

文章编号: 1673-9469 (2018) 04-0025-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.04.006

粉煤灰取代率对再生混凝土断裂性能影响试验研究

马晓楠, 安新正, 张冰, 牛薇

(河北工程大学土木工程学院, 河北邯郸 056038)

摘要: 为了研究不同粉煤灰取代率对富含砖粒再生混凝土断裂性能的影响, 以RC25为基准再生混凝土, 并以粉煤灰取代率为0%、10%、20%、30%为变化参数, 制作了四组尺寸为100 mm×100 mm×515 mm的富含砖粒再生混凝土三点弯曲梁试件。通过三点弯曲梁的断裂韧性试验, 研究了富含砖粒再生混凝土随粉煤灰取代率的变化规律。结果表明: 当粉煤灰取代率为10%时, 富含砖粒再生混凝土的起裂韧度和失稳韧度提高幅度分别为4.61%和7.44%, 当粉煤灰取代率超过10%后, 随着粉煤灰取代率的增加, 断裂韧性逐渐减小, 最大降幅为12.21%。给出了富含砖粒再生混凝土的双K断裂韧度与粉煤灰取代率的关系式。

关键词: 富含砖粒再生混凝土; 粉煤灰取代率; 断裂韧性

中图分类号: TU528

文献标识码: A

Experimental study on influence of fly ash on fracture toughness of recycled concrete

MA Xiaonan, AN Xinzhen, ZHANG Bing, NIU Wei

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan, 056038, China)

Abstract: In order to study the effect of different fly ash replacement ratio on the fracture performance of brick-rich recycled concrete, four sets of brick-recycled concrete three-point bending beam specimens with dimensions of 100mm×100mm×515mm were produced. Recycled concrete was based on RC25, and the replacement ratio of fly ash was 0%, 10%, 20% and 30%. Through the fracture toughness test of three-point bending beam, the variation law of the replacement rate of brick-rich recycled concrete with fly ash was studied. The results show that when the replacement ratio of fly ash is 10%, the increase of cracking toughness and instability toughness of brick-rich recycled concrete is 4.61% and 7.44%, respectively. When the replacement rate of fly ash exceeds 10%, with the increase of the replacement rate of fly ash, the fracture toughness decreases gradually, and the reduction maximum is 12.21%. The relationship between double K fracture toughness and fly ash replacement ratio of brick-rich recycled concrete is given.

Key words: brick-rich recycled concrete; fly ash replacement rate; fracture toughness

当今社会, 由于人为及自然灾害等原因造成了大量建筑物被拆除, 因此产生了大量固体废弃物^[1], 这其中除了废弃混凝土外还有相当大比例的废弃砖粒^[2], 如何将这部分含砖粒的固体废弃物进行资源化利用, 成了亟待解决的问题。混凝土的断裂性能反映了其抵抗裂缝产生和失稳扩展的能力, 对

结构的抗裂设计有重要意义^[3-4], 然而到目前为止对含废弃砖粒再生混凝土的研究都基本集中在力学性能及耐久性方面^[5-7], 而对其断裂性能的研究涉及较少。鉴于粉煤灰作为一种活性掺合料, 能在一定程度上改善再生混凝土的力学性能^[8-9], 基于以上分析, 以粉煤灰取代率为参数, 通过试验研究不同粉煤灰取

收稿日期: 2018-07-21

特约专稿

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目 (E2015204111); 河北省科学技术研究与发展计划资助项目 (15273609D)

作者简介: 马晓楠 (1994-), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要从事再生混凝土断裂性能的研究工作。

代率对富含砖粒再生混凝土断裂性能的影响,旨在为富含砖粒再生混凝土的基础性研究提供一些参考。

1 试验概况

1.1 试验用原材料

水泥采用普通硅酸盐水泥(太行山牌 42.5 级);再生粗骨料由邯郸市全有建材有限公司提供,砖粒含量 45% ~ 60%,其基本性能指标详见表 1;细骨料采用细度模数为 1.6 的河砂;拌合用水为市用自来水;粉煤灰采用邯郸马头电厂生产的 I 级 F 类粉煤灰;减水剂采用 TW-JS 高效减水剂,掺量为胶凝材料用量的 11%。

1.2 再生混凝土配合比及试件制作

本试验根据《普通混凝土配合比设计规程》计算富含砖粒再生混凝土的各组分用量,并考虑到再生粗骨料的吸水率较大,会对其和易性有一定不良影响,故应考虑附加用水量^[5]。富含砖粒再生混凝土配合比及 28 d 抗压强度实测值详见表 2。

