

# 掺钢纤维和矿渣的高性能再生混凝土性能研究

熊辉<sup>1</sup>, 刘洪辉<sup>2</sup> 编译

(1.柳州铁道职业技术学院, 广西 柳州 545616; 2.西安公路研究院)

**摘要:** 为了研究钢纤维和矿渣对高性能再生骨料混凝土性能的影响, 首先从抗压强度为 40 和 80 MPa 的母体混凝土中提取再生混凝土骨料(RCA), 采用 50% 和 100% 两种掺量的 RCA 替代天然粗集料、30% 的矿渣(GGBS)替代部分水泥以及通过向再生混凝土中掺加钢纤维的方式, 研究其对高性能混凝土性能的影响, 主要包括再生混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度、弯拉强度、吸水率、电阻率和收缩性能等。结果表明: 在混凝土中采用 30% GGBS 取代水泥对混凝土的强度影响不大, 而 GGBS 的加入使混凝土的吸水率和收缩率降低, 混凝土的电阻率显著提高; 在再生骨料混凝土中加入 1% 钢纤维可使劈裂抗拉强度提高 60%, 28 d 时弯拉强度提高 88%; 采用高强度 RCA 可以制备出性能优良的高性能混凝土。

**关键词:** 再生骨料混凝土; 钢纤维; 矿渣; 力学性能; 耐久性

随着经济的发展, 中国建筑垃圾及拆卸废弃物数量逐年增加, 其中很大一部分废弃物来自于废弃混凝土结构。据统计, 每年仅在欧盟各国就能产生 3.2 亿~3.8 亿 t 建筑垃圾材料。采用再生混凝土骨料替代天然骨料, 不仅可以节约资源, 而且可以保护环境。

与天然骨料混凝土相比, 再生骨料混凝土的性能较低, 往往导致混凝土的物理、力学和耐久性能下降。然而, 在再生骨料混凝土中掺入矿物掺合料, 可使混凝土的性能与天然骨料混凝土(NAC)相当。近年来, 由于环境保护意识的提高, 矿物掺合料的使用大幅增加。较常见的矿物掺合料包括硅粉、粉煤灰和磨碎的粒状高炉炉渣(GGBS)等。将 GGBS 掺入到混凝土中可以降低混凝土的空隙率, 改变混凝土的性能, 进而改善混

凝土的耐久性。

为此, 该文针对掺钢纤维和矿渣的高性能再生混凝土性能进行研究, 系统分析其对再生混凝土性能的影响规律, 针对再生混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度、弯拉强度、吸水率、电阻率和收缩性能等进行评价。

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 原材料

#### 1.1.1 胶凝材料

水泥采用 ASTM 1 型硅酸盐水泥, 比表面积 300 m<sup>2</sup>/kg; 矿渣比表面积 474 m<sup>2</sup>/kg。两种胶凝材料的化学成分和物理性能见表 1。

表 1 胶凝材料的化学组成和物理性能

| 材料    | 胶凝材料中各组分含量/%     |                                |                                |     |                   |      |                  |                  |                  |                   | 密度/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 比表面积/<br>(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> ) |
|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-------------------|------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------------------|--|
|       | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO | Na <sub>2</sub> O | CaO  | C <sub>3</sub> S | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF |                              |  |
| 水泥    | 21.2             | 5.4                            | 3.4                            | 1.4 |                   | 63.9 | 51.5             | 22               | 6.4              | 10.5              | 3.150                        | 300  |
| 磨细矿渣粉 | 37.2             | 11.4                           | 0.8                            | 8.3 | 1.0               | 41.2 |                  |                  |                  |                   | 2.720                        | 474  |

