

文章编号:1007-9629(2021)01-0087-06

钢纤维增强粉煤灰自密实混凝土力学性能

海 然, 刘 盼, 杨艳蒙, 刘俊霞

(中原工学院 建筑工程学院, 河南 郑州 450007)

摘要: 采用粉煤灰取代 40% 水泥来制备粉煤灰自密实混凝土(SCC), 研究其工作性、基本力学性能和轴压变形性能随钢纤维体积分数的变化规律. 结果表明: 粉煤灰 SCC 的工作性随钢纤维体积分数的增加而降低, 当钢纤维体积分数大于 0.75% 时, 粉煤灰 SCC 的工作性降幅最大; 钢纤维体积分数对粉煤灰 SCC 抗压强度的影响不明显, 但能够显著改善其劈裂抗拉强度和抗折强度, 当钢纤维体积分数为 1.00% 时, 劈裂抗拉强度和抗折强度较未掺钢纤维粉煤灰 SCC 分别提高了 14%、12%; 钢纤维能够显著改善粉煤灰 SCC 的轴压变形能力, 当钢纤维体积分数为 0.50% 时, 其极限应力、峰值应变、应变能和相对韧性与未掺钢纤维粉煤灰 SCC 相比, 分别提高了 3%、35%、53% 和 49%.

关键词: 自密实混凝土; 钢纤维; 工作性; 应力-应变试验; 相对韧性

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.012

Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Fly Ash Self-compacting Concrete

HAI Ran, LIU Pan, YANG Yanmeng, LIU Junxia

(School of Architectural Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: Fly ash self-compacting concrete(SCC) was prepared by replacing 40% cement with fly ash. Its workability, basic mechanical properties and axial compression deformation properties with the volume fraction of steel fibers were studied. The results show that the workability of fly ash SCC decreases with the increase of the volume fraction of steel fibers. When the volume fraction of steel fibers is more than 0.75%, the workability decreases most remarkable. The change of the volume fraction of steel fibers has slight effect on the compressive strength of fly ash SCC, but it can significantly improve its splitting tensile strength and flexural strength. When the volume fraction of steel fibers is 1.00%, the splitting tensile strength and flexural strength are increased by 14% and 12% respectively compared with SCC without steel fiber fly ash. The addition of steel fibers can significantly improve the axial compressive deformation properties of fly ash SCC. When the volume fraction of steel fiber is 0.50%, its ultimate stress, peak strain, strain energy and relative toughness are increased by 3%, 35%, 53% and 49% respectively compared with SCC without steel fiber fly ash.

Key words: self-compacting concrete; steel fiber; workability; stress-strain test; relative toughness

自密实混凝土(SCC)具有较高的流动性、均匀性和稳定性, 浇筑时无需外力振捣就能够在自重作用下流动并充满模板空间, 因其良好的工作性能而

被广泛应用于形状复杂、配筋密集的结构之中. 为满足 SCC 高流动性且不离析、不泌水的要求, 相同强度等级的 SCC 与普通混凝土相比, 水胶比低, 砂率、

收稿日期:2019-09-20; 修订日期:2019-10-14

基金项目:河南省教育厅重点科研计划项目(18A5600004, 20A560026)

第一作者:海 然(1978—), 女, 河南卫辉人, 中原工学院教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事高性能水泥基复合材料和固体废弃物资源化利用研究. E-mail: lilyhai_2001@163.com

水泥和外加剂用量大,致使 SCC 水化热高、自收缩大、成本高^[1-2]. 因此,用粉煤灰取代部分水泥来配制 SCC 不仅能够有效地解决上述问题,还能改善其工作性.

