

文章编号:1673-9469(2012)02-0001-06

## 硫酸盐环境下再生混凝土的损伤演化研究

安新正<sup>1,2</sup>, 易成<sup>2</sup>, 赵长彪<sup>3</sup>, 张结太<sup>1</sup>

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 3. 邯郸市四方建设监理有限公司, 河北 邯郸 056002)

**摘要:**在干湿交替环境下,再生混凝土的硫酸盐侵蚀不仅会引发其外观上的损伤,而且对再生混凝土材料的耐久性也会产生严重的影响。采用硫酸盐-干湿循环试验,研究了3%、5%、10%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液下全再生混凝土材料性能的衰减退化规律,以及5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液下不同再生粗骨料取代率混凝土材料性能的衰减退化规律。试验结果表明:在5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液侵蚀作用下,再生混凝土的线膨胀率  $\Delta L$  随再生粗骨料取代率  $r$  的增加而增大,相对动弹性模量  $E_r$  达到最大值  $E_{\max}(r)$  时所需的干湿循环次数随  $r$  的增大而减少,  $E_r$  的衰减速率随  $r$  的增大而增大;全再生混凝土  $E_r$  的衰减速率和  $\Delta L$  都将随  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  浓度水平的升高而增大;  $E_{\max}(r)/E_r$  约为 1.07。

**关键词:**再生混凝土;硫酸盐环境;再生骨料取代率;损伤模型

**中图分类号:** TG333.17

**文献标识码:** A

## Research on the damage behaviors of the recycled aggregate concrete in the sulfate environment

AN Xin-zheng<sup>1,2</sup>, YI Cheng<sup>2</sup>, ZHAO Chang-biao<sup>3</sup>, ZHANG Jie-tai<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan, 056038, China;

2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;

3. Handan Si-fang Engineering Construction Supervision Limited Company, Hebei Handan, 056002, China)

**Abstract:** A method to solve sulfate corrosion damage of recycled aggregate concrete (RAC) from the wet-dry cycles test was used to study material performance degradation rules for all RAC ( $r = 100\%$ ) and RAC with different recycled aggregate replacement ratio ( $r$ ) under sulfate environments 3%, 5% and 10% (by mass)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . The results show that: ① linear dilatation ratio ( $\Delta L$ ) of RAC increases with the increase of  $r$ , and the change trend of relative dynamic modulus of elasticity ( $E_r$ ) were consistent, and the attenuation rate for  $E_r$  increases with the decrease of  $r$  under different  $r$  and 5% (by mass)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; ② the attenuation rate of  $E_r$  and the  $\Delta L$  for the all RAC increase with the increase of the level of  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  solution concentration; ③ the specific value of  $E_{\max}(r)/E_r$  close to 1.07. At the same time, the damage computation model of RAC in sulfate environment was put forward based on test results.

**Key words:** recycled aggregate concrete (RAC); sulfate environment; recycled aggregate replacement ratio; damage model

Mehta<sup>[1]</sup>曾于1991年指出,环境介质的腐蚀对混凝土结构的巨大破坏作用。我国的《工业建筑防腐设计规范》也针对硫酸盐对混凝土的腐蚀

性作出了明确的等级划分。就当前的环境情况来看,我国还存在着较为严重的环境污染问题,如  $\text{SO}_3$  污染等,有害介质环境对再生混凝土材料的劣

化作用结果也将随着混凝土结构服役年限的逐渐增加而日益突显出来。可以说,环境有害介质对再生混凝土结构的腐蚀作用已成为当今再生混凝土结构耐久性劣化因素中一个不可忽视的重要因素。

试验研究表明<sup>[2-4]</sup>,干湿交替条件下从外部经渗透而进入混凝土构件内部的硫酸盐对混凝土具有较强的劣化作用,是混凝土材料性能劣化的一个主要因素。处于浪溅区、潮汐区的服役混凝土结构遭受干湿循环、硫酸盐腐蚀等环境作用是一个十分常见的现象,由此诱发的钢筋锈蚀、混凝土强度降低之类的性能损伤与失效问题也表现得十分突出<sup>[5-7]</sup>。再生混凝土是由再生粗集料、细集料(或再生细集料)、水泥、水、掺合料等按一定的配合比配制而成的新型混凝土<sup>[8]</sup>,因此再生混凝土也存在着初始微裂纹、微孔隙及骨料损伤等内部结构缺陷,而且这些缺陷也明显地复杂和多于普通混凝土。探讨硫酸盐侵蚀环境对再生混凝土耐久性能的影响规律,开展相关的实验研究是必要的。

