

冻融—硫酸盐干湿循环作用下 复掺水泥砂浆性能研究

叶 珊, 周志云

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 探讨了复掺粉煤灰、矿渣在冻融循环、硫酸盐干湿循环以及二者共同作用下的性能。通过研究其质量损失率、相对动弹性模量、抗压强度等力学性能来对复掺比例进行讨论, 得出了复合作用下的较优配合比。研究表明: 随着循环次数的增加, 试块破坏程度逐渐严重, 质量损失率出现负增长现象, 相对动弹性模量及抗压强度逐渐减小。掺入矿物掺合料的试件组(试验组)性能略差于未掺入矿物掺合料的试件组(对照组), 水胶比越小, 其试验组与对照组的数据曲线变化趋势越相似。复合作用下, 试件的破坏程度相对单一作用下更严重, 但是破坏过程相对平缓。

关键词: 粉煤灰; 矿渣; 冻融; 硫酸盐干湿循环; 复合作用

中图分类号: TU 528 **文献标志码:** A

Properties of Cement Mortar Under Freezing-Thawing and Wet-Dry Cycles with Salt Soaking

YE Shan, ZHOU Zhiyun

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The properties of cement mortar mixed with fly ash and slag powder under freezing-thawing or wet-dry cycles with salt soaking as well as under both of them were studied. The mass loss ratios, longitudinal relative dynamic elastic modulus, cubic compressive strength and other properties were tested and the optimal ratio was obtained. The results show that the damage to the specimens will be more serious with the increasing of the number of freezing-thawing cycles or wet-dry cycles. The mass loss ratio negatively increases with the increasing of the number of freezing-thawing cycles or wet-dry cycles, while the cubic compressive strength and longitudinal relative dynamic elastic modulus decrease. The behaviors of specimens with mineral admixtures (experimental group) are worse than those without mineral admixtures (control group). The smaller the experimental group's ratio of water to cementation material, the closer the data changing trend of the experimental group and the control group. Under the combined effect of

收稿日期: 2017-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408359)

第一作者: 叶珊(1992-), 女, 硕士研究生。研究方向: 混凝土耐久性。E-mail: 372005877@qq.com

通信作者: 周志云(1966-), 女, 副教授。研究方向: 混凝土基本理论和耐久性。E-mail: zhouzyfj@163.com

freezing-thawing cycles and wet-dry cycles, the damage to specimens is more serious than that under a single effect, but the changing process is relatively smooth.

Keywords: fly ash; slag; freezing-thawing cycles; wet-dry cycles with salt soaking; combined action

目前,混凝土多因素破坏的问题逐渐成为世界研究焦点.北方地区冬季寒冷漫长、盐碱区域多,受到冻融循环及盐侵干湿循环破坏.经历复合盐浸、冻融、干湿循环作用的混凝土破坏更为严重.复合作用比如硫酸盐冻融、硫酸盐干湿循环、冻融—干湿循环下混凝土的研究不断增多^[1-7].复合矿物掺合料同样也引起国内外研究学者的重视,并有不少的研究成果^[8-11].粉煤灰和矿渣粉化学组成与结构均具有互补性,两者复合有“超叠加效应”^[8].而且利用矿物掺合料部分替代水泥用量既可实现持续发展要求,又降低水泥使用量及生产成本,减少水泥生产过程中产生的环境污染^[12].掺入矿物掺合料的混凝土的结构和部分性能都有一定程度的改善^[13-14],将其放于混凝土多因素影响中进行研究,对混凝土耐久性的研究有很大的意义.本文研究了水泥基材料在冻融及硫酸盐干湿循环作用下,不同矿物掺合料掺量、不同水胶比情况下的力学性能,探讨了矿物掺合料

对水泥砂浆性能的影响.

1 试验

1.1 试验原材料

试验用原材料如下:海螺牌 PO 42.5 级硅酸盐水泥,相对密度 3.12 g/cm^3 ,比表面积 321 g/cm^3 ,安定性良好,化学成分含量如表 1 所示;一级粉煤灰,密度 $2\,600 \text{ g/cm}^3$,化学成分含量如表 2 所示;河南某公司的粒化高炉矿渣粉,微粉级别 S95,该矿粉主要的化学成分含量如表 3 所示;上海宝钢的钢渣成品粉,检测样本的状态为干、粉状、无杂质,检测温度 $19^\circ\text{C} \sim 21^\circ\text{C}$,湿度 $60\% \sim 68\%$,检测参照标准为 YB/T140—2009,其检测结果详见表 4;细骨料为河沙,属于细砂,表观密度 $2\,320 \text{ g/cm}^3$,级配良好;HSN 引气高效减水剂,含气量 5% ,减水率 15% .

