

引文格式:唐宇翔,肖建庄,夏冰. 三点弯曲下再生砂浆断裂性能与裂纹扩展过程[J]. 建筑科学与工程学报, 2025, 42(2): 114-121.

TANG Yuxiang, XIAO Jianzhuang, XIA Bing. Fracture properties and crack propagation process of recycled mortar under three-point bending[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(2): 114-121.

DOI:10.19815/j.jace.2023.04037

三点弯曲下再生砂浆断裂性能与裂纹扩展过程

唐宇翔^{1,2}, 肖建庄^{1,3}, 夏冰¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 长沙理工大学 交通学院, 湖南 长沙 410114;

3. 广西大学 双碳科学与技术研究院, 广西 南宁 530004)

摘要:为研究再生细骨料(RFA)取代率对砂浆断裂性能与裂纹扩展特性的影响,开展了4种RFA取代率(0%、25%、50%和100%)下的砂浆断裂行为试验研究。基于三点弯曲切口梁试验,获得再生砂浆断裂响应,包括完整的荷载-裂纹口张开位移曲线、临界裂纹扩展、起裂韧度、失稳韧度与断裂能。利用非接触式数字图像相关技术,测得试件表面变形,获取再生砂浆裂纹发展全过程。结果表明:RFA的使用降低了再生砂浆荷载-位移曲线的初始线性段斜率与峰值荷载,主要影响再生砂浆临界裂纹宽度方向的张开而不是裂纹长度方向的扩展;再生砂浆的起裂韧度、失稳韧度和断裂能随着RFA取代率的增加而逐渐减小,当RFA取代率为100%时,砂浆的起裂韧度、失稳韧度和断裂能分别减小了31.1%、29.5%和37.8%;不同RFA取代率下再生砂浆的断裂过程区长度 l_{FPZ} 发展表现出相似的特征,即先缓慢发展至峰值荷载(l_{FPZ} 为0.24倍~0.32倍的韧带长度),接着迅速增加至完全发展(l_{FPZ} 为0.83倍~0.91倍的韧带长度),之后 l_{FPZ} 随裂纹的扩展而减小。

关键词:再生砂浆;再生细骨料取代率;三点弯曲断裂试验;双K断裂韧度;断裂能;裂纹扩展特性

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2025)02-0114-08

Fracture properties and crack propagation process of recycled mortar under three-point bending

TANG Yuxiang^{1,2}, XIAO Jianzhuang^{1,3}, XIA Bing¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Transportation,

Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 3. Institute of Science and

Technology for Carbon Peak & Neutrality, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

Abstract: To investigate the effect of the replacement ratios of recycled fine aggregate (RFA) on the fracture properties and crack propagation characteristics of mortar, experimental studies were conducted on the fracture behavior of mortar with four types of RFA replacement ratios (0%, 25%, 50%, and 100%). Based on the three-point bending notched beam tests, the fracture responses of recycled mortar were obtained, including the complete load-crack mouth opening displacement curves, critical crack propagation, initial cracking toughness, unstable toughness, and fracture energy. By using non-contact digital image correlation technology, the surface

收稿日期: 2023-04-05

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3803400, 2022YFE0198300); 国家自然科学基金项目(52078358);

上海市科委“科技创新行动计划”科技支撑项目(22dz1207300)

作者简介: 唐宇翔(1996-), 男, 工学博士, 博士后, E-mail: yxtang@tongji.edu.cn.

通信作者: 肖建庄(1968-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, E-mail: jzx@tongji.edu.cn.

deformation of the specimen was measured to obtain the entire process of crack propagation in recycled mortar. The results show that the use of RFA reduces the initial linear slope and peak load of the load-displacement curves of recycled mortar, mainly affecting the critical crack propagation in the opening direction rather than the extension direction. The initial cracking toughness, unstable toughness, and fracture energy of recycled mortar gradually decrease with the increase of RFA replacement ratio. When the RFA replacement ratio is 100%, the initial cracking toughness, unstable toughness, and fracture energy of mortar decrease by 31.1%, 29.5%, and 37.8%, respectively. The development of the fracture process zone length of recycled mortar l_{FPZ} with different RFA replacement ratio exhibits similar characteristics, which slowly develops to the peak load (0.24 times to 0.32 times the ligament length), then rapidly increases to fully development (0.83 times to 0.91 times the ligament length), and then l_{FPZ} decreases with crack propagation.

Key words: recycled mortar; replacement ratio of recycled fine aggregate; three-point bending fracture test; double-K fracture toughness; fracture energy; crack propagation characteristic

Author resumes: TANG Yuxiang(1996-), male, PhD, E-mail: yxtang@tongji.edu.cn; XIAO Jianzhuang(1968-), male, PhD, professor, E-mail: jzx@tongji.edu.cn.

