

水平定向钢纤维混凝土的制备与力学性能

卿龙邦¹, 毕梦迪¹, 慕 儒¹, 邢 鹏²

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 中交基础设施养护集团有限公司, 北京 100020)

摘 要: 钢纤维混凝土(SFRC)中钢纤维方向对其力学性能有显著影响, 楼板、地坪、路面等工程中, 竖直方向的钢纤维有害无益, 钢纤维水平随机分布最为有利。为改善钢纤维混凝土结构的力学性能, 提高钢纤维的增强效率, 通过旋转磁场对基体中的钢纤维进行调控定向, 制备出水平定向钢纤维混凝土(2D-SFRC)。测试比较了 2D-SFRC 和随机乱向钢纤维混凝土(RD-SFRC)的劈拉性能、棱柱体试件和圆板试件的弯曲性能, 同时利用断面纤维分布特征和声发射技术揭示了水平定向钢纤维的增强机理。结果表明, 与 RD-SFRC 相比, 2D-SFRC 的各项力学性能显著提升。钢纤维分布统计和声发射分析表明, 2D-SFRC 力学性能提高的主要原因是, 断面纤维数量增加、纤维方向有效系数提高。水平定向钢纤维混凝土具有高性能和低成本的特点, 对于提高工程质量、节约材料具有重要意义。

关键词: 钢纤维混凝土; 二维定向钢纤维; 力学性能; 纤维分布; 声发射

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)05-1210-09

网络出版时间: 2023-04-04



Preparation and Mechanical Properties of 2D - Aligned Steel Fiber Reinforced Concrete

QING Longbang¹, BI Mengdi¹, MU Ru¹, XING Peng²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. China Communication Construction Company Infrastructure Maintenance Group Co.Ltd, Beijing 100020, China)

Abstract: The orientation of steel fibers has an effect on the mechanical properties of steel fiber reinforced concrete (SFRC). In elements or structures such as slabs, floors and pavements, vertical steel fibers are useless but harmful to the structures. In this case, the optimal distribution of steel fibers is two-dimensional (no vertical, but random in the plane) dispersion. In this paper, the steel fibers were aligned using a rotating uniform magnetic field, and the 2D aligned steel fiber reinforced concrete (2D-SFRC) was prepared to enhance the mechanical properties of SFRC and the efficiency of reinforcement of steel fibers. The splitting tensile performance, flexural behavior of prism and circular plate specimens of 2D-SFRC were tested and compared with those of the specimens with randomly distributed steel fiber reinforced concrete (RD-SFRC). Besides, the mechanism of reinforcement of 2D-SFRC was investigated from the perspective of fiber distribution characteristics and acoustic emission signals. The results show that the mechanical properties of 2D-SFRC are significantly improved, compared with RD-SFRC. The fiber distribution statistics and acoustic emission analysis indicate that the increased amount of steel fibers in the fracture surface and enhanced fiber orientation effective factor are the main reasons for the improved mechanical properties of 2D-SFRC. The 2D-SFRC has the characteristics of high performance and low cost, which is of great significance for improving the engineering quality and reduce the materials consumption.

Keywords: steel fiber reinforced concrete; 2D - aligned steel fiber; mechanical property; fiber distribution; acoustic emission

收稿日期: 2022-09-30。 修订日期: 2022-10-13。

基金项目: 国家自然科学基金优秀项目(52022027); 国家自然科学基金面上项目(52078180, 52178199); 河北省自然科学基金项目(E2022202141, E2020202151); 河北省高校科研重点项目(ZD2019072, ZD2020190)。

第一作者: 卿龙邦(1982—), 男, 博士, 教授。

通信作者: 慕 儒(1971—), 男, 博士, 教授级高工。

Received date: 2022-09-30. Revised date: 2022-10-13.

First author: QING Longbang (1982—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: qing@hebut.edu.cn

Correspondent author: MU Ru (1971—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: ru_mu@hotmail.com

钢纤维混凝土(SFRC)是土木工程较常用的纤维增强复合材料。由于钢纤维对基体的增强、增韧和阻裂作用,大幅提高了混凝土的力学性能和耐久性能。因此, SFRC 在市政、交通、桥梁、隧道和军工等领域得到广泛应用^[1-5]。

结构在服役过程中, 钢纤维取向对其力学性能有显著影响^[6]。SFRC 中钢纤维一般随机乱向分布, 只有与拉应力方向平行或接近的纤维才能有效发挥作用, 与拉应力垂直或成一定夹角的钢纤维所起到的增强作用微乎其微^[7]。为改善钢纤维的增强效率, 可通过控制钢纤维方向来制备定向钢纤维混凝土(ASFRC)。ASFRC 的研究始于 1977 年, 当时美国科学家 Miller 申请了第一个关于 ASFRC 制备方法的专利^[8]。1986 年, Philip 等^[9]率先将 ASFRC 应用于实际工程。此后 ASFRC 的制备方法逐渐发展, 目前常用的方法主要有磁场法、流动诱导法和 3D 打印技术等。

磁场法利用的是钢纤维的铁磁性, 当置于磁场中时, 钢纤维被磁化为小磁针, 纤维两端被磁化为 N 极和 S 极并同时受到等大反向的磁场作用力。钢纤维受磁场力的驱动旋转至与磁场方向平行, 从而实现定向^[10]。沈荣熹^[11]于 1984 年开始利用磁场法实现钢纤维定向, 慕儒等在 2010 年申请了第一个电磁定向钢纤维专利^[12]。为了探究钢纤维定向效果的影响因素, Mu 等^[10, 13]对钢纤维转动进行了受力分析, 发现拌合物粘度和磁场强度是影响钢纤维定向效果的主要因素。此后, 在实现钢纤维单向定向的基础上, 又相继开发出全场定向工艺^[14]和曲线定向工艺^[15], 以进一步提高钢纤维的增强效率并扩大 ASFRC 的应用范围。以上方法均是利用通电线圈来实现钢纤维定向, Mu 等^[16]和苟鸿翔^[17]分别利用永久磁体制备了 ASFRC, 使 ASFRC 的制备向大尺寸方向发展。

