

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.197



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 纤维分布对活性粉末混凝土构件力学性能的影响

李坤坤<sup>1</sup>, 杨克家<sup>2</sup>, 李坤梁<sup>1</sup>, 林一苇<sup>1</sup>

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

**摘要:**为研究准静态荷载下纤维分布对活性粉末混凝土(RPC)构件力学性能的影响,对同一纤维掺量(2%)下不同纤维长度(13~20 mm)的单向分布和乱向分布钢纤维 RPC 试件开展了四点受弯试验。通过选取弯拉荷载-挠度曲线上的初裂点、峰值点及其他几个特征点,定量分析单向分布和乱向分布钢纤维 RPC 的弯拉性能。结果表明:钢纤维在主拉应力方向上的方向系数显著影响基体的弯曲性能。其中,较乱向分布试件,单向分布钢纤维试件的弯拉峰值应力、弯曲韧性均大幅提高,且跨中挠度达到  $L/150$  时,残余强度仍比初裂强度高 4.35~16.9 MPa;纤维长度由 13 mm 增加至 20 mm 时,与乱向分布试件相比,单向分布试件的裂后弯曲性能提高幅度更明显,且单向分布试件受荷越大,纤维长径比的优势越显著;单向分布试件断口处纤维分布均匀,绝大部分方向与主裂纹方向垂直,锚固长度大,断口处桥接效应显著;综合考虑单向钢纤维 RPC 试件的等效弯曲应力、耗能能力等指标,在纤维掺量为 2%、纤维长度为 20 mm 时,其力学性能最优。

**关键词:**单向分布钢纤维;活性粉末混凝土;纤维长度;等效弯曲应力;韧性

**中图分类号:** TU528.58 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)05-0197-08

## Effect of fiber orientation on the mechanical properties of reactive powder concrete members

LI Kunkun<sup>1</sup>, YANG Kejia<sup>2</sup>, LI Kunliang<sup>1</sup>, LIN Yiwei<sup>1</sup>

(1. School of Architecture Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, P. R. China;

2. School of Architecture Engineering, Taizhou University, Taizhou 318000, Zhejiang, P. R. China)

**Abstract:** To study the influence of fiber distribution on the mechanical properties of Reactive Power Concrete(RPC) members under quasi-static loading, the four-point bending test was carried out on aligned steel fiber RPC and steel fiber RPC specimens at the same fiber content (2%) and different fiber lengths (13~20 mm). By selecting the initial crack point, peak point and other characteristic points on the bending load-deflection curves, the bending properties of aligned steel fiber RPC(ASFRPC) and steel fiber RPC(SFRPC) were analyzed quantitatively. The experimental results show that orientation coefficient of steel

收稿日期:2020-08-31

基金项目:浙江省教育厅一般项目(Y201942336)

作者简介:李坤坤(1995-),女,主要从事单向钢纤维活性粉末混凝土力学性能研究, E-mail: 184611572168@stu.wzu.edu.cn.

杨克家(通信作者),男,副教授, E-mail: yangkejia@tom.com.

Received: 2020-08-31

Foundation item: General Project of Zhejiang Education Department (No. Y201942336)

Author brief: LI Kunkun (1995-), main research interest: mechanical properties of aligned steel fiber reactive powder concrete, E-mail: 184611572168@stu.wzu.edu.cn.

YANG Kejia (corresponding author), associate professor, E-mail: yangkejia@tom.com.

fibers in the direction of main tensile stress has a strong impact on the deflection hardening behavior in bending. First of all, the bending tensile peak stress and bending ductility of ASFRPC is greater than that of SFRPC. In particular, when the mid-span deflection reaches  $L/150$ , the residual strength of ASFRPC specimen is still 4.35~6.9 MPa higher than that of the initial crack strength. Secondly, when the fiber length increases from 13 mm to 20 mm, the flexural property of ASFRPC specimen improves more significantly than that of SFRPC specimen, and the advantage of fiber length diameter ratio is more significant with the increasing load of ASFRPC specimen. Thirdly, the fiber distribution of ASFRPC is uniform at the fracture, most of which are perpendicular to the main crack direction. Besides, the anchorage length is also long, and the bridging effect is significant at the fracture. In conclusion, considering the equivalent bending stress and energy absorption capacity of ASFRPC specimens, the mechanical properties of aligned steel fiber specimens perform best when the fiber content is 2% and the fiber length is 20 mm.