0 引言

随着建筑业的飞速发展,天然砂石资源日益稀缺,价格也随之飙升。与此同时,大量的建筑固体废弃物(主要是废弃混凝土)消纳难题愈发凸显。将废弃混凝土资源转化为再生骨料,制备再生骨料混凝土(RAC),是一种有效的解决方案^[1]。

混凝土中裂缝的萌生和发展会降低材料的强度和刚度,从而影响结构的安全性与耐久性。因此,混凝土材料的断裂特性对工程结构的性能设计和耐久性评估至关重要^[2]。相较于天然骨料,再生骨料表面附着随机分布的老砂浆,对其制备的混凝土力学性能会产生一定影响^[1]。根据粒径大小,再生骨料可分为再生细骨料(RFA)和再生粗骨料(RCA)。近年来,国内外学者对 RAC 的断裂特性进行了大量研究,主要集中在再生粗骨料混凝土(RCAC)。Ghorbel 等^[3]发现,由于混凝土孔隙率的增加,断裂能和裂纹扩展阻力随着 RCA 取代率的增加而降低。Dilbas 等^[4]采用优化的球磨方法对 RCA 进行改性,发现改性后的 RCA 可以提升混凝土的力学和断裂性能。Li 等^[5]对相同强度等级的天然骨料混凝土(NAC)和 RCAC 进行了三点弯曲断裂试验,发现 RCAC 的断裂韧度与 NAC 相似,但断裂能较低。肖建庄等^[6]发现剑麻纤维的掺入有效提升了 RCAC 的断裂性能。

关于 RFA 的使用对水泥基材料断裂性能影响的研究相对有限^[7]。Akono 等^[8]利用纳米级力学

表征方法研究了再生细骨料混凝土的断裂行为,发现再生细骨料混凝土的断裂韧度低于 NAC。Xiao 等^[9]研究发现,RCA 和 RFA 的使用分别导致混凝土断裂破坏呈现“穿晶”模式与“绕晶”模式。由于 RFA 分散于混凝土中的砂浆基体,有必要以砂浆为对象,研究 RFA 对水泥基材料的影响。

为了探讨 RFA 的使用对砂浆断裂行为与裂纹扩展特性的影响,本文对中心缺口梁进行三点弯曲试验,研究了不同 RFA 取代率下砂浆的断裂性能。记录了完整的荷载-裂纹口张开位移曲线,提取并分析了各种断裂参数,包括临界裂纹扩展、起裂韧度、失稳韧度、断裂能。然后,通过数字图像相关(DIC)技术测量的位移场,定量地评估再生砂浆断裂过程区的演化。

1 试验概况

1.1 原材料与配合比

水泥为 P.O42.5 级普通硅酸盐水泥;天然细骨料(NFA)为上海市某建材市场的河砂;RFA 来自上海市某建筑固废资源化利用工厂,骨料最大粒径为 4.75 mm;减水剂为聚羧酸高效减水剂,减水率为 20%~25%;水为自来水。细骨料的颗粒级配符合规范《混凝土和砂浆用再生细骨料》(GB/T 25176—2010)的 3 级配区要求,属于粗砂。按照规范《建设用砂》(GB/T 14684—2022)对所用细骨料的物理性能进行测试,结果见表 1。从表 1 可以看出,由于 RFA 表面附着旧浆体,导致其相对 NFA 有较低的

表 1 细骨料物理性能

Table 1 Physical properties of fine aggregates

类型	细度模数	表观密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	吸水率/%	含水率/%
NFA	3.2	2 610	1.0	0.9
RFA	3.4	2 240	13.3	6.6

表观密度与较高的吸水率。

保持水灰比为 0.45 不变,选取 4 种 RFA 取代率(0%、25%、50%、100%)进行研究。为了确保不同的砂浆具有相同的体积,按等体积法进行 RFA 取代。取代率为 0%时为天然骨料砂浆(NAM),将其作为基准砂浆。本试验是将自然条件下的 RFA 添加附加水,制备再生骨料砂浆(RAM)。由于 RFA 在砂浆拌合过程中并未完全吸水饱和^[7],附加用水量取 RFA 吸水率的 70%^[9]。调整每种拌合物的减水剂含量以获得接近且较优的工作性,参照规范《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005),测得相应的流动度约为 210 mm±30 mm。砂浆配合比如表 2 表示。

表 2 砂浆配合比

Table 2 Mix ratios of mortar

试件编号	各材料用量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)					
	水泥	NFA	RFA	水	附加水	减水剂
NAM	676	1 230	0	304	0.0	1.4
RAM-25	676	922	277	304	7.4	1.4
RAM-50	676	615	552	304	15.0	1.4
RAM-100	676	0	1 105	304	29.9	2.4

