

文章编号:1673-9469(2022)03-0001-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2022.03.001

钢纤维再生混凝土劈拉和弯拉强度试验研究

蒋毓晋,安新正*,王李鑫,刘浩楠,张翠霞

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要: 为了研究钢纤维体积率和再生粗骨料取代率对破碎卵石混凝土劈拉和弯拉强度的影响规律,设计制作了钢纤维体积率为0%、1%、2%,再生粗骨料取代率为0%、10%、20%、30%、40%的15组试件,并开展了劈裂抗拉和四点弯曲试验。试验结果表明:钢纤维再生混凝土的劈拉和弯拉强度受钢纤维体积率影响较大,两者均随钢纤维体积率的增加而增大,再生粗骨料取代率对二者的影响较小,两者均随再生粗骨料取代率的增加呈现先增大后减小的趋势,且都在再生粗骨料取代率为30%时达到最大值。根据试验数据,提出了钢纤维再生混凝土劈拉强度和弯拉强度的函数关系式。

关键词: 钢纤维再生混凝土;钢纤维体积率;再生粗骨料取代率;劈拉强度;弯拉强度

中图分类号:TU528

文献标识码:A

Tentative Research on Split Tensile and Flexural Tensile Intensity of Steel Fiber Recycled Concrete

JIANG Yujin, AN Xinzheng*, WANG Lixin, LIU Haonan, ZHANG Cuixia

(School of Architectural Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: In order to study the influences of steel fiber capacity rate and recycled rough aggregate replacement rate on the split tensile and flexural tensile strength of destroyed pebble concrete, 15 sets of specimens with different steel fiber capacity rates of 0%, 1%, and 2% and different recycled rough aggregate replacement rates of 0%, 10%, 20%, 30%, and 40% were designed for splitting tensile tests and four-point bending tests. The test results show that the splitting and bending strengths of steel fiber recycled concrete are greatly affected by the capacity ratio of steel fiber, and both increase with the increase of steel fiber capacity rate, and are less affected by the replacement rate of recycled rough aggregate. In addition, both of splitting and bending strengths show a tendency of primary increasing and then decreasing with the increase of the replacement rate of recycled rough aggregate, and reach their maximum when the replacement rate of recycled coarse aggregate is 30%. Based on the experimental results, the practical relationship between the split tensile intensity and the flexural tensile intensity of steel fiber recycled concrete is suggested.

Key words: steel fiber recycled concrete; steel fiber volume rate; recycled coarse aggregate replacement rate; split tensile strength; flexural strength

再生混凝土通常是指将建筑废物中的废弃混凝土块,经人工或者机器破碎、清洗和筛分等工艺后,以适当的比例用以部分或者全部替代天然骨料配制而成的混凝土。这种新型混凝土的开发利

用不仅能够解决大量建筑废料管理困难的问题,而且还能减少对生态环境的破坏,具有显著的经济价值和社会效益^[1-4]。但是由于再生粗骨料的表面孔隙和棱角多,吸水率大等原因,导致再生混

收稿日期:2021-11-17

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2015204111);河北省科学技术研究与发展计划资助项目(15273609D)

作者简介:蒋毓晋(1994-),男,湖北十堰人,硕士研究生,主要从事再生混凝土材料及其结构的研究工作。

* 通讯作者:安新正(1963-),男,河南镇平人,博士,副教授,研究方向为结构耐久性理论与设计。

凝土强度低、脆性大、抗拉强度低和弯曲韧性差,以至于在很大程度上限制了其应用范围^[5-8]。钢纤维混凝土是将随机乱向分布的钢纤维掺入普通混凝土中形成的一种新型复合混凝土^[9],钢纤维的加入可以改善混凝土内部的缺陷,降低混凝土的脆性,显著提高其抗拉和抗弯性能^[10-11]。周佳媚^[12]等人为研究钢纤维混凝土的弯曲性能,通过对四种钢纤维掺量的切口梁进行三点弯曲试验,研究表明,钢纤维掺入后钢纤维混凝土切口梁的初裂荷载并无明显提升,但是开裂后的弯曲性能有着显著的提高。张阳^[13]等人为了研究钢纤维含量对高强混凝土力学性能的影响,对不同钢纤维含量的试件进行了立方体抗压、轴心受压、弹性模量和四点弯曲试验研究,研究表明,随着钢纤维含量的增加,混凝土的立方体抗压、轴心受压弹性模量呈递增趋势,试件具有良好的受压变形性能,且弯拉强度也随着钢纤维含量的增加而显著提高。Jang^[14]等人为了研究钢纤维含量和粗骨料粒度对钢纤维混凝土基本力学性能的影响规律,对不同钢纤维含量和粗骨料粒度的钢纤维混凝土试件进行了力学性能试验,研究表明,钢纤维含量和粗骨料粒度对抗压强度和弹性模量影响不大,但其弯曲和拉伸性能有显著提高。

