

# 硫酸盐侵蚀作用下再生混凝土耐久性研究

付腾欢, 王瑞骏, 何晓莹, 陶喆, 马利平

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为了研究不同再生粗骨料(RCA)取代率在干湿循环条件下对再生混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响,设计了再生粗骨料取代率为0%、20%、50%与100%的4组配合比,分别检测混凝土质量损失率、相对动弹模量和剩余抗压强度。同时采用电子显微镜扫描(SEM)和EDS技术,对硫酸盐侵蚀后再生混凝土微观结构变化及生成产物进行了分析。结果表明:在硫酸盐侵蚀过程中,再生骨料掺量是影响再生混凝土质量损失率、相对动弹模量和剩余抗压强度的重要因素。随着再生粗骨料的增加,再生混凝土经过硫酸盐侵蚀以后质量损失率增大,剩余相对动弹模量减小,抗压强度降低。再生粗骨料的掺入会削弱混凝土抗硫酸盐侵蚀性能,掺量越大削弱效果越明显。

**关键词:** 再生混凝土; 粗骨料取代率; 硫酸盐侵蚀; 混凝土耐久性; 剩余抗压强度; 显微镜扫描; 混凝土微观变化  
**中图分类号:** TU528      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-643X(2018)03-0194-06

## Study on durability of recycled concrete under sulfate attack

FU Tenghuan, WANG Ruijun, HE Xiaoying, TAO Zhe, MA Liping

(Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Four groups of replacement ratios of recycled coarse aggregate (0%, 20%, 50% and 100%) were designed in order to study the effect of different replacement ratios of recycled coarse aggregate (RCA) on the corrosion resistance of recycled concrete under dry and wet cycle conditions. And the mass loss rate, relative dynamic modulus and residual compressive strength of recycled coarse aggregate were measured respectively. At the same time, the microstructure changes and products of recycled concrete after sulfate attack were analyzed by SEM and EDS. The results show that the content of recycled aggregate is an important factor affecting the mass loss rate, relative dynamic modulus and residual compressive strength of recycled concrete. With the increase of recycled coarse aggregate, the mass loss rate of recycled concrete after sulfate attack increases, and the residual relative dynamic modulus decreases, and the compressive strength decreases. The addition of recycled coarse aggregate will weaken the anti-sulfate corrosion performance of concrete and the greater the amount of recycled coarse aggregate is added, the more obvious the effect will be.

**Key words:** recycled concrete; aggregate replacement percentages; sulfate attack; concrete durability; remnant compressive strengths; SEM; microscopic changes of concrete

## 1 研究背景

我国城市化建设过程中,产生了大量建筑垃圾,其中50%~60%为废弃混凝土。据统计,我国2010年混凝土垃圾达 $2.39 \times 10^8$  t。长期以来,这些建筑垃圾大都采取填埋的方式进行处理,不仅花费了大量运输成本,也使得土地资源更加紧张,同时还会污

染填埋区的土质水质,进而影响人类生活环境<sup>[1-6]</sup>。

再生混凝土的广泛使用既可缓解建筑骨料日益短缺的局面,又可解决处理废弃混凝土所带来的一系列问题,最终达到“无害化”和“资源化”。近年来,诸多学者对再生混凝土做了一系列研究。肖建庄等<sup>[7]</sup>通过再生混凝土单轴受压疲劳试验,考察了疲劳荷载作用下应变响应的疲劳损伤累积,提出了

收稿日期:2017-12-17; 修回日期:2018-01-18

基金项目:陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS092)

作者简介:付腾欢(1994-),男,河南平顶山人,在读硕士研究生,主要从事水工结构分析及数值仿真研究。

通讯作者:王瑞骏(1963-),男,陕西宝鸡人,博士,教授,博士生导师,主要从事坝工应力研究。

一个再生混凝土损伤模型。陈宗平等<sup>[8]</sup>、余乃宗等<sup>[9]</sup>研究了不同再生粗骨料取代率、侧向围压值、龄期、再生骨料来源和混凝土强度等级参数变化对再生混凝土三轴受压力学性能的影响。雷斌等<sup>[10]</sup>系统研究了水胶比、水泥用量、再生粗集料性能、矿物掺和料、再生粗集料取代率、荷载水平等因素对再生混凝土碳化性能的影响。耿欧等<sup>[11]</sup>采用正交试验的方法研究了温度、水灰比、粗骨料取代率和水泥用量 4 个因素对再生混凝土碳化深度的影响规律,在此基础上,通过试验数据的回归分析建立了再生混凝土碳化深度的预测模型,预测模型计算结果与试验数据对比分析表明,此预测模型所选相关参数合理,能较好地预测普通大气环境下再生混凝土的碳化深度。