试验中以 $r=0\%$ 、 $r=10\%$ 、 $r=20\%$ 、 $r=30\%$ 为研究参量,设置了 4 个试验对照组,分组编号分别为 RCF0、RCF1、RCF2、RCF3,每组浇筑三根尺寸为 100 mm × 100 mm × 515 mm,预制裂缝长度为 40 mm 的富含砖粒再生混凝土三点弯曲梁试件和三个尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试块。富含砖粒再生混凝土三点弯曲梁的制作方法立方体试块抗压强度的实测分别严格按照《水工混凝土断裂试验规程》和《普通混凝土力学性能方法标准》的相关要求进行。

1.3 断裂韧性试验方法

试件的断裂韧性试验在河北工程大学力学实验室 WDW-100D 微机控制电子式万能试验机上进行。具体方法为: (1) 在试验机承重台上放置两个钢支墩,并在钢支墩上放置支座,两者之间通过螺栓连接,由于安装和拆卸试件可能会导致支墩发生偏移,故每个试件试验前都及时调整支墩位置,以保证试验数据的准确性。(2) 在预制裂缝底部两侧粘贴薄木板,并在薄木板上粘贴带肋钢筋用于安装夹式引伸计;夹式引伸计标距为 50 mm,量程为 25 mm。(3) 在试件预制裂缝尖端部位对称粘贴应变片,目的是通过应变回滞点找出起裂荷载。(4) 试验的加载方式为等位移加载,加载速率为 0.1 mm/min。荷载和各测点的应变以及裂缝口张开位移用计算机采集系统进行实时采集。试验装置见图 1。

2 试验结果与分析

2.1 试件试验现象分析

试验初期,试件开始受力,裂缝尖端处由于受到荷载(包括试件自重)的影响产生拉应变,并产生细微裂缝。随着试验荷载的继续施加,裂缝尖端的富含砖粒再生混凝土由于应力集中而产生开裂,此时细微裂缝衍生并逐渐形成宏观裂缝,之后裂缝会有一段稳定的扩展过程,此阶段裂缝端部张开位移稳步增大,裂缝平稳地向上延展。随着试验的继续进行,荷载达到最大值后开始逐渐降低,裂缝口张开位移迅速增大,随后裂缝贯穿整个梁截面,富含砖粒再生混凝土梁发生脆断性破坏。通过对试件破坏面的仔细观察可以发现,各组试件的断裂破坏

表 1 再生粗骨料的基本性能指标
Tab.1 Basic performance index of recycled coarse aggregate

粒径范围 /mm	压碎指标 /%	表观密度 /(kgm ⁻³)	堆积密度 /(kgm ⁻³)	24 h 吸水率 /%	含泥量 /%
5 ~ 25	16.5	2 381	1 936	11.67	1.07

表 2 设计配合比及抗压强度
Tab.2 Mix proportion and compressive strength of RAC

试件编号	水胶比	粉煤灰取代率 $r/\%$	配合比 /(kg·m ⁻³)						28 d 抗压强度 实测值 /MPa
			粉煤灰	水	水泥	河砂	再生粗骨料	减水剂	
RCF0-1~3	0.45	0	0	162	362	602	906	39.82	31.5
RCF1-1~3	0.45	10	36.2	162	325.8	602	906	39.82	32.1
RCF2-1~3	0.45	20	72.4	162	289.6	602	906	39.82	30.8
RCF3-1~3	0.45	30	108.6	162	253.4	602	906	39.82	29.1

