

文章编号:1673-2049(2016)06-0044-09

# 宁夏盐渍土地地区现场暴露混凝土耐久性损伤 评价试验

乔宏霞<sup>1,2</sup>, 路承功<sup>1</sup>, 李宇<sup>3</sup>, 关利娟<sup>1</sup>

- (1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;  
2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050;  
3. 甘肃省建筑设计研究院, 甘肃 兰州 730030)

**摘要:**以掺有不同粉煤灰量的混凝土试件为研究对象,将3种配合比的混凝土试件暴露在具有典型盐渍土特征的宁夏地区,选取相对质量和相对动弹性模量作为评价参数,通过比较分析得出一种更适合盐渍土地地区现场暴露混凝土耐久性损伤的综合评价参数。同时结合现场暴露混凝土微观分析对盐渍土地地区混凝土受硫酸盐侵蚀的劣化机理进行了研究,从微观角度分析了盐渍土地地区混凝土耐久性能变化的原因。结果表明:混凝土在盐渍土地地区受到复杂的化学侵蚀,与土壤中的硫酸盐反应生成了硫铝酸钙晶体填充在孔隙中,综合损伤评价参数能很好地描述盐渍土地地区混凝土的耐久性。

**关键词:**混凝土;现场暴露;盐渍土;耐久性;损伤评价;硫酸盐侵蚀

**中图分类号:**TU528 **文献标志码:**A

## Experiment on Durability Damage Assessment of Concrete Field Exposed in Saline Soil Area of Ningxia

QIAO Hong-xia<sup>1,2</sup>, LU Cheng-gong<sup>1</sup>, LI Yu<sup>3</sup>, GUAN Li-juan<sup>1</sup>

- (1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 3. Gansu Institute of Architectural Design and Research, Lanzhou 730030, Gansu, China)

**Abstract:** The concrete specimens with different amounts of fly ash were taken as research object. The concrete specimens of three kinds of mix ratio were exposed to saline soil with typical characteristics in Ningxia area. The relative mass and relative dynamic elastic modulus were selected as evaluation parameters. Through the comparative analysis, the more suitable comprehensive damage assessment parameters of durability evaluation of the concrete field exposed in the saline area were obtained. At the same time, the degradation mechanism of concrete under sulfate erosion in saline soil was studied combining with microcosmic analysis of field exposed concrete. The reasons for the durability change of concrete in saline soil area were analyzed from micro perspective. The results show that the concrete is subjected to complex chemical erosion in the saline soil area, and react with sulfate in soil to form calcium

收稿日期:2016-04-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51168031,51468039)

作者简介:乔宏霞(1977-),女,山西应县人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:qiaohx7706@163.com。

sulphoaluminate crystals which is filled in the pore. The durability of concrete in saline soil area can be well described by the comprehensive damage assessment parameters.

**Key words:** concrete; field exposure; saline soil; durability; damage assessment; sulfate erosion

## 0 引言

宁夏位居欧亚大陆桥中国段关键节点,是中国惟一以省域为单位的内陆开放型经济试验区<sup>[1]</sup>。近年来,随着中国“一带一路”战略的实施和“中国-阿拉伯国家博览会”的成功举办,该地区迎来了新一轮建设高潮。混凝土由于其具有经济适用、易于成型、强度高优点,成为工程建设的首选原材料。然而,宁夏地区环境特殊,是西部众多盐渍土地地区之一,该地区昼夜温差大,干旱少雨,风大沙多,处于这一地区的混凝土受到硫酸盐和冷热、干湿、冻融循环交替相互作用的影响,混凝土易出现表面起皮、棱角脱落、裂缝长度和深度显著增大的现象,部分体表面积大的混凝土呈蜂窝状,极大降低了混凝土的承载能力和使用寿命<sup>[2-4]</sup>。对该地区硫酸盐侵蚀环境下混凝土耐久性问题的研究是进行工程建设时必须高度重视的一个课题。

董宜森等<sup>[5]</sup>基于断裂力学理论,采用三点弯曲梁试验方法,研究了混凝土在硫酸盐侵蚀和干湿循环双重因素作用下双K断裂参数等断裂性能的劣化规律,结果表明起裂荷载与最大荷载的比值大致分布在0.55~0.90,在侵蚀初期,失稳韧度和起裂韧度均有较明显的增大,起裂韧度较失稳韧度对硫酸盐侵蚀因素的影响敏感;聂彦锋等<sup>[6]</sup>应用粗糙集理论对受硫酸盐侵蚀的混凝土评价指标权重进行了分析,指出超声波波速和长度变化率的权重系数最大,回弹值次之,质量变化率和侵蚀深度最小;杨英姿等<sup>[7]</sup>研究了在不同养护制度下掺与未掺防冻剂混凝土的抗压强度、50次冻融循环强度损失率及渗透系数,参照防冻剂标准提出了一种负温混凝土结构损伤评价参数和基于混凝土长期耐久性的未来防冻剂设计方向,并指出适当延长正温养护时间是提高混凝土耐久性的重要措施。刘道维等<sup>[8-10]</sup>研究了掺有粉煤灰、矿渣等掺和料及不同水灰比的混凝土试块在不同浓度硫酸盐溶液中进行干湿循环和两者共同耦合作用时的侵蚀情况,并分析了硫酸盐侵蚀劣化机理,结果表明粉煤灰和矿渣都能够很好地改善混凝土抗硫酸盐侵蚀的性能,随着干湿循环次数和硫酸盐浓度的增加,其损伤程度越来越严重。其他学者也对不同种类混凝土在硫酸盐等侵蚀环境下的

