

文章编号:1672-3961(2024)04-0115-07 DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.117

# 氯盐干湿循环下风积沙混凝土微观结构演变

董伟<sup>1,2</sup>, 朱相茹<sup>1\*</sup>, 王雪松<sup>1</sup>, 周梦虎<sup>1</sup>

(1. 内蒙古科技大学土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古自治区土木工程安全与耐久性重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:**为探究干湿循环作用下风积沙混凝土内部微观结构的演变规律, 试验采用河砂质量的0、25%、50%、75%及100%的风积沙替代河砂制备混凝土, 在NaCl质量分数为3.5%的溶液中进行干湿循环试验。利用扫描电镜、核磁共振等技术对氯盐干湿循环作用下风积沙混凝土(aeolian sand concrete, ASC)的微观结构及氯离子侵蚀机理进行分析。结果表明: 随风积沙质量分数增大, ASC内部自由氯离子质量分数先减小后增大; 随侵蚀深度的增加, 自由氯离子质量分数逐渐减小; 氯盐干湿循环使ASC内部产生了大量盐结晶, 结晶压力造成ASC内部孔结构劣化, 核磁共振 $T_2$ 图谱不断右移, 其中采用河砂质量的100%的风积沙替代河砂的混凝土(A100)在氯盐干湿循环过程中损伤最严重。

**关键词:**风积沙混凝土; 氯盐干湿循环; 微观结构; 自由氯离子; 侵蚀机理

中图分类号: TU528

文献标志码: A

**引用格式:**董伟, 朱相茹, 王雪松, 等. 氯盐干湿循环下风积沙混凝土微观结构演变[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(4): 115-121.

DONG Wei, ZHU Xiangru, WANG Xuesong, et al. The microstructure evolution of aeolian sand concrete under dry-wet cycles of chlorine salt solution[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(4): 115-121.

## The microstructure evolution of aeolian sand concrete under dry-wet cycles of chlorine salt solution

DONG Wei<sup>1,2</sup>, ZHU Xiangru<sup>1\*</sup>, WANG Xuesong<sup>1</sup>, ZHOU Menghu<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** In order to investigate the evolution of the internal microstructure of aeolian sand concrete under the action of dry-wet cycling, Tests were conducted using 0, 25%, 50%, 75% and 100% of the mass of river sand in place of river sand for concrete preparation, and the dry-wet cycling test was carried out in a solution with a NaCl mass fraction of 3.5%. Scanning electron microscope, nuclear magnetic resonance and other techniques were used to analyze the microstructure and chloride erosion mechanism of ASC under the dry and wet cycles of chloride salt. The results showed that the mass fraction of free chloride ions inside the ASC decreased and then increased with the increase of the mass fraction of aeolian sand concrete, and the mass fraction of free chloride ions gradually decreased with the increase of the erosion depth. The dry and wet cycles of chloride salts produced a large amount of salt crystals inside the ASC, and the crystals pressure caused the deterioration of the internal pore structure of the ASC, and the nuclear magnetic resonance  $T_2$  pattern was constantly shifted to the right, in which A100 was most seriously damaged during the chlorine salt dry-wet cycling process.

**Keywords:** aeolian sand concrete; dry-wet cycle of chlorine salt solution; microstructure; free chloride; erosion mechanism

收稿日期: 2023-06-05

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(52268044); 内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2021LHMS05019); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费资助项目(2023QNJS161); 内蒙古科技大学建筑科学研究所开放基金资助项目(JYSJJ-2021Q01)

**第一作者简介:**董伟(1987—), 男, 内蒙古包头人, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要研究方向为绿色建筑材料。E-mail: dw617@126.com

\* **通信作者简介:**朱相茹(1998—), 女, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要研究方向为混凝土耐久性。E-mail: 3403628674@qq.com

## 0 引言

随着我国基础建设领域的快速发展,对砂石等自然资源的需求不断增大。砂石资源的大量开采不仅造成自然资源日益匮乏,而且对生态环境造成破坏。作为混凝土原材料的河砂已经不能满足当前建设规模的需求,因此寻找新的天然砂石替代品尤为重要。风积沙是一种在沙漠及戈壁地区经受风吹、沉淀作用下形成的特细沙,在我国西北地区储量丰富,不仅开采方便且价格低廉<sup>[1]</sup>。用其替代河砂制备风积沙混凝土是缓解建筑用砂短缺的有效途径,对于助力西部沙漠地区各项设施发展有重要意义。