流动诱导法是指在拌合物流动期间, 依靠拌合物施加给钢纤维的剪切力, 钢纤维倾向于沿流线分布。根据拌合物各处流速的大小, 可分为径向流动诱导和剪切流动诱导^[18-19]。径向流动诱导是拌合物由一点流向四周时, 其流动范围呈圆形并不断向外扩展。同一圆周上各处拌合物流速相同, 变形同步, 钢纤维也随着拌合物的流动而调整自身取向使其沿圆周分布。径向流动诱导适用于边壁对流动影响小的构件, 如板式构件。剪切流动诱导指的是当拌合物在狭窄通道内流动时, 由于边壁对流体存在摩擦力, 拌合物各处的流速从边壁处的 0 增加到通道中

心线处的最大值。流速差的存在使得钢纤维两端运动速度不一致, 流速大的一端会朝流速小的一端旋转, 从而使钢纤维倾向于沿流速梯度定向。剪切流动诱导适用于边壁对流动影响大的构件, 如梁式构件。

3D 打印过程中, 当拌合物由喷嘴挤出时, 喷嘴会对拌合物产生“约束效果”^[20], 使纤维倾向于沿打印方向定向。打印过程中, 纤维长度与喷嘴尺寸对钢纤维定向效果影响较大, 为了防止喷嘴堵塞, 钢纤维长度一般为 6~13 mm, 喷嘴尺寸一般为 10~30 mm 且均大于纤维长度^[21-23]。研究表明, 使用 3D 打印技术可使钢纤维方向有效系数达到 0.8 以上^[24]。

通过钢纤维定向, 桥接裂缝的纤维数量增多, 增强能力明显提高, 使混凝土各项力学性能显著提升^[7]。Mu 等^[10]研究表明实现钢纤维定向可使劈拉强度提高 65%~100%, 弯曲强度提高 80%~160%, 弯曲韧性平均提高 140%以上, 剪切强度提高 40%左右。Ahmad^[25]和 Qing 等^[26]分别研究了 ASFRC 的断裂性能和轴拉性能, 发现在保持相同力学性能的条件下, ASFRC 可节约 50%以上钢纤维, 同时单轴拉伸荷载下 ASFRC 呈现“多缝开裂”的破坏形式, 即具有较高的韧性。此外, ASFRC 的动态力学性能和疲劳性能等也均有显著提升^[27-28]。

以上表明, 通过调控钢纤维方向使其沿拉应力方向分布可显著提高 ASFRC 的力学性能。对于楼板、路面、桥面和机场跑道等构件或工程, 板底水平受拉, 但是拉应力方向不确定。这种情况下, 如果采用钢纤维随机乱向分布的 RD-SFRC, 竖直方向的钢纤维非但不能起到增强作用, 还可能冒头造成一定的隐患; 钢纤维单向定向的 ASFRC 也不适用。对于板式构件, 钢纤维水平定向(二维定向)最为有利, 提高钢纤维增强效率的同时, 能够消除隐患。因此, 亟需开发相应定向工艺, 使钢纤维沿任意水平方向分布。

根据板式构件的需求, 研究了制备水平定向钢纤维混凝土(2D-SFRC)的方法, 制备了 2D-SFRC 试件, 并测试分析了 2D-SFRC 的立方体劈拉性能、棱柱体和圆板的弯曲性能。同时, 辅以声发射技术和断面纤维分布特征揭示了水平定向钢纤维的增强增韧机理。

1 水平定向钢纤维增强作用分析

根据复合材料理论, 钢纤维混凝土的抗拉性能

与钢纤维方向有效系数呈正相关。Alberti 等^[29]分析了理想状态下钢纤维水平定向(2D)和随机乱向(3D)分布时的纤维方向有效系数(表 1), 钢纤维水平定向分布可显著提升其方向有效系数。不同研究结果表明, 与随机乱向相比, 水平定向条件下的钢纤维方向有效系数提高了 20%~57%。因此, 理论上钢纤维水平定向可提高钢纤维混凝土的力学性能。

表 1 不同分布条件下的纤维方向有效系数

Table 1 Fiber orientation effective factor with different distribution conditions

References	Fiber orientation effective factor	
	2D	3D
Soroushian <i>et al</i> ^[30–32]	0.637	0.405
Dupont <i>et al</i> ^[33–35]	0.600	0.500
Alberti <i>et al</i> ^[29]	0.667	0.444

2 2D-SFRC 的制备原理和方法

匀强磁场(各处的磁力线方向和磁感应强度相同)中的任意方向的钢纤维, 受磁场力驱动, 转动到与磁场方向一致。若该水平方向的匀强磁场绕中心点水平旋转(图 1), 其中的钢纤维有趋向于水平且跟随磁场旋转的趋势。当磁场旋转频率较高时, 水泥基拌合物中的钢纤维受基体阻力无法同步水平旋转, 最终趋向于水平, 但方向随机。据此, 开发了旋转电磁场, 用于制备水平(二维)定向钢纤维混凝土^[36], 旋转电磁场设备与三相交流电动机的电磁场类似。

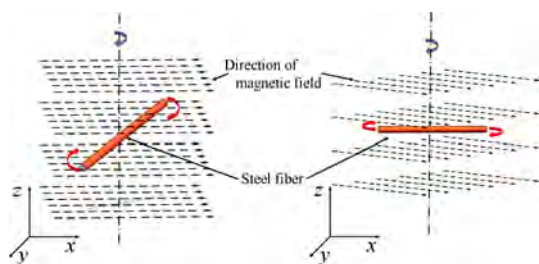


图 1 旋转磁场实现钢纤维水平定向的原理

Fig. 1 Principle of preparing 2D-SFRC by rotating magnetic field

制备试件时采用 P·O 42.5 水泥、细度模数 2.5 的河砂, 聚羧酸型减水剂以及长度为 30 mm、直径为 0.5 mm 的圆直型钢纤维, 配制时未掺粗骨料以获得理想钢纤维定向效果。制备试件的水灰比为 0.42, 钢纤维体积掺量分别为 0.8%、1.2%、1.6%和 2.0%, 详细配合比见表 2。

