

文章编号:1007-9629(2023)01-0096-07

## 定向分布钢纤维 RPC 的剪切性能

李坤梁<sup>1</sup>, 杨克家<sup>1,\*</sup>, 李坤坤<sup>2</sup>

(1.台州学院 建筑工程学院,浙江台州 318000;2.温州大学 建筑工程学院,浙江温州 325035)

**摘要:**为研究准静态荷载下纤维分布对活性粉末混凝土(RPC)构件受剪、受拉力学性能的影响,利用电磁场定向装置制备了定向分布钢纤维活性粉末混凝土(ASFRPC)试件,并对其进行了双面直剪和劈裂抗拉试验,结合图像分析法研究了纤维方向、纤维长径比对钢纤维活性粉末混凝土(SFRPC)试件受剪、受拉力学性能的影响.结果表明:相同条件下 ASFRPC 试件的抗剪强度、峰值剪切变形和剪切韧性相比于 SFRPC 试件均有了显著的提高,表现出更高的抗剪、抗拉性能.

**关键词:**定向分布钢纤维;活性粉末混凝土;抗剪强度;抗剪韧性;劈裂强度

中图分类号:TU528.58

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.01.014

## Shear Performance of Aligned Steel Fiber Reinforced RPC

LI Kunliang<sup>1</sup>, YANG Kejia<sup>1,\*</sup>, LI Kunkun<sup>2</sup>

(1. School of Architecture Engineering, Taizhou University, Taizhou 318000, China;

2. School of Architecture Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

**Abstract:** The effect of fiber distribution on shear and tensile properties of reactive powder concrete(RPC) components under quasi-static load was studied. The aligned steel fiber reinforced reactive powder concrete(ASFRPC) specimen was prepared by electromagnetic field directional device. The effects of fiber direction and fiber length-diameter ratio on the shear properties and splitting tensile properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete(SFRPC) specimens with constant random direction distribution were studied by using double-sided direct shear and splitting tensile tests. The results show that under the same conditions, the shear strength, peak shear deformation and shear toughness of ASFRPC specimens are significantly improved compared with those of randomly distributed specimens. ASFRPC specimens show better shear and tensile properties.

**Key words:** aligned steel fiber; reactive powder concrete; shear strength; shear toughness; splitting tensile strength

活性粉末混凝土(RPC)具有高强度、高韧性和高耐久性等优点,在道路桥梁、海洋工程、军事及特种结构中得到了广泛的应用.纤维的掺入可以有效增强 RPC 的抗拉性能、韧性、弯曲性能和抗裂性能<sup>[1-6]</sup>.但是,普通钢纤维活性粉末混凝土(SFRPC)中的钢纤维为乱向分布,纤维方向系数(纤维在给定方向投影长度总和与实际长度总和之比)较小,纤维增强效率低.Dupont 等<sup>[7]</sup>和 Wuest 等<sup>[8]</sup>基于立体测量学

原理,计算出三维随机分布纤维的方向系数仅为 0.4~0.5.Yoo 等<sup>[9-13]</sup>和 Kang 等<sup>[14]</sup>采用图像分析技术定量分析了水平分层浇筑和垂直分块浇筑 SFRPC 梁的纤维分布特征,发现水平分层浇筑能将纤维方向系数提高到 0.6~0.7,SFRPC 的弯曲抗拉强度、弯曲韧性及冲击韧性均得到显著提升.陈宁<sup>[15]</sup>最早从理论上论证了应用外加磁场方式制备定向钢纤维混凝土构件的构想.慕儒等<sup>[16-20]</sup>利用均匀磁场将混合物

收稿日期:2021-10-15; 修订日期:2021-12-05

基金项目:浙江省基础公益技术研究计划项目(LGF21E080003)

第一作者:李坤梁(1996—),男,四川德阳人,台州学院硕士生. E-mail:1650103190@qq.com

通讯作者:杨克家(1980—),男,山西运城人,台州学院教授,硕士生导师,博士. E-mail:yangkejia99@163.com

流体中的钢纤维按照特定方向进行排列,制备出纤维方向系数高于0.9的定向分布钢纤维普通混凝土试件,其剪切强度和韧性比乱向分布构件分别提高了40%、50%,弯曲抗拉强度增幅达100%以上,在承受单向荷载的结构构件以及线槽、下水道盖板等构件中具有广泛的应用前景。