掺加钢纤维是改善混凝土力学性能和变形性能的主要途径,在利用钢纤维的桥接和阻裂作用抑制微裂纹产生和扩展的同时,还可以减少混凝土的自收缩变形. Majain 等^[3]对比研究了掺入不同体积分数(0%,0.5%,1.0%)钢纤维的自密实混凝土(SCCSF)抗压强度,发现钢纤维掺量为 0.5%和 1.0%的 SCCSF 抗压强度较 SCC 分别提高了 6.6%和 8.0%. Sulthan 等^[4]和 Siddique 等^[5]的研究结果表明,掺加钢纤维能够改善 SCC 的力学性能,钢纤维对 SCC 劈拉、抗折强度的改善程度优于抗压强度. 通过研究 CF40 钢纤维混凝土轴压应力-应变全曲线,张晓燕等^[6]发现钢纤维混凝土的轴心抗压强度和韧性比随着钢纤维体积分数的增加而提高. 赵顺波等^[7]研究表明,钢纤维全轻混凝土单轴受压应力-应变曲线的峰值应力及其对应应变随钢纤维体积分数的提高呈现增大趋势,钢纤维体积分数的增加使试件的破坏形态由脆性向塑性转变,与权长青等^[8]的研究结果相一致. 杨久俊等^[9]研究表明,钢纤维对大流动度超高强混凝土的拉压比、折压比起着显著增强作用,轴压条件下的相对韧性达到基体的 2 倍.

上述研究表明,掺加钢纤维能够改善普通混凝土、高强混凝土、轻质混凝土和 SCC 的力学性能和韧性,对 SCC 工作性的影响尤为显著^[10-11]. 鉴于此,本文以粉煤灰取代 40%水泥配制的粉煤灰 SCC 为基准混凝土,通过工作性、力学性能和轴压条件下的应力-应变试验,研究钢纤维体积分数变化对粉煤灰 SCC 工作性、力学性能的影响,重点研究粉煤灰 SCC 应力-应变曲线的极限应力、峰值应变、应变能和相对韧性及其应变软化阶段的承载能力和变形特征随钢纤维体积分数的变化规律,为钢纤维增强粉煤灰 SCC 的研究和应用提供参考.

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

普通硅酸盐水泥由天瑞集团郑州水泥公司生产,45 μm 筛余量(质量分数,文中涉及的筛余量、含水率等除特别说明外均为质量分数)为 2.55%,比表面积为 358 m^2/kg ,密度为 3.03 g/cm^3 ,标准稠度用水量为 27.30%,胶砂流动度为 192 mm,其技术性能指标见表 1;石灰石粉由广东省鹤山市沙坪镇连南桥建材店生产;粉煤灰的比表面积为 463 $\text{m}^2/$

kg,含水率为 0.18%,需水量比为 104.32%,28 d 活性指数为 79.34%,其主要组成见表 2;粗骨料为 5~19 mm 连续集配碎石,堆积密度为 1.56 g/cm^3 ,表观密度为 2.61 g/cm^3 ;细骨料为混合砂,细度模数为 2.75,堆积密度为 1.52 g/cm^3 ,表观密度为 2.65 g/cm^3 ;水为自来水;减水剂(WRA)为南京斯泰宝贸易有限公司生产的 530P 型聚羧酸盐高效减水剂,减水率为 30%;钢纤维为河北衡水瑞海橡胶制品有限公司生产的波纹型钢纤维,其基本性能参数见表 3.

表 1 普通硅酸盐水泥性能指标 Table 1 Properties of ordinary Portland cement					
Setting time/min		Compressive strength/MPa		Flexural strength/MPa	
Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
267	342	32.5	52.5	6.4	8.7

表 2 粉煤灰化学组成 Table 2 Chemical composition of fly ash $w/\%$							
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	MgO	Na_2O	IL
54.84	24.73	6.04	4.07	1.72	0.72	0.12	4.52

表 3 钢纤维基本性能参数 Table 3 Performance parameters of steel fiber			
Density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Length/mm	Aspect ratio	Tensile strength/MPa
7.8	35 $\pm$ 3	63	$\geq$ 380

1.2 试验方法

1.2.1 钢纤维增强粉煤灰 SCC 工作性测试

钢纤维增强粉煤灰 SCC 的工作性由填充性、间隙通过性和抗离析性表征,工作性试验参照 JGJ/T 283—2012《自密实混凝土应用技术规程》进行.

