

## 钢纤维 RAC 抗冲击性能试验研究与统计分析

何文昌

湛江科技学院建筑工程学院 广东湛江

**【摘要】**对钢纤维掺量为 0.5%、1.0% 和 1.5% 的再生混凝土 (RAC) 进行了自由落锤抗冲击性能试验研究, 并利用数理统计的方法对钢纤维 RAC 试件初裂和破坏抗冲击次数的分布特征进行了拟合分析。试验结果表明: 掺入钢纤维显著改善了 RAC 的初裂和破坏的抗冲击能力, 并且改善效果随钢纤维掺量的增多而提高。拟合分析结果表明: 不同钢纤维掺量 RAC 试件的初裂和破坏抗冲击次数的分布规律均较好地服从于对数正态分布特征。

**【关键词】**钢纤维; 再生混凝土; 抗冲击性能; 对数正态分布

**【基金项目】**广东省教育厅普通高校青年创新人才项目 (2021KQNCX139)

### Experimental study and statistical analysis for impact resistance of steel fiber reinforced RAC

Wenchang He

College of Civil Engineering and Architecture, Zhanjiang University of Science and Technology, Zhanjiang

**【Abstract】** The drop-weight impact resistance tests were carried out on recycled aggregate concrete (RAC) specimens reinforced with 0.5%, 1.0% and 1.5% steel fiber, respectively. The mathematical statistical method was adopted to fit the distribution of initial and failure crack blow numbers. The experimental results indicate that the incorporation of the steel fiber significantly improved the impact resistance of RAC, and the impact resistance capacity of initial and failure crack increases with the increase of steel fiber content. The fitting results show that the impact resistance numbers of initial and failure crack are well subordinated to log-normal distribution.

**【Keywords】** Steel fiber; Recycled aggregate concrete; Impact resistance; Log-normal distribution

将一定比例的钢纤维掺入混凝土基体中, 钢纤维发挥良好的桥接作用, 可以很好地抑制混凝土基体内部原生裂纹的萌生和阻滞宏观裂缝的扩展, 从而提高混凝土由主拉应力控制的抗剪、抗弯及抗冲击性能<sup>[1,2]</sup>。近年来, 为减少建筑垃圾的排放, 实现绿色建筑发展目标, 世界各国积极开展再生混凝土 (recycled aggregate concrete, RAC) 的探讨与研究——将废旧砖、瓦和废弃混凝土进行回收、破碎和清洗等处理后制成再生骨料, 将其部分或全部取代天然骨料配制 RAC, 研究 RAC 的物理、力学和耐久性能等。已有的研究<sup>[3,4]</sup>表明: 由于再生骨料的表观密度小、强度低、吸水率高等缺陷, 导致 RAC 的耐久性和力学性能均低于普通混凝土。钢纤维具有优异的力学特性, 而 RAC 具有良好的经济效益, 将两者有机结合起来, 优势互补, 具有非常广阔的应

用前景。目前, 国内外学者针对钢纤维增强 RAC (SFRAC) 静态力学性能的设计方法和理论分析进行了大量研究, 而针对动态力学性能方面的文献报道相对少。但是, 绝大多数工程在服役期间经常受到各种偶发性的冲击和脉冲荷载, 动态力学性能研究对工程设计的安全性及经济性非常重要<sup>[5-7]</sup>。为此, 本文采用美国 ACI544 委员会推荐的混凝土自由落锤抗冲击试验方法, 钢纤维体积率为 0.5%、1.0% 和 1.5% 的 SFRAC 进行抗冲击试验研究。同时, 采用数理统计理论对数正态分布函数对 SFRAC 抗冲击试验结果的分布特征进行拟合分析。