虽然针对相关环境介质侵蚀作用下再生混凝土的耐久性问题,国内外学者已进行了一些试验研究与理论分析,且获得了一些宝贵的研究成果<sup>[9-11]</sup>。但是,相关硫酸盐侵蚀环境下再生混凝土材料耐久性损伤与劣化方面的研究目前还仅仅处于初期的起步阶段。基于此,本文设计了一系列硫酸盐侵蚀环境下的再生混凝土耐久性试验,通过对干湿循环与硫酸盐侵蚀环境下再生混凝土试件相对动弹性模量、抗压强度等相关参数的室

内试验,研究在干湿循环与硫酸盐侵蚀环境作用下再生混凝土耐久性能的损伤演化规律。

## 1 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 环境下的再生混凝土试验

### 1.1 试验概况

#### (1) 再生粗骨料

以旧有建筑上拆卸下来的废弃混凝土梁作为基体,采用钻芯取样法检测得到强度评价值为32.4MPa。经自来水清洗并晾干后,人工破碎、小型颚式破碎机破碎,并对破碎后的再生骨料颗粒进行筛分,制成具有连续颗粒级配的再生粗骨料(表1)。检测得到再生粗骨料中硫化物及硫酸盐的质量含量(折算成SO<sub>3</sub>)为0.87%。

#### (2) 再生混凝土配置与试件制作

水泥:太行山P. O 42.5级普通硅酸盐水泥;细骨料:普通河砂,表观密度2.65 g/cm<sup>3</sup>,细度模数2.6;掺合料:磨细矿粉;拌和水:饮用自来水。配合比详见表2所示。

采用以上配合料制作再生混凝土时,拌和方法为强制搅拌机搅拌,试件制作为钢模一次灌注成型,分别浇筑棱柱体试件26个,立方体试件12个,试件尺寸分别为70 mm × 70 mm × 210 mm和100 mm × 100 mm × 100 mm。试件灌注后在振实台上振捣密实,而后静止24 h拆模。将拆模后的试件移入标准养护室养护,28 d后进行立方体抗压强度测试。

表1 再生粗骨料指标

Tab. 1 Properties of recycled coarse aggregate

连续级配/mm	含水率/%	含泥量/%	15min吸水率/%	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	压碎指标/%
5~15	2.33	0.83	2.26	2 204.1	1 168.7	11.05

表2 再生混凝土配合比及强度指标

Tab. 2 Mix proportion and compressive strength of RAC

试件 编组	水胶比	再生混凝土材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )							含气量/%	实测28d抗压强度值 f <sub>cu,0</sub> /MPa
		水泥	水	砂	磨细 矿粉	引气减 水剂	粗骨料			
							天然	再生		
A组	0.45	305	175	655	82	0.83	1170	0	1.7	35.1
B组	0.45	305	175	655	82	0.83	819	351	1.9	33.7
C组	0.45	305	175	655	82	0.83	585	585	2.0	32.8
D组	0.45	305	175	655	82	0.83	0	1170	2.4	31.4

(3) 硫酸盐 - 干湿循环侵蚀实验设计

由于干湿循环通常发生在港工混凝土工程的浪溅区、潮汐区部分,同时考虑到我国南方地区在干湿循环频发季节浪溅区、潮汐区的地面平均温度情况,本文设计的室内实验干湿循环制度( $Q_{wet}$ )为:再生混凝土试件在烘箱中( $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ )烘12h,室温冷却12h,然后在配制好的 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 侵蚀溶液中( $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ )浸泡24h,至此完成一个 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 侵蚀溶液侵蚀的干湿循环周期。

1.2  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  环境下全再生粗骨料混凝土的退化

将 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 侵蚀溶液浓度( $S_i$ )分别设计为3%、5%和10%。基于全再生混凝土棱柱体试件在不同的 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 侵蚀溶液浓度水平和设定的干湿循环次数下的实验结果,可以得到 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 侵蚀溶液的浓度水平对全再生混凝土相对动弹性模量( $E_r$ )及线膨胀率( $\Delta L$ )演化的影响规律(图1、图2)。

