

文章编号:1007-9629(2023)03-0310-07

ASR 抑制下高性能混凝土的长期抗卤水腐蚀性

程明¹, 余红发^{1,2,*}, 张丽芳¹, 刘连新², 刘成奎³

(1. 南京航空航天大学民航学院, 江苏南京 211106; 2. 青海大学土木工程学院, 青海西宁 810016;
3. 青海省建筑建材科学研究院有限责任公司, 青海西宁 810008)

摘要:以中国西北地区高浓度盐碱环境为背景,研究了含潜在碱活性细骨料的大掺量矿物掺合料高性能混凝土(HPC)在 $\text{Na}^+\text{-Cl}^-\text{SO}_4^{2-}$ 型卤水中的力学性能和损伤演变。结果表明:在卤水浸泡3650d时,HPC的相对动弹性模量大于90%,抗腐蚀系数大于1,线性膨胀率小于0.12%;较高的当量碱含量在一定程度上加剧HPC的碱硅酸反应(ASR);引气能够提高HPC的抗卤水腐蚀能力,降低ASR引起的膨胀;采用大掺量矿物掺合料和潜在碱活性细骨料制备的强度等级为C50的HPC,在 $\text{Na}^+\text{-Cl}^-\text{SO}_4^{2-}$ 型卤水中具有优良的长期耐久性。

关键词:高性能混凝土;卤水腐蚀;碱-硅酸反应;相对动弹性模量;强度;膨胀率

中图分类号:TU528

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.03.012

Long-Term Bittern Attack Resistance of High Performance Concrete under ASR Inhibition

CHENG Ming¹, YU Hongfa^{1,2,*}, ZHANG Lifang¹, LIU Lianxin², LIU Chengkui³

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. School of Civil Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China;
3. Qinghai Building Materials Research Institute Co., Ltd., Xining 810008, China)

Abstract: Based on the high concentration saline-alkali environment in northwest China, the mechanical properties and damage evolution of high performance concrete (HPC) with large amount of mineral admixtures and fine aggregate with potential alkali activity exposed in $\text{Na}^+\text{-Cl}^-\text{SO}_4^{2-}$ brine were studied. The results show that the relative dynamic elastic modulus and the corrosion resistance coefficient of HPC are greater than 90% and 1, respectively, and the linear expansion ratio of HPC is less than 0.12%. The high equivalent alkali content aggravates the alkali-silica reaction (ASR) in HPC to some extent. Air entraining can improve the brine attack resistance of HPC and reduce the expansion by ASR. HPC of C50 prepared by large amount of mineral admixtures and fine aggregate with potential alkali activity has excellent long-term durability in $\text{Na}^+\text{-Cl}^-\text{SO}_4^{2-}$ brine.

Key words: high performance concrete (HPC); brine attack; alkali-silica reaction (ASR); relative dynamic elastic modulus; strength; expansion ratio

中国西北地区的盐湖以及盐渍土环境是含高浓度盐碱的腐蚀性环境,应用于该环境下的混凝土常见的耐久性问题包括卤水腐蚀,氯离子侵蚀导致的钢筋锈蚀,以及当地广泛分布的碱活性骨料极可能

会引发的碱硅酸反应(ASR)^[1]。含碱活性骨料的混凝土在卤水环境中遭受复合离子腐蚀^[2]和ASR^[3-4]双重因素的耐久性破坏,其使用寿命将被极大地缩短。目前国内外学者在混凝土卤水腐蚀或ASR单因素条件

收稿日期:2022-01-12; 修订日期:2022-03-15

基金项目:国家973计划课题(2015CB655102);青海省科技支撑计划(2013-G-Q006A)

第一作者:程明(1997—),男,安徽六安人,南京航空航天大学硕士生。E-mail:ming2589432486@163.com

通讯作者:余红发(1964—),男,湖北武穴人,南京航空航天大学教授,博士生导师,博士。E-mail:yuhongfa@nuaa.edu.cn

下的损伤及抑制措施方面已开展了大量研究.余红发^[5]发现高强非引气的高性能混凝土(HPC)具有优异的抗卤水腐蚀性,并分析了HPC的抗腐蚀优化机理.王复生等^[6]发现在盐湖卤水中浸泡3 a后,低水胶比、掺硅灰的高密实混凝土的抗压强度仍有增长.金祖权^[7]发现HPC在青海湖卤水($Mg^{+}-Cl^{-}-SO_4^{2-}$ 复合溶液)中浸泡450 d后仍能保持体积稳定性和力学稳定性.左晓宝等^[8]发现粉煤灰能提高钢筋混凝土的抗氯盐侵蚀性能.高鹏等^[9]发现在高盐碱环境下使用的引气HPC强度并未降低,引气和大掺量矿物掺合料的联合作用能有效减缓HPC的ASR膨胀发展.

