抗剪强度的不利影响, 且试件变形能力随着橡胶颗粒的掺入稍有增长。

但值得注意的是, 当橡胶掺量为 20% 时, SF-橡胶/混凝土试件的抗剪强度相比 SF/混凝土试件下降了 5%, 峰值剪切变形下降了 11%, 说明 SF-橡胶/混凝土的橡胶掺量应控制在合适范围之内。

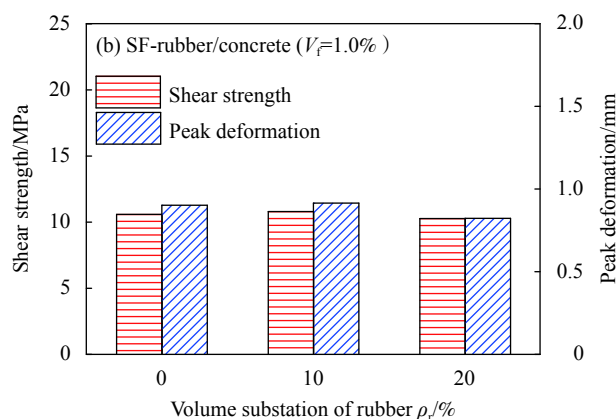
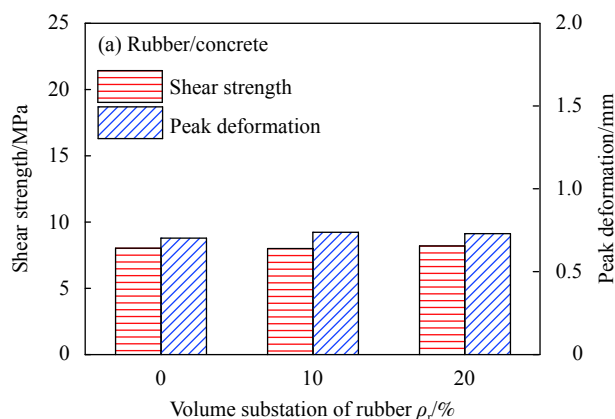


图 7 优化水胶比后橡胶掺量对 SF-橡胶/混凝土试件剪切强度与峰值变形的影响

Fig. 7 Shear strength and peak deformation of SF-rubber/concrete specimen influenced by volume substitution of rubber after mix optimization of water-binder ratio

2.4 SF-橡胶/混凝土试件剪切韧性

SF-橡胶/混凝土试件对材料剪切性能的改善作用可分为峰值荷载前、后两个阶段。对峰值前阶段的改善主要是提高抗剪强度、峰值变形和韧性, 对峰值后阶段的改善主要是提高残余抗剪强度和持荷能力。以实测的试件剪切荷载-变形曲线为基础, 并借鉴纤维混凝土剪切韧性评估方法^[19], 对材料的剪切韧性进行评价。以试件的等效初始剪切强度 f_{eq} 、峰值剪应变 γ_p 和初始能量密度 T_p (图 8) 作为峰值前韧性评价指标, 分别表征剪切强度、变形和韧性, 计算公式如下:

$$f_{eq} = \frac{\Omega_p}{2bh\delta_p} \quad (1)$$

$$\gamma_p = \frac{\delta_p}{h} \quad (2)$$

$$T_p = \int_0^{\gamma_p} \tau(\gamma) d\gamma = \frac{\Omega_p}{2bh\delta_p} \frac{\delta_p}{h} = f_{eq} \gamma_p \quad (3)$$

式中: δ_p 为剪切荷载-变形曲线峰值荷载处挠度; Ω_p 为峰值荷载前剪切荷载-变形曲线下的面积, 即图 9 中 OAB 包围的面积; $\tau(\gamma)$ 是由剪切荷载-变形曲线计算得到的剪应力-剪应变曲线。

以试件的等效残余剪切强度 $f_{p,k}$ 和残余剪力韧度比 $R_{p,k}$, 作为峰值后韧性评价指标, 表征剪切

峰值后的残余持荷能力。计算公式如下:

$$f_{p,k} = \frac{\Omega_{p,k}}{2bh\delta_{p,k}} \quad (4)$$

$$R_{p,k} = \frac{f_{p,k}}{f_v} \quad (5)$$

式中: $\Omega_{p,k}$ 为图 9 中峰值挠度 δ_p 至挠度 δ_k 部分剪切荷载-变形曲线下的面积, 其中 δ_k 为 δ_p 的 k 倍, k 可取 1.2、1.5 或 2.0。因此 $\Omega_{p,1.2}$ 、 $\Omega_{p,1.5}$ 、 $\Omega_{p,2.0}$ 分别