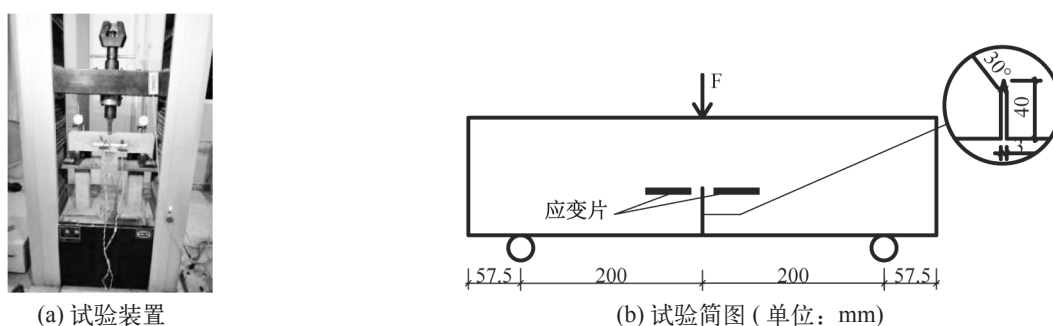


图1 试验装置简图

Fig.1 Test device schematic

均表现为再生砖粒和旧碎石以及水泥石被拉断,造成这种断裂特征的原因可能是再生砖粒自身的抗拉强度一般较低,表面粗糙且有较多孔隙,这种结构形态使得再生砖粒与水泥石的界面粘接力较强^[10]。由于砖粒内部孔隙较多,旧碎石内部带有一定初始裂缝,且水泥石中含有一部分因振捣不密实等原因产生的微小气孔,故试件受荷时,这些初始损伤处会由于应力集中而先行开裂,各自独立发展。随着荷载的增大,裂缝逐渐汇聚成一条主裂缝并向上延伸,导致富含砖粒再生混凝土的整体断裂破坏,这与普通混凝土主要沿粗骨料和水泥石的界面破坏是不同的。各组试件断裂破坏面见图2所示。

2.2 再生混凝土断裂性能试验结果

文章采用徐世烺教授提出的双 K 断裂模型^[11]来分析研究富含砖粒再生混凝土的断裂性能,并根据我国《水工混凝土断裂试验规程》中给定的计算式

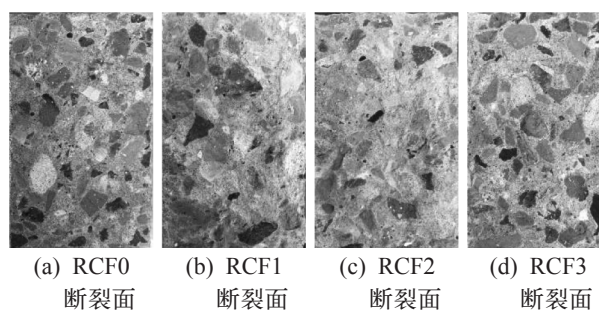


图2 试件断裂破坏面

Fig.2 Specimen fracture surface

对试验中得到的数据进行计算,将试验所得数据代入相关计算式中得出各组试件相应的断裂参数,见表3所示。

2.3 粉煤灰掺量对再生混凝土断裂韧度的影响

根据表3的试验结果,用每组数据的平均值来代表该组数据可以发现相对于 $r=0\%$ 时的富含砖粒

表3 三点弯曲梁试件双 K 断裂参数试验结果Tab.3 Results of double K fracture parameter test of three-point bending beam specimen

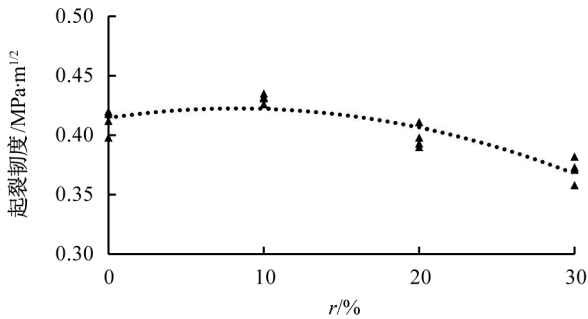
试件编号	起裂荷载/kN	平均值	最大荷载/kN	平均值	起裂韧度/(MPa·m ^{1/2})	平均值	失稳韧度/(MPa·m ^{1/2})	平均值
RCF0-1	1.757		2.603		0.420		0.671	
RCF0-2	1.820	1.794	2.496	2.521	0.398	0.412	0.649	0.659
RCF0-3	1.805		2.464		0.418		0.658	
RCF1-1	1.849		2.638		0.435		0.714	
RCF1-2	1.840	1.837	2.629	2.623	0.432	0.431	0.711	0.708
RCF1-3	1.822		2.602		0.426		0.698	
RCF2-1	1.704		2.402		0.411		0.635	
RCF2-2	1.649	1.682	2.317	2.358	0.390	0.398	0.637	0.628
RCF2-3	1.693		2.355		0.393		0.611	
RCF3-1	1.297		1.934		0.382		0.579	
RCF3-2	1.269	1.274	1.807	1.824	0.373	0.371	0.557	0.561
RCF3-3	1.256		1.731		0.358		0.548	

再生混凝土, $r=10\%$ 时, 起裂韧度和失稳韧度分别增长了 4.61% 和 7.44%, $r=20\%$ 和 $r=30\%$ 时, 起裂韧度分别下降了 3.40% 和 9.95%, 失稳韧度分别下降了 4.70% 和 12.21%。由此可知, 富含砖粒再生混凝土的双 K 断裂韧度随着 r 的增加呈现出先增大, 后减小的趋势, 且富含砖粒再生混凝土起裂韧度的增幅和降幅都小于同取代率条件下失稳韧度的增幅和降幅, 说明不同粉煤灰取代率对富含砖粒再生混凝土的起裂韧度影响相对较小。

