

浸烘与加载耦合作用下混凝土的损伤失效研究^{*}

张立明^{1,2}, 余红发¹, 宁作君³

(1. 南京航空航天大学土木工程系, 江苏 南京 210016;

2. 吉林交通职业技术学院, 吉林 长春 130012;

3. 甘肃土木工程研究院, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 研究了水灰比分别为 0.53、0.35 和 0.27 的普通混凝土 (OPC)、高性能混凝土 (HPC) 和高强混凝土 (HSC) 在盐湖卤水浸烘、浸烘 + 30% 荷载和盐湖现场暴露环境下盐应力腐蚀行为。试验结果表明: 在不同环境作用下, 混凝土在应力腐蚀作用下的相对动弹性模量要经历强化和劣化 2 个发展阶段, 强化和劣化阶段的时间与试验环境和混凝土类型密切相关。水灰比越大, 劣化速率越大强化时间越短。浸烘循环 + 30% 荷载作用显著加速了混凝土应力腐蚀破坏进程。OPC 应力腐蚀的强化段在浸烘循环 + 30% 荷载时间与长度暴露环境条件的相应时间长度分别压缩了 67%。在浸烘 + 30% 荷载循环作用下, 在强化阶段 HSC 发生应力腐蚀的干湿循环次数分别比 OPC 和 HPC 延长了 1.8 倍, 因此, 在中国盐湖地区, HSC 表现出更强的抗应力腐蚀能力。

关键词: 浸烘循环; 应力腐蚀; 混凝土; 相对动弹性模量

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529 - 6579 (2013) 03 - 0040 - 05

Stress Corrosion of Concrete Exposed to Immersion-dry and Loading Conditions

ZHANG Liming^{1,2}, YU Hongfa¹, NING Zuojun³

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Jilin Communication Polytechnic, Changchun 130012, China;

3. Research Institute of Civil Engineering in Gansu, Lanzhou 730020, China)

Abstract: The considered concretes include ordinary portland cement (OPC)、High Strength Concrete (HSC) and High performance Concrete (HPC) with the water to binder 0.53、0.35 and 0.27 under three different conditions. This study revealed that the relative dynamic elastic modulus of concrete went through strengthen and deterioration stages subjected to stress corrosion under three conditions, the length of time of these stages are closely related with test environment and concrete type. With the increase of water to binder, the ratio of deterioration was increased, and the length of strength stages was decreased. Immersing-drying + 30% loading action significantly accelerated the process of stress corrosion damage. Under the action of Immersing-drying + 30% load, strengthen section of the length of OPC shorter 67%, compared with the length of time at exposure salt lake. The effect of immersing and drying, HSC Immersing-drying cycles when the stress strength occurred were longer 1.8 times than the OPC and HPC. HSC showed more resistance to stress corrosion in the salt lake regions of china.

Key words: immersing-drying cycle; stress corrosion; concrete; relative dynamic elastic modulus

* 收稿日期: 2012 - 09 - 19

基金项目: 国家“973”计划资助项目 (2009CB623203); 国家自然科学基金资助项目 (51178221)

作者简介: 张立明 (1978 年生), 男, 博士研究生; 通讯作者: 余红发; E-mail: yuhongfa@nuaa.edu.cn

在海洋、盐湖、盐渍土和高含量的腐蚀盐的地下水等环境下，硫酸盐腐蚀、干湿循环、氯离子锈蚀钢筋是引起混凝土耐久性不足的主要原因^[1-4]。Hekal等^[5-6]研究了混凝土10% MgSO₄溶液中在不同试验环境下（室温、60℃和60℃的浸烘循环下）的抗腐蚀损伤能力。结果表明只有在60℃的浸烘循环是一种加速混凝土腐蚀的一种方法。金祖权等^[7-9]关注了不同浓度硫酸盐、氯盐复合溶液，在浸烘循环下，普通混凝土的相对动弹模量规律，混凝土劣化速度与硫酸盐浓度成正相关，复合溶液中氯盐存在，延缓了混凝土损伤劣化速度。余红发等^[10-14]进行的调查研究表明，西部盐渍土地区的混凝土结构因受到外部荷载、干湿循环和化学腐蚀作用，服役3~5年就遭受严重破坏。混凝土在服役过程中还承受一定的荷载，许多研究者对混凝土施加弯曲荷载，然后浸泡到一定浓度的溶液中来研究荷载对混凝土性能劣化的影响。但对于混凝土在荷载+浸烘循环复合作用下，力学与环境因素复合对在混凝土应力腐蚀有待探讨。

