

文章编号: 1673-9469 (2019) 02-0021-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.02.005

## 砂率对富含砖粒再生混凝土断裂性能影响试验研究

马晓楠, 张冰, 安新正

(河北工程大学土木工程学院, 河北邯郸 056038)

**摘要:** 为了研究砂率对再生混凝土断裂性能的影响, 以RC25为基准再生混凝土, 制作了砂率分别为25%、30%、35%、40%、45%、50%的再生混凝土梁试件。通过梁的三点弯曲试验, 从断裂韧度和断裂能两个方面, 研究了富含砖粒再生混凝土断裂性能随砂率的变化规律。结果表明: 富含砖粒再生混凝土的断裂韧度、断裂能均随砂率的增大呈现出先增大而后减小的趋势; 砂率由25%增大到35%时, 断裂韧度增大了8.43%, 断裂能增大了10.73%; 砂率由35%增大到50%时, 断裂韧度降低了3.81%, 断裂能降低了11.29%; 砂率小于35%时的断裂韧度比砂率大于35%时的断裂韧度更容易受到砂率变化的影响, 而断裂能则没有出现相同的情况。

**关键词:** 砂率; 富含砖粒再生混凝土; 断裂能; 断裂韧度

**中图分类号:** TU528

**文献标识码:** A

## Experimental Study on Influence of Sand Ratio on Fracture Performance of Brick-rich Recycled Concrete

MA Xiaonan, ZHANG Bing, AN Xinzheng

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

**Abstract:** In order to study the effect of sand rate on the fracture properties of recycled concrete, recycled concrete was prepared based on RC25, and recycled concrete beam specimens with sand ratios of 25%, 30%, 35%, 40%, 45% and 50% were produced. Through the three-point bending test of the beam, the variation of the fracture performance of the brick-rich recycled concrete with the sand ratio was studied from the aspects of fracture toughness and fracture energy. The results show that the fracture toughness and fracture energy of the brick-recycled concrete increase first and then decrease with the increase of sand rate. When the sand rate increases from 25% to 35%, the fracture toughness increases. By 8.43%, the fracture energy increases by 10.73%, and when the sand ratio increases from 35% to 50%, the fracture toughness decreases by 3.81%, the fracture energy decreases by 11.29%. The fracture toughness at a sand ratio less than 35% is more susceptible to changes in sand rate compared with that at a sand ratio greater than 35%, which does not happen to the fracture energy.

**Key words:** sand rate; rich in brick recycled concrete; fracture energy; fracture toughness

砂率作为混凝土配合比设计的重要参数之一, 其大小直接影响了混凝土的和易性、密实度, 从而对混凝土的施工性能、质量及生产成本产生影响。再生混凝土中由于骨料来源的特殊性, 使其物理力学性能相对于普通混凝土要差<sup>[1-2]</sup>, 所以再生混凝土应用于结构中更容易产生宏观裂缝, 而断裂性能作

为评价结构内部存在宏观裂缝时的力学性能, 能在结构出现宏观裂缝后评价结构的寿命和安全性<sup>[3]</sup>。目前砂率对再生混凝土的影响研究主要集中在砂率对再生混凝土的工作性能、收缩开裂及强度方面的影响<sup>[4-6]</sup>, 而砂率对再生混凝土断裂性能的影响研究则少有涉及。鉴于以上原因, 有必要展开砂率对再

收稿日期: 2018-12-18

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(152736090)

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。

生混凝土断裂性能的影响研究,使其尽早地应用到结构工程中。

## 1 试验概述

### 1.1 试验所用原材料及配合比

试验所用再生粗骨料由邯郸全有建材公司提供,砖粒含量:45%~60%,粒径范围:5~20 mm,压碎指标:19.1%,表观密度:2 381 kgm<sup>-3</sup>;搅拌用水:邯郸市自来水;水泥:太行山牌 P.O 42.5 级普通硅酸盐水泥;细骨料:普通河砂,细度模数 1.6;粉煤灰:马头电厂 I 级粉煤灰,掺量为 10%;减水剂:TW-JS 高效减水剂,掺量为胶凝材料用量的 1.2%。搅拌前粗、细骨料均为自然干燥状态,含水率为 2.71%,搅拌时加入附加用水量<sup>[7]</sup>。BRC 的配合比见表 1 所示。

### 1.2 试件制作

以 RC25 为基准富含砖粒再生混凝土(BRC),试验共浇筑了 6 组 BRC 试件,砂率分别为 25%、30%、35%、40%、45%、50%,组别编号分别为 SC25、SC30、SC35、SC40、SC45、SC50。每组浇筑 3 根梁试件(具体尺寸详见图 1)和 6 个边长为 100 mm 的立方体试块,其中 3 个试块用于实测 28 d 抗压强度,3 个试块用于实测 28 d 劈拉强度。梁试件与立方体试块的养护条件均为薄膜覆盖养护,养护时长 28 d。平均抗压强度、平均劈拉强度的实测结果见表 1 所示。