本文研究含有不同当量碱含量¹⁾(Na_2O_{eq})、引气剂、阻锈剂和潜在碱活性骨料的HPC在卤水腐蚀和

ASR耦合作用下的损伤演化,测定其3 650 d腐蚀龄期内的相对动弹性模量(E_{rd})、强度、线性膨胀率和微观结构演变,旨在为高海拔地区、高浓度盐碱环境下的工程应用混凝土提供参考.

1 试验

1.1 原材料

水泥采用甘肃祁连山水泥集团股份有限公司生产的P·II 52.5硅酸盐水泥,其物理力学性能见表1.矿物掺合料采用甘肃永登连电粉煤灰有限责任公司提供的I级粉煤灰(FA)、甘肃翔阳商贸有限公司提供的S95级磨细矿渣(SG)和青海蓝天环保科技有限公司提供的硅灰(SF).原材料的化学组成见表2.

表1 硅酸盐水泥的物理力学性能
Table 1 Physical and mechanical properties of Portland cement

Fineness/%	Specific surface area/($m^2 \cdot kg^{-1}$)	Water consumption for standard consistency/%	Setting time/s		Flexural strength/MPa		Compressive strength/MPa	
			Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
0.8	412	25	95	146	5.6	9.3	26.8	57.2

表2 原材料的化学组成
Table 2 Chemical compositions of raw materials

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	IL
Cement	19.56	3.78	65.88	2.42	2.41	3.69	0.50	0.82	0.94
FA	52.68	32.42	2.94	1.21	0.74	7.47	0.74	1.46	0.34
SG	26.09	26.88	37.38	5.60	1.75	0.67	0.49	0.83	0.31
SF	90.51	0.96	0.50	2.10		0.64	1.03	2.00	2.26

细骨料采用青海大通宝库产河砂,细度模数为2.87,颗粒级配区为II区;粗骨料采用西宁小峡产花岗岩碎石,5~20 mm连续级配;快速砂浆棒法测得细骨料和粗骨料14 d的膨胀率分别为0.123%和0.007%;岩相鉴定法测得细骨料的主要成分为石英砂岩、少量灰岩和杂砂岩,其碱活性主要来源于杂砂岩中的微晶质石英、隐晶质石英和应变石英.

外加剂均为液体,由西宁杨建防水外加剂有限公司生产;引气剂的主要成分为松香热聚物;钢筋阻锈剂的主要成分为 $Ca(NO_2)_2$,其含固量为30%;聚羧酸高效减水剂的减水率为25%.

拌和水为自来水.

按照西宁火车站地下卤水的最高浓度配制腐蚀介质,卤水的化学组成见表3.

1.2 配合比

设计强度等级为C50的9种配合比的HPC.首先

表3 卤水的化学组成
Table 3 Chemical composition of brine

NaCl	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	CaSO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	K ₂ SO ₄
208.98	43.10	5.48	1.21	0.25	0.09

按照单掺引气剂、单掺阻锈剂及双掺引气剂和阻锈剂设计对照组HPC的配合比,如表4所示;编号Ca50、C50Z和Ca50Z中的C代表HPC,a代表掺加引气剂,数字代表HPC的抗压强度标准值,Z代表掺加阻锈剂;对照组HPC的 Na_2O_{eq} 均为0.8%,含气量(体积分)分别为5.1%、1.9%和4.0%.在3种对照组HPC配合比的基础上,再通过外加NaOH设计 Na_2O_{eq} 分别为1.2%和1.6%的HPC配合比,未加NaOH的对照组试件在编号后标记-0(如Ca50-0),外加NaOH后 Na_2O_{eq} 分别为1.2%和1.6%的试件在编号后分别标记-1和-2(如Ca50-1和Ca50-2).

1) 文中涉及的含量、组成、含固量、减水率等除特别说明外均为质量分数.

表4 对照组HPC的配合比
Table 4 Mix proportions of control HPC

Sample	Cement	FA	SG	SF	Sand	Gravel	Water reducer	Air entraining agent	Rust inhibitor	Water
Ca50	325.00	60.00	100.00	15.00	741.00	1 159.00	10.00	0.25	0	150.00
C50Z	325.00	60.00	100.00	15.00	741.00	1 159.00	10.00	0	33.00	127.00
Ca50Z	325.00	60.00	100.00	15.00	741.00	1 159.00	10.00	0.25	33.00	127.00

1.3 试验方法

通过测定HPC试件的 E_{rd} 、强度、线性膨胀率和微观结构演变,评估卤水腐蚀和ASR作用导致的混凝土劣化. 150 mm×150 mm×150 mm的立方体试件用于测定抗压强度;两端埋置铜测头的100 mm×100 mm×515 mm的棱柱体试件用于测定抗折强度、超声波声速和长度. 以试件标准养护28 d时的强度和超声波声速为初始值,然后将其浸泡于卤水中定期进行检测,检测时的腐蚀龄期为30、180、365、3 650 d;以棱柱体试件标准养护24 h时的长度为基准长度,然后将其浸泡于卤水中定期进行检测,检测时的腐蚀龄期为3、7、14、28、60、90、180、360、720、3 650 d.