表 1 水泥成分含量

Tab.1 Contents of cement composition

%

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₃
含量	22.02	5.2	5.23	1.02	64.42	2.1

表 2 粉煤灰成分含量

Tab.2 Contents of fly ash composition

%

成分	SO ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
含量	1.46	54.88	1.93	1.45	32.12	4.28

表 3 矿渣成分含量

Tab.3 Contents of slag composition

%

成分	SO ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂
含量	1.8	35.98	37.18	8.26	13.46	0.71	1.00	0.56

表 4 钢渣成分含量

Tab.4 Contents of steel slag composition

%

成分	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	S	P	f · CaO	MFe
含量	9.84	11.06	0.98	41.98	8.69	14.88	0.042	0.56	5.68	0.58

1.2 水泥砂浆配比设计

选取水泥砂浆试件尺寸为 $160\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$. 根据《GB/T50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法》进行试件的制作. 试验中,按照混凝土试件制作计算配比方法来计算水泥砂浆的试件配比,其中去除粗骨料. 水胶比(W/C)分为 0.40, 0.45 两组;粉煤灰(FA)与矿渣(GS)分别采取 1:3, 1:1, 3:1 这 3 个比例. 其中矿物掺合料的掺量为胶凝材料用量的 30%;钢渣掺量为矿物掺合料掺量的 10%,即胶凝材料用量的 3%;减水剂掺量为胶凝材料用量的 0.2%. 试块分组情况如表 5 所示, C01, C02 为未掺入矿物掺合料的试件组,称对照组;其余为掺入矿物掺合料的试件组,称试验组.

表 5 水泥砂浆配比及分组情况

Tab.5 Mixed proportions and groups of cement mortar

组号	W/C	FA/GS
C01	0.40	0
C1		1:3
C2		1:1
C3		3:1
C02	0.45	0
C4		1:3
C5		1:1
C6		3:1

1.3 试验方法

试验分为两大部分:第一部分为单一冻融试验与单一硫酸盐干湿循环试验;第二部分为冻融—硫

酸盐干湿循环试验,此部分的试验试块配比从第一部分的试验结果中筛选. 试验方法均按照《GB/T 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行. 单一冻融试验采用快冻法,采用型号为 CABR-HDK9A 型混凝土快速冻融试验机,试验仪器如图 1(a). 每次冻融设定 4 h 一个循环,在冷却和融化过程中,设定试件中心最低和最高温度分别控制在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. 每冻融循环 10 次后,立即将试件取出观察试验现象并记录,将试件表面浮渣清洗干净并擦干表面水分对试件称重,测量其纵向基频并记录,直到测定的相对动弹性模量下降至 60% 或质量损失率达到 5% 时,即认为试件达到破坏可终止试验的进行. 单一硫酸盐干湿循环试验采用型号为 TR-LSB 的硫酸盐干湿循环试验机,试验仪器如图 1(b). 每次干湿循环 24 h,浸泡阶段温度控制在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,浸泡时间为 15 h;干燥阶段温度控制在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,干燥时间为 6 h,浸泡溶液采用 5% 的硫酸钠溶液. 每干湿循环 10 次后,将试件取出观察记录称重及纵向基频,直到测定的相对动弹性模量下降至 60% 或质量损失率达到 5% 时,即认为试件达到破坏可终止试验的进行. 冻融—硫酸盐干湿循环试验采用两种单一试验的结合. 一次大循环周期为 7 d:冻融试验 6 次循环(每次循环 4 h,共 24 h,即 1 d);硫酸盐干湿循环试验 6 次(每次循环 24 h,共 6 d). 每次大循环后立即将试件取出观察试验现象并记录,将试件表面浮渣清洗干净并擦干表面水分对试件称重,测量其纵向基频和抗压强度并记录,总共进行 5 次大循环.