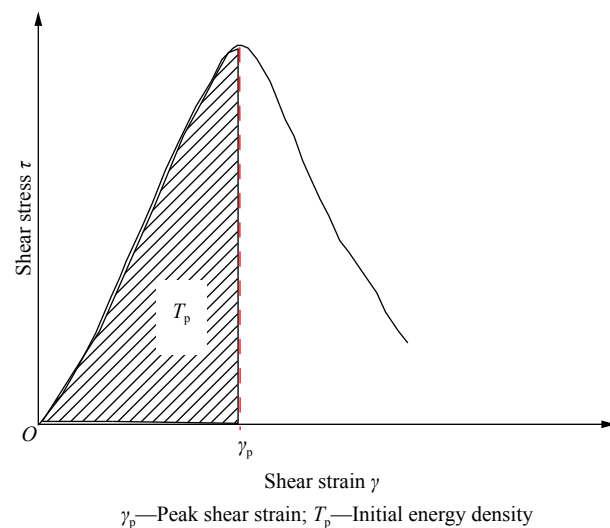
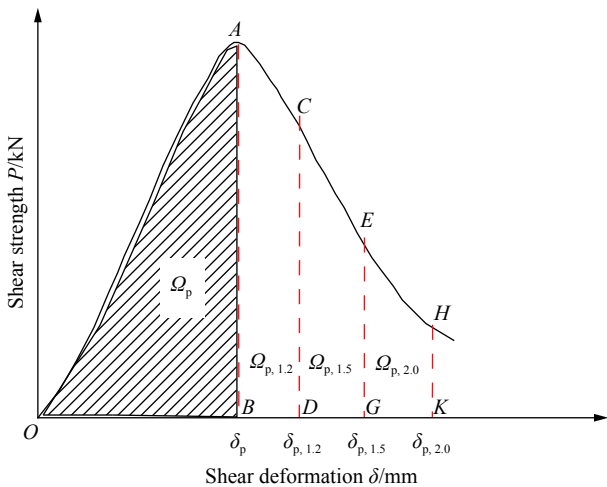


图 8 初始能量密度的定义

Fig. 8 Definition of initial energy density



$\Omega_{p,1.2}, \Omega_{p,1.5}, \Omega_{p,2.0}$ —Corresponding to the area surrounded by $BACD$, $BAEG$ and $BAHK$ in the figure, respectively; Ω_p —Area under shear load-deformation curve before peak load; δ_p —Deflection at peak load on the shear load-deformation curve; δ_k — k times δ_p , $k=1.2, 1.5, 2.0$; $\delta_{p,k}$ —Difference between δ_p and δ_k

图9 剪切韧性计算参数

Fig. 9 Definitions for shear toughness indexes

对应图9中 $BACD$ 、 $BAEG$ 、 $BAHK$ 所包围的面积； $\delta_{p,k}$ 为 δ_p 与 δ_k 段的差值， f_v 为剪切强度。

表3为根据14组试件的剪切荷载-变形曲线计算的等效初始剪切强度、峰值剪应变、初始能量密度、等效残余剪切强度和残余剪力韧度比。SF掺量、橡胶掺量及水胶比对试件剪切韧性指标的影响趋势如图10~12所示，其中峰值后阶段的韧性指标仅包括等效残余剪切强度和残余剪力韧度比。

图10为未采用水胶比优化设计时，SF掺量对SF/混凝土试件及橡胶掺量为10%的SF-橡胶/混凝土试件剪切韧性指标的影响。由表3和图10可知，随着SF掺量的增加，SF/混凝土试件及SF-橡胶/混凝土试件的各项峰值前剪切韧性指标均显著提高，且SF-橡胶/混凝土试件的增长更明显。当SF掺量为1.5vol%时，SF/混凝土试件的等效初始强度、峰值剪切应变及初始能量密度相比PC试件分别提高了63%、43%和132%，而SF-橡胶/混凝土试件的等效初始强度、峰值剪切应变及初始能量密度相比橡胶/混凝土试件则分别提高了88%、63%和207%。另一方面，PC试件与橡胶/混凝土试件的峰值后韧性指标为0，意味着试件达到峰值承载力后立即破坏，呈脆性破坏特征，与试验观察到的现象相符，而SF/混凝土试件及SF-橡胶/混凝土试件的峰值后剪切韧性指标随着SF掺量的增加而明显增加。这体现出SF对SF/混凝土及SF-橡胶/混凝土试件的剪切韧性起到主导的作用，增强了试件延性。