#### 1.1.2 骨料

天然骨料由粗骨料和细骨料组成, 质量比为 1:1, 其中粗骨料为公称最大粒径 19 mm 的碎石, 细骨料为细度模数为 3.4 的砂土。

再生混凝土粗骨料有两种, 分别来自于抗压强度为 40 和 80 MPa 的混凝土, 记为 R40 和 R80。为了获

得与天然粗骨料相似的级配曲线和最大骨料尺寸, 碾碎后对再生粗骨料进行了筛选。

天然骨料和再生骨料的粒径分布见表 2, 其物理性能见表 3。由表 3 可知: 天然粗骨料比再生粗骨料密度高, 吸水率低。其中, 再生混凝土骨料附加砂浆的含量采用盐酸溶出法测定。

表 2 集料级配

| 集料类型 | 通过下列筛孔(mm)的质量百分率/% |      |      |      |      |      |      |     |      |       |
|------|--------------------|------|------|------|------|------|------|-----|------|-------|
|      | 19                 | 13.2 | 9.5  | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6  | 0.3 | 0.15 | 0.075 |
| 细骨料  | 100                | 100  | 100  | 97.0 | 78.3 | 50.9 | 24.8 | 4.6 | 1.1  | 0.6   |
| 粗骨料  | 97.6               | 62.4 | 32.3 | 0.4  | 0.1  |      |      |     |      |       |
| R40  | 95.2               | 53.4 | 30.0 | 2.0  | 0.2  |      |      |     |      |       |
| R80  | 97.0               | 57.2 | 28.1 | 2.4  | 0.5  |      |      |     |      |       |

表 3 天然和再生混凝土骨料的物理特性

| 集料类型 | 骨料最大粒径/mm | 吸水率/% | 密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 附加砂浆/% | 含水率/% |
|------|-----------|-------|--------------------------|--------|-------|
| 细骨料  | 4.75      | 1.35  | 2.62                     |        | 1.07  |
| 粗骨料  | 19.0      | 0.73  | 2.66                     |        | 0.52  |
| R40  | 19.0      | 4.90  | 2.41                     | 38     | 2.28  |
| R80  | 19.0      | 4.12  | 2.47                     | 24     | 1.84  |

1.1.3 减水剂

超增塑剂(减水剂)采用羧酸 110M,其最高减水率达 26%,推荐掺量为 0.8%~1.2%。

1.1.4 钢纤维

钢纤维采用双钩端钢纤维,其技术指标见表 4。

表 4 钢纤维技术指标

| 纤维类型<br>和形状 | 长度/<br>mm | 直径/<br>mm | 纵横<br>比 | 密度/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 抗拉强<br>度/MPa |
|-------------|-----------|-----------|---------|------------------------------|--------------|
| 双钩端钢纤维      | 60        | 0.9       | 65      | 7.8                          | 2 300        |

1.2 配合比设计

共设计了 20 个试验方案,分为 4 个组:A、B、C、D,每组包括 5 种试验方案。针对 B 组和 D 组,用 30%的磨细高炉矿渣(GGBS30)代替水泥胶结料,在 C 和 D 两组的高性能混凝土中掺加 1%钢纤维。不同方案配合比中,胶结料掺量均为 500 kg/m<sup>3</sup>,有效水胶比为 0.3。具体试验方案见表 5。