(a) 混凝土快速冻融试验机



(b) 硫酸盐干湿循环试验机

图 1 试验仪器

Fig.1 Test instruments

2 试验结果与分析

2.1 冻融循环作用下水泥砂浆的力学特性

随着冻融次数的增加,试件表面逐渐剥落,棱角逐渐圆滑,其表现及破坏程度按水胶比划分:水胶比为 0.40 的组块相比 0.45 的组块,其表面更完整,且

整个过程中表层脱落速度较慢;其次,对照组试件表面较试验组的完整,脱落速度也较慢. 分析可知,冻融破坏是结冰膨胀受损产生裂缝的过程,最初的破坏形式表现在外表面上. 内部膨胀产生裂缝至裂缝贯通需要一段时间,而表面的砂浆在一开始结冰膨

胀时就会出现明显的受损,表现为表面脱落.由于水胶比或掺入矿物掺合料的不同又会出现不同快慢程度的表面脱落,观察得知水胶比小的对照组的试件表面比较完整,脱落相对不明显,有较强的抗冻能力.

2.1.1 质量损失率

对每 10 次冻融循环后的试件进行质量测量,数据处理结果如图 2 所示.

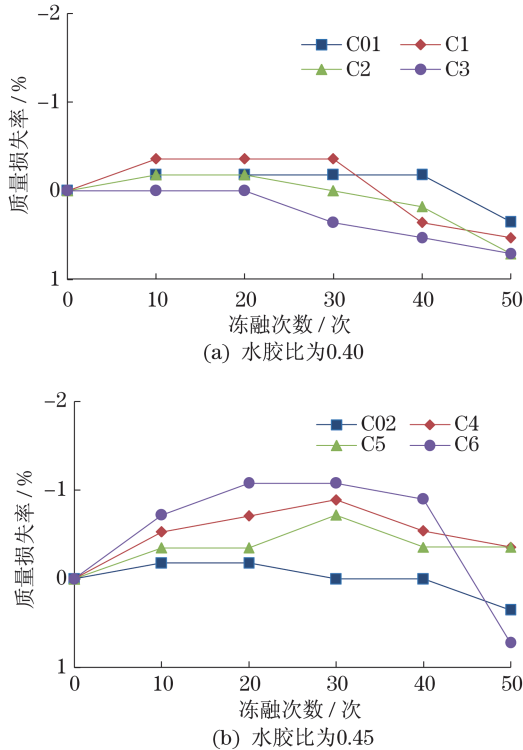


图 2 质量损失率与冻融循环次数的关系

Fig.2 Relation between the mass loss rate and the number of freezing-thawing cycles

由图 2 可知,大部分试件的质量损失率为负增长,质量先增加后减少.经过冻融处理后的试件内部孔隙在冰冻过程中膨胀后进入更多的水溶液,导致质量有小幅上升.冻融后期试件表面脱落越来越明显,质量减少明显.水胶比为 0.40 的试件组受冻融影响波动较小,水胶比为 0.45 的试件组质量损失率负增长较大且持续时间较长,可以看出水胶比较大的水泥砂浆的质量损失率受冻融影响较大.水胶比为 0.40 的试件组中,C2 与 C3 组的曲线与对照组 C01 的曲线变化趋势最为接近,在试验组中 C2 与 C3 组试件相对来说是受影响最小的一组.试验组中由于粉煤灰与矿渣的形态效应和微集料效应,矿物掺合料填充了浆体孔隙,堵截了毛细孔,使得水泥砂浆密实,从而质量提高.但当矿渣相比粉煤灰较多的

时候,即 C1,掺入效果适得其反,C1 组的质量损失率负增长最多.

2.1.2 纵向相对动弹性模量

对每 10 次冻融循环后的试件进行纵向振动的基频振动频率测量,数据处理结果如图 3 所示.

