

纤维对混凝土的损伤、裂缝曲折度及裂缝恢复的影响

丁一宁*, 李林泽, 曾伟

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 大连 116024)

摘要: 通过混凝土圆饼劈裂试验预制准确宽度的裂缝, 研究了钢纤维(SF)、聚丙烯(PP)长纤维对荷载作用下混凝土的损伤、裂缝曲折度及裂缝恢复率的影响。使用数码显微镜(Supereyes)和 Image Pro Plus 图像处理软件对不同位置裂缝实际宽度进行测量。通过测量劈拉作用下穿过圆饼试件的超声波速, 分析、对比了各组试件超声波速与裂缝宽度、损伤变量因子之间的关系。研究表明: 纤维的桥接作用使裂缝扩展得以控制, 同时提高了卸载时的裂缝恢复程度和裂缝曲折度。SF 掺量为 55 kg/m^3 的混凝土试件比 SF 掺量为 25 kg/m^3 的混凝土试件, 曲折度增加 26.9%, 混杂使用 PP 长纤维和 SF 对提高混凝土裂缝表面曲折度有显著的正混杂效应。桥接于裂缝处的 SF 有利于超声波的传播, 减缓超声波速损失。超声波速随着裂缝宽度的增加而逐渐降低、且与裂缝之间存在较好的指数关系, 可用于表征混凝土内部裂缝的扩展。

关键词: 纤维; 超声波; 劈裂试验; 曲折度; 裂缝恢复

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2019)10-2439-09

Fibers effects on the concrete damage, crack tortuosity and crack recovery

DING Yining*, LI Linze, ZENG Wei

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Through the disc splitting testing, the exact crack width of concrete has been prefabricated. In this work, the effects of steel fiber(SF) and macro polypropylene(PP) fiber on tortuosity, recovery rate and damage of concrete cracks were studied. The crack widths at different locations were measured using the digital microscope (Supereyes) and Image Pro Plus (an image processing software). In order to analyze the relationship between ultrasonic velocity and crack width as well as damage variable factors of different specimens, the ultrasonic velocity passing through the concrete disc under splitting load was also measured. The experimental results show that the crack widening can be controlled by the fiber bridging effect, and the crack recovery and tortuosity of crack can be increased simultaneously. Compared with the concrete sample with a SF content of 25 kg/m^3 , the crack tortuosity of the sample with a SF content of 55 kg/m^3 increases by 26.9%; the hybrid use of macro PP fibers and SF indicates significant positive hybrid effect on the increasing of crack surface tortuosity. The steel fibers acrossing the cracks may improve the propagation of ultrasonic wave and decline the loss of the ultrasonic velocity. The ultrasonic velocity may decrease with the increasing of the crack width, and there is an exponential relationship between the crack width and ultrasonic velocity, which can be used to illustrate the crack development of concrete matrix.

Keywords: fiber; ultrasonic; splitting testing; tortuosity; crack recovery

收稿日期: 2018-10-18; **录用日期:** 2018-11-21; **网络出版时间:** 2018-12-27 16:18

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181218.003>

基金项目: 国家自然科学基金(51578109)

通讯作者: 丁一宁, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高性能混凝土 E-mail: ynding@hotmail.com

引用格式: 丁一宁, 李林泽, 曾伟. 纤维对混凝土的损伤、裂缝曲折度及裂缝恢复的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(10): 2439-2447.

DING Yining, LI Linze, ZENG Wei. Fibers effects on the concrete damage, crack tortuosity and crack recovery[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(10): 2439-2447 (in Chinese).

混凝土构件在正常使用阶段是带裂缝工作的。Armandei 等^[1]研究了钢纤维(SF)对混凝土裂缝粗糙度的影响,发现随着纤维掺量的增加,混凝土裂缝粗糙度逐渐提高。Picandet V 等^[2]研究了 SF 对高强混凝土渗透性及裂缝曲折度和粗糙度的影响,试验结果表明,纤维的掺入提高了裂缝的曲折度和粗糙度,显著降低了混凝土的渗透性。王卿^[3]通过对纤维混凝土断面的激光扫描试验,定量分析了纤维对裂缝曲折度和分形特性的影响。

混凝土裂缝形态是一种三维结构,不同学者曾使用 CT 技术^[4]和中子射线透照技术^[5]来分析裂缝的三维结构,但这两项技术虽可获得裂缝断面内部的形态但对试验仪器要求过高,因此相关学者还是更多地使用二维技术研究裂缝形态,主要包括摄像及录像。除了分析裂缝形态外,目前无损探伤技术也被用于混凝土损伤的研究,如超声回弹法等。超声波无损检测法在一些国际相关研究机构得到较广泛应用^[6-7],国内根据相关研究撰写了《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》^[8],王怀亮等^[9]通过建立损伤因子和混凝土超声波速之间的关系来研究混凝土裂缝形态。Seher 等^[10]通过超声波检测分析了裂缝深度与超声波速之间的关系。