由于西部盐湖地区存在大量氯离子,易对混凝土结构产生较为严重破坏,因此对混凝土抗氯离子侵蚀的研究具有重要实际意义。同时,干湿循环作用对盐湖地区服役混凝土的性能影响尤为显著<sup>[2-3]</sup>。干燥和湿润2种环境交替作用使氯离子更容易侵入混凝土内部,造成孔洞和裂缝的扩展,最后形成裂纹,对混凝土结构耐久性产生较大影响<sup>[4-6]</sup>。任何材料微观结构变化对其宏观性能均有较大影响<sup>[7]</sup>,因此混凝土的宏观性能取决于其微观结构的改变<sup>[8]</sup>。文献[9]研究了氯盐干湿循环共同作用下混凝土孔结构的变化规律,结果表明,在润湿和干燥2个阶段,反应产物会在孔隙中溶解迁移,

影响孔结构的连通性;文献[10]基于核磁共振技术研究了干湿循环对再生混凝土微观结构的影响,研究表明随着干湿循环次数增加,再生混凝土孔结构间相互连通,且孔径不断增大;文献[11]对氯盐干湿循环后混凝土微观结构变化进行研究,结果表明,氯盐干湿循环作用使混凝土抗渗性增强,临界孔径增大。

综上,目前对于风积沙混凝土(aeolian sand concrete, ASC)在氯盐干湿循环作用下微观结构变化的研究较少,本研究针对氯盐干湿循环作用下ASC的劣化规律开展研究,通过扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)及核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)等技术分析氯盐干湿环境下ASC的微观结构和孔隙结构,从微观层面揭示ASC在氯盐干湿循环共同作用下的损伤机理,为ASC在实际工程中的应用提供依据。

## 1 试验

### 1.1 试验原材料

水泥采用P·O42.5级普通硅酸盐水泥。粉煤灰为Ⅱ级粉煤灰。细骨料选用库布其沙漠风积沙(100%取代河砂),粒径为0.075~0.215 mm。粗骨料采用5~25 mm连续级配碎石,骨料物理性能指标见表1。外加剂选用减水率23%、含固量7%的复合高效减水引气剂。

表1 骨料物理性能指标  
Table 1 Physical performance of aggregate

项目	表观密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	堆积密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	颗粒尺寸/mm	含泥量/%
河砂	2 610	1 550	<4.75	0.9
风积沙	2 630	1 570	0.075~0.215	0.3
碎石	2 590	1 610	5~25	1.5

### 1.2 试验设计

以C30强度的普通混凝土配合比作为试验基准组,混凝土配制配合比依据文献[12],确保坍落度大于等于150 mm,外加剂为胶凝材料质量的1%,水胶质量比为0.55,砂率0.42。用河砂质量的0%、25%、50%、75%及100%的风积沙制备ASC。以取代率0%为基准组,记为A0,以此类推。配合比如表2所示。

试验选用100 mm×100 mm×100 mm的立方体试块,养护至龄期26 d将试件从标养室取出,干燥2 d。干湿循环试验参照4 d(干湿时间比1:3)为一

个循环周期,浸泡溶液选用质量分数为3.5%的NaCl溶液,干湿循环每进行5次对试块分层取粉,采用文献[13]检测试块粉末中自由氯离子质量分数并记录相关数据。

### 1.3 试验方法

为观测风积沙混凝土在氯盐干湿循环后内部结构变化,采用SEM、NMR等技术进行微观试验。NMR选用直径为50 mm、长度为50 mm的圆柱体试样,氯盐干湿循环结束后对试样进行钻心取孔并进行24 h真空饱水处理,待试样达到饱和状态后擦除表面水分进行NMR试验。