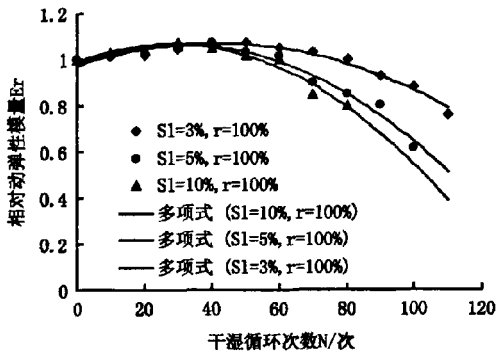


图1 不同  $S_i$  时  $E_r$  随  $N$  的演化关系

Fig.1 Evolution relation of  $E_r$  and  $N$  with different  $S_i$

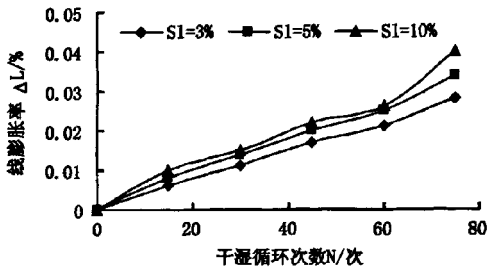


图2 不同  $S_i$  时  $\Delta L$  随  $N$  的演化关系

Fig.2 Evolution relation of  $\Delta L$  and  $N$  with different  $S_i$

由图1、图2可以得知,干湿循环 -  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶

液侵蚀作用对全再生混凝土的相对动弹性模量  $E_r$  和线膨胀率  $\Delta L$  具有显著的影响,其影响的显著程度与浸泡溶液的浓度水平  $S_i$  及干湿循环次数都有着十分密切的相关关系。由图2可以发现,在相同的干湿循环条件下, $S_i = 3\%$  时,  $\Delta L$  最小,体积稳定性最好;而  $S_i = 10\%$  时,  $\Delta L$  最大,体积稳定性最差,  $\Delta L$  随  $S_i$  的增加而增大。

在干湿循环 -  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  侵蚀的作用下,全再生混凝土  $E_r$  的演化过程基本上呈现为非线性发展,其发展趋势可用以下3个阶段来描述。

(1) 初期的缓慢增长阶段( $T_1$ )。在这一时期,  $E_r$  开始非线性缓慢增长并累积达到最大值  $E_{max}(r)$ , 3种浓度水平  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液侵蚀引起  $E_r$  的变化趋势大致上是一致的,但达到  $E_{max}(r)$  时所需的干湿循环次数却随  $S_i$  的增大而减少。通过对比可以得知,  $S_i$  从3%增大到5%,相应地达到  $E_{max}(r)$  所需的干湿循环次数  $N$  也从50次左右下降到了近20次左右;

(2) 中期的非线性缓慢衰减退化阶段( $T_2$ )。在这一时期,  $E_r$  以  $E_{max}(r)$  为起点开始出现非线性缓慢衰减退化,  $T_2$  将随  $S_i$  的减小而增大,随  $S_i$  的增大而缩短;

(3) 后期的快速破坏阶段( $T_3$ )。在这一时期,  $E_r$  开始加速衰减退化并达到损伤临界值,即:相对动弹性模量值等于60% (当  $E_r \geq 60\%$  时,表明全再生混凝土已达到技术性失效状态)。

对实验结果进行统计可以发现,  $T_1$  约占整个破坏过程的1/10左右。  $E_r$  的下降速度随着干湿循环次数的增加而增大。同时,所有试件相对动弹性模量的最大值都基本上接近于1.07。

1.3 不同再生粗骨料取代率混凝土的退化

由于再生混凝土的力学性能和其自身体积稳定性与再生混凝土结构耐久性、安全性息息相关,因此开展再生混凝土力学性能及其自身体积稳定性的相关实验研究很有必要。为了研究不同再生粗骨料取代率再生混凝土在  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  侵蚀溶液侵蚀条件下的力学性能损伤演化规律及体积膨胀变化规律,进行了A组、B组、C组和D组试件在  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  侵蚀溶液浓度(质量分数)水平  $S_i = 5\%$  侵蚀条件下的相对动弹性模量和线膨胀性实验。