耐久性问题进行了研究,丰富了混凝土抗腐蚀性能的理论<sup>[11-18]</sup>。

目前,对混凝土耐久性方面的研究主要集中在以地区原材料为基础的室内模拟加速方面,基于现场暴露的混凝土抗硫酸盐侵蚀研究较少。混凝土耐久性影响因素较多,失效机理复杂,所得成果很难准确反映复杂实际环境下混凝土性能退化的真实情况,得出的结论与实际情况往往有较大偏差。本文将以宁夏地区作为盐渍土地地区的一个典型区域,测量混凝土在不同暴露时间段内的质量和超声波,通过比较分析并结合受侵蚀后混凝土微观分析得出一种更加适合盐渍土地地区的评价参数进而研究现场暴露环境下混凝土的耐久性。

## 1 原材料与试验方法

### 1.1 原材料

试验选用祁连山水泥公司生产的P42.5的普通硅酸盐水泥,各项性能指标见表1;粉煤灰采用兰州二热厂生产的Ⅱ级粉煤灰;粗集料采用甘肃华陇混凝土有限责任公司生产的碎石,含水率为0.15%,表观密度为 $2\ 660\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;细集料采用兰州安宁的河砂,含水率为3.3%,表观密度为 $2\ 581\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,细度模数为3.18,属于中砂;减水剂采用兰州宏建商品混凝土有限责任公司提供的聚羧酸高效减水剂,减水率为18%左右,掺量(质量分数)为2.1%。

表1 普通硅酸盐水泥性能指标

Tab. 1 Performance Indexes of Ordinary Portland Cement

凝结时间/min		安定性	不同养护龄期(d)的 抗压强度/MPa		不同养护龄期(d)的 抗折强度/MPa	
初凝	终凝	合格	3	28	3	28
155	243		17.9	47.3	3.85	6.51

### 1.2 配合比设计

为了更加客观研究现场暴露地区环境对混凝土耐久性的影响,结合宁夏地区的气候条件、地理环境及土壤中所含较高浓度的腐蚀性离子,基于不同水灰比、粉煤灰掺量混凝土抗侵蚀能力的不同<sup>[19]</sup>,本文试验设计了3种水胶比的混凝土试样,具体配合比如表2所示。

### 1.3 试验方案

采用上述配合比制作试件,试件尺寸为100

表2 试件编号和配合比设计

Tab. 2 Number of Test Specimens and Mix Proportion Design

组别	试件编号	试件数量	水胶比	各材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )					
				水泥	粉煤灰	碎石	细砂	减水剂	水
1	NX13	3	0.43	300	100	1 155	650	6	170
	NX23	3							
2	NX14	3	0.35	360	90	1 167	628	9	158
	NX24	3							
3	NX15	3	0.30	425	75	1 173	640	13	150
	NX25	3							

mm×100 mm×400 mm,养护 24 h 后拆模,标准养护 28 d 后将试件埋入土中。试件两端分别标记 A 端和 B 端,在长度方向标记试件编号,沿长度方向将 B 端埋入土中,埋深 200 mm,A 端朝上暴露在空气中。

混凝土受到的侵蚀作用与土壤中各类盐离子含量有关,根据《土工试验方法标准》<sup>[20]</sup>对埋置点的土质进行分析,各离子含量如表 3 所示,其中  $n, m$  分别为每千克土质中离子的物质的量和质量。由表 3 可知 2 个埋设点均为典型盐渍土地区。

表3 土质分析结果

Tab. 3 Soil Analysis Results

序号	离子	1 号点分析结果			2 号点分析结果		
		$n/\text{mmol}$	$m/\text{mg}$	质量分数/%	$n/\text{mmol}$	$m/\text{mg}$	质量分数/%
1	$\text{CO}_3^{2-}$	1.12	67	0.007	1.12	67	0.007
2	$\text{HCO}_3^-$	10.10	616	0.062	7.86	586	0.059
3	$\text{Cl}^-$	1.27	45	0.005	16.51	45	0.005
4	$\text{SO}_4^{2-}$	1.21	116	0.012	10.31	989	0.100
5	$\text{Ca}^{2+}$	2.73	109	0.011	2.12	84	0.008
6	$\text{Mg}^{2+}$	0.91	21	0.002	1.51	36	0.004

在埋置之前,对试件进行初始数据采集,包括试件质量  $M$ ,A,B 端的超声波波速  $V_A, V_B$  和长度方向的超声波波速  $V$ ,并且每隔 60 d 采集 1 次试件的质量和超声波。由于现场暴露环境复杂,不确定因素较多,为确保试验的严谨性和准确性,尽量减少试验过程中的误差,本文分别选取宁夏中卫市和中卫市兴仁镇 2 个现场暴露试验点埋置试件,每个点埋置 3 种配合比的试件,每种水胶比的试件 3 个,2 个暴露点共 18 个试件。

#### 1.4 耐久性评价参数和损伤评价参数设计

对混凝土基本性能评价常用的指标主要有 4 个:相对动弹性模量、质量损失率、抗折强度与抗压强度。考虑到本文试验需收集大量数据,抗折、抗压试验属于破坏性试验,而相对质量和相对动弹性模量可以对同一个试件进行多次测量,同时也避免了不同试件差异性所带来的误差,所以本文试验参考了文献<sup>[21]</sup>设计的混凝土耐久性指标,选取相对质量评价参数  $\omega_1$  和相对动弹性模量评价参数  $\omega_2$  作为混凝土试件耐久性评价参数。质量用分度值为 0.1 g 的电子称进行测量,相对动弹性模量用 NM-4A 非