表 5 试验方案设计

| 编号 | 系列 | 方案缩写              | 水泥掺量/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | GGBS<br>掺量/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | 天然细骨<br>料掺量/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | 天然粗骨<br>料掺量/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) |     | 钢纤维<br>掺量/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | 增塑<br>剂掺<br>量/% | 坍落<br>度/mm |
|----|----|-------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-----|-------------------------------------|-----------------|------------|
|    |    |                   |                                |                                      |                                       |                                       | R80                      | R40 |                                     |                 |            |
| 1  | A  | NAC               | 500                            |                                      | 881                                   | 894                                   |                          |     |                                     | 1.1             | 210        |
| 2  |    | R80-50            | 500                            |                                      | 881                                   | 447                                   | 415                      |     |                                     | 1.1             | 200        |
| 3  |    | R80-100           | 500                            |                                      | 881                                   |                                       | 830                      |     |                                     | 1.1             | 210        |
| 4  |    | R40-50            | 500                            |                                      | 881                                   | 447                                   |                          | 405 |                                     | 1.1             | 215        |
| 5  |    | R40-100           | 500                            |                                      | 881                                   |                                       |                          | 810 |                                     | 1.1             | 225        |
| 6  | B  | NAC-GGBS30        | 350                            | 150                                  | 870                                   | 883                                   |                          |     |                                     | 1.1             | 190        |
| 7  |    | R80-50-GGBS30     | 350                            | 150                                  | 870                                   | 441                                   | 410                      |     |                                     | 1.1             | 205        |
| 8  |    | R80-100-GGBS30    | 350                            | 150                                  | 870                                   |                                       | 820                      |     |                                     | 1.1             | 200        |
| 9  |    | R40-50-GGBS30     | 350                            | 150                                  | 870                                   | 441                                   |                          | 400 |                                     | 1.1             | 200        |
| 10 |    | R40-100-GGBS30    | 350                            | 150                                  | 870                                   |                                       |                          | 800 |                                     | 1.1             | 210        |
| 11 | C  | NAC-S1            | 500                            |                                      | 868                                   | 881                                   |                          |     | 78                                  | 1.4             | 135        |
| 12 |    | R80-50-S1         | 500                            |                                      | 868                                   | 440                                   | 409                      |     | 78                                  | 1.4             | 130        |
| 13 |    | R80-100-S1        | 500                            |                                      | 868                                   |                                       | 818                      |     | 78                                  | 1.4             | 125        |
| 14 |    | R40-50-S1         | 500                            |                                      | 868                                   | 440                                   |                          | 309 | 78                                  | 1.4             | 140        |
| 15 |    | R40-100-S1        | 500                            |                                      | 868                                   |                                       |                          | 798 | 78                                  | 1.4             | 135        |
| 16 | D  | NAC-GGBS30-S1     | 350                            | 150                                  | 857                                   | 870                                   |                          |     | 78                                  | 1.4             | 130        |
| 17 |    | R80-50-GGBS30-S1  | 350                            | 150                                  | 857                                   | 435                                   | 404                      |     | 78                                  | 1.4             | 120        |
| 18 |    | R80-100-GGBS30-S1 | 350                            | 150                                  | 857                                   |                                       | 808                      |     | 78                                  | 1.4             | 135        |
| 19 |    | R40-50-GGBS30-S1  | 350                            | 150                                  | 857                                   | 435                                   |                          | 394 | 78                                  | 1.4             | 130        |
| 20 |    | R40-100-GGBS30-S1 | 350                            | 150                                  | 857                                   |                                       |                          | 788 | 78                                  | 1.4             | 115        |

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 强度

抗压强度试验参照标准 ASTM C39 进行,其试件尺寸为  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ ,试件在标准条件下养生,利用万能试验机分别测试其 7、28 和 90 d 的抗压强度。

劈裂抗拉强度试验参照标准 ASTM C496 进行,试件尺寸为  $\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  的圆柱体,将试件养生至 28 d 后,利用万能试验机测试其劈裂抗拉强度。

弯曲强度试验参照标准 BS EN 14651 进行,试件尺寸为  $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 60\text{ cm}$  的长方体,将试件养生至 28 d 后,利用万能试验机测试其弯拉强度。

#### 1.3.2 吸水率

吸水率试验参照标准 ASTM C642 进行,试件尺寸为  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  的立方体,将试件养生 7 d 后,分别测试试件干燥前后的质量差,以此作为指标评价混凝土的吸水率。

#### 1.3.3 比电阻率

采用交流阻抗法测定比电阻率,频率设定为 1.0 kHz,电容设定为 1.0 M $\Omega$ 。试件尺寸为  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 。首先将试件养生至规定龄期(7、28 和 90 d),然后在试件表面干燥情况下对试样进行测试,求得其电阻率。