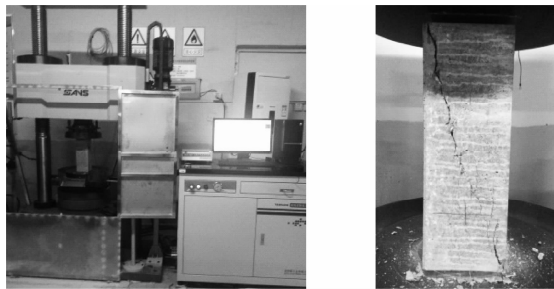
1.2.2 钢纤维增强粉煤灰 SCC 力学性能试验

粉煤灰 SCC 的配合比见表 4. 钢纤维为外掺,其体积分数分别为 0%、0.25%、0.50%、0.75% 和 1.00%. 钢纤维增强粉煤灰 SCC 的抗压强度和劈裂抗拉强度试块尺寸均为 100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 100 mm,抗折强度试块尺寸为 100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 400 mm. 参照 GB/T 50081—2016《普通混凝土力学性能试验方法标准》相关规定,进行基本力学性能测试,每组试块数量均为 3 个,结果取平均值.

表 4 粉煤灰 SCC 配合比 Table 4 Mix proportion of fly ash SCC					
Cement/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Fly ash/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Lime powder/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	m_w/m_c	Sand ratio	$w(\text{WRA})/\%$
287.5	175.0	16.5	0.35	0.50	0.4

1.2.3 钢纤维增强粉煤灰 SCC 轴压条件下应力-应变试验

钢纤维增强粉煤灰 SCC 轴压条件下应力-应变试验选用 YAW6206 型压力试验机,试验过程采用位移控制获得荷载-位移曲线,加载速度为 0.05 mm/min,试验过程见图 1. 试块尺寸为 100 mm×100 mm×300 mm,测试龄期为 28 d,每组 3 块,结果取平均值。



(a) Loading and displaying device (b) Failure modes of specimens

图 1 钢纤维增强粉煤灰 SCC 轴压试验过程
Fig. 1 Axial compression test process of SCC

2 试验结果与分析

2.1 钢纤维体积分数对粉煤灰 SCC 工作性的影响

粉煤灰 SCC 工作性测试指标有坍落扩展度、 T_{500} 、J 环扩展度和离析率筛析试验. 表 5 为钢纤维增强粉煤灰 SCC 拌和物的工作性测试结果. 由表 5 可知:随着钢纤维体积分数的增加,粉煤灰 SCC 的坍落扩展度和 J 环扩展度逐渐降低, T_{500} 流动时间延长,坍落扩展度和 J 环扩展度的差值均在 0~25 mm 之间,离析率呈现先增加后减小的趋势,但均能满足 SCC 填充性、流动性、间隙通过性和离析率的要求;当钢纤维体积分数大于 0.75% 时,粉煤灰 SCC 拌和物工作性各指标均显著降低。

表 5 钢纤维增强粉煤灰 SCC 拌和物的工作性
Table 5 Workability of steel fiber reinforced fly ash SCC

Code	$\varphi_f/\%$	Slump flow/mm	T_{500}/s	J-ring flow/mm	Separation rate/%
SCC-0	0	625	4.9	625	6.3
SCC-1	0.25	620	5.0	600	8.0
SCC-2	0.50	600	8.0	580	10.0
SCC-3	0.75	590	8.2	575	9.4
SCC-4	1.00	560	10.9	560	6.9

钢纤维体积分数对粉煤灰 SCC 工作性产生的影响主要归因于以下 3 个方面:一是掺入钢纤维后,新拌粉煤灰 SCC 体系用于包裹骨料和纤维的浆体增多,导致其体系内部自由砂浆含量减少,增大了流

