

文章编号:1007-9629(2023)06-0587-09

## 剑麻纤维对再生骨料混凝土断裂性能的影响

肖建庄<sup>1,2</sup>, 许金校<sup>1</sup>, 罗素蓉<sup>1,\*</sup>, 张凯建<sup>1</sup>, 张青天<sup>1</sup>

(1.福州大学 土木工程学院,福建 福州 350116;2.同济大学 土木工程学院,上海 200092)

**摘要:**为改善再生骨料混凝土(RAC)的断裂性能,在 RAC 中掺入剑麻纤维,并基于三点弯曲梁试验,研究了再生粗骨料(RCA)和剑麻纤维对 RAC 断裂性能的影响.结果表明:与普通混凝土相比,100% RCA 取代率且未掺剑麻纤维时,混凝土的起裂韧度、失稳韧度和断裂能分别降低 20.36%、17.36% 和 20.66%;当剑麻纤维长度为 10 mm、体积分数为 0.2% 时,其对 RAC 的起裂韧度改善效果最佳,且较未掺剑麻纤维 RAC 的起裂韧度提高 37.81%;就失稳韧度和断裂能而言,剑麻纤维的最佳体积分数为 0.3%;剑麻纤维的掺入可有效提升 RAC 的断裂性能.

**关键词:**再生骨料混凝土;剑麻纤维;三点弯曲梁试验;断裂韧度;断裂能

中图分类号:TU528.041

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.06.003

## Effect of Sisal Fiber on Fracture Performance of Recycled Aggregate Concrete

XIAO Jianzhuang<sup>1,2</sup>, XU Jinxiao<sup>1</sup>, LUO Surong<sup>1,\*</sup>, ZHANG Kaijian<sup>1</sup>, ZHANG Qingtian<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to improve the fracture performance of recycled aggregate concrete (RAC), the effects of recycled coarse aggregate (RCA) and sisal fiber on the fracture performance of RAC were studied based on the three-point bending beam test by mixing sisal fiber into RAC. The results show that, compared with ordinary concrete, the initiation toughness, instability toughness and fracture energy of RAC without sisal fiber are reduced by 20.36%, 17.36% and 20.66%, respectively, when the replacement rate of RCA is 100%. When the length of sisal fiber is 10 mm, and its volume fraction is 0.2%, it has the best improvement effect on the initiation toughness of RAC, which is 37.81% higher than that of RAC without sisal fiber. In terms of instability toughness and fracture energy, the optimal volume fraction of sisal fiber is 0.3%. In summary, the incorporation of sisal fiber can effectively improve the fracture performance of RAC.

**Key words:** recycled aggregate concrete(RAC); sisal fiber; three-point bending beam test; fracture toughness; fracture energy

随着城市化建设的快速发展,工程建设对混凝土材料及天然砂石资源的需求量日益增多<sup>[1]</sup>.同时,拆除老旧建筑物将产生大量建筑固废<sup>[2]</sup>,对其采用传统方式进行处理,不仅占用有限的土地资源,还会带来一系列环境问题<sup>[3]</sup>.将废弃混凝土加工成再生骨料用以制备再生骨料混凝土(RAC)<sup>[4]</sup>,能够减少砂石资

源的消耗,缓解“垃圾围城”的困境<sup>[5]</sup>,有利于推动建筑业的可持续发展<sup>[6]</sup>.然而,相较于天然骨料,再生骨料压碎指标大、吸水率高<sup>[7]</sup>,且骨料表面附着的老砂浆使得 RAC 存在多重薄弱的界面过渡区<sup>[8]</sup>,导致 RAC 脆性提高,性能有所降低<sup>[9]</sup>.

研究表明,在 RAC 中掺入纤维能够起到良好的改

收稿日期:2022-07-26; 修订日期:2022-11-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078139,52078358,52008304)

第一作者:肖建庄(1968—),男,山东沂南人,同济大学教授,福州大学兼职教授,博士生导师,博士. E-mail:jzx@tongji.edu.cn

通讯作者:罗素蓉(1963—),女,福建尤溪人,福州大学教授,硕士生导师,学士. E-mail:lrsr@fzu.edu.cn

性作用<sup>[10]</sup>,其中钢纤维、聚丙烯(PP)纤维、聚乙烯醇(PVA)纤维等在混凝土领域中的应用已取得了丰富的研究成果<sup>[11-14]</sup>,而植物纤维在RAC中的研究较少.剑麻纤维(SiF)是一种可大面积种植、价格低廉的可再生纤维,其富于弹性,属低密度、高强度、低拉伸的纤维材料,具备良好的耐磨性和耐腐蚀性.相较于传统纤维,剑麻纤维性能优异且属于可再生资源,可满足混凝土性能方面的使用要求,还可实现经济选材和节约资源.研究发现,剑麻纤维体积分数和长度的差异对材料的力学性能影响较大,当剑麻纤维体积分数为0.2%<sup>[15]</sup>或掺入的剑麻纤维长度为10 mm<sup>[16]</sup>时,其对材料的力学性能具有良好的改善效果.剑麻纤维对混凝土的增强<sup>[15-16]</sup>、增韧<sup>[17]</sup>效果明显,能够有效抑制裂缝的扩展<sup>[18-19]</sup>.实际工程中的混凝土往往是带裂缝工作的,由再生骨料拌制成型RAC,受荷时裂缝将沿薄弱的界面过渡区快速发展,应用断裂力学理论可以深入剖析RAC受荷状态下裂缝的发展规律.剑麻纤维是一种可再生的绿色纤维,掌握其对RAC断裂性能的影响规律,既能够丰富植物纤维

RAC力学性能领域的研究,又将植物纤维拓展至崭新的应用领域,为实现RAC的低碳高效利用提供依据.

本文基于三点弯曲梁断裂试验,研究再生粗骨料(RCA)、剑麻纤维体积分数及长度对RAC断裂性能的影响,测试双K断裂韧度及断裂能,探究不同变量对RAC断裂性能的影响规律,为推广剑麻纤维增强RAC的实际应用提供一定的理论依据.