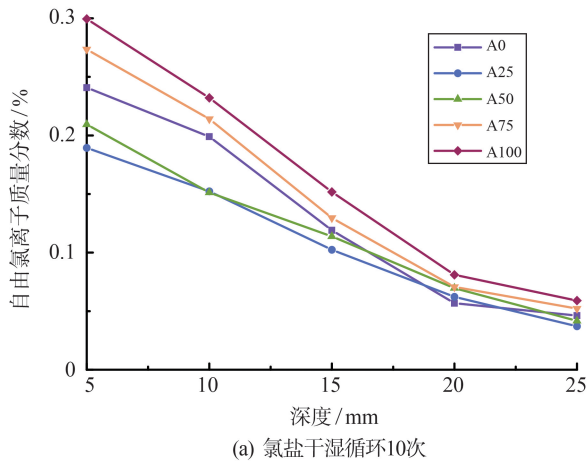
表2 混凝土配合比及基本性能指标  
Table 2 Concrete mix proportion and basic performance index

组别	每 m <sup>3</sup> 混凝土 水泥用量/kg	每 m <sup>3</sup> 混凝土 水用量/kg	每 m <sup>3</sup> 混凝土 风积沙用量/kg	每 m <sup>3</sup> 混凝土 碎石用量/kg	每 m <sup>3</sup> 混凝土 河砂用量/kg	每 m <sup>3</sup> 混凝土 粉煤灰用量/kg	28 d 抗压 强度/ MPa
A0	297	180	0	1 090	800	33	33.7
A25	297	180	200	1 090	600	33	36.0
A50	297	180	400	1 090	400	33	34.5
A75	297	180	600	1 090	200	33	33.0
A100	297	180	800	1 090	0	33	30.2

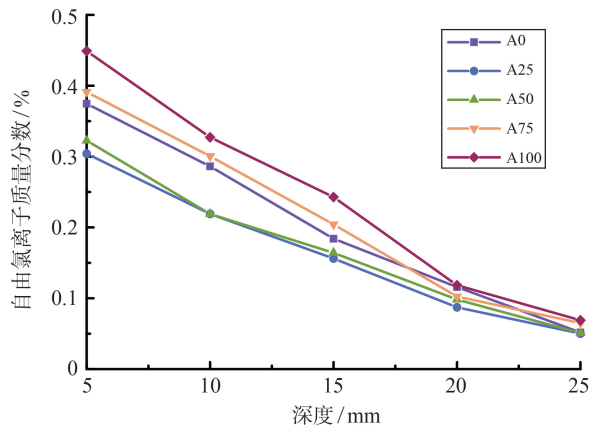
## 2 结果与分析

### 2.1 氯盐干湿循环作用对氯离子质量分数的影响

氯盐干湿循环 10 次、25 次后 ASC 不同深度处自由氯离子质量分数的变化曲线如图 1 所示。



(a) 氯盐干湿循环10次



(b) 氯盐干湿循环25次

图1 不同氯盐干湿循环次数下风积沙混凝土自由氯离子质量分数

Fig.1 Free chloride ion mass fraction of aeolian sand concrete under different dry-wet cycles of chlorine salt solution

由图 1 可知:(1) ASC 内部自由氯离子质量分

数受干湿循环次数的影响较为明显,随干湿循环次数增加,相同深度处自由氯离子质量分数明显增大。(2) 试件表面自由氯离子质量分数较高,距离侵蚀面越远,混凝土内部自由氯离子质量分数越低;干湿循环 10 次和 25 次时,5 组 ASC 在距离表面 25 mm 处自由氯离子质量分数约为 0.05%,说明到达一定深度后自由氯离子质量分数趋于稳定。(3) A100 组的自由氯离子质量分数最高,下降幅度更高,抗氯离子侵蚀能力最差;A25 组自由氯离子质量分数较其他组更低,下降幅度更小,抗氯离子侵蚀能力最好。