金属超声波检测分析仪测量。针对试件 A,B 端侵蚀环境及含水率的不同,所测声速也会有差异,所以在每次测试时分别测量每个试件两端的超声声速,以研究其变化趋势。

相对质量评价参数为

$$\omega_1 = \frac{M_r - 0.95}{0.05} \quad (1)$$

式中: $M_r$  为埋置一定时间后试件的相对质量。

$\omega_1 > 1$  时,相对质量比基准值高; $0 \leq \omega_1 \leq 1$  时,相对质量比基准值低,但未达到破坏; $\omega_1 < 0$  时,相对质量低于 95%,达到破坏。

相对动弹性模量评价参数为

$$\omega_2 = \frac{E_r - 0.6}{0.4} \quad (2)$$

$$E_r = \frac{V_i^2}{V_0^2} \quad (3)$$

式中: $E_r$  为埋置一定时间后试件的相对动弹性模量; $V_0, V_i$  分别为试件初始超声波波速和一定暴露时间后超声波波速。

$\omega_2 > 1$  时,相对动弹性模量比基准值高; $0 \leq \omega_2 \leq 1$  时,相对动弹性模量比基准值低,但未达到破

坏; $\omega_2 < 0$  时,相对动弹性模量低于 60%,达到破坏。

目前,基于现场暴露试验混凝土耐久性损伤评价参数的设计还不够完善,化学离子侵蚀、冻融循环以及干湿循环等因素对试件的耐久性影响还没有统一的评定标准。本文采用文献[22]同时考虑相对质量和相对动弹性模量的综合损伤评价参数  $\omega$ ,其表达式为

$$\omega = \begin{cases} -\omega_1 \omega_2 & \omega_1, \omega_2 \text{ 同时小于 } 0 \\ \omega_1 \omega_2 & \omega_1, \omega_2 \text{ 不同时小于 } 0 \end{cases} \quad (4)$$

在评价过程中发现,当 2 个评价参数  $\omega_1, \omega_2$  同时小于 1 时综合损伤评价指标  $\omega$  能很好地评价现场暴露混凝土的损伤程度,但当  $\omega_1, \omega_2$  其中一个大于 1,另一个小于 1 时,会出现违背客观事实的评价。因此,本文根据试验数据结合何海杰[23]设计的损伤评价参数对式(4)进行优化设计,其表达式为

$$\omega = \begin{cases} -A\omega_1^2 B\omega_2^2 & \omega_1, \omega_2 \text{ 同时小于 } 0 \\ A\omega_1^2 B\omega_2^2 & \omega_1, \omega_2 \text{ 大于 } 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $A$  为相对质量评价有效损伤系数; $B$  为相对动弹性模量评价有效损伤系数。

当  $\omega_1 > 1$  时, $A = 1/\omega_1^2$ ;当  $\omega_1 \leq 1$  时, $A = 1$ ;当  $\omega_2 > 1$  时, $B = 1/\omega_2^2$ ;当  $\omega_2 \leq 1$  时, $B = 1$ 。

## 2 试验结果与数据分析

### 2.1 1 号点 3 种水胶比试件耐久性损伤评价参数

将 3 种水胶比的混凝土试件在宁夏中卫地区进行 720 d 现场暴露,随着龄期的延长,混凝土试件受到了不同程度的侵蚀,其质量、相对动弹性模量都出现了变化。为了避免不确定因素对试验结果的影响,试件质量、超声波波速均取 3 个试件的平均值。1 号点 3 种水胶比混凝土试件的相对质量评价参数、相对动弹性模量评价参数及综合损伤评价参数的变化如图 1~3 所示。图 1 中  $\omega_{2A}, \omega_A$  分别为 A 端的混凝土相对动弹性模量和综合损伤评价参数,  $\omega_{2B}, \omega_B$  分别为 B 端的混凝土相对动弹性模量和综合损伤评价参数。

从图 1~3 中可以看出,在现场暴露环境下,1 号点 3 种水胶比混凝土试件的 60 d 相对质量评价参数  $\omega_1$  都出现了不同程度的波动,其中 NX13 组试件波动幅度最大, NX14 组试件次之, NX15 组试件波动最小,该水胶比试件在 600 d 时评价参数出现了最大值 1.267。从开始暴露到 120 d 时间段内,3 组试件相对质量都增加了,且 NX14 组试件达到了其在整个暴露时间段内的最大值 1.142,之后 3 组试件相对质量都开始出现波动式的交替变化。从暴

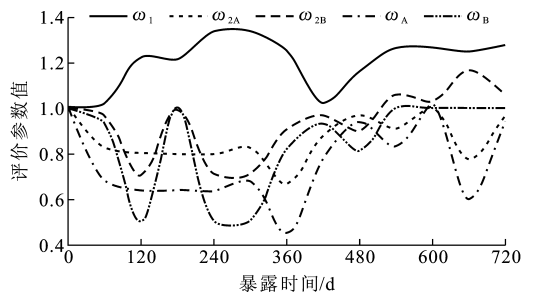


图 1 1 号点 NX13 组试件损伤评价参数  
Fig. 1 Damage Assessment Parameters of NX13 Group Specimens at Point 1

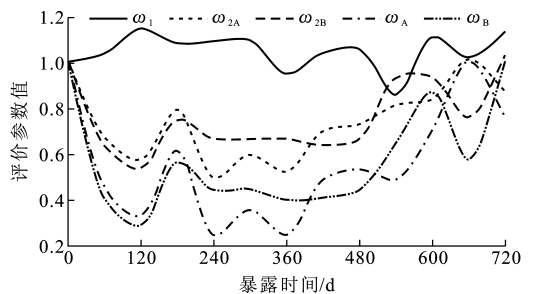


图 2 1 号点 NX14 组试件损伤评价参数  
Fig. 2 Damage Assessment Parameters of NX14 Group Specimens at Point 1