制备时, 将拌合好的钢纤维混凝土拌合物装满塑料试模置于旋转磁场内, 并将装置放置在振动台

上振动 60 s 左右。由于磁感线方向在二维平面上周期性旋转, 钢纤维受磁场力驱动而转动至与水平方向平行, 从而使钢纤维水平定向。

表 2 试验用配合比

Table 2 Mix proportion used in the experiment

Water-cement ratio	Mix proportion/(kg·m ⁻³)				Steel fiber volume fraction/%
	Water	Cement	Sand	Super plasticizer	
0.42	266	634	1 268	0.5	0.8
0.42	265	632	1 264	0.5	1.2
0.42	264	629	1 258	0.5	1.6
0.42	263	627	1 254	0.5	2.0

采用以上方法制备了边长 150 mm 立方体, 100 mm×100 mm×400 mm 棱柱体和直径 400 mm、厚度 60 mm 圆板 2D-SFRC 试件, 分别用于劈裂抗拉、三点弯曲和圆板弯曲试验, 同时, 制备了钢纤维方向随机的 RD-SFRC 试件作为对照组。3 个试件为 1 组, 试验结果取平均值。此外, 将完成三点弯曲试验的棱柱体试件的完整部分进行切割、制样, 用于 X 射线-CT 扫描以进行纤维空间分布分析。

3 结果与讨论

3.1 纤维空间分布分析

进行纤维空间分布检测所用仪器为 YXLON FF35 型计算机断层扫描(X 射线-CT)检测系统, RD-SFRC 和 2D-SFRC 试件的 X 射线-CT 扫描结果见图 2。由图 2a 可知, RD-SFRC 试件中钢纤维在空间上呈三维乱向分布, 竖直方向上存在较多钢纤维。与之相反, 图 2b 所示的 2D-SFRC 试件中, 大部分钢纤维在空间上趋向于沿水平面分布, 竖直方向上纤维较少。此外, 由图 2b 还可以看出, 在磁场的作用下, 尽管钢纤维被磁化, 但是钢纤维相互之间没有因为互相吸引而发生结团现象, 表明使用该方法可成功制备水平定向钢纤维混凝土。

3.2 断面纤维数量与纤维方向有效系数

将 2D-SFRC 试件沿垂直于定向平面破坏, RD-SFRC 不对破坏面进行区分。统计两断面纤维数量以及钢纤维轴线与断裂面法线的夹角 θ , 根据式(1)计算纤维方向有效系数 η_θ ^[37]。

$$\eta_\theta = \frac{\sum_{i=1}^n l \times \cos \theta_i}{n \times l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \quad (1)$$

式中: l 为钢纤维长度(mm); θ_i 为钢纤维轴线与断裂面法线的夹角(°); n 为断面纤维总数。

各组试件按照“试件类型-钢纤维体积掺量”来

编号。表 3 为各组 2D-SFRC 和 RD-SFRC 断面纤维数量与纤维方向有效系数。由表 3 可知, 与 RD-SFRC 试件相比, 2D-SFRC 试件在断面处的纤维数量较高, 当钢纤维体积掺量为 0.8%、1.2%、1.6% 和 2.0% 时, 断面纤维数量分别较 RD-SFRC 提高了 28%、14%、16% 和 17%。



(a) RD-SFRC



(b) 2D-SFRC

图 2 RD-SFRC 和 2D-SFRC 的纤维空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of steel fibers in RD-SFRC and 2D-SFRC specimens

表 3 2D-SFRC 与 RD-SFRC 断面纤维数量与纤维方向有效系数

Table 3 Number of fibers and fiber orientation effective factor in fracture surface of 2D-SFRC and RD-SFRC

Specimen	Number of fibers	Fiber orientation effective factor
2D-SFRC-0.8%	252	0.65
RD-SFRC-0.8%	197	0.58
2D-SFRC-1.2%	286	0.64
RD-SFRC-1.2%	251	0.59
2D-SFRC-1.6%	306	0.65
RD-SFRC-1.6%	264	0.57
2D-SFRC-2.0%	433	0.66
RD-SFRC-2.0%	370	0.58

同时, 由表 3 可知, 不同纤维掺量下, 2D-SFRC 和 RD-SFRC 的平均纤维方向有效系数分别是 0.65 和 0.58, 其中 2D-SFRC 的纤维方向有效系数与表 1 中的 0.667 相近, 而 RD-SFRC 的纤维方向有效系数均大于表 1 中的理论值, 这主要是因为振捣作用有助于使钢纤维沿水平方向排布, 且试模尺寸有限, 其“边壁效应”也会影响钢纤维取向, 导致 RD-SFRC 的钢纤维方向有效系数较理想分布状态大^[38]。

3.3 2D-SFRC 的劈拉强度

劈拉试验所用试件为 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体, 劈拉面与定向平面垂直。各组试件的劈拉强度见图 3。由图 3 可知, 相对于 RD-SFRC, 2D-SFRC 试件的劈拉强度显著提高, 钢纤维体积掺量为 0.8%、1.2%、1.6% 和 2.0% 的 2D-SFRC 试件的劈拉强度较 RD-SFRC 试件分别提高 19%、41%、37% 和 54%。说明与随机乱向分布的钢纤维相比, 钢纤维水平定向时增强能力更高。同时, 由图 3 还可以看出, 随着钢纤维体积掺量由 0.8% 依次递增至 2.0%, 2D-SFRC 的劈拉强度分别提高了 25%、7% 和 10%, 而 RD-SFRC 则分别提高 5%、10% 和 0%。说明较高纤维掺量下, RD-SFRC 的劈拉强度增长不明显, 而 2D-SFRC 依然显著增长。