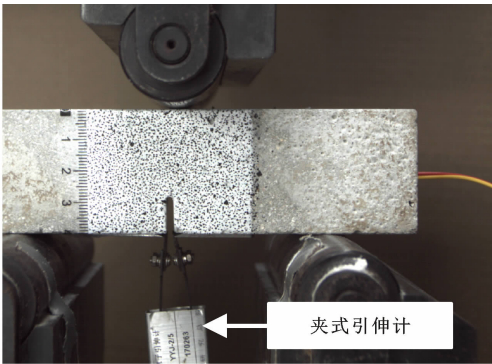
1.2 试件制作

再生砂浆制备的方法参考两阶段搅拌法^[10]。第一步是在搅拌机中将混合细骨料和一半所需用水搅拌 60 s,再加入水泥和减水剂,搅拌 30 s;最后,加入剩下的一半水,搅拌时间设定为 120 s。新拌砂浆在相应的塑料模具中浇筑,并通过振动台压实。在室温下储存 1 d 后,试样脱模并在饱和氢氧化钙溶液中进行养护,以防止氢氧化钙从试样中析出,影响水泥的水化过程,从而影响砂浆的强度。

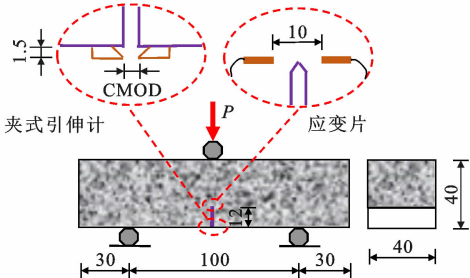
制备砂浆时,每组砂浆中分别浇筑 6 个 40 mm×40 mm×40 mm 的立方体试件,用于抗压与劈裂强度的测定,3 个 40 mm×40 mm×160 mm 的棱柱体,用于断裂性能试验。棱柱体试件的跨度 S 为 100 mm,预制切口长度 a_0 为 12 mm,切口由湿式切割所制。

1.3 三点弯曲断裂试验

参考 RELIM 的建议^[11],使用 MTS 电子万能试验机进行切口梁的三点弯曲试验,如图 1 所示。



(a) 实物图



(b) 示意图

图 1 三点弯曲试验装置(单位:mm)

Fig. 1 Three-point bending setup (unit: mm)

采用夹式引伸计测量裂纹口张开位移(CMOD),两个相距 10 mm 的应变片对称分布在切口尖端,确定起裂荷载 P_{ini} ;通过工业相机捕捉试件表面散斑图像(频率为 1 Hz),利用 DIC 技术获得位移信息。在确认所有测量设备都已安装好后,对试件进行 20 N 的预加载,然后以 $0.02 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的恒定速率加载至破坏。CMOD 值、挠度 δ 和荷载 P 由 MTS 记录,而应变片数据由静态应变采集仪收集。测试时再生砂浆试件的龄期为 60 d,且同一组试件的测试在 1 d 内不间断地进行。

2 试验结果与分析

2.1 抗压与劈裂强度

不同 RFA 取代率下砂浆的抗压强度 f_{cu} 和劈裂拉伸强度 f_{st} 如图 2 所示,力学与断裂参数如表 3 所示。由图 2 可知,与 NAM 相比,RFA 取代率低于 50%时,砂浆的 f_{cu} 变化较小,而取代率为 100%时, f_{cu} 下降约 10.4%。砂浆的 f_{st} 随 RFA 取代率的增加而持续减小,最大减小比例约为 33.7%,这一现象与文献[12]类似。造成这一现象的主要原因为:①RFA 需要额外的拌合用水,增大了砂浆中有效水灰比^[7];②RFA 中多孔附着旧浆体(甚至是完全的旧浆体),导致骨料强度差,存在多个薄弱界面过渡区^[13]。

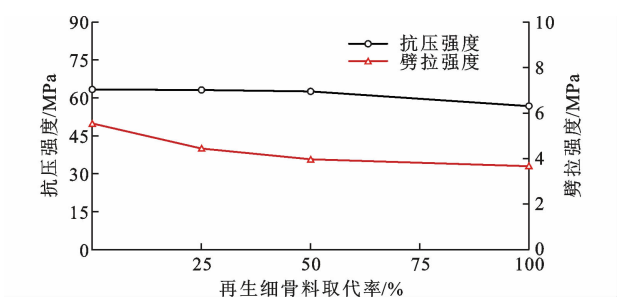


图 2 抗压与劈拉强度

Fig. 2 Compressive and splitting tensile strength

表 3 力学与断裂参数

Table 3 Mechanical and fracture parameters

试件编号	f_{cu}/MPa	f_{st}/MPa	P_c/N	T_c/mm	a_c/mm	$K_{Ic}^{ini}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	$K_{Ic}^{un}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	$G_f/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$
NAM	63.4	5.55	1 809	0.011	17.9	0.689	1.318	143.5
RAM-25	63.2	4.45	1 683	0.010	18.1	0.581	1.201	123.5
RAM-50	62.6	3.97	1 608	0.010	17.7	0.561	1.116	115.9
RAM-100	56.8	3.67	1 353	0.015	18.4	0.475	0.929	89.2