采用NM-4B型非金属超声检测分析仪和混凝土收缩膨胀仪分别测定HPC试件的超声波声速和长度,计算其 E_{rd} 和线性膨胀率;参照GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》,采用YAW4306型微机控制电液伺服试验机测定HPC试件的抗压强度和抗折强度,由HPC在卤水中腐蚀3 650 d时的强度和浸泡前标准养护28 d时的强度的比值,可计算其抗腐蚀系数(K),其中由抗压强度计算得到的为抗压腐蚀系数(K_c),由抗折强度计算得到的为抗折腐蚀系数(K_f);采用EM-30 PLUS型台式扫描电镜(SEM)和牛津X-ACT型X射线能谱仪(EDS)对在卤水中浸泡3 650 d时的HPC试件进行微观结构和微区成分分析,测试前对混凝土样品的断面表面进行真空镀金,测试时的加速电压为15 kV,EDS采样时间为5 min.

2 结果与讨论

2.1 相对动弹性模量

图1为HPC的 E_{rd} 随在卤水中浸泡时间的变化. 由图1可见:随浸泡时间延长, E_{rd} 基本先增加后降低;浸泡早期,HPC致密的结构能够大大降低腐蚀离子的侵入概率,浸泡过程中HPC不断吸水还可以促进水泥的水化,腐蚀离子侵入混凝土后生成的少量钙矾石(AFt)和石膏等产物^[10]填充在孔隙中,进一步密实混凝土结构,因此 E_{rd} 随浸泡时间延长而增加;浸泡后期,不断生成的腐蚀产物和ASR凝胶产生的膨胀应力使

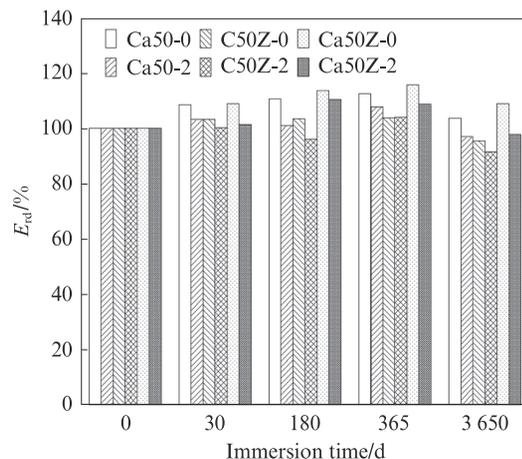


图1 HPC的 E_{rd} 随在卤水中浸泡时间的变化

Fig. 1 Variation of E_{rd} of HPC with immersion time in brine

得 E_{rd} 降低. 由图1还可见:3 650 d时,HPC的 E_{rd} 均大于90%,表明各试件均未发生严重的腐蚀破坏;在使用相同外加剂的情况下,在卤水中浸泡3 650 d时,较高 Na_2O_{eq} HPC的 E_{rd} 降低幅度相对较大,表明较高 Na_2O_{eq} 促使ASR产生更多的膨胀裂缝,增大了腐蚀离子侵入的概率,导致腐蚀损伤劣化加快;在卤水中浸泡3 650 d时,相同 Na_2O_{eq} Ca50Z的 E_{rd} 大于C50Z的 E_{rd} ,这是由于HPC容纳腐蚀产物的孔隙空间有限^[11],适量引气剂引入的均匀微小气孔可以作为腐蚀产物的储仓,缓解混凝土受到的膨胀性损伤;在卤水中浸泡超过180 d后,相同 Na_2O_{eq} Ca50Z的 E_{rd} 均大于Ca50的 E_{rd} ,表明加入阻锈剂有利于缓解HPC E_{rd} 的降低.

2.2 强度

图2为在卤水中浸泡3 650 d时HPC的 K_c 和 K_f 之间的关系,其中Ca50-0、Ca50-2、C50Z-0、C50Z-2、Ca50Z-0和Ca50Z-2的 K_c 分别为1.25、1.08、1.11、1.03、1.22和1.09,其 K_f 分别为1.65、1.53、1.50、1.32、1.58和1.55.由图2可见: K_c 和 K_f 之间具有明显的线性相关性,相关系数 $R=0.9950$,样本容量 $n=6$,取显著性水平 $\alpha=0.01$ 时的临界相关系数 $R_{0.01}=0.9172$,表明两者之间相关性显著; K_c 和 K_f 均大于1,且相同试件的 K_c 小于 K_f ,表明卤水腐蚀和ASR耦合作用下,HPC的抗压强度更容易劣化,因此本文选择 K_c 作为评价HPC抗卤水腐蚀性能的指标.