## 1 试验

### 1.1 原材料

胶凝材料为P·O 42.5普通硅酸盐水泥和Ⅱ级粉煤灰;再生粗骨料为废弃混凝土经机械破碎加工得到,均满足粒径5~20 mm连续级配要求,天然粗骨料(NCA)和再生粗骨料的物理性能指标见表1;天然细骨料为河砂,细度模数2.53,中砂,满足连续级配要求;剑麻纤维为天然短切国产剑麻纤维,长度为5、10、15 mm,其物理性能指标见表2;外加剂为聚羧酸系高效减水剂;试验拌和水、附加水均为自来水.

表1 天然粗骨料与再生粗骨料的物理性能指标  
Table 1 Physical properties of NCA and RCA

Coarse aggregate	Apparent density/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Water absorption <sup>1)</sup> /%	Moisture content/%	Crushing value/%	Mud content/%	Needle content/%
NCA	2 672	0.65	1.24	3.46	0.28	0.30
RCA	2 584	4.06	1.56	9.92	1.24	1.43

表2 剑麻纤维的物理性能指标  
Table 2 Physical properties of SiF

Density/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	Extension strength/MPa	Elastic modulus/GPa	1 h water absorption/%
0.93	622-844	32-37	150

### 1.2 配合比设计

混凝土配合比设计中,水胶比为0.40,砂率为40%,水泥用量为 $300\text{ kg}/\text{m}^3$ ,粉煤灰用量为 $120\text{ kg}/\text{m}^3$ ,砂用量为 $726\text{ kg}/\text{m}^3$ ,其余材料用量如表3所示.考虑3个水平因素,共设计8个试验组:(1)基准组,使用天然粗骨料,试件编号为NC;(2)再生粗骨料试验组,粗骨料取代率分别为50%、100%,相应的试件编号为RC50、RC100;(3)再生粗骨料100%全取代时掺入剑麻纤维组,长度为10 mm的纤维体积分数分别为0.1%、0.2%和0.3%,长度为5、15 mm的纤维体积分数为0.2%,相应的试件编号为RC100-S0.1L10、RC100-S0.2L10、RC100-S0.3L10、RC100-S0.2L05、RC100-S0.2L15,其中S代表纤维体积分数,L代表纤维长度.因再生粗骨料及剑麻纤维吸水率较高,掺入混凝土时需加入一定量的附加水以保证实际水胶比与设计

值一致,其中剑麻纤维附加水的掺入量参考其1 h吸水率,再生粗骨料及剑麻纤维的附加水掺入量如表3所示.

### 1.3 试件设计及试验方法

抗压强度和劈裂抗拉强度试件尺寸为 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 的标准立方体试块,参考GB/T 50081—2016《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行强度测试.

相关研究表明<sup>[20]</sup>,三点弯曲梁尺寸取为 $750\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 时,可保证断裂参数无明显的尺寸效应,其中净跨 $S=600\text{ mm}$ ,预制裂缝长度 $a_0=80\text{ mm}$ ,图1为三点弯曲梁简图.加载仪器为MTS疲劳性能试验机,采用速率为 $0.0005\text{ mm}/\text{s}$ 的静力加载方式,加载前施加100 N的荷载预压试件,以保证数据采集的稳定性;由MTS内置传感器和夹式引伸计采集荷载 $P$ 及跨中位移 $\delta$ 、裂缝口张开位移CMOD;在预制裂

1) 文中涉及的吸水率、水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比.

表3 混凝土配合比及附加水掺入量

Table 3 Mix proportions of concretes and content of additional water

Specimen	Mix proportion					RCA additional water	SiF additional water
	NCA	RCA	SiF	Water	Super-plasticizer		
NC	1 089.000	0	0	168.000	2.520	0	0
RC50	544.500	544.500	0	168.000	2.520	13.610	0
RC100	0	1 089.000	0	168.000	2.520	27.230	0
RC100-S0.1L10	0	1 086.400	0.930	168.000	2.520	27.160	1.395
RC100-S0.2L10	0	1 083.800	1.860	168.000	2.520	27.100	2.790
RC100-S0.3L10	0	1 081.200	2.790	168.000	2.520	27.030	4.185
RC100-S0.2L05	0	1 083.800	1.860	168.000	2.520	27.100	2.790
RC100-S0.2L15	0	1 083.800	1.860	168.000	2.520	27.100	2.790

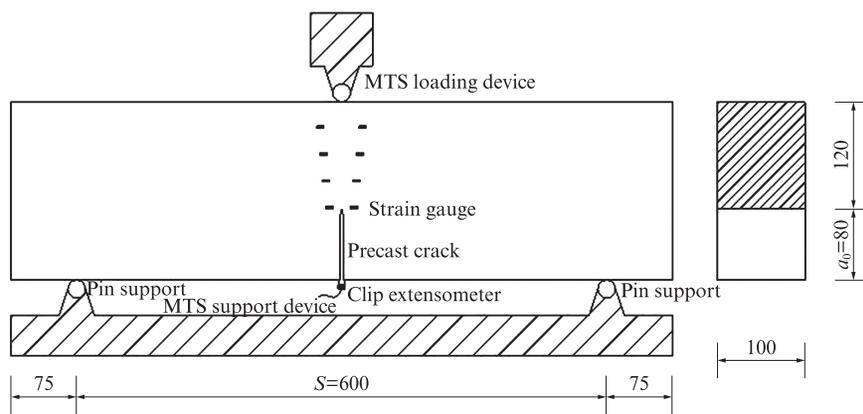


图1 三点弯曲梁简图

Fig. 1 Diagram of three-point bending beam(size: mm)

缝尖端左右 10 mm 处对称粘贴电阻应变片,图 2 为应变片布置示意图;经 8 通道 IMC 动态数据采集仪采集应变  $\epsilon$ ,得到  $P-\epsilon$  曲线、 $P-CMOD$  曲线和  $P-\delta$  曲线。