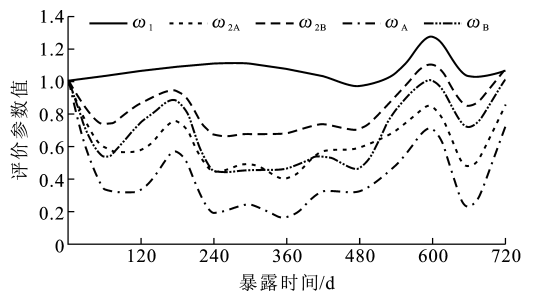


图 3 1 号点 NX15 组试件损伤评价参数  
Fig. 3 Damage Assessment Parameters of NX15 Group Specimens at Point 1

露年限上看,3 组试件损伤评价参数第 2 年(360~720 d)的波动趋势和频率与第 1 年(0~360 d)相似,但增大趋势有所减弱。在 300 d 的时候, NX13, NX15 组试件相对质量评价参数  $\omega_1$  达到最大值,分别为 1.338, 1.104。整体来看,3 组试件相对质量评价参数虽然都出现了波动,但其值基本都在 1.0 以上,表明在暴露 720 d 内试件的质量较室内养护 28 d 时有所增强,究其原因主要是土壤中硫酸盐的侵入与水化反应生成的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生置换反应生成石膏,进而与先期产物铝酸钙反应生成钙矾石。

3 种水胶比试件的 A 端相对动弹性模量  $\omega_{2A}$  呈现出前期减小,中期稳步增大,后期减小的波动趋势。NX13 和 NX15 组试件在 600 d 时相对动弹性

模量达到最大值 0.999 和 0.840, NX14 组试件在 660 d 时达到最大值 1.011。B 端的相对动弹性模量  $\omega_{2B}$  呈现出前期减小, 中期稳定, 后期波动增大的趋势, 且在 720 d 时相对动弹性模量评价参数都超过了 1.0, 表明 3 种水胶比试件的性能都得到了提升。这主要是因为土壤中侵入的硫酸盐与混凝土中水化产物反应生成了硫铝酸钙晶体, 这些晶体填充在孔隙中, 改善了混凝土性能。同时可以看到, 混凝土试件的  $\omega_{2A}$ ,  $\omega_{2B}$  以 NX13 组试件的波动程度最大, NX14 组次之, NX15 组最小, 且 A, B 两端中期波动时的相对动弹性模量极值不同, 如在 360 d 时 A 端的  $\omega_2$  为波谷, 而 B 端表现为上升态势, 这表明暴露在空气中的 A 端和埋在土中的 B 端损伤劣化机理不同, 随着时间的延长两者又表现出同步波动。

对于综合损伤评价参数  $\omega_A$ ,  $\omega_B$ , 两者表现出较强的同步性, 从开始暴露到 120 d 的时间内, 3 种水胶比试件的  $\omega_A$ ,  $\omega_B$  均呈现出下降趋势, 表明在这段时间内由于受到外界侵蚀环境的影响, 试件性能在降低。之后出现波动式的变化, 其中第 2 年(360~720 d)内的综合损伤评价参数值比第 1 年(0~360 d)略高, 说明在第 2 年内由于内部水化反应的加强, 试件的性能得到了强化。总的来看, 3 种水胶比试件的  $\omega_A$ ,  $\omega_B$  都在 0~1.0 范围内波动, 表明试件在埋置点暴露 720 d 后均受到了一定程度的损伤。

## 2.2 2 号点 3 种水胶比试件耐久性损伤评价参数

2 号点 3 种水胶比混凝土试件的相对质量评价参数、相对动弹性模量评价参数及综合损伤评价参数的变化如图 4~6 所示。

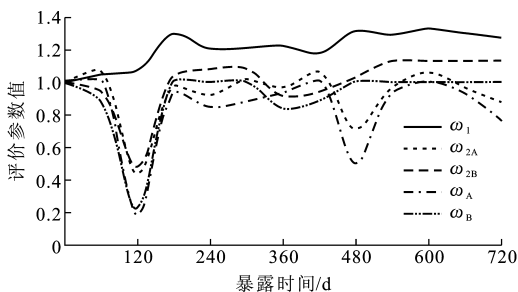


图 4 2 号点 NX23 组试件损伤评价参数

Fig. 4 Damage Assessment Parameters of

### NX23 Group Specimens at Point 2

从图 4~6 中可以看出, 随着暴露时间的延长, 3 种水胶比试件的相对质量评价参数  $\omega_1$  都表现出波动式变化, 但与 1 号点相比变化幅度不大, 都在 1.0 附近波动。从开始暴露至 180 d 的时间段内 NX23, NX24 组试件的相对质量呈上升趋势,  $\omega_1$  达到了暴露时间内的第 1 个峰值 1.296 和 1.120, 之后微小