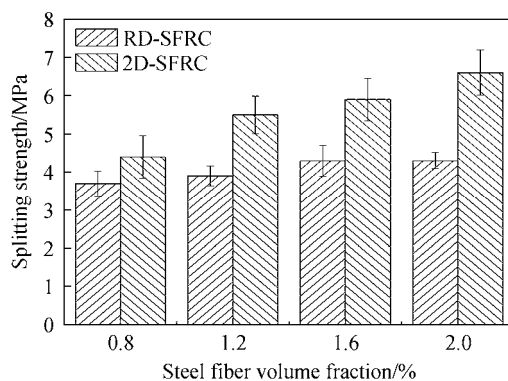


图 3 2D-SFRC 与 RD-SFRC 的劈拉强度对比

Fig. 3 Comparison of splitting strength of 2D-SFRC and RD-SFRC

在劈拉试验过程中, 上下两垫条之间会形成劈拉面, 使试件沿劈拉面破坏。劈拉面上的钢纤维数量和纤维方向有效系数对劈拉强度有显著影响。由表 3 可知, 相同纤维掺量下, 2D-SFRC 试件的断面纤维数量与纤维方向有效系数较 RD-SFRC 均有所提升, 说明 2D-SFRC 中桥接裂缝的钢纤维数量增多, 且更多纤维垂直于劈拉面分布。当 2D-SFRC 与 RD-SFRC 承受相同劈拉荷载时, 2D-SFRC 试件有更多纤维起到阻裂作用, 试件不易开裂, 从而能抵抗更大的劈拉荷载。此外, 当钢纤维体积掺量增加时, 钢纤维水平定向分布对劈拉面的钢纤维数量及角度的影响逐渐增大, 使 2D-SFRC 试件的劈拉强度提高程度随钢纤维体积掺量的增加而增大。

3.4 2D-SFRC 的三点弯曲性能

弯曲试验所用试件为 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体, 加载速度为 0.1 mm/min, 加载方向与定

向平面垂直。加载过程中测试荷载–挠度曲线, 并采用声发射技术收集跨中断裂面附近声源点数量, 其中采集门限和回放门限均设置为 40 dB, 采样频率为 3 MHz。

1) 荷载–挠度曲线

2D-SFRC 试件和 RD-SFRC 试件的荷载–挠度曲

线如图 4 所示。由图 4 可知, 两种试件的荷载–挠度曲线在峰值荷载前区别并不明显, 但是 2D-SFRC 试件的峰值荷载较 RD-SFRC 试件显著提升。对于曲线下降段, 相同挠度下, 2D-SFRC 的荷载较 RD-SFRC 高, 说明变形程度相同时, 2D-SFRC 能承受更高的荷载。

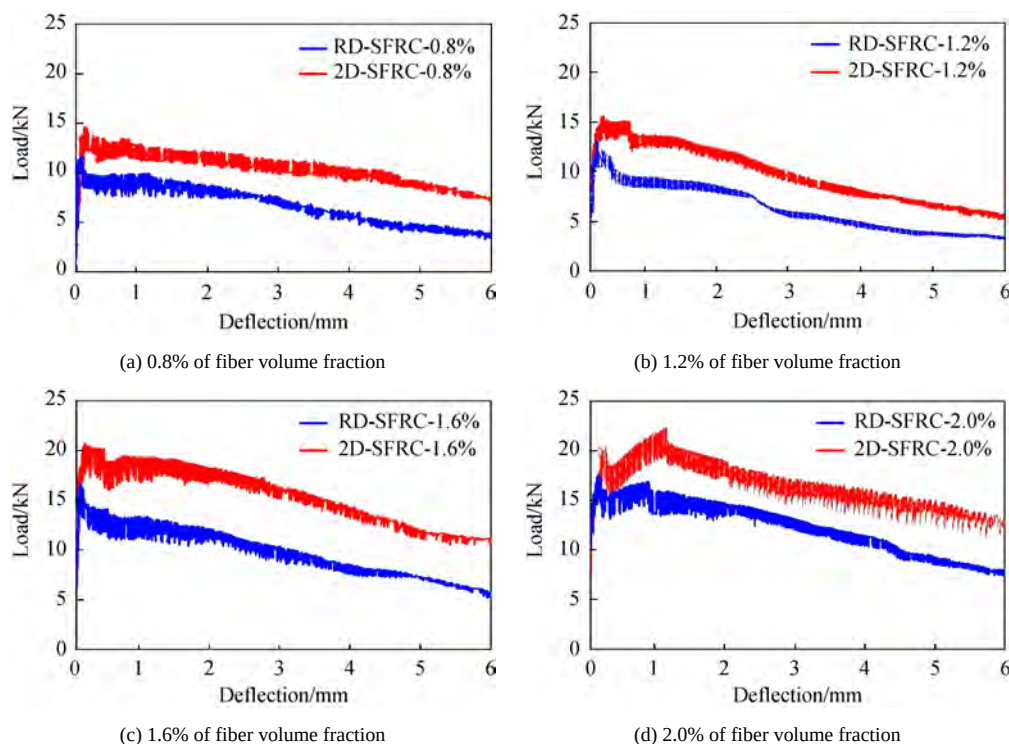


图 4 三点弯曲试验荷载–挠度曲线

Fig. 4 Load-deflection curve of three-point bending test

根据 ASTM C1609, 试件的弯曲韧性可用跨中挠度达到试件跨长 1/150 时对应的荷载–挠度曲线的面积(T_{150})来评价。不同掺量下试件的弯曲强度和弯曲韧性分别见图 5 和图 6。