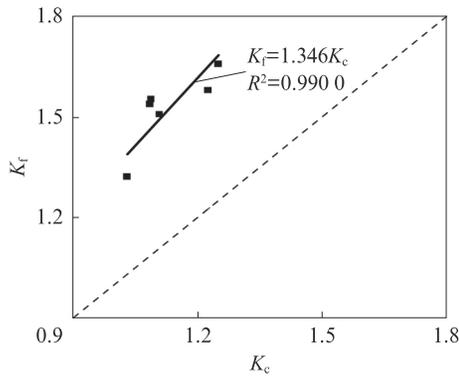


图2 在卤水中浸泡3650 d时HPC的 K_c 和 K_f 之间的关系
Fig. 2 Relationship between K_c and K_f of HPC immersed in brine for 3650 d

图3为在卤水中浸泡不同时间时HPC的抗压强

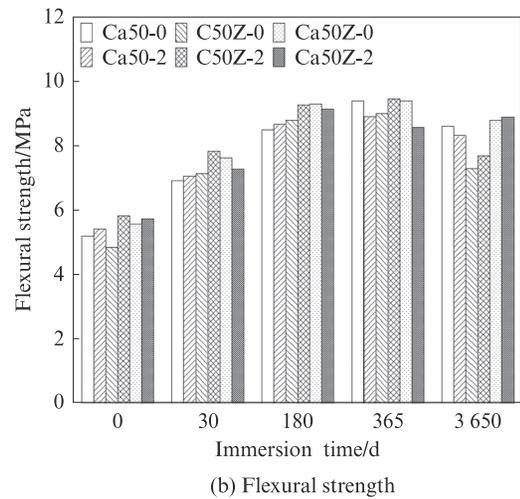
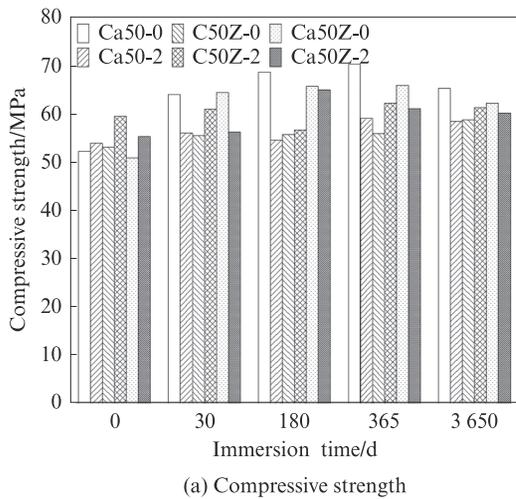


图3 在卤水中浸泡不同时间时HPC的抗压强度和抗折强度
Fig. 3 Compressive strength and flexural strength of HPC at different immersion time in brine

2.3 线性膨胀率

2.3.1 线性膨胀率的发展规律

图4为在卤水中浸泡不同时间时HPC的线性膨胀率.由图4可见:HPC的线性膨胀率变化包括迅速上升和缓慢上升2个阶段;在迅速上升阶段,HPC的线性膨胀率增长速率随 Na_2O_{eq} 增大而增加;在缓慢上升阶段,不同 Na_2O_{eq} HPC的线性膨胀率增长速率几乎相同,这是因为此时混凝土内、外液相已完成交换,膨胀主要受浸泡溶液的浓度控制,与HPC的 Na_2O_{eq} 关系不大.由图4还可见:相同 Na_2O_{eq} Ca50Z的前期线性膨胀率增长速率比C50Z快,但在7~14 d期间增长速率开始减缓;C50Z的线性膨胀率在0~180 d期间迅速上升,缓慢上升阶段持续时间更短,因此最终的线性膨胀率更高;在卤水中浸泡3650 d时,HPC的线性膨胀率均小于0.12%,其中Ca50Z-0的线性膨胀率比C50Z-0降低约25%,Ca50Z-1和Ca50Z-2的线性膨胀率分别比C50Z-0降低约13%和15%.