**Keywords:** aligned steel fiber; reactive powder concrete; fiber length; the equivalent bending stress; toughness

活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC)<sup>[1]</sup>具有优异的力学性能和耐久性能,尤其在掺入钢纤维后,其受拉应变硬化和多元开裂特性受到工程界的广泛关注<sup>[2-4]</sup>。然而,钢纤维的掺入显著提高了材料成本(体积掺量 2% 的钢纤维大约占总成本的 33%),故研究人员设法在钢纤维掺量相同或降低的情况下提高 RPC 的拉伸或弯曲性能<sup>[5-10]</sup>。Wille 等<sup>[6]</sup>对异形钢纤维与短直纤维的钢纤维混凝土构件进行了对比,发现异形钢纤维对其抗拉强度和应变能力提升效率更高。Yoo 等<sup>[8-12]</sup>研究表明,使用长径比较高的钢纤维能够提高基体的弯曲性能和耗能能力,并且对于 RPC 而言,使用易于制造的长直纤维是首选,但当纤维长径比过大时,可能会出现纤维分布性差和纤维成团现象,导致基体力学性能下降。

纤维分布方向对基体的力学性能同样有着重要影响。Yoo 等<sup>[8-12]</sup>和 Kang 等<sup>[13]</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的钢纤维 RPC 弯曲梁的纤维分布特征,结果表明,纤维方向系数越高,钢纤维 RPC 的裂后增强越明显。陈宁<sup>[14]</sup>从理论上论证了应用外加磁场方式制备定向型钢纤维混凝土新型构件的构想。慕儒等<sup>[15-16]</sup>通过磁场将钢纤维按照特定方向排列,制备出了纤维方向系数达 0.9 的单向分布钢纤维普通混凝土试件,相较乱向分布构件,其受弯承载力及韧性性能均有显著提升。

各种调整纤维分布的方法中,磁场控制钢纤维分布最为高效和实用。但普通混凝土中存在粗骨料,纤维方向效应系数难以进一步提高。RPC 不含大粒径粗骨料,钢纤维在基体中转向所受阻力远小于普通混凝土,有利于进一步提高钢纤维的增强效率,实现钢纤维增强水泥基复合材料力学性能的突破。笔者利用电磁场定向装置制备了具有 3 种不同

长度( $L_f=13,16,20$  mm)、掺量 2% 的单向分布钢纤维 RPC (ASFRPC) 和乱向分布钢纤维 RPC (SFRPC) 试件,并开展了四点受弯试验,通过弯拉荷载-挠度曲线上的初裂点、峰值点及其他几个特征点,定量分析了纤维分布特征及纤维长度对 RPC 构件力学性能的影响。

## 1 试验概况

### 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  $1.06 \text{ g/m}^3$  的粉体聚羧酸高效减水剂,拌合物中不含粗骨料,具体配比见表 1。所使用的钢纤维为镀铜微丝钢纤维,其几何和物理性能见表 2。根据前期试配试验,当钢纤维掺量为 2%、长径比大于 100 时,在搅拌过程中,RPC 出现纤维成团导致纤维分散不均匀的现象,因此,采用的钢纤维最大长度为 20 mm(长径比为 100)。

表 1 RPC 配合比

Table 1 Mix proportion of RPC

水胶比	水/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	水泥/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	砂/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	硅灰/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	减水剂/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
0.28	244.4	710.0	1 266.0	230.0	3.6

表 2 钢纤维的各项性能

Table 2 Properties of smooth steel fiber

编号	直径 $d_f/\text{mm}$	长度 $L_f/\text{mm}$	长径比 $L_f/d_f$	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	拉伸强 度/MPa	弹性模 量/GPa
S13	0.2	13	65			
S16	0.2	16	80	7.8	2 900	200
S20	0.2	20	100			

### 1.2 试验设计

考虑纤维长度和纤维分布对 RPC 受弯力学性能的影响,制备了掺有 2% 体积分数、3 种纤维长度 ( $L_f=13、16、20$  mm)、尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm 的 SFRPC 和 ASFRPC 试件,每组 3 个,共 18 个试件,根据各组所用纤维掺量和分布方向特征对其进行编号,D、L 分别表示单向、乱向分布钢纤维 RPC,后加一个表示纤维长度的数字。例如,L13 表示纤维长度为 13 mm、掺量为 2% 的乱向分布钢纤维试件。