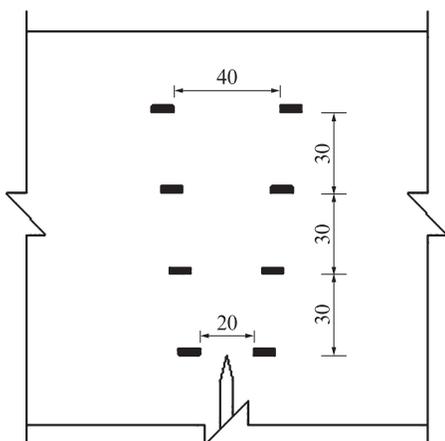


图2 应变片布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of strain gauge arrangement(size: mm)

在三点弯曲梁试件破坏后的试件裂缝断面选取尺寸最大不超过  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 25\text{ mm}$  的块状试样,采用型号为 Quanta250 的扫描电子显微镜(SEM)

观测掺入的剑麻纤维对水泥石微观形貌和剑麻纤维-水泥石界面过渡区微观形貌的影响.此外,选取剑麻-水泥石界面过渡区拔出的剑麻纤维进行 SEM 观测,分析剑麻纤维对 RAC 断裂性能的增强机理。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 基本力学性能

混凝土的基本力学性能如表 4 所示.由表 4 可见:再生粗骨料的掺入导致混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度呈降低趋势,其中 100% 再生粗骨料取代率混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度较 NC 分别降低 8.11%、18.77%;剑麻纤维对混凝土的基本力学性能起到增强作用,当 RAC 中掺入长度为 10 mm、体积分数为 0.2% 的剑麻纤维时,其抗压强度、劈裂抗拉强度比未掺剑麻纤维的 RAC 分别提升 12.85%、18.40%.再生骨料损伤多且表面存在老砂浆,由其拌制成型的 RAC 为试件的裂缝扩展提供了条件.剑麻纤维在 RAC 内部形成乱向分布的三维结构,纤维的竖向条纹还可增加基体与纤维间的接触面积,从而有利于提高两者间的黏结性能,有效约束受荷基体

表4 混凝土的基本力学性能  
Table 4 Basic mechanical properties of concretes

Specimen	MPa	
	Compressive strength	Splitting tensile strength
NC	48.71	6.02
RC50	45.10	5.04
RC100	44.76	4.89
RC100-S0.1L10	49.39	5.61
RC100-S0.2L10	50.51	5.79
RC100-S0.3L10	50.45	5.72
RC100-S0.2L05	48.20	5.23
RC100-S0.2L15	48.19	5.45

的横向变形。

## 2.2 三点弯曲梁破坏形态

图3为三点弯曲梁试件断裂面破坏形态的数字照片,其中I为断裂面,II为相应断裂面的截面。由图

3可见:无纤维试验组NC受荷过程表现出明显的脆性破坏特征,裂缝在试件起裂后扩展迅速,试件最终发生破坏;与NC试件相比,RC100试件的断裂面存在较多已破坏的再生粗骨料;掺加了剑麻纤维的RC100-S0.2L10在试件发生起裂后,处于裂缝扩展路径上的剑麻纤维拉结裂缝两端的混凝土基体,吸收一部分基体开裂时释放的能量,这部分剑麻纤维还会随着试验的进行逐渐被拔出或拉断,从而提高RAC的变形性能。

## 2.3 三点弯曲梁加载试验结果

### 2.3.1 $P-\epsilon$ 曲线

将应变采集仪得到的预制裂缝尖端处的应变值与MTS自身记录的荷载值相结合,可得到 $P-\epsilon$ 曲线。各试验组取1根具有代表性的三点弯曲梁试件以绘制其 $P-\epsilon$ 曲线,如图4所示。

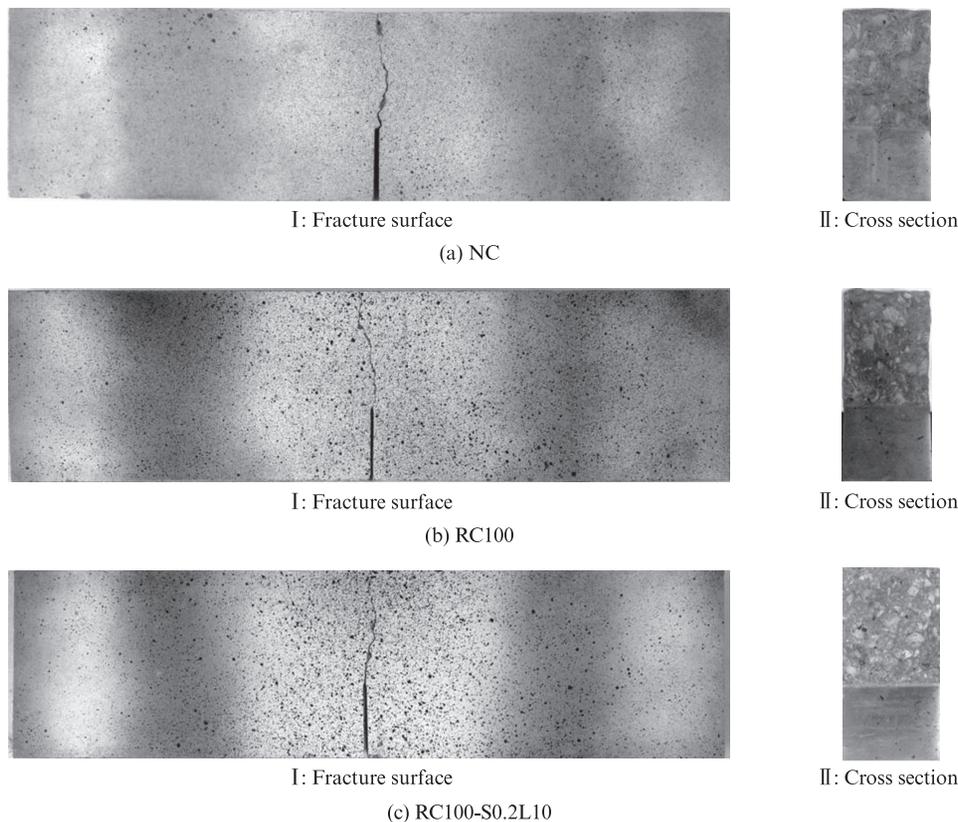


图3 三点弯曲梁试件断裂面破坏形态的数字照片

Fig. 3 Digital photos of failure morphologies of three-point bending beam specimen fracture surfaces