动时的内应力和黏度;二是随着钢纤维体积分数的增加,粉煤灰 SCC 体系内的钢纤维根数也在增加,钢纤维的三维乱向分布和相互搭接更加明显,钢纤维的乱向分布形成空间网络结构,将粉煤灰 SCC 体系中的浆体团聚在网络结构中,阻碍了体系浆体的自由流动而影响新拌料的流动性和间隙通过性;三是由于钢纤维的表面较光滑,降低了钢纤维表面水泥浆体的吸附能力,因而使拌和物的离析率随钢纤维体积分数的增加而增大,当钢纤维体积分数大于 0.50% 时,在拌和物体系自由浆体含量减少和钢纤维周围浆体吸附能力降低的共同作用下,新拌混凝土的离析率又逐渐减小。

2.2 钢纤维体积分数对粉煤灰 SCC 力学性能的影响

2.2.1 钢纤维体积分数对粉煤灰 SCC 抗压强度的影响

图 2 为钢纤维体积分数对粉煤灰 SCC 各龄期抗压强度的影响. 由图 2 可知:钢纤维体积分数对各龄期粉煤灰 SCC 抗压强度的影响不明显,钢纤维体积分数为 0.25%~0.75% 的各试块 28 d 抗压强度提高幅度较高;钢纤维体积分数为 1.00% 的试块 SCC 28 d 抗压强度略有降低,但仍略高于试块 SCC-0. 这是由于钢纤维在粉煤灰 SCC 中相互搭接,在受力过程中,基体受到的荷载能够传递到分散的钢纤维上,当粉煤灰 SCC 中微小裂纹受荷扩展时必将遇到钢纤维,裂纹绕过钢纤维继续扩展时,跨越裂纹的钢纤维将力传递给未开裂的混凝土,裂纹尖端的应力集中程度得到缓解,从而在一定程度上提高了粉煤灰 SCC 的抗压强度;当钢纤维体积分数过高时,粉煤灰 SCC 体系中形成的大量新的黏结强度较低的钢纤维-水泥基界面,降低了粉煤灰 SCC 的密实性,导致其抗压强度降低. 因此,在粉煤灰 SCC 受压过程中,当钢纤维的抗裂、增强作用为主导时,粉煤灰 SCC 抗压强度会有小幅度提高;当钢纤维-水泥基界面为主导时,其抗压强度呈现小幅度的下降趋势。

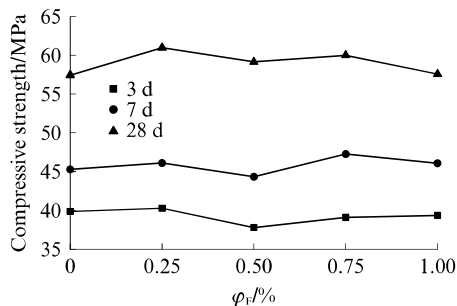


图 2 钢纤维体积分数对粉煤灰 SCC 各龄期抗压强度的影响
Fig. 2 Effect of steel fiber volume fraction on compressive strength of fly ash SCC at different ages