本文利用电磁场定向装置制备定向分布钢纤维活性粉末混凝土(ASFRPC)试件,研究了纤维方向、纤维长径比对钢纤维RPC试件剪切性能和劈裂抗拉性能的影响。

## 1 试件制作和试验方法

### 1.1 试验材料

试验选用P·O 42.5R普通硅酸盐水泥和硅灰作为胶凝材料,以细度模数为2.32的天然河砂作为骨料,添加剂采用密度为1.06 g/cm<sup>3</sup>的粉体聚羧酸高效减水剂。表1为RPC的配合比,水灰比(质量比) $m_w/m_c=0.26$ 。钢纤维采用镀铜微丝钢纤维,其性能见表2。

表1 RPC的配合比  
Table 1 Mix proportion of RPC

Water	Cement	Sand	Silica fume	Water reducing agent
244.4	710.0	1 266.0	230.0	3.6

### 1.2 试件制作

图1为ASFRPC试件的制作方法原理示意图。首先,将装有拌和好SFRPC的塑料试模放入螺

线圈中,两者共同放置在振动台上;然后,打开电流转换器,通电螺线圈内产生与构件轴向平行的恒定电磁场,使钢纤维磁化;接着,开启振动台,钢纤维在磁场力( $f_m$ )的作用下于基体中发生旋转,最终与磁场方向基本一致;最后,依次关闭振动台和电磁场设备即可完成ASFRPC试件的制备。试件破坏后,对断面的钢纤维数量和方向进行分块统计,发现ASFRPC试件的方向系数均在0.91以上。

考虑纤维分布和纤维长度对SFRPC剪切与劈裂抗拉力学性能的影响,制备了2种体积分数( $V_f$ ,1%、2%),3种纤维长度( $L_f$ ,13、16、20 mm)、尺寸为100 mm×100 mm×400 mm和100 mm×100 mm×100 mm的SFRPC与ASFRPC试件以及同尺寸的素RPC试件。剪切试件每组4个,劈裂抗拉试件每组3个。根据纤维体积分数、纤维长度及其分布特征对试件进行编号,D、L分别表示定向、乱向分布钢纤维,数字表示纤维长度和体积分数。例如L13-2%表示纤维长度为13 mm,体积分数为2%的乱向分布钢纤维试件。

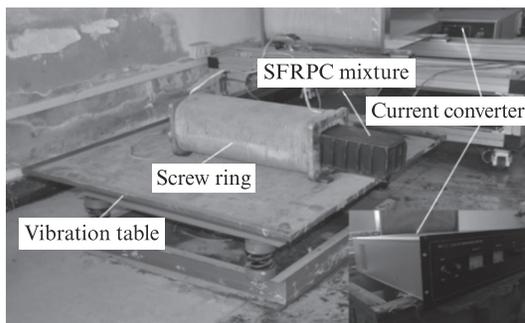
### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 剪切试验

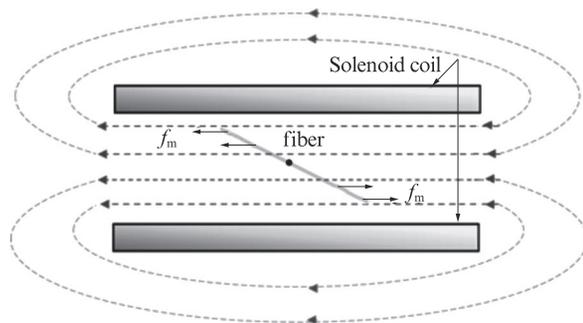
参考CECS13:2009《纤维混凝土试验方法标准》开展剪切试验。为控制试件剪切破坏截面的位置,在试件上下加载面对应的加载点处用切割机分别切割深2 mm、宽2 mm的细缝。采用500 t电液伺服压力机通过位移控制进行加载,加载速度为0.1 mm/min。双面剪切试验装置如图2所示。其中: $F$ 为荷载; $H$ 为内部宽度, $a$ 为预切割剪切缝的宽度。剪切强度( $\tau$ )计算公式如下:

表2 钢纤维的性能  
Table 2 Properties of steel fiber

No.	Diameter/mm	Length/mm	Aspect ratio	Density/(g·cm <sup>-3</sup> )	Number of 1 kg steel fiber	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa
S13	0.2	13	65	7.8	313 852	2 900	200
S16	0.2	16	80	7.8	255 498	2 900	200
S20	0.2	20	100	7.8	204 886	2 900	200



