

冻融与硫酸盐作用下再生混凝土性能劣化研究

李蕾蕾¹, 康 抗¹, 冯泽平¹, 肖青波¹, 肖前慧²

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 陕西 西安 710065; 2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院 陕西 西安 710054)

摘要: 主要研究在冻融循环和硫酸盐腐蚀共同作用下再生混凝土的力学性能以及性能劣化规律。试验采用 0.35、0.45、0.55 三组水灰比, 再生骨料质量取代率 30%, Na_2SO_4 溶液浓度为 5%, 混凝土试块在不同冻融循环次数下, 其质量、相对动弹性模量、抗压强度进行测试, 并结合电镜扫描和 XRD 衍射实验。试验结果表明: 水灰比越大, 再生混凝土在冻融与硫酸盐环境下的力学性能越差, 耐久性能劣化也越严重, 并结合电镜扫描的图片和衍射图分析了再生混凝土的损伤。同时, 以相对动弹性模量作为损伤值对再生混凝土在冻融和硫酸盐共同作用下的寿命进行了预测; 结果表明: 水灰比是影响其寿命的重要因素, 在冻融与硫酸盐共同作用的环境下, 建议再生混凝土的水灰比宜控制在 0.45 及以下。

关键词: 再生混凝土; 冻融循环; 硫酸盐腐蚀; 力学性能; 寿命预测

中图分类号: TU528.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)04-0571-07

Study on performance deterioration of recycled concrete under coupling effect of freeze-thaw and sulfate

LI Leilei¹, KANG Kang¹, FENG Zeping¹, XIAO Qingbo¹, XIAO Qianhui²

(1. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: This paper mainly studies the mechanical properties and performance degradation of recycled concrete under the combined action of freeze-thaw cycle and sulfate corrosion. Three groups of water-cement ratios of 0.35, 0.45 and 0.55 were used in the test. The replacement rate of recycled aggregate was 30%, and the concentration of Na_2SO_4 solution was 5%. The mass, relative dynamic elastic modulus and compressive strength of concrete specimens were tested under different freeze-thaw cycles, combined with electron microscopy and XRD diffraction experiments. The test results show that the greater the water-cement ratio, the worse the mechanical properties of recycled concrete under freeze-thaw and sulfate environment, and the more serious the deterioration of durability. The damage of recycled concrete is analyzed by combining the images and diffraction patterns of electron microscope scanning. At the same time, the relative dynamic elastic modulus is used as the damage value to predict the life of recycled concrete under the combined action of freeze-thaw and sulfate. The results show that the water-cement ratio is an important factor affecting its service life. Under the combined action of freeze-thaw and sulfate, it is suggested that the water-cement ratio of recycled concrete should be controlled at 0.45 and below.

Key words: recycled concrete; freeze-thaw cycle; sulfate corrosion; mechanical properties; life prediction

改革开放四十年来, 我国建筑业迎来了迅猛发展, 在城镇化进程快速推进的过程中, 城市中建筑垃圾量也在持续增加, 这在很大程度上制约着我国城市化的可持续发展。将建筑垃圾中的混凝土回收后代替新拌合混凝土中的粗骨料可以降低其对环境的污染和资源的浪费。

最近五年来, 众多学者都将研究方向放在了再生混凝土上, 其中再生混凝土在冻融作用下的

相关研究有了一些进展^[1-3]。相关研究发现, 混凝土中水灰比、外加剂及掺合料对再生混凝土的强度具有非常重要的影响^[4-5]。谢本怡^[6]通过试验表明: 水灰比越低的再生混凝土, 其抗硫酸盐侵蚀的能力越强。薛建阳等^[7]通过试验结果得到: 再生混凝土在 5% 硫酸钠溶液侵蚀下其抗压强度损失率会随再生骨料取代率的提高而增大。闫宏生等^[8]通过试验研究得出: 再生混凝土在硫酸盐侵蚀下,

收稿日期: 2022-11-11

修回日期: 2023-07-09

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2018JQ5215); 校企联合基金资助项目(建筑垃圾再生产品研究与利用)

第一作者: 李蕾蕾(1983—), 女, 学士, 正高级工程师, 研究方向: 砂石、混凝土、固废资源化利用。E-mail: 5532452642@qq.com

其内部的孔隙结构会随水灰比的降低以及掺入粉煤灰得到改善,同时,试块内部生成石膏和钙矾石的速度和数量也会大幅降低,从而增强再生混凝土的抗侵蚀能力.对再生混凝土在冻融和硫酸盐共同作用下也有一些研究,但大部分研究只停留在力学性能或宏观层面,对微观层面上的研究较少.本文将对 0.35、0.45、0.55 三组水灰比的再生混凝土试块在 5%硫酸钠溶液和不同冻融循环次数的环境下进行质量、相对动弹性模量、强度测试、电镜扫描以及 XRD 衍射,研究再生混凝土在冻融和硫酸盐侵蚀共同作用下的性能劣化、侵蚀产物,并建立再生混凝土在冻融循环和硫酸盐侵蚀共同作用下的寿命预测模型.