为了研究开裂后混凝土的裂缝曲折度,关键在于准确地引入可控裂缝;Desmettre 等^[11]对棱柱体混凝土试件施加垂直方向压力产生沿长度方向裂缝,但引入裂缝宽度难以控制,Ismail 等^[12]尝试通过挤压楔形钢柱中空圆柱体致使试件开裂,Yi 等^[13]采用了人工拼接的方式预制裂缝,但两个裂缝面位置难以控制,无法准确模拟裂缝,Wang 等^[14]通过混凝土圆饼的劈裂试验,首次采用圆饼反馈劈裂试验预制裂缝宽度。通过以上研究方法预制不同宽度裂缝,无法准确控制裂缝扩展,且预制的裂缝宽度较随机。

本文参考混凝土圆饼的劈裂试验预制可控裂缝,采用数码显微镜(Supereyes,放大倍数为 500)对不同位置处的裂缝进行测量,利用 Image Pro Plus(IPP)软件分析卸载后裂缝宽度和裂缝曲折度,利用超声波无损检测法研究裂缝宽度与裂缝损伤之

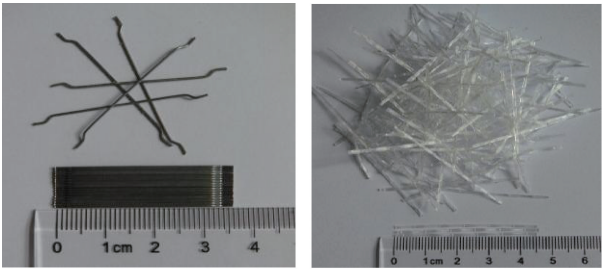
间的关系。

1 试验方法

1.1 原材料及配合比

试验采用大连小野田水泥有限公司生产的强度等级为 42.5R 的普通硅酸盐水泥(P·O42.5R);细骨料采用 II 区级配的优质河砂;粒径为 0~5 mm;细度模数为 2.6;粗骨料为粒径 5~15 mm 的连续级配碎石;硅灰平均粒径在 0.1~0.15 μm 之间,SiO₂ 含量为 85%~96%,氯离子含量≤0.02%,比表面积≥15 m²/g,火山灰活性指标≥90%;采用 Dramix 65/35-BN 端部弯钩型 SF,选用维克聚丙烯(PP)长纤维 WK-8,减水剂为聚羧酸高效减水剂,减水率为 30%,纤维外观参数见图 1。主要性能参数见表 1。参照 CECS13:2009^[15]操作规程,将新拌混凝土装模振捣,所有试件均在预制圆饼模具中浇筑成型,模具高 40 mm,直径 100 mm。24 h 后拆模,混凝土配合比见表 2。

混凝土设计强度等级为 C40,SF 的掺量为 25 kg/m³、35 kg/m³、55 kg/m³;PP 长纤维的掺量为 4 kg/m³;SF25PP4 代表 SF、PP 长纤维掺量分别为 25 kg/m³、4 kg/m³,其余编号以此类推。各组纤维掺量及混凝土 28 d 抗压强度见表 3。



(a) Steel fiber (SF) (b) Macro polypropylene PP fibers

图 1 纤维外观形状

Fig. 1 Geometry of fibers

1.2 圆饼劈裂试验

参照 Wang 等^[14]圆饼劈裂试验使用液压伺服试验机,采用位移闭环控制,加载速率为 0.05 mm/min。按照纤维类型与掺量的不同将试件分为 7 组,每组

表 1 纤维性能参数

Table 1 Properties of fiber

Fiber type	Length/mm	Diameter/mm	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa
Dramix RC-65/35-BN SF	35	0.55	>1 150	200
WK-8 PP fiber	45	0.74	490	3.9

表 2 混凝土试件配合比

Table 2 Mix proportion of the concrete specimens

Cement	Water	Sand	Gravel	Silica fume	Super plasticizer
473.8	221.2	829.5	826.5	39.5	5.57

表 3 不同聚丙烯(PP)长纤维和钢纤维(SF)掺量的混凝土立方体 28 d 抗压强度

Table 3 28 d compressive strength of concrete with different contents of macro polypropylene(PP) fibers and steel fibers(SF)

Group	SF/(kg·m ⁻³)	PP fiber/(kg·m ⁻³)	Compressive strength/MPa
PC	0	0	52.91
PP4/PC	0	4	51.15
SF25/PC	25	0	52.35
SF35/PC	35	0	54.43
SF55/PC	55	0	51.43
SF25-PP4/PC	25	4	52.22
SF35-PP4/PC	35	4	53.03

Note: PC—Plain concrete.