(a) Prepare actual picture of the device



(b) Diagram of magnetic field and fiber force

图1 ASFRPC试件的制作方法原理示意图

Fig. 1 Manufacturing method and principle diagram of ASFRPC specimen

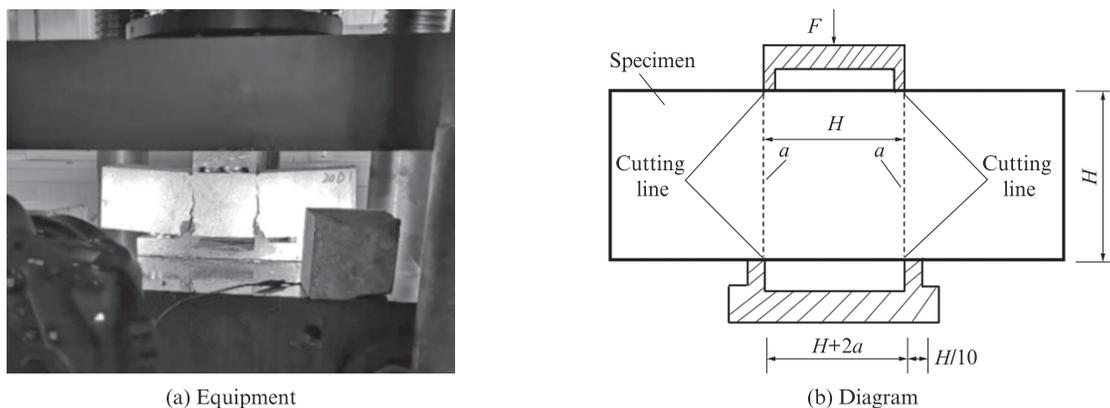


图2 双面剪切试验装置图

Fig. 2 Schematic of the double shear test setup

$$\tau = \bar{F}_{\max} / 2bh \quad (1)$$

式中:  $\bar{F}_{\max}$  为平均峰值剪切荷载, N;  $b$ 、 $h$  分别为剪切面的宽度和高度, mm.

采用数字图像相关法(DIC)来确定试件的全场剪切应变和剪切位移. 加载前在观察面上刷上白漆作为底色, 以黑色散斑图案作为变形信息载体, 通过图像

处理软件获取试件加载过程中的全场应变、位移信息.

### 1.3.2 劈裂抗拉试验

根据 CECS13:2009 标准, 钢纤维 RPC 的劈裂抗拉强度试验与普通混凝土相同. 加载装置为 500 t 电液伺服压力机, 加载速率为 0.1 mm/min, 具体试验装置如图 3 所示.

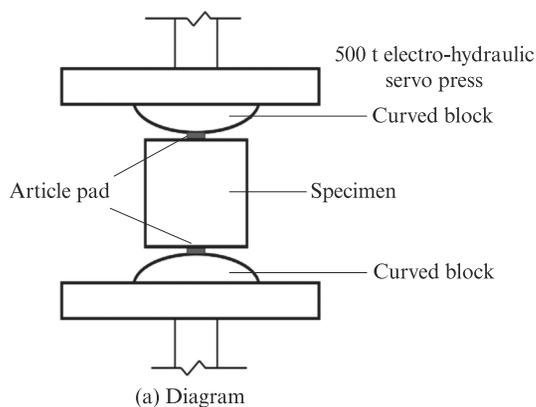


图3 试件劈裂加载示意图

Fig. 3 Splitting loading sketon diagram of specimen

根据劈裂抗拉强度试验得到的最大荷载值 ( $F$ ), 可以计算出试件的劈裂抗拉强度 ( $f_t$ ), 同组 3 个试件的强度平均值乘以尺寸折算系数 0.85 作为该组试件的劈裂抗拉强度. 劈裂抗拉强度的计算公式如下:

$$f_t = 2F / \pi A = 0.637F / A \quad (2)$$

式中:  $A$  为试件的劈裂面积,  $\text{mm}^2$ .

## 2 结果与分析

### 2.1 试验结果

#### 2.1.1 破坏模式

图 4 为试件 L20-1% 的剪切失效模式和裂纹形态. 图 5 为素 RPC 试件的剪切失效模式和裂纹形态, 其呈现“一裂即坏”的脆性破坏模式.