图11为未采用水胶比优化设计时，橡胶掺量对橡胶/混凝土试件及SF掺量为1.0vol%的SF-橡胶/混凝土试件剪切韧性指标的影响。由表3及图11可知，随着橡胶掺量的增加，橡胶/混凝土试件的各项峰值前韧性评价指标均下降。当橡胶掺量为20%时，橡胶/混凝土试件的等效初始抗剪强度、峰值剪应变及初始能量密度相比PC试件分别降

表3 SF-橡胶/混凝土试件剪切荷载-变形曲线峰值前及峰值后的韧性指标

Table 3 Toughness index evaluation pre-peak and post-peak load of shear load-deformation curves of SF-rubber/concrete specimens

Type	Specimen	f_{eq}/MPa	$\gamma_p/\%$	$T_p/(10^4\text{J}\cdot\text{m}^{-3})$	$f_{p,k}/\text{MPa}$			$R_{p,k}/\%$		
					$f_{p,1.2}$	$f_{p,1.5}$	$f_{p,2.0}$	$R_{p,1.2}$	$R_{p,1.5}$	$R_{p,2.0}$
PC Rubber/concrete	R-0-F-0.0	3.66	0.70	2.57	—	—	—	—	—	—
	R-10-F-0.0	2.99	0.60	1.80	—	—	—	—	—	—
	R-10-F-0.0-OP	3.79	0.74	2.80	—	—	—	—	—	—
	R-20-F-0.0	2.41	0.53	1.28	—	—	—	—	—	—
	R-20-F-0.0-OP	3.60	0.73	2.62	—	—	—	—	—	—
SF/concrete	R-0-F-0.5	3.73	0.87	3.23	0.44	—	—	4.64	—	—
	R-0-F-1.0	5.04	0.90	4.54	1.18	0.70	0.07	11.15	6.64	0.66
	R-0-F-1.5	5.94	1.00	5.95	1.32	0.60	0.43	10.72	4.82	3.46
SF-rubber/concrete	R-10-F-0.5	4.58	0.84	3.85	0.61	0.26	0.03	6.66	2.78	0.35
	R-10-F-1.0	4.96	0.88	4.35	1.50	0.87	0.65	15.09	8.79	6.50
	R-10-F-1.0-OP	5.23	0.91	4.78	1.63	0.91	0.68	15.06	8.46	6.26
	R-10-F-1.5	5.65	0.98	5.52	1.39	1.05	0.60	11.54	8.73	4.94
	R-20-F-1.0	4.68	0.91	4.26	1.35	1.13	0.79	14.93	12.47	8.70
	R-20-F-1.0-OP	4.78	0.82	3.93	1.59	1.37	0.74	15.51	13.36	7.23

Notes: f_{eq} —Initial equivalent shear strength; $f_{p,k}$ —Equivalent residual shear strength; $R_{p,k}$ —Residual shear toughness ratio.