### 1 试验概况

#### 1.1 试验原材料与配合比

本研究所采用的水泥、再生粗骨料及细骨料的物理性能详见文献[8]。为增加混凝土的和易性, 采

用高效减水剂, 减水率为 20%~30%; 拌合水为自来水; 端钩形钢纤维, 平均长度为 30mm, 长径比为 40, 抗拉强度为 1100MPa。试验设计了素混凝土 RAC-0 组(不掺钢纤维); 钢纤维掺量分别为 0.5%、1.0%和 1.5%的 SFRAC-0.5、SFRAC-1.0、SFRAC-1.5 组, 基准配合比(试件 RAC-0)的 28d 抗压强度为 43.5MPa, 配合比详见表 1 所示。

### 1.2 试验方法

先将水泥、再生骨料和砂投入强制式搅拌机中干拌 60~120s; 然后撒入钢纤维, 继续干拌 120s; 最后加入水和减水剂混合物搅拌 240s, 充分搅拌均匀后装模、振捣成型, 标准养护 28d。试件尺寸为 300mm×300mm×50mm, 每种配合比浇筑 3 块。试验用冲击锤的质量为 3.0kg, 冲击高度为 300mm。记录试件出现第 1 条裂缝(初裂)的抗冲击次数  $N_1$  和最终失效(破坏)的抗冲击次数  $N_2$ 。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试件破坏形态

图 1 为不同钢纤维掺量 RAC 试件的抗冲击破坏

形态对比。由图 1 (a) 可以看出, 素混凝土 RAC-0 试件破坏严重, 破坏断面比较平整、均匀, 呈现出典型的脆性破坏特征。由图 1 (b)~(d) 可以看出, 掺入钢纤维后, RAC 的脆性破坏特征得到显著改善; 破坏试件表面的裂缝数量较多, 主裂缝附近有多条较细、走向曲直不一的细裂缝; 大量的钢纤维桥联于裂缝之间, 使得试件破坏时呈现出裂而不断的现象。分析原因是 RAC 试件开裂后, 钢纤维发挥桥联作用, 阻滞裂缝扩展和贯通, 延迟了试件破坏时间, 使得试件的整体变形能力显著提高。在试验过程中观察到, 钢纤维掺量较低的试件 SFRAC-0.5 出现开裂后, 抗冲击能力下降较快, 由于钢纤维桥联于裂缝间, 使得裂缝的尺寸较小; 而钢纤维掺量较多的试件 SFRAC-1.0 和试件 SFRAC-1.5 出现开裂后, 仍保持较好的抗冲击能力, 但随着冲击锤头的不断冲撞、挤压, 试件表面的裂缝也越明显、凹痕越深, 这与已有的钢纤维普通混凝土抗冲击试验研究<sup>[9,10]</sup>中观察到的现象相似。

表 1 钢纤维再生混凝土配合比

试件编号	水泥/(kg/m <sup>3</sup> )	砂/(kg/m <sup>3</sup> )	水/(kg/m <sup>3</sup> )	再生粗骨科/(kg/m <sup>3</sup> )	钢纤维体积掺量/%	减水剂/(kg/m <sup>3</sup> )
RAC-0	410	719	166	1073	0	2
SFRAC-0.5	410	719	166	1073	0.5	2
SFRAC-1.0	410	719	166	1073	1.0	2
SFRAC-1.5	410	719	166	1073	1.5	2