结合电测法<sup>[21]</sup>原理,由图4可见:当试件承受荷载作用时,预制裂缝尖端因受拉而不断聚集能量,应变沿正值方向不断增大,当应变值增大至混凝土极限拉应变时,裂缝尖端因应力集中发生起裂,此前所聚集的能量得以释放;裂缝尖端的检测点因发生起裂而得到卸载,应变发生回缩并沿负值方向逐渐减小; $P_{\text{ini}}$ 为 $P-\epsilon$ 曲线应变值发生回缩时对应的荷载值,即起裂荷载,各试件最大荷载 $P_{\text{max}}$

由MTS内置传感器直接采集得到。表5为三点弯曲梁试件的断裂参数,可见 $P_{\text{ini}}$ 、 $P_{\text{max}}$ 及其比值。

### 2.3.2 $P$ -CMOD曲线和 $P-\delta$ 曲线

采用MTS组合夹式引伸计可获取三点弯曲梁试件的CMOD和 $\delta$ ,临界裂缝口张开位移 $\text{CMOD}_c$ 列于表5。图5、6分别为各变量影响下试件的 $P$ -CMOD曲线和 $P-\delta$ 曲线。由图5、6可进行断裂参数分析。

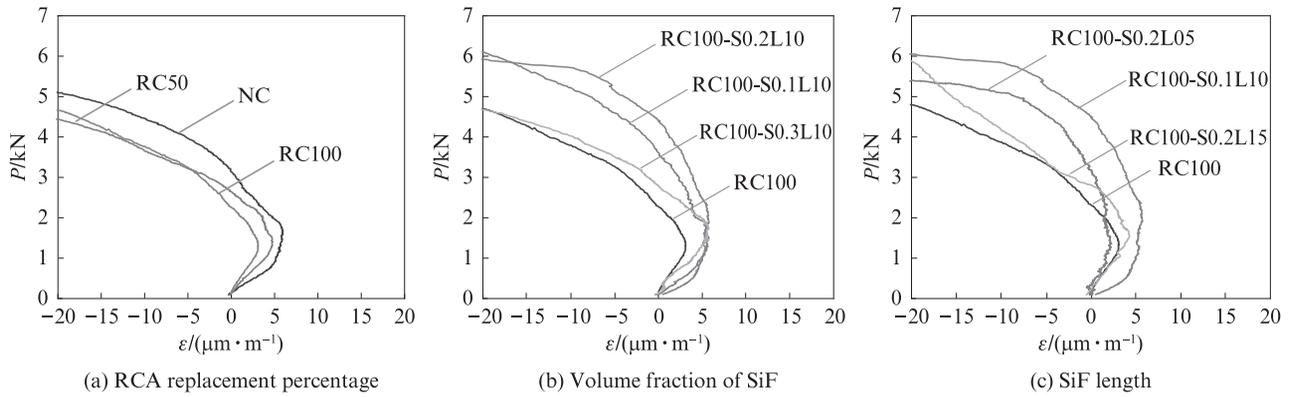


图4 各变量影响下试件的 $P-\varepsilon$ 曲线

Fig. 4  $P-\varepsilon$  curves of specimens under influence of various variables