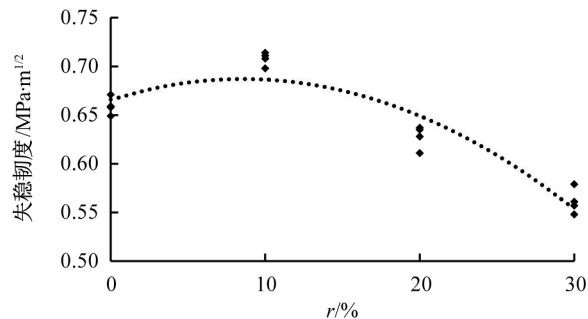
图 3 给出了富含砖粒再生混凝土的双 K 断裂韧度随 r 的变化规律, 利用最小二乘法对其进行拟合分析, 可以得出两者之间的关系式为:

$$K_{IC}^{ini} = - 0.000\ 1r^2 + 0.001\ 9r + 0.414\ 9 \tag{1}$$

$$K_{IC}^{un} = - 0.000\ 3r^2 + 0.005\ 0r + 0.666\ 1 \tag{2}$$



(a) 起裂韧度随 r 的变化规律



(b) 失稳韧度随 r 的变化规律

图 3 双 K 断裂韧度随 r 的变化规律

Fig.3 Variation of cracking toughness and instability toughness with r

式中, K_{IC}^{ini} —起裂韧度, $MPa \cdot m^{1/2}$; K_{IC}^{un} —失稳韧度, $MPa \cdot m^{1/2}$ 。

将富含砖粒再生混凝土的起裂韧度 K_{IC}^{ini} 和失稳韧度 K_{IC}^{un} 的实测平均值与根据式 (1)、式 (2) 分别得出的计算值 k_1 、 k_2 相比较, 结果见表 4 所示。

根据表 4 可知, 本文给出的富含砖粒再生混凝土的双 K 断裂韧度总体偏差在 0.96~1.03 之间, 能在一定程度上反映双 K 断裂韧度与 r 的实际情况。

3 结论

1) 富含砖粒再生混凝土的断裂破坏同普通混凝土类似可以分为起裂、裂缝稳定扩展和失稳扩展三个阶段, 但破坏面形态有较大的不同。

2) 粉煤灰取代率为 10% 时, 富含砖粒再生混凝土的双 K 断裂韧度最大, 但起裂韧度和失稳韧度仅分别增幅 4.61% 和 7.44%, 由此可以看出不同粉煤灰取代率对富含砖粒再生混凝土的断裂性能影响较小; 粉煤灰取代率大于 10% 时, 富含砖粒再生混凝土的双 K 断裂韧度随粉煤灰取代率的增加逐渐减小。

3) 给出了富含砖粒再生混凝土的双 K 断裂韧度与粉煤灰取代率的关系式, 其计算结果与试验结果吻合度较好。

参考文献:

[1] 陈家珑, 周文娟, 路宏波. 地震灾区建筑垃圾处理技术研究 [J]. 建筑技术, 2009, 40(9): 822-824.
[2] 王社良, 景龙平, 张 博, 等. 砖含量对再生骨料性能影响的试验研究 [J]. 混凝土, 2011(2): 83-85.
[3] 胡少伟, 陆 俊, 范向前. 混凝土损伤断裂性能试验研究进展 [J]. 水利学报, 2014, 45(S1): 10-18.
[4] 徐世烺, 董丽欣, 王冰伟, 等. 我国混凝土断裂力学发展三十年 [J]. 水利学报, 2014, 45(S1): 1-9.
[5] 安新正, 易 成, 王小学, 等. 冻融后钢筋再生混凝土粘结性能研究 [J]. 实验力学, 2013, 28(2): 227-234.
[6] 姜新佩, 舒 倩, 董云婷. 富含砖粒再生混凝土的抗

表 4 双 K 断裂韧度实测值与计算值对比

Tab.4 Comparison of measured and calculated values of double K fracture toughness

试件编号	$K_{IC}^{ini} / (MPa \cdot m^{1/2})$	$k_1 / (MPa \cdot m^{1/2})$	K_{IC}^{ini} / k_1	$K_{IC}^{un} / (MPa \cdot m^{1/2})$	$k_2 / (MPa \cdot m^{1/2})$	K_{IC}^{un} / k_2
RCF0	0.412	0.415	0.99	0.659	0.666	0.99
RCF1	0.431	0.424	1.02	0.708	0.686	1.03
RCF2	0.398	0.413	0.96	0.628	0.646	0.97
RCF3	0.371	0.382	0.97	0.561	0.546	1.03

渗性试验[J]. 兰州理工大学学报, 2017, 43(1): 143-147.