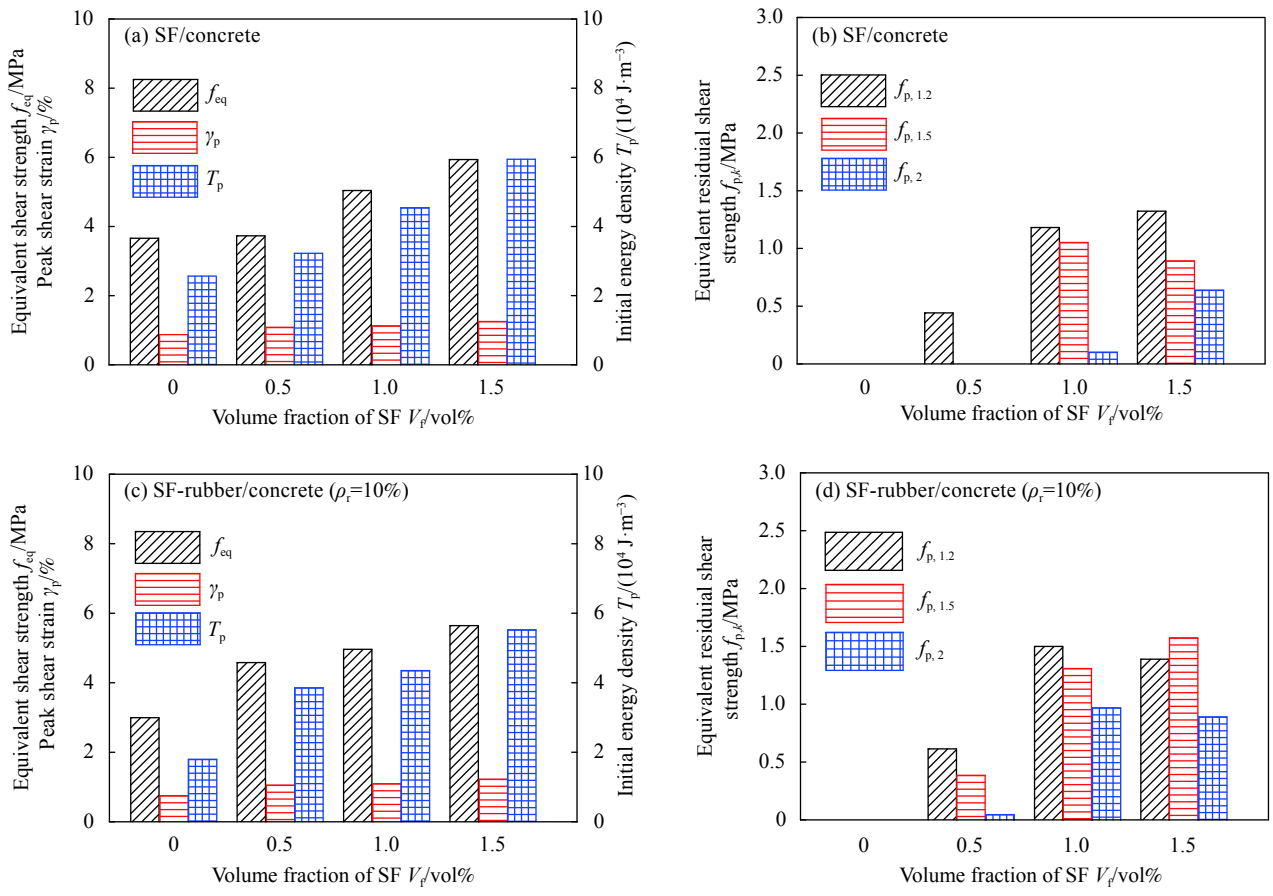


图 10 SF 掺量对 SF-橡胶/混凝土试件剪切韧性指标的影响

Fig. 10 Effects of volume fraction of SF on shear toughness index of SF-rubber/concrete specimens

低了 34%、24% 和 50%；SF-橡胶/混凝土试件的峰值前韧性指标相比 SF/混凝土试件变化幅度较小，仅在 7% 以内，而峰值后韧性指标有明显增加，SF-橡胶/混凝土试件的等效残余剪切强度 $f_{p,1.2}$ 和 $f_{p,1.5}$ 相比 SF/混凝土试件分别提高了 14% 和 61%。由此可见，与普通混凝土不同，在纤维混凝土中加入橡胶颗粒不仅对材料峰值前剪切韧性的影响较有限，并且明显增强了材料的峰值后剪切韧性。SF 减弱了橡胶颗粒对试件峰值前剪切韧性的不利影响，而在峰值后阶段，即裂缝充分开展阶段，与橡胶颗粒展现了明显的正向协同作用。

图 12 为采用水胶比优化设计时，橡胶掺量对橡胶/混凝土试件及 SF 掺量为 1.0vol% 的 SF-橡胶/混凝土试件剪切韧性指标的影响。由表 3 和图 12 可知，采用水胶比优化设计后，随着橡胶掺量的增加，橡胶/混凝土试件的峰值前韧性指标不再明显降低，而是基本保持不变；SF-橡胶/混凝土试件的峰值前韧性指标基本保持不变，而峰值后韧性指标进一步增加，当橡胶掺量为 20% 时，等效

残余剪切强度 $f_{p,1.2}$ 和 $f_{p,1.5}$ 相比 SF/混凝土试件分别提高了 35% 和 96%。这说明优化水胶比设计可弥补橡胶颗粒对橡胶/混凝土试件及 SF-橡胶/混凝土试件峰值前剪切韧性的不利影响。