混凝土表层氯离子侵蚀主要依靠毛细吸附作用,其速度大于氯离子的扩散作用,故短时间内 ASC 表面自由氯离子质量分数较高<sup>[14-18]</sup>。随氯盐干湿循环进行,自由氯离子侵入混凝土内部,扩散速率减慢,自由氯离子质量分数降低。深度 25 mm 处自由氯离子质量分数趋于稳定,由此表明氯盐干湿循环 25 次后氯离子传输深度小于 25 mm。同时,风积沙质量分数变化对氯离子的侵入有较显著的影响,随风积沙质量分数增加,ASC 内自由氯离子质量分数先减小后增大,其原因为适量风积沙的掺入能够改善骨料颗粒级配,由于风积沙较河砂粒径更小,能够填充骨料间的空隙,因此当风积沙质量分数为 25% 及 50% 时 ASC 内部更为密实,阻碍了氯离子的扩散<sup>[19]</sup>。随风积沙质量分数的继续增大,骨料比表面积增大,导致胶凝材料对骨料包裹程度降低,A75 及 A100 组内部结构疏松多孔,氯离子更容易向 ASC 内部扩散<sup>[20]</sup>。

### 2.2 SEM 微观结构形貌

为更加直观地研究风积沙质量分数变化及氯盐-干湿循环作用对 ASC 微观结构的影响,分别对 A0、A25 及 A100 组进行 SEM 试验,3 组混凝土养护 28 d 后的 SEM 照片如图 2 所示。

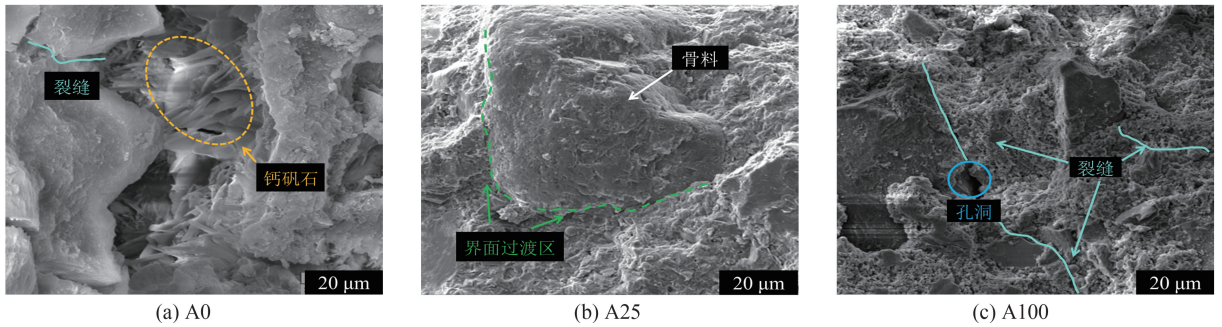


图2 A0、A25、A100 侵蚀前 SEM 照片

Fig.2 The SEM photos of A0, A25 and A100 concrete before chloride erosion

由图 2(a)可见,A0 组内部结构较为疏松,水化产物较少且水化产物填充不密实。由图 2(b)可见,A25 组由于掺入风积沙对其内部产生填充作用,混凝土孔隙度有所降低,其微观结构更加密实,水泥水化产物与骨料整体性更好。由图 2(c)可知,A100 组微观结构较为疏松,界面过渡区(interfacial transition zone, ITZ)出现裂缝和孔隙,且出现了独

立的大型孔洞。当风积沙质量分数较高时,在制备过程中混凝土内部会产生较多气孔,由于风积沙比表面积较大,胶凝材料包裹性的不足弱化了 ASC 的 ITZ 结构,使其更为疏松并出现裂缝。