### 1.3 单向分布钢纤维 RPC 的制备

制备 ASFRPC 的装置如图 1 所示。将装有 RPC 拌合物的塑料试模放入螺线圈后共同放置在振动台上。打开电流转换器,通电螺线圈在试模周围施加与构件轴向平行的恒定磁场。开启振动台,此时拌合物处于流体状态,钢纤维在磁场作用下发生转动,最终与磁场方向基本一致。依次关闭振动台和电磁场设备,即可完成 ASFRPC 试件的制备。制作完成后,及时在试块表面覆盖保鲜膜以防止水分过快蒸发,在室温下养护 24 h 后拆模,随后放入标准养护室养护至 28 d 龄期,表 3 为钢纤维 RPC 材料实测的抗压强度和弹性模量。

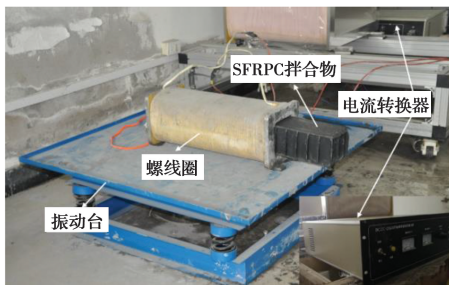


图 1 单向钢纤维 RPC 制备装置

Fig. 1 Manufacturing device of ASFRPC members

表 3 钢纤维 RPC 实测的抗压强度和弹性模量

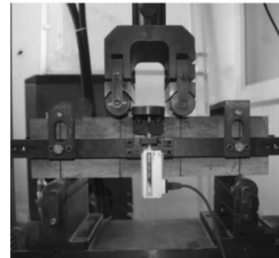
Table 3 Measured compressive strength and elastic modulus of steel fiber RPC

编号	$f_c$ /MPa	$E_c$ /GPa	$\epsilon_{cf}/10^{-6}$
ASFRPC-13	82.72	39.78	2 640.64
ASFRPC-16	85.75	34.69	2 689.34
ASFRPC-20	82.04	36.35	2 694.73
SFRPC-13	97.21	34.26	3 361.45
SFRPC-16	97.56	32.68	3 382.94
SFRPC-20	87.57	34.28	2 917.44

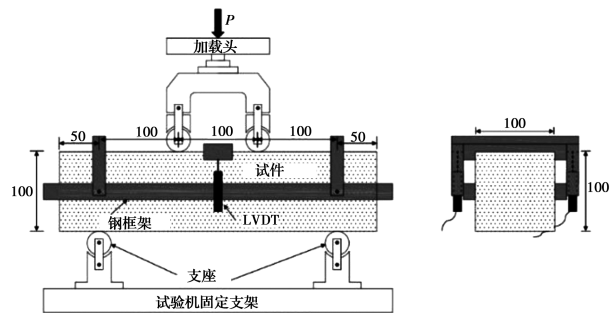
### 1.4 试验方法

按照 ASTM C1609<sup>[17]</sup> 规范要求,采用 MTS 万

能试验机对 100 mm×100 mm×400 mm 的试件进行四点受弯试验。试验采用位移加载控制,加载速率为 0.1 mm/min。试验装置如图 2 所示,在梁的中间高度安装一个钢框架,框架两侧固定两个 LVDT 用来测量不包括支座沉降的跨中挠度,荷载和跨中挠度均由试验机自带采集仪采集。



(a) 加载装置实物



(b) 加载装置正面及断面示意图

图 2 四点抗折试验装置

Fig. 2 Four-point bending test device

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 初裂点的确定

FRC 的弯曲性能通常被分为挠度硬化或挠度软化,如图 3 中的曲线(a)、(b)所示<sup>[18]</sup>。FRC 材料受拉或受弯初裂后,相较于普通混凝土或挠度软化 FRC,具有挠度硬化性能的试件可以产生较高的承载能力。无论是 ASFRPC 试件还是 SFRPC 试件,其荷载-挠度关系曲线均显示出较明显的挠曲硬化平台,故将荷载-挠度曲线上升段首次发生线性偏离的点称为初裂点。