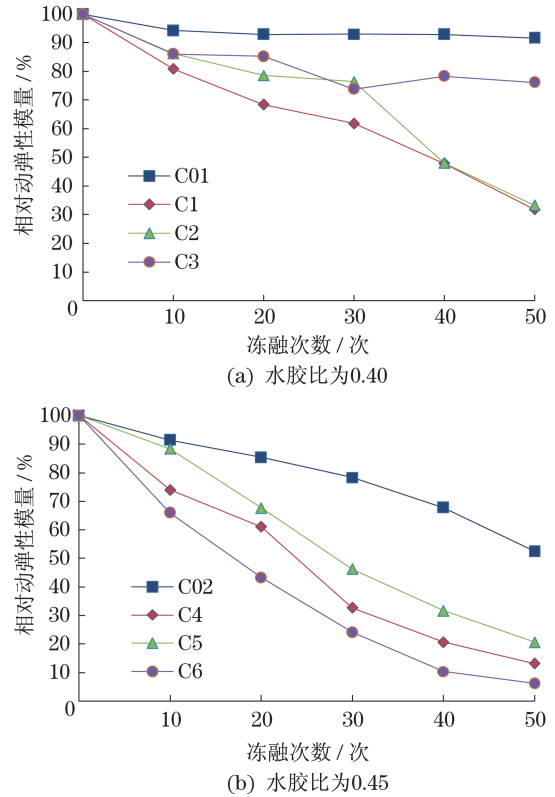


图 3 相对动弹性模量与冻融循环次数的关系

Fig.3 Relation between the relative dynamic elastic modulus and the number of freezing-thawing cycles

由图 3 中数据变化情况可看出,随着冻融次数的增加,相对动弹性模量逐渐下降,水胶比为 0.45 的试件组的相对动弹性模量在冻融过程中下降较快.这与试件外观表现基本一致,水胶比为 0.45 的试件表面脱落明显,在 20 次冻融时试件的棱角已不明显.水胶比为 0.40 的试验组的相对动弹性模量虽然相比对照组下降相对较多,但与水胶比 0.45 的组块来说,曲线变化趋势较为缓慢.C3 组试件相对动弹性模量变化平缓,表现出较好的抗冻能力,C2 组试件前期抗冻性能表现良好,但后期急剧下降,C4, C5, C6 组试件均呈直线下降,受冻融影响明显.

在同一水胶比对比中,不同的矿物掺合料比例对试件抗冻能力影响不同,粉煤灰掺量比例多时的抗冻性能较优,矿渣掺量比例增大时反而降低.但在水胶比较大的情况下,试验组的抗冻性能劣于对照组的抗冻性能.可见,水胶比对水泥砂浆的抗冻能力

的影响较掺入矿物掺合料的影响大。

根据以上测量指标分析得到:水胶比较小的组抗冻性能表现良好;掺入粉煤灰与矿渣比例为3:1的试验组与对照组的抗冻性能最接近,此比例被视为掺入矿物掺合料的较优配比。

2.2 硫酸盐干湿循环作用下水泥砂浆的力学特性

对每10次干湿循环作用后的试件进行观察,随着硫酸盐干湿循环次数的增加,试件表面开始出现错综布列的微细裂纹,裂纹逐步发展扩大形成明显裂缝,主裂缝从棱边延伸至中部;试件表面发黄有盐渍,体积膨胀,放置方式上表面剥落,棱角逐渐圆滑。对照组与试验组相比,试验组试件表面破坏比较明显。水胶比为0.40试件组与0.45试件组相比,0.45试件组表面先于0.40试件组出现裂纹与脱落,10次循环后试件均出现不同程度的细微裂纹,而30次循环后C4,C5,C6组的表面首先开始剥落,50次循环后试件脆化,水胶比为0.45的试验组脆化最明显。从表观特征来看,水胶比较小的试件组表现出较好的抗硫酸盐干湿循环能力。