A0、A25 及 A100 组 ASC 干湿循环 25 次后的微观形貌图如图 3 所示。

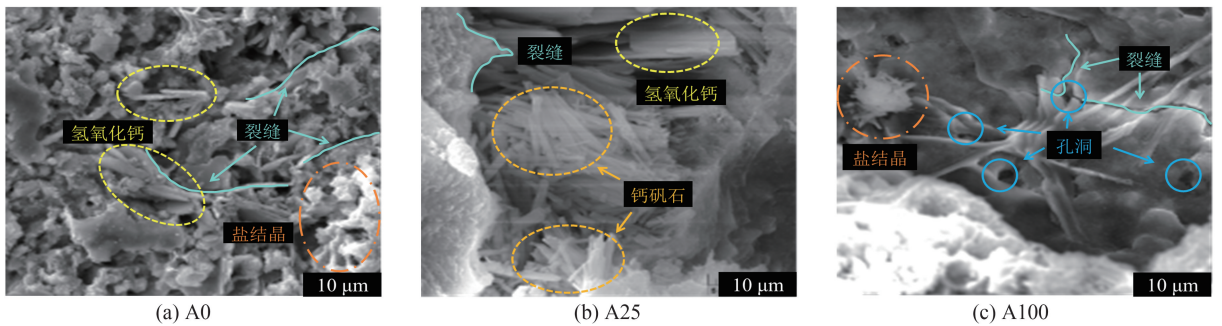


图3 A0、A25、A100 侵蚀后 SEM 照片

Fig.3 The SEM photos of A0, A25 and A100 concrete after chloride erosion

从图 3 可知,干湿循环 25 次后,ASC 内部较为疏松且内部出现较多裂缝。这是因为氯离子随着干湿循环作用进入 ASC 内部与水化产物  $C_3A$  反应生成 Friedel 盐;同时,溶液中的氯离子渗入混凝土基体中,吸附在钙矾石表层,削弱了水化产物的胶结能力,使混凝土产生更大的缝隙;此外,由于盐溶液中钠离子的存在,强化了混凝土内部颗粒表面的双电层,削弱了内部颗粒结构的黏结力,增大了混凝土的缝隙<sup>[21-22]</sup>。由图 3(c)可见,孔隙壁存在较为明显的裂缝,由于 A100 组内部结构不够密实,随氯离子不断侵蚀,反应产物及盐结晶对孔隙壁的压力使孔径不断变大,造成 ASC 孔隙逐渐劣化。湿润阶段,在毛细吸收及 NaCl 溶液扩散的双重作用下,大量 NaCl 溶液向混凝土内部迁移,并逐渐填充孔隙;干燥阶段,水分的蒸发造成混凝土内部 NaCl 质量分数不断升高,最终以 NaCl 晶体的形式析出,并填充了 ASC 中原有孔隙及裂缝。随干湿循环进行,不断产生的盐结晶会对混凝土的孔壁产生挤压,使得

混凝土原有的裂缝发展和扩张,并产生新的孔隙和裂缝,为氯离子进一步侵蚀作用提供了新的接触面和通道,故 A100 组在干湿循环作用后内部产生较大的裂缝和孔洞。

### 2.3 NMRT<sub>2</sub> 谱分析

A0、A25 和 A100 组经氯盐干湿循环 0、10 和 25 次后的核磁共振  $T_2$  图谱如图 4 所示。由图 4 可知,ASC 核磁共振  $T_2$  图谱基本呈现 3 个峰值。干湿循环 0 次时,A0 及 A100 组第一峰峰值弛豫时间变化不大。氯盐干湿循环 10 次后,A0 及 A25 组第一峰峰值弛豫时间分别由 2.248、3.525 ms 变为 1.956、2.543 ms, A100 组的第一峰峰值弛豫时间由 3.654 ms 左移至 2.583 ms,说明混凝土孔隙孔径在变小。氯盐干湿循环 25 次后,A0、A100 及 A25 第一峰峰值弛豫时间分别右移至 2.583、4.824 和 3.623 ms,表明混凝土孔隙孔径在变大。ASC 的  $T_2$  谱首峰均出现左移,表明适量的风积沙掺入可以较好地填充混凝土内部孔隙,提高基体密实度,使部

分大孔向小孔转化。在氯盐干湿循环前期,产生的盐结晶填充了部分孔洞,造成大孔向小孔转化。随干湿循环进行,NaCl 晶体对孔隙壁产生压力,造成 ASC 孔结构劣化,  $T_2$  图谱右移。而 A25 组内部结构更为致密,在干湿循环作用时能较好抵抗氯离子侵蚀。

此外,第二峰信号幅度和第三峰信号幅度变化有明显的交替,表明随干湿循环进行,混凝土内部

孔隙破坏过程呈不均匀性。对比 A100 氯盐干湿循环 10 次和 25 次的  $T_2$  图谱可知,第一峰顶点信号幅度下降了 12.17%,第二峰顶点信号幅度则增加了 8.29%。表明随氯盐干湿循环进行,氯盐侵蚀产生的盐结晶使孔隙结构劣化严重,内部小孔以及新劣化的孔隙向大孔方向生成。所以 A100 在氯盐干湿循环 25 次时各个深度的自由氯离子质量分数始终保持较高,抵抗氯离子的侵蚀能力要低于其他组。