注: P_c 为荷载峰值; T_c 为临界裂纹尖端张开位移; a_c 为临界裂纹扩展长度; K_{Ic}^{ini} 为起裂韧度; K_{Ic}^{un} 为失稳韧度; G_f 为断裂能。

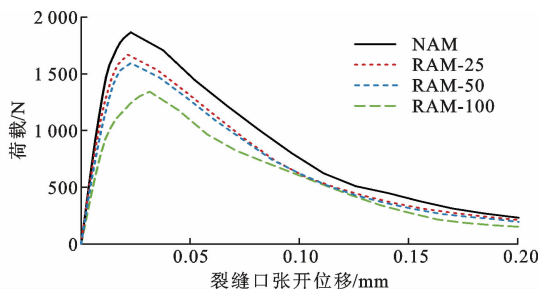


图 3 荷载-裂缝口张开位移曲线

Fig. 3 Load-crack mouth opening displacement curves

初始线性段的斜率和 P_c 明显下降,这表明 RFA 会导致砂浆的弹性模量和抗弯承载力下降。

2.3 临界裂纹扩展

峰值荷载时临界裂纹扩展包括临界裂纹尖端张开位移 T_c 与临界裂纹扩展长度 a_c 。基于线弹性断裂力学,临界裂纹尖端张开位移可以通过临界裂纹口张开位移与裂纹扩展长度计算得到,如式(1)所示^[14]。

$$T_c = M_c \left\{ \left(1 - \frac{a_0}{a_c} \right)^2 + \left(1.081 - 1.149 \frac{a_c}{D} \right) \cdot \left[\frac{a_0}{a_c} - \left(\frac{a_0}{a_c} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (1)$$

$$a_c = \frac{2(D + h_0)}{\pi} \arctan \sqrt{\frac{tE_c}{32.6(P_c + 0.5mg)} M_c - 0.1135} \quad (2)$$

$$E_c = \frac{1}{tC_i} \left[3.70 + 32.60 \tan^2 \left(\frac{\pi a_0 + h_0}{2D + h_0} \right) \right] \quad (3)$$

2.2 荷载-位移曲线

图 3 为不同 RFA 取代率下砂浆的荷载-裂缝口张开位移曲线。从图 3 可以看出,RFA 取代率对曲线的形状影响有限。荷载和裂缝口张开位移之间的关系反映了典型的准脆性断裂行为,曲线大致可以分为 3 个阶段:在早期加载阶段,试件几乎处于线弹性变形阶段;随着裂纹的萌生,非线性变形开始出现,且随着裂纹的稳定扩展而不断增加;当荷载达到荷载峰值 P_c 后,积累的应变能迅速释放,裂纹失稳扩展,曲线出现急剧下降。随着 RFA 取代率的增加,

式中: M_c 为临界裂纹口张开位移; D 为试件的高度; h_0 为固定夹式引伸计所用刀口的厚度,约为 1.5 mm; t 为试件的厚度; m 为梁支撑之间的质量; g 为重力加速度, $g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; E_c 为弹性模量; C_i 为荷载-裂缝口张开位移曲线初始线性段的柔度,即裂缝口张开位移与荷载的比值。

图 4 为不同 RFA 取代率下砂浆的临界裂纹尖端张开位移与扩展长度。从图 4 可以看出,在 RFA 取代率不大于 50% 的情况下,临界裂纹尖端张开位移保持在 0.010 mm,而随着取代率升高至 100% 时,临界裂纹尖端张开位移增大至 0.015 mm。不同砂浆的 a_c 受 RFA 取代率变化的影响有限,始终为 17.9 mm 左右。上述分析结果表明,RFA 主要影响砂浆临界裂纹宽度方向的张开,而不是裂纹长度方向的扩展。Xiao 等^[9]通过研究也发现,混凝土的 a_c 几乎不会随再生粗骨料、再生细骨料和再生粉料的使用而改变。