目前国内外学者的研究大多针对钢纤维普通混凝土,对钢纤维再生混凝土(Steel Fiber Reinforced Concrete,简称 SFRC)的研究相对较少。故本文基于《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13—2009)^[15],对不同钢纤维体积率和再生粗骨料取代率的钢纤维再生混凝土试件开展劈裂抗拉和四点弯曲试验,研究钢纤维体积率和再生粗骨料取代率对其劈拉和弯拉强度的影响规律以及两者之间的相关关系,以期对钢纤维再生混凝土工程提供一定的参考。

1 试验概况

1.1 试验材料

(1)水泥(C):选用红旗牌P·O 42.5级普通硅酸盐水泥;(2)粗骨料:包含天然粗骨料(NCA)和再生粗骨料(RCA),其中天然粗骨料为具有良好级配的破碎卵石,如图1(a)所示,再生粗骨料选用学校结构试验室废弃混凝土梁经人工和机械破碎、筛分得到的级配良好的粗骨料,如图1(b)所示,两种粗骨料的粒径均为5~20 mm,其常用性能

指标如表1所示;(3)细骨料:选用细度模数为1.8的天然河砂(S),其含泥量为1.2%;(4)粉煤灰(FA):选用邯峰电厂生产的I级粉煤灰,掺量为10%;(5)减水剂(WR):减水率大于20%的ST-01聚羧酸高性能液体减水剂;(6)钢纤维(SF):铣削波纹型,长度32 mm,长径比为34,抗拉强度为600 MPa;(7)水(W):邯郸市政自来水。



图1 粗骨料

Fig. 1 Coarse aggregate

表1 粗骨料物理性能指标

Tab. 1 Physical performance index of coarse aggregate

粗骨料类型	粗骨料堆积密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粗骨料表观密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粗骨料吸水率/%	粗骨料压碎指标/%
破碎卵石粗骨料	1 579	2 697	1.80	8.7
再生粗骨料	1 306	2 581	4.85	18.7

1.2 试验配合比与试件制作

试验基于相关规程^[16-18],以钢纤维体积率为0%、1%、2%和再生粗骨料取代率为0%、10%、20%、30%、40%作为设计变量共设计15组配合比(表2)。基于《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13—2009)^[15],每组配合比制作6个试件,其中3个100 mm×100 mm×100 mm的立方体试块和3个100 mm×100 mm×400 mm的小梁试件,放入养护室中标准养护28 d。

2 试验方法

2.1 劈拉强度试验

依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB 50081—2002)^[19]对标准养护28 d的钢纤维再生混凝土立方体试块开展劈裂抗拉强度试验,试验加载装置采用型号为YES-2000的数显式压力试验机,加载速率控制在0.05 MPa/s左右,其试验示意图,如图2所示。钢纤维再生混凝土的劈裂抗拉强度值按公式(1)计算,每组试件的劈拉强度值为三个试件的算术平均值。