6 个圆饼试件。在试件两侧径向方向分别固定位移传感器(LVDT)以测量加载过程中由于试件开裂而产生的径向位移, 试验加载前预先在圆饼上下两端与加载头接触处放置木合板, 使混凝土试件受力均匀, 圆盘劈裂试验装置如图 2 所示。



图 2 圆盘劈裂试验装置

Fig. 2 Splitting test setup

劈裂试验结束后, 为了精确评估裂缝扩展宽度, 采用数码显微镜(Supereyes, 放大倍数 500)对不同位置处的裂缝进行测量, 如图 3 所示。裂缝采集图像导入 Image Pro Plus(IPP)软件计算裂缝实际长度与曲折度, 如图 4 所示, 裂缝实际长度和曲折度以每组 6 个试件试验结果的平均值作为测定值。

1.3 超声无损检测法

与掺入 PP 长纤维的试件相比, 掺加 SF 试件的裂缝扩展速率更容易控制, 试件不会发生突然的

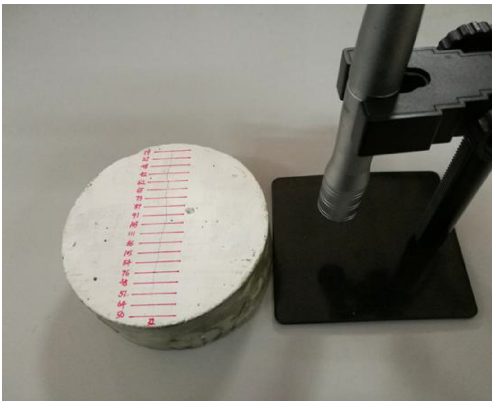


图 3 裂缝宽度测量

Fig. 3 Measuring crack width

脆性断裂。为了保证超声波检测在试验过程中的可操作性和安全性, 试验选用 SF25/素混凝土(PC)、SF35/PC、SF55/PC 三种 SF 掺量混凝土试件, 每种 SF 掺量的混凝土试件为一组, 每组 6 个试件, 以 6 个试件试验结果的平均值作为测定值。试验加载方式与上述相同。采用 PROCEQ-TICO 超声波检测仪, 超声波频率为 54 kHz。首先对试件侧面进行打磨处理, 得到彼此平行的两个表面, 以确保超声波探头与混凝土试件接触良好, 其次, 在超声波探头与试件之间涂抹适量的黄油使其彼此无缝隙。超声波速法检测混凝土裂缝试验装置如图 5 所示。

当纵向超声波穿过混凝土等固体材料时, 波速 v_0 与材料的密度 ρ 、动弹性模量 E_0 和泊松比 ν 存在如下关系^[16]:

$$v_0^2 = \frac{E_0}{\rho} \times \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

(1)

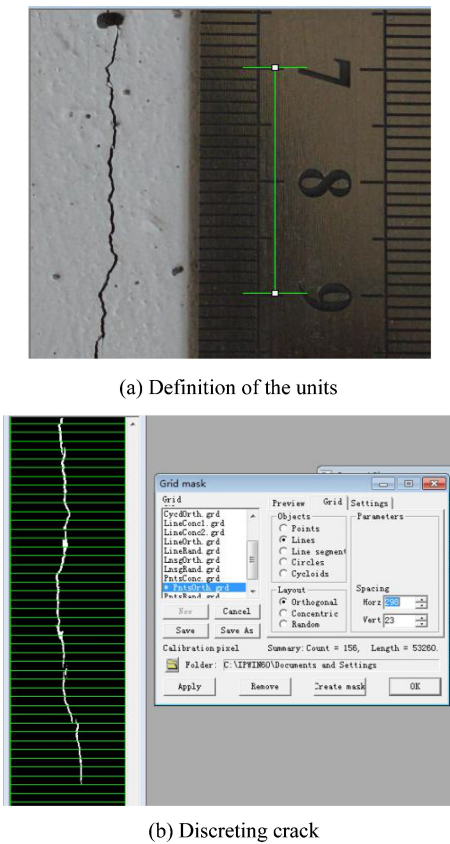


图 4 Image Pro Plus(IPP)软件测量过程
Fig. 4 Measurement process with Image Pro Plus(IPP)



图 5 超声波速法检测混凝土裂缝
Fig. 5 Detecting concrete cracks based on changes of ultrasonic velocity

如不考虑加载过程对泊松比 ν 和密度 ρ 的影响, 则不同荷载作用下存在如下关系^[9]:

$$v_t^2 = \frac{E_t}{\rho} \times \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \tag{2}$$

其中: v_t 为不同荷载水平 t 下的波速; E_t 为不同荷载水平 t 下的有效动弹性模量。参考损伤力学中对

损伤变量 D_d 的定义:

$$D_d = 1 - \frac{E_t}{E_0} \tag{3}$$

将式(1)和式(2)代入式(3), 可得利用超声波速表示的损伤变量^[17]:

$$D_d = 1 - \frac{v_t^2}{v_0^2} \tag{4}$$

其中, v_0 和 v_t 分别为初始及不同荷载水平 t 下的超声波速度。通过损伤变量 D_d 对超声波速进行分析, 混凝土试件的初始状态为 0, D_d 值越小, 混凝土基体越密实。通过 D_d 的变化可以反映不同荷载水平对混凝土内部微裂缝的影响。