1 试验概况

再生混凝土试块采用陕西秦岭水泥股份有限公司生产的 PO42.5R 普通硅酸盐水泥,其初凝时间为 110 min,终凝时间为 310 min,3 d 抗压强度不小于 20 MPa,28 d 抗压强度不小于 35 MPa.细骨料采用陕西灞河中砂,天然粗骨料为泾阳区石灰岩质锤破碎石,粒径在 20~40 mm,经鄂式破碎机破碎后筛分粒径为 5~16 mm.再生砖混粗骨料取自陕西省西安市长安区域中村改造拆除房屋,经鄂式破碎机破碎筛分后粒径为 5~16 mm.外加剂采用复合型,兼有减水剂和引气剂功效;普通

自来水,具体试验配合比和再生骨料的基本物理性质如表 1、表 2 所示.

试块尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm(强度试验)、100 mm×100 mm×400 mm(质量,动弹模测量试验),前期试验中得到采用 30%再生骨料质量取代率的立方体抗压强度与普通混凝土的接近,因此再生骨料取代率统一选为 30%^[9].试块按照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》^[10]的要求制作,模具内养护 24 h,拆模后放入标准养护箱养护(温度为 20±2 ℃、湿度为 98%)养护 28 d.

试验方法:将再生混凝土试件放入在含有 5%浓度的 Na₂SO₄ 溶液试验盒中进行冻融试验,25 次为一组冻融循环,每次冻融循环应控制在 2~4 h.为冻融循环过程采用 KDR-V9 型混凝土快速冻融试验机,依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T50082—2009^[11]的相关操作完成,冻融中的溶液浓度不变.动弹性模量测试采用 NM-4B 型非金属超声检测分析仪完成.在冻融循环次数达到 100、200、300 次后进行取样,将样品研成粉末状进行 XRD 试验.

表 1 再生粗骨料基本性能

粒径 /mm	表观密度 /kg·m ⁻³	堆积密度 /kg·m ⁻³	吸水 率/%	压碎 指标/%
5-16	2 480	1 200	9.08	18.2

表 2 再生混凝土配合比

Tab. 2 Proportion of recycled concrete

分组	水/ kg·m ⁻¹	水泥/ kg·m ⁻¹	碎石/ kg·m ⁻¹	再生骨料/ kg·m ⁻¹	沙子/ kg·m ⁻¹	水灰比	外加剂/ kg·m ⁻¹
MG0.35	160	457	886	380	517	0.35	2.7
MG0.45	160	355	910	390	585	0.45	2.1
MG0.55	160	290	915	392.5	645	0.55	1.7

2 数据分析

2.1 表观形貌

再生混凝土的冻融破坏可分为大概三个阶段,其破坏过程是一个从表面向内部发展的过程,不同冻融次数下再生混凝土的冻融破坏表观形貌差别较大,如图 1 所示:

(1)冻融破坏初期,再生混凝土表面破坏程度很小,表面仅有少量水泥浆脱落,同时存在微小孔蚀;

(2)随着冻融的进行,再生混凝土表面的水泥浆和细骨料脱落,表面变得疏松多孔,呈蜂窝状;

(3)冻融次数继续增加,再生混凝土表面的粗

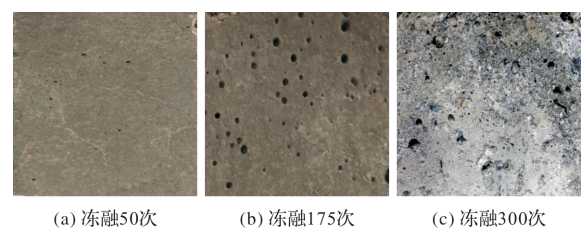


图 1 不同冻融次数下再生混凝土表观形貌

Fig. 1 Apparent morphology of recycled concrete under different freeze-thaw cycles

骨料出现外露,水泥砂浆的脱落现象加剧,粗骨料和细骨料明显发生分离.