2.5 SF-橡胶/混凝土试件抗剪强度拟合计算公式

已有研究表明，普通混凝土抗剪强度和抗压强度的比值基本为定值^[9]。由上述试验数据分析可知，进行水胶比优化设计后，可不考虑橡胶对橡胶/混凝土抗剪强度的削弱作用，基本视为等强。未进行水胶比优化设计时，橡胶/混凝土试件的抗剪强度随橡胶掺量的增加而减小，需考虑橡胶掺量对抗剪强度的削弱作用。引入文献 [17-18] 采用影响系数表征橡胶掺合料对混凝土抗剪强度的影响，结合试验数据进行回归分析，拟合得到橡胶/混凝土的抗剪强度计算式为

$$f_{v,r} = f_v(1 + \alpha_{r,w}\lambda_r) \tag{6}$$

式中： $f_{v,r}$ 为橡胶/混凝土抗剪强度； f_v 为混凝土抗剪强度， $f_v = 0.8f_{cu}^{0.55}$ ^[18]， f_{cu} 为混凝土的立方体抗压强度； $\alpha_{r,w}$ 为橡胶/混凝土的橡胶削弱系数，

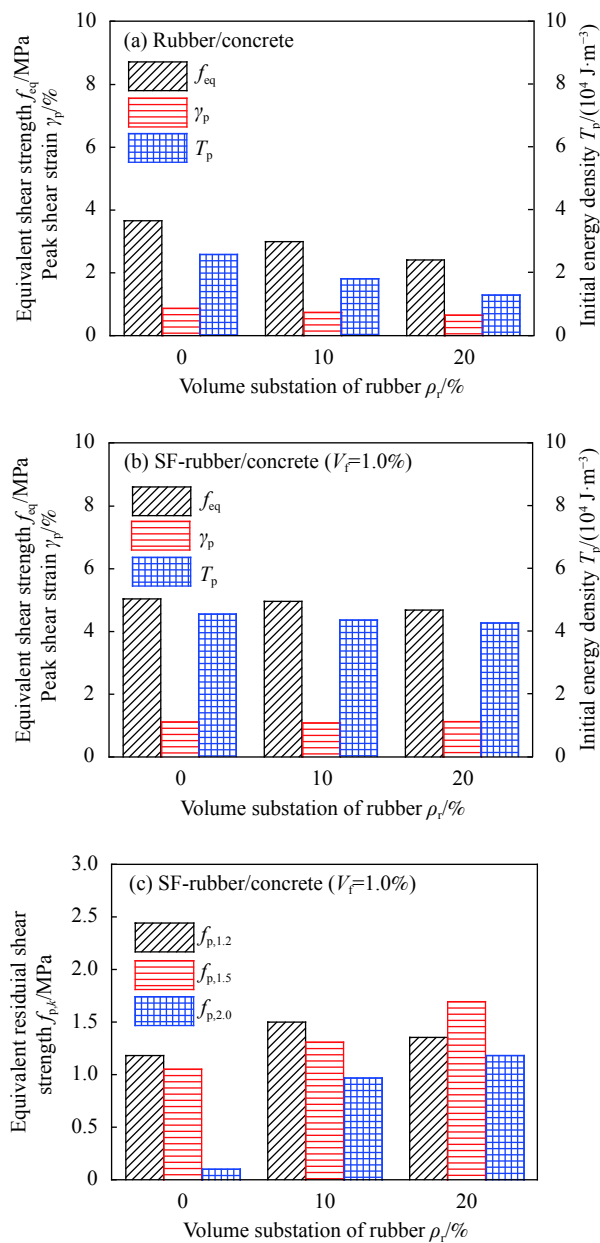


图 11 橡胶掺量对 SF-橡胶/混凝土试件剪切韧性指标的影响
Fig. 11 Effects of volume substitution of rubber on shear toughness index of SF-rubber/concrete specimens

拟合得到 $\alpha_{r,w}=-1.609$ ； λ_r 为橡胶特征参数， $\lambda_r=\rho_r\cdot d_r$ ，其中 ρ_r 、 d_r 为橡胶颗粒等体积替换率和平均粒径。

SF-橡胶/混凝土试件的抗剪强度与 SF 体积掺量基本呈正比关系，因此引入 SF 影响系数的方法来表征 SF 对混凝土抗剪强度的增强作用^[17-18]。而由于在 SF-橡胶/混凝土中橡胶和 SF 两者存在正向协同作用，SF 可显著减弱橡胶对抗剪强度的不利影响，橡胶削弱系数将有所变化。结合试验数据进行回归分析，拟合得到抗剪强度计算式为