#### 1.3.4 收缩

参照规范 ASTM C157 对棱柱试样进行自由收缩试验。试件尺寸为  $7.5\text{ cm} \times 7.5\text{ cm} \times 28.5\text{ cm}$ ,首先将试件在相应模具内保湿 24 h,用塑料板覆盖,之后进行脱模。将试件从模具内取出,并放入石灰饱和水中浸泡 30 min,然后将试件从石灰水中取出,用湿布擦拭,并立即用比长仪测得其初始值。养生环境为相对湿度 50%、温度为 22  $^{\circ}\text{C}$ ,养生龄期为 4、7、14、28、56、112、224 和 448 d 后进行连续读数。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 抗压强度

不同混合料的抗压强度结果如图 1、2 所示。

由图 1、2 可知:无论是再生骨料混凝土还是纤维增强再生骨料混凝土,其抗压强度均随着龄期的增长而增大;与天然骨料混凝土相比,采用抗压强度为 80 MPa 的混凝土做再生骨料后,其强度有所提高,而采用抗压强度为 40 MPa 的混凝土做再生骨料后,其抗压强度有所下降。与再生骨料混凝土相比,当掺加钢纤维后,再生混凝土的抗压强度显著提高。

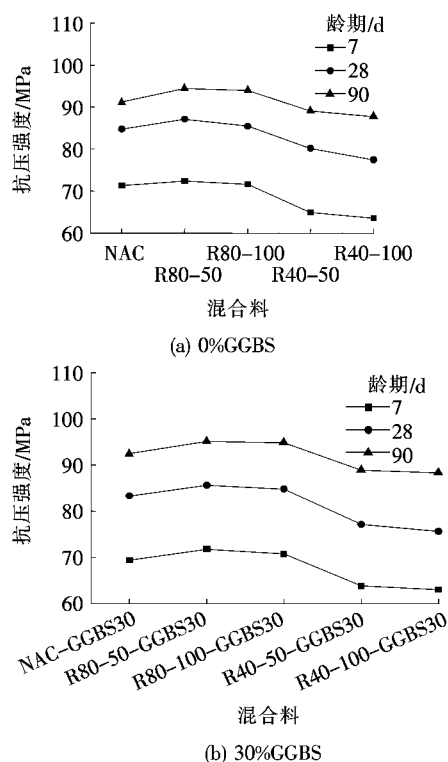


图 1 再生骨料混凝土抗压强度测试结果

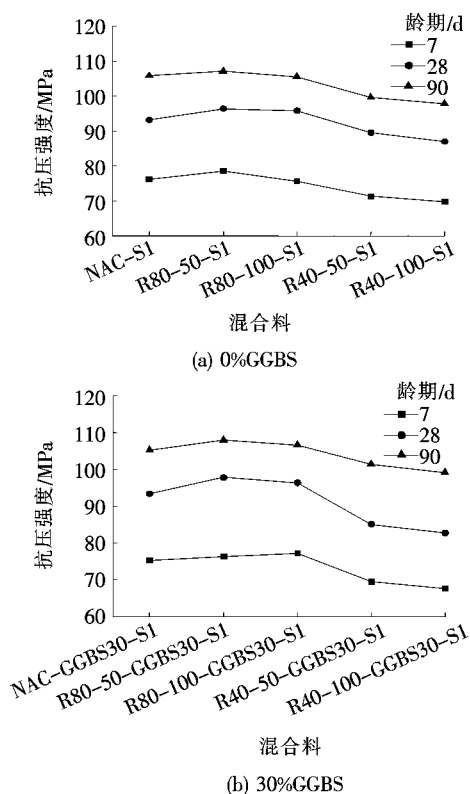


图 2 纤维增强再生骨料混凝土的抗压强度

由图 1 可知:当采用 30% 的矿渣等量替代水泥后,与对照组相比,其 7、28 d 的抗压强度有所下降,而

90 d 的抗压强度有所提高。由图 2 可知:对于纤维增强再生骨料混凝土,当采用 30% 的矿渣等量替代水泥后,与对照组相比,其 7 d 的抗压强度有所下降,而 28、90 d 的抗压强度基本不变。