2.2 质量损失率

如图 2 所示为再生混凝土在 5%硫酸钠溶液浸

泡后与冻融条件耦合作用下试件质量损失率随冻融循环次数的变化规律,可以看出冻融循环次数小于100次时,再生混凝土质量损失率呈线性增长,质量损失较小;当冻融循环次数增加至200~300次时,0.55水灰比的试件质量损失继续加速增长,0.35和0.45水灰比的再生混凝土质量损失持续增长,水灰比越大的试件破坏越大,抗冻性越差。

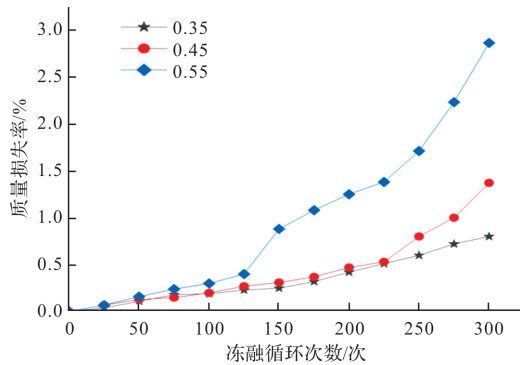


图2 不同水灰比再生混凝土质量损失率

Fig. 2 Mass loss rate of recycled concrete with different water cement ratio

2.3 相对动弹性模量

再生混凝土试块在硫酸盐溶液侵蚀作用下以及不同冻融循环次数下相对动弹性模量的变化规律如图3所示。当冻融循环次数从200次增加到300次的过程中,试块相对动弹性模量均出现了急速下降,这是由于在200次冻融循环时,再生混凝土试块内部已经产生了较多的裂缝和孔洞,此时硫酸钠溶液进入孔洞后使内部硫酸盐溶液迅速上升,析出的物质产生的膨胀应力和本身冻融过程中的冻胀应力共同作用使得破坏进一步加速,相对动弹性模量下降继续加快。和普通混凝土相比,再生混凝土的抗冻性同样受到水灰比大小的明显影响。

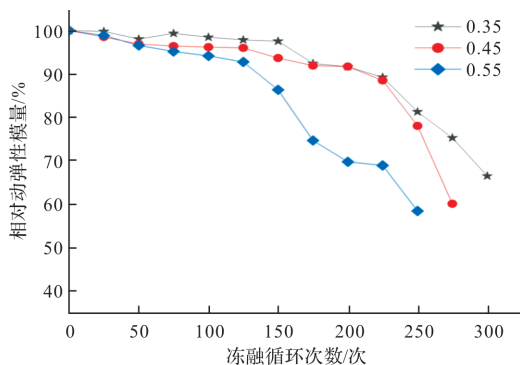


图3 相对动弹性模量变化

Fig. 3 Changes of relative dynamic elastic modulus

2.4 立方体抗压强度

如图4所示为再生混凝土试块不同冻融循环次

数下的立方体抗压强度变化规律,随着冻融次数的增加,外部水分沿混凝土试块表面微裂缝进入内部继续发生水化反应生成膨胀晶体,使得试块破坏加剧,强度损失增长,冻融循环次数从200增长到300的过程,由于孔隙发生破坏,水进入混凝土内部后,在水冻胀力和混凝土内部侵蚀产物的膨胀应力耦合作用下,再生混凝土试块的强度损失进一步增大。

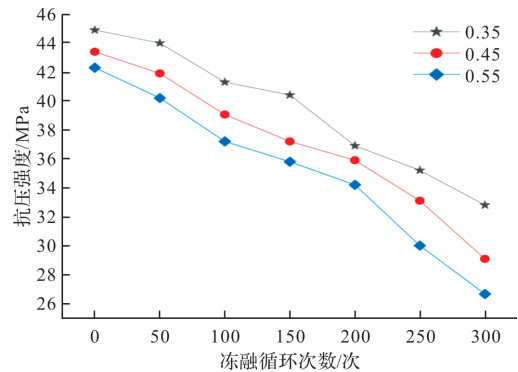
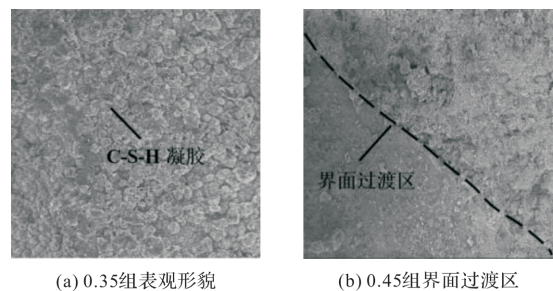