以 SFRPC-S13 试件为例确定初裂点,如图 4 所示。根据该方法得出的各试件组的初裂值及初裂韧性值见表 3。按照 ASTM C1609<sup>[17]</sup> 四点弯拉等效应力计算方法,将初裂荷载值  $P_{LOP}$  代入式(1)中,得到的等效弯曲应力定义为初裂强度,即  $f_{LOP}$ 。

$$f_{LOP} = P_{LOP} \cdot \frac{L}{bh^2} \quad (1)$$

式中: $L$  为试件跨度,mm; $b$  为试件截面宽度,mm; $h$

为试件截面高度, mm。

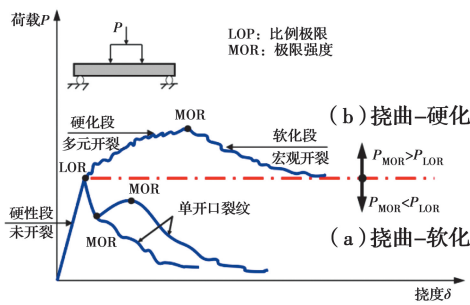


图 3 FRC 经典荷载-挠度响应曲线<sup>[18]</sup>

Fig. 3 Typical load-deflection response curves of FRC<sup>[18]</sup>

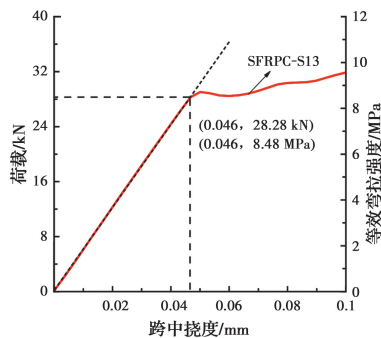


图 4 钢纤维 RPC 初裂点的确定(以 SFRPC-S13 为例)

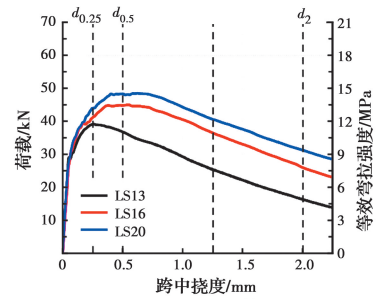
Fig. 4 Determination of first cracking point of SFRPC (Take SFRPC-S13 as an example)

### 2.2 试验结果分析

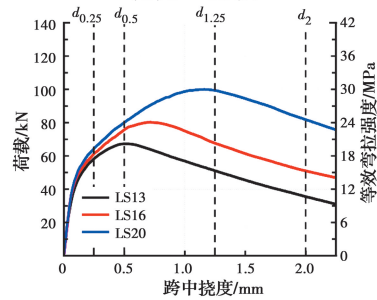
将四点受弯实测数据经过平均处理后,绘制出不同纤维长度 ASFRPC 和 SFRPC 的荷载-挠度关系曲线,如图 5 所示。由图可知,所有试件均呈现挠曲硬化响应,其弯拉过程由线弹性阶段、挠曲硬化阶段、挠曲软化阶段 3 部分组成。同等条件下,ASFRPC 的承载能力和峰值挠曲变形均高于 SFRPC,并且相关性能随着纤维长度的增加而呈递增趋势。

文献[5,19]指出,UHPC 受弯试件的跨中挠度为  $L/600$  时,该试件处于小变形状态,当 UHPC 受弯试件的跨中挠度试件为  $L/150$  时,该试件处于大变形状态,故取跨中挠度为  $L/240$  代表中等弯拉变形状态。图 5 中荷载-挠度曲线上有两个弯曲性能特征点:比例极限点(LOP)和极限强度点(MOR)。为了全面地反映出试件的四点弯曲响应,定义另外 4 个特征点: $d_{0.25}$ (跨中挠度为  $L/1200$ )、 $d_{0.5}$ (跨中挠度为  $L/600$ )、 $d_{1.25}$ (跨中挠度为  $L/240$ )、 $d_2$ (跨中挠度为  $L/150$ )。其中,MOR 为钢纤维 RPC 裂后荷载峰值点,点  $d_{0.25}$ 、 $d_{0.5}$  代表小变形状态,点  $d_{1.25}$ 、 $d_2$  分别代表中等变形和大变形状态。将各特征点对应