### 1.3 BRC 的断裂性能试验

对满足试验条件的 BRC 梁试件,在量程为 100 KN 微机控制电子式万能试验机上进行三点弯曲

试验。试验时在梁试件跨中位置施加集中荷载,加荷方式为等位移加载,速率控制在 0.1 mm·min<sup>-1</sup>;将加载点的净位移作为试件的挠度值;预制裂缝口张开位移用量程 25 mm,精度 0.5 级的夹式引伸计测量,在试件底部预制裂缝两侧粘贴细钢筋,用于安装夹持式引伸计。荷载、挠度值和预制裂缝口张开位移由计算机采集系统进行实时采集。梁试件的加载与量测示意图详见图 1 所示。

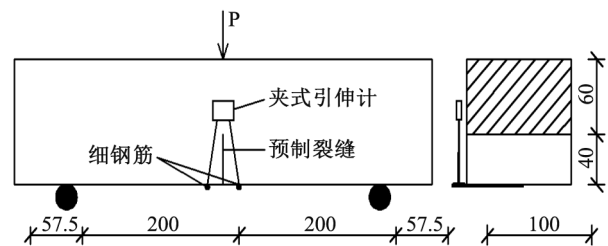


图 1 试件加载与量测示意图(单位: mm)

Fig.1 Test piece loading and measurement diagram (unit: mm)

## 2 断裂性能参数计算方法与试验结果

### 2.1 再生混凝土断裂韧度

不同砂率条件下 BRC 的断裂韧度按美国材料与试验协会(ASTM)给出的计算公式计算<sup>[8]</sup>,见式(1)。

$$K_{IC} = \frac{P_{\max} S}{th^{3/2}} f(a_0/h) \quad (1)$$

其中:  $f(a_0/h) = 2.9(a_0/h)^{1/2} - 4.6(a_0/h)^{3/2} + 21.8(a_0/h)^{5/2} - 37.6(a_0/h)^{7/2} + 38.7(a_0/h)^{9/2}$

式中:  $K_{IC}$ —断裂韧度, MPa·m<sup>1/2</sup>;  $P_{\max}$ —三点弯曲梁峰值荷载, kN;  $S$ —跨度, cm;  $t$ —试件厚度, cm;  $h$ —试件高度, cm。

### 2.2 再生混凝土断裂能

本试验中所有三点弯曲梁试件的最小荷载  $P_{\min}$

表 1 富含砖粒再生混凝土配合比及实测结果

Tab.1 Mixture ratio and measured strength of brick-rich recycled concrete

| 组别编号 | 水胶比  | 配合比/(kg·m <sup>-3</sup> ) |     |     |       |      | 平均抗压强度/MPa | 平均劈拉强度/MPa |
|------|------|---------------------------|-----|-----|-------|------|------------|------------|
|      |      | 水                         | 水泥  | 砂   | 再生粗骨料 | 减水剂  |            |            |
| SC25 | 0.45 | 162                       | 326 | 377 | 1131  | 4.34 | 30.76      | 2.49       |
| SC30 | 0.45 | 162                       | 326 | 452 | 1056  | 4.34 | 32.12      | 2.66       |
| SC35 | 0.45 | 162                       | 326 | 528 | 980   | 4.34 | 33.37      | 2.72       |
| SC40 | 0.45 | 162                       | 326 | 602 | 906   | 4.34 | 33.09      | 2.68       |
| SC45 | 0.45 | 162                       | 326 | 679 | 829   | 4.34 | 31.57      | 2.65       |
| SC50 | 0.45 | 162                       | 326 | 754 | 754   | 4.34 | 30.96      | 2.57       |

与试验峰值荷载  $P_{max}$  的比值控制在  $P_{min} / P_{max} < 0.03$ ，可直接利用试验得到的  $P-\delta$  曲线来计算断裂能<sup>[9]</sup>，计算公式见式(2)。

$$G_F = \frac{\int P(\delta)d\delta}{(h-a_0)t} \quad (2)$$

式中： $G_F$ —断裂能， $N \cdot m^{-1}$ ； $\int P(\delta)d\delta$ — $P-\delta$  曲线积分面积（如图 2）， $N \cdot m$ 。