图4 抗压强度变化规律

Fig. 4 Variation of compressive strength

2.5 电镜扫描

通过电镜扫描分别对经过5%硫酸钠溶液浸泡后的再生混凝土0、100、200、300次冻融循环后的结果进行分析,观察内部侵蚀产物的形貌以及相关裂缝开展情况。如图5所示为未经冻融的试块,可以看出其中水泥水化产物水化硅酸钙凝胶分布均匀、紧密,对硫酸盐的侵入有一定阻挡作用,这就解释了再生混凝土试块在冻融循环次数较少时质量损失、强度损失以及损伤程度都比较小。0.45水灰比的再生混凝土电镜照片中可以看到粗骨料与水泥石的界面过渡区粘结性较好,0.55水灰比的再生混凝土电镜照片可以看到由于水灰比较大试块硬化后出现的原始干缩微裂缝,进而导致骨料界面区的粘结性较差,从而使水灰比大的再生混凝土试块发生的质量损失、强度损失越大。微观图中可以看出此时试块内只有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及其结晶,没有发现钙矾石等的析出。



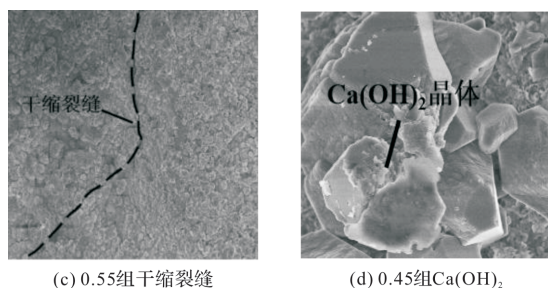


图5 未经冻融循环时各组试块电镜照片

Fig. 5 Electron microscope photographs of each test block without freeze-thaw cycle

如图6所示,当冻融循环次数达到100次时,可以看到各水灰比的再生混凝土试块电镜照片上开始出现裂缝,数量和宽度长度较未冻融前都有所增加,0.55水灰比的再生混凝土试块电镜照片上出现了 SO_4^{2-} 与水化铝酸钙发生反应生成的水化硫铝酸钙,即钙矾石,0.55水灰比再生混凝土试块中的界面区裂缝发展最明显,这是 SO_4^{2-} 的侵蚀产物和孔隙水冻胀应力共同作用的结果。

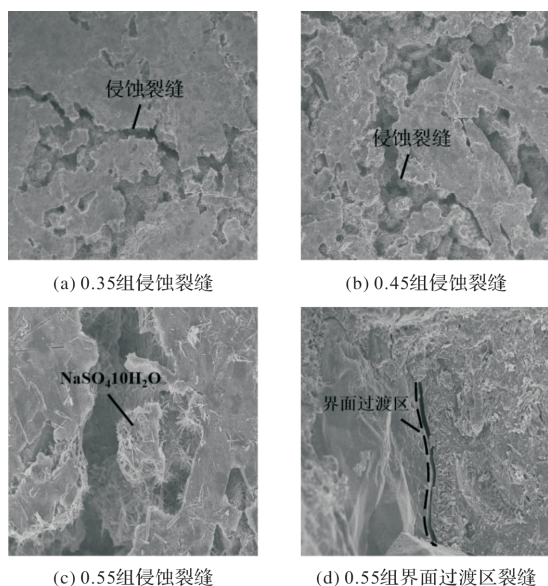


图6 100次冻融循环各组试块电镜照片

Fig. 6 Electron microscope photographs of each test block after 100 freeze-thaw cycles

如图7所示,当冻融循环达到200次时,各水灰比再生混凝土试块电镜照片中均出现了 SO_4^{2-} 与水化铝酸钙发生反应生成的水化硫铝酸钙,其形状如图中标注的有方向的针状晶体,试块内部可以看到各水灰比再生混凝土试块的裂缝都进一步扩大。5%浓度硫酸钠溶液会析出 $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$,其体积将膨胀为原来的4.2倍,这对于再生混凝土试块内部的孔隙结构将带来非常大的危害,0.55水灰比的试块由于硫酸钠大量进入试块内部导致试块内硫酸盐溶液浓度快速上升,所以冻融200次