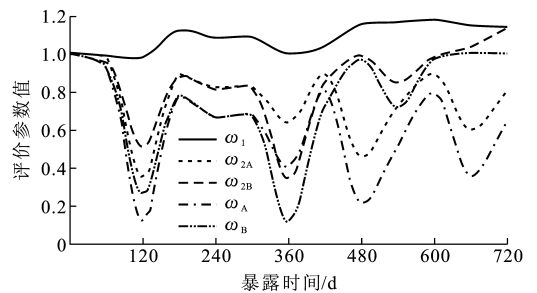


图 5 2 号点 NX24 组试件损伤评价参数

Fig. 5 Damage Assessment Parameters of

### NX24 Group Specimens at Point 2

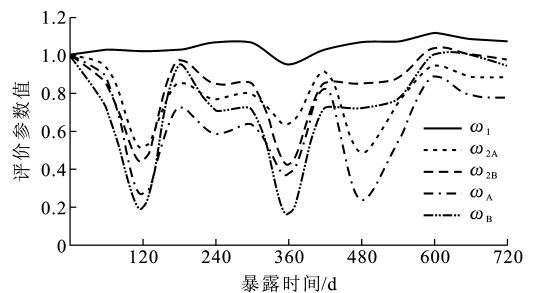


图 6 2 号点 NX25 组试件损伤评价参数

Fig. 6 Damage Assessment Parameters of

### NX25 Group Specimens at Point 2

波动并在 420 d 和 360 d 时  $\omega_1$  出现整个暴露时间段内的第 1 个波谷值 1.178 和 0.999; NX25 组试件的  $\omega_1$  持续增大直至 240 d 达到 1.061, 在 360 d 时  $\omega_1$  出现整个暴露时间内的最小值 0.951。从年限上来看, 3 种水胶比试件第 1 年(0~360 d)的波动频率和趋势与第 2 年(360~720 d)基本吻合, 但第 2 年的波动较第 1 年更平缓一些。整体来看, 除了个别时间点外, 3 组试件的  $\omega_1$  均大于 1.0, 表明在暴露时间段内试件的质量均有所增加; 3 种水胶比试件中以 NX23 组试件变化最为剧烈, NX24 组次之, NX25 组最小。

除了 NX23 组混凝土试件的  $\omega_2$  在 60 d 内出现短暂增大之外, 3 种水胶比试件 A 端  $\omega_2$  在前期暴露时间段内均出现了较大幅度降低, 达到了整个暴露时间内的最小值 0.432, 0.347 和 0.510。之后迅速回升, 然后保持稳定波动。在第 2 年内, 出现了与第 1 年频率与趋势相似的波动, 但波动的幅值明显减小。在此过程中除 NX23 组试件在个别时间点的  $\omega_{2A}$  峰值超过 1.0 外, 其他 2 种配合比试件的  $\omega_{2A}$  值均小于 1.0, 表明 NX24, NX25 组试件在暴露时间段内性能降低, 出现了不同程度的损伤。同 A 端的相对动弹性模量评价参数一样, B 端的  $\omega_{2B}$  也出现前期减小然后迅速回升, 在稳定波动一段时间后继续

重复与第 1 年类似的波动。同时也观察到 B 端的  $\omega_{2B}$  在 360~720 d 的暴露时间段内呈现出波动式稳步增大,且在 720 d 时 NX23, NX24 组试件的  $\omega_{2B}$  均大于 1.0,表明试件在第 2 年内性能增强。

3 种水胶比试件 A, B 两端综合评价参数  $\omega$  在 0~120 d 时间段内均呈下降趋势,其中 A 端下降幅度比 B 端大,表明初期 A 端受环境侵蚀作用比 B 端更加明显。随着时间延长,  $\omega_A, \omega_B$  值回升并保持稳定波动,在 360 d 时又出现一次较大幅度下降之后保持了较稳定的增加。同时观察到在第 2 个暴露期内,不同试件 B 端的综合损伤评价参数要比 A 端的波动幅度小,这可能是气候条件对在空气中暴露的 A 端影响更大。

综上所述,对比 2 个埋置点 3 种水胶比的试件可以看到,相对质量评价参数值波动较小,除个别时间段外其值基本都在 1.0 以上波动,其中水胶比为 0.30 的试件波动幅度最小。如果单纯以  $\omega_1$  作为混凝土耐久性评价参数则不能客观反映混凝土损伤程度。与  $\omega_1$  相比,相对动弹性模量评价参数  $\omega_2$  则表现出较大的波动,2 个埋置点 3 种水胶比的试件在第 1 年内的波动频率和趋势与第 2 年相似,且随着暴露时间的延长,波动幅度越小,究其原因主要是室内养护 28 d 的混凝土试件中含有较多未参与水化的游离态水,在暴露初期,受外界环境气候影响,孔隙中游离态水蒸发到空气中,减缓了内部的水化;随着暴露时间的延长,试件中的粉煤灰发生二次水化反应,后期强度发展较快,在吸收了土壤和空气中的水分后继续水化反应,从而提高了试件的强度;对比 2 个埋置点 3 种水胶比试件发现, A 端的波动程度比 B 端大,表明暴露端受到气候变化的影响较大;在 360~720 d 内,  $\omega_{2A}$  下降趋势比  $\omega_{2B}$  陡,这主要是因为随着时间的延长,埋在土中的 B 端混凝土与土壤中的  $\text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^-$  等离子发生了化学反应,并与自身水化产生的铝酸钙晶体反应形成了一种新的硫铝酸钙晶体,使得混凝土自身致密程度增加。因此,在研究盐渍土地区混凝土损伤破坏时宜选择波动规律较好的 B 端相对动弹性模量进行耐久性综合损伤评价参数的计算。同时也看到,不同埋置点中,无论是相对质量评价参数、相对动弹性模量评价参数还是综合损伤评价参数,水胶比为 0.43 的试件波动最为剧烈,水胶比为 0.35 的试件次之,水胶比 0.30 的试件波动相对较平缓些,这说明 NX15, NX25 混凝土试件耐久性最好。

### 2.3 现场暴露混凝土试件微观机理分析

利用 SEM 扫描电镜观察混凝土试样在现场暴露环境下生成水化产物的微观形态,从而进一步研究试件在盐渍土地区现场暴露时其水化产物对混凝土强度及耐久性能的影响。不同配合比试件 A, B 端的 SEM 图像如图 7~10 所示。试验所用的仪器为中国科学院兰州化学物理研究所的 JSM-5600LV 扫描电子显微镜, HV 分辨率为 3.5 nm, LV 分辨率为 5.0 nm, 放大倍数为 18~300 000。本文试验选取 5 000 倍的 SEM 图像进行研究。