的弯曲特征参数统计于表 4。前缀  $P$ 、 $f$ 、 $\delta$ 、 $T$  等表示特征点相对应的荷载、应力、挠度和韧性(如 LOP)。



(a) SFRPC 试件

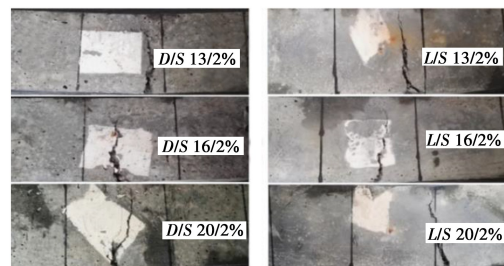


(b) ASFRPC 试件

图 5 四点弯拉荷载-跨中挠度曲线

Fig. 5 Curves between load and mid-span deflections of the four-point bending test

图 6 为部分 ASFRPC 和 SFRPC 构件破坏形态。所有试件均在纯弯段最薄弱截面处产生一条主裂缝,这种现象称为裂纹局部化。ASFRPC 在发生开裂后可听到“滋滋滋”的响声,同时可以观察到纤维和基体发生滑移现象。然而,SFRPC 在发生开裂后伴随着“噼啪”的响声,纤维和基体发生局部脱落,开裂处可观察到少量纤维拔出。达到峰值荷载后,主裂缝水平位移增加并向上延伸,形成裂纹局部化,荷载承载力开始缓慢下降,纤维不断被拔出,试件发生明显弯曲,基体呈现软化性能。两种试件断口处桥接纤维对比如图 7 所示。



(a) ASFRPC 试件

(b) SFRPC 试件

图 6 弯拉试件失效模式和裂纹形态

Fig. 6 Failure mode and crack morphology of the four-point bending specimens

表 4 所有测试试件弯曲性能参数平均值

Table 4 Average value of bending property parameters of all test specimens

试件	方向	LOP				$d_{0.25}$			
		$P_{LOP}/kN$	$f_{LOP}/MPa$	$\delta_{LOP}/mm$	$T_{LOP}/(kN \cdot mm)$	$P_{d_{0.25}}/kN$	$f_{d_{0.25}}/MPa$	$\delta_{d_{0.25}}/mm$	$T_{d_{0.25}}/(kN \cdot mm)$
S13	乱向	28.28	8.48	$4.6 \times 10^{-2}$	0.70	39.04	11.70	0.25	7.81
	单向	20.98	6.29	$3.3 \times 10^{-2}$	0.36	58.51	17.55	0.25	10.61
S16	乱向	20.07	6.02	$3.7 \times 10^{-2}$	0.39	41.18	12.35	0.25	8.10
	单向	27.56	8.27	$4.3 \times 10^{-2}$	0.61	61.42	18.42	0.25	11.08
S20	乱向	24.32	7.30	$4.2 \times 10^{-2}$	0.53	43.97	13.19	0.25	8.37
	单向	28.03	8.41	$4.4 \times 10^{-2}$	0.64	64.60	19.37	0.25	11.57

$d_{0.5}$				MOR			
$P_{d_{0.5}}/kN$	$P_{d_{0.5}}/kN$	$\delta_{d_{0.5}}/mm$	$T_{d_{0.25}}/(kN \cdot mm)$	$P_{MOR}/kN$	$f_{MOR}/MPa$	$\delta_{MOR}/mm$	$T_{MOR}/(kN \cdot mm)$
36.78	11.03	0.5	17.29	39.13	11.74	0.26	8.21
67.22	20.17	0.5	26.44	67.25	20.17	0.52	27.87
44.80	13.44	0.5	18.98	44.97	13.49	0.54	20.80
75.78	22.73	0.5	28.01	80.21	24.06	0.71	45.26
48.30	14.49	0.5	19.96	48.48	14.54	0.63	26.10
80.00	24.00	0.5	29.52	99.95	29.99	1.16	89.83