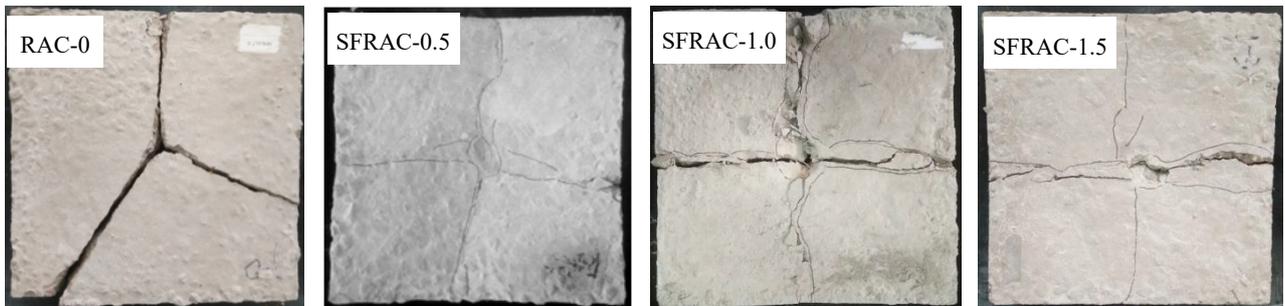


图 1 SFRAC 试件抗冲击的破坏形态

### 2.2 抗冲击次数

SFRAC 初裂和破坏的抗冲击次数试验结果及其平均值、标准差和变异系数的统计分析见表 2 和图 2 所示。

由表 2 和图 2 可见, 掺入钢纤维显著改善了 RAC 初裂和破坏的抗冲击能力。SFRAC 试件初裂和破坏抗冲击次数的试验结果由大到小的排序依次是: SFRAC-1.5→SFRAC-1.0→SFRAC-0.5→RAC-0。这

表明, SFRAC 的初裂和破坏的抗冲击能力随着钢纤维掺量的增多而提高。钢纤维掺量为 1.5% 的 SFRAC-1.5 试件的抗冲击性能最好, 试件初裂和破坏抗冲击次数的平均值分别为试件 RAC-0 的 7.1 倍和 23.9 倍。此外, 变异系数主要反映数据偏离平均值的程度。由表 2 可见, SFRAC 试件抗冲击次数的变异系数随着钢纤维掺量的增多逐渐减小。分析原

因主要是 RAC 本身属于一种非均质的混合材料, 而掺入较低量钢纤维, 纤维在混凝土基体中分散不均匀, 加剧了混凝土的不均匀性, 使得混凝土强度分布特征偏离平均值的程度越大; 随着钢纤维的增多, 纤维在基体中分散得更加均匀, 混凝土本身的变异性减小, 试验结果越集中于平均值周围, 离散程度也越小。

表 2 SFRAC 抗冲击次数统计分析

试件编号	抗冲击次数(N <sub>1</sub> / N <sub>2</sub> )			平均值 (N <sub>1</sub> / N <sub>2</sub> )	标准差 (N <sub>1</sub> / N <sub>2</sub> )	变异系数/% (N <sub>1</sub> / N <sub>2</sub> )
	试件 1	试件 2	试件 3			
RAC-0	6/7	8/9	9/10	8/9	1.25/1.25	15.63/13.89
SFRAC-0.5	18/49	22/38	27/53	22/47	4.03/6.34	18.32/13.49
SFRAC-1.0	29/87	33/95	38/117	33/100	3.68/12.68	11.15/12.68
SFRAC-1.5	52/189	56/211	63/246	57/215	4.55/23.47	7.98/10.92

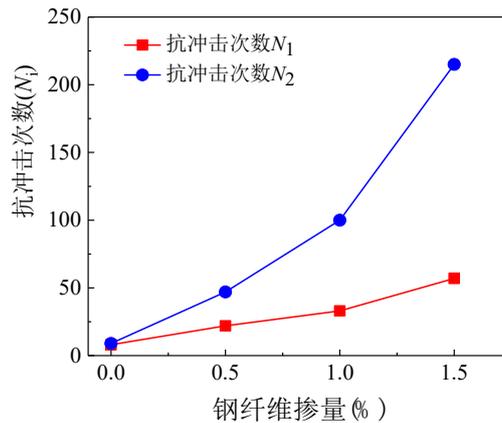


图 2 SFRAC 抗冲击能力的对比

### 3 概率分布拟合

#### 3.1 数理统计模型

已有的研究<sup>[4,11,12]</sup>表明, 混凝土的落锤抗冲击的破坏机制与弯曲疲劳试验的较为相似, 且主要采用正态、对数正态分布和 Weibull 分布等作为混凝土弯曲疲劳寿命的概率分布模型。而在结构可靠度理论中常采用对数正态分布作为结构抗力概率分布<sup>[13,14]</sup>。因此, 采用对数正态分布理论对 SFRAC 抗冲击试验结果进行线性回归分析。