基于5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  侵蚀溶液浓度水平下不同再生粗骨料取代率再生混凝土棱柱体试件的干湿循环实验结果,可以得到再生粗骨料取代率对再生

混凝土的线膨胀率 $\Delta L$ 及相对动弹性模量演化的影响规律(图3、图4)。

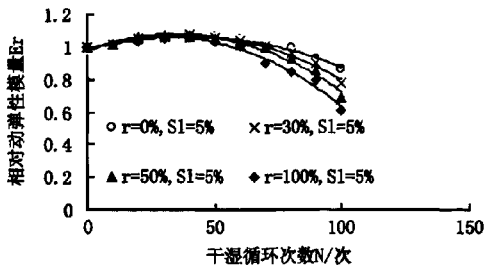


图3 不同 $r$ 下 $E_r$ 随 $N$ 的演化关系

Fig.3 Evolution relation of  $E_r$  and  $N$  with different  $r$

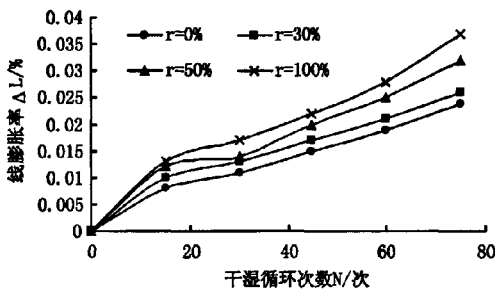


图4 不同 $r$ 下 $\Delta L$ 随 $N$ 的演化关系

Fig.4 Evolution relation of  $\Delta L$  and  $N$  with different  $r$

(1)再生粗骨料取代率对相对动弹性模量的影响。由图3可以得知,在相同的干湿循环- $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 溶液侵蚀作用下,不同再生粗骨料取代率 $r$ 引起 $E_r$ 的变化趋势基本上是一致的,但达到 $E_{\max}(r)$ 时所需的干湿循环次数却随再生粗骨料取代率 $r$ 的增大而减少。通过对比还可以发现, $r$ 从0%增大到100%,相应地达到 $E_{\max}(r)$ 所需的干湿循环次数 $N$ 也从50次左右下降到了近30次左右。 $E_r$ 的衰退退化期将随 $r$ 的减小而加长,随 $r$ 的增大而缩短,而且 $E_r$ 的下降速度随着干湿循环次数的增加而增大。同时,试验结果也表明,不论 $r$ 如何变化 $E_r$ 的最大值都大致上接近于1.07。

(2)再生粗骨料取代率对再生混凝土线膨胀率的影响。基于再生混凝土试件线性膨胀率实验数据,可以得到在5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 溶液-干湿循环侵蚀作用下,不同再生粗骨料取代率 $r$ 的再生混凝土试件的线膨胀率的经时变化规律(图4)。可以发现,在5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 溶液-干湿循环侵蚀作用下, $r=0\%$ 的再生混凝土(基准混凝土),其线膨胀率 $\Delta L$ 最小,体积稳定性最好。 $r=100\%$ 的再生混凝土

(全再生混凝土) $\Delta L$ 最大,体积稳定性也最差。在相同的干湿循环条件下, $\Delta L$ 随 $r$ 的增加而增大。这是因为随着再生粗骨料的掺入量的增大,再生混凝土的抗渗性能就逐渐变差,在相同时间里硫酸根离子经渗透进入到再生混凝土内部的量就越大,反应生成膨胀性钙矾石、石膏的量也就越多。再生混凝土的体积膨胀是由膨胀性钙矾石、石膏造成其内部微结构体积膨胀造成的。显然,随着干湿循环次数的增加,硫酸根离子继续向再生混凝土内部扩散,生成膨胀性钙矾石、石膏的量也就更多,再生混凝土的线长度变化将继续增大并最终引发再生混凝土体积稳定性失效。