其他学者也进行了多因素耦合作用下再生混凝土耐久性能的研究。刘金龙等<sup>[12]</sup>总结了近年来硫酸盐与应力、氯离子、干湿循环、冻融循环、碳化以及不同阳离子类型等环境单因素及多因素耦合作用下混凝土耐久性的研究成果,并且对多因素耦合作用下混凝土抗硫酸盐耐久性的研究进行了展望。刘辉<sup>[13]</sup>针对寒冷地区经常与水接触的海岸和盐湖水工建筑在昼夜温差出现冻融破坏的同时,也可能在水平面浮动下,出现干湿交替和硫酸盐侵蚀的情况进行了混凝土冻融循环后进行干湿循环、混凝土干湿循环后进行冻融循环和混凝土在冻融循环干湿循环交替作用 3 组对比试验。赵高升等<sup>[14]</sup>采用单边冻融和一维碳化的方法,在冻融循环和碳化交替作用下,研究混凝土耐久性能的演变规律及其与气孔结构变化的关系,提出在实际工程中进行混凝土结构抗冻耐久性设计和使用寿命预测时,必须考虑和

引进碳化与冻融的交替作用的建议。宿晓萍等<sup>[15]</sup>研究了不同类型的易溶盐在冻融循环作用下对混凝土耐久性能的影响。同时在复合盐侵蚀与冻融循环双重因素作用下混凝土耐久性试验研究的基础上,进行混凝土的单盐-冻融循环对比试验,总结出在冻融交替作用下,硫酸盐、氯盐与碳酸氢盐对混凝土材料腐蚀破坏的特点、规律,并进一步对混凝土的盐冻破坏机理进行分析。

目前,对再生混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的研究相对较少<sup>[16-20]</sup>。因此,本文通过对不同粗骨料取代率的再生混凝土在硫酸盐侵蚀环境下质量损失率、相对动弹模量和抗压强度的测定来研究再生粗骨料的掺入对其抗硫酸盐侵蚀性能的影响。进行了 SEM 和 EDS 分析,研究了硫酸盐侵蚀过程中再生混凝土的微观结构变化,更有力地佐证了宏观结果。

2 试验概况

2.1 试验材料

试验采用 P. O 42.5R 硅酸盐水泥(陕西秦岭水泥厂),灞河中砂,细度模数 2.5,汾河卵石,粒径 5~16 mm;再生粗骨料为废弃混凝土试件经破碎加工制成,表 1 为骨料基本性能。减水剂为西安市红旗外加剂厂聚羧酸高效减水剂;引气剂为三萜皂甙高效引气剂;混凝土拌和与养护用水为西安市饮用自来水。混凝土配合比如表 2 所示。

表 1 骨料基本性能

| 性能参数                         | 天然砂  | 天然粗骨料 | 再生粗骨料 |
|------------------------------|------|-------|-------|
| 吸水率/%                        | 0.79 | 0.76  | 6.4   |
| 松散堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 1675 | 1426  | 1302  |

表 2 再生混凝土配合比

| 试件   | 水/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 水泥/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 砂/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 石/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 再生粗骨料/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 引气剂/% | 减水剂/% |
|------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------|-------|
| R0   | 160                     | 400                      | 702                     | 1098.00                 | 0                           | 0.03  | 1     |
| R20  | 160                     | 400                      | 702                     | 880.17                  | 211.2                       | 0.03  | 1     |
| R50  | 160                     | 400                      | 702                     | 552.36                  | 530.3                       | 0.03  | 1     |
| R100 | 160                     | 400                      | 702                     | 0.00                    | 1066.0                      | 0.03  | 1     |