依据对数正态分布的定义, 随机变量 (本试验中的 N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub>) N<sub>i</sub>>0, 做变换 Y =ln(N<sub>i</sub>); 若 Y 服从正态分布 N(μ, σ<sup>2</sup>), 则抗冲击次数 N<sub>i</sub> 对应的对数正态分布概率密度函数和累积分布函数 (也称破坏概率函数) 分别为:

$$f(N_i) = \frac{1}{\sigma N_i \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\ln N_i - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1)$$

$$F(\ln N_i) = P(\ln N < \ln N_i) = \Phi \left( \frac{\ln N_i - \mu}{\sigma} \right) \quad (2)$$

其中, 令  $z = (\ln N_i - \mu) / \sigma$ , 则  $\Phi(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{x^2}{2} \right] dx$  为标准正态分布函数。

因为  $\Phi(z)$  在区间 (0, +∞) 上为严格单增函数, 必存在其反函数; 因此, 对式 (2) 两边分别求反函数, 并令  $Y = \Phi^{-1}[F(\ln N_i)]$ ;  $X = \ln N_i$ ;  $\alpha = 1/\sigma \ln N$ ;  $\beta = \mu \ln N / \sigma \ln N$ , 整理得:

$$Y \alpha X \beta - \quad (3)$$

对于小样本 (n≤20) 的情况, 通常采用平均秩

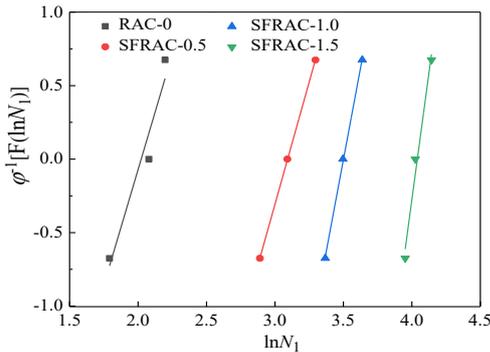
法的期望估计来计算失效概率  $F(\ln(N_i))$  的估计量 [15,16]:

$$F(\ln(N_i)) = \frac{i}{k+1} \quad (4)$$

式中:  $i$  表示某组试件的抗冲击次数由小到大排列的秩序数,  $k$  为该组试件的样本总数。

### 3.2 回归结果分析

对表 2 中不同钢纤维掺量 RAC 试件的抗冲击次数  $N_1$  和  $N_2$  按式 (3) 和 (4) 进行对数正态分布线性回归分析。图 3 为抗冲击次数  $N_1$  和  $N_2$  的线性拟合直线; 表 3 为抗冲击次数  $N_1$  和  $N_2$  拟合分析得出的结果如所示。由图 3 可以看出, 抗冲击次数  $N_1$  和  $N_2$  的各数据点近似呈直线分布。同时, 由表 3 可以看出, 抗冲击次数  $N_1$  和  $N_2$  拟合的相关系数  $R^2$  最小值为 0.830, 最大值为 0.999, 且绝大部分相关系数  $R^2$  的值接近于 1。说明采用对数正态分布可以较好地描述不同钢纤维掺量 RAC 试件初裂冲击次数  $N_1$  和破坏冲击次数  $N_2$  的分布特征。



### 3.3 抗冲击次数分布规律

综上, SFRAC 试件的抗冲击次数  $N_1$  和  $N_2$  服从对数正态分布, 由式 (2)、(3) 和 (4) 可以得到不同失效概率  $F(\ln(N_i))$  下的 SFRAC 抗冲击次数  $N_i$ :

$$N_i = \exp\left(\frac{\varphi F^{-1}[\ln(N_i)] + \beta}{\alpha}\right) \quad (5)$$