#### 2.1.2 初裂点确定

参照 CECS13:1989《钢纤维混凝土试验规范》, 对剪切荷载-挠度曲线的线性段做切线, 找出曲线与线性部分发生偏离的点即为初裂点. 以试件 D13-2% 为例, 确定初裂点如图 6 所示. 根据该方法得出各组试件的初裂荷载 ( $F_{\text{LOP}}$ ), 将其代入式 (3), 得到的剪切应力定义为初裂强度 ( $f_{\text{LOP}}$ ).

$$f_{\text{LOP}} = F_{\text{LOP}} / 2bh \quad (3)$$

#### 2.1.3 数据处理

参照 CECS13:1989 规范, 抗剪强度 ( $f_v$ ) 按照式 (4) 计算.

$$f_v = F_{\max} / 2bh \quad (4)$$

式中:  $F_{\max}$  为试件的峰值剪切荷载, N.

表 3 为所有试件抗剪试验的结果. 其中:  $\Delta_p$  为峰值变形,  $f_{\text{cu}}$  为立方体抗压强度.

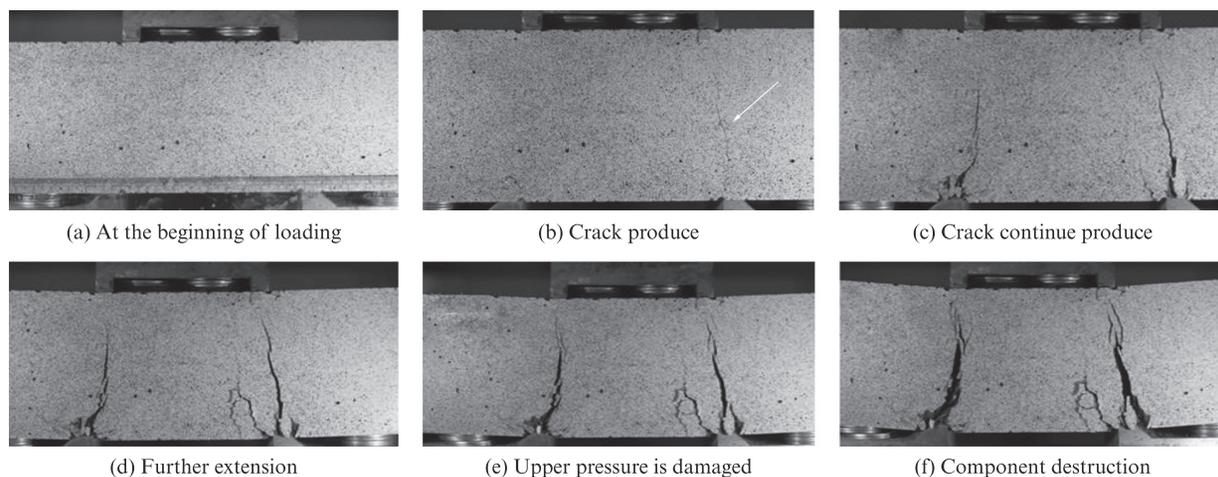


图4 试件L20-1%的剪切失效模式和裂纹形态

Fig. 4 Failure mode and crack morphology of specimen L20-1%

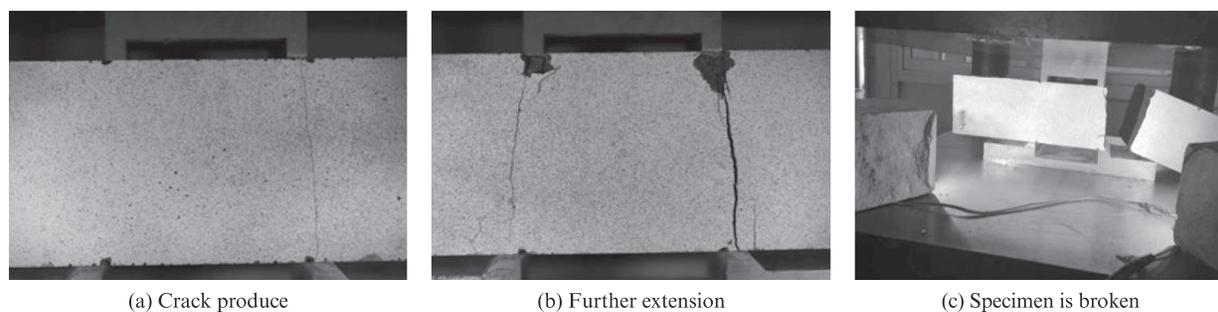


图5 素RPC试件的剪切失效模式和裂纹形态

Fig. 5 Shear failure mode and crack morphology of the pure RPC specimen

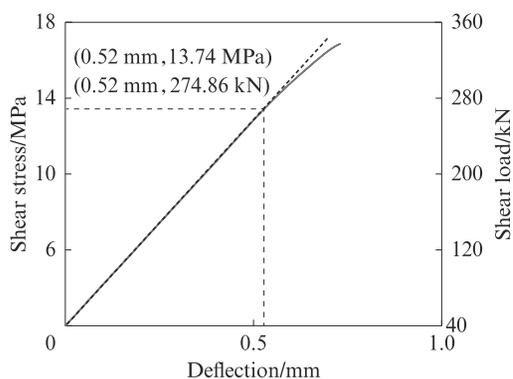


图6 试件D13-2%初裂点的确定

Fig. 6 Determination of first cracking point of specimen D13-2%

## 2.2 数据分析

### 2.2.1 剪切荷载-变形曲线

钢纤维RPC试件的剪切荷载-变形( $P-\delta$ )曲线如图7所示.由图7可见:在未开裂前,各试件的 $P-\delta$ 曲线基本呈线性增长,素RPC试件的 $P-\delta$ 曲线在峰值荷载处陡降,剪切变形小,破坏时脆性特征显著;开裂后,ASFRPC试件和SFRPC试件的 $P-\delta$ 曲线随着剪切变形的增大逐渐呈现非线性特征;在同等条件下,ASFRPC试件的承载能力和峰值剪