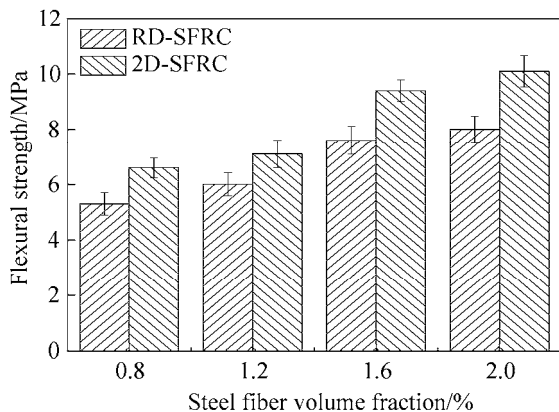


图 5 2D-SFRC 试件与 RD-SFRC 试件弯曲强度

Fig. 5 Flexural strength of 2D-SFRC and RD-SFRC

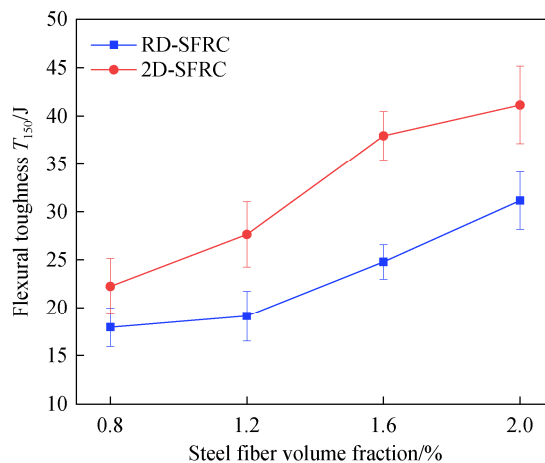


图 6 2D-SFRC 试件与 RD-SFRC 试件弯曲韧性

Fig. 6 Flexural toughness of 2D-SFRC and RD-SFRC

由图 5 和图 6 可见, 2D-SFRC 试件的弯曲性能较 RD-SFRC 试件显著提高。钢纤维体积掺量为 0.8%、1.2%、1.6% 和 2.0% 的 2D-SFRC 试件的弯曲

强度较 RD-SFRC 试件分别提高 25%、18%、23% 和 26%，相应的弯曲韧性分别提高 24%、45%、53% 和 32%。因此，水平定向钢纤维在断裂截面处能更有效发挥桥接作用并承担弯拉应力，从而显著提升弯曲性能。

2) 跨中断裂面声源点数量

图 7 为跨中断裂面附近声源点数量。由图可知，相对于 RD-SFRC 试件而言，当钢纤维体积掺量为 0.8%、1.2%、1.6% 和 2.0% 时，2D-SFRC 试件的声源点数量分别增加了 19%、23%、19% 和 26%。Soulioti 等^[39]研究发现，随着钢纤维体积掺量的增加，跨越截面的纤维数量增多，声发射信号总数也相应增大，因此声发射信号总数与断面纤维数量有关。相同纤维掺量下，2D-SFRC 跨中断裂面声源点数量均比 RD-SFRC 高，说明实现钢纤维水平定向能增加桥接裂缝的钢纤维数量，这与表 3 的研究结果一致。进一步地，图 7 还表明，当达到相同的声发射信号总数时，RD-SFRC 需要比 2D-SFRC 更高掺量的钢纤维，即 2D-SFRC 基体内有更多的钢纤维发挥作用。

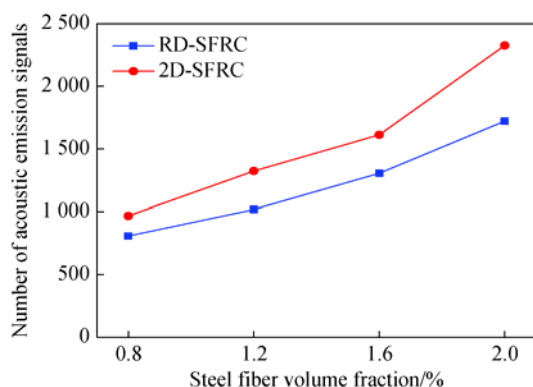


图 7 跨中断裂面附近声源点数量

Fig. 7 Number of acoustic emission signals near the mid-span fracture surface

钢纤维混凝土的弯曲强度、韧性等性能高于普通混凝土，主要原因在于掺入的钢纤维能有效桥接裂缝，阻止或延缓裂缝的扩展。桥接裂缝的钢纤维数量与弯曲性能紧密相关。普通钢纤维混凝土中，钢纤维随机乱向分布，部分纤维可能沿竖直方向分布，这种分布位置与开裂截面平行(图 8a)，因而无法桥接裂缝，在统计截面纤维数量时也无法纳入统计结果。钢纤维实现水平定向后，沿竖直方向分布的钢纤维转动至与水平面平行(图 8b)，尽管钢纤维在水平面上随机乱向分布，但其桥接裂缝的几率显著增大。因此，在纤维掺量不变的情况下，钢纤维

水平定向能增加桥接裂缝的纤维数量，进而提高钢纤维混凝土的弯曲性能。

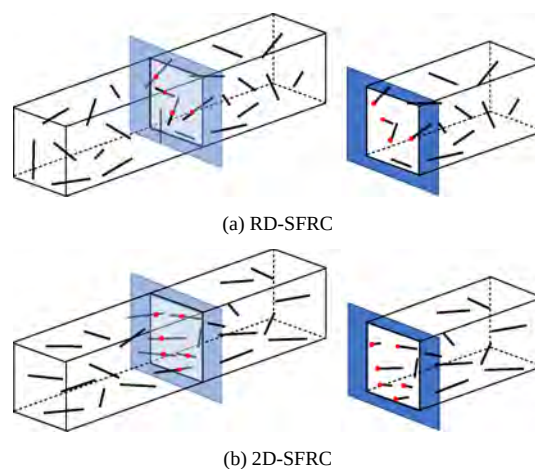


图 8 RD-SFRC 试件与 2D-SFRC 试件桥接裂缝纤维数量对比示意图

Fig. 8 Schematic diagram comparison of the number of fibers in bridging cracks between RD-SFRC and 2D-SFRC