[7] 安新正, 牛薇, 张亚飞, 等. 含砖粒再生混凝土基本性能研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2017, 34(1): 30-33.

[8] 仝小芳, 杨鼎宜, 王欣, 等. 粉煤灰再生混凝土基本性能研究[J]. 混凝土, 2014(7): 27-31.

[9] JONGSUNG SIM, CHEOLWOO PARK. Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and

carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate[J]. Waste Management, 2011, 31(11): 2352-2360.

[10] 崔宏志, 邢锋. 用 SEM 和 FT-IR 研究轻骨料混凝土界面过渡区[J]. 混凝土, 2010(1): 18-20.

[11] 徐世烺, 赵艳华. 混凝土裂缝扩展的断裂过程准则与解析[J]. 工程力学, 2008, 25(S2): 20-33.

(责任编辑 王利君)

(上接第24页)

4 结论

1) 选用 42.5R 快硬硫铝酸盐水泥, 占比 15.89%, 在与其它材料进行拌和后, 有利于桩基 3D 打印混凝土快速凝结, 以便于 3D 打印时能快速形成所制的桩基础; 桩基 3D 打印混凝土的强度测试结果表明, 其具有较高的强度。

2) 当材料配比中水占比 6.2%, 水灰比为 0.39, 砂和石选用粒径小于 0.5 mm 的建筑干砂和粒径 2~3 mm 的石子, 占比分别为 41.14% 和 35.58% 时, 能保证材料有较好的强度; 试验选用砂率靠近合理砂率, 有利于提高混凝土密实性, 提高其强度; 同时小粒径砂石的选择避免了打印过程中发生喷嘴堵塞, 便于打印过程的进行。

3) 采用葡萄糖酸钠缓凝剂, 占比 0.71%, 有利于较好地控制拌和后的混凝土的凝结时间, 避免凝结时间的不合适导致打印过程的中断产生不良的影响; 采用聚羧酸减水剂, 占比 0.48%, 能够增强材料的塑形, 有利于较好地控制混凝土的流动性, 能够在混凝土配比较低的情况下提供较好的流动性, 从而获得较高的抗压强度, 以达到所需的强度要求。

参考文献:

[1] SUVASH Chandra Paul, YI Wei Daniel Tay, BIRANCHIPANDA, et al. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building

and construction[J]. Archives of Civil & Mechanical Engineering, 2018, 18(1): 311-319.

[2] TAKAGISHI Kensuke, UMEZU Shinjiro. Development of the Improving Process for the 3D Printed Structure[J]. Scientific Reports, 2017(7): 39852.

[3] 马敬畏, 蒋正武, 苏宇峰. 3D 打印混凝土技术的发展与展望[J]. 混凝土世界, 2014(7): 41-46.

[4] 李旋. 3D 打印混凝土配合比设计及其基本性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.

[5] 石从黎, 林宗浩, 陈敬, 等. 3D 打印混凝土技术的初探[J]. 重庆建筑, 2017(3): 24-27.

[6] 丁铸, 李定发, 朱继翔. 3D 打印建筑材料现状及其发展[J]. 墙体革新与建筑节能, 2017(10): 61-65.

[7] 李福平, 邓春林, 万晶. 3D 打印建筑技术与商品混凝土行业展望[J]. 混凝土世界, 2013(3): 28-29.

[8] 李福平. 3D 打印混凝土结构及原材料初探[J]. 商品混凝土, 2015(11): 32-33.

[9] 乔星宇, 李韵通, 潘宁. 3D 打印建筑混凝土配合比设计研究[J]. 现代装饰: 理论, 2016(6): 240-241.

[10] 张大旺, 王栋民. 3D 打印混凝土材料及混凝土建筑技术进展[J]. 硅酸盐通报, 2015(6): 1583-1588.

[11] 余洋. 浅析水灰比对混凝土强度的影响与控制[J]. 河南水利与南水北调, 2006(6): 34-34.

[12] 胡延燕. 关于缓凝剂葡萄糖酸钠若干问题的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.

[13] 王栋民, 熊卫锋, 左彦峰, 等. 聚羧酸盐高性能减水剂的制备、作用机理及应用现状[J]. 混凝土, 2008(5): 64-67.

(责任编辑 王利君)