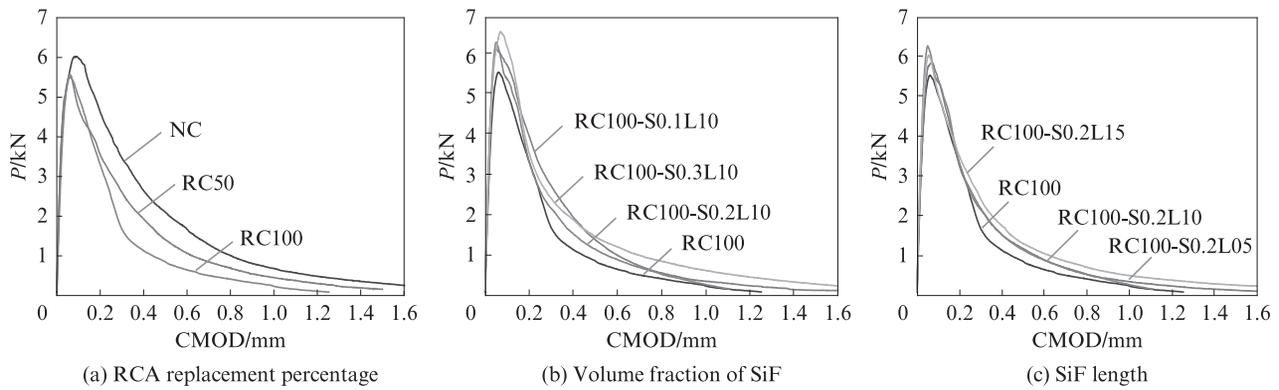


图5 各变量影响下试件的 $P-CMOD$ 曲线

Fig. 5  $P-CMOD$  curves of specimens under influence of various variables

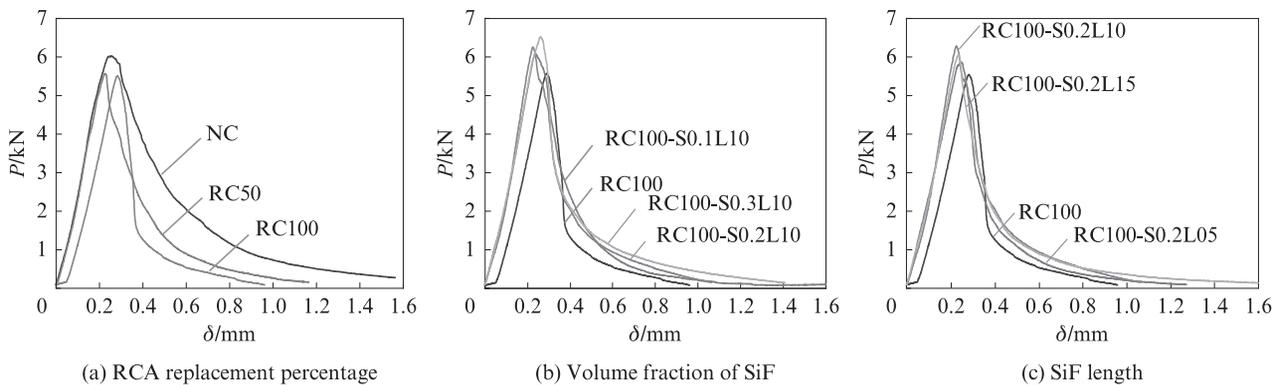


图6 各变量影响下试件的 $P-\delta$ 曲线

Fig. 6  $P-\delta$  curves of specimens under influence of various variables

### 3 断裂参数分析

#### 3.1 起裂荷载和最大荷载

由表5可见,试件的 $P_{ini}$ 和 $P_{max}$ 随着再生粗骨料取代率的增大而降低,当再生粗骨料取代率为50%和100%时, $P_{ini}$ 较NC降低12.10%和21.34%, $P_{max}$ 较NC降低6.56%和12.16%。其主要原因是由于再生粗骨料品质差、损伤及微裂纹增多,成型的RAC薄弱的界面过渡区增多,裂缝在基体受荷时沿薄弱的界面过渡区快速发展,基体限制裂缝扩展的能力降低。

由表5还可见:剑麻纤维的掺入使得试件的 $P_{ini}$ 和 $P_{max}$ 均表现出增长趋势;长度10 mm的剑麻纤维体积分数为0.1%、0.2%和0.3%时, $P_{ini}$ 较NC提高21.71%~41.09%, $P_{max}$ 较NC提高12.55%~23.06%;长度5、10、15 mm的剑麻纤维体积分数为0.2%时, $P_{ini}$ 较NC提高11.49%~41.09%, $P_{max}$ 较NC提高4.98%~14.58%。适量掺入剑麻纤维能有效抑制混凝土中微裂缝的发展,粗糙的纤维表面有利于提高其与基体的黏结性能,纤维在混凝土内部形成的三维分布结构将有效约束基体的横向变形。

3.2 双K断裂韧度

3.2.1 双K断裂参数的计算

非标准三点弯曲梁断裂韧度K的计算参考DL/T 5332—2005及文献[22]中的相关公式,其计算式如式(1)所示.

$$K = \frac{3(P + P_d)S \times 10^{-3}}{2th^2} \sqrt{h} k_\beta(\alpha) \quad (1)$$

式中:P、P<sub>d</sub>为试件跨中集中荷载及附加跨中荷载;S为试件净跨,t、h分别为试件截面宽度、高度;α为缝高比,α=a/h,a为试件跨中裂缝长度;β为跨高比,β=S/h;k<sub>β</sub>(α)为表征α与β间关系的函数表达式,其中P<sub>d</sub>、k<sub>β</sub>(α)的计算参考文献[23].

将P<sub>ini</sub>、a<sub>0</sub>、P<sub>max</sub>及相应有效裂缝长度a<sub>c</sub>代入式(1),可得到试件的起裂韧度K<sub>lc</sub><sup>ini</sup>和失稳韧度K<sub>lc</sub><sup>un</sup>,如式(2)、(3)所示,其中α<sub>0</sub>=a<sub>0</sub>/h、α<sub>1</sub>=a<sub>c</sub>/h.当P=P<sub>max</sub>时,a<sub>c</sub>的计算参考文献[23].

$$K_{lc}^{ini} = \frac{3(P_{ini} + P_d)S \times 10^{-3}}{2th^2} \sqrt{h} k_\beta(\alpha_0) \quad (2)$$

$$K_{lc}^{un} = \frac{3(P_{max} + P_d)S \times 10^{-3}}{2th^2} \sqrt{h} k_\beta(\alpha_1) \quad (3)$$

试件的a<sub>c</sub>、K<sub>lc</sub><sup>ini</sup>和K<sub>lc</sub><sup>un</sup>也列于表5.

3.2.2 再生粗骨料取代率对双K断裂韧度的影响

由表5可见,三点弯曲梁试件的断裂参数随再生粗骨料取代率的增大逐渐降低,NC的起裂韧度和失稳韧度分别为0.230 8、1.280 1 MPa·m<sup>1/2</sup>,再生粗骨料取代率为50%、100%时,RC50和RC100的起裂韧度分别降低11.66%、20.36%,失稳韧度分别降低10.80%、17.36%.再生粗骨料本身品质较差,附着老砂浆强度低且存在初始微裂纹,混凝土内部薄弱的界面过渡区增多,裂缝在外力尤其是拉应力作用下沿着

薄弱的界面过渡区快速发展,表现出起裂韧度与失稳韧度的明显降低.

3.2.3 剑麻纤维对双K断裂韧度的影响

由表5可见:剑麻纤维长度为10 mm,体积分数分别为0.1%、0.2%和0.3%时,可使RAC起裂韧度分别提高20.51%、37.81%和24.32%,失稳韧度分别提高12.83%、16.45%和18.75%;当剑麻纤维体积分数为0.2%时,其对RAC断裂韧度的改善效果最佳.作为短切纤维,剑麻纤维的掺入能够抑制混凝土中微裂缝的发展,且表面粗糙的剑麻纤维能够增强与基体间的黏结作用<sup>[19,24]</sup>,有效提高RAC的起裂韧度.剑麻纤维在试件开裂后拉结基体两端,吸收基体的部分能量<sup>[24]</sup>,随着其掺量的增大,试件裂缝扩展路径上的纤维增多,能够发挥优异的拉结作用,裂缝的发展需要施加更多的外力荷载,表现为最大荷载和失稳韧度增大.

由表5还可见,当剑麻纤维体积分数为0.2%时,长度不同的剑麻纤维对RAC起裂韧度的影响存在差异,5、10、15 mm长度的剑麻纤维可使RAC的起裂韧度分别提高10.66%、37.81%和18.82%,失稳韧度分别提高9.39%、16.45%和9.07%,因此10 mm长度的剑麻纤维对断裂韧度的改善效果最优.适宜长度的剑麻纤维将有效抑制裂缝的发展,改善RAC的起裂韧度和失稳韧度;当纤维较短时,单位面积内纤维数量增多,增加了混凝土内部界面,导致纤维的增强效果被部分抵消;较短的纤维易被从基体中拔出,无法有效发挥其优异的抗拉性能;当纤维较长时,试件受到荷载时能够发挥拉结作用的剑麻纤维减少,且较长纤维在搅拌时易发生结团现象,在基体中的分散均匀性降低,形成薄弱区,增加基体的内部缺陷<sup>[24]</sup>,因此其使用效率降低.