利用式 (5), 结合表 3 中的拟合分析结果, 可以得到各组 SFRAC 试件在给定失效概率下的抗冲击次数  $N_1$  和  $N_2$ 。选取了三种失效概率 (5%、15% 和 30%) 进行估计, 结果如表 4 所示。在不同失效概率下的  $\ln N_2 - V_f$  ( $V_f$  为钢纤维掺量) 曲线, 如图 4 所示。由表 3 可以看出, 抗冲击次数  $N_1$  和  $N_2$  随失效概率的升高而不断增加, 这与混凝土的物理属性一致。另外, 由图 4 可以看出, 在不同失效概率下, SFRAC 试件的抗冲击次数  $N_2$  与钢纤维掺量  $V_f$  之间近似呈线性关系。

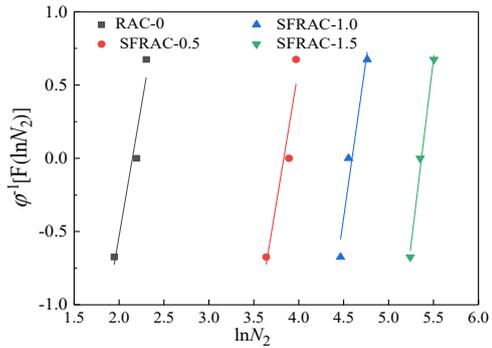


图 3 SFRAC 试件抗冲击次数的对数正态分布线性拟合图

表 3 SFRAC 试件抗冲击次数的线性拟合分析结果

抗冲击次数	试件编号	拟合参数		相关系数 $R^2$
		$\alpha$	$\beta$	
$N_1$	RAC-0	3.144	6.359	0.900
	SFRAC-0.5	3.327	10.290	0.999
	SFRAC-1.0	4.987	17.459	0.998
	SFRAC-1.5	6.911	27.921	0.966
$N_2$	RAC-0	3.582	7.696	0.894
	SFRAC-0.5	3.710	14.221	0.830
	SFRAC-1.0	4.316	19.826	0.900
	SFRAC-1.5	5.072	27.219	0.982

表 4 不同失效概率下 SFRAC 抗冲击次数

抗冲击次数	试件编号	失效概率 $F(\ln(N_i))$		
		5%	15%	30%
$N_1$	RAC-0	4	5	6
	SFRAC-0.5	13	16	19
	SFRAC-1.0	24	27	30
	SFRAC-1.5	45	49	53
$N_2$	RAC-0	5	6	7
	SFRAC-0.5	30	35	40
	SFRAC-1.0	68	78	88
	SFRAC-1.5	155	175	193