2.2.1 质量损失率

对每10次干湿循环后的试件进行质量测量,数据处理结果如图4所示。

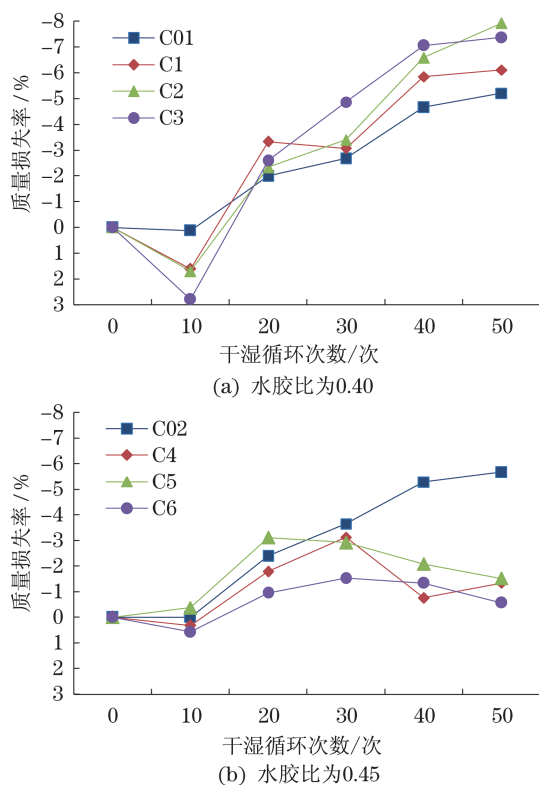


图4 质量损失率与干湿循环次数的关系

Fig.4 Relation between the mass loss rate and the number of wet-dry cycles

根据整理出来的图表得到:水胶比为0.40的试验组相比对照组有更多的硫酸盐溶液的渗透结晶,即掺入矿物掺合料未能改善水泥砂浆在干湿循环作用下的抗侵蚀性能。水胶比为0.45的试验组相比对照组表面脱落更为严重,从质量损失的变化不能完全判断出试验组内部渗透更多的硫酸盐结晶。

2.2.2 纵向相对动弹性模量

对每10次干湿循环后的试件进行纵向振动的基频振动频率测量,数据处理后得到纵向相对动弹性模量变化趋势,如图5所示。

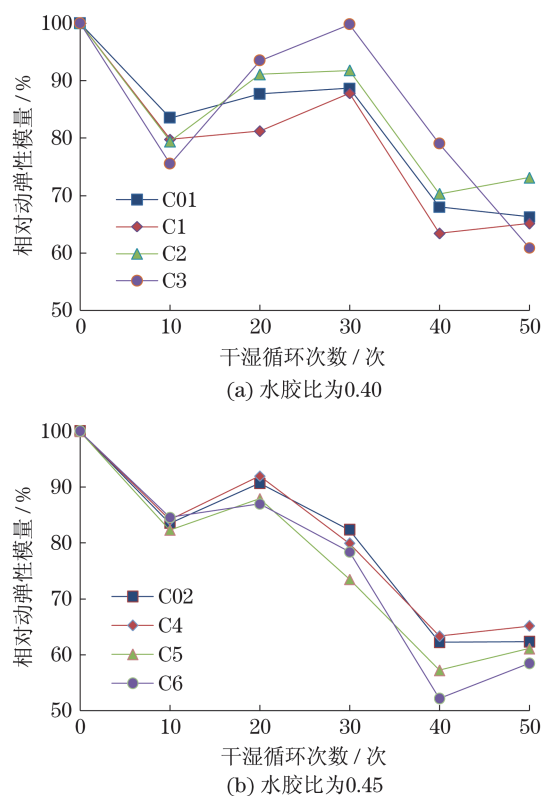


图5 相对动弹性模量与干湿循环次数的关系

Fig.5 Relation between the relative dynamic elastic modulus and the number of wet-dry cycles

不同水胶比的试件组的变化曲线规律大体相同,均呈不断下降趋势。水胶比为0.40的试件组在试验前期下降平缓,后期才下降迅速;而水胶比为0.45的试件组在整个过程均处于迅速下降状态,且先于水胶比为0.40的试件组到达相对动弹性模量60%阶段。在试验前期,矿物掺合料的掺入可以一定量地减缓水泥砂浆在硫酸盐干湿交替环境下的破坏速度,但是到了后期矿物掺合料的掺入非但不能改善水泥砂浆的抗侵蚀性能,有可能还会加剧其破坏程度。由图5观察得知:水胶比为0.40的试件组中,相同次数里,试验组C3,C2组的相对动弹性模量均

高于对照组 C01 的相对动弹性模量;在水胶比为 0.45 的试件组中,试验组均略低于对照组.水胶比较大的试件组中,掺入矿物掺合物没有改善水泥砂浆抗盐干湿循环能力,但是也没有明显降低其能力.水胶比较小的试件组中,有部分试验组表现出略优于对照组的水泥砂浆抗盐干湿循环能力,这与矿物掺合料掺入胶凝材料的复掺比例有关.水胶比 0.40 的试件组中,粉煤灰所占比例越大,其相对动弹性模量越高.这是由于硫酸钠是粉煤灰的活性激发剂,能促进生成水化产物填充内部孔隙^[15],而矿渣需要一定浓度的碱性环境才能更好地激发其活性^[16],待足够多的硫酸钠溶液渗透进入水泥砂浆内部,矿渣便不能完全发挥出其潜在胶凝性.水胶比 0.45 的试件组中,粉煤灰所占比例越高,其相对动弹性模量不一定越高.