2.2 试件的制备

再生骨料取代率为 0、20%、50% 和 100% 的再生混凝土试件各制作一组,分别记为 R0、R20、R50 和 R100。依据 GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中“抗硫酸盐侵蚀试验”章节内容,试件采用 100 mm×100 mm×100 mm

的立方体试件。混凝土浇筑 24 h 后拆模,放入标准养护室(20℃±2℃,RH≥95%)养护 28 d。

2.3 试验方法

试件达到 28 d 养护龄期时,将试件从标准养护箱取出,擦拭干净表面水分,再将试件放入烘箱中,烘干结束后将试件放置于干燥环境中冷却至室温,

然后将试件放入硫酸盐干湿循环试验机中,按照 GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》进行试验。再生混凝土试件的浸泡溶液是质量分数为 5% 的  $\text{NaSO}_4$  溶液,侵蚀试验工况为干湿交替循环工况,试验过程中每完成 25 次干湿循环测定一次再生混凝土试件的质量和相对动弹模量,每完成 50 次干湿循环测定一次再生混凝土试件的抗压强度。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 硫酸盐干湿循环后再生混凝土试件外观形态

经过硫酸盐干湿循环 0、75、150 次后试件外观

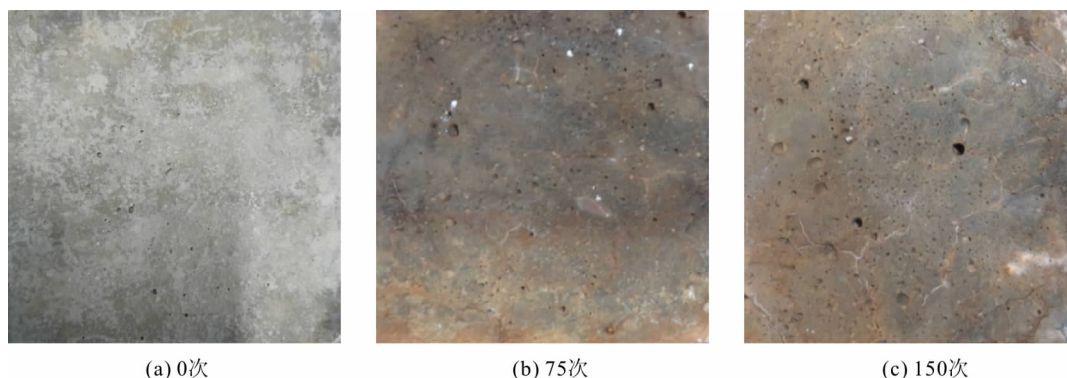


图 1 不同硫酸盐干湿循环次数后再生混凝土试件外观形态

#### 3.2 质量损失率

再生混凝土试件硫酸盐侵蚀的质量损失率按公式(1)计算:

$$W_n = \frac{G_0 - G_n}{G_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $W_n$  为试件经过  $n$  次硫酸盐干湿循环后质量损失率,%;  $G_0$  为试件初始测试质量,kg;  $G_n$  为试件经过  $n$  次硫酸盐干湿循环后的质量,kg。每完成 25 次干湿循环后,取出试件并擦拭干净表面水分,测定再生混凝土试件的质量,R0、R20、R50 和 R100 4 组试件质量随干湿循环周期的变化规律如图 2 所示。

从图 2 可以看出,在 150 次干湿循环结束后,4 组试件的质量损失率都不明显,其中,R0 最小,为 0.46%; R20、R50 和 R100 相对稍大,分别为 0.95%、1.21% 和 1.25%。混凝土硫酸盐侵蚀过程是一个复杂的物理化学过程,再生混凝土出现质量变化的原因主要在于表面砂浆的剥落。再生混凝土在硫酸盐侵蚀的过程中,混凝土试件会在 80 ℃ 的高温下进行干湿循环,在高温条件下再生混凝土表面会产生干缩裂缝,从而加速混凝土表面砂浆破坏过程。在前 50 次循环周期中,4 组试件的质量损失率