为了研究这些地区的混凝土耐久性问题，选取青海盐湖卤水为腐蚀溶液，进行在现场暴露试验、和一个循环包括在盐湖卤水中浸泡2 d和60℃烘1 d的浸烘循环和浸烘循环+30%弯曲荷载。深入讨论不同环境下混凝土的腐蚀应力腐蚀规律。并采用现代测试技术分析不同腐蚀环境下的腐蚀产物和微结构损伤。

1 实验

1.1 原材料

湖北黄石水泥厂生产的华新牌P·I 52.5硅酸盐水泥。镇江谏壁电厂华源I级粉煤灰。江苏江南粉磨公司生产的S95级磨细矿渣，比表面积461 m²/kg。胶凝材料化学成分见表1。兰州产河砂，II区级配，中砂细度模数为2.5。甘肃省临洮河口产石灰岩碎石，5~20 mm连续级配，最大粒径20 mm。饮用水。江苏省苏博特PCA[®] (I) 聚羧酸类高性能减水剂，减水率达20%以上。

表1 胶凝材料的化学成分

Table 1 Chemical Compositions of binder material

materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	w/%
Cement	21.35	4.67	62.60	3.08	2.25	3.31	-	-	-	-	
Silica fume	85.16	0.06	0.56	2.10	-	0.75	-	-	-	-	
Fly ash	58.30	20.97	5.16	1.46	0.81	7.04	-	-	-	-	
slag	33.48	12.21	36.35	10.59	0.66	1.40	0.34	2.17	1.27	1.56	

1.2 配合比

试件尺寸500 mm × 100 mm × 75 mm 棱柱体。矿物掺合料(w)分别为：硅灰掺10%，粉煤灰掺量30%，矿粉掺量50%。水灰比为0.35。其配比

及28 d抗压强度见表2。

青海盐湖运回卤水，到中科院青海盐湖研究所进行等离子光谱测定化学成分件见表3。

表2 混凝土配合比及抗压强度

Table 2 Mixed proportions and compressive strength of concretes

Mix	W/B	Mixed proportions/ (kg · m ⁻³)						Compressive strength/MPa		
		Cement	SF	FA	SL	Fine aggregate	Coarse aggregate	PCA [®] (I)	Water	28 d
C30	0.53	368	—	—	—	735	1 103	—	195	31.3
C50FA30	0.35	316.4	—	135.6	—	679	1 145	4.07	158	58.6
C80SF10	0.27	526.5	58.5	—	—	703	1 145	5.85	158	80.6

SF—silica fume; FA—fly ash; SL—blast furnace slag; PCA[®] (I) —Sup-performance (high range water reducing admixture)

表 3 青海察尔汗盐湖卤水化学成分
Table 3 The chemical composition of salt lake

名称	Na ⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
$\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	97 167.92	3 671	2 638.42	129.29	107 790	36 445.42	4 595.42

1.3 试验方法

相对动弹模量用北京康科瑞公司生产的 NM-4B 非金属超声波检测仪测定。混凝土的相对动弹模量可用下式计算:

$$E_r = E_t/E_0 = V_t^2/V_0^2 \quad (1)$$

式中: E_r 为相对动弹模量; E_0 和 V_0 分别为混凝土实验前的初始动弹模量和超声波波速; E_t 和 V_t 分别为混凝土在 t 时刻的动弹模量和超声波波速。参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[15], 当降低到 60%, 质量损失率达到 5% 以上可认为混凝土已经发生应力破坏。

抗压试件边长 100 mm 的立方体, 棱柱体试件为 100 mm × 75 mm × 500 mm, 混凝土试件标准养护 28 d。测定好初始超声波值后, 依次放置在如下持续浸泡环境、干湿循环环境及现场暴露环境下。分别在 90、180、270、330、390、480 和 540 d 测定各棱柱体的相对动弹模量。