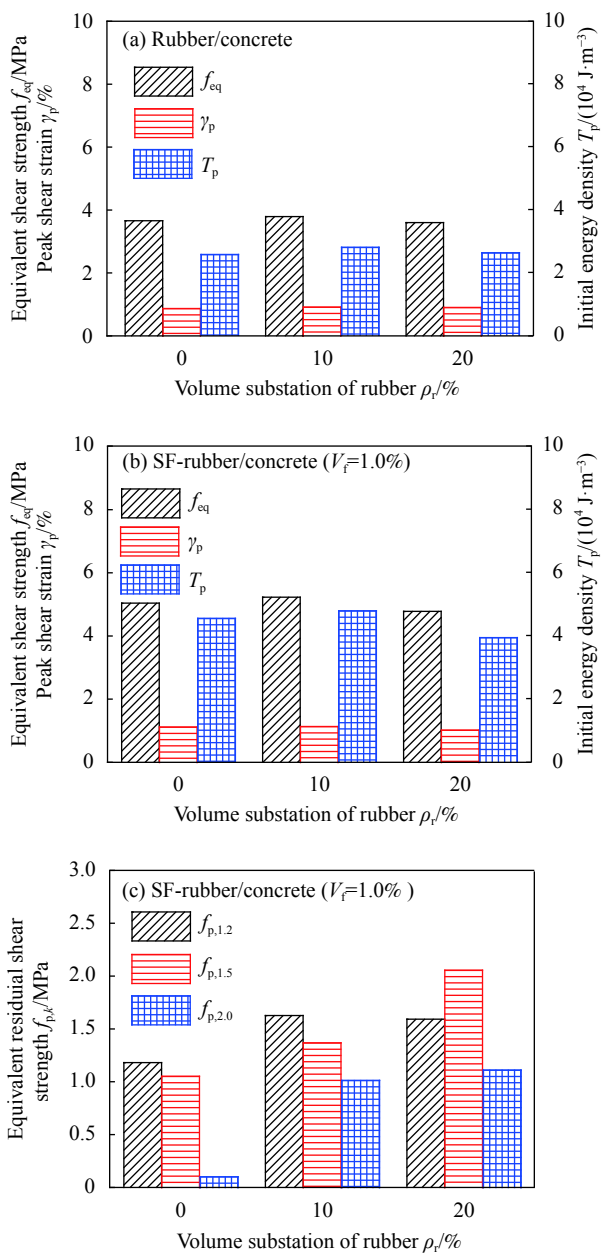


图 12 优化水胶比后橡胶掺量对 SF-橡胶/混凝土试件剪切韧性指标的影响
Fig. 12 Effects of volume substitution of rubber on shear toughness index of SF-rubber/concrete specimens after mix optimization of water-binder ratio

$$f_{v,fr} = f_v(1 + \alpha_{f,r}\lambda_f + \alpha_{r,r}\lambda_r) \quad (7)$$

式中： $f_{v,fr}$ 为 SF-橡胶/混凝土的抗剪强度； $\alpha_{f,r}$ 为 SF 增强系数，拟合得到 $\alpha_{f,r}=0.733$ ； λ_f 为 SF 特征参数， $\lambda_f=V_f l_f/d_f$ ，其中 V_f 、 l_f 、 d_f 为 SF 体积分数掺量、长度和等效直径， l_f/d_f 为 SF 长径比； $\alpha_{r,r}$ 为 SF-橡胶/混凝土的橡胶削弱系数，拟合得到 $\alpha_{r,r}=-0.341$ 。