2 结果与分析

2.1 混凝土裂缝曲折度

混凝土裂缝曲折度的计算方法如图 6 及下式所示:

$$L_0 = N\delta \tag{5}$$

$$L_t = \sum_{i=1}^N \sqrt{[z(i) - z(i-1)]^2 + \delta^2} \tag{6}$$

其中: $z(i)$ 和 $z(i-1)$ 分别为 i 、 $i-1$ 点对应的高度值; δ 为单元尺寸; N 为单元划分个数; 裂缝曲折度 $\tau = L_t/L_0$ 。

混凝土试件裂缝形态如图 7 所示。沿裂缝开展方向测量混凝土试件直径方向相关各点(图 3)处的裂缝宽度, 研究其变化规律, 可以看出: 与素混凝土试件(PC)和合成纤维增强混凝土试件(PP4/PC)相比, SF 试件的裂缝扩展路径先沿着直径方向, 随着 SF 掺量的增加, 纤维在裂缝间产生桥接效应更加显著, 从而使裂缝扩展路径逐渐弯曲。

通过数码显微镜 Supereyes 与 IPP 图像处理软件, 对试件裂缝曲折度进行分析。采用 IPP 图像处理软件来提取裂缝实际长度 L_t , 并通过裂缝曲折度 τ 来分析不同纤维掺量和类型对裂缝走向的影响, 结果如图 8 所示。

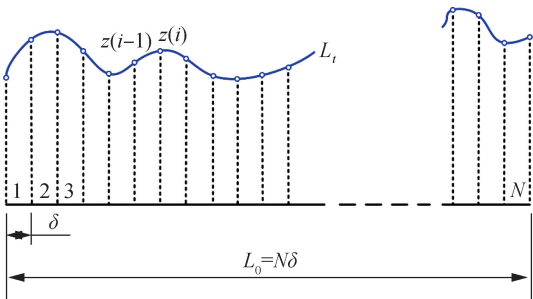


图 6 混凝土裂缝曲折度计算方法
Fig. 6 Method for calculating crack tortuosity of concrete

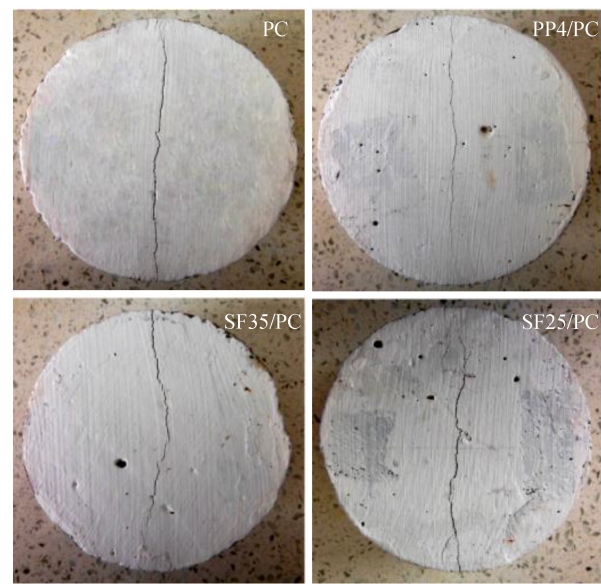


图 7 混凝土试件裂缝形态计算方法

Fig. 7 Method for calculating crack pattern of concrete specimens

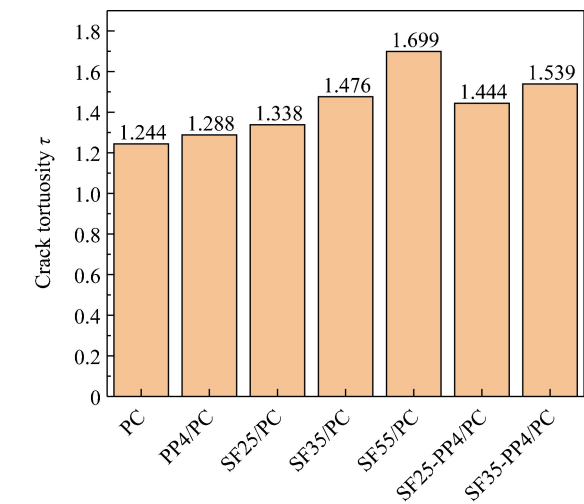


图 8 纤维对混凝土裂缝曲折度的影响

Fig. 8 Effect of fiber on crack tortuosity of concrete

表 4 混凝土试件实际裂缝长度及裂缝曲折度统计
Table 4 Analysis of actual crack length and crack tortuosity
of concrete specimens

Group	Length L_0 /mm	Length L_t /mm	τ
PC	100	124.4	1.244
PP4/PC	100	128.8	1.288
SF25/PC	100	133.8	1.338
SF35/PC	100	147.6	1.476
SF55/PC	100	169.9	1.699
SF25-PP4/PC	100	144.4	1.444
SF35-PP4/PC	100	153.9	1.539

Note: τ —Crack tortuosity.