时就已经观察到 $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的块状晶体析出,0.35和0.45水灰比试块尚未出现。

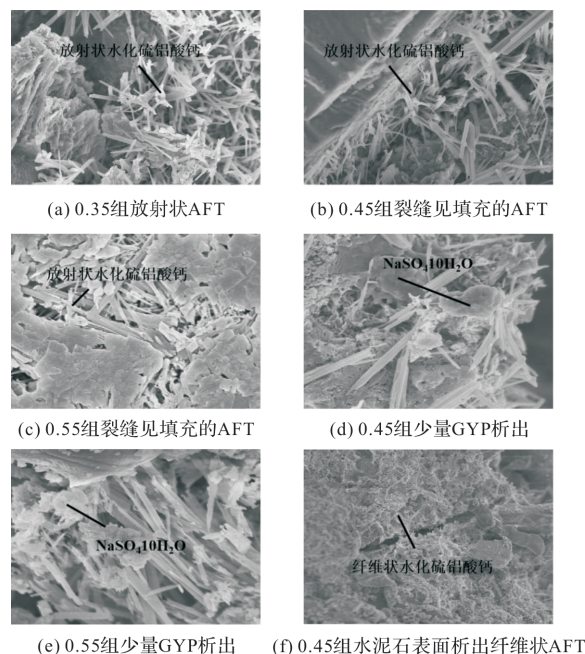


图7 200次冻融循环各组试块电镜照片

Fig. 7 Electron microscope photographs of each test block after 200 freeze-thaw cycles

如图8所示,当冻融循环达到300次时,试块在内部冻胀应力与硫酸盐溶液与各种膨胀侵蚀物质的共同作用下,孔隙结构开始贯穿。图8(b)可以看出水泥基受到严重侵蚀后发生了脱落,导致粗骨料出现外露。再生混凝土试块在冻融循环300次后,内部孔壁在孔隙水的膨胀应力下产生疲劳荷载与硫酸盐侵蚀下逐渐破坏联通形成贯通通道,裂缝进一步发展。

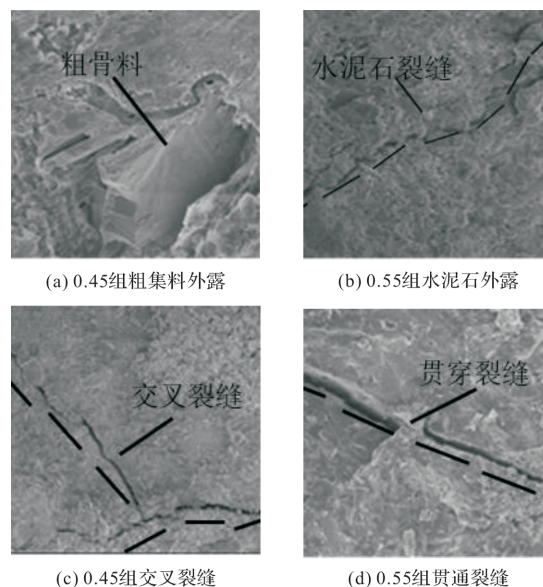


图8 300次冻融循环各组试块电镜照片

Fig. 8 Electron microscopic photographs of each test block after 300 freeze-thaw cycles

2.6 XRD 衍射

冻融循环次数达到 100、200、300 次后进行取样检测,将样品研成粉末状进行观察,利用每种晶体在 X 射线照射下的衍射特性,分析在不同水灰比与不同冻融次数下试样侵蚀产物的变化。

由图 9 可以看出,当冻融循环 200 次后,三组试样的衍射峰均较为明显,AFt 的衍射峰强度随水灰比的增大逐渐增强。图 10 为 0.45 水灰比的试样在 100、200、300 次冻融循环后的衍射图谱,由图可见,随着冻融循环的增加,硫酸盐侵蚀作用逐渐明显,混凝土中水化产物的衍射峰逐渐减弱,同时侵蚀产物 AFt 率先析出,并随冻融次数的增加其衍射峰强度逐渐增强,随着 AFt 的逐渐累积,

使得原始裂缝不断扩展、延伸,导致大量的进入混凝土孔隙,当浓度达到一定条件后开始有 GYm 晶体析出,在冻融循环 200 次时观察到石膏的衍射峰,且随冻融次数的增加,衍射峰强度呈增长趋势。