由式 (6)~(7) 可得各组试件的抗剪强度计算值见表 2，计算值与试验值的对比如图 13 所示，其

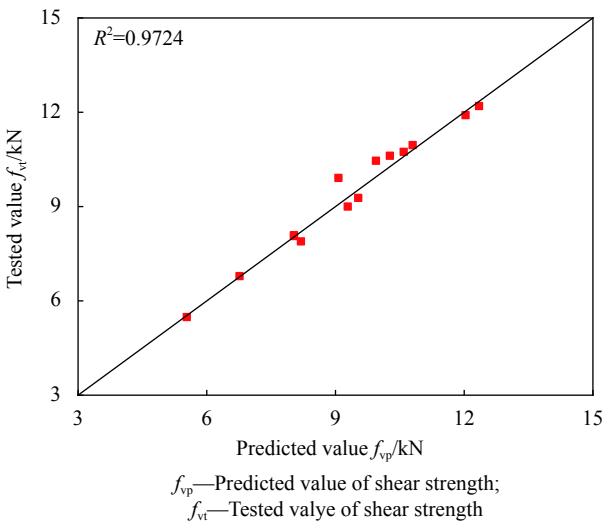


图 13 SF-橡胶/混凝土试件抗剪强度试验值与拟合值比较

Fig. 13 Comparison of shear strength of SF-rubber/concrete specimens between experimental and predicted results

中 f_{vp} 代表计算值， f_{vt} 代表试验值，计算结果与试验结果吻合较好。

3 结论

(1) 与橡胶/混凝土试件的脆性破坏特征不同，钢纤维 (SF)-橡胶/混凝土试件的受剪破坏呈明显延性特征，试件保持完整，且主裂缝两侧形成细密的裂缝带，使更多的 SF 发挥桥联作用，表现出比 SF/混凝土试件更好的剪切变形韧性，体现了 SF 与橡胶的正向协同作用。

(2) 随着 SF 掺量的增加，SF-橡胶/混凝土及纤维混凝土的抗剪强度、变形能力及剪切韧性显著增强，且前者更明显。当橡胶掺量 (等体积取代砂取代率) 为 10% 时，SF 掺量为 1.5vol% 的 SF-橡胶/混凝土试件的抗剪强度、峰值剪切变形及初始能量密度相比橡胶/混凝土分别提高了 78%、63% 及 207%，体现出 SF 对材料的抗剪性能起到主导作用。

(3) 未采用水胶比优化设计时，随着橡胶掺量的增加，SF-橡胶/混凝土的抗剪强度及峰值前韧性指标相比 SF/混凝土有所下降，降幅在 14% 及 7% 以内，但峰值变形无明显下降，且峰值后韧性指标增幅可高达 61%。SF 不仅减弱了橡胶颗粒对材料抗剪强度及峰值前剪切韧性的不利影响，而且在峰值后阶段即裂缝充分开展阶段，与橡胶颗粒展现了明显的正向协同作用，进一步增强了材料的剪切韧性及延性。

(4) 采用水胶比优化设计后，随着橡胶掺量的增加，SF-橡胶/混凝土的抗剪强度、峰值变形及峰值前剪切韧性可基本保持不变，而峰值后韧性指标进一步增加，增幅可高达 96%。水胶比优化设计不仅弥补了橡胶颗粒对材料抗剪强度及峰值前剪切韧性的不利影响，而且使橡胶颗粒对材料峰值后剪切韧性的增强作用更明显，进一步凸显了 SF 及橡胶的正向协同作用。

(5) 基于双面剪切试验结果，针对不同橡胶掺量和 SF 掺量，提出了 SF-橡胶/混凝土的抗剪强度计算公式，计算结果与试验结果吻合较好。

参考文献:

[1] HUANG Baoshan, LI Guoqiang, PANG Suseng, et al. Investigation into waste tire rubber-filled concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2004, 16(3): 187-194.

[2] 龙广成, 马昆林, XIE Xu, 等. 橡胶集料对混凝土抗压强度的降低效应 [J]. *建筑材料学报*, 2013(5): 758-762.

LONG Guangcheng, MA Kunlin, XIE Xu, et al. Effect of rubber aggregate on reduction of compressive strength of concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2013(5): 758-762(in Chinese).

[3] RAFFOUL S, GARCIA R, PILAKOUTAS K, et al. Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: An experimental investigation [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 124: 391-404.

[4] NOAMAN A T, BAKAR B H A, AKIL H M. Experimental investigation on compression toughness of rubberized steel fibre concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 115: 163-170.

[5] LI Yue, LI Yaqiang. Experimental study on performance of rubber particle and steel fiber composite toughening concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 146: 267-275.

[6] FU Chuanqing, YE Hailong, WANG Kejin, et al. Evolution of mechanical properties of steel fiber-reinforced rubberized concrete (FR-RC) [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 160: 158-166.

[7] 朱江, 陈传锋, 朱志文, 等. 钢纤维改性再生橡胶高强混凝土性能试验研究 [J]. *混凝土*, 2009(5): 86-89.