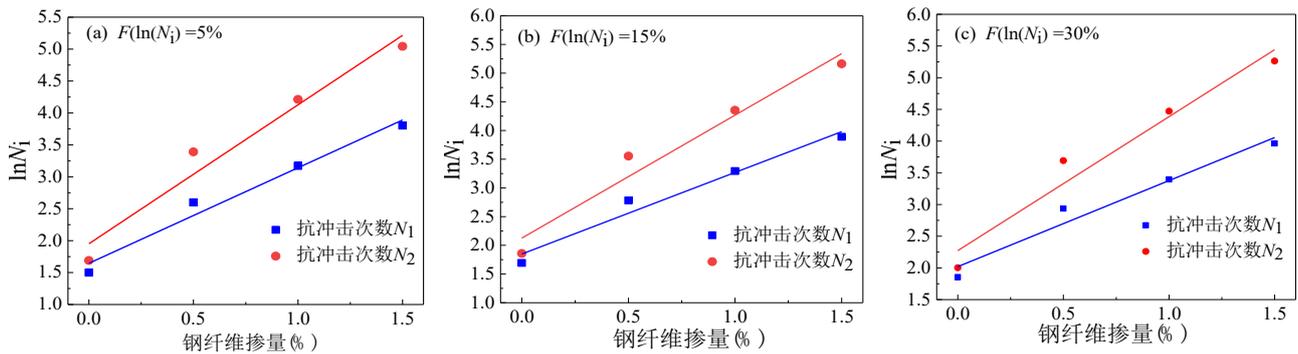


图 4 不同失效概率下  $\ln N_i - V_i$  关系曲线

4 结论

(1) 掺入钢纤维显著改善了 RAC 抗冲击脆性破坏特征，钢纤维发挥桥联作用，有效抑制了裂缝的形成与发展，提高了试件的整体变形能力。

(2) 掺入钢纤维显著提高了 RAC 的抗冲击次数，钢纤维 RAC 初裂和破坏的抗冲击能力随着钢纤维掺量的增多而提高。钢纤维掺量为 1.5% 时，RAC 的抗冲击性能最好，SFRAC 试件的初裂和破坏抗冲击次数的平均值分别为素混凝土 RAC-0 的 7.1 倍和 23.9 倍；SFRAC 试件抗冲击次数的变异系数随着钢纤维掺量的增多逐渐降低。

(3) 采用对数正态分布理论可以较好地分析不同钢纤维掺量 RAC 试件的初裂和破坏冲击次数的分布特征。

参考文献

[1] 陈相宇. 纤维混凝土抗冲击性能的试验研究[D]. 大连

理工大学, 2010.

[2] He Wenchang, Kong Xiangqing, Fu Ying, et al. Experimental investigation on the mechanical properties and microstructure of hybrid fiber reinforced recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 261: 120488.

[3] Xie J, Huang L, Guo Y, et al. Experimental study on the compressive and flexural behaviour of recycled aggregate concrete modified with silica fume and fibres [J]. Construction and Building Materials, 2018, 178(3 0):612-623.

[4] 孔祥清, 何文昌, 邢丽丽, 等. 钢纤维-聚丙烯纤维混杂对再生混凝土抗冲击性能的影响[J]. 复合材料学报, 2020, 37(7): 1763-1773.

[5] 曾翔, 许斌. 无腹筋钢筋混凝土梁抗冲击行为试验研究 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 63-73.

[6] 任亮, 何瑜, 王凯. 超高性能混凝土抗冲击性能研究进

- 展[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(1):146-154+165.
- [7] 焦楚杰, 孙伟, 高培正, 等. 钢纤维混凝土抗冲击试验研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2005(06):41-44.
- [8] 何文昌, 孔祥清, 周聪, 等. 钢纤维再生混凝土力学性能和微观结构研究[J]. 混凝土, 2020(12):44-49.
- [9] Ali M, Soliman A M, Nehdi M L. Hybrid-fiber reinforced engineered cementitious composite under tensile and impact loading[J]. Materials & Design, 2017, 117: 139-149.
- [10] Murali G, Ramprasad K. A feasibility of enhancing the impact strength of novel layered two stage fibrous concrete slabs[J]. Engineering Structures, 2018, 175: 41-49.
- [11] 李冬, 丁一宁. 钢筋与结构型合成纤维对混凝土抗冲击性能混杂效应的分析[J]. 振动与冲击, 2017, 36(02):123-128.
- [12] 王立成, 王海涛, 刘汉勇. 钢纤维轻骨料混凝土抗冲击性能试验研究与统计分析[J]. 大连理工大学学报, 2010(4): 557-563.
- [13] 蒋维, 邓建. 基于对数正态分布的岩石损伤统计分析方法研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2010, 24(02):34-37.
- [14] 赵国藩, 金伟良, 贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 中国建筑工业出版社, 2000.
- [15] 赵宇, 杨军, 马小兵. 可靠性数据分析教程[M]. 北京航空航天大学出版社, 2009.
- [16] 朱学超. 水泥混凝土抗冲击性能测定方法研究[D]. 天津大学, 2016.

**收稿日期:** 2022 年 4 月 1 日

**出刊日期:** 2022 年 5 月 7 日

**引用本文:** 何文昌, 钢纤维 RAC 抗冲击性能试验研究与统计分析[J]. 建筑工程进展, 2022, 2(1): 58-63  
DOI: 10.12208/j.ace.20220017

**检索信息:** 中国知网 (CNKI Scholar)、万方数据 (WANFANG DATA)、Google Scholar 等数据库收录期刊

**版权声明:** ©2022 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**