2.2.2 钢纤维体积分数对粉煤灰 SCC 弯拉性能的影响

图 3 为钢纤维增强粉煤灰 SCC 28 d 劈裂抗拉强度和抗折强度. 由图 3 可知: 当钢纤维体积分数大于 0.25% 时, 试块劈裂抗拉强度逐渐增大, 钢纤维体积分数介于 0.25%~0.50% 时, 增加幅度最为明显; 钢纤维体积分数为 0.25% 的试块 SCC-1 劈裂抗拉强度较试块 SCC-0 出现小幅度的降低. 各试块抗折强度随钢纤维体积分数的增加呈先降后增的趋势, 钢纤维体积分数介于 0.25%~0.50% 的各试块抗折强度较试块 SCC-0 略有降低, 钢纤维体积分数超过 0.50% 后, 试块抗折强度逐渐提高. 钢纤维体积分数为 1.00% 的试块 SCC-4 劈裂抗拉强度和抗折强度的增加幅度均达到最大, 较 SCC-0 分别提高了 14% 和 12%. 这是因为加入钢纤维后, 粉煤灰 SCC 内引入了大量新的黏结强度较低的钢纤维-水泥基界面, 当钢纤维体积分数较小时, 钢纤维-水泥基界面为主导作用, 粉煤灰 SCC 的劈裂抗拉、抗折强度会有小幅度下降, 随着钢纤维体积分数的增加, 纤维阻裂作用开始占优势, 在受拉或受弯过程中, 基体开裂后, 具有较大变形能力的钢纤维将起到承担拉力并保持基体裂缝缓慢扩展的作用, 直到钢纤维被拉断或者从基体中拔出, 从而提高了粉煤灰 SCC 的劈裂抗拉、抗折强度. 在劈裂抗拉试验和抗折试验过程中发现, 不加钢纤维的粉煤灰 SCC 破坏表现为脆性断裂; 掺入钢纤维后的破坏表现出一定的延性, 试块断裂面有钢纤维连接而没有完全断开. 上述结果表明, 钢纤维的加入能够改善粉煤灰 SCC 的弯拉性能, 缓解其脆性破坏强度.

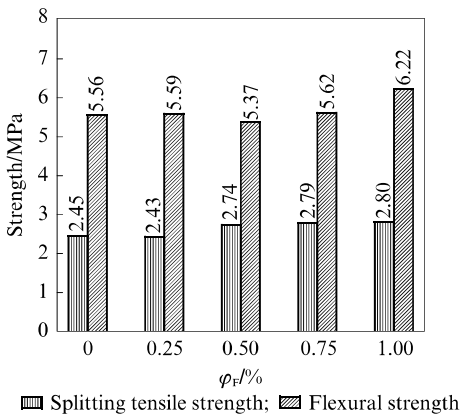


图 3 钢纤维增强粉煤灰 SCC 28 d 劈裂抗拉强度和抗折强度
Fig. 3 Splitting tensile strength and flexural strength of steel fiber reinforced fly ash SCC at 28 d

2.3 钢纤维体积分数对粉煤灰 SCC 轴压变形性能的影响

钢纤维增强粉煤灰 SCC 轴压试验采集的荷载-

位移数据, 通过式(1)、(2)计算转化成应力和应变值并绘制成应力-应变(σ - ϵ)曲线(见图 4).

$$\sigma = F/A \tag{1}$$

$$\epsilon = \Delta L/L \tag{2}$$

式中: F 为轴向荷载, kN; A 为试块截面面积, mm^2 ; ΔL 为试块轴压位移, mm; L 为试块高度, mm.

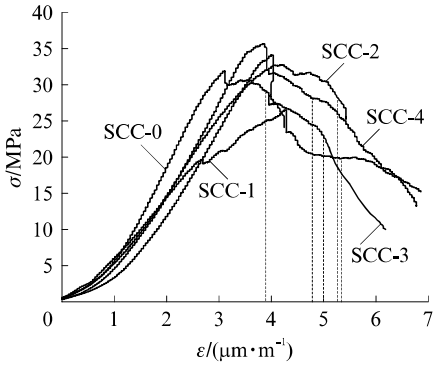


图 4 轴压条件下应力-应变曲线
Fig. 4 Stress-strain curves under axial compression

混凝土的应变能通常用应力-应变曲线下的面积表示, 表征混凝土丧失承载力时单位体积吸收的能量. 本文以 1.25 倍峰值位移下的应力-应变曲线面积为参考依据, 分析钢纤维体积分数对粉煤灰 SCC 轴压条件下的应变能 V_ϵ ($\text{N} \cdot \text{m}$):

$$V_\epsilon = V \int_0^{\epsilon_1} \sigma d\epsilon \tag{3}$$

式中: V 为试件体积, mm^3 ; ϵ_1 为 1.25 倍峰值应变, $\mu\text{m}/\text{m}$; σ 为轴压应力, MPa; ϵ 为应变, $\mu\text{m}/\text{m}$.