从图 8 和表 4 可看出, 单掺 SF 时, 掺量越高,

曲折度越大。SF25/PC、SF35/PC、SF55/PC 混凝土试件比 PC 素混凝土试件曲折度分别增加 7.6%、18.6%、36.6%; PP4/PC 比 PC 素混凝土试件曲折度增加 3.5%; SF25-PP4/PC 比 PC 曲折度增加 16.1%, SF35-PP4/PC 比 PC 曲折度增加 23.7%。当纤维混杂产生的效应大于单掺不同纤维产生的效应之和时, 可产生对混凝土裂缝曲折度的正混杂效应, 而负混杂效应表示为混掺纤维产生的效应小于单掺不同纤维产生的效应之和^[18]。以复掺混杂纤维产生的效应与不同单掺纤维产生的效应之和的比值作为混杂效应系数, 当混杂效应系数大于 1 时为正混杂效应, 小于 1 时为负混杂效应, 根据试验数据, SF35-PP4/PC 和 SF25-PP4/PC 混杂效应系数均大于 1, 表明在一定范围内, PP 长纤维和 SF 混杂对提高混凝土裂缝表面曲折度有正混杂效应。对于素混凝土试件, 由于裂缝往往集中出现一条, 开展宽度较大, 当混凝土受拉区达到混凝土极限拉应变时, 混凝土开裂即承载力丧失, 发生脆性断裂。而随着纤维的加入, 裂缝间纤维的桥接作用如图 9 所示。可见, 纤维提高混凝土韧性^[19], 使裂缝的扩展得以限制, 提高了裂缝的曲折性。



图 9 纤维的桥接作用

Fig. 9 Anti-cracking effect of fibers

2.2 SF 对混凝土裂缝恢复的影响

纤维桥接裂缝, 改善裂缝形态, 对裂缝的进一步扩展起限制作用, 影响卸载时裂缝的恢复程度^[20], 通过对卸载前后 SF25/PC、SF35/PC、SF55/PC 混凝土试件裂缝宽度进行分析, 研究 SF 对卸载后混凝土裂缝恢复的影响, 结果如图 10 和表 5 所示。从图 10 可以看出, 卸载后的裂缝宽度都发生不同程度的恢复。当卸载前裂缝宽度为 305 μm 时, SF25/PC 混凝土试件卸载后裂缝宽度

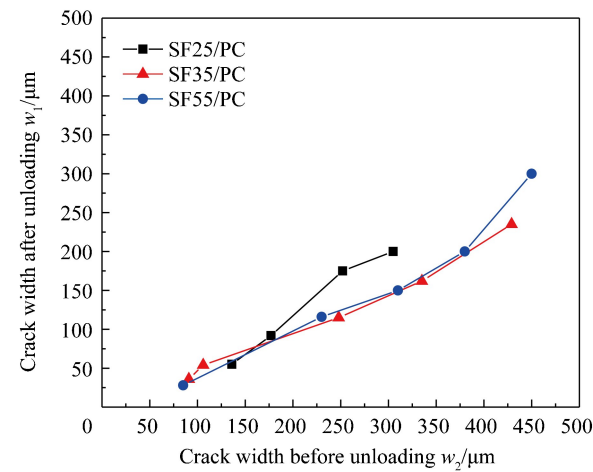


图 10 SF 对混凝土裂缝恢复的影响

Fig. 10 Effect of SF on crack recovering of concrete

表 5 混凝土裂缝恢复量

Table 5 Recovering level of the crack of concrete

Group	$w_2/\mu\text{m}$	$w_1/\mu\text{m}$	$R= (w_2-w_1)/w_2 /\%$
SF25/PC	135	55	59.3
	177	92	48.0
	252	175	30.6
	305	205	32.8
SF35/PC	91	36	60.4
	106	54	49.1
	248	115	53.6
	335	162	51.6
SF55/PC	429	235	45.2
	85	28	67.1
	230	116	49.6
	300	150	50.0
SF55/PC	380	200	47.4
	450	300	33.3

Note: w_2 , w_1 —Crack width before and after unloading.

为 205 μm ，裂缝恢复值为 100 μm ；当加载时的裂缝宽度相同时，SF35/PC、SF55/PC 混凝土试件裂缝恢复值约为 150 μm ，试验结果表明，当加载时的裂缝宽度相同时，随着 SF 掺量从 25 kg/m^3 增加到 55 kg/m^3 ，裂缝恢复量逐渐增加。

w_1 表示卸载后裂缝宽度， w_2 表示卸载前裂缝宽度，以卸载后裂缝恢复量与卸载前裂缝宽度的比值乘以 100% 作为相对裂缝恢复率 R 。分析表 5 可发现，SF25 混凝土试件，当卸载前裂缝宽度为 305 μm 时，卸载后相对裂缝恢复率 $R=32.8\%$ ；SF55 混凝土试件，卸载前裂缝宽度为 300 μm 时， $R=50\%$ 。可以看出，SF25 混凝土试件，当卸载前的裂缝宽度为 135 μm 时，相应的 R 值为 59.3%；当卸载前裂缝宽度为 305 μm 时， R 值降为 32.8%，