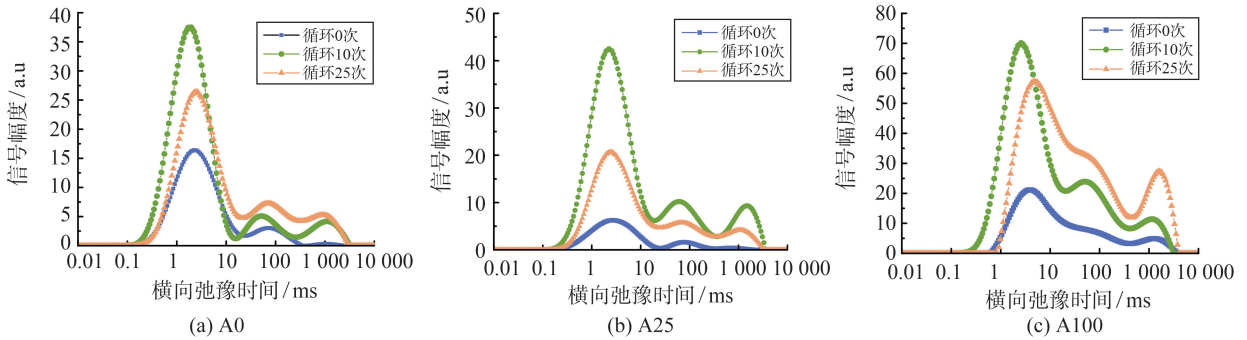


图 4 不同干湿循环周期的  $T_2$  谱图  
Fig.4  $T_2$  spectra of concrete in different periods of dry-wet cycles

2.4 NMR 孔隙演变

将 A0、A25 和 A100 的 NMR 测试结果按照孔径区间大小(按孔径的大小分为 4 类<sup>[13]</sup>:超微孔(1 ~ 10 nm)、微毛细孔(10 ~ 100 nm)、大毛细孔

(100 ~ 1 000 nm)、非毛细孔(1 000 ~ 10 000 nm)) 进行分类,并绘制成孔径分布占比图,结果如图 5 所示。

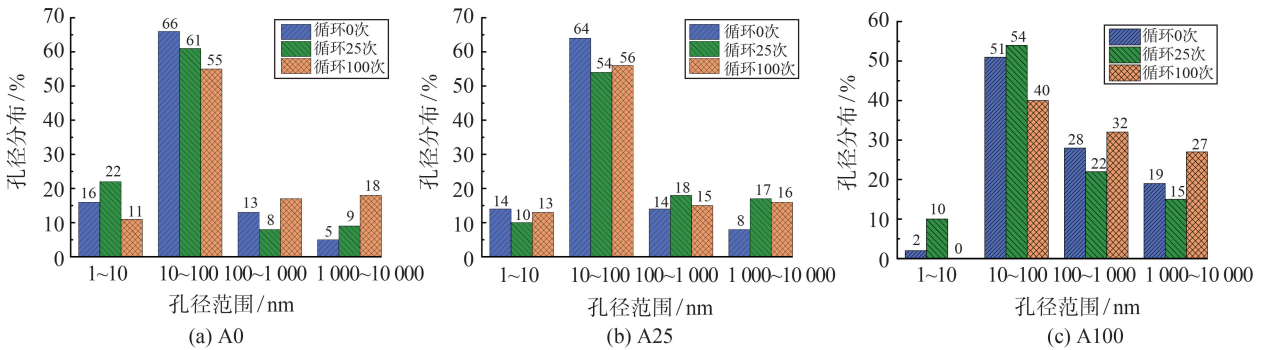


图 5 不同干湿循环周期孔隙分布图  
Fig.5 Pore distribution of concrete in different dry-wet cycles