## 2 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 环境下再生混凝土的损伤演化

相关文献研究结果表明<sup>[12-14]</sup>,在硫酸盐侵蚀溶液的作用下,混凝土的侵蚀破坏会因侵蚀方式(全侵蚀、半侵蚀、干湿交替侵蚀)、侵蚀环境的温度、硫酸盐溶液的浓度水平的不同而呈现出不同的破坏特征。在干湿循环作用过程中,由于硫酸根离子与混凝土材料中的水泥水化物发生化学反应生成体积膨胀的钙矾石(或石膏),同时这些生成物逐渐沉积于再生混凝土的原始微裂纹、微孔隙之中,所以混凝土在干湿循环的初期,其基本性能将得到一定程度的提高,从而致使该阶段内结构的可靠度也将有一定程度的提高<sup>[15-17]</sup>。但是,随着时间的推移,当钙矾石(或石膏)的累积量超过临界阈值时生成物累积的膨胀压力就会超过再生混凝土的抗拉强度,致使再生混凝土内部产生开裂损伤,并通过损伤积累最终引起再生混凝土结构的宏观破坏。

目前,干湿循环下混凝土硫酸盐侵蚀损伤的预测模型,主要有基于经验的预测模型,如Schneider等<sup>[18]</sup>提出了预测混凝土硫酸盐腐蚀寿命的经验模型,模拟硫酸盐侵蚀环境下混凝土相对强度的演变规律。我国学者对硫酸盐侵蚀环境下混凝土的耐久性预测也进行了一些研究,陈静等<sup>[19]</sup>基于自然衰变规律并结合硫酸盐侵蚀作用的实际情况,建立的硫酸盐侵蚀环境下混凝土耐久性的经验预测模型;李士伟等<sup>[20]</sup>从材料的微观结构出发,基于Fick第二定律及Loland损伤模型,提出的硫酸盐侵蚀环境下混凝土立方体损伤度的理论预测模型。但是,针对相关硫酸盐侵蚀环境下再生混凝土损伤模型方面的研究,却鲜有报导。

2.1 基于实验结果的  $E_r$  演化研究

假定  $E_r$  与  $N$  的关系符合抛物线的演化规律,那么  $E_r$  与  $N$  可建立如下的相关函数式:

$$E_r = a + bN + cN^2 \quad (1)$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $c$ —实验参数。

边界条件:当  $N=0$  时,  $E_r = 1$ , 可得到参数  $a = 1$ 。则

$$E_r = 1 + bN + cN^2 \quad (2)$$

结合本文的研究内容,  $b$ 、 $c$  为与再生混凝土材料性能及外部侵蚀环境(侵蚀溶液浓度水平)因素有关的参数,可通过试验获得。由抛物线的基本特性可知在此  $c$  是负值( $c < 0$ ),且  $|c|$  的值越大,抛物线的开口就越宽阔,即  $|c|$  的值越大,曲线  $E_r$  的变化趋势就越缓慢。反之,曲线  $E_r$  的变化趋势就越陡峭。

影响再生混凝土耐久性能劣化的因素很多,考虑到  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  侵蚀溶液浓度水平、再生粗骨料取代率、再生混凝土强度这些因素对再生混凝土耐久性演化的影响,同时考虑到实际干湿循环 -  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  侵蚀环境下再生混凝土相对动弹性模量计算模型的一般性,在此以  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液浓度水平  $S_i = 5\%$  和再生粗骨料取代率  $r = 100\%$  作为基准条件,以  $E_r$  随环境干湿循环次数  $N$  的损伤演化规律

符合抛物线变化特征为前提。同时,依据实验结果并结合式(2),可以建立如下再生混凝土相对动弹性模量计算模型。

$$E_r = \alpha k_1 k_2 k_3 [gN^2 + hN + 1] \quad (3)$$

式中: $k_1$ — $\text{Na}_2\text{SO}_4$  侵蚀溶液浓度水平  $S_i$  的修正系数,  $k_1 = -0.0038S_i^2 + 0.0265S_i + 0.9612$ ;  $k_2$ —再生粗骨料取代率修正系数,  $k_2 = 1.0177e^{-0.0002r}$ ;  $k_3$ —再生混凝土强度修正系数,  $k_3 = 0.9207e^{0.0026f_{cu,0}}$ ;  $\alpha$ —损伤变量调整系数,可由实验确定,在此取 1.0;  $g = -9.0375 \times 10^{-5}$ ,  $h = 5.5126 \times 10^{-3}$ 。