为对比不同钢纤维体积分数粉煤灰 SCC 轴压条件下的变形特征, 以单位体积混凝土极限应力时单位强度所消耗的应变能作为比较参数, 即:

$$\Gamma = \frac{V_\epsilon}{\sigma_0 V} \tag{4}$$

式中: Γ 为相对韧性; σ_0 为极限应力, MPa.

按照式(1)~(4), 依据图 4, 计算得出各试块的极限应力 σ_0 、峰值应变 ϵ_0 、应变能 V_ϵ 和相对韧性 Γ , 见表 6.

表 6 钢纤维增强粉煤灰 SCC 的 σ_0 、 ϵ_0 、 V_ϵ 和 Γ Table 6 σ_0 , ϵ_0 , V_ϵ and Γ of steel fiber reinforced fly ash SCC				
Code	σ_0/MPa	$\epsilon_0/(\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$	$V_\epsilon/(\text{N} \cdot \text{m})$	$\Gamma \times 10^3$
SCC-0	31.85	3.11	66.07	0.69
SCC-1	26.52	4.27	83.37	1.05
SCC-2	32.75	4.21	101.01	1.03
SCC-3	34.09	4.00	81.64	0.80
SCC-4	35.65	3.83	88.31	0.82

由图4可知,所有试块在轴压条件下均出现了明显的弹性变形阶段、非线性强化阶段、应力突然跌落阶段和应变软化阶段^[12]。钢纤维体积分数为0.50%的试块 SCC-2,应力突然跌落阶段不明显,应变软化阶段的曲线更加饱满。结合表6数据可知,随着钢纤维体积分数的增加,各试块的极限应力逐渐增大,钢纤维体积分数为0.25%的试块 SCC-1因引入少量的钢纤维在混凝土内部形成了许多钢纤维-水泥基界面薄弱区,使其极限应力较试块 SCC-0 明显降低,其降低幅度为17%。各试块的峰值应变随钢纤维体积分数的增加而逐渐减小,但与试块 SCC-0 相比明显提高,钢纤维体积分数为0.25%~0.50%的各试块峰值应变增幅最大,较试块 SCC-0 提高了35%;当应力-应变曲线下降段达到 $0.8\sigma_0$ 时,对应应变值随钢纤维体积分数的增加呈先增后减的变化趋势,钢纤维体积分数为0.50%的试块 SCC-2 下降至 $0.8\sigma_0$ 时对应的应变值较相同条件下的试块 SCC-0 提高了28%。这表明加入一定数量的钢纤维后,钢纤维的开裂应变高于混凝土基体的开裂应变,当试块达到极限应力后,其横向膨胀变形增大并开始产生竖向裂纹,此时钢纤维起到约束变形的作用,将混凝土所承受的压缩变形能转化为钢纤维的拉伸变形能,从而提高了粉煤灰 SCC 的轴压变形能力;然而,随着钢纤维数量的增多,钢纤维之间相互搭接结团,使其结构内部缺陷增加,从而在一定程度上降低了粉煤灰 SCC 的轴压变形能力。