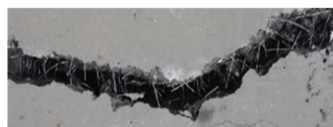
  

$d_{1.25}$				$d_2$			
$P_{d_{1.25}}/kN$	$f_{d_{1.25}}/MPa$	$\delta_{d_{1.25}}/mm$	$T_{d_{1.25}}/(kN \cdot mm)$	$P_{d_2}/kN$	$f_{d_2}/MPa$	$\delta_{d_2}/mm$	$T_{d_2}/(kN \cdot mm)$
25.33	7.60	1.25	40.65	16.34	4.90	2.0	56.16
50.97	15.29	1.25	71.41	35.48	10.64	2.0	103.49
36.42	10.93	1.25	50.41	25.95	9.35	2.0	73.73
67.57	20.27	1.25	85.39	50.88	15.26	2.0	129.51
40.50	12.15	1.25	54.30	31.15	9.35	2.0	81.26
99.32	29.80	1.25	100.20	81.67	24.5	2.0	168.49

注:  $P$  为荷载;  $f$  为弯曲强度;  $\delta$  为跨中挠度;  $T$  为韧性。



(a) ASFRPC



(b) SFRPC

图 7 试件破坏断裂面处纤维拔出图(以 S16 为例)

Fig. 7 Fiber pullout diagram at fracture surface of specimens(Take S16 as an example)

2.2.1 承载能力(等效弯曲强度) 纤维长度对等效弯曲强度的影响如图 8 所示。从图 8 可见,无论是 SFRPC 试件还是 ASFRPC 试件,当纤维长径比由 65 变化至 100 时,其  $f_{LOP}$  大致相当。另一方面,表 4 可定量反映出:所有试件的  $f_{LOP}$  最大差值仅为

2.46 MPa,对应的  $\delta_{LOP}$  只有 0.013 mm,即纤维方向和长度对钢纤维 RPC 试件初裂性能的影响并不明显,试件开裂应力主要取决于基体而非钢纤维。LOP 点之后,随着挠度的增加,等效弯曲应力受纤维长度影响显著,ASFRPC 试件的纤维长度从 13 mm 增加到 20 mm 时,其  $f_{MOR}$  增幅约 49%,对应 SFRPC 试件的  $f_{MOR}$  提高幅度接近 29%。这主要是由于钢纤维 RPC 材料开裂后,跨越裂缝的钢纤维通过粘结横贯裂缝传递应力,纤维长径比越大,纤维与基体间的粘结应力越大。此外,特征点  $d_{1.25}$ 、 $d_2$  处于试件软化范围,但 ASFRPC 系列试件仍保持较高的持荷能力,尤其纤维长度为 20 mm 的 ASFRPC 试件  $f_{d_{1.25}} = 29.80$  MPa,  $f_{d_2} = 24.50$  MPa,说明 ASFRPC 系列试件残余强度的提高幅度随纤维长度的增加而增大。

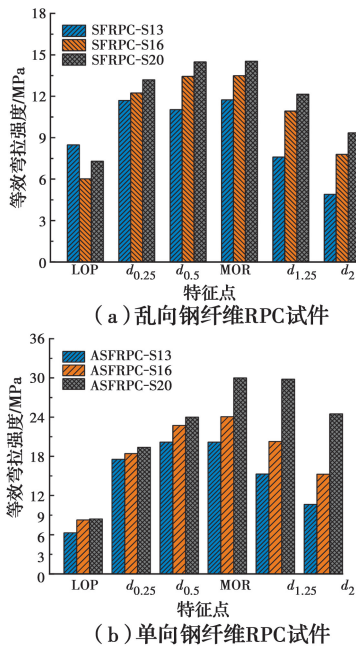


图 8 不同纤维长度下特征点的等效弯拉强度比较  
Fig. 8 Comparison of equivalent bending strength of characteristic points under different fiber length