表5 三点弯曲梁试件的断裂参数

Table 5 Fracture parameters of three-point bending beam specimens

Specimen	P <sub>ini</sub> /kN	P <sub>max</sub> /kN	$\frac{P_{ini}}{P_{max}}$	CMOD <sub>c</sub> /μm	a <sub>c</sub> /m	K <sub>lc</sub> <sup>ini</sup> /(MPa·m <sup>1/2</sup> )	K <sub>lc</sub> <sup>un</sup> /(MPa·m <sup>1/2</sup> )
NC	1.64	6.17	0.266	65.06	0.109	0.230 8	1.280 1
RC50	1.44	5.58	0.258	57.30	0.108	0.203 9	1.141 8
RC100	1.29	5.42	0.238	65.47	0.105	0.183 8	1.057 8
RC100-S0.1L10	1.57	6.10	0.259	55.85	0.105	0.221 5	1.193 5
RC100-S0.2L10	1.82	6.21	0.293	61.93	0.106	0.253 3	1.231 8
RC100-S0.3L10	1.63	6.67	0.244	62.84	0.103	0.228 5	1.256 1
RC100-S0.2L05	1.44	5.69	0.252	73.16	0.108	0.203 4	1.157 1
RC100-S0.2L15	1.55	6.13	0.254	54.93	0.103	0.218 2	1.153 7

3.3 断裂能

3.3.1 断裂能的计算

混凝土断裂能G<sub>I</sub>指结构形成单位断裂面所消耗的能量,是表征混凝土脆性和断裂性能的非线性断

裂参数,由外力总功W与断裂面总面积A的比值来表示,按式(4)进行计算.试件在加载过程中存在脆断的可能性,为保证数据的精确度,取图6曲线上x约为P<sub>max</sub>/3的点后(下降段)任意点作为该曲线的拟

合点,自拟合点后曲线的包络面积经幂函数拟合方式可计算得到  $W_3$  的相应值.

$$G_f = \frac{W}{A} = \frac{W_0 + W_1 + W_2 + W_3}{A} \quad (4)$$

式中:  $W_0$  为外荷载加载至拟合点所做总功,即  $P-\delta$  曲线于起始时刻至拟合点的包络面积;  $W_1$  为三点弯曲梁自重所作总功,因其数值较小可忽略不计;  $W_2$  为重力于拟合点前所作附加功;  $W_3$  为幂函数拟合得到的曲线尾部包络面积;  $A = l(h - a_0)$ ;  $W_0$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  分别按式(5)、(6)、(7)进行计算.

$$W_0 = \int_0^{\delta_0} P(\delta) d\delta \quad (5)$$

$$W_2 = \frac{1}{2} mg\delta_0 \quad (6)$$

$$W_3 = \int_{\delta_0}^{\infty} a\delta^b d\delta = \frac{a\delta_0^{b+1}}{b+1} \quad (7)$$

式中:  $a$ 、 $b$  均为通过幂函数拟合得到的参数;  $\delta_0$  为拟合点处跨中竖向位移.

### 3.3.2 再生粗骨料取代率对断裂能的影响

图7为再生粗骨料取代率对RAC断裂能的影响.由图7可见,NC断裂能为189.43N/m,再生粗骨料取代率为50%、100%时,RAC的断裂能分别比NC降低14.87%、20.66%,表明混凝土断裂能随着再生粗骨料取代率的增大而降低.再生粗骨料强度低、存在微裂缝以及一定的内部损伤,使用表面附着老砂浆的再生粗骨料拌制成型的RAC存在多重的界面过渡区,试件受到荷载时,裂缝将沿薄弱的界面过渡区发展并扩展,无需消耗更多能量即可达到失稳状态.

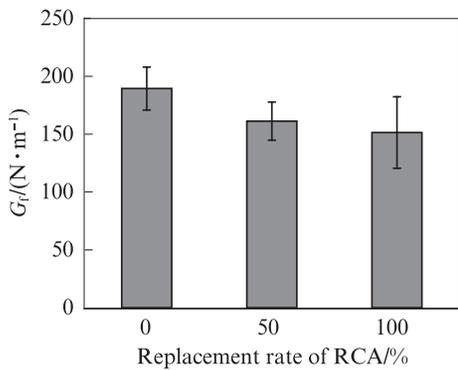


图7 再生粗骨料取代率对RAC断裂能的影响  
Fig. 7 Effect of replacement rate of RCA on fracture energy of RAC

### 3.3.3 剑麻纤维对断裂能的影响

图8为剑麻纤维体积掺量对RAC断裂能的影响.由图8可见,剑麻纤维的掺入使RAC的断裂能呈现增长趋势,纤维长度为10 mm,掺入量为0.1%、0.2%和0.3%时,可使RAC断裂能较未掺纤维的

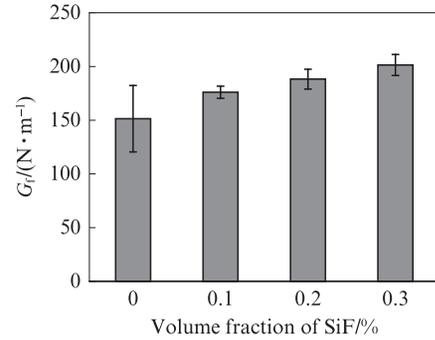


图8 剑麻纤维体积分数对RAC断裂能的影响  
Fig. 8 Effect of SiF volume fraction on fracture energy of RAC

RAC分别提高16.29%、24.32%和33.03%.分布于裂缝扩展路径上的剑麻纤维在裂缝扩展中能够拉结裂缝两端基体,承受一部分荷载,使得RAC受荷至临界状态(即失稳)的过程中消耗更多的能量.此外,表面粗糙的剑麻纤维与混凝土基体存在良好的黏结作用<sup>[24]</sup>,两者间的黏结作用在裂缝失稳扩展时发挥优势,当外部荷载作用大于纤维自身抗拉性能或纤维-基体间黏结作用时,纤维从基体中被拉断或拔出,从而在该过程中吸收基体所承受的部分能量,缓解裂缝尖端的应力集中现象.