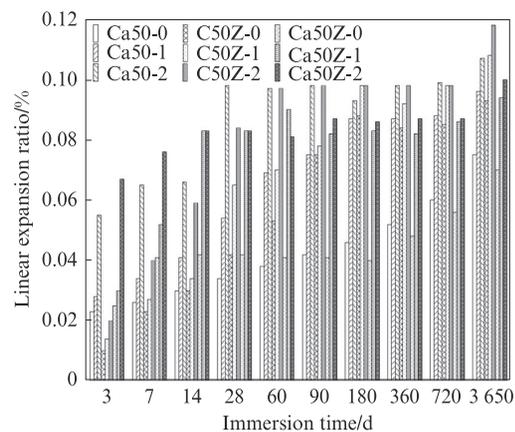


图4 在卤水中浸泡不同时间时HPC的线性膨胀率
Fig. 4 Linear expansion ratios of HPC at different immersion time in brine

度和抗折强度.由图3可见:随在卤水中浸泡时间延长,HPC的抗压强度和抗折强度均先增加后降低,这与 E_{cl} 的变化规律及其影响机理相似;标准养护28 d时, Na_2O_{eq} 为1.6%的HPC的抗压强度和抗折强度比 Na_2O_{eq} 为0.8%的HPC略高,在卤水中浸泡3650 d时,其 K_c 和 K_f 更低,表明较高 Na_2O_{eq} 加剧ASR,降低HPC的抗卤水腐蚀能力;对比相同 Na_2O_{eq} 的Ca50Z和C50Z,引气HPC的28 d抗压强度和抗折强度与未引气HPC相近,浸泡3650 d时引气HPC的 K_c 更高,表明含气量为4.0%时能提高HPC的抗卤水腐蚀能力;标准养护28 d时,相同 Na_2O_{eq} Ca50Z的抗压强度和抗折强度均略高于Ca50,在卤水中浸泡3650 d时其 K_c 和 K_f 相近,表明阻锈剂对HPC的强度发展基本没有影响.

图5为在卤水中浸泡3650 d时不同 Na_2O_{eq} HPC的线性膨胀率之间的关系.由图5可见,数据点均位于45°斜线上方,且 Na_2O_{eq} 越高,数据偏离45°斜线的程度越大,表明 Na_2O_{eq} 越高,含潜在碱活性骨料的

HPC的线性膨胀率越大。

图6为在卤水中浸泡90~3 650 d时HPC线性膨胀率之间的关系。由图6可见,数据点均位于45°斜线上方,表明阻锈剂只能略微降低HPC 90~3 650 d的

线性膨胀率,但是引气剂能够显著降低HPC 90~3 650 d的线性膨胀率。因此引气可以有效降低卤水环境下含潜在碱活性骨料HPC的线性膨胀率,并且对于较低 Na_2O_{eq} 的HPC作用更为显著(见图5)。

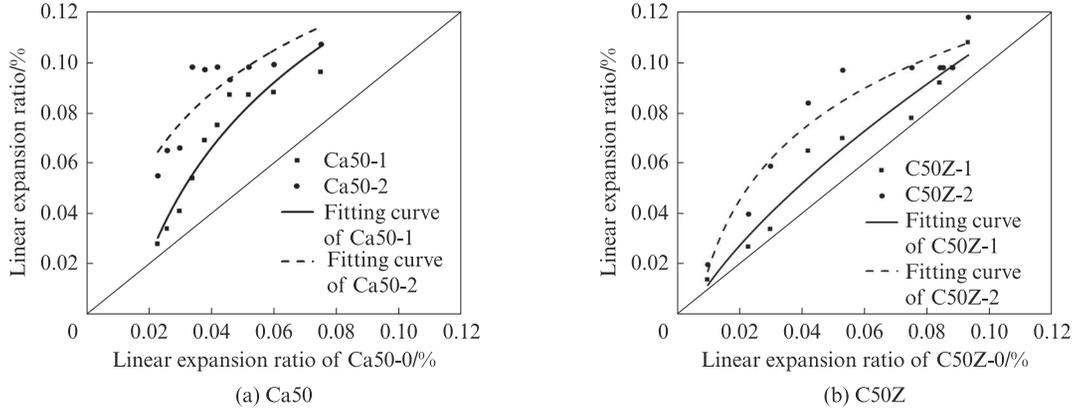


图5 在卤水中浸泡3 650 d时不同 Na_2O_{eq} HPC的线性膨胀率之间的关系

Fig. 5 Relationships between linear expansion ratios of HPC specimens with different Na_2O_{eq} immersed in brine for 3 650 d