在此引入参数相对误差绝对值  $\Delta$ ,对式(3)进行检验:

$$\Delta = \left| \frac{E_r^c - E_r^t}{E_r^t} \right| \times 100\% \quad (4)$$

式中: $E_r^c$ —干湿循环  $N$  次计算得到的再生混凝土相对动弹性模量计算值;  $E_r^t$ —干湿循环  $N$  次后再生混凝土相对动弹性模量的实测值。

基于干湿循环 -  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  环境下再生混凝土  $E_r$  的计算模型,对不同  $S_i$ 、 $f_{cu,0}$  和  $r$  下试件  $E_r$  随  $N$  变化的实测数据进行  $E_r^c$  计算和  $\Delta$  计算。设  $N = 50$  次,比较结果详见表3所示。

表3  $E_r$  演化方程的各项系数  
Tab.3 Coefficients of evolution function for  $E_r$

$r/\%$	$S_i/\%$	$E_r^c$	$E_r^t$	$\Delta/\%$	$S_i/\%$	$r/\%$	$E_r^c$	$E_r^t$	$\Delta/\%$
100	3	1.0564	1.0309	2.47	5	30	1.0655	1.0543	1.06
100	5	1.0491	1.0316	1.70	5	50	1.0652	1.0282	3.60
100	10	0.893	0.933	4.31	5	100	1.0491	1.0316	1.70

由表3可知,  $E_r$  计算模型的计算结果与试验结果的相对误差绝对值均在5%以内,计算结果与实际的腐蚀演化过程具有较好的吻合性。

2.2 再生混凝土腐蚀损伤预测模型的建立

再生混凝土的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  侵蚀损伤,是指在  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  侵蚀过程中初期的再生混凝土材料内部微结构的变化和后期微裂纹的形成与扩展。而且再生混凝土的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  侵蚀损伤过程是一个不可逆的累积损伤过程。假定再生混凝土在  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  侵蚀过程中所造成的累积损伤是各向同性的,依据

文献[21]对损伤变量的定义,可以得知经历  $N$  次干湿循环 -  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液侵蚀之后,再生混凝土的累积损伤  $D_N$  与其相应时刻的相对动弹性模量  $E_r$  存在如下的相关关系。

$$D_N = 1 - E_r(N) \quad (5)$$

代入式(3)得

$$D_N = 1 - \alpha k_1 k_2 k_3 [gN^2 + hN + 1] \quad (6)$$

式(6)即为在干湿循环 -  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  侵蚀环境下,掺入不同用量再生粗骨料的再生混凝土在不同干湿循环次数  $N$  下的累积损伤变量  $D_N$  表达式。  $D_N < 0$  时表示试件无腐蚀损伤发生,此时取  $D_N =$

$0, D_N = 1$  时表示试件已经发生腐蚀破坏,因此  $0 \leq D_N \leq 1$ 。式(6)中各系数的计算方法与式(3)的相同。

### 3 结论

1) 在全再生混凝土情况下,  $E_r$  的衰减退化期将随  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液浓度水平  $S_i$  的增大而缩短, 随  $S_i$  的减小而加长, 而且  $E_r$  的下降速度随着干湿循环次数的增加而增大;  $S_i = 5\%$  时, 不同再生粗骨料取代率  $r$  引起  $E_r$  的变化趋势基本上是一致的, 但达到  $E_{\max}(r)$  时所需的干湿循环次数却随再生粗骨料取代率  $r$  的增大而减少。  $E_r$  的衰减退化期将随  $r$  的减小而加长, 随  $r$  的增大而缩短, 而且  $E_r$  的下降速度随着干湿循环次数的增加而增大。同时, 不论  $r$  与  $S_i$  如何变化, 比值  $E_{\max}(r)/E_r$  大致上接近于 1.07。

2) 在 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液 - 干湿循环侵蚀作用下,  $r = 0\%$  的再生混凝土(基准混凝土), 其线膨胀率  $\Delta L$  最小, 体积稳定性最好。而  $r = 100\%$  的再生混凝土(全再生混凝土), 其  $\Delta L$  最大, 体积稳定性最差。在相同的干湿循环条件下,  $\Delta L$  随  $r$  的增加而增大。