ZHU Jiang, CHEN Chuanfeng, ZHU Zhiwen, et al. Experimental study on the properties of steel fiber modified high strength recycled rubber concrete [J]. *Concrete*, 2009(5): 86-89(in Chinese).

[8] SONNENBERG A M C, AL-MAHAIDI R, TAPLING. Behaviour of concrete under shear and normal stresses [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2003, 55(4): 367-372.

[9] 张琦, 过镇海. 砼抗剪强度和剪切变形的研究 [J]. *建筑结构学*

报, 1992, 13(05): 17-24.

ZHANG Qi, GUO Zhenhai. Study on shear strength and shear deformation of concrete[J]. Journal of Building Structures, 1992, 13(05): 17-24(in Chinese).

[10] 曲福进, 乔光, 赵国藩. 高性能纤维混凝土的抗剪性能研究[J]. 建筑结构, 2001(11): 36-37.

QU Fujin, QIAO Guang, ZHAO Guofan. Research on shear property of slurry infiltrated fiber concrete[J]. Building Structure, 2001(11): 36-37(in Chinese).

[11] 丁春林, 张国防, 张骅. 新型棒状聚丙烯纤维混凝土抗剪性能试验与比较[J]. 自然科学版, 2011, 39(6): 802-806.

DING Chunlin, ZHANG Guofang, ZHANG Hua. Experiment and comparison on shear behavior of new type rod-like polypropylene fiber reinforced concrete[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(6): 802-806(in Chinese).

[12] 张丽娟, 高丹盈, 王丽, 等. 钢纤维再生混凝土抗剪性能试验[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(2): 104-107.

ZHANG Lijuan, GAO Danying, WANG Li, et al. Experiments on shear behavior of steel fiber recycled concrete[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 34(2): 104-107(in Chinese).

[13] MIRSAYAH A A, BANTHIA N. Shear strength of steel fiber-reinforced concrete[J]. ACI Materials Journal, 2002, 99(5): 473-479.

[14] HIGASHIYAMA H, BANTHIA N. Correlating flexural and shear toughness of lightweight fiber-reinforced concrete[J]. ACI Materials Journal, 2008, 105(3): 251-257.

[15] KHALOO A R, NAKSEOK K. Influence of concrete and fiber characteristics on behavior of steel fiber reinforced concrete under direct shear[J]. ACI Materials Journal, 1997, 94(6): 592-601.

[16] 丁一宁, 刘思国. 钢纤维自密实混凝土弯曲韧性和剪切韧性试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(11): 55-63.

DING Yining, LIU Siguo. Experimental study on flexural toughness and shear toughness of steel fiber self-compacting concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(11): 55-63(in Chinese).

[17] 杨萌, 黄承逵, 刘毅. 钢纤维高强混凝土抗剪性能试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2005, 6(45): 842-846.

YANG Meng, HUANG Chengkui, LIU Yi. Experimental research on shear behavior of high-strength SFR[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 6(45): 842-846(in Chinese).

[18] 朱海堂, 高丹盈, 汤寄予. 钢纤维高强混凝土的强度指标及其相互关系[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3): 323-327.

ZHU Haitang, GAO Danying, TANG Jiyu. Strength indexes of steel fiber reinforced high strength concrete and their interrelations[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(3): 323-327(in Chinese).

[19] 邓明科, 刘华政, 马福栋, 等. 聚乙烯醇纤维改性高延性混凝土双面剪切试验及剪切韧性评价方法[J]. 复合材料学报, 2020, 37(2): 461-471.

DENG Mingke, LIU Huazheng, MA Fudong, et al. Double shear experiment of highly ductile concrete modified by polyvinyl alcohol and shear toughness evaluation method[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2020, 37(2): 461-471(in Chinese).

[20] 高丹盈, 朱海堂, 汤寄予. 纤维高强混凝土抗剪性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(6): 88-92.

GAO Danying, ZHU Haitang, TANG Jiyu. Experimental study on behavior of fiber reinforced high-strength concrete under shear[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(6): 88-92(in Chinese).

[21] 中国工程建设标准化协会. 纤维混凝土试验方法标准: CECS13: 2009[S]. 北京: 中国计划出版社. 2010: 54-59.

China Association for Engineering Construction Standardization. Standard test methods for steel fiber reinforced concrete: CECS13: 2009[S]. Beijing: China Planning Press. 2010: 54-59(in Chinese).