表 2 再生混凝土配合比
Tab. 2 Recycled concrete mix ratio

序号	试件组编号	单方材料用量/(kg·m ⁻³)								
		C	W	NCA	RCA	S	WR	FA	SF	W _{附加}
1	SF-0-RC-0	328	175	980	0	801	7.3	36.5	0.0	0
2	SF-0-RC-10	328	175	882	98	801	7.3	36.5	0.0	4
3	SF-0-RC-20	328	175	784	196	801	7.3	36.5	0.0	8
4	SF-0-RC-30	328	175	686	294	801	7.3	36.5	0.0	12
5	SF-0-RC-40	328	175	588	392	801	7.3	36.5	0.0	16
6	SF-1-RC-0	328	175	980	0	801	7.3	36.5	78.5	0
7	SF-1-RC-10	328	175	882	98	801	7.3	36.5	78.5	4
8	SF-1-RC-20	328	175	784	196	801	7.3	36.5	78.5	8
9	SF-1-RC-30	328	175	686	294	801	7.3	36.5	78.5	12
10	SF-1-RC-40	328	175	588	392	801	7.3	36.5	78.5	16
11	SF-2-RC-0	328	175	980	0	801	7.3	36.5	157.0	0
12	SF-2-RC-10	328	175	882	98	801	7.3	36.5	157.0	4
13	SF-2-RC-20	328	175	784	196	801	7.3	36.5	157.0	8
14	SF-2-RC-30	328	175	686	294	801	7.3	36.5	157.0	12
15	SF-2-RC-40	328	175	588	392	801	7.3	36.5	157.0	16

注: SF-*i*-RC-*j* 代表钢纤维体积率为 *i*%, 再生粗骨料取代率为 *j*%。

$$f_{ts} = 0.85 \frac{2F}{\pi A} \quad (1)$$

式中: *F*—试件竖向破坏荷载; *A*—试件劈裂面截面面积。

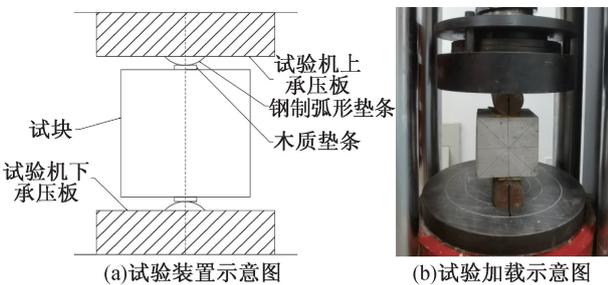


图 2 试验示意图

Fig. 2 Experimental schematic graph

2.2 抗弯强度试验

依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(CECS 13—2009)^[15] 进行抗弯强度试验, 本试验加载设备为微机控制 WAW-1000 型电液伺服试验机, 采用四点弯曲加载和位移控制的加载方式, 早期加载速率为 0.15 mm/s, 试件开裂后加载速率为 0.1 mm/s。试验加载示意图和现场图如图 3 所示。钢纤维再生混凝土试件梁的弯拉强度值按公式(2)计算, 每组试件的弯拉强度值为三个试件的算术平均值。

$$f_{ts} = 0.85 \frac{F_{pl} L}{bh^2} \quad (2)$$

式中: *f_{ts}*—梁试件的弯拉强度; *F_{pl}*—试件的峰值荷载; *L*—支座之间跨度; *b*—梁试件截面宽度; *h*—梁试件截面高度。

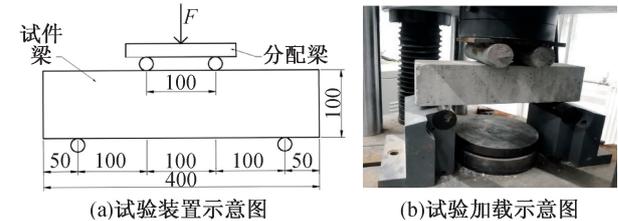


图 3 试验示意图(单位: mm)

Fig. 3 Experimental schematic graph (unit: mm)

3 试验结果与分析

3.1 劈拉强度试验结果及分析

3.1.1 钢纤维体积率对 SFRC 劈拉强度的影响

图 4 给出了 SFRC 的劈拉强度 *f_{ts}* 随钢纤维体积率 *V* 的变化关系柱状图。由图 4 可以看出, 当 SFRC 的再生粗骨料取代率 *r* 一定时, SFRC 的 *f_{ts}* 随 *V* 的增大而增大。当 *r* 分别为 0%, 10%, 20%, 30% 和 40% 时, *V* = 1% 和 2% 的 SFRC 试件相比于 *V* = 0% 时的 SRCF 试件, *f_{ts}* 分别提升了 46.2% 和 58.3%, 37.1% 和 53.3%, 30.0% 和 48.2%, 25.1% 和 39.8%, 39.9% 和 47.1%, 由此我们可以看出, 含钢纤维的破碎卵石再生混凝土试件 (*V* > 0%) 相比不含钢纤维的 (*V* = 0%) 破碎卵石再生混凝土试件, 劈裂强度明显提高, 这是由于在 SRCF 劈裂受