3.5 2D-SFRC 的圆板弯曲性能

根据 ASTM C1550 对直径为 400 mm，厚度 60 mm 的圆板试件进行弯曲试验。试验时圆板试件底部三点支撑，3 个支座所围成圆周的直径为 370 mm 且沿圆周等分互呈 120° 分布，圆板顶面中心点加载，顶部加载头与 3 个支座为直径 50 mm 的圆柱，试验加载装置如图 9 所示。试验采用位移加载，加载速度为 0.5 mm/min，加载过程中测试试件下表面中心点处位移(挠度)，当位移达到 20 mm 时结束加载。

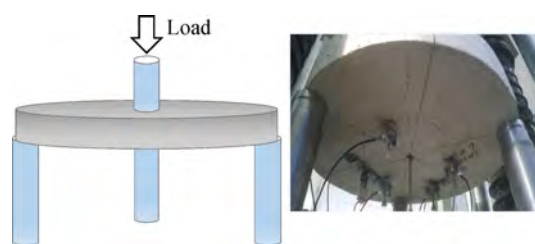


图 9 圆板弯曲试验装置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of circular plate bending test device

图 10 为 2D-SFRC 与 RD-SFRC 圆板试件的弯曲荷载-挠度曲线。由图 10 可知，圆板试件弯曲破坏过程中，荷载先随挠度增大而线性增长，此时荷载主要由基体承担。随着荷载的增加，试件发生开裂，荷载-挠度曲线呈现非线性增长，钢纤维开始发挥阻裂作用。当达到峰值荷载时，随着挠度的增加荷载开始降低，但 2D-SFRC 荷载始终比 RD-SFRC 荷载高。

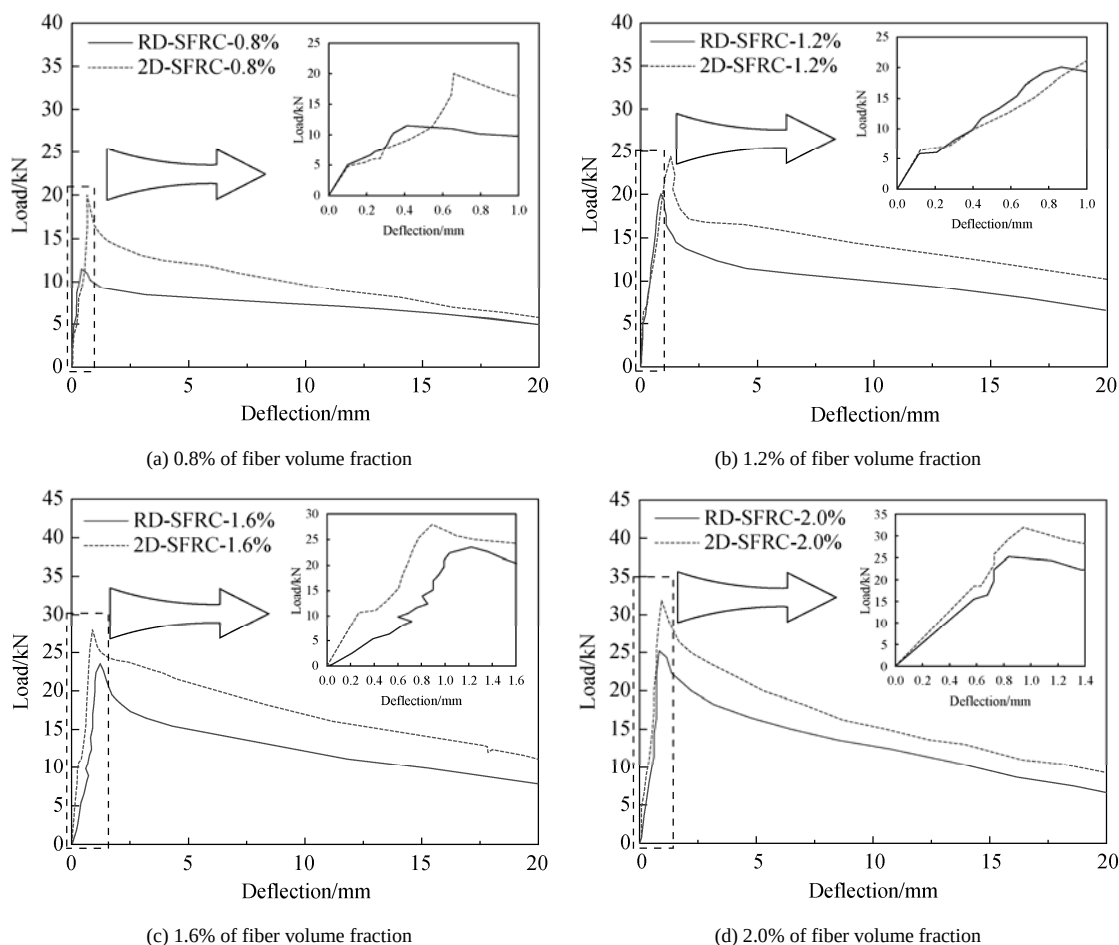


图 10 圆板试件荷载-挠度曲线

Fig. 10 Load-deflection curve of circular plate specimen

根据文献[40], 圆板试件弯曲强度计算公式为:

$$f = \frac{Pr}{H^2 R \cos 30^\circ} \quad (2)$$

式中: f 为圆板试件弯曲强度(MPa); P 为极限荷载(N); r 为加载点到支座的距离(mm); R 为试件半径(mm); H 为试件厚度(mm)。

图 11 为根据式(2)计算得到的 2D-SFRC 和 RD-SFRC 的弯曲强度。由图 11 可知, 当钢纤维体积掺量分别为 0.8%、1.2%、1.6% 和 2.0% 时, 2D-SFRC 的弯曲强度较 RD-SFRC 试件分别提高了 13%、22%、17% 和 23%, 说明实现钢纤维水平定向可提高圆板试件的弯曲强度。