卸载前裂缝宽度从 135 μm 增加到 305 μm ， R 值不断减小；当 SF 掺量为 35 kg/m^3 和 55 kg/m^3 时，相对裂缝恢复率随着裂缝宽度的增大均逐渐减小。

上述结果表明，SF 掺量越高，裂缝的恢复作用越显著，在裂缝截面分布的纤维根数越多，对裂缝的阻裂、桥接作用越明显。对于掺入 SF 的混凝土试件，由于卸载后 SF 与混凝土裂缝之间的桥接作用，裂缝会发生不同程度的恢复，且随着试件的裂缝宽度进一步增大，相对裂缝恢复率逐渐减小。

2.3 混凝土超声波速与混凝土裂缝宽度的关系

通过圆饼劈拉试验，对比超声波速随裂缝宽度的变化规律，测量劈拉试验过程中经过试件的超声波速，对比各试件裂缝宽度与超声波速之间变化规律，裂缝宽度与超声波速之间关系散点图如图 11 所示；试验结果表明，随着裂缝宽度的不断增加，超声波速呈指数下降趋势；在裂缝位于 0~90 μm 时，超声波速从 4 200 m/s 降低至 3 800 m/s ，降低了 9.5%；当裂缝宽度在 90~300 μm 之间时，裂缝宽度增加了 210 μm ，但超声波速从 3 800 m/s 降低到 3 500 m/s 左右，仅降低了 7.9%；当裂缝宽度大于 300 μm 后，超声波速下降趋势趋于平稳。裂缝宽度在不同的区间时，超声波速的下降与混凝土基体内部微裂缝的产生与扩展有关；在不同介质中超声波速存在明显差异，在混凝土和空气中的传播速度分别为 4 000 m/s 和 340 m/s ，随着内部微裂缝的产生和逐渐扩展，超声波速传递介质由混凝土逐渐转变为空气，混凝土基体裂缝间充满空气，超声波速迅速降低。当裂缝宽度为 90~300 μm 时，试件的微裂缝开始逐渐扩展，基体内部裂缝数量开始增加，超声波速随着裂缝宽度的增加平稳降低；

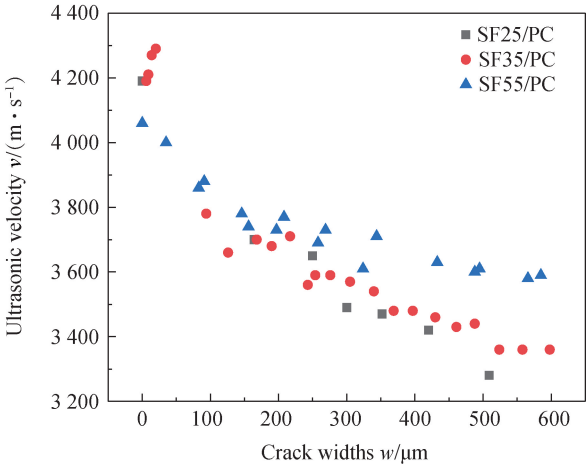


图 11 混凝土超声波速随不同裂缝宽度变化关系

Fig. 11 Relationship between ultrasonic velocity and crack width

当裂缝宽度大于 300 μm 后, 微裂缝继续扩展、交汇, 基体中两个裂缝截面已经相互脱离, 随着裂缝宽度的进一步扩展, 超声波速出现平稳下降的趋势。

裂缝宽度与超声波速试验数据拟合结果如图 12 所示。各组试件的决定系数 R^2 分别为 0.997、0.998、0.988, 均大于 0.98, 此拟合函数与试验数据拟合良好, 超声波传播速度与裂缝宽度满足较好的指数型关系:

$$v = a + be^{-kb_L} \tag{7}$$

其中: v 为超声波速 (m/s); a 、 b 、 k 为对应的拟合参数; b_L 为水平径向裂缝宽度 (μm)。

由图 12 可知, SF25/PC、SF35/PC 混凝土试件, 当裂缝宽度从 0 μm 到 600 μm 变化时, 其超声波速从 4 200 m/s 降低为 3 300 m/s, 降低了 21.4%; SF55 混凝土试件超声波速从 4 060 m/s 降低到 3 580 m/s, 下降了 11.8%, 降低幅度相对较小, 这是由于混凝土开裂后纤维发挥作用导致。在混凝土裂缝为 0~90 μm 时, 纤维的掺入对混凝土基体影响效果不明显, 随着外荷载的增大和裂缝进一步扩展, 裂缝面彼此相互分离, 纤维在裂缝间产生桥接效应, 使裂缝的进一步扩展得以限制, 有利于超声波的传播, 降低了超声波速下降速率。