2.4 双 K 断裂韧度

双 K 断裂模型由 2 个断裂参数控制,分别为起裂韧度 K_{Ic}^{ini} 与失稳韧度 K_{Ic}^{un} 。在该模型中,材料的断裂全过程分为 3 个阶段,分别为起裂 ($K = K_{Ic}^{ini}$)、稳定扩展 ($K_{Ic}^{ini} < K < K_{Ic}^{un}$) 和失稳断裂 ($K_{Ic}^{un} < K$)。 K_{Ic}^{ini} 可由起裂荷载 P_{ini} 和 a_0 确定,如式(4)所示^[2,11]。

$$K_{Ic}^{ini} = 1.5 \frac{(P_{ini} + 0.5mg)S}{D^2 t} \sqrt{a_0} F(\alpha_0) \quad (4)$$

$$F(\alpha_0) = \frac{1.83 - 1.65\alpha_0 + 4.76\alpha_0^2 - 5.3\alpha_0^3 + 2.51\alpha_0^4}{(1 + 2\alpha_0)(1 - \alpha_0)^{3/2}} \quad (5)$$

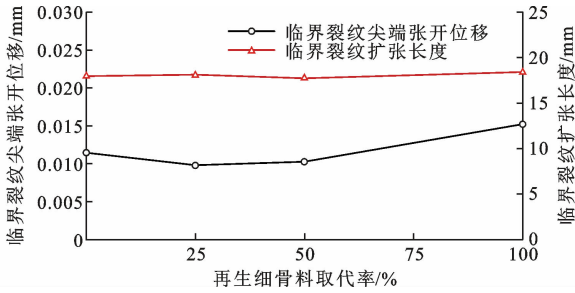


图4 临界裂纹尖端张开位移与扩展长度

Fig. 4 Critical crack tip opening displacement and extension length

式中: α_0 为初始缝高比, $\alpha_0 = a_0/D$; $F(\alpha_0)$ 为几何形状函数^[15]。

P_{ini} 通过电测法确定^[2,11], 其原理为: 砂浆承受外力作用时, 预制切口尖端受拉, 应变不断增大, 当切口尖端发生起裂, 此前所积累的能量得以释放, 应变发生回缩并逐渐减小。 P_{ini} 为荷载-应变 ($P-\epsilon$) 曲线应变发生回缩时所对应的荷载, 如图 5 所示。

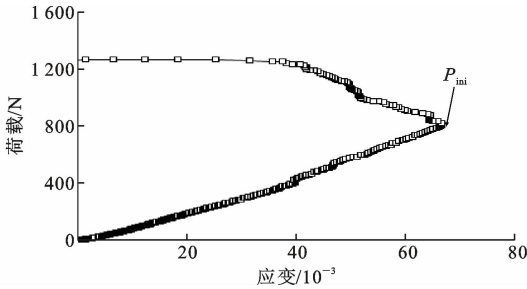


图5 典型荷载-应变曲线

Fig. 5 Typical load-strain curve

将式(4)和(5)中的 P_{ini} 和 a_0 替换为 P_c 和 a_c 来确定 K_{Ic}^u 的值。图 6 为不同 RFA 取代率下砂浆的双 K 断裂韧性。由图 6 可知: 砂浆的 K_{Ic}^{ini} 随 RFA 取代率的增加而逐渐减小; 当 RFA 取代率为 100% 时, 砂浆的 K_{Ic}^{ini} 达到最小 ($0.475 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), 与未掺 RFA 的砂浆 ($K_{Ic}^{ini} = 0.689 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) 相比减小了 31.1%。相似地, 随着 RFA 取代率的增加, 砂浆的 K_{Ic}^u 逐渐减小; 与 NAM 的 K_{Ic}^u ($1.318 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) 相比, RAM-100 的 K_{Ic}^u ($0.929 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) 减小了 29.5%。Akono 等^[8] 发现再生砂浆的断裂韧性低于天然砂浆, 并将其归因于再生砂浆相较于天然砂浆存在更高体积分数的低密度 C—S—H 凝胶。

起裂韧度与失稳韧度之间的差值定义为黏聚韧度 K_{Ic}^c , 即骨料黏聚力在裂纹尖端产生的应力强度因子^[2]。图 7 为不同 RFA 取代率下砂浆的起裂韧度与失稳韧度之比和黏聚韧度。由图 7 可知, 随着 RFA 取代率的增加, K_{Ic}^{ini}/K_{Ic}^u 几乎不变, 约为 0.50,