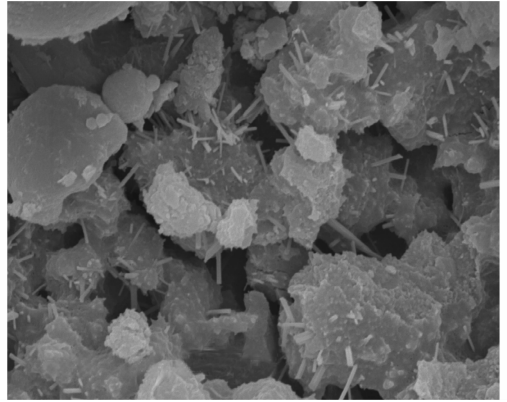


图 7 1 号点 NX13 试件 B 端 SEM 图

Fig. 7 SEM Figure of B-end of NX13 Specimen at Point 1

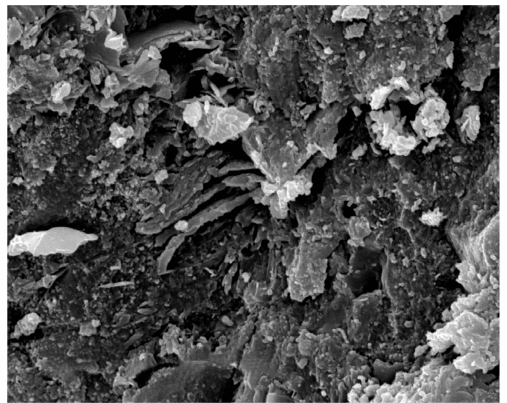


图 8 1 号点 NX14 试件 B 端 SEM 图

Fig. 8 SEM Figure of B-end of NX14 Specimen at Point 1

本文试验所用的胶结材料有普通硅酸盐水泥和粉煤灰,主要矿物成分有硅酸二钙( $\text{C}_2\text{S}$ )、硅酸三钙( $\text{C}_3\text{S}$ )、铝酸三钙( $\text{C}_3\text{A}$ )及铁铝酸四钙( $\text{C}_4\text{AF}$ ),其在标准养护阶段发生水化反应生成硅酸钙凝胶( $\text{C-S-H}$ )、氢氧化钙晶体、水化铁酸钙凝胶及铝酸钙晶体。 $\text{C}_2\text{S}$  水化反应速度慢,是后期强度增加的主要原因, $\text{C}_3\text{S}$  水化速度快且在反应过程中释放大量的热量。28 d 标准养护后将试件埋置在盐渍土地区,随着暴露时间的延长,硫酸根离子侵入混凝土中与前期水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生置换反应生成石膏。当石膏

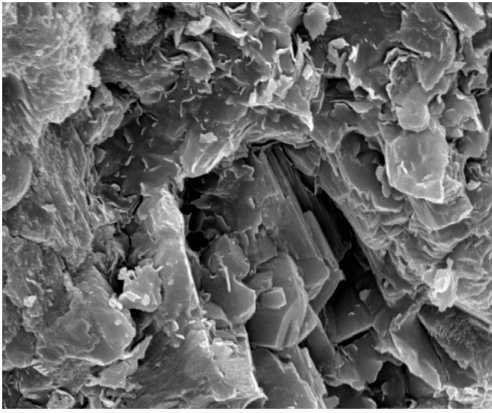


图9 1号点NX15试件A端SEM图

Fig. 9 SEM Figure of A-end of NX15 Specimen at Point 1

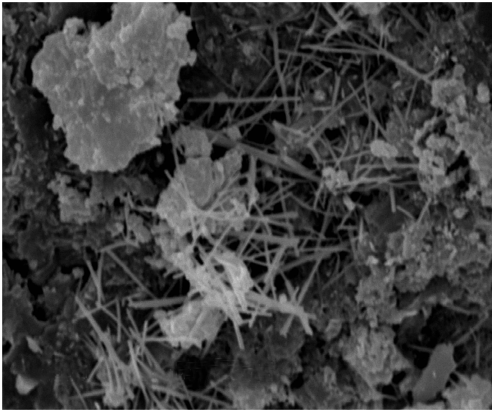


图10 1号点NX15试件B端SEM图

Fig. 10 SEM Figure of B-end of NX15 Specimen at Point 1

存在时会与水化反应生成的铝酸钙发生反应生成高硫型水化铝酸钙晶体(AFt),简称钙矾石,该晶体呈针状。在生成钙矾石过程中晶体的体积会增大,产生较大的膨胀压力导致混凝土开裂,也将这种腐蚀称为“E”盐腐蚀。若石膏在 $C_3A$ 完全水化前消耗完,则AFt与 $C_3A$ 作用生成单硫型水化铝酸钙晶体(AFm)。在硫酸根离子浓度很高时,反应生成的 $CaSO_4$ 会直接在混凝土孔隙中结晶成石膏,导致液相石灰浓度降低和混凝土体积增大,使得水泥石中胶凝物质分解和混凝土开裂破坏,称这类腐蚀为“G”盐腐蚀。同时,粉煤灰中含有活性矿物成分 $SiO_2$ 和 $Al_2O_3$ ,这些活性成分也会与水泥水化产物 $Ca(OH)_2$ 发生二次水化反应,生成硅酸钙凝胶及铝酸钙晶体,期间会消耗大量的 $Ca(OH)_2$ ,从而减少了其与硫酸盐反应生成石膏的数量。石膏数量的减少又会减少膨胀产物钙矾石的数量,与此同时生成大量C-S-H无定形凝胶填充在混凝土孔隙中,增加了混凝土的致密程度,改善了混凝土抗硫酸盐侵蚀的能力。