拉过程中的裂缝扩展阶段,随机乱向掺入的钢纤维中有部分钢纤维横跨于裂缝两端,这起到了很好的裂缝搭接作用,对裂缝有拉结作用。在裂缝的扩展过程中,这些钢纤维改善了 SFRC 的裂缝扩展的形态,阻碍了裂缝的发展。从而使 SFRC 的劈拉强度 f_{ts} 显著提高,并且钢纤维体积率 V 越大,劈拉强度 f_{ts} 增加的越显著。

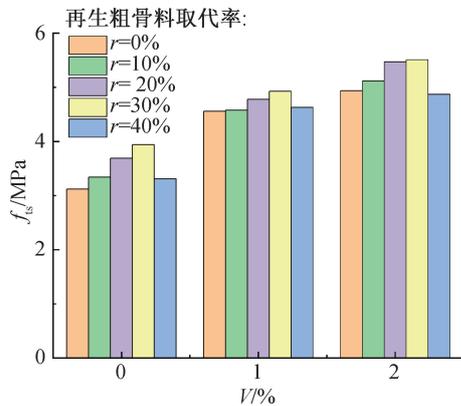


图4 劈拉强度 f_{ts} 随钢纤维体积率 V 的变化关系柱状图

Fig. 4 Histogram of splitting tensile strength f_{ts} with steel fiber volume ratio V

3.1.2 再生粗骨料取代率对 SFRC 劈拉强度的影响

图5给出了 SFRC 的劈拉强度 f_{ts} 随再生粗骨料取代率 r 的变化关系图。由图5可以看出,当 SFRC 的体积率 V 一定时, SFRC 的劈拉强度 f_{ts} 随再生粗骨料取代率 r 的增大,表现出先增大后减小的变化情况,在再生粗骨料取代率 $r=30\%$ 时, f_{ts} 达到最大值。相比于 $r=0\%$ 时的 SFRC 试件, $r=10\%$, 20% , 30% , 40% 时 SRCF 试件劈拉强度 f_{ts} 分别增长了 7.0% , 18.2% , 26.3% , 6.1% 。在 $r=30\%$ 时, SFRC 的 f_{ts} 增幅最大,劈裂抗拉强度最高。原因再于再生骨料的表面较为粗糙,且附着较多的老旧砂浆块,适量的再生粗骨料掺入可以增强骨料与水泥砂浆的界面粘结强度,增大了与混凝土基体之间的机械咬合力,从而使 SFRC 的劈裂抗拉强度有所提升。但由于再生骨料的强度较低,掺入过多又会劣化界面粘结强度。所以在 $r>30\%$ 时, SFRC 的劈拉强度 f_{ts} 变化趋势开始下降。

3.2 弯拉强度试验结果及分析

3.2.1 钢纤维体积率对 SFRC 弯拉强度的影响

图6给出了 SFRC 的弯拉强度 f_{ts} 随钢纤维体积率 V 的变化关系图。由图6可知,当 SFRC 的再生粗骨料取代率 r 一定时, SFRC 试件的弯拉强度 f_{ts} 随钢纤维体积率 V 的增大而增大。当 r 分别为

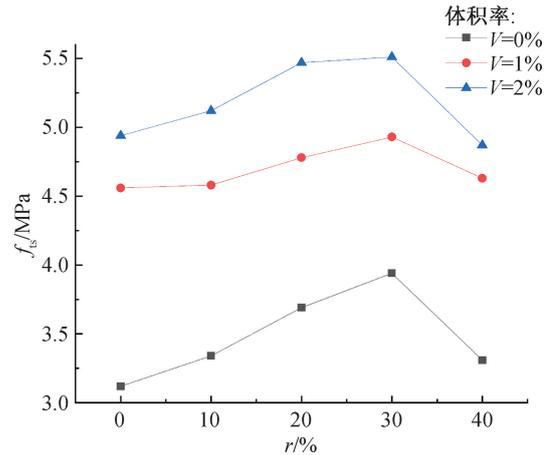


图5 劈拉强度 f_{ts} 随再生粗骨料取代率 r 的变化关系图

Fig. 5 Relationship between splitting tensile strength f_{ts} and replacement rate r of recycled coarse aggregate