由表6可知,加入钢纤维后,各试块的应变能和相对韧性较试块 SCC-0 明显提高,随着钢纤维体积分数的增加,各试块的应变能和相对韧性呈先增后减的趋势,但所有钢纤维增强粉煤灰 SCC 的应变能和相对韧性均大于试块 SCC-0。钢纤维体积分数为0.50%的试块 SCC-2 应变能和相对韧性最高,分别达到 $101.01 \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 1.03×10^{-3} ,相对试块 SCC-0 分别提高了53%和49%;钢纤维体积分数大于0.50%时,由于粉煤灰 SCC 的内部缺陷增多,造成试块应变能和相对韧性在一定程度上有所降低。这说明在粉煤灰 SCC 受力过程中,钢纤维的加入能够改变试块的受力形式,由集中受力变成分散受力,钢纤维的约束作用能够有效地抑制微裂纹产生,增大微裂纹扩展的行程,延长试块的开裂时间,从而提高粉煤灰 SCC 破坏时所吸收的能量,增大其应变能和相对韧性。然而,当钢纤维体积分数超过某一临界值时,钢纤维之间的“棚架”作用会使其流动性降低,钢纤维之间、钢纤维与水泥石之间界面过渡区的缺陷增多,导致其应变能和韧性会在一定程度上有所降低。

3 结论

(1)钢纤维增强粉煤灰 SCC 的工作性随钢纤维体积分数的增加而降低,当钢纤维体积分数大于0.75%时,其 T_{500} 值明显增大,流动性急剧下降。

(2)钢纤维对粉煤灰 SCC 抗压强度的影响不明显,但能够显著改善其弯拉性能,钢纤维体积分数为1.00%的钢纤维增强粉煤灰 SCC 的劈裂抗拉强度和抗折强度较纯粉煤灰分别提高了14%和12%。

(3)钢纤维增强粉煤灰 SCC 的极限应力 σ_0 随着钢纤维体积分数的增加而线性增加,峰值应变 ϵ_0 随钢纤维体积分数的增加逐渐减小,应变能 V_ϵ 和相对韧性 Γ 随钢纤维体积分数的增加呈先增后减的趋势。总体上钢纤维增强粉煤灰 SCC 的 σ_0 、 ϵ_0 、 V_ϵ 和 Γ 均高于纯粉煤灰 SCC;钢纤维体积分数为0.50%时,钢纤维增强粉煤灰 SCC 的 σ_0 、 ϵ_0 、 V_ϵ 和 Γ 与纯粉煤灰 SCC 相比分别提高了3%、35%、53%和49%。

参考文献:

- [1] LIU K Z, SHUI Z H, SUN T, et al. Effects of combined expansive agents and supplementary cementitious materials on the mechanical properties, shrinkage and chloride penetration of self-compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 211: 120-129.
- [2] 黄维蓉, 刘贞鹏, 张忠明, 等. 自密实混凝土的特点及性能研究综述 [J]. 混凝土, 2014(1): 108-110.
HUANG Weirong, LIU Zhenpeng, ZHANG Zhongming, et al. Summary of research on the characteristic and property of self-compacting concrete [J]. Concrete, 2014(1): 108-110. (in Chinese)
- [3] MAJAIN N, RAHMAN A B A, MOHAMED R N, et al. Effect of steel fibers on self-compacting concrete slump flow and compressive strength [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 513(1): 1-8.
- [4] SULTHAN F, SALOMA. Influence of hooked-end steel fibers on fresh and hardened properties of steel fiber reinforcement self-compacting concrete (SFRSCC) [J]. Journal of Physics Conference Series, 2019, 1198(3): 1-11.
- [5] SIDDIQUE R, KAUR G, KUNAL. Strength and permeation properties of self-compacting concrete containing fly ash and hooked steel fibres [J]. Construction and Building Materials, 2016, 103: 15-22.
- [6] 张晓燕, 曹晨杰, 孙丽, 等. 钢纤维混凝土轴压应力-应变曲线试验研究 [J]. 混凝土, 2013(5): 24-27.
ZHANG Xiaoyan, CAO Chenjie, SUN Li, et al. Experimental study on axial compressive stress-strain curve of SFRC [J]. Concrete, 2013(5): 24-27. (in Chinese)
- [7] 赵顺波, 赵明爽, 张晓燕, 等. 钢纤维轻骨料混凝土单轴受压应力-应变曲线研究 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(5): 181-190.
ZHAO Shunbo, ZHAO Mingshuang, ZHANG Xiaoyan, et al.