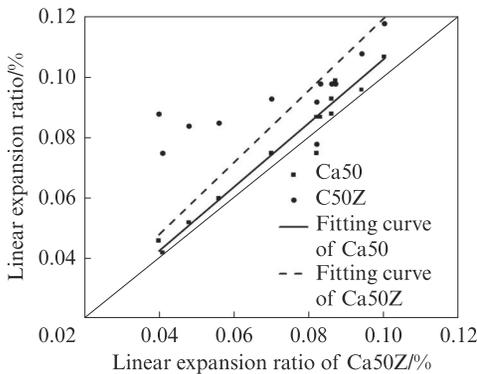


图6 在卤水中浸泡90~3 650 d时HPC线性膨胀率之间的关系

Fig. 6 Relationships between linear expansion ratios of HPC specimens immersed in brine for 90-3 650 d

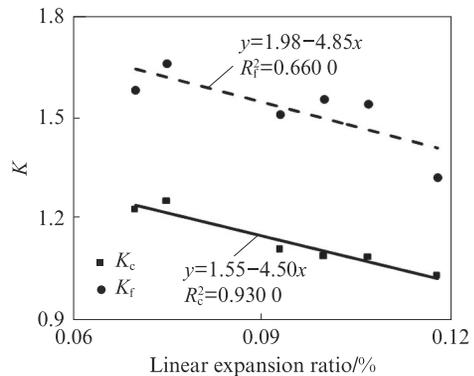


图7 在卤水中浸泡3 650 d时HPC线性膨胀率和K之间的关系

Fig. 7 Relationships between linear expansion ratios and K of HPC specimens immersed in brine for 3 650 d

2.3.2 线性膨胀率和抗腐蚀系数的关系

图7为在卤水中浸泡3 650 d时HPC线性膨胀率和抗腐蚀系数之间的关系。由图7可见:HPC的线性膨胀率与抗腐蚀系数之间具有显著的线性相关关系;样本容量 $n=6$ 时, $R_c=0.9644, R_r=0.8120$,抗压强度和抗折强度分别取显著性水平 $\alpha=0.01$ 和 $\alpha=0.05$ 时,相应的临界相关系数为 $R_{c,0.01}=0.9172, R_{r,0.05}=0.8114$,表明线性膨胀率和 K_c 的线性关系比和 K_r 的线性关系更为显著。

2.4 微观结构及机理分析

长期物理力学性能和长期线性膨胀率试验数据表明,在卤水中浸泡3 650 d时,含碱活性骨料的HPC仅发生轻微的耐久性损伤,对其进行微观结构分析有助于理解其优异耐久性的形成机理。

图8为在卤水中浸泡3 650 d时Ca50-0的SEM

图片。由图8(a)可见,粉煤灰颗粒表面堆积着非常致密的、由掺合料的火山灰反应生成的低钙硅比水化硅酸钙凝胶(C-S-H),这种凝胶具有强结合碱金属离子的能力,可以降低孔溶液中碱金属氢氧化物的浓度^[12],并且能够促进孔结构的细化,增加对有害物质(氯化物和硫酸盐)渗透的物理抵抗力^[13]。由图8(b)可见,骨料周围未发生ASR典型膨胀环特征。因此,HPC致密的结构和大掺量的矿物掺合料能够很好地缓解复合离子腐蚀和ASR膨胀破坏。由图8(c)可见,引气剂引入的气孔中充斥着卤水腐蚀产物AFt,表明这些气孔可以作为膨胀产物的储仓。此外,由引气剂引入的、封闭且互不连通的气孔能够有效地隔断硬化浆体中的毛细孔通道,从而降低毛细孔吸水率^[14],均匀、微小和稳定的气孔还可以消散裂缝开裂时释放的能量,从而阻止裂缝的进一步发展^[15]。因此,加入

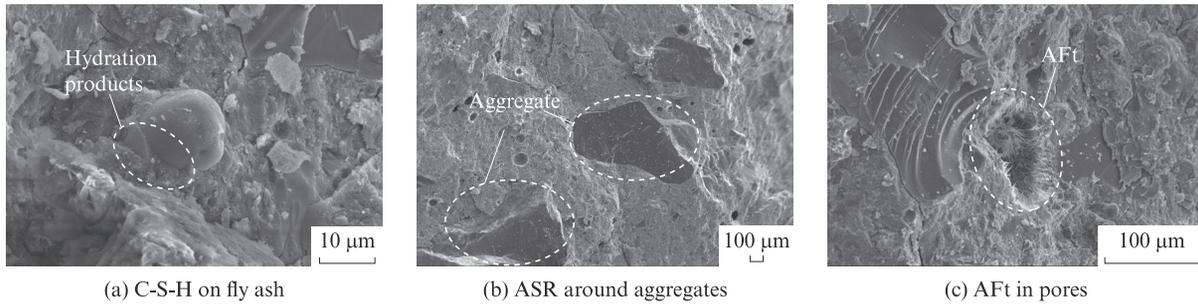


图8 在卤水中浸泡3 650 d时Ca50-0的SEM图片

Fig. 8 SEM images of Ca50-0 immersed in brine for 3 650 d

引气剂的HPC具有更高的耐久性.