2.4 混凝土裂缝宽度与损伤变量的关系

图 13 为裂缝宽度与损伤变量的拟合曲线。其中裂缝宽度 w 为自变量, 损伤变量 D_d 为因变量, D_d 值越小, 混凝土损伤越少, 基体越密实。可以看出, 随着裂缝宽度的增加, 损伤因子 D_d 呈现逐渐上升的趋势。

SF25/PC、SF35/PC 混凝土试件, 当裂缝从 0 μm 到 200 μm 变化时, 其损伤变量 D_d 从 0 增加到 0.2 左右; 而 SF 掺量为 55 kg/m³ 时, 损伤参数 D_d 从 0 变为 0.15, 结果显示, SF 的掺入可有效降低混凝土损伤发展速率; 当裂缝宽度大于 300 μm 后, 损伤变量增速趋于平稳, 超声波速与损伤变量可以反映混凝土试件内部微裂缝的扩展情况, 结果显示, 损伤变量 D_d 和超声波传播速度衡量混凝土裂缝扩展具有一致性。

3 结 论

在劈裂试验的基础上, 研究不同纤维种类、掺量对混凝土裂缝曲折度、裂缝损伤及裂缝恢复的

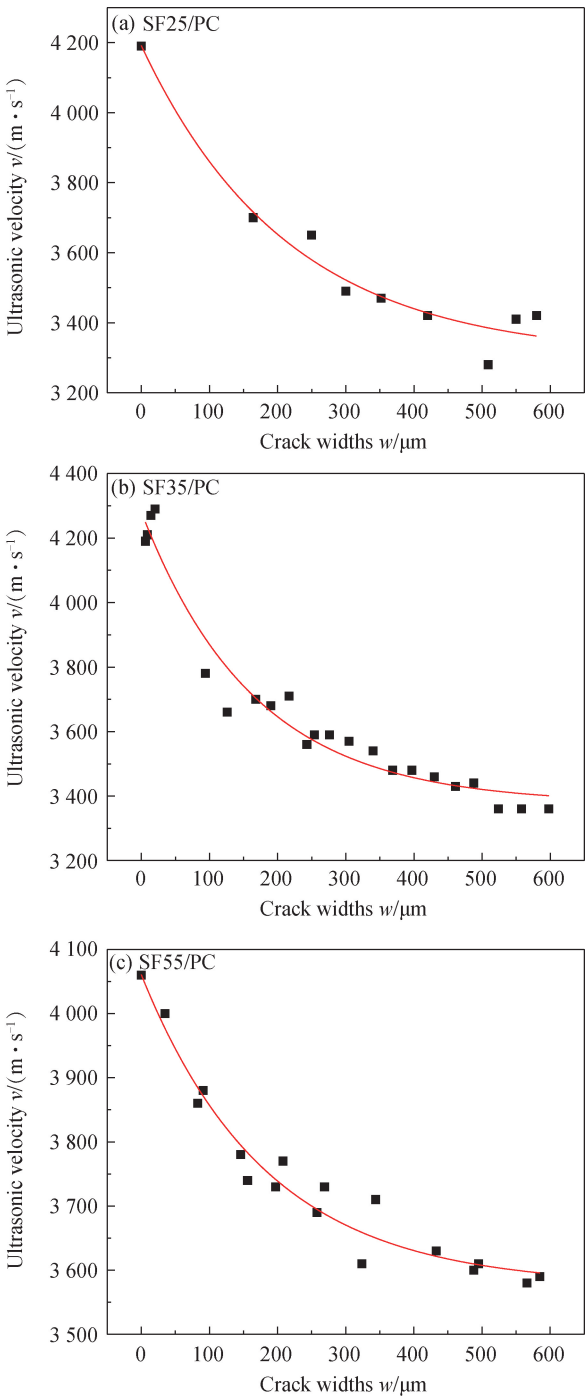


图 12 超声波速与混凝土裂缝宽度拟合结果

Fig. 12 Exponential fitting analysis of relationship between ultrasonic velocity and concrete crack width

影响。

(1) 纤维与混凝土裂缝之间的桥接作用可提高裂缝曲折度、限制裂缝的进一步扩展; 随着纤维掺量的增加, 裂缝曲折度逐渐提高。复掺混杂纤维可取得更好的效果, 混杂效应系数均大于 1, 在本文研究的纤维类型及掺量范围内, 混掺钢纤维(SF)和