无论是再生骨料混凝土还是纤维增强再生骨料混凝土,当采用抗压强度为 80 MPa 的混凝土做再生骨料,并替代 50% 天然骨料后,其抗压强度值最大。

## 2.2 劈裂抗拉强度和弯拉强度

不同混合料的 28 d 劈裂抗拉强度和弯拉强度如图 3、4 所示。

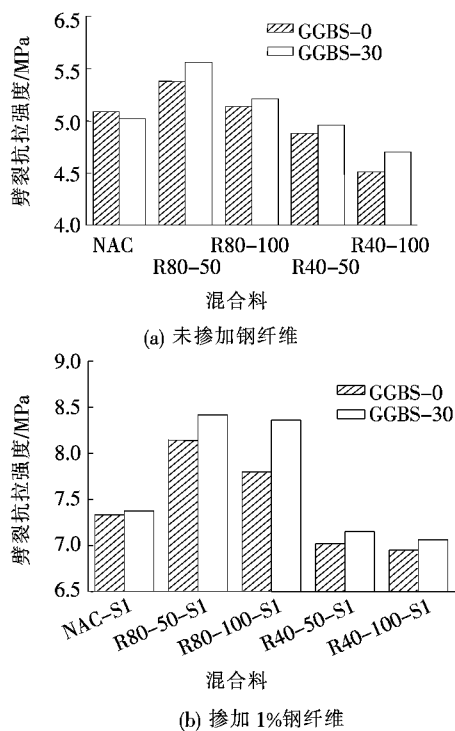


图 3 再生骨料混凝土的 28 d 劈裂抗拉强度

由图 3 可知:无论是再生骨料混凝土还是纤维增强再生骨料混凝土,当采用 30% 的磨细高炉矿渣等量替代水泥后,其劈裂抗拉强度均会提高。与再生骨料混凝土相比,掺加 1% 钢纤维后,可显著提高混合料的劈裂抗拉强度。与天然骨料混凝土相比,掺加 1% 钢纤维后,其劈裂抗拉强度可提高 46% 左右,最高可提高 50% 以上。图 4 中弯拉强度亦表现出相似的规律。