根据 ASTM C1550 计算圆板试件中心点挠度 δ 达到 5 mm、10 mm 和 20 mm 时的荷载-挠度曲线的面积, 以此来评价圆板试件的弯曲韧性。由表 4 可知, 相同挠度下, 实现钢纤维水平定向能吸收更多的能量, 从而表现出更高的韧性。当板底中心点挠度 $\delta=20$ mm 时, 钢纤维体积掺量为 0.8%、1.2%、1.6% 和 2.0% 的 2D-SFRC 圆板试件较 RD-SFRC 圆

板试件的弯曲韧性分别提高了 30%、40%、25% 和 26%。而且还可以看出, 随着钢纤维体积掺量由 0.8% 依次递增至 2.0%, $\delta=20$ mm 时 RD-SFRC 的能量吸收值依次提高 35%、23% 和 9%, 提高幅度略低于 2D-SFRC 试件。

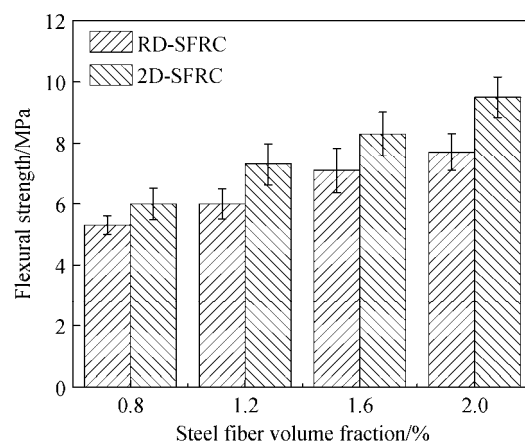


图 11 圆板试件弯曲强度

Fig. 11 Flexural strength of circular plate specimen

表 4 圆板试件在不同挠度下的弯曲韧性

Table 4 Flexural toughness of circular plate specimen under different deflections

Specimen	Flexural toughness/J		
	$\delta=5$ mm	$\delta=10$ mm	$\delta=20$ mm
2D-SFRC-0.8%	62.3	116.0	191.0
RD-SFRC-0.8%	44.5	83.4	146.6
2D-SFRC-1.2%	81.8	157.2	278.7
RD-SFRC-1.2%	61.0	114.1	198.5
2D-SFRC-1.6%	104.2	195.1	304.8
RD-SFRC-1.6%	77.8	144.3	244.5
2D-SFRC-2.0%	111.9	199.5	331.8
RD-SFRC-2.0%	86.2	153.7	266.1

δ is center deflection of circular plate specimen.

4 结论

1) 利用旋转磁场控制驱动基体拌合物中随机乱向钢纤维转动到水平方向，成功制备出水平定向钢纤维混凝土(2D-SFRC)。断面纤维分布特征表明 2D-SFRC 的纤维方向有效系数高于 RD-SFRC，与理论分析一致；

2) 2D-SFRC 试件的力学性能较 RD-SFRC 试件显著提高。当钢纤维体积掺量为 0.8%、1.2%、1.6% 和 2.0% 时，2D-SFRC 的劈拉强度较 RD-SFRC 分别提高了 19%、41%、37% 和 54%，棱柱体试件弯曲强度提高了 25%、18%、23% 和 26%，弯曲韧性提高了 24%、45%、53% 和 32%，圆板试件弯曲强度提高了 13%、22%、17% 和 23%，弯曲韧性提高了 30%、40%、25% 和 26%；

3) 钢纤维水平定向时，与随机乱向分布的钢纤维相比，桥接裂缝的钢纤维数量增加了 14%~28%，纤维方向有效系数平均增加了 12%，有更多的纤维起到阻裂和增强增韧的作用，这是 2D-SFRC 较 RD-SFRC 力学性能提高的主要原因。

参考文献：

- [1] TAN Y, LV L S, ZHANG D W, et al. Fatigue performance of a simply-supported T-beam UHPC bridge deck variable section joint structure[J]. Eng Struct, 2022, 269: 114758.
- [2] CUI H Z, LI Y H, BAO X H, et al. Thermal performance and parameter study of steel fiber-reinforced concrete segment lining in energy subway tunnels[J]. Tun Unde Spa Tech, 2022, 128: 104647.
- [3] SHIN H O, YANG J M, YOON Y S, et al. Mix design of concrete for prestressed concrete sleepers using blast furnace slag and steel fibers[J]. Cem Concr Compos, 2016, 74: 39–53.
- [4] FOGLAR M, HAJEK R, FLADR J, et al. Full-scale experimental testing of the blast resistance of HPFRC and UHPFRC bridge decks[J]. Constr Build Mater, 2017, 145: 588–601.
- [5] MOHAMED N, SOLIMAN A M, NEHDI M L. Mechanical performance of full-scale precast steel fibre-reinforced concrete

pipes[J]. Eng Struct, 2015, 84: 287–299.