0% , 10% , 20% , 30% 和 40% 时, 钢纤维体积率 $V=1\%$ 的 SFRC 试件相比于 $V=0\%$ 的 SRCF 试件, 其弯拉强度 f_{ts} 分别提高了 42.9% 、 39.5% 、 40.5% 、 51.1% 和 44.4% ; 钢纤维体积率 $V=2\%$ 的 SFRC 试件相比于 $V=0\%$ 的 SFRC 试件, 其弯拉强度 f_{ts} 分别提高了 97.1% 、 94.7% 、 97.6% 、 95.5% 和 94.4% 。由此可以看出, 含钢纤维的 SFRC 试件相比不含钢纤维的 SFRC 试件, 其弯拉强度 f_{ts} 显著提高, 且随着 V 的增加而增加。这是由于钢纤维自身抗拉强度高, 当 SFRC 试件中掺入随机乱向分布的钢纤维后, 在试件受弯过程中钢纤维随机乱向横跨分布于裂缝两边, 对裂缝两边的基体起到了很好的连结和锚固作用, 从而抑制了裂缝的扩展, 所以, SFRC 试件的弯拉强度 f_{ts} 显著提高, 且随着钢纤维体积率 V 的增大, 钢纤维分布于裂缝两边的数量越多, 在裂缝上形成了片状钢纤维网, 进一步增强

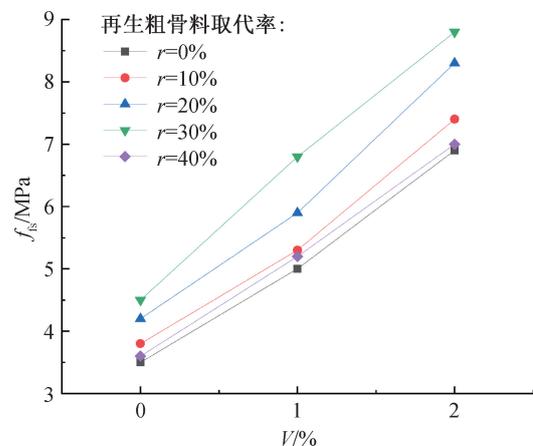


图6 弯拉强度 f_{ts} 随钢纤维体积率 V 的变化关系图

Fig. 6 Relationship between bending tensile strength f_{ts} and steel fiber volume ratio V