图9为在卤水中浸泡3 650 d时C50Z-2的SEM图片和EDS分析.由图9(a)可见,未引气的C50Z-2中的AFt等腐蚀产物直接形成于毛细孔内,使得混凝土的局部膨胀应力不断增大,促使微裂纹的产生.由图9(b)可见,ASR凝胶覆盖在部分碱活性骨料砂

粒的表面,表明HPC的损伤是由卤水腐蚀和ASR膨胀破坏双重因素导致的结果.图9(c)为图9(b)中骨料表面覆盖的凝胶产物的EDS分析,其为含有Na和Si的ASR凝胶,表明ASR凝胶的产生使得较高 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$.未引气的HPC在卤水中浸泡3 650 d后,各方面损伤相对较为严重.

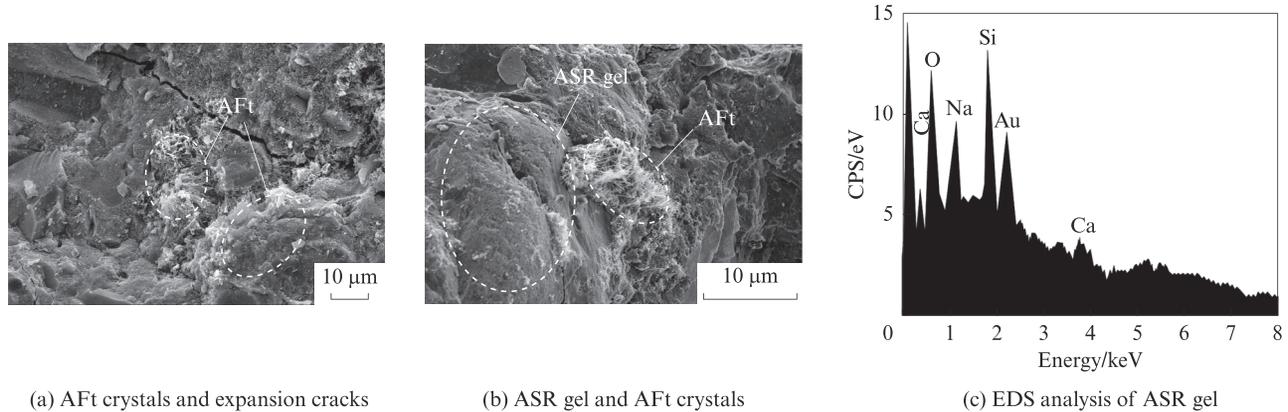


图9 在卤水中浸泡3 650 d时C50Z-2的SEM图片和EDS分析

Fig. 9 SEM images and EDS analysis of C50Z-2 immersed in brine for 3 650 d

综上所述,在长期卤水腐蚀和ASR双重作用下,含有碱活性骨料的大掺量矿物掺合料HPC具有高耐久性;较高 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ 会导致HPC性能降低;适当引气可以缓解HPC的损伤;阻锈剂不会对HPC性能产生不利影响,并且还可以有效阻止钢筋锈蚀;Ca50Z-0具有最强的抗卤水腐蚀能力和最轻微的ASR特征.

ASTM C1293-08b《Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction》中判断掺合料对ASR的抑制效果时,认为2 a龄期的混凝土棱柱体试件的线性膨胀率小于0.04%是可以接受的.由图8和图9可见,在卤水中浸泡3 650 d时,Ca50-0未发生ASR,C50Z-2仅局部区域发生ASR,其在720 d时的ASR程度则更轻微.由图4可见,HPC在卤水中浸泡720 d时的线性膨胀率远大于0.04%.据此可以推测,HPC的

膨胀主要是由卤水腐蚀所导致.因此,对卤水环境下含有潜在碱活性骨料的HPC,应适当提高掺合料抑制ASR效果的判定限值,2 a龄期的混凝土棱柱体试件膨胀率低于0.10%时,可认为掺合料对ASR有很好的抑制效果.

3 结论

(1)在 $\text{Na}^+\text{-Cl}^-\text{-SO}_4^{2-}$ 型卤水环境下,含潜在碱活性细骨料的大掺量矿物掺合料HPC的相对动弹性模量、抗压强度和抗折强度均随浸泡时间延长先增加后降低;3 650 d时,相对动弹性模量 $>90\%$,抗腐蚀系数 >1 ;抗折腐蚀系数 $>$ 抗压腐蚀系数,且两者之间具有显著的线性相关性.