- Study on complete stress-strain curves of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete under uniaxial compression [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(5): 181-190. (in Chinese)
- [8] 权长青, 焦楚杰, 苏永亮, 等. 钢纤维及陶粒掺量对轻质混凝土基本力学性能的影响 [J]. *复合材料学报*, 2018, 35(5): 280-288.
- QUAN Changqing, JIAO Chujie, SU Yongliang, et al. Influence of steel fibre and haydite adding content on the basic mechanical properties of lightweight concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(5): 280-288. (in Chinese)
- [9] 杨久俊, 刘俊霞, 韩静宜, 等. 大流动度超高强钢纤维混凝土力学性能研究 [J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(1): 1-6.
- YANG Jiujun, LIU Junxia, HAN Jingyi, et al. Studies on mechanical property of high fluidity steel fiber reinforced ultra-high strength concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(1): 1-6. (in Chinese)
- [10] KHALOO A, RAISI E M, HOSSEINIP, et al. Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 51: 179-186.
- [11] 曾翠云, 李庆来, 陈兵. 自密实钢纤维超高强混凝土试验 [J]. *土木工程与管理学报*, 2017, 34(2): 29-32.
- ZENG Cuiyun, LI Qinglai, CHEN Bing. Experiments on the self-compacting steel fiber reinforced UHPC [J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2017, 34(2): 29-32. (in Chinese)
- [12] MINDESS S, YOUNG J F, DARWIN D. 混凝土 [M]. 吴科如, 张雄, 姚武, 等译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 304.
- MINDESS S, YOUNG J F, DARWIN D. Concrete [M]. WU Keru, ZHANG Xiong, YAO Wu, et al, Translated. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 304. (in Chinese)
-
- (上接第 86 页)
- LUO Daming, NIU Ditao. Influences of water-to-cement ratio and curing condition on water absorption of internal curing concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(1): 169-177. (in Chinese)
- [27] 刘伟, 邢锋, 谢友均. 矿物掺合料对混凝土毛细吸水性的影响 [J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2008, 25(3): 303-307.
- LIU Wei, XING Feng, XIE Youjun. Effect of mineral admixture on capillary water absorption of concrete [J]. *Journal of Shenzhen University (Science & Engineering)*, 2008, 25(3): 303-307. (in Chinese)
- [28] NEVILLE A. Chloride attack of reinforced concrete: An overview [J]. *Material and Structures*, 1995, 28: 63-70.
- [29] WINNEFELD F, LOTHENBACH B. Hydration of calcium sulfoaluminate cements—Experimental findings and thermodynamic modeling [J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40: 1239-1247.
- [30] ANTIOHOS S, TSIMAS S. Activation of fly ash cementitious systems in the presence of quicklime Part II: Nature of hydration products, porosity and microstructure development [J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(12): 2123-2131.
- [31] ISMAIL I, BERNAL S A, PROVIS J L, et al. Modification of phase evolution in alkliactivated blast furnace slag by the incorporation of fly ash [J]. *Cement and Concrete Research*, 2014, 45: 125-135.
- [32] BIRNIN-YAURI U, GLASSER F P. Friedel's salt, $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6(\text{Cl}, \text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: Its solid solutions and their role in chloride binding [J]. *Cement and Concrete Research*, 1998, 28: 1713-1723.
- [33] YUEY F, WANG J J, MUHAMMED BASHEER P A, et al. Raman spectroscopic investigation of Friedel's salt [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2018, 86: 306-314.
- [34] DIAMOND S. Mercury porosimetry—An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(10): 1517-1525.
- [35] ZAJAC M, HOOCK S, STABLER C, et al. Effect of hydration kinetics on properties of compositionally similar binders [J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 101: 13-24.