表3 所有试件抗剪试验的结果

Table 3 Shear test results of all specimens

Specimen No.	$f_{cu}/\text{MPa}$	$f_{LOP}/\text{MPa}$	$f_v/\text{MPa}$	$F_{max}/\text{kN}$	$\Delta_p/\text{mm}$
L13-1%	87.33	5.67	10.02	200.4	0.49
L13-2%	95.04	11.26	15.13	302.6	0.82
L16-1%	93.31	9.08	12.07	241.4	0.53
L16-2%	103.52	14.66	17.94	358.8	0.80
L20-1%	93.63	12.25	15.04	300.8	0.75
L20-2%	98.22	18.37	22.21	444.2	0.98
D13-1%	87.33	9.57	12.73	254.6	0.54
D13-2%	95.04	13.74	17.67	353.4	0.83
D16-1%	93.31	11.39	15.94	318.8	0.84
D16-2%	103.52	16.89	22.11	442.2	1.20
D20-1%	93.63	15.97	21.12	422.4	0.95
D20-2%	98.22	22.92	27.46	549.2	1.25
L0-0%	79.91	5.14	6.94	138.8	0.31

切变形均高于SFRPC试件,相关性能随着纤维长径比的增加呈递增趋势;ASFRPC试件和SFRPC试件开裂后,随着剪切裂缝的变宽,基体内部纤维滑动和材料损伤累积加剧,承载力持续下降.由于钢纤维在拔出过程中的吸能作用,试件呈延性破坏.

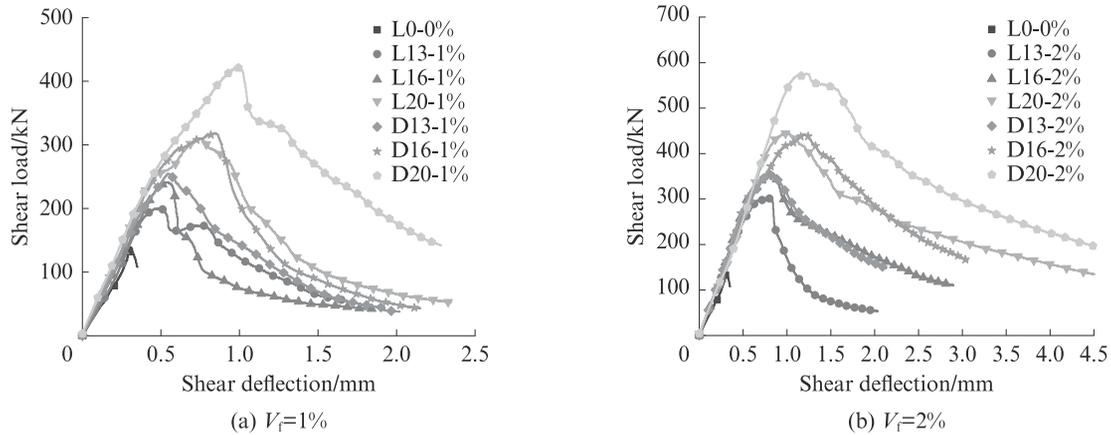


图7 钢纤维RPC试件的荷载-剪切变形曲线  
Fig. 7 Shear load-deformation curves of SFRPC specimens

### 2.2.2 剪切性能的影响因素

由表3可知:

(1)当纤维体积分数为1%,纤维长度分别为13、16、20 mm时,相比于SFRPC试件,ASFRPC试件的抗剪强度分别提高了27.05%、32.06%、36.43%,峰值变形分别提高了8.00%、58.00%、30.00%;当纤维体积分数为2%,纤维长度为13、16、20 mm时,相比于SFRPC试件,ASFRPC试件的抗剪强度分别提高了16.79%、23.24%、29.67%,峰值剪切变形分别提高了1.20%、50.00%、24.49%;相比于素RPC试件,掺入钢纤维可使抗剪强度提高0.4~3.0倍,峰值变形提高0.6~3.0倍。

(2)当钢纤维掺量一定时,通过提高纤维长径比,ASFRPC试件的抗剪强度和峰值变形均显著提高.由表3可知:当纤维掺量为1%时,纤维长度为16、20 mm ASFRPC试件的抗剪强度较纤维长度为13 mm的ASFRPC试件分别提高了25.22%和65.90%,峰值变形分别提高了55.56%、81.48%;当纤维掺量为2%时,与纤维长度为13 mm的ASFRPC试件相比,纤维长度为16、20 mm ASFRPC试件的抗剪强度分别提高了25.12%和63.00%,峰值变形分别提高了25.00%和56.25%。

### 2.2.3 剪切韧性

表4为RPC试件剪切荷载-变形曲线峰值前后的韧性指标.其中: $\gamma_p$ 为试件的峰值剪应变, $f_{eq}$ 为等效初始剪切强度, $T_p$ 为初始剪切能量密度.由表4可见:

(1)相同钢纤维掺量的ASFRPC试件表现出更高的剪切韧性,纤维方向显著影响试件的剪切性能。

(2)对于纤维长度13 mm SFRPC试件来说,纤维分布和纤维掺量对 $\gamma_p$ 、 $f_{eq}$ 、 $T_p$ 的影响较为显著。

(3)当纤维长度由13 mm增加至16、20 mm时,1%

表4 RPC试件剪切荷载-变形曲线峰值前后的韧性指标  
Table 4 Toughness index evaluation pre-peak load and post-peak load of shear load-deformation curves of RPC specimens

Specimen No.	$f_{eq}/\text{MPa}$	$\gamma_p/\%$	$T_p/(\text{J}\cdot\text{m}^{-3})$
L0-0%	3.13	0.310	0.97
L13-1%	5.56	0.490	2.73
L13-2%	9.47	0.800	7.06
L16-1%	6.67	0.515	3.54
L16-2%	10.60	0.800	8.48
L20-1%	9.42	0.750	7.07
L20-2%	12.44	0.980	12.20
D13-1%	6.91	0.540	3.74
D13-2%	10.12	0.820	8.20
D16-1%	10.05	0.840	8.45
D16-2%	13.84	1.210	16.75
D20-1%	12.56	0.980	12.31
D20-2%	15.60	1.250	19.48

纤维体积分数的ASFRPC试件的 $f_{eq}$ 、 $\gamma_p$ 、 $T_p$ 的提高幅度分别为45.44%和24.98%、55.56%和16.67%、125.94%和45.68%;当纤维长度由13 mm增加至16、20 mm时,2%纤维体积分数的ASFRPC试件的 $f_{eq}$ 、 $\gamma_p$ 、 $T_p$ 的提高幅度分别为36.76%和12.71%、47.56%和3.00%、104.26%和16.30%。

### 2.2.4 劈裂抗拉强度

以钢纤维体积分数为1%为例,图8为劈裂抗拉试件的失效模式和裂纹.由图8可见,随着纤维方向系数和长径比的增加,横跨裂缝处钢纤维的桥接作用更明显,试件破坏时就更不容易形成贯通裂缝。

表5为钢纤维RPC试件的劈裂抗拉强度和抗剪强度的试验结果.由表5可见:当纤维体积分数为1%时,13、16、20 mm纤维长度ASFRPC试件的劈裂抗拉强度相比于SFRPC试件,分别提高了31.26%、35.9%、