综合各项指标分析可知,掺入粉煤灰与矿渣的比例在 1:1 与 3:1 之间的试件组的抵抗硫酸盐干湿性能较好.

2.3 冻融—硫酸盐干湿循环作用下水泥砂浆的力学特性

根据第一部分试验结果,选定水胶比为 0.40,粉煤灰与矿渣比例为 3:1 的配比进行进一步的复合试验.其中 CF0 为对照组,CF 为试验组.

对照组试件在全部过程中表现出良好的抗复合作用能力,表面脱落缓慢,外观变化很少,出现微裂缝的速度很慢,在第四、第五次大循环后,才出现相对明显的表层脱落.试验组在第二次大循环后开始表层脱落,脱落速度缓慢,到第五次大循环后脱落明显,棱角磨圆.两组的表观情况如图 6 所示.

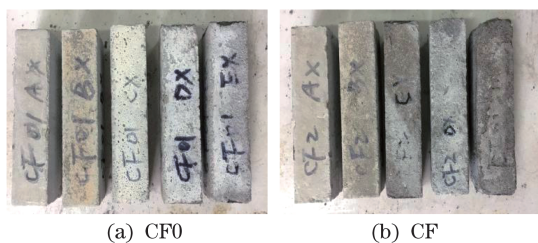


图 6 表观现象

Fig.6 Apparent phenomena

2.3.1 质量损失率

对每一次大循环后的试件进行质量测量,数据处理结果如图 7 所示.

根据图 7 中观察得知,对照组与试验组质量损失率变化趋势相似,曲线先下降再回升保持.前两次大循环过程中曲线下降的原因是水泥砂浆在冻融阶

段受影响明显,冻融过程中试件内部孔隙可冻水在循环作用下对试件造成一定损伤.随着循环次数增加,硫酸钠溶液进入水泥砂浆内部更多并发生物理结晶,且试验后期试验组中掺入的矿物掺合物的二次水化生成的水化产物填充水泥砂浆内部孔隙,所以质量曲线出现回升.掺入矿物掺合料后的水泥砂浆与对照组的质量损失率相差明显,可以考虑作为减少水泥用量的方案.

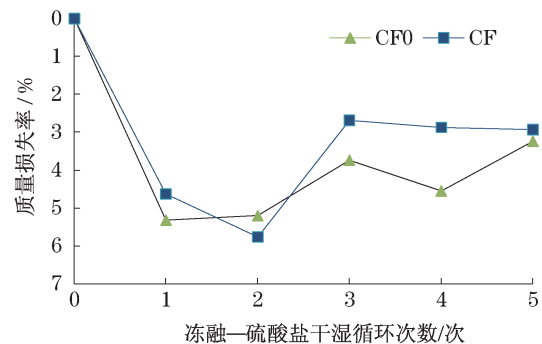


图 7 质量损失率与冻融—干湿循环次数的关系

Fig.7 Relation between the mass loss rate and the number of freezing-thawing and wet-dry cycles

2.3.2 纵向相对动弹性模量

对每一次大循环后的试块进行相对动弹性模量测量,数据处理结果如图 8 所示.

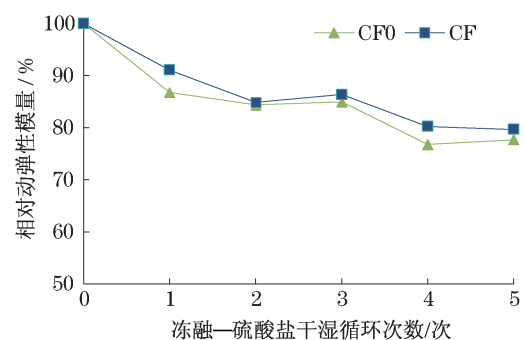


图 8 相对动弹性模量与冻融—干湿循环次数的关系

Fig.8 Relation between the relative dynamic elastic modulus and the number of freezing-thawing and wet-dry cycles