通过四点抗弯拉试验确定最大抗弯拉应力, 利用设计加载装置对各试件进行加载, 加载装置和加载过程见图 1。



图 1 加载装置及加载过程

Fig. 1 The load device and loading process

2 结果与讨论

2.1 不同试验环境对 OPC、HSC 和 HPC 耐腐蚀能力的影响

图 2 所示: 在不同试验环境下, 各混凝土的相对动弹模量都经历强化和劣化的过程。相对动弹模量强化阶段: 因腐蚀产物在混凝土孔隙、缺陷处生成, 密实了混凝土结构。①在现场暴露环境下, 混凝土强化阶段还没达到最大值, 其中 OPC 在 540 d 时, 增加了 18.9%, HSC 在 540 d 增加了 5.63%; HPC 在 540 d 增加了 9.35%。增长的速率随水灰比的增大而增大, 强化阶段的时间长度随水灰比的增大而减小。②在浸烘循环中, OPC 在 180 d 达到最大值, 增加了 15.2%; HSC 在 330 d 达到最大值, 增加了 21.5%; HPC 在 270 d 达到最大值, 增加了 20.7%, 增长的速率随水灰比的增大而增大, 强化阶段的时间长度随水灰比的增大而减小。③浸烘 + 30% 加载环境中, OPC 在 180 d 达到最大值, 增加了 24.8%; HPC 在 180 d 达到最大值, 增加了 25.5%; HSC 在 270 d 时, 增加了 25.7%, 还没达到最大值; 增长的速率随水灰比的增大而增大, 强化阶段的时间长度随水灰比的增大而减小。性能劣化阶段: 因腐蚀产物填满孔隙后, 产生裂纹导致混凝土孔壁破坏, 裂纹引发、扩展, 并最终导致混凝土破坏。①在暴露环境中, OPC、HSC 和 HPC 都没到达劣化阶段。②在浸烘循环中, OPC 在 540 d 时降低了 22.7%, 在劣化阶段下降了 38.4%; HSC 在 540 d 时增加了 7.8%, 在劣化阶段下降了 11.1%; HPC 在 540 d 时增加了 0.5%, 在劣化阶

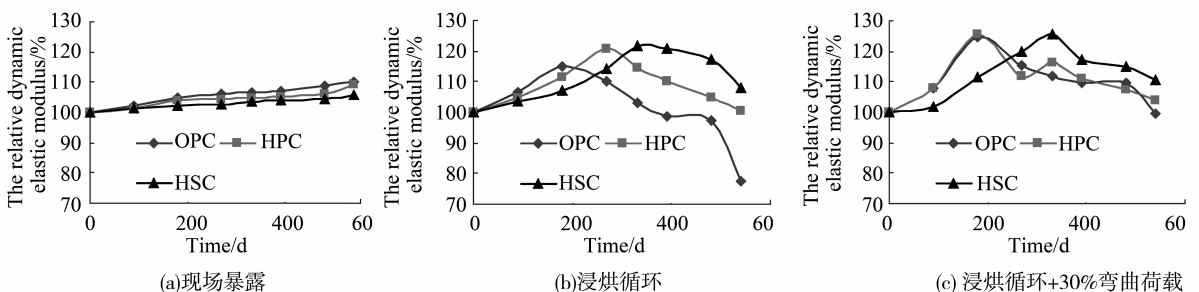


图 2 不同试验环境下对 OPC、HSC 和 HPC 耐腐蚀能力的影响

Fig. 2 The influence of the ability of stress for OPC、HSC and HPC in different test conditions

段下降了 14.1%；劣化的速率随水灰比的增大而增大。③在浸烘 + 30% 加载环境中，OPC 下降 0.6%，在劣化阶段下降了 25.4%；HSC 增加了 10.8%，在劣化阶段下降了 14.9%；HPC 增加了 4.1%，在劣化阶段下降了 21.1%。在相同试验环境下，水灰比越大劣化速度越快。

2.2 OPC、HSC 和 HPC 耐腐蚀能力和试验环境的关系

图 3 (a) 所示：OPC 在不同试验环境下，相对动弹模量的变化规律。暴露环境下，强化阶段阶段还未完成，浸烘和浸烘 + 30% 加载环境下强化阶段时间长度均为 180 d。因此，与暴露环境相比，浸烘和浸烘 + 30% 加载可以显著缩短强化阶段时间长度，浸烘和浸烘 + 30% 荷载的强化阶段时间长度至多是暴露强化阶段时间长度的 33.3% 倍。图 3 (b) 所示：HSC 在不同试验环境下，相对动弹模量的变化规律。暴露环境下，强化阶段阶段还未完成，浸烘和浸烘 + 30% 荷载环境下强化阶段时间长度