形态见图 1。

从图 1(b)可以看出,硫酸盐干湿循环 75 次后,试件表面出现少量裂隙及孔洞,一两处区域出现砂浆松动,但并不严重。从图 1(c)可以看出,硫酸盐干湿循环 150 次后,试件表面裂隙及孔洞明显增多,周边角落区域骨料出露明显,并伴随有骨料剥落现象。原因在于硫酸盐干湿循环初期,再生混凝土内部生成膨胀性产物,进而在其内部产生膨胀性应力。随着干湿循环次数的增加,膨胀性产物持续生成,膨胀应力不断增加,当膨胀应力大于再生混凝土的抗拉强度时,再生混凝土就会产生裂隙与孔洞并不断发展。

都增加缓慢;50 次循环周期后,所有试件的质量损失率增加速率都变得越来越快,其中,R100 最快,其次为 R50,再次为 R20,R0 最慢。可见,再生骨料取代率越高,再生混凝土质量损失越大且损失速率也越快。

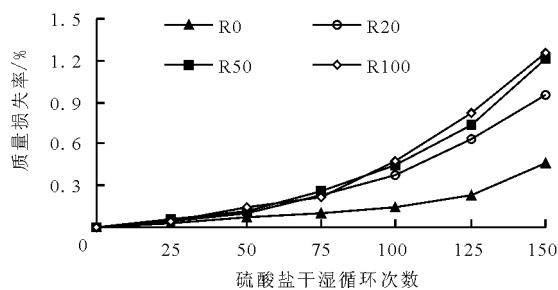


图 2 4 组试件质量损失率曲线

#### 3.3 相对动弹模量

相对动弹模量现场试验照片见图 3。

再生混凝土试件硫酸盐侵蚀的相对动弹模量按公式(2)计算:

$$P_n = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $P_n$  为经过  $n$  次干湿循环后试件相对动弹性模

量,% ;  $f_0$  为硫酸盐干湿循环前的自振频率,Hz;  $f_n$  为硫酸盐干湿循环  $n$  次后的自振频率,Hz。R0、R20、R50 和 R100 4 组试件相对动弹模量随干湿循环周期的变化规律如图 4 所示。

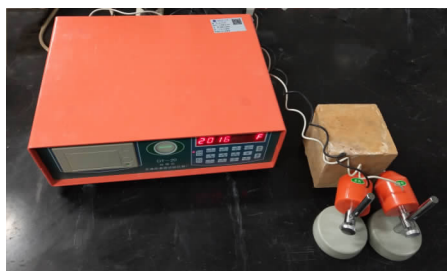


图3 相对动弹模量现场试验

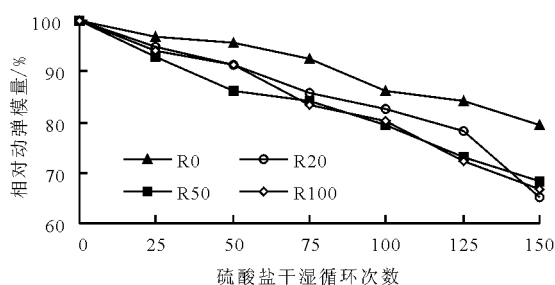


图4 4组试件相对动弹模量曲线

从图 4 可以看出,在 150 次干湿循环结束后,4 组试件的相对动弹模量下降较明显,其中,R0 变化最小,为 79.5%;R20、R50 和 R100 相对变化较大,分别为 65.2%、68.2% 和 66.7%。在整个干湿循环过程中,所有试件的相对动弹模量均随干湿循环次

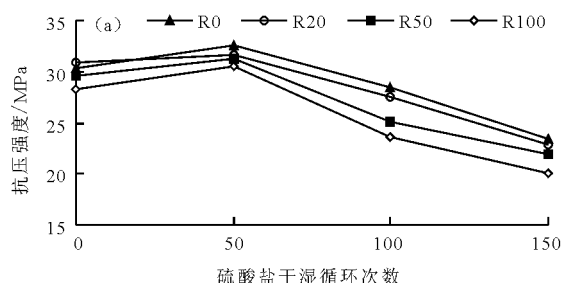


图6 4组试件抗压强度试验数据

从图 6(a) 可以看出,R0、R20、R50 和 R100 4 组试件抗压强度均呈现先小幅增加再逐步减小的过程。其中,经历 50 次干湿循环硫酸盐侵蚀后,R0、R20、R50 和 R100 4 组试件抗压强度分别增加了 7.2%、2.3%、5.8% 和 7.7%。从图 6(b) 可以看出,试验结束时各组试件的抗压强度均有明显下降。其中,R0 下降最少,为 22.7%;R20 和 R50 分别下降 25.9% 与 26.1%;R100 下降最多,为 29.5%。依