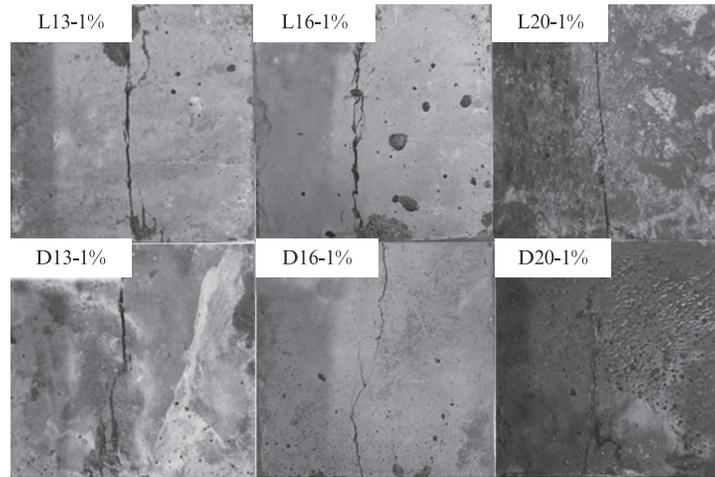


图8 劈裂抗拉试件的失效模式和裂纹形态

Fig. 8 Failure mode and crack morphology of splitting tensile specimen

27.45%;当纤维体积分数为2%时,13、16、20 mm纤维长度 ASFRPC 试件的劈裂抗拉强度相比于 SFRPC 试件,分别提高了 29.48%、27.66%、28.09%。

表5 钢纤维RPC试件劈裂抗拉强度和抗剪强度的试验结果  
Table 5 Test results of splitting tensile strength and shear strength of SFRPC specimens

Specimen No.	$f_t$ /MPa	$f_v$ /MPa	Specimen No.	$f_t$ /MPa	$f_v$ /MPa
L13-1%	7.17	10.02	D13-1%	9.42	12.73
L13-2%	9.48	15.13	D13-2%	12.29	17.67
L16-1%	8.50	12.07	D16-1%	11.55	15.94
L16-2%	11.12	17.94	D16-2%	14.20	22.11
L20-1%	8.35	15.04	D20-1%	10.64	21.12
L20-2%	10.70	22.21	D20-2%	13.70	27.46

考虑到剪切的复杂性,通过建立抗剪强度和劈裂抗拉强度的关系用来预测抗剪强度,方便工程实际需要。

图9为纤维长度为20 mm时,ASFRPC试件和

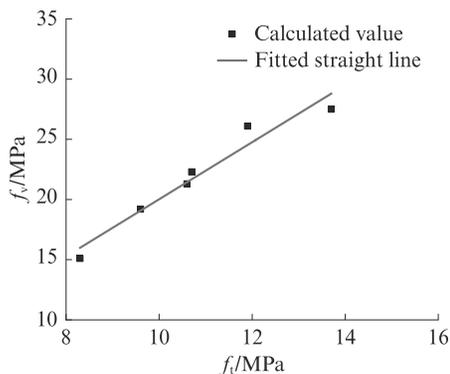


图9 ASFRPC试件和SFRPC试件抗剪强度与劈裂抗拉强度的关系

Fig. 9 Relationships between shear strength and splitting tensile strength of ASFRPC and SFRPC specimens

SFRPC试件抗剪强度与劈裂抗拉强度的关系.由图9可知,随着劈裂抗拉强度的增大,SFRPC试件和ASFRPC试件的抗剪强度均呈增大趋势,二者呈近似线性关系.结合劈裂抗拉强度数据,可回归出定、乱向SFRPC试件的抗剪强度和劈裂抗拉强度的关系式:

$$f_v = -3.84 + 3.82f_t, R^2 = 0.95 \quad (5)$$

### 3 结论

(1)活性粉末混凝土(RPC)试件的剪切破坏无明显征兆,即典型的“一裂即坏”.加入钢纤维后,定向分布钢纤维活性粉末混凝土(ASFRPC)试件和钢纤维活性粉末混凝土(SFRPC)试件的剪切破坏呈一定延性,其延性随着纤维掺量和长径比的增大而增大。

(2)定向钢纤维对剪切性能的增强作用非常显著.当试件进入峰值后状态时,ASFRPC试件的等效残余剪切强度相比于SFRPC试件也有一定的提高。

(3)当纤维掺量一定时,ASFRPC试件的抗剪强度、峰值变形及剪切韧性均随着纤维长径比的增加而增加,当纤维掺量为2%、纤维长度为20 mm时,ASFRPC试件的剪切性能最优。

(4)不论ASFRPC试件还是SFRPC试件,由于纤维的桥联作用,试件破坏后不会完全断开.随着纤维掺量和长径比的增加,劈裂裂缝扩展长度、宽度变小,试件的整体性提高,ASFRPC试件破坏后所产生的裂缝宽度比SFRPC试件的更窄。