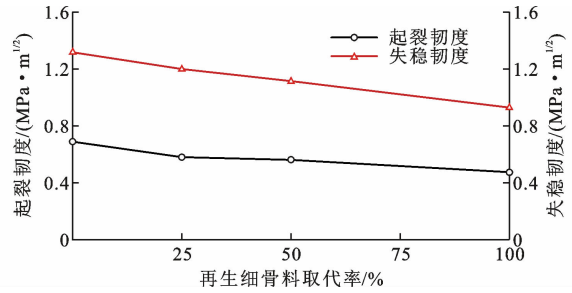


图6 双 K 断裂韧度

Fig. 6 Double-K fracture toughness

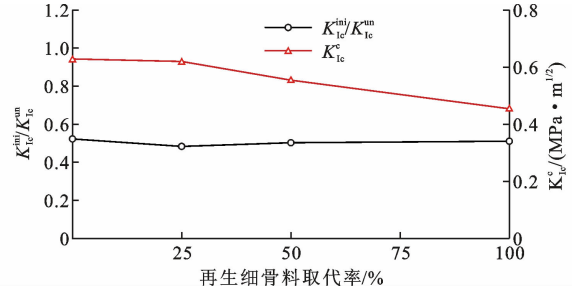


图7 起裂韧度与失稳韧度之比和黏聚韧度

Fig. 7 Ratio of crack initiation toughness to unstable fracture toughness and cohesive toughness

而 K_{Ic}^c 呈现下降趋势, 当 RFA 取代率为 100% 时, K_{Ic}^c 的下降幅度最大, 约为 27.8%, 表明 RFA 的使用减小了裂纹稳定扩展过程的骨料黏聚力, 但对其在整个断裂全过程占比的影响有限。

2.5 断裂能

断裂能 G_f 为单位面积裂纹扩展所需的能量, 根据断裂功法, G_f 可以根据荷载-位移曲线下的面积 W_0 确定, 计算公式如式(6)所示^[16]。

$$G_f = \frac{W_0 + mg\delta_0}{(D - a_0)t} \quad (6)$$

式中: δ_0 为试件最终失效时的挠度。

图 8 为不同 RFA 取代率下砂浆的 G_f 。可以看出, RAM-25、RAM-50 和 RAM-100 的 G_f 分别约为 123.5、115.9、89.2 $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$, 与 NAM 的 G_f (约为 143.5 $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$) 相比分别下降了 13.9%、19.2% 和 37.8%。由于附着旧浆体和天然骨料之间的老界面过渡区较弱, 且部分 RFA 为纯旧浆体, 降低了再生砂浆中硬骨料的体积分^[8], 导致再生砂浆破坏过程中裂纹分支和弯曲减少, 从而降低了能耗。

2.6 断裂过程区发展

砂浆断裂过程的能量消耗集中在断裂过程区 (FPZ), FPZ 是一个具有许多开裂钝化机制的损伤区, 包括微开裂、裂纹偏转、裂纹分支和骨料桥接^[17]。FPZ 的发展可以利用 DIC 获取的位移场来

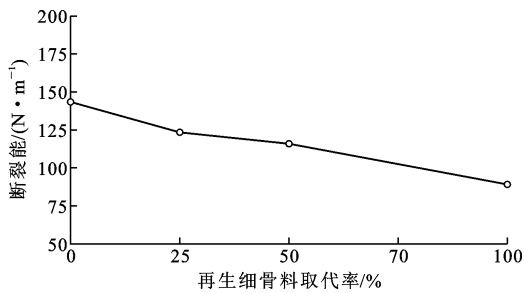


图8 断裂能

Fig. 8 Fracture energy

定量评估^[18]。关于 DIC 技术如何提取试件裂纹张开位移与扩展长度,可以参考文献[18]。图 9 比较了夹式引伸计和 DIC 测量的 RAM-100 试件的荷载-裂缝口张开位移曲线,二者良好的一致性验证了 DIC 的测量精度。图 10 为 DIC 测得的 RAM-100 试件的 3 个典型加载步下的裂缝张开位移曲线,其中横坐标的主裂缝张开位移值 w 可通过裂缝左右两端水平位移差获得^[18-20],纵坐标的切口以上高度以预制切口尖端为零点。

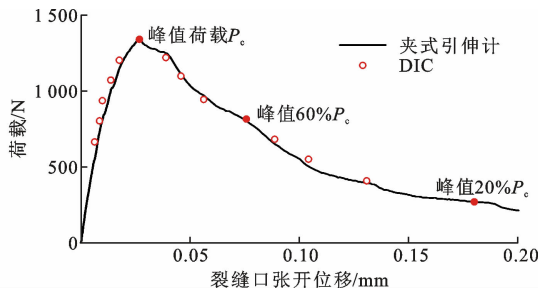


图9 夹式引伸计和 DIC 的荷载-裂缝口张开位移曲线比较

Fig. 9 Comparison of load-crack mouth opening displacement curves of clip gauge and DIC