数的增加逐渐下降,其中,R0 下降最慢,R20、R50 和 R100 相对较快。分析原因可知, $\text{SO}_4^{2-}$  渗入混凝土孔隙内部,与水泥水化产物发生反应生成膨胀性钙矾石、石膏晶体,随着生成产物的增多,膨胀性内力超过混凝土抗拉强度,混凝土内部开裂、强度损失较大;同时,伴随着无水硫酸钠结晶转化成十水硫酸钠的过程,体积膨胀产生的结晶压力超过混凝土的抗拉强度时,也会使得混凝土孔隙内壁产生裂纹,最终使混凝土结构劣化和破坏。又由于再生骨料的孔隙率高于普通骨料,其渗透性更大,也就使得外部环境中的  $\text{SO}_4^{2-}$  更容易进入再生混凝土内部,且随着再生骨料取代率的增加,进入试件内部的  $\text{SO}_4^{2-}$  就更多,试件所受的侵蚀程度和内部损伤就越严重。

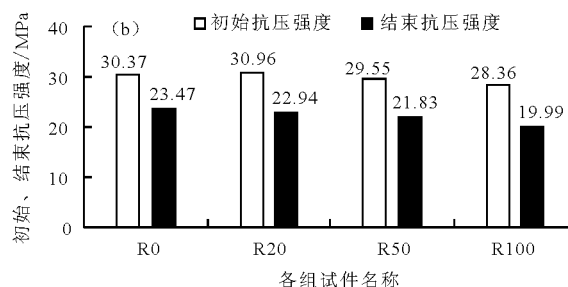
### 3.4 抗压强度变化

抗压强度现场试验照片见图 5。



图5 抗压强度现场试验

分别对 0、50、100、150 次干湿循环后的试件进行抗压强度试验,其结果如图 6 所示。



据 GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》中“抗硫酸盐侵蚀试验”章节内容,当抗压强度耐蚀系数达到 75% 时,即可认为混凝土试件破坏。因此在硫酸盐干湿循环到达 150 次时,R20、R50 和 R100 均已破坏。结果表明:随着再生粗骨料取代率的增加,经历 150 次硫酸盐干湿循环侵蚀后抗压强度的减少率也在增加。原因在于,再生粗骨料具有孔隙率高、密度小和强度较低的特

性。在硫酸盐干湿循环侵蚀前期,硫酸盐侵蚀再生混凝土的行为增加了其抗压强度,随着侵蚀过程的继续进行,其抗压强度开始下降。并且随着再生粗骨料取代率的增加,侵蚀程度也在不断加重,表现为抗压强度的减少率越来越大。

### 3.5 再生混凝土微观分析

一定的条件下,水泥水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和  $\text{C}-\text{A}-\text{H}$  与硫酸盐反应生成钙矾石晶体,在  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度超过  $1\,000\text{ mg/L}$  时,还会生成石膏<sup>[21]</sup>。钙矾石和石膏晶体的形成都会使得水泥石体积膨胀,最终使水泥石结构破坏。对再生骨料取代率为 20% 且经过干湿循环 150 次之后的试件进行 EDS 分析和 SEM 扫描,以分析再生混凝土微观结构变化。从图 7 中的 EDS 分析可以得出,此针状晶体的主要成

分有:Al、S、Ca 和 O 等化学元素,再根据各个化学元素的组成含量,可以推断此针状物为钙矾石晶体。SEM 扫描图片见图 8。

图 8(a) 显示在经历了 150 次硫酸盐干湿循环后,再生混凝土内部产生了较多针状钙矾石晶体,同时再生混凝土内部出现了较多裂缝,表明此时再生混凝土内部结构已经出现了损伤。图 8(b) 为检测到的板状石膏晶体,在石膏晶体周围有大量絮状水化产物,同时可以观察到大量的微小裂缝及孔洞,再次说明了再生混凝土在硫酸盐侵蚀下内部结构已经遭到破坏。