综上所述,水灰比对再生混凝土抗冻性及抗硫酸盐侵蚀能力有着非常重要的影响,特别是在冻融循环和硫酸盐侵蚀前期。在冻融循环和硫酸盐侵蚀过程中,伴随含量逐渐减少,侵蚀产物 AFt 和 GYm 依次析出,其含量在冻融后期将增长迅速;含量的多少直接影响着再生混凝土的抗冻和抗侵蚀能力,因此能否有效降低再生混凝土中的含量对提高再生混凝土抗冻性及抗硫酸盐侵蚀能力具有重要意义。

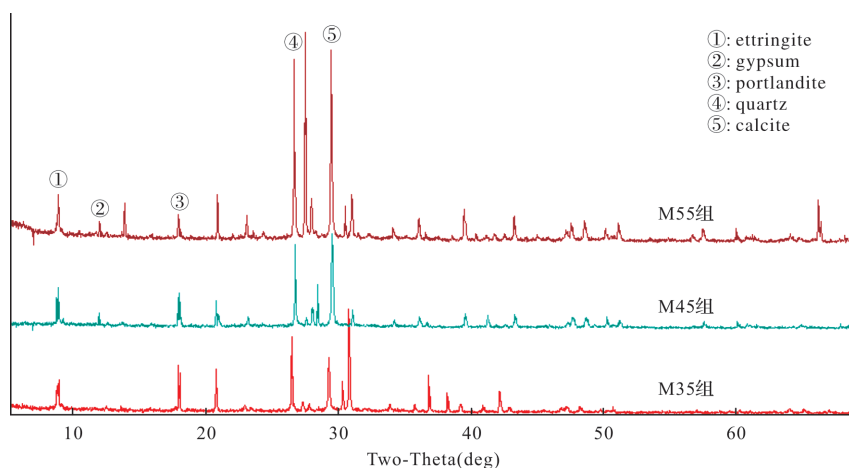


图 9 200 次冻融循环下再生混凝土 XRD 图谱

Fig. 9 XRD pattern of recycled concrete under 200 freeze-thaw cycles

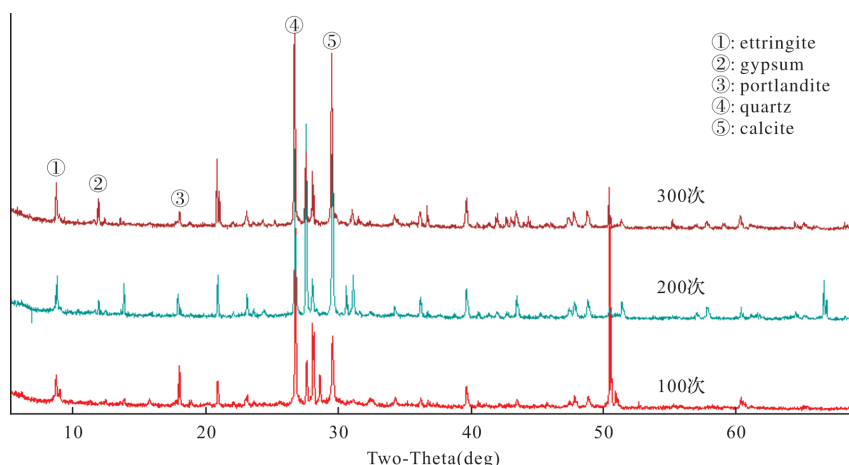


图 10 M45 组不同冻融循环次数下再生混凝土 XRD 图谱

Fig. 10 XRD pattern of recycled concrete under different freeze-thaw cycles in M45 group

2.7 再生混凝土冻融损伤模型与寿命预测

混凝土的劣化过程通常用相对动弹性模量进行表征,因此引入损伤力学中的损伤度为

$$D_{En} = 1 - \frac{E_n}{E_0} \quad (1)$$

式中: D_{En} 为 n 次冻融循环后试块的损伤度, E_n 为

n 次冻融循环后试块的冻弹性模量, E_0 为经过冻融循环试块的动弹性模量。

据相对动弹性模量的实验数据,计算得出再生混凝土在冻融循环与硫酸盐侵蚀共同作用下的损伤度结果,如表 3 所示。

表 3 不同水灰比再生混凝土在硫酸盐溶液与冻融循环共同作用下的损伤度

Tab. 3 Damage degree of recycled concrete with different water cement ratio under combined action of sulfate solution and freeze-thaw cycle