图 9 表示不同纤维方向与纤维长度下各特征点的等效弯曲应力。由图 9 可知,两种不同纤维分布的钢纤维 RPC 等效弯曲应力-挠度曲线均呈现挠度硬化特性。由表 4 可知,纤维长度为 13、16、20 mm 的 ASFRPC 试件  $f_{MOR}$  分别为 20.17、24.06、29.99 MPa,较乱向分布试件分别提高了 72.12%、78.35%、106.26%。由此可知,与纤维长度相比,纤维分布对等效弯曲强度提高幅度更大,其主要原因为:当钢纤维方向与试件主拉应力方向一致时,单向分布钢纤维试件裂缝处有更多的钢纤维起到桥接作用,可有效承担荷载,从而大幅提高水泥基复合材料的力学性能。图 9 中的曲线反映出弯拉试件由小变形状态进入到大变形状态时,ASFRPC 试件的等效弯曲强度  $f_{d_2}$  与初裂强度  $f_{LOP}$  的比值较高,而 SFRPC 试件在大变形状态下的  $f_{d_2}$  与  $f_{LOP}$  大致相当或略低于初裂强度(纤维长度为 13 mm 的 SFRPC 试件)。表 4 定量地反映出 ASFRPC 试件在大变形状态下的等效弯曲强度  $f_{d_2}$  高于初裂强度 4.35~16.9 MPa,依然保持一定的持荷能力。总体上,单向分布钢纤维用于 RPC 受弯结构中具有较高的安全可靠。

2.2.2 韧性 图 10 表示不同纤维分布与纤维长度下各特征点的韧性,其中,图 10(a)、(c)分别反映了小变形状态下 ASFRPC 试件和 SFRPC 试件的韧性

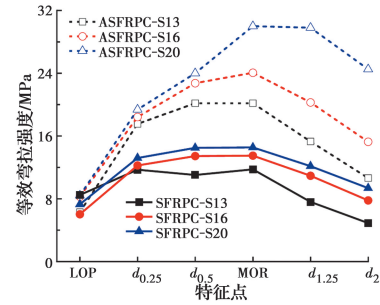


图 9 不同纤维分布与纤维长度下特征点的弯拉强度  
Fig. 9 Equivalent bending strength of characteristic points under different fiber orientation and different fiber length

值;图 10(b)、(d)分别为峰值荷载后 ASFRPC 试件和 SFRPC 试件的韧性值。可以看出,纤维分布和纤维长度对试件峰值荷载后的韧性提高幅度较为显著。在一定纤维长度范围内,单向分布试件的峰值韧性大约是乱向分布试件的 2 倍。各特征点韧性值如表 4 所示,由表 4 可知:对于纤维长度为 16 mm 的 ASFRPC 试件和 SFRPC 试件,前者的  $T_{MOR}$  较后者高 117.6%左右,较纤维长度为 20 mm 的 SFRPC 试件高约 73.4%。因此,在实际结构设计中,调整纤维分布方向也是提高纤维混凝土试件力学性能的重要方法之一。

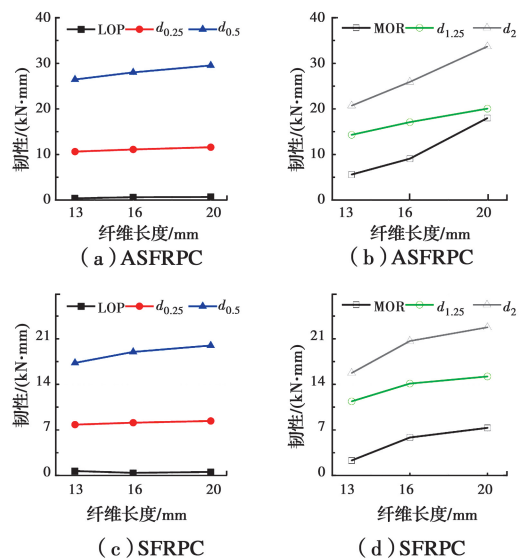


图 10 纤维方向与纤维长度下特征点的韧性  
Fig. 10 Toughness of characteristic points under different fiber orientation and different fiber length

### 3 结论

研究了纤维分布和纤维长度对钢纤维 RPC 弯曲性能的影响,得到以下结论:

1)利用外加磁场将钢纤维按照特定方向排列制备 ASFRPC,其受弯承载力及韧性显著高于 SFRPC。在纤维长度为 13~20 mm 范围内,单向分布试件的弯拉峰值应力较乱向分布弯拉试件提高 72.12%~106.26%,韧性提高 2~4 倍。此外,试件进入大变形状态时(跨中挠度为  $L/150$ ),前者的残余弯曲应力与初裂应力的比值  $f_{d_2}/f_{LOP}$  为 1.69~2.91,而后的  $f_{d_2}/f_{LOP}$  不大于 1.3。