综上所述,检测到钙矾石及石膏晶体的生成,同时也观测到了再生混凝土内部的微小裂缝,这都与 3.3 节相对动弹模量数据的降低相互对应。

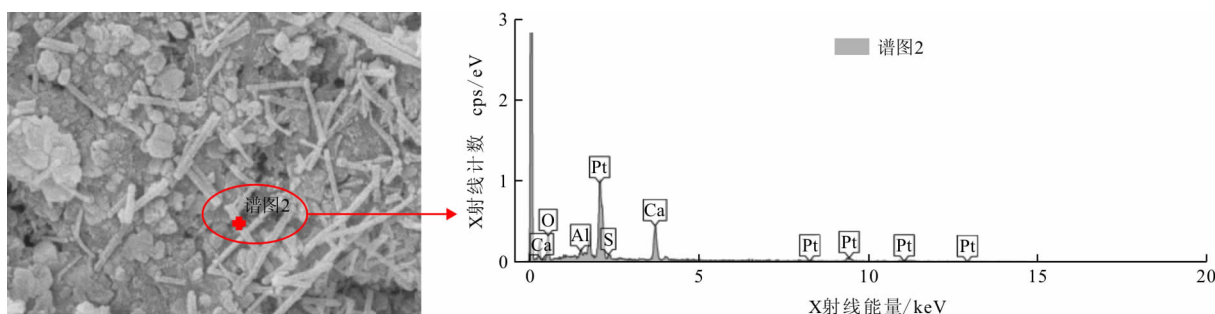


图 7 再生混凝土生成产物及 EDS 分析结果

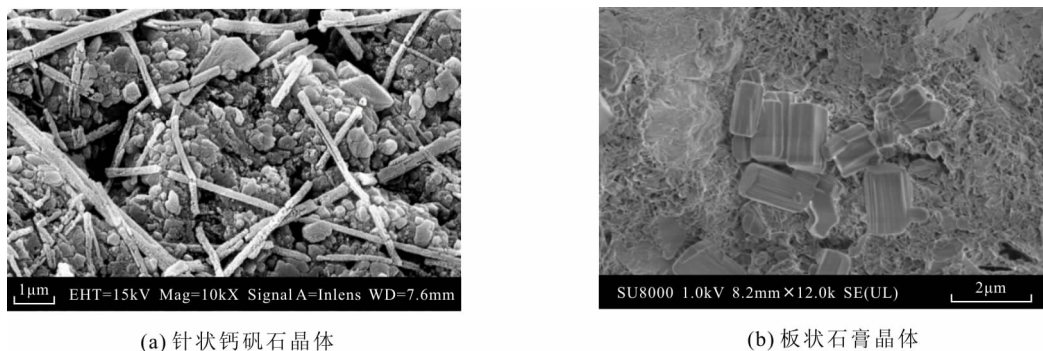


图 8 150 次干湿循环后 SEM 图

## 4 结 论

(1) 不同再生粗骨料取代率对混凝土在硫酸盐干湿循环条件下的质量损失率影响不明显。其中,  $R_0$  为 0.46%,  $R_{20}$ 、 $R_{50}$  和  $R_{100}$  分别为 0.95%、1.21% 和 1.25%。所有试件的质量损失率都随干湿循环次数的增加而不断加大,在 50 次干湿循环之后增加速率变得越来越快,且再生骨料取代率越大,质量损失率增加越快。

(2) 不同再生粗骨料取代率对混凝土在硫酸盐

干湿循环条件下的相对动弹模量影响较明显。其中,  $R_0$  为 79.5%,  $R_{20}$ 、 $R_{50}$  和  $R_{100}$  分别为 65.2%、68.2% 和 66.7%。所有试件的相对动弹模量均随干湿循环次数的增加逐渐下降,在 50 次干湿循环之后下降速率有加快的趋势。整体来说,  $R_0$  下降速度最慢,  $R_{20}$ 、 $R_{50}$  和  $R_{100}$  下降速度相差不大且明显高于  $R_0$ 。试验结果表明:再生骨料取代率越高,再生混凝土抗硫酸盐侵蚀的能力越弱。