图9为剑麻纤维长度对RAC断裂能的影响.由图9可见,当剑麻纤维的体积分数为0.2%时,不同长度的剑麻纤维对RAC断裂能的改善效果存在一定差异,5、10、15 mm长度的剑麻纤维使得RAC断裂能分别提高9.88%、24.32%和12.21%,其中10 mm长度的剑麻纤维对RAC断裂能的改善效果最佳.较短的剑麻纤维使得单位面积内纤维数量增多,总表面积增大,需更多水泥浆体进行包裹,从而降低剑麻纤维-水泥石界面的黏结作用;较长的剑麻纤维在搅拌时存在结团、缠绕问题,将导致其在基体内的分散均匀性降低,基体内部缺陷增多<sup>[25]</sup>,且较长的剑麻纤维可能无法承受过大拉力而被拉断破坏,无法有效发挥其拉结作用.

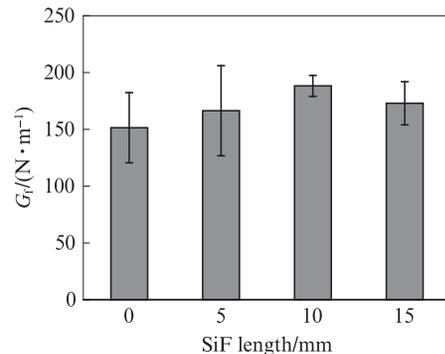


图9 剑麻纤维长度对RAC断裂能的影响  
Fig. 9 Effect of SiF length on fracture energy of RAC

## 4 微观结构

图10为剑麻纤维-水泥石界面的SEM图片.由图10可见:剑麻纤维和水泥石间的界面较为致密、无明显的间断或者裂缝;剑麻纤维周边的水泥石整体较为密实、无明显的孔洞及微裂纹,均匀分布的剑麻纤维对基体内部的孔隙率有明显的降低效果.剑麻纤维的亲水性使得包裹于纤维表面的水泥浆可进行正常的水化反应,生成大量的水化产物C-S-H凝胶,有效填充在纤维-水泥石界面的孔隙内,提高混凝土的密实度;剑麻纤维的吸湿特性能够增大其与水泥石间的黏结作用力.由图10还可见,剑麻纤维与水泥石基体间存在微裂缝,这是其在基体受荷时被拔出所引起的,纤维在拔出过程中将消耗能量,从而达到增强、增韧的效果.

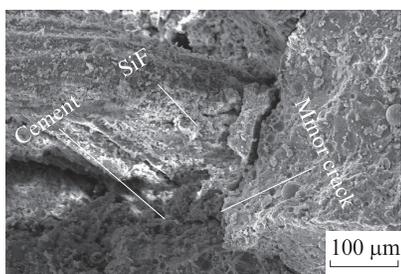


图10 剑麻纤维-水泥石界面的SEM图片  
Fig. 10 SEM image of SiF-cement interface

图11为剑麻纤维表面的SEM图片.由图11可见:剑麻纤维被从基体内部拔出后,其表面附着较多的水化产物,表明其与基体间存在良好的黏结性能;剑麻纤维表面较为粗糙且存在大量的竖向条纹,这将增大其与水泥石间的黏结作用及摩擦力,有利于增大剑麻纤维对基体受荷时横向变形的约束作用.

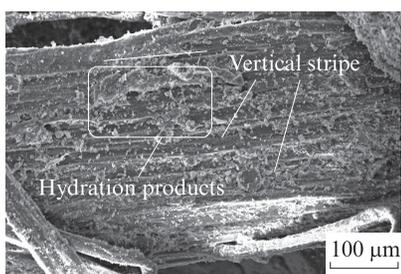


图11 剑麻纤维表面的SEM图片  
Fig. 11 SEM image of SiF surface

## 5 结论

(1)再生骨料混凝土的断裂性能随再生粗骨料取代率的增大而降低,50%和100%再生粗骨料取代

率时,再生骨料混凝土的起裂韧度较普通混凝土分别降低11.66%和20.36%,失稳韧度分别降低10.80%和17.36%,断裂能分别降低14.87%和20.66%.

(2)掺入适量的剑麻纤维对再生骨料混凝土的断裂性能起到增强作用,纤维长度为10 mm时,再生骨料混凝土断裂性能的提升幅度随着剑麻纤维体积分数的增大先增大后减小,体积分数为0.2%时,增强效果最佳,其起裂韧度、失稳韧度和断裂能较未掺纤维的再生骨料混凝土分别提升37.81%、16.45%和24.32%.

(3)剑麻纤维体积分数为0.2%时,掺入不同长度的剑麻纤维对再生骨料混凝土断裂性能的改善效果存在一定差异.掺入长度为5、10、15 mm的剑麻纤维时,再生骨料混凝土的起裂韧度分别提高10.66%、37.81%和18.82%,失稳韧度分别提高9.39%、16.45%和9.07%,断裂能分别提高9.88%、24.32%和12.21%.