- [6] 张秀芝, 毕梦迪, 刘同军, 等. 钢纤维混凝土中纤维分布特性影响因素研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(8): 1732–1742.
ZHANG Xiuzhi, BI Mengdi, LIU Tongjun, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(8): 1732–1742.
- [7] MU R, XING P, YU J C, et al. Investigation on reinforcement of aligned steel fiber on flexural behavior of cement-based composites using acoustic emission signal analysis[J]. Constr Build Mater, 2019, 201: 42–50.
- [8] MILLER A I, BJÖRKLUND F R. Method of reinforcing concrete with fibers[P]. US Patent, 4062913. 1977–12–13.
- [9] PHILIP L R, KURT H W. Aligned Steel Fibers in Concrete Poles[J]. Concr Int, 1986, 8(12): 22–27.
- [10] MU R, LI H, QING L B, et al. Aligning steel fibers in cement mortar using electro-magnetic field[J]. Constr Build Mater, 2017, 131: 309–316.
- [11] 沈荣熹. 捣实方法对钢纤维混凝土的纤维取向、抗弯强度与韧性的影响[J]. 硅酸盐学报, 1984(1): 21–31, 133–134.
SHEN Rongxi. J Chin Ceram Soc, 1984(1): 21–31, 133–134.
- [12] 慕儒, 赵全明, 田稳苓. 制备单向分布钢纤维增强混凝土的方法及其专用设备[P]. CN Patent, 201010235371. 2011–11–30.
MU Ru, ZHAO Quanming, TIAN Wenling. The method and corresponding device of preparing aligned steel fiber reinforced concrete (in Chinese)[P]. CN Patent, 201010235371. 2011–11–30.
- [13] 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. J Build Mater (in Chinese), 2015, 18(2): 208–213.
- [14] MU R, DIAO C R, LIU H Q, et al. Design, preparation and mechanical properties of full-field aligned steel fiber reinforced cementitious composite[J]. Constr Build Mater, 2021, 272: 121631.
- [15] MU R, XUE Y, QING L B, et al. Preparation and mechanical performance of annularly aligned steel fiber reinforced cement-based composite pipes[J]. Constr Build Mater, 2019, 211: 167–173.
- [16] MU R, DONG R X, LIU H Q, et al. Preparation of aligned steel-fiber-reinforced concrete using a magnetic field created by the assembly of magnetic pieces[J]. Crystals, 2021, 11(7): 837–850.
- [17] 苟鸿翔, 朱洪波, 周海云, 等. 定向分布钢纤维对超高性能混凝土的增强作用[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1756–1764.
GOU Hongxiang, ZHU Hongbo, ZHOU Haiyun, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(11): 1756–1764.
- [18] RAJU R A, LIM S, AKIYAMA M, et al. Effects of concrete flow on the distribution and orientation of fibers and flexural behavior of steel fiber-reinforced self-compacting concrete beams[J]. Constr Build Mater, 2020, 262: 119963.
- [19] BOULEKBACHE B, HAMRAT M, CHEMROUK M, et al. Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material[J]. Constr Build Mater, 2010, 24(9): 1664–1671.
- [20] ARUNOTHAYAN A R, NEMATOLLAHI B, RANADE R, et al. Fiber orientation effects on ultra-high performance concrete formed by 3D printing[J]. Cem Concr Res, 2021, 143: 106384.
- [21] SINGH A, LIU Q, XIAO J Z, et al. Mechanical and macrostructural properties of 3D printed concrete dosed with steel fibers under different loading direction[J]. Constr Build Mater, 2022, 323: 126616.
- [22] BOS F P, BOSCO E, SALET T M. Ductility of 3D printed concrete reinforced with short straight steel fibers[J]. Virtual Phys Prototyping,

- 2018, 14(2): 160–174.
- [23] ZHOU J H, LAI J Z, DU L Y, et al. Effect of directionally distributed steel fiber on static and dynamic properties of 3D printed cementitious composite[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 318: 125948.
- [24] PHAM L, TRAN P, SANJAYAN J. Steel fibres reinforced 3D printed concrete: Influence of fibre sizes on mechanical performance[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 250: 118785.
- [25] AHMAD I, QING L B, KHAN S, et al. Experimental investigations on fracture parameters of random and aligned steel fiber reinforced cementitious composites[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 284: 122680.
- [26] QING L B, YU K L, MU R, et al. Uniaxial tensile behavior of aligned steel fibre reinforced cementitious composites[J]. *Mater Struct*, 2019, 52(4): 70–81.
- [27] HUANG H H, GAO X J, TENG L. Fiber alignment and its effect on mechanical properties of UHPC: An overview[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 296: 123741.
- [28] 魏栾苏. 定向钢纤维增强水泥基复合材料弯曲疲劳性能研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2018.
- WEI Luansu. Flexural fatigue behaviour of aligned steel fiber reinforced cementitious composites (in Chinese, dissertation). Tianjin: Hebei University of Technology, 2018.
- [29] ALBERTI M G, ENFEDAQUE A, GÁLVEZ J C. On the prediction of the orientation factor and fibre distribution of steel and macro-synthetic fibres for fibre-reinforced concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2017, 77: 29–48.
- [30] LEE C, KIM H. Orientation factor and number of fibers at failure plane in ring-type steel fiber reinforced concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2010, 40(5): 810–819.
- [31] PARVIZ S, CHA D L. Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete[J]. *ACI Mater J*, 1990, 87(5): 433–439.
- [32] JAMES P R, JAMES A M. Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement[J]. *ACI J Pro*, 1964, 61(6): 657–672.
- [33] LARANJEIRA F, AGUADO A, MOLINS C, et al. Framework to predict the orientation of fibers in FRC: A novel philosophy[J]. *Cem Concr Res*, 2012, 42(6): 752–768.
- [34] DUPONT D, VANDEWALLE L. Distribution of steel fibres in rectangular sections[J]. *Cem Concr Compos*, 2005, 27(3): 391–398.
- [35] RAO C K. Effectiveness of random fibres in composites[J]. *Cem Concr Res*, 1979, 9(6): 685–693.
- [36] 邢鹏. 二维定向钢纤维增强水泥基复合材料制备方法及其性能研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2018.
- XING Peng. Investigation of preparation and flexural properties of the two-dimensional oriented steel fiber reinforced cementitious composites (in Chinese, dissertation). Tianjin: Hebei University of Technology, 2018.
- [37] WU Z M, KHAYAT K H, SHI C J. Changes in rheology and mechanical properties of ultra-high performance concrete with silica fume content[J]. *Cem Concr Res*, 2019, 123: 105786.
- [38] MORÓN A, FERRÁNDEZ D, SAIZ P, et al. New system for vibrating and orientation of steel fibers in masonry mortars[J]. *J Build Eng*, 2021, 43: 102827.
- [39] SOULIOTI D, BARKOULA N M, PAIPETIS A, et al. Acoustic emission behavior of steel fibre reinforced concrete under bending[J]. *Constr Build Mater*, 2009, 23(12): 3532–3536.
- [40] BARNETT S J, LATASTE J F, PARRY T, et al. Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength[J]. *Mater Struct*, 2010, 43(7): 1009–1023.