(3) 不同再生粗骨料取代率对混凝土在硫酸盐干湿循环条件下的抗压强度影响较明显。其中,试

验结束时 R0、R20、R50 和 R100 的抗压强度减少率分别为 22.7%、25.9%、26.1% 和 29.5%。4 组试件的抗压强度减少率都随再生粗骨料取代率的增加而增加。

(4)再生混凝土微观结构观察结果显示:在干湿循环 150 次之后,混凝土内部出现了针状钙矾石晶体和板状石膏,同时在混凝土内部还有较多裂缝出现。这些微观测试结果证实了再生混凝土质量损失、相对动弹模量与抗压强度降低的宏观实测数据。

#### 参考文献:

- [1] 申健,牛荻涛,王艳,等.再生混凝土耐久性能研究进展[J].材料导报,2016,30(5):89-94+100.
- [2] 朱红兵,赵耀,雷学文,等.再生混凝土研究现状及研究建议[J].公路工程,2013,38(1):98-102.
- [3] 谢本怡.再生骨料混凝土抗硫酸盐侵蚀性能研究[D].武汉:华中科技大学,2014.
- [4] 李元鑫,韩旭.再生骨料混凝土与普通混凝土的比较[J].四川建筑,2009,29(S1):305-306.
- [5] 潘丽云,梁娜,胡飞佳,等.全再生粗骨料混凝土力学性能试验与评价研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(6):32-42.
- [6] 彭成,肖苗良,叶恒达,等.再生混凝土耐久性研究进展[J].水利与建筑工程学报,2016,14(6):126-130.
- [7] 肖建庄,李宏.再生混凝土单轴受压疲劳性能[J].土木工程学报,2013,46(2):62-69.
- [8] 陈宗平,陈宇良,姚侃.再生混凝土三轴受压力学性能试验及其影响因素[J].建筑结构学报,2014,35(12):72-81.
- [9] 余乃宗,刘卫东,欧阳瑞,等.再生骨料对混凝土力学性能及抗冻性能研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(4):117-122.
- [10] 雷斌,肖建庄.再生混凝土抗碳化性能的研究[J].建筑材料学报,2008,11(5):605-611.
- [11] 耿欧,张鑫,张铖铠.再生混凝土碳化深度预测模型[J].中国矿业大学学报,2015,44(1):54-58.
- [12] 刘金龙,韩建德,王曙光,等.硫酸盐侵蚀与环境多因素耦合作用下混凝土耐久性研究进展[J].混凝土,2014(9):33-40.
- [13] 刘辉.硫酸盐侵蚀与冻融循环双重因素对混凝土耐久性的双重影响[D].成都:西南交通大学,2010.
- [14] 赵高升,何真,杨华美.冻融循环和碳化交替作用下的混凝土耐久性[J].武汉大学学报,2013,46(5):604-609.
- [15] 宿晓萍,张利,郭金辉.单盐侵蚀与冻融循环作用下混凝土耐久性能试验研究[J].工业建筑,2014,44(9):110-113+6.
- [16] QI Bing, GAO Jianming, CHEN Fei, et al. Evaluation of the damage process of recycled aggregate concrete under sulfate attack and wetting-drying cycles[J]. Construction and Building Materials, 2017, 138:254-262.
- [17] KATSIOTI M, PATSIKAS N, PIPILIKAKI P, et al. Delayed ettringite formation (DEF) in mortars of white cement[J]. Construction & Building Materials, 2011, 25(2):900-905.
- [18] 王忠星,李秋义,曹瑜斌,等.硫酸盐侵蚀对再生混凝土多重界面显微结构的影响[J].硅酸盐通报,2017,36(2):443-448.
- [19] 张凯,陈亮亮,侍克斌,等.不同取代率再生骨料混凝土硫酸根离子扩散试验[J].科学技术与工程,2016,16(31):276-280.
- [20] 闫宏生.再生混凝土的硫酸盐腐蚀试验研究[J].混凝土,2013(5):13-15+20.
- [21] 王维红.稻壳灰混凝土性能及机理研究[D].银川:宁夏大学,2017.