3) 建立的干湿循环 -  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  作用环境下再生混凝土的抛物线型损伤计算模型, 其计算值与实测值有较好的吻合, 能够在实验室环境下较好地反映干湿循环 -  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  侵蚀环境下  $E_r$  的演化规律。

### 参考文献:

- [1] MEHTA P K. Concrete durability - fifty year's progress [C]//Proceeding 2nd International Conference on Concrete Durability. US: American Concrete Institution, ACI SP - 126, 1991(1): 1 - 31.
- [2] CODY R D, CODY A M, SPRY P J, et al. Reduction of concrete deterioration by ettringite using crystal growth inhibition techniques [R]. US: Iowa State University, 2001.
- [3] 梁咏宁, 袁迎曙. 硫酸盐侵蚀环境因素对混凝土性能退化的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 452 - 457.
- [4] 左晓宝, 孙伟. 硫酸盐侵蚀下的混凝土损伤破坏全过程[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(7): 1063 - 1067.
- [5] 安新正, 易成, 刘燕, 等. 硫酸盐侵蚀与冻融循环作用下混凝土损伤试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2010(2): 1 - 3.
- [6] 安新正, 易成, 刘燕, 等. 钢筋混凝土梁腐蚀损伤超声检测试验研究[J]. 河北农业大学学报, 2010, 33(1): 108 - 112.
- [7] 高润东, 赵顺波, 李庆斌, 等. 干湿循环作用下混凝土硫酸盐侵蚀劣化机理试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(2): 48 - 54.
- [8] 肖建庄. 再生混凝土材料与结构研究新进展[J]. 世界科学, 2006(12): 29 - 31.
- [9] 安新正, 易成, 刘燕, 等. 硫酸盐环境下再生混凝土性能试验研究[J]. 混凝土, 2010(7): 31 - 33.
- [10] 肖建庄, 雷斌. 再生混凝土耐久性能研究[J]. 混凝土, 2010(5): 83 - 89.
- [11] 安新正, 易成, 姜新佩, 等. 海水环境下再生混凝土的腐蚀研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2011, 28(1): 5 - 9.
- [12] BOUAZZA A, JEFFERIS S, VANGPAISAL T. Investigation of the effects and degree of calcium exchange on the atterberg limits and swelling of geosynthetic clay liners when subjected to wet - dry cycles [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2007, 25(3): 170 - 185.
- [13] SANTHANAM M, COHEN M D, OLEK J. Sulfate attack research - wither now [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(6): 845 - 851.
- [14] SANTHANAM M, COHEN M D, OLEK J. Modeling the effects of solution temperature and concentration during sulfate attack on cement mortars [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(4): 585 - 592.
- [15] 乔宏震, 何忠茂, 刘翠兰. 硫酸盐环境混凝土动弹性模量及微观研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(8): 1302 - 1306.
- [16] 王琴, 杨鼎宜, 郑佳明. 干湿交替环境下混凝土硫酸盐侵蚀的试验研究[J]. 混凝土, 2008(6): 29 - 31.
- [17] 袁晓露, 李北星, 崔巩, 等. 干湿循环 - 硫酸盐侵蚀下混凝土损伤机理的分析[J]. 公路, 2009, (2): 163 - 166.
- [18] SCHNEIDER U, CHEN S W. Modell and empirical formulas for chemical corrosion and stress corrosion of cementitious materials [J]. Mater. Struct, 1998, 31(10): 662 - 668.
- [19] 陈静, 刘学文, 杜应吉, 等. 混凝土抗硫酸盐侵蚀耐久寿命预测模型[J]. 人民黄河, 2009, 31(4): 95 - 96.
- [20] 李士伟, 王迎飞, 王胜年. 硫酸盐环境下混凝土损伤预测模型[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(14): 35 - 39.
- [21] 关宇刚, 孙伟, 缪昌文. 基于可靠性与损伤理论的混凝土寿命预测模型 II: 模型验证与应用[J]. 硅酸盐学报, 2001, 29(6): 535 - 540.

(责任编辑 马立)