(2)在 $\text{Na}^+\text{-Cl}^-\text{-SO}_4^{2-}$ 型卤水环境下,含潜在碱活性细骨料的大掺量矿物掺合料HPC的线性膨胀率随浸泡时间延长迅速增加,随后增加速率趋缓;浸

泡3 650 d时,HPC的线性膨胀率小于0.12%;线性膨胀率和抗腐蚀系数之间有显著的线性相关性;在卤水环境下,HPC的膨胀是由卤水腐蚀和ASR的耦合作用引起的,2 a龄期的混凝土棱柱体试件膨胀率低于0.10%时,可认为掺合料对ASR有很好的抑制效果。

(3)在卤水腐蚀和ASR的耦合作用下,大掺量矿物掺合料能够很好地缓解混凝土的长期耐久性损伤,使得HPC能够适应高浓度的盐碱环境;降低当量碱含量、适量掺入引气剂和阻锈剂对提高HPC的耐久性有利,使得Ca50Z-0具有最佳的长期耐久性。

参考文献:

- [1] 谢永江, 贾耀东, 张勇, 等. 青藏铁路建设中混凝土的碱-骨料反应问题[J]. 铁道科学与工程学报, 2004(2):6-13.
XIE Yongjiang, JIA Yaodong, ZHANG Yong, et al. Alkali-aggregate reaction in concrete for construction of Qinghai-Tibet railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2004(2):6-13. (in Chinese)
- [2] 余红发, 孙伟, 王甲春, 等. 盐湖地区混凝土的长期腐蚀产物与腐蚀机理[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(5):434-440.
YU Hongfa, SUN Wei, WANG Jiachun, et al. On attack product and corrosion mechanism of ordinary concrete after long-term exposure to salt lakes [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2003, 31(5):434-440. (in Chinese)
- [3] STANTON T E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate[J]. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1940, 66(10):1781-1811.
- [4] KANDASAMY S, SHEHATA M H. The capacity of ternary blends containing slag and high-calcium fly ash to mitigate alkali silica reaction[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 49: 92-99.
- [5] 余红发. 盐湖地区高性能混凝土的耐久性、机理与使用寿命预测方法[D]. 南京:东南大学, 2004.
YU Hongfa. Study on high performance concrete in salt lake: Durability, mechanism and service life prediction[D]. Nanjing: Southeast University, 2004. (in Chinese)
- [6] 王复生, 秦晓娟, 孙瑞莲. 青海察尔汗盐湖条件下水泥混凝土侵蚀的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2003(4):25-28.
WANG Fusheng, QIN Xiaojuan, SUN Ruilian. Study on corrosion and destruction of concrete under natural conditions of Caerhan salt lake[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2003(4):25-28. (in Chinese)
- [7] 金祖权. 西部地区严酷环境下混凝土的耐久性与寿命预测[D]. 南京:东南大学, 2006.
JIN Zuquan. Durability and service life prediction of concrete exposed to harsh environment in West of China[D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese)
- [8] 左晓宝, 邹帅, 李向南, 等. 氯盐环境下粉煤灰-混凝土中钢筋的锈蚀过程[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4):875-881.
ZUO Xiaobao, ZOU Shuai, LI Xiangnan, et al. Corrosion process of steel bar in fly ash-concrete under chloride environment[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4):875-881. (in Chinese)
- [9] 高鹏, 余红发, 文静, 等. 引气剂对延缓高海拔强碱环境下碱-硅酸反应的影响[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(5):625-631.
GAO Peng, YU Hongfa, WEN Jing, et al. Effect of air-entraining agent on mitigating alkali-silica reactions under high-altitude alkaline environment [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(5):625-631. (in Chinese)
- [10] 刘赞群, 裴敏, 张丰燕, 等. 半浸泡在Na₂SO₄溶液中水泥净浆不同部位化学侵蚀产物对比[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3): 485-492.
LIU Zanqun, PEI Min, ZHANG Fengyan, et al. Comparison of chemical attack products in different zones of cement paste partially immersed in Na₂SO₄ solution [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3):485-492. (in Chinese)
- [11] NEVILLE A. The confused world of sulfate attack on concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(8):1275-1296.
- [12] HONG S Y, GLASSER F P. Alkali sorption by C-S-H and C-A-S-H gels Part II. Role of alumina[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(7):1101-1111.
- [13] TAPAS M J, SOFIA L, VESSALAS K, et al. Efficacy of SCMs to mitigate ASR in systems with higher alkali contents assessed by pore solution method [J]. Cement and Concrete Research, 2021, 142:106353.
- [14] ZHANG P, WITTMANN F H, VOGEL M, et al. Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 100: 60-67.
- [15] AITCIN P C. Entrained air in concrete: Rheology and freezing resistance[J]. Science and Technology of Concrete Admixtures, 2016, 59:87-95.