两组的相对动弹性模量变化趋势都是缓慢下降,相对动弹性模量的变化趋势与质量损失率反映出的变化趋势相同,试验组抵抗复合作用的能力没有明显低于对照组,矿物掺合料的一定比例取代水泥制作水泥砂浆得到一个较好的效果.在冻融—硫酸盐干湿循环过程中,试块先受到冻融破坏,渗透性下降,在硫酸盐干湿循环过程中促使硫酸根离子进入试块内部.再冻融过程时,硫酸钠的加入降低内部溶液冰点,提高水泥砂浆的抗冻性,硫酸钠结冰体与

冰相比受挤压时表现出一定的塑性,起到缓冲作用.冻融循环在复合作用中起主导作用,硫酸盐干湿循环过程促进了硫酸盐结晶,加快了硫酸盐和水化产物的反应,加快了物理和化学破坏^[16],但是干湿循环过程是个缓慢的过程,使得曲线变化比较平缓,没有出现突变的地方.

如图9所示,两组分别为水胶比0.40,对照组和粉煤灰与矿渣比值3:1的试验组;曲线分别为50次冻融循环、50次硫酸盐干湿循环和5次冻融—硫酸盐干湿循环中相对动弹性模量的对比.可以看出,在复合作用下相对动弹性模量是比较稳定的.在复合作用中试件受到的破坏应该是相对比较严重的,但却表现出比较稳定的曲线变化.原因为:a.复合作用的循环轮流过程中,水泥砂浆在一种作用情况下产生的损伤有可能在另一种作用情况下产生自愈合的现象,虽然最终会受到更严重的破坏,但是过程中会有相对缓和的阶段;b.矿物掺合料的掺入在复合作用环境下充分发生二次水化,使得水泥砂浆密实度提高,一定程度地提高了抵抗能力.

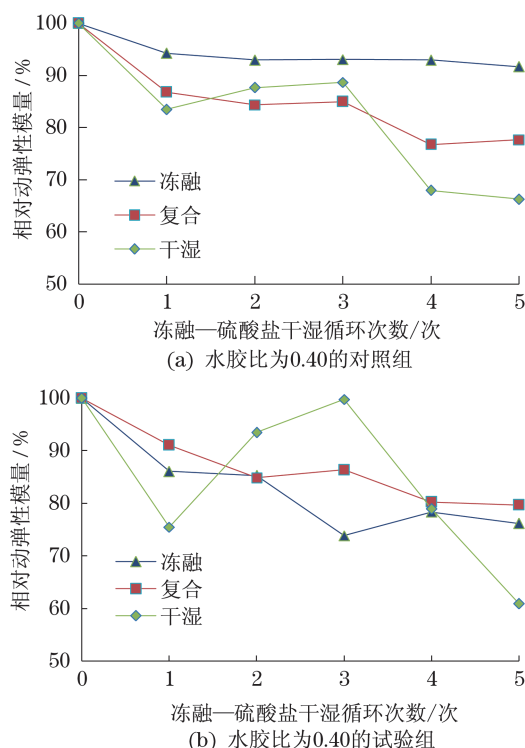


图9 3种不同试验方案相对动弹性模量对比

Fig.9 Comparison of the relative dynamic elastic moduli by three different test schemes

2.3.3 抗压强度损失率

对每一次大循环后的试件进行抗压强度测量,数据处理结果如图10所示.

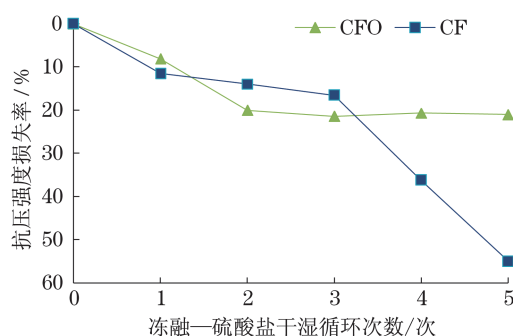


图10 抗压强度损失率与冻融—干湿循环次数的关系

Fig.10 Relation between the compressive strength loss rate and the number of freezing-thawing and wet-dry cycles