## 2.3 吸水率

对再生骨料混凝土在掺加矿渣与钢纤维前后的吸水率进行测试,试验结果如图 5 所示。

由图 5 可知:在混凝土中加入矿渣,可以显著降低其吸水率。在天然骨料混凝土中掺加 30% 矿渣,可以使混合物的吸水率降低 12%。这可能是由于矿渣能

够改善水泥基体的微观结构,减小孔隙尺寸,并中断孔隙的连接。除了矿渣的火山灰活性外,由于矿渣粒径小,其填充效应也可能会降低吸水率。

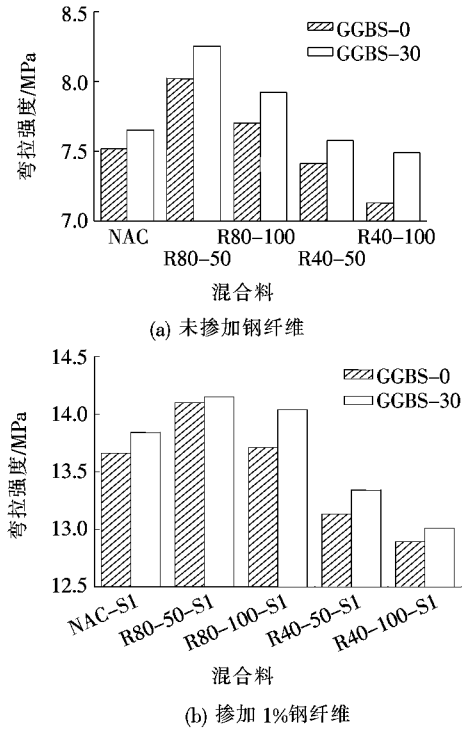


图 4 再生骨料混凝土的 28 d 弯拉强度

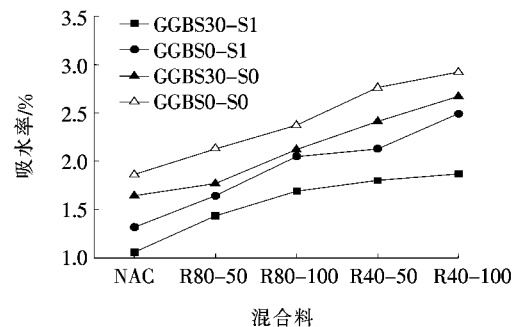


图 5 再生骨料混凝土 28 d 吸水率

纤维增强再生骨料混凝土的研究结果表明:纤维的加入对混凝土的吸水率有显著影响,加入 1% 的钢纤维可使混凝土吸水率降低 29%,含 1% 钢纤维的再生骨料混凝土的吸水率比不掺钢纤维的再生骨料混凝土的吸水率降低 23%。结果表明:纤维的加入限制了混凝土结构裂缝的形成和扩展,从而可以降低其渗透性。

## 2.4 比电阻率

对不同龄期下的再生骨料混凝土进行电阻率测试,以评价混合料内钢筋的抗腐蚀性能,试验结果如图 6 所示。

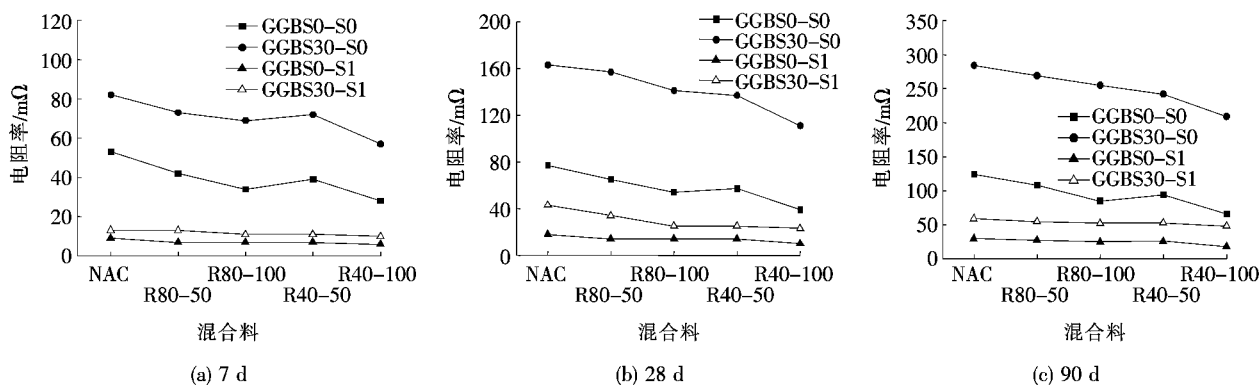


图 6 不同龄期再生骨料混凝土的比电阻率

由图 6 可知:随着养护龄期的增加,再生骨料混凝土的比电阻率比天然骨料混凝土的电阻率略有提高, R40-50 和 R80-50 的 90 d 龄期比电阻率分别比其在 7 d 龄期时的电阻率提高 138% 和 151%;而天然骨料混凝土的增幅为 128%。其原因可能是受养护水分的影响以及额外 C-S-H 的形成,改善了混凝土的微观结构,减少了毛细孔结构。

在混凝土中加入矿渣可以显著提高混合料的比电阻率,特别是在养护后期(28、90 d)。在养护龄期为 7、28 和 90 d 时,在普通混凝土中加入矿渣后,其比电阻

率分别提高 56%、115% 和 132%。在再生骨料混凝土中加入钢纤维后,其比电阻率显著下降。当养生龄期为 7、28 和 90 d 时, R40-100-S1 混合物的比电阻率分别比天然骨料混凝土降低 89%、86% 和 84%。这可能是由于钢纤维的导电性大大降低了混凝土的电阻。