由图7~10中可以看出,A,B端断面处未看到六角形的 $Ca(OH)_2$ 晶体,但有较多的纤维状、颗粒状、薄片状、层状及短柱状的胶体,说明在暴露期间混凝土试件与粉煤灰中的活性 $SiO_2$ 和活性 $Al_2O_3$ 发生了较充分的二次水化反应生成大量水化硅酸钙(C-S-H)凝胶。C-S-H呈无定形的凝胶相,其化学成分不固定且结晶度极差,当水泥熟料中的阿利特和贝利特相在温度和含水量不同时就会产生不同的C-S-H相。此外,水化产物的形貌还与钙硅比、熟料的活性、水化时溶液中离子的过饱和度有很大的关系。因此,C-S-H的形貌较复杂,呈现出纤维状、团簇颗粒状、网络状、层状及短柱状等众多形态。由于混凝土试件长期暴露在空气中,生成的 $Ca(OH)_2$ 晶体还会与环境中的 $CO_2$ 和 $H_2O$ 反应后分解,使得 $Ca(OH)_2$ 含量进一步减少。

除了明显的絮状、层块状及短柱状的水化硅酸钙凝胶外,还可以清晰看到少量针状集合体,这主要是水化反应生成的铝酸钙晶体与环境中的硫酸盐发生反应生成了硫铝酸钙晶体(钙矾石)。对比NX15试件A,B两端SEM图发现,A端有较为致密的层状晶体且颗粒圆滑细腻,而B端有少量的孔隙,孔隙表面有较多针状的硫铝酸钙晶体,表明先期水化反应生成的 $C_3A$ 与硫酸盐发生了反应使得埋置在土壤中的B端受到硫酸盐侵蚀作用比A端大许多,腐蚀效果明显。少量的钙矾石能够提高混凝土的性能,这也是混凝土试件初期强度增加的主要原因,但是过量的钙矾石会对混凝土造成破坏,随着暴露时间的增加,混凝土最终会因硫酸盐的侵蚀而破坏。此外,这些晶体的形成会降低过渡层的孔隙率并改善其性能。这与通过相对质量、相对动弹性模量及综合损伤评价指标所得出的结论具有较高的一致性。

### 3 结语

(1)相对质量评价参数 $\omega_1$ 和相对动弹性模量评价参数 $\omega_2$ 能直观表征在暴露环境下混凝土的劣化性能,但单纯以1个评价参数不能客观准确衡量现场暴露混凝土的耐久性,综合考虑相对质量和相对动弹性模量的优化综合损伤评价参数 $\omega$ 能很好地描述在盐渍土地区暴露混凝土的耐久性。暴露720d的混凝土试件耐久性受到劣化但未达到破坏。

(2)盐渍土地区的混凝土受到外界环境侵蚀作用,随着暴露时间的增加,侵蚀作用越来越明显。暴

露端和埋置端侵蚀劣化稍有不同,埋置在土壤里面的混凝土受到硫酸盐的侵蚀比暴露在空气中的混凝土大。混凝土在硫酸盐环境作用下生成针状的硫酸钙晶体填充在孔隙中。

(3)盐渍土地区混凝土前期水化反应是其强度增加的主要原因,后期强度发展主要是因为前期水化产物铝酸钙与硫酸盐进一步反应生成钙矾石使混凝土致密性增加。粉煤灰的掺入使得二次反应较为彻底,在水化产物的微观形貌中没有看到明显的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体。

## 参考文献:

## References:

- [1] 王志彪. 浅谈宁夏在“一带一路”建设中的地位和作用[J]. 经济技术协作信息, 2015(8):37.  
WANG Zhi-biao. Brief Introduction of the Position and Role of Ningxia in “One Belt and One Road” Construction[J]. Economic and Technological Cooperation Information, 2015(8):37.
- [2] 周纲, 李少荣, 王掌军, 等. 盐渍土地区混凝土腐蚀状况调查分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(4):121-126.  
ZHOU Gang, LI Shao-rong, WANG Zhang-jun, et al. Investigation and Analysis on Corrosion Situation of Concrete in Saline Soil Region[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(4):121-126.
- [3] 张洪亮, 朱月凤, 韩劲草. 青海氯盐渍土地区半埋混凝土耐久性研究[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2015, 38(6):804-809.  
ZHANG Hong-liang, ZHU Yue-feng, HAN Jin-cao. Study of the Durability of Partially-exposed Concrete in Chloride Saline Soil Areas of Qinghai Province[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2015, 38(6):804-809.
- [4] 张俊喜, 易博, 林德源, 等. 盐渍土环境下钢筋混凝土腐蚀的电化学研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2):390-396, 403.  
ZHANG Jun-xi, YI Bo, LIN De-yuan, et al. Electrochemical Study on the Corrosion of Reinforced Concrete Under Saline Soil Environment[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2):390-396, 403.
- [5] 董宜森, 王海龙, 金伟良. 硫酸盐侵蚀环境下混凝土双K断裂参数试验研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2012, 46(1):58-63, 78.  
DONG Yi-sen, WANG Hai-long, JIN Wei-liang. Experimental Study on Double-K Fracture Parameters of Concrete Exposed to Sulfate Environment[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(1):58-63, 78.
- [6] 聂彦锋, 钱春香. 基于RST的混凝土硫酸盐侵蚀评价指标分析及损伤程度预测[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2013, 43(3):594-598.  
NIE Yan-feng, QIAN Chun-xiang. Evaluation Indices Analysis and Sulfate Attack Degree Prediction of Concrete Based on RST[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013, 43(3):594-598.
- [7] 杨英姿, 高小建, 邓红卫, 等. 负温混凝土耐久性与结构损伤评价参数[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(10):39-43.  
YANG Ying-zi, GAO Xiao-jian, DENG Hong-wei, et al. Durability and Evaluation Parameter of Structure Damage of Concrete at Subzero Temperature[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(10):39-43.
- [8] 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.  
LIU Dao-wei, LIU Ben-yi, LI Xiang-dong, et al. Property Analysis of Concrete Under Coupling Action of Sulfate and Wet-dry Cycles[J]. Hydro-science and Engineering, 2015(4):69-74.
- [9] 孙迎召, 牛涛涛, 姜磊, 等. 干湿循环条件下混凝土硫酸盐侵蚀损伤分析[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(7):1405-1409.  
SUN Ying-zhao, NIU Di-tao, JIANG Lei, et al. Damage Layer Thickness of Concrete Under Wet/Dry Cycling Measured by Ultrasonic Method[J]. Bulletin of Chinese Ceramic Society, 2013, 32(7):1405-1409.
- [10] 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.  
GAO Run-dong, ZHAO Shun-bo, LI Qing-bin, et al. Experimental Study of the Deterioration Mechanism of Concrete Under Sulfate Attack in Wet-dry Cycles[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(2):48-54.
- [11] 邢明亮, 关博文, 陈拴发, 等. 硫酸盐腐蚀与疲劳荷载联合作用下混凝土劣化特性[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2):249-254.  
XING Ming-liang, GUAN Bo-wen, CHEN Shuan-fa, et al. Deterioration Characteristics of Concrete Under Sulfate Erosion and Fatigue Load[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(2):249-254.
- [12] 杨礼明, 余红发, 麻海燕, 等. 混凝土在碳化和干湿循