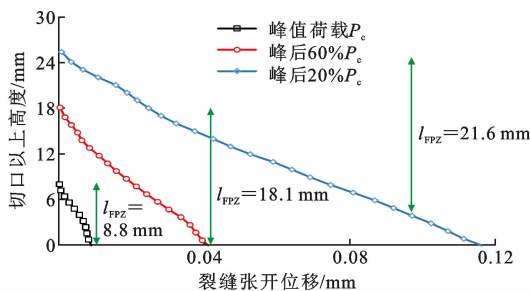


图10 典型加载步下 RAM-100 试件裂纹张开位移曲线

Fig. 10 Crack opening displacement curves of specimen RAM-100 under typical loading steps

在 FPZ 发展初期,FPZ 的尾部为预制切口尖端,FPZ 的端部为裂纹尖端,如图 10 所示。当荷载达到峰值荷载与峰后 60% P_c 时,断裂过程区长度 l_{FPZ} 分别为 8.8、18.1 mm。在 FPZ 完全发展之后,其端部仍为裂纹尖端,而尾部会往上移,这时需要重

新确定^[20]。根据虚拟裂缝模型^[17],FPZ 内的黏聚应力与 w 呈一定的函数关系,FPZ 完全发展时的 w 可视为无黏聚应力时所对应的临界裂缝张开位移 w_c 。Petersson^[21] 建议 w_c 取 $3.6G_f/f_t$,其中 f_t 为砂浆的抗拉强度,由 $0.9f_{st}$ 确定^[22]。根据表 3, RAM-100 的 w_c 约为 0.097 mm。当荷载下降至峰后 20% P_c 时,FPZ 尾部上移约 3.8 mm,此时的 l_{FPZ} 约为 21.6 mm。

为了评估不同 RFA 取代率下砂浆 FPZ 长度的变化,将整个断裂过程中 l_{FPZ} 与归一化裂纹扩展长度 $(a-a_0)/(D-a_0)$ 和归一化荷载水平 P/P_c 之间的关系绘于图 11。从图 11 可以看出,不同 RFA 取代率下曲线的形状大致相同。峰值荷载前, l_{FPZ} 发展缓慢;在峰值荷载时, l_{FPZ} 为韧带深度 $(D-a_0)$ 的 0.23 倍~0.32 倍;随后, l_{FPZ} 发展迅速,当荷载降低到 0.20 P_c ~0.32 P_c 时,FPZ 完全发展并达到其最大长度,为韧带长度的 0.83 倍~0.91 倍;在 FPZ 完全发展之后, l_{FPZ} 随着裂纹的扩展而减小。产生该现象的原因可能为试件的边界效应,因为剩余韧带长度不够,导致裂纹张开主导了裂纹的扩展。

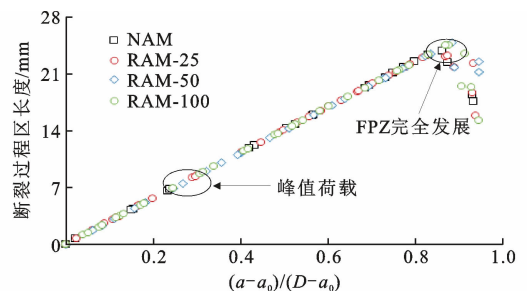
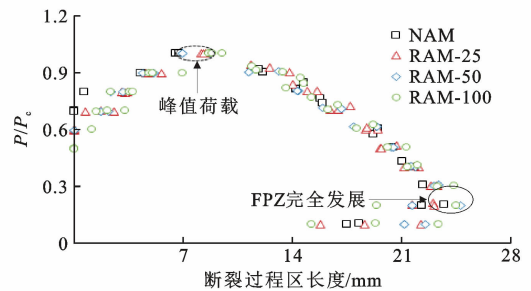
(a) 断裂过程区长度随 $(a-a_0)/(D-a_0)$ 的变化(b) 断裂过程区长度随 P/P_c 的变化

图11 断裂过程区长度发展

Fig. 11 Development of length of fracture process zone

3 结语

(1) RFA 的使用降低了砂浆荷载-裂缝口张开位移曲线的初始线性段斜率与峰值荷载,且主要影响再生砂浆的临界裂纹宽度方向的张开而不是裂纹长度方向的扩展。

(2)随着 RFA 取代率的增加,再生砂浆的起裂韧度与失稳韧度逐渐减小,当 RFA 取代率为 100% 时,再生砂浆的起裂韧度与失稳韧度分别减小了 31.1% 和 29.5%。RFA 的使用减小了裂纹稳定扩展过程的骨料黏聚力,但对其在整个断裂全过程占比的影响有限。

(3)再生砂浆的断裂能随着 RFA 取代率的增加而降低,当 RFA 取代率为 100% 时,再生砂浆的断裂能降低了 37.8%。

(4)不同 RFA 取代率下再生砂浆的 FPZ 长度发展表现出类似的特征:峰值荷载前, l_{FPZ} 发展缓慢;在峰值荷载下, l_{FPZ} 为韧带深度的 0.24 倍~0.32 倍,当荷载降低到 0.20 倍~0.32 P_c 时,FPZ 完全发展并达到其最大长度,为韧带长度的 0.83 倍~0.91 倍,之后 l_{FPZ} 随着裂纹的扩展而减小。