从图10可以看出,在前3次大循环中,两组的抗压强度损失率变化规律基本一致,3次大循环之后,试验组的抗压强度损失率突增,几乎呈直线下降,而对照组的抗压强度损失率保持稳定.整个过程中,试验组在前期变化较为平稳,后期急剧下降,而对照组全程变化波动不大,后期表现比前期平稳,后期对照组表现出良好的抵抗复合环境影响的能力.试验组在前期的复合作用下粉煤灰与矿渣的作用得到较好的发挥,抵抗复合作用的能力稍有提高,但是随着冻融循环和硫酸盐干湿循环交替的次数的逐渐增加,矿物掺合料的掺入加剧了水泥砂浆力学性能的损伤.特别是在干湿循环环境中,矿物掺合料的火山灰效应受到影响,没有足够的水化产物填充于水泥砂浆内部逐渐增加的孔隙,降低了结构密实性.从而硫酸盐更易渗透扩散至水泥砂浆内部,加之部分水泥被取代所造成的强度损失,导致掺矿物掺合料混凝土性能的迅速劣化^[17].

3 结 论

a. 相对动弹性模量指标比质量损失率更能反映水泥砂浆的受损程度.

b. 冻融循环或抗硫酸盐干湿循环中,水胶比较小的试块有良好的抵抗能力,水胶比愈大时,试件受到外界因素影响的程度愈明显.

c. 掺入粉煤灰与矿渣的比例会影响水泥砂浆的抵抗能力.在水胶比较小时,粉煤灰与矿渣的比值范围在1:1与3:1之间,可以一定程度改善水泥砂浆性能.在冻融—硫酸盐干湿循环复合作用下,水胶比为0.40,粉煤灰与矿渣比例为3:1的试件组表现出良好的性能.

d. 复合作用中,两种作用对水泥砂浆起到的破坏或自愈合作用有待进一步研究.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 覃丽坤,宋宏伟. 混凝土冻融破坏机理及国内外研究现状[J]. 山西建筑, 2012,38(29):136-137.
- [3] 王海龙,董宜森,孙晓燕,等. 干湿交替环境下混凝土受硫酸盐侵蚀劣化机理[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012,46(7):1255-1261.
- [4] 刘道维,刘本义,李向东,等. 硫酸盐和干湿循环耦合作用下混凝土性能研究[J]. 水利水运工程学报, 2015(4):69-74.
- [5] 刘洪珠. 冻融及硫酸盐作用对水泥砂浆损伤影响研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2005.
- [6] KHANLARI G, ABDILOR Y. Influence of wet-dry, freeze-thaw, and heat-cool cycles on the physical and mechanical properties of upper red sandstones in central Iran[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015,74(4):1287-1300.
- [7] ÖZBEK A. Investigation of the effects of wetting-drying and freezing-thawing cycles on some physical and mechanical properties of selected ignimbrites[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014,73(2):595-609.
- [8] 杨帆. 粉煤灰基复合矿物掺合料在混凝土中的应用研究[D]. 厦门:厦门大学, 2013.
- [9] 郑蕾董. 复掺矿物掺合料混凝土性能及其抗压强度预测模型研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
- [10] 陈益民,贺行洋,李永鑫,等. 矿物掺合料研究进展及存在的问题[J]. 材料导报, 2006,20(8):28-31.
- [11] 缠宏宇. 粉煤灰及矿渣微粉混凝土性能试验研究[D]. 包头:内蒙古科技大学, 2014.
- [12] 王申进,刘加根,张守治. 工业废渣在复合水泥中的应用研究[J]. 混凝土, 2011(9):62-63,67.
- [13] 陶岚,邵继新,侯文虎. “双掺”磨细矿渣粉和粉煤灰对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2009(3):10-13.
- [14] 杨钱荣,张树青,杨全兵. 掺钢渣-矿渣-粉煤灰复合微粉混凝土性能研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2009(4):3-6.
- [15] 包文忠,殷会玲,罗忠涛,等. 早期受冻环境下含粉煤灰水泥砂浆力学性能及作用机理研究[J]. 混凝土, 2016(2):117-120.
- [16] 刘仍光,阎培渝. 水泥-矿渣复合胶凝材料中矿渣的水化特性[J]. 硅酸盐学报, 2012,40(8):1112-1118.
- [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.

(编辑:董 伟)