水灰比	冻融次数												
	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
0.35	0	0.002	0.019	0.006	0.015	0.021	0.024	0.075	0.083	0.107	0.187	0.247	0.335
0.45	0	0.014	0.031	0.036	0.038	0.040	0.063	0.081	0.083	0.115	0.219	0.399	
0.55	0	0.011	0.034	0.048	0.058	0.072	0.136	0.253	0.302	0.310	0.415		

刘志勇^[12]认为冻融累计损伤值与冻融循环次数之间可以指数型函数来描述,根据相关定义,得到损伤度与冻融循环次数为

$$D_n = ae^{bn} \quad (2)$$

式中: D_n 为损伤值; n 为冻融循环次数; a 、 b 为常值参数. 将实验数据与指数函数关系式进行拟合,得到 a 、 b 参数值及相关系数如表 4 所示.

表 4 不同水灰比的 a 、 b 参数值及相关系数Tab. 4 a , b parameter values and correlation coefficients of different water-cement ratios

水灰比	a	b	c
0.35	4.98E-3	1.41E-2	0.989
0.45	2.30E-3	1.86E-2	0.956
0.55	2.61E-2	1.13E-2	0.940

得到不同水灰比下再生混凝土试块的拟合公式为

0.35 水灰比的冻融度与冻融循环次数方程为

$$D_n = 4.98 \times 10^{-3} \times e^{1.41 \times 10^{-2} \times n} \quad (3)$$

0.45 水灰比的冻融度与冻融循环次数方程为

$$D_n = 2.30 \times 10^{-3} \times e^{1.86 \times 10^{-2} \times n} \quad (4)$$

0.55 水灰比的冻融度与冻融循环次数方程为

$$D_n = 2.61 \times 10^{-2} \times e^{1.13 \times 10^{-2} \times n} \quad (5)$$

引入水灰比并进行修正得到式 6 为

$$D_n = (0.223 - 1.086 \times i + 1.324 \times i^2) \times e^{(-0.095 + 0.517 \times i - 0.59 \times i^2) \times n} \quad (6)$$

式中: D_n 为损伤值; n 为冻融循环次数; i 为水灰比. 根据 GBJ82—85《普通混凝土长期性能与耐久性性能试验方法》,当相对动弹性模量下降到 60% 即认为再生混凝土失去抗冻性能,利用相对动弹性模量对再生混凝土试块进行寿命预测,计算出不同水灰比再生混凝土达到破坏所需要的冻融循环次数如表 5 所示.

表 5 不同水灰比再生混凝土达到破坏所需要的冻融循环次数

Tab. 5 Number of freeze-thaw cycles required to achieve failure of recycled concrete with different water cement ratios

水灰比	指数函数损伤模型
0.35	319
0.45	288
0.55	251

曹永康^[13]分析中提出了计算混凝土结构使用寿命的公式如下.

$$T = KF/M \quad (7)$$

式中: T 为混凝土结构的预测使用寿命; K 为比例系数,即室内进行一次快速冻融相当于室外自然冻融次数的比例关系; F 为室内混凝土的快速冻融次数; M 为室外混凝土一年经受的冻融循环次数.

根据李金玉^[14]的相关研究,我国东北地区一年平均冻融循环次数为 120 次/a,华北地区一年平均冻融循环次数为 84 次/a,西北地区一年平均冻融循环次数为 118 次/a. 相关文献^[15]研究分析得出,室内快速冻融循环次数与室外实际环境冻融循环次数的换算关系在 1:10~1:15 之间,本实验考虑到硫酸盐溶液对试块的侵蚀,其换算关系取 1:15. 计算得到各地区不同水灰比再生混凝土的寿命如表 6 所示.

表 6 不同水灰比再生混凝土的寿命

Tab. 6 Life span of recycled concrete with different water cement ratio

水灰比	东北地区/a	华北地区/a	西北地区/a
0.35	39.88	56.96	40.55
0.45	36.00	51.43	36.61
0.55	31.38	44.82	31.91

可以看到,华北地区 0.35 和 0.45 水灰比的再生混凝土寿命超过 50 a,因此华北地区的工程项目运用再生骨料混凝土的水灰比应该控制在 0.45 或者以下.