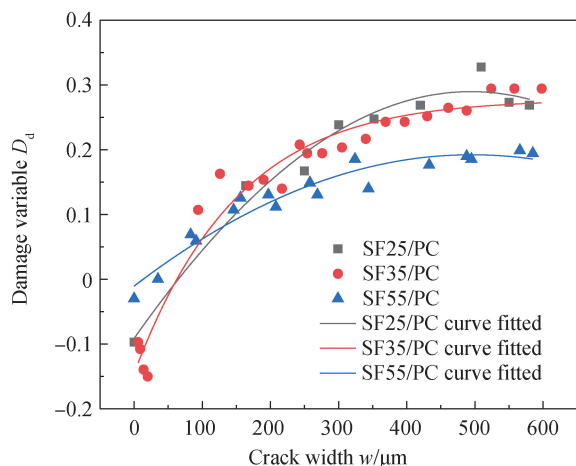


图 13 损伤变量与混凝土裂缝宽度的关系

Fig. 13 Relationship between damage variable and concrete crack width

聚丙烯(PP)长纤维对于提高混凝土裂缝的曲折度有着明显的正混杂效应。

(2) SF 掺量越高,裂缝的恢复作用越明显,在裂缝截面分布的纤维根数越多,对裂缝扩展的限制作用越显著;随着混凝土裂缝宽度增加,裂缝恢复率逐渐减小。

(3) 随着纤维的掺入,桥接在裂缝处的纤维使裂缝的进一步扩展得以限制,延缓了因裂缝宽度变大而导致的超声波速的下降。随着混凝土裂缝宽度的增加,超声波速迅速降低,损伤变量逐渐增大。对裂缝宽度与超声波速进行的拟合分析表明决定系数均大于 0.98,拟合效果较好,超声波速和损伤变量可以反映混凝土试件内部微裂缝的扩展情况,损伤变量因子 D_d 与超声波速衡量混凝土裂缝扩展具有一致性。

参考文献:

[1] ARMANDEI M, DE SOUZA SANCHEZ FILHO E. Correlation between fracture roughness and material strength parameters in SFRCs using 2D image analysis[J]. Construction and Building Materials, 2017, 140: 82-90.

[2] PICANDET V, KHELIDJ A, BELLEGOU H. Crack effects on gas and water permeability of concretes[J]. Cement & Concrete Research, 2009, 39(6):537-547.

[3] 王卿. 纤维对混凝土开裂后渗透性及裂缝形态的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.

WANG Qing. Effect of fibers on permeability and crack geometry of cracked concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017 (in Chinese).

[4] LANDIS E N, ZHANG T, NAGY E N, et al. Cracking, damage and fracture in four dimensions[J]. Materials and Structures, 2007, 40(4): 357-364.

[5] TOROPOVS N, MONTE F L, WYRZYKOWSKI M, et al. Real-time measurements of temperature, pressure and moisture profiles in high-performance concrete exposed to high temperatures during neutron radiography imaging [J]. Cement & Concrete Research, 2015, 68:166-173.

[6] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test method for pulse velocity through concrete: ASTM C-597[S]. Philadelphia: ASTM, 2009.

[7] ACI. Control of cracking in concrete structures: ACI 224R-90[S]. USA: ACI, 2000: 43.

[8] 中国工程建设标准化协会. 超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程: CECS 02-2005 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.

China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for testing concrete strength by ultrasonic-rebound combined method: CECS 02-2005 [S]. Beijing: Standard Press of China, 2005 (in Chinese).

[9] 王怀亮, 宋玉普. 不同尺寸混凝土试件受压状态下超声波传播特性研究[J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(1): 90-94.

WANG Huailiang, SONG Yupu. Ultrasonic pulses behavior in various-size concrete specimens under compression[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2007, 47(1):90-94 (in Chinese).

[10] SEHER M, IN C W, KIM J Y, et al. Numerical and experimental study of crack depth measurement in concrete using diffuse ultrasound[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2013, 32(1):81-92.

[11] DESMETTRE C, CHARRON J P. Novel water permeability device for reinforced concrete under load[J]. Materials & Structures, 2011, 44(9):1713.

[12] ISMAIL M, TOUMI A, FRANCOIS R, et al. Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in cracked mortar samples[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(8): 1106-1111.

[13] YI S T, HYUN T Y, KIM J K. The effects of hydraulic pressure and crack width on water permeability of penetration crack-induced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(5): 2576-2583.

[14] WANG K, JANSEN D C, SHAH S P, et al. Permeability study of cracked concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(3): 381-393.

[15] 中国工程建设协会. 纤维混凝土试验方法标准: CECS:2009

[S]. 北京:中国计划出版社, 2010.
China Association for Engineering Construction Standardization. Standard test methods for fiber reinforced concrete; CECS:2009[S]. Beijing:China Planning Press, 2010 (in Chinese).

[16] QASRAWI H Y, MARIE I A. The use of USPV to anticipate failure in concrete under compression[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(12): 2017-2021.

[17] HOSEINI M. Effect of compressive loading on transport properties of cement-based materials[D]. Edmonton: University of Alberta, 2013.

[18] BANTHIA N, MAJDZADEH F, WU J, et al. Fiber synergy in hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC) in flexure and direct shear[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 48: 91-97.

[19] 邓宗才. 混杂纤维增强超高性能混凝土弯曲韧性与评价方法[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6):1274-1280.
DENG Zongcai. Flexural toughness and characterization method of hybrid fibers reinforced ultra-high performance concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(6): 1274-1280 (in Chinese).

[20] 任县伟. 纤维对混凝土力学性能及开裂后抗渗性能的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
REN Xianwei. Effects of fibers on mechanical properties and permeability of cracked concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016 (in Chinese).