2)无论是单向分布还是乱向分布,钢纤维 RPC 试件初裂强度和相应挠度与纤维分布及长度无明显相关性,但其裂后等效弯曲应力和弯曲韧性均随纤维长度的增加而呈递增趋势,与 SFRPC 试件相比,纤维长度的变化对 ASFRPC 试件裂后性能的改善更明显(增幅约 40%),且 ASFRPC 试件受荷越大,纤维长度的优势越能体现出来。

3)综合考虑 ASFRPC 试件等效弯曲强度、韧性等指标,当纤维掺量为 2%、纤维长度为 20 mm 时,单向分布试件力学性能综合最优。

笔者仅对相同尺寸下的小尺寸梁开展了弯拉试验与分析,实际工程应用尚待对大尺寸 ASFRPC 构件的弯拉性能及其尺寸效应进行更深一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1501-1511.
- [2] MAKITA T, BRÜHWILER E. Tensile fatigue behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) [J]. Materials and Structures, 2014, 47(3): 475-491.
- [3] 张哲, 邵旭东, 李文光, 等. 超高性能混凝土轴拉性能试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 50-58.  
ZHANG Z, SHAO X D, LI W G, et al. Axial tensile behavior test of ultra high performance concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8): 50-58. (in Chinese)
- [4] 梁兴文, 胡翱翔, 于婧, 等. 钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3): 722-731.  
LIANG X W, HU A X, YU J, et al. Effect of steel fibers on the flexural response of ultra-high performance concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(3): 722-731. (in Chinese)
- [5] 邵旭东, 李芳园, 邱明红, 等. 钢纤维特性对 UHPC 轴拉性能与弯拉性能的影响及对比研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(4): 51-64.  
SHAO X D, LI F Y, QIU M H, et al. Influential and comparative research on the effects of steel fiber properties on the axial tensile and bending tensile properties of UHPC [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(4): 51-64. (in Chinese)
- [6] WILLE K, KIM D J, NAAMAN A E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents [J]. Materials and Structures, 2011, 44(3): 583-598.
- [7] 张哲, 邵旭东, 朱平, 等. 基于超高性能混凝土弯曲拉伸特性的二次倒推分析法[J]. 土木工程学报, 2016, 49(2): 77-86.  
ZHANG Z, SHAO X D, ZHU P, et al. Twice inverse analysis method based on four-point bending test results for UHPC tensile behavior characterization [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(2): 77-86. (in Chinese)
- [8] YOO D Y, BANTHIA N, YOON Y S. Predicting the flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 74: 71-87.
- [9] YOO D Y, YOON Y S. Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers [J]. Engineering Structures, 2015, 102: 409-423.
- [10] 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.
- [11] YOO D Y, BANTHIA N, KANG S T, et al. Effect of fiber orientation on the rate-dependent flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete [J]. Composite Structures, 2016, 157: 62-70.
- [12] 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.
- [13] 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(1): 57-65.
- [14] 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(3): 8-10.
- CHEN N. Discussion on the possibility of directional steel fiber reinforced concrete [J]. *Prestress Technology*, 2012(3): 8-10. (in Chinese)
- [15] 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 R, LI H, WANG X W, et al. Aligned steel fibre reinforced cement based composites(II): Preparation and reinforcement of aligned steel fibres [J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(3): 387-392. (in Chinese)
- [16] MU R, LI H, QING L B, et al. Aligning steel fibers in cement mortar using electro-magnetic field [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 131: 309-316.
- [17] Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading): ASTM C 1609-97 [S]. American Society of Testing and Materials, 2006: 1-8.
- [18] NAAMAN A E, REINHARDT H W. Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response [J]. *Materials and Structures*, 2006, 39(5): 547-555.
- [19] 王俊颜, 李钢, 郭君渊, 等. 常温养护型超高性能混凝土的弯曲性能表征方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(9): 1352-1358.
- WANG J Y, LI G, GUO J Y, et al. Characterization of flexural performance of ultra-high performance concrete without thermal curing [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(9): 1352-1358. (in Chinese)

(编辑 黄廷)