了与基体之间的粘结锚固力,增强了它们的整体性能,从而抑制裂缝发展的作用越大,所以 SFRC 试件的延性有了很大的提高,随之其弯拉强度 f_{ts} 也显著提高。

3.2.2 再生粗骨料取代率对 SFRC 弯拉强度的影响

图 7 给出了 SFRC 的弯拉强度 f_{ts} 随再生粗骨料取代率 r 的变化关系图。由图 7 可以看出,当 SFRC 的钢纤维体积率 V 一定时, SFRC 的弯拉强度 f_{ts} 随再生粗骨料取代率 r 的增大表现为先增大后减小的趋势,在 r 为 30% 时达到最大值。当钢纤维体积率 $V=0\%$ 时(即不掺钢纤维时), SFRC 的弯拉强度 f_{ts} 相比于 $V=1\%$ 和 $V=2\%$ 时较小,并且再生粗骨料取代率 $r=10\%$ 、 20% 、 30% 和 40% 时的 SFRC 试件与 $r=0\%$ 的 SFRC 试件,其弯拉强度 f_{ts} 分别提高了 8.6%、20%、28.6% 和 2.85%。当钢纤维体积率 $V=1\%$ 时,再生粗骨料取代率 $r=10\%$ 、 20% 、 30% 和 40% 相比较 $r=0\%$ 时的 SFRC 试件,其弯拉强度 f_{ts} 分别提高了 6%、18%、36% 和 4%;当钢纤维体积率 $V=2\%$ 时,再生粗骨料取代率 $r=10\%$ 、 20% 、 30% 和 40% 相比较 $r=0\%$ 时的 SFRC 试件,其弯拉强度 f_{ts} 分别提高了 7.2%、20.3%、27.5% 和 1.5%。由此可以看出,当再生粗骨料取代率 $r=30\%$ 时, SFRC 试件的弯拉强度 f_{ts} 增幅最大且其值达到最大值。当钢纤维体积率 $V=0\%$ 和再生粗骨料取代率 $r<30\%$ 时,一方面由于再生粗骨料表面粗糙且棱角多,其加入可以增强水泥砂浆和再生粗骨料的界面粘结性能^[20-21];另一方面再生粗骨料的吸水率比天然粗骨料大,从而在混凝土搅拌时吸走了部分拌和水,导致实际水灰比变小,所以使 SFRC 试件的弯拉强度 f_{ts} 提高。但是当再生粗骨料取代率 $r>30\%$ 时, SFRC 试件的弯拉强度 f_{ts} 下降,原因是再生粗骨料本身的强度较低,掺入过多会使试件的强度变低而脆性增大,同时又会影响到浆体与骨料界面的粘结强度,所以其弯拉强度 f_{ts} 下降。当钢纤维体积率 $V=1\%$ 和 2% 时, SFRC 试件的弯拉强度 f_{ts} 的变化规律跟 $V=0\%$ 时相同,也是随再生粗骨料取代率 r 的增大而先增大后减小,并都在 $r=30\%$ 时 SFRC 试件的弯拉强度 f_{ts} 达到最大值,同时随着钢纤维体积率的增大而增大。原因是,再生粗骨料表面空隙多,随着钢纤维的掺加,使得再生粗骨料与钢纤维之间的粘结锚固作用增强,摩擦阻力增大,增强了再生粗骨料、钢纤维和浆体之间的整体性,从而有效提升了 SFRC 试件的抗弯强度,但是再生粗骨料掺量

过多以及钢纤维的加入会增大试件内部的空间,减弱钢纤维和浆体与骨料之间的连接作用,降低了试件的整体性,对 SFRC 试件的弯拉强度 f_{ts} 产生不利影响。由此可以看出,再生粗骨料取代率为 30% 时为最佳掺量。

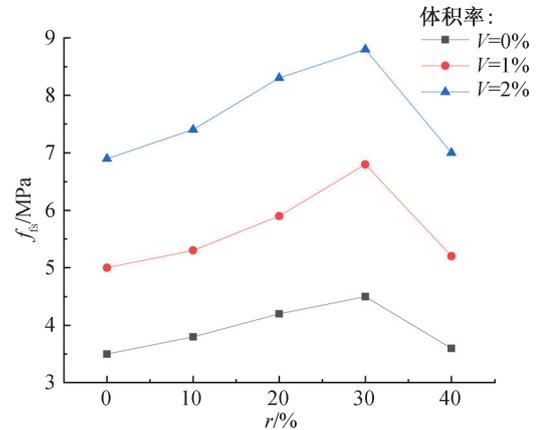


图 7 弯拉强度 f_{ts} 随再生粗骨料取代率 r 的变化关系图

Fig. 7 Relationship between flexural tensile strength f_{ts} and replacement rate r of recycled coarse aggregate

3.3 SFRC 劈拉强度和弯拉强度的关系

图 8 给出了 SFRC 的弯拉强度 f_{ts} 和劈拉强度 f_{ts} 的关系图。

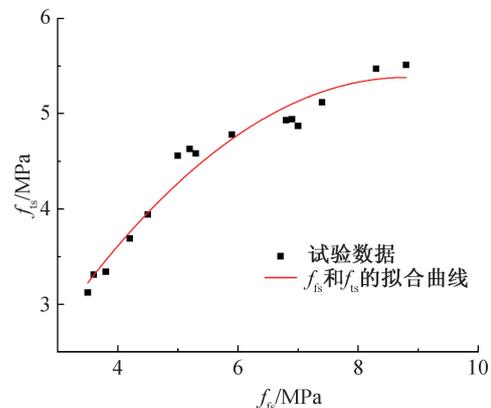


图 8 弯拉强度 f_{ts} 与劈拉强度 f_{ts} 的关系图

Fig. 8 Relationship between bending tensile strength f_{ts} and splitting tensile strength f_{ts}