度为 330 d；浸烘可以显著缩短强化阶段时间长度；因此，与暴露环境相比，浸烘和浸烘 + 30% 加载可以显著缩短强化阶段时间长度，浸烘和浸烘 + 30% 加载的强化阶段时间长度至多是暴露强化阶段时间长度的 50% 倍。图 3 (c) 所示：HPC 在不同试验环境下，相对动弹模量的变化规律。暴露环境下，强化阶段还未完成，浸烘和浸烘 + 30% 荷载，强化阶段时间长度分别为 270 d 和 180 d；浸烘 + 30% 荷载可以显著缩短强化阶段时间长度；浸烘和浸烘 + 30% 荷载环境的强化阶段时间长度至少是暴露强化阶段时间长度的 33.3% 和 50% 倍。与暴露环境相比，浸烘 + 30% 荷载环境可以显著的缩短强化阶段时间长度，OPC、HSC 和 HPC 分别暴露强化阶段时间长度的 33.3%、61% 和 33.3% 倍；而浸烘环境下 OPC、HSC 和 HPC 分别暴露强化阶段时间长度的 33.3%、61% 和 50% 倍。因此，与现场暴露环境相比，浸烘 + 30% 荷载环境对混凝土应力腐蚀最大，其次是浸烘环境。

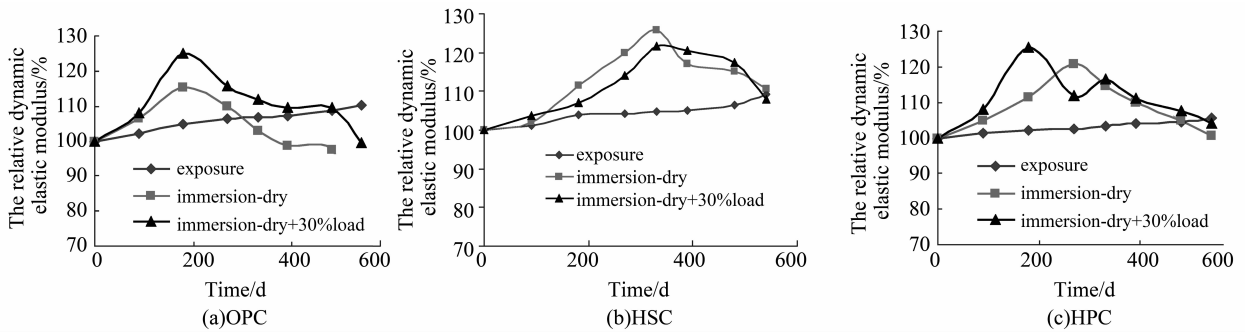


图 3 OPC、HSC 和 HPC 耐腐蚀能力与试验环境的关系

Fig. 3 The relationship between OPC、HSC、HPC and test environment

2.3 盐湖卤水腐蚀混凝土的微观分析

浸烘循环下，分别对 90, 330 和 540 d 的 HSC 进行 SEM 分析混凝土空洞中微观结构的变化，如图 4 所示：90 d 时有少量的腐蚀产物，330 d 随腐蚀产物有大量的腐蚀产物，经过 540 d 的浸烘循环，混凝土孔洞几乎完全被针状产物充填，并形成裂纹混凝土。裂缝并在进一步发展，通过对腐蚀产物进行确定为钙矾石和石膏。这是因为 SO_4^{2-} 扩散到混凝土近表面区，在孔隙和界面区生成钙矾石和石膏，当钙矾石和石膏结晶长大，一旦其膨胀力超过混凝土的抗拉强度，就会差生大量裂缝，相对动弹模量开始劣化，随着试验的继续，裂缝进一步扩展，促进钙矾石和石膏的生成，相对动弹模量迅速下降。