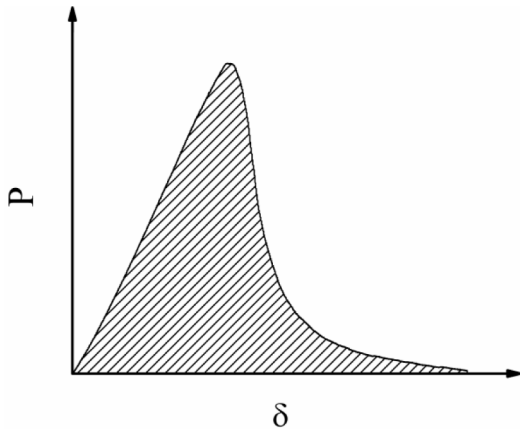


图 2  $P-\delta$  曲线积分面积示意图

Fig.2 Schematic diagram of integral area of  $P-\delta$  curve

### 2.3 试验结果

将试验实测数据代入式(1)、式(2)分别计算不同砂率条件下 BRC 的断裂韧度与断裂能，结果见表 2 所示。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 砂率对 BRC 断裂性能的影响规律

根据表 2 的试验数据，在图 3 中给出了 BRC 的断裂韧度及断裂能随砂率的变化规律。可以看出随着砂率的增大，BRC 的断裂韧度、断裂能均表现出先变大后减小的规律，且均在砂率为 35% 处出现转折。当砂率小于 35% 时，每增大 5% 砂率，断裂韧度的增幅分别为 3.61%、4.65%，断裂能的增幅分别为 5.34%、5.11%；当砂率大于 35% 时，每增大 5% 砂率，断裂韧度的降幅均小于 3%，断裂能的降幅分别为 1.81%、6.37%、3.51%，可以看出，砂率小于 35% 时的断裂韧度比砂率大于 35% 时的断裂韧度更容易受到砂率变化的影响，而断裂能则没有出现相

表 2 试验结果

Tab.2 Test results

| 试件编号   | $K_{IC}/MPa \cdot m^{1/2}$ | 平均值   | $G_F/N \cdot m^{-1}$ | 平均值    | 试件编号   | $K_{IC}/MPa \cdot m^{1/2}$ | 平均值   | $G_F/N \cdot m^{-1}$ | 平均值    |
|--------|----------------------------|-------|----------------------|--------|--------|----------------------------|-------|----------------------|--------|
| SC25-1 | 0.561                      |       | 109.65               |        | SC40-1 | 0.616                      |       | 103.25               |        |
| SC25-2 | 0.598                      | 0.581 | 121.38               | 111.57 | SC40-2 | 0.635                      | 0.624 | 118.12               | 121.31 |
| SC25-3 | 0.584                      |       | 103.69               |        | SC40-3 | 0.622                      |       | 112.56               |        |
| SC30-1 | 0.604                      |       | 112.24               |        | SC45-1 | 0.629                      |       | 124.27               |        |
| SC30-2 | 0.574                      | 0.602 | 120.78               | 117.53 | SC45-2 | 0.608                      | 0.620 | 102.36               | 113.58 |
| SC30-3 | 0.629                      |       | 119.58               |        | SC45-3 | 0.621                      |       | 114.12               |        |
| SC35-1 | 0.629                      |       | 124.79               |        | SC50-1 | 0.585                      |       | 103.52               |        |
| SC35-2 | 0.647                      | 0.630 | 131.41               | 123.54 | SC50-2 | 0.605                      | 0.606 | 116.75               | 109.59 |
| SC35-3 | 0.615                      |       | 115.42               |        | SC50-3 | 0.629                      |       | 108.51               |        |