## 2.5 干燥收缩性能

干燥条件下的收缩试验结果如图 7、8 所示。再生骨料混凝土在 56 和 448 d 的相对收缩率如图 9 所示。

由图 7~9 可知:与天然骨料混凝土相比,掺加再生骨料后混凝土的收缩应变均增大;再生骨料掺量越

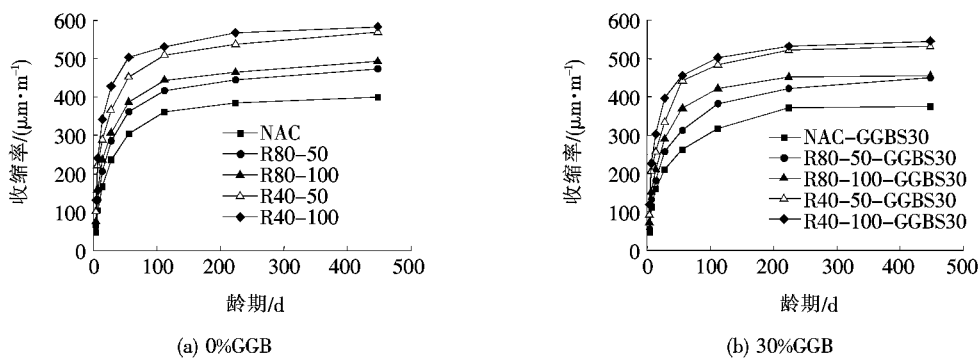


图 7 再生骨料混凝土在干燥条件下的收缩率

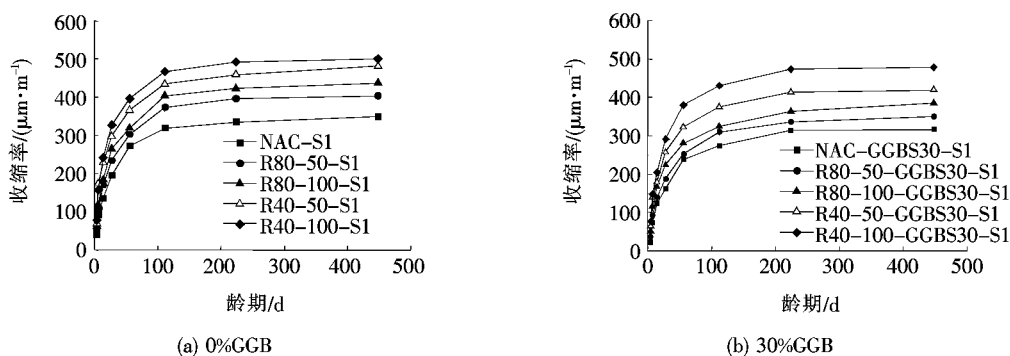


图 8 纤维增强再生骨料混凝土在干燥条件下的收缩率

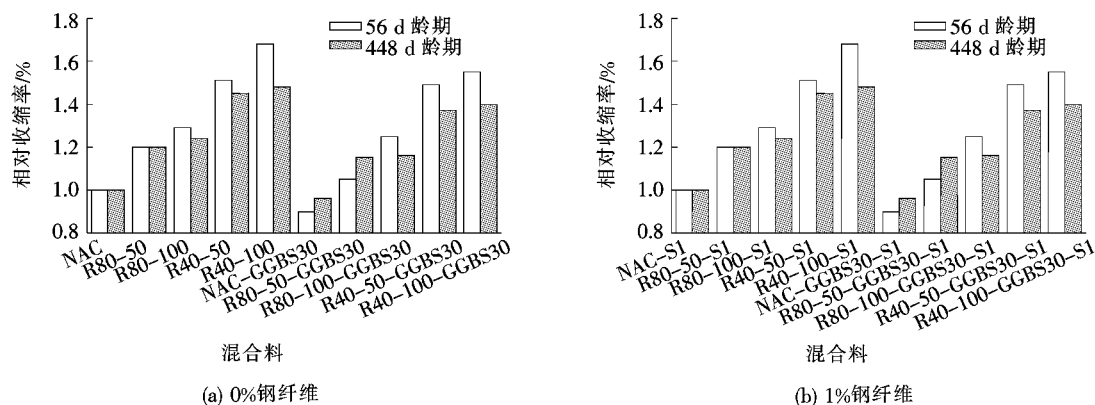


图 9 再生骨料混凝土干燥条件下的相对收缩率

大,其收缩率越高。当采用 30% 矿渣取代水泥后,混凝土在养生 56 d 后,其收缩应变降低 11% 以上。在混凝土中掺加 1% 钢纤维后,混凝土的收缩应变显著减小,表明纤维能有效抑制干燥收缩引起的裂纹扩展。与天然再生骨料相比,钢纤维在再生骨料混凝土中的抑制抗裂能力更优,在养生龄期为 448 d 时,钢纤维增强天然骨料混凝土相对收缩率降低 10%,而钢纤维再生骨料混凝土的收缩率可降低 15% 左右。

### 3 结论

研究了钢纤维和矿渣对不同强度等级、不同再生料掺量的高性能混凝土的力学性能和耐久性能的影响,得出以下结论:

(1) 在高性能混凝土中掺加 RCA,会对混凝土的耐久性能产生不利影响,采用 R40 的再生混凝土骨料 100% 取代天然骨料,可使混凝土的吸水率和收缩率分别提高 57% 和 68%,混凝土比电阻率下降 49%。

(2) 随着养护龄期的增加,与天然骨料混凝土(NAC)相比,掺加 50% R40 和 R80 的再生骨料混凝土比电阻率显著增大,在 7~90 d 内,其电阻率分别提高了 138% 和 151%,而 NAC 混凝土的电阻率提高了 128%。

(3) 在混凝土中用 30% GGBS 取代水泥对混凝土的强度影响不大,而 GGBS 的加入使混凝土的吸水率和收缩率降低,混凝土的比电阻率显著提高。

(4) 在再生骨料混凝土中加入 1% 钢纤维可使劈裂抗拉强度提高 60%,28 d 弯拉强度提高 88%。

(5) 随着钢纤维的加入,NAC 的吸水率、收缩率和比电阻率在 28 d 时分别下降了 29%、10% 和 77%,而再生骨料混凝土的吸水率、收缩率和比电阻率分别

下降了 23%、15% 和 86%。

### 参考文献:

- [1] Gonzalez—Corominas A, Etxeberria M, Poon CS. Influence of Steam Curing on the Pore Structures and Mechanical Properties of Fly—Ash High Performance Concrete Prepared with Recycled Aggregates [J]. Cement Concr Compos, 2016, 71: 77—84.