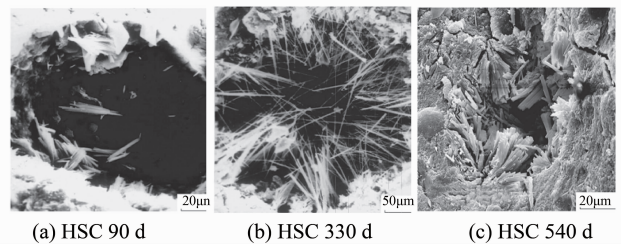


图 4 钙矾石晶体在不同腐蚀龄期对混凝土孔洞的充填情况

Fig. 4 Ettringite crystals filled in void pore of the concrete specimens for different ages

3 结 论

混凝土在应力腐蚀作用下的相对动弹性模量要经历强化阶段与试验环境和混凝土类型密切相关。

1) 水灰比越大强化阶段的时间越短, 说明腐蚀产物多, 混凝土结构迅速密实。对于同一混凝土而言, 浸烘循环 + 30% 荷载的强化阶段时间最短, 其次是浸烘循环, 最后是现场暴露。

2) 浸烘循环 + 30% 荷载作用显著加速了混凝土应力腐蚀破坏进程。OPC 应力腐蚀的强化段在浸烘循环 + 30% 荷载时间与长度暴露环境条件的相应时间长度分别压缩了 67%。在浸烘 + 30% 荷载循环作用下, 在强化阶段 HSC 发生应力腐蚀的干湿循环次数分别比 OPC 和 HPC 延长了 1.8 倍, 因此, 在中国盐湖地区, HSC 表现出更强的抗应力腐蚀能力。

3) 通过微观分析, 可知混凝土应力腐蚀的产物是钙矾石和石膏。这是因为 SO_4^{2-} 扩散到混凝土近表面区, 在孔隙和界面区生成钙矾石和石膏, 当钙矾石和石膏结晶长大, 一旦其膨胀力超过混凝土的抗拉强度, 就会差生大量裂缝, 相对动弹性模量开始劣化。

参考文献:

- [1] ADAM N E. The confused world of sulfate attack on concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(8): 1275 - 1296.
- [2] HEKAL E E, KISHAR E, MOSTAFA H. Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances [J]. Cement and Concrete Research 2002, 32(9): 1421 - 1427.
- [3] 张建业, 余红发, 麻海燕, 等. 盐腐蚀与应力作用下混凝土的冻融损伤及抑制 [J]. 混凝土, 2009 (12): 32 - 36.
- [4] 张云清, 余红发, 孙伟, 张建业. MgSO_4 腐蚀环境作用下混凝土的抗冻性 [J]. 建筑材料学报, 2011 (5): 698 - 702

- [5] MANGAT P S, EL-KHATIB J M. Influence of initial curing on sulfate resistance of blended cement concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1992, 22 (6): 1089 - 1100.
- [6] AKÖZ F, TÜRKER F. Effects of raised temperature of sulfate solutions on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume [J]. Cement Concrete Research, 1999, 29(4): 537 - 544.
- [7] ZHANG Z, OLEK J, DIAMOND S. Studies on delayed ettringite formation in early-age, heat-cured mortars: I. Expansion measurements, change sin dynamic modulus of elasticity, and weight gains [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(11): 1729 - 1736
- [8] 金祖权, 孙伟, 张云升. 混凝土在硫酸盐、氯盐溶液中的损伤过程 [J]. 硅酸盐学报, 2006, 34 (5): 630 - 635
- [9] 金祖权, 孙伟, 赵铁军, 将金洋. 混凝土在硫酸盐-氯盐环境下的损伤失效研究 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2006, 36(S II) 200 - 204.
- [10] 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: 东南大学材料科学与工程学院, 2004.
- [11] 余红发, 孙伟, 李美丹. 荷载对混凝土在腐蚀、冻融作用下强度的影响 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42 (2): 297 - 301.
- [12] 燕坤, 余红发, 麻海燕, 等. 硫酸镁腐蚀与弯曲荷载对碳化混凝土抗冻性的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2008, 36 (7): 877 - 883.
- [13] 余红发, 孙伟, 屈武, 等. 盐湖地区的环境条件与混凝土和钢筋混凝土结构的耐久性 [J]. 工业建筑, 2003, 33 (3): 1 - 4.
- [14] YU Hongfa, SUN Wei, ZHANG Yunsheng, et al. Durability of concrete subjected to the combined actions of flexural stress, freeze-thaw cycles and bittern solutions [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 23(6): 893 - 900.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T50082 - 2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.