根据试验数据,对 SFRC 试件的 f_{ts} 与 f_{ts} 进行拟合回归,得出两者的函数计算关系式为(拟合优度 $R^2=0.96$):

$$f_{ts} = -0.077f_{ts}^2 + 1.349f_{ts} - 0.561$$

4 结论

1) 当再生粗骨料取代率一定时,随着钢纤维

体积率的提高,钢纤维再生混凝土的劈拉强度和弯拉强度也随之提高,且受其影响显著。

2)当钢纤维体积率一定时,钢纤维再生混凝土的劈拉强度和弯拉强度则随再生粗骨料取代率的增加表现为先增大而后降低,且在再生粗骨料取代率为30%时增幅最大并达到最大值。

3)基于劈拉和弯拉强度试验数据,给出了钢纤维再生混凝土的弯拉强度和劈拉强度的函数计算关系式,且计算关系式与实际试验值吻合度较好,可为钢纤维再生混凝土的弯拉强度和劈拉强度的计算提供参考。

参考文献:

- [1]周宏敏,柴俊.再生混凝土技术及其研究现状[J].混凝土,2008(12):75-77.
- [2]侯景鹏,史巍,宋玉普.再生混凝土技术的研究开发与应用推广[J].建筑技术,2002(1):15-17.
- [3]刘阳.再生混凝土梁受力性能的分析与研究[D].淮南:安徽理工大学,2015.
- [4]MAIER P L, DURHAM S A. Beneficial Use of Recycled Materials in Concrete Mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2012, 29: 428-437.
- [5]ETXEBERRIA M, VÁZQUEZ E, MARÍ A, et al. Influence of Amount of Recycled Coarse Aggregates and Production Process on Properties of Recycled Aggregate Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(5): 735-742.
- [6]李琳.纤维再生细骨料混凝土基本力学性能研究[D].郑州:郑州大学,2019.
- [7]刘晓龙,谭波,刘纪艳,等.强化再生粗骨料物理性能试验研究[J].山东农业大学学报:自然科学版,2018, 49(6):933-936+1058.
- [8]韩慧优,裴长春.不同掺率比混杂纤维再生砂浆力学性能试验研究[J].四川建材,2019,45(9):21-22.
- [9]鲁先福.微钢纤维与骨料粒径匹配效应的研究[D].淮南:安徽理工大学,2017.
- [10]张丽娟,高丹盈,闫兆强,等.钢纤维再生混凝土配合比正交试验研究[J].河北工业大学学报,2014,43(6):81-84.
- [11]高丹盈,刘健秀.钢纤维混凝土基本理论[M].北京:科学技术文献出版社,1994.
- [12]周佳媚,张迁,蒙国往,等.钢纤维混凝土力学性能和弯曲韧性研究[J].铁道标准设计,2017,61(8):84-90.
- [13]张阳,侯昌贵.不同钢纤维含量对超高性能混凝土弯曲性能的影响[J/OL].公路工程:1-11[2022-06-16].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1481.U.20210429.1739.018.html>.
- [14]JANG S J, YUN H D. Combined Effects of Steel Fiber and Coarse Aggregate Size on the Compressive and Flexural Toughness of High-strength Concrete [J]. Composite Structures, 2018, 185: 203-211.
- [15]CECS 13—2009,纤维混凝土试验方法标准[S].
- [16]JGJ 55—2011,普通混凝土配合比设计规程[S].
- [17]JGJ/T 240—2011,再生骨料应用技术规程[S].
- [18]JGJ/T 221—2010,纤维混凝土应用技术规程[S].
- [19]GB 50081—2002,普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
- [20]何霞,朱从香,王兵.再生混凝土路面砖抗碳化性能试验研究[J].建筑技术,2017,48(5):523-527.
- [21]林水泳.再生高强混凝土静力与抗冲击力学性能研究[D].福州:福建工程学院,2018.

(责任编辑 王利君)