### 参考文献:

[1] ROSSI P, ACKER P, MALIER Y. Effect of steel fiber at two

- different stages: The material and the structure[J]. *Materials and Structure*, 1987, 20(6):436-439.
- [ 2 ] 高丹盈, 刘建秀. 钢纤维混凝土基本理论[M]. 北京: 科学技术出版社, 1994.  
GAO Danying, LIU Jianxiu. Basic theory of steel fiber concrete [M]. Beijing: Science and Technology Press, 1994. (in Chinese)
- [ 3 ] 赵健, 廖霖, 张帆, 等. 钢纤维混凝土弯曲性能和纤维分布试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(4):838-845.  
ZHAO Jian, LIAO Lin, ZHANG Fan, et al. Experimental study on flexural properties and fiber distribution of steel fiber concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(4):838-845. (in Chinese)
- [ 4 ] 杜咏, 严奥宇, 戚洪辉. 纤维增强超高强混凝土防高温爆裂研究[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(1):216-223.  
DU Yong, YAN Aoyu, QI Honghui. Fiber reinforced high strength concrete heat burst study [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(1):216-223. (in Chinese)
- [ 5 ] BRANDT A M. Fiber reinforced cement-based(FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering [J]. *Composite Structures*, 2008, 86(1):3-9.
- [ 6 ] ZOLLO R F. Fiber-reinforced concrete: An overview after 30 years of development[J]. *Cement Concrete Composites*, 1997, 19(2):107-122.
- [ 7 ] DUPONT D, VANDEWALLE L. Distribution of steel fiber in rectangular section[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27(3):391-398.
- [ 8 ] WUEST J, DENARIE E, BARUHWILER E, et al. Determination of fiber distribution and orientation in fiber reinforced composites[J]. *Experimental Techniques*, 2009, 33(5):50-55.
- [ 9 ] YOO D Y, YOON Y S, BANTHIA N. Predicting the flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 74:71-87.
- [ 10 ] YOO D Y, YOON Y S. Structure performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers [J]. *Engineering Structure*, 2015, 102:409-423.
- [ 11 ] YOO D Y, KANG S T, YOON Y S. Enhancing the flexural performance of ultra-high-performance concrete using long steel fibers[J]. *Composite Structures*, 2016, 147:220-230.
- [ 12 ] YOO D Y, KANG S T, YOON Y S. Effect of fiber orientation on the rate-dependent flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete[J]. *Composite Structures*, 2016, 157:62-70.
- [ 13 ] YOO D Y, KANG S T, YOON Y S. Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 64:67-81.
- [ 14 ] KANG S T, KIM J K. Investigation on the flexural behavior of UHPCC considering the effect of fiber orientation distribution [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 28:57-65.
- [ 15 ] 陈宁. 定向型钢纤维增强混凝土可能性探讨[J]. *预应力技术*, 2012, 92(3):8-10.  
CHEN Ning. Discussion on possibility of directional steel fiber reinforced concrete[J]. *Prestressing Technology*, 2012, 92(3):8-10. (in Chinese)
- [ 16 ] 慕儒, 邱欣, 赵全明, 等. 单向分布钢纤维增强水泥基复合材料(I):钢纤维方向控制[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(2):208-213.  
MU Ru, QIU Xin, ZHAO Quanming, et al. Unidirectional distributed steel fiber reinforced cement matrix composites(I): Direction control of steel fiber[J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(2):208-213. (in Chinese)
- [ 17 ] 慕儒, 李辉, 王晓伟, 等. 单向分布钢纤维增强水泥基复合材料(II):制备及钢纤维增强作用[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(3):387-392.  
MU Ru, LI Hui, WANG Xiaowei, et al. Unidirectional distributed steel fiber reinforced cement matrix composite(II): Preparation and strengthening effect of steel fiber[J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(3):387-392. (in Chinese)
- [ 18 ] 慕儒, 王成, 李辉, 等. 单向分布钢纤维增强水泥基复合材料(III):断裂性能[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(1):78-82.  
MU Ru, WANG Cheng, LI Hui, et al. One-way distribution of steel fiber reinforced cement matrix composites(III):Fracture [J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(1):78-82. (in Chinese)
- [ 19 ] MU R, LI H, QING L B. Aligning steel fiber in cement mortar using electro-magnetic field [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 131:309-316.
- [ 20 ] MU R, WANG Z D, WANG X W. Experimental study on shear properties of aligned steel fiber reinforced cement-based composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 184:27-33.