## 参考文献:

- [1] 陈尚权,高越青,梁超锋,等.透水再生骨料混凝土研究进展[J].硅酸盐通报,2020,39(1):150-156.  
CHEN Shangquan, GAO Yueqing, LIANG Chaofeng, et al. Research progress on pervious recycled aggregate concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(1):150-156. (in Chinese)
- [2] XIAO J Z, LI W G, FAN Y H, et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996 - 2011) [J]. Construction and Building Materials, 2012, 31:364-383.
- [3] DING Z K, WANG Y F, ZOU P X W. An agent based environmental impact assessment of building demolition waste management: Conventional versus green management[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 133:1136-1153.
- [4] 肖建庄.再生混凝土[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.  
XIAO Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese)
- [5] XIAO J Z. Recycled aggregate concrete structures [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2018.
- [6] MAIER P L, DURHAM S A. Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2012, 29:428-437.
- [7] ZHANG H R, JI T, LIU H. Performance evolution of the interfacial transition zone (ITZ) in recycled aggregate concrete under external sulfate attacks and dry-wet cycling [J]. Construction and Building Materials, 2019, 229:116938.
- [8] 白卫峰,李思蕾,管俊峰,等.再生混凝土的单轴压缩动态力学性能[J].建筑材料学报,2022,25(5):498-508.  
BAI Weifeng, LI Silei, GUAN Junfeng, et al. Dynamic mechanical properties of recycled concrete under uniaxial compression [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(5): 498-508. (in Chinese)

- [9] CHEN Y L, CHEN Z P, XU J J, et al. Performance evaluation of recycled aggregate concrete under multiaxial compression[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 229:1169-35.
- [10] NIU H C, WANG L, LI J H, et al. Experimental study on mechanical properties of steel-polyvinyl alcohol fibre-reinforced recycled concrete[J]. *Applied Sciences-Basle*, 2021, 11(22):10550.
- [11] 康天蓓, 刘昱, 周静海, 等. 干湿循环下废弃纤维再生混凝土氯离子传输性能[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(4):389-394.  
KANG Tianbei, LIU Yu, ZHOU Jinghai, et al. Chloride transport performance of waste fiber recycled concrete under dry-wet cycles[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(4):389-394.(in Chinese)
- [12] 孔祥清, 高化东, 刚建明, 等. 钢-聚丙烯混杂纤维再生混凝土断裂性能研究[J]. *混凝土*, 2018(10):79-83, 86.  
KONG Xiangqing, GAO Huadong, GANG Jianming, et al. Fracture properties of hybrid steel-polypropylene fiber recycled aggregate concrete [J]. *Concrete*, 2018 (10) : 79-83, 86. (in Chinese)
- [13] 何文昌, 孔祥清, 高化东, 等. 高掺量聚丙烯纤维再生混凝土力学性能及微观结构研究[J]. *混凝土*, 2020(1):82-86.  
HE Wenchang, KONG Xiangqing, GAO Huadong, et al. Research on the mechanical properties and microstructure of recycled aggregate concrete with high content polypropylene fiber [J]. *Concrete*, 2020(1):82-86.(in Chinese)
- [14] 赵隆柳, 谢军, 林鑫, 等. PVA对改善再生混凝土抗氯离子渗透性能试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(7):2127-2133.  
ZHAO Longliu, XIE Jun, LIN Xin, et al. Experimental study on improvement to chloride ion impermeability of recycled aggregate concrete by mixing PVA[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(7):2127-2133.(in Chinese)
- [15] 覃峰, 黄琼念, 包惠明, 等. 剑麻纤维水泥混凝土性能试验研究[J]. *新型建筑材料*, 2008(4):47-50.  
QIN Feng, HUANG Qiongnian, BAO Huiming, et al. Experimental study on performance of sisal hemp fiber cement concrete[J]. *New Building Materials*. 2008(4):47-50.(in Chinese)
- [16] 董健苗, 王亚东, 杜亚聪, 等. 不同长度及直径的剑麻纤维对自密实轻骨料混凝土力学性能的影响[J]. *广西科技大学学报*, 2017, 28(3):26-30.  
DONG Jianmiao, WANG Yadong, DU Yacong, et al. Effect of sisal fiber with different length and diameter on mechanical properties of self-compacting lightweight aggregate concrete[J]. *Journal of Guangxi University of Science and Technology*, 2017, 28(3) :26-30.(in Chinese)
- [17] WANG L, SHEN N, YU D P, et al. Strengthening mechanism and microstructure of fibre-reinforced coral mortar and concrete [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 2022, 175(9) :671-681.
- [18] 董健苗, 曹嘉威, 王留阳, 等. 纤维增强自密实轻骨料混凝土早期抗裂性能试验[J]. *广西科技大学学报*, 2020, 31(2):36-42.  
DONG Jianmiao, CAO Jiawei, WANG Liuyang, et al. Experimental study on early anti-cracking capability of fiber reinforced self-compacting lightweight aggregate concrete [J]. *Journal of Guangxi University of Science and Technology*, 2020, 31(2) :36-42.(in Chinese)
- [19] REN G S, YAO B, HUANG H H, et al. Influence of sisal fibers on the mechanical performance of ultra-high performance concretes [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 286:1229-58.
- [20] 徐世焱, 周厚贵, 高洪波, 等. 各种级配大坝混凝土双K断裂参数试验研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(11):50-62.  
XU Shilang, ZHOU Hougui, GAO Hongbo, et al. An experimental study on double-K fracture parameters of concrete for dam construction with various grading aggregates[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(11) :50-62.(in Chinese)
- [21] 赵志方. 基于裂缝粘聚力的大坝混凝土断裂特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.  
ZHAO Zhifang. Fracture characteristics of dam concrete based on crack cohesion[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.(in Chinese)
- [22] 吴智敏, 徐世焱, 丁一宁, 等. 砼非标准三点弯曲梁试件双K断裂参数[J]. *中国工程科学*, 2001, 3(4):76-81.  
WU Zhimin, XU Shilang, DING Yining, et al. The double-K fracture parameter of concrete for non-standard three point bending beam specimens[J]. *Strategic Study of CAE*, 2001, 3(4) :76-81. (in Chinese)
- [23] 吴恺云, 罗素蓉, 郑建岚. 基于非接触式观测技术的再生骨料混凝土断裂性能分析[J]. *工程力学*, 2022, 39(3):147-157.  
WU Kaiyun, LUO Surong, ZHENG Jianlan. Fracture properties analysis of recycled aggregate concrete based on digital image correlation technique[J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(3) :147-157. (in Chinese)
- [24] MASTALI M, DALVAND A. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete reinforced with hybrid recycled steel-polypropylene fiber [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(6) :04017012.
- [25] KHAN M R, CAO M L, XIE C P, et al. Efficiency of basalt fiber length and content on mechanical and microstructural properties of hybrid fiber concrete[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2021, 44(8) :2135-2152.