(5)在后续的研究中,可以采用一些低碳调控措施,如再生骨料碳化改性以及绿色纤维增韧等,对再生砂浆断裂性能进行优化提升。再生细骨料细微观结构特征对材料宏观力学性能的跨尺度影响机理仍需进一步深入研究。

参考文献:

References:

- [1] 肖建庄,张航华,唐宇翔,等.废弃混凝土再生原理与再生混凝土基本问题[J].科学通报,2023,68(5):510-523.
XIAO Jianzhuang, ZHANG Hanghua, TANG Yuxiang, et al. Principles for waste concrete recycling and basic problems of recycled concrete[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(5): 510-523.
- [2] 徐世烺.混凝土断裂力学[M].北京:科学出版社,2011.
XU Shilang. Fracture mechanics of concrete[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [3] GHORBEL E, WARDEH G. Influence of recycled coarse aggregates incorporation on the fracture properties of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 154: 51-60.
- [4] DILBAS H, ÖZGÜR C, YILDIRIM H. An experimental investigation on fracture parameters of recycled aggregate concrete with optimized ball milling method[J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 119118.
- [5] LI T, XIAO J Z, ZHANG Y M, et al. Fracture behavior of recycled aggregate concrete under three-point bending[J]. Cement and Concrete Composites,

2019, 104: 103353.

- [6] 肖建庄,许金校,罗素蓉,等.剑麻纤维对再生骨料混凝土断裂性能的影响[J].建筑材料学报,2023,26(6):587-595.
XIAO Jianzhuang, XU Jinxiao, LUO Surong, et al. Effect of sisal fiber on fracture performance of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(6): 587-595.
- [7] NEDELJKOVIC M, VISSER J, BRANKO S, et al. Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: a critical review[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 38: 102196.
- [8] AKONO A T, CHEN J X, ZHAN M M, et al. Basic creep and fracture response of fine recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 266: 121107.
- [9] XIAO J Z, TANG Y X, CHEN H N, et al. Effects of recycled aggregate combinations and recycled powder contents on fracture behavior of fully recycled aggregate concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 366: 132895.
- [10] TAM V W Y, TAM C M, WANG Y. Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(10): 1928-1939.
- [11] XU S L, LI Q H, WU Y, et al. RILEM standard: testing methods for determination of the double-K criterion for crack propagation in concrete using wedge-splitting tests and three-point bending beam tests, recommendation of RILEM TC265-TDK[J]. Materials and Structures, 2021, 54(6): 220.
- [12] KUMAR R, GURRAM S C B, MINOCHA A K. Influence of recycled fine aggregate on microstructure and hardened properties of concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 2017, 69(24): 1288-1295.
- [13] 王春晖,肖建庄.再生细骨料混凝土材料性能与结构行为研究评述[J].土木工程学报,2022,55(5):37-53.
WANG Chunhui, XIAO Jianzhuang. Material properties and structural behaviors of recycled fine aggregate concrete: an overview[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(5): 37-53.
- [14] JENQ Y, SHAH S P. Two parameter fracture model for concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111(10): 1227-1241.
- [15] 尹阳阳,胡少伟.小跨高比混凝土三点弯曲梁双 K 断裂参数研究[J].工程力学,2020,37(12):138-146, 170.

- YIN Yangyang, HU Shaowei. Double-k fracture parameters of concrete in three-point bending beams with small span-depth ratios[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(12): 138-146, 170.
- [16] RILEM D R. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams[J]. Materials and Structures, 1985, 18(4): 287-290.
- [17] HILLERBORG A, MODEER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6): 773-781.
- [18] WU Z M, RONG H, ZHENG J J, et al. An experimental investigation on the FPZ properties in concrete using digital image correlation technique[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(17): 2978-2990.
- [19] TANG Y X, CHEN H N. Characterizations on fracture process zone of plain concrete[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 25(8): 819-830.
- [20] 唐宇翔,陈红鸟,王青原,等. 基于扩展有限元法的混凝土断裂参数研究[J]. 应用力学学报, 2019, 36(6): 1307-1313.
- TANG Yuxiang, CHEN Hongniao, WANG Qingyuan, et al. Study on fracture parameters of concrete based on extended finite element method[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(6): 1307-1313.
- [21] PETERSSON P. Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials [R]. Sweden: Lund University, 1981
- [22] CEB-FIP model code 1990: CEB-90[S]. Brussels: Committee Euro-International Du Beton, 1991.