3 结论

(1)再生混凝土在冻融循环和硫酸盐共同作用下,水灰比越大,其破坏程度越大,表观形貌越粗糙;相同冻融循环次数下,水灰比越大,其损伤值越大;

(2)冻融循环过程中,生成的侵蚀膨胀物不断累积,冻融循环次数越多,强度、相对动弹性模量、质量下降越快,内部孔隙破坏越严重,0.55 水灰比的试块破坏程度最大;

(3)硫酸盐与冻融破坏共同作用下,侵蚀产物

有钙矾石水化硫铝酸钙和 $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, 同时再生混凝土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量减少, 减少再生混凝土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 可有效改善再生混凝土的抗冻性和抗硫酸腐蚀;

(4)冻融与硫酸盐共同作用下, 再生混凝土的寿命随水灰比的增大而减少, 在海港及低温地区, 再生混凝土的水灰比宜控制在 0.45 及以下。

参考文献 References

- [1] XIAO Q H, LI Q, CAO Z Y, et al. The deterioration law of recycled concrete under the combined effects of freeze-thaw and sulfate attack[J]. Construction and Building Materials, 2019, 200: 344-355.
- [2] 邓祥辉,高晓悦,王睿,等. 再生混凝土抗冻性能试验研究及孔隙分布变化分析[J]. 材料导报, 2021, 35(16): 16028-16034.
DENG Xianghui, GAO Xiaoyue, WANG Rui, et al. Experimental study on frost resistance of recycled concrete and analysis of pore distribution change[J]. Material introduction, 2021, 35(16): 16028-16034.
- [3] 王晨霞,刘路,曹芙波,等. 冻融循环后再生混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(12): 193-202.
WANG Chenxia, LIU Lu, CAO Fubo, et al. Experimental study on mechanical properties of recycled concrete after freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(12): 193-202.
- [4] U ĞURLU A İ, KARAKOÇ M B, ÖZCAN A. Effect of binder content and recycled concrete aggregate on freeze-thaw and sulfate resistance of GGBFS based geopolymer concretes[J]. Construction and Building Materials, 2021, 301: 124246.
- [5] 阎西康,周明,杜闯,等. 骨料和外加剂对活性粉末混凝土强度影响的试验研究[J]. 混凝土, 2021, 386(12): 56-60, 65.
YAN Xikang, ZHOU Ming, DU Chuang, et al. Experimental study on the effect of aggregates and admixtures on the strength of reactive powder concrete[J]. Concrete, 2021, 386(12): 56-60, 65.
- [6] 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.
XIE Benyi. Research on sulfate resistance of recycled aggregate concrete[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [7] 薛建阳,罗峥,元成方,等. 再生混凝土力学性能及耐久性能试验研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(10): 6.
XUE Jianyang, LUO Zheng, YUAN Chengfang, et al. Experimental study on mechanical properties and durability of recycled concrete[J]. Industrial Buildings, 2013, 43(10): 6.
- [8] 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.
YAN Hongsheng. Experimental study on sulfate corrosion of recycled concrete[J]. Concrete, 2013(5): 13-15, 20.
- [9] 田伟宇. 冻融与硫酸盐耦合作用下不同水灰比再生混凝土性能劣化研究[D]. 西安:西安科技大学, 2020
TIAN Weiyu. Study on the deterioration of ground performance of recycled concrete with different water-cement ratio under the coupling effect of freeze-thaw and sulfate[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of performance on ordinary fresh concrete: GB/T 50080—2016[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2016.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009[S]. Beijing: China Construction Industry Publishing House, 2009.
- [12] 刘志勇,马立国. 高强混凝土的抗冻性与寿命预测模型[J]. 工业建筑, 2005(1): 11-14.
LIU Zhiyong, MA Ligu. Frost resistance and life prediction model of high strength concrete[J]. Industrial building, 2005(1): 11-14.
- [13] 曹永康. 解读“混凝土抗冻性的量化设计”一文[J]. 混凝土与水泥制品, 2011(7): 1-3.
CAO Yongkang. Interpretation of “Quantitative design of frost resistance of concrete”[J]. Concrete and Cement Products, 2011(7): 1-3.
- [14] 李金玉,彭小平,曹建国,等. 高贝利特水泥低热高抗裂大坝混凝土性能的研究[J]. 硅酸盐学报, 2004(3): 364-371.
LI Jinyu, PENG Xiaoping, CAO Jianguo, et al. Study on the properties of high belite cement dam concrete with low heat and high crack resistance[J]. Acta Silicate Sinica, 2004(3): 364-371.
- [15] 张秀梅. 混凝土抗冻性的量化设计[J]. 混凝土, 2000(12): 61-65.
ZHANG Xiumei. Quantitative design of frost resistance of concrete[J]. Concrete, 2000(12): 61-65.

(编辑 郑晓龙 沈 波)