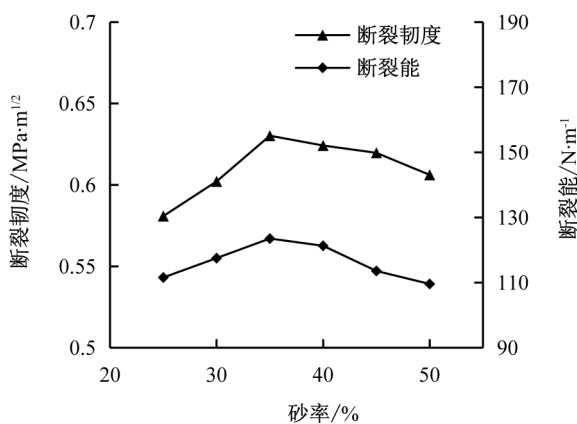


图 3 断裂性能随砂率的变化规律

Fig.3 The variation of fracture performance with sand ratio

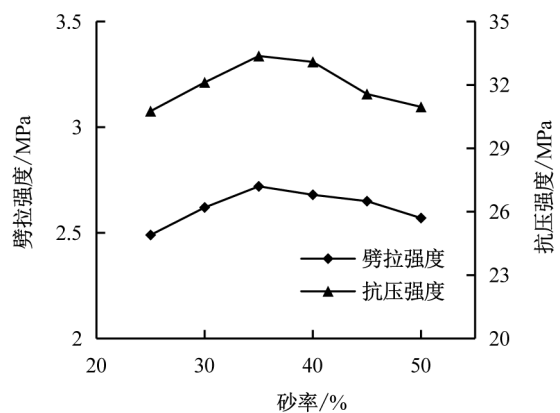


图 4 强度随砂率的变化规律

Fig.4 The variation of strength with sand ratio

同的情况。

砂率由 25% 增大到 35% 时, 断裂韧度的增幅为 8.43%, 断裂能的增幅为 10.73%; 砂率由 35% 增大到 50% 时, 断裂韧度的降幅为 3.81%, 断裂能的降幅为 11.29%。整体而言可以看出, 相对于 BRC 的断裂韧度, 其断裂能受砂率变化的影响相对较大。根据表 1 中的试验数据, 图 4 给出了 BRC 抗压、劈拉强度随砂率的变化规律, 由图 3 和图 4 可以看出, 本次试验条件下, BRC 的断裂韧度、断裂能均与抗压、劈拉强度呈正相关关系。

### 3.2 砂率对 BRC 断裂性能影响分析

砖粒本身强度低, 但其表面特征能强化砖粒与硬化水泥砂浆的粘结面, 故砖粒本身相对于粘结面成为了 BRC 内部的主要薄弱环节, 破坏先从砖粒开始<sup>[10]</sup>。砂率在一定范围内时, 随着砂率的增大, 一方面粗骨料的用量减少, BRC 内部的薄弱环节变少; 另一方面砂率的增大使硬化水泥砂浆内的孔隙变得更加致密<sup>[11]</sup>, 从而减小了断裂过程区的应力大小, 提高了 BRC 的断裂性能<sup>[12]</sup>。故当砂率在一定范围内, 随着砂率的增大, BRC 的断裂韧度、断裂能会有所提高。

砂率增大到一定值时, 在水泥用量不变的前提下继续增大砂率, 骨料的总表面积变大, 骨料表面浆量变薄, 导致 BRC 的流动性、粘聚性变差, 对硬化水泥砂浆和其与再生粗骨料的粘结面产生了不利影响。当砂率大于 35% 时, 部分再生粗骨料与硬化水泥砂浆的界面出现了破坏, 砂率小于 35% 时则没有出现这种破坏现象。虽然此时随着砂率的增大, 再生粗骨料用量继续降低, BRC 内部的薄弱环节变得更少, 但从试验结果可以看出, 砂率过大对 BRC 产生的负面影响大于正面影响, 所以此时 BRC 的断裂性能出现了下降。

## 4 结论

1) 砂率小于 35% 时, BRC 的断裂韧度、断裂能均增加; 砂率大于 35% 时, BRC 的断裂韧度、断裂能均减小, 由此确定的对于强度等级为 RC25 的 BRC, 考虑其断裂性能时, 宜取砂率为 35%。

2) 砖粒为 BRC 内部的主要薄弱环节, 故在对 BRC 的断裂破坏分析时要充分考虑其物理特性。

3) 砂率小于 35% 时的断裂韧度比砂率大于 35% 时的断裂韧度更容易受砂率变化的影响, 而断裂能则没有出现相同的情况。

4) 整体而言, BRC 的断裂能比断裂韧度更容易受砂率的影响。

### 参考文献:

- [1] 肖建庄, 李佳彬, 兰阳. 再生混凝土技术研究最新进展与评述[J]. 混凝土, 2003(10): 17-20.
- [2] SHI C J, LI Y K, ZHANG J K, et al. Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112(1): 466-472.
- [3] 徐世焯. 混凝土断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [4] 苏卿. 砂率对 C30 再生混凝土干燥收缩开裂性能评价的影响[J]. 混凝土, 2017(12): 116-119.
- [5] 王雨楠. 不同砂率条件下再生混凝土的强度及收缩变化规律[J]. 公路, 2016, 61(5): 162-166.
- [6] 何启东, 陈守开, 邱子轩. 灰比和砂率对再生骨料混凝土抗压强度的影响[J]. 中国农村水利水电, 2018(5): 173-176.
- [7] 安新正, 牛薇, 张亚飞, 等. 富含砖粒再生混凝土抗剪性能研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2018, 35(2): 75-79.
- [8] 张廷毅, 高丹盈, 郑光和, 等. 三点弯曲下混凝土断裂韧度及影响因素[J]. 水力学报, 2013, 44(5): 601-607.
- [9] 刘春, 陈红鸟, 赵艳兵, 等. 三点弯曲下混凝土断裂性能参数试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(12): 4191-4200.
- [10] 石建光. 再生骨料对混凝土性能影响的试验研究和计算分析[D]. 上海: 上海大学, 2011.
- [11] 周继凯, 金龙, 丁宁. 含砂量对水泥砂浆强度与孔结构的影响[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(20): 5855-5860.
- [12] FELIX E, AMPARANO, Xi Y P, et al. Experimental study on the effect of aggregate content on fracture behavior of concrete[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 67(1): 65-84.

(责任编辑 李新)