- [2] Pacheco J, de Brito J, Ferreira J, Soares D. Dynamic Characterization of Full—Scale Structures Made with Recycled Coarse Aggregates [J]. J Cleaner Prod, 2017, 142 (4): 4 195—4 205.
- [3] Kou SC, Poon CS. Effect of the Quality of Parent Concrete on the Properties of High Performance Recycled Aggregate Concrete [J]. Constr Build Mater, 2015, 77: 501—508.
- [4] Gonzalez—Corominas A, Etxeberria M. Effects of Using Recycled Concrete Aggregates on the Shrinkage of High Performance Concrete [J]. Constr Build Mater, 2016, 115: 32—41.
- [5] Pepe M, Toledo Filho RD, Koenders EA, Martinelli E. A Novel Mix Design Methodology for Recycled Aggregate Concrete [J]. Constr Build Mater, 2016, 122: 362—372.
- [6] Dinakar P, Sethy KP, Sahoo UC. Design of Self—Compacting Concrete with Ground Granulated Blast Furnace Slag [J]. Mater Des, 2013, 43: 161—169.
- [7] Kou SC, Poon CS, Etxeberria M. Residue Strength, Water Absorption and Pore Size Distributions of Recycled Aggregate Concrete after Exposure to Elevated Temperatures [J]. Cement Concr Compos, 2014, 53: 73—82.
- [8] Binici H, Temiz H, Köse MM. The Effect of Fineness on the Properties of the Blended Cements Incorporating Ground Granulated Blast Furnace Slag and Ground Basaltic Pumice [J]. Constr Build Mater, 2007, 21 (5): 1 122—1 128.