- 环作用下的抗硫酸盐腐蚀性能[J]. 复合材料学报, 2012, 29(5): 127-133.
- YANG Li-ming, YU Hong-fa, MA Hai-yan, et al. Resistance of Concrete to Magnesium Sulfate Attack Under Combined Action of Carbonation and Dry-wet Cycles[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(5): 127-133.
- [13] 马昆林, 谢友均, 龙广成. 毛细作用下硫酸盐溶液在混凝土中传输速率的试验研究[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(10): 1448-1455.
- MA Kun-lin, XIE You-jun, LONG Guang-cheng. Transportation Velocity of Sulfate Solution in Concrete Under Capillary Effect[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(10): 1448-1455.
- [14] 徐存东, 刘辉, 聂俊坤, 等. 受侵蚀混凝土耐久性衰减影响因素试验研究[J]. 混凝土, 2015(3): 1-4.
- XU Cun-dong, LIU Hui, NIE Jun-kun, et al. Experimental Study on the Impact Factor of the Attenuation of Eroded Concrete Durability[J]. Concrete, 2015(3): 1-4.
- [15] SANTHANAM M, COHEN M D, OLEK J. Effects of Gypsum Formation on the Performance of Cement Mortars During External Sulfate Attack[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(3): 325-332.
- [16] 唐灵, 黄琪, 王清远, 等. 同一硫酸盐环境下地聚物混凝土与普通混凝土的耐蚀性能及机理分析[J]. 材料导报, 2015, 29(3): 129-134.
- TANG Ling, HUANG Qi, WANG Qing-yuan, et al. Research on Corrosion Resistance and Relevant Mechanism of Geopolymer Concrete and Ordinary Concrete in the Same Sulfate Solution[J]. Materials Review, 2015, 29(3): 129-134.
- [17] 蒋春阳. 盐渍土路基防治措施与选择标准[J]. 筑路机械与施工机械化, 2013, 30(2): 46-48.
- JIANG Chun-yang. Preventive Measures and Selection Criteria of Saline Soil Subgrade[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2013, 30(2): 46-48.
- [18] 耿强, 刘杰. 极旱荒漠盐湖区超氯盐渍土路用性能试验研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2014, 31(6): 51-54.
- GENG Qiang, LIU Jie. Study on Pavement Performance of Ultra-chloride Saline Soil in Extremely Arid Desert Salt Lake[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2014, 31(6): 51-54.
- [19] 苏建彪, 唐新军, 刘向楠, 等. 水胶比及粉煤灰掺量对混凝土抗硫酸盐、镁盐双重侵蚀性能的影响[J]. 粉煤灰综合利用, 2014(5): 30-32.
- SU Jian-biao, TANG Xin-jun, LIU Xiang-nan, et al. The Influence on Double Erosion Performance of Resistance to Sulfate and Magnesium Salt by Water-cement Ratio and Dosage of Fly Ash to Portland Cement Concrete[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2014(5): 30-32.
- [20] GB/T 50123—1999, 土工试验方法标准[S].
- GB/T 50123—1999, Standard for Soil Test Method [S].
- [21] 乔宏霞, 周茗如, 朱彦鹏, 等. 混凝土抗硫酸盐腐蚀性的参数评价[J]. 粉煤灰综合利用, 2008(5): 3-6.
- QIAO Hong-xia, ZHOU Ming-ru, ZHU Yan-peng, et al. Assessment Parameter for Concrete Performance of Anti-sulfate Erosion[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2008(5): 3-6.
- [22] 乔宏霞. 混凝土抗硫酸盐腐蚀耐久性的评价方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2007.
- QIAO Hong-xia. The Durability Parameter Assessment of Concrete Resistance Under Sulfate Corrosion [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2007.
- [23] 何海杰. 兰州地区现场暴露普通混凝土耐久性试验研究及寿命预测[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- HE Hai-jie. Experimental Research on the Durability and Life Prediction of the Ordinary Concrete Field Exposure in Lanzhou [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.