由图 5 可知:3 组 ASC 的超微孔和微毛细孔占比随氯盐溶液干湿循环次数的增加逐渐减小;大毛细孔与非毛细孔占比随氯盐干湿循环次数增加而增加。以 A25 组为例,氯盐干湿循环 0 次时,超微孔及微毛细孔之和占总孔隙体积的 78%,100 nm 以上的孔隙占 22%;氯盐干湿循环 10 次时,超微孔及微毛细孔之和占总孔隙体积的 64%,100 nm 以上的孔隙占 35%;氯盐干湿循环 25 次后,超微孔与微毛细孔占比 69%,100 nm 以上的孔隙占 31%。说明 ASC 在经历氯盐干湿循环后,由于其表面受到较强烈的腐蚀,且侵蚀不断向内部发展,造成 ASC 内部裂缝和孔洞迅速扩张,为氯离子的侵蚀提供了新的

通道和路径,劣化作用更加明显,新产生的孔隙数量也不断增多。

整个氯盐干湿循环过程中,A25 组超微孔和微毛细孔减少相对较低,大毛细孔和非毛细孔增加相对较少,说明由于 A25 组内部结构较为密实,加之氯盐干湿循环耦合作用下产生的结晶体对 ASC 内部起填充作用,使得混凝土的孔结构演变趋势相对较好;而 A100 中大毛细孔和非毛细孔的占比在干湿循环的整个过程都是最大的,可见 A100 孔隙结构分布最差,这是因为风积沙骨料级配不良,ASC 内部存在大量不均匀的孔隙,盐溶液容易向 ASC 内部侵入,加快了氯离子侵蚀。

### 3 结论

(1) A100 组的自由氯离子质量分数最高, 下降幅度较高, 抗氯离子侵蚀能力最差。当风积沙质量分数取代率为 25% 时, 自由氯离子的质量分数在各个深度都表现的最低, 最低为在 20 ~ 25 mm 处, 此时自由氯离子质量分数为 0.05%。混凝土内部自由氯离子质量分数随着侵入深度增加而减小并逐渐趋于平缓, 25 mm 处的混凝土没有受到氯离子的侵蚀, A25 组抗氯离子侵蚀能力最好。

(2) 随着氯盐干湿循环次数的增加, A0 混凝土和 A100 混凝土第一峰顶点时间均出现明显延长, 而 A25 混凝土第一峰顶点时间延长不明显。另外, 第二峰顶点信号幅度和第三峰顶点信号幅度变化有明显的交替, 对比 A100 干湿循环 10 次和 25 次的  $T_2$  图谱可知, 第一峰顶点信号幅度下降了 12.17%, 第二峰顶点信号幅度则增加了 8.29%。

(3) 氯盐干湿循环作用下, A100 内部氯盐侵蚀产生的盐结晶使孔隙结构劣化严重, 内部小孔以及新劣化的孔隙向大孔方向生成。而 A25 内部结构比较致密, 能较好抵抗氯离子侵蚀。

(4) 随着氯盐干湿循环次数的增加, 超微孔和微毛细孔逐步向非毛细孔发展, 盐结晶对非毛细孔的损伤要高于超微孔和微毛细孔。A100 混凝土非毛细孔占比最高, 经过 10 次干湿循环作用, 非毛细孔数量减少 4%, 但经过 25 次干湿循环后, 非毛细孔数量增长 8%, 新的裂缝及孔隙为氯离子向内部迁移提供通道, 加快了氯离子对 ASC 的侵蚀。

#### 参考文献:

[1] BAI J, XU R, ZHAO Y, et al. Flexural fatigue behavior and damage evolution analysis of aeolian sand concrete under freeze-thaw cycle[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 171: 107583.

[2] TIAN Y, JIN N G, JIN X Y. Coupling effect of temperature and relative humidity diffusion in concrete under ambient conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 159: 673-689.

[3] ZHANG D S, MAO M J, ZHANG S R, et al. Influence of stress damage and high temperature on the freeze-thaw resistance of concrete with fly ash as fine aggregate[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 229: 116845.

[4] ZHANG G H, LIZ L, ZHANG L F, et al. Experimental research on drying control condition with minimal effect on concrete strength[J]. *Construction and Building*

*Materials*, 2017, 135: 194-202.

[5] NIU X J, LIQ B, LIU W J, et al. Effects of ambient temperature, relative humidity and wind speed on interlayer properties of dam concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 260: 119791.

[6] 王静薇. 混凝土微观结构与强度的关系[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

WANG Jingwei. The relationship between fine microstructure and the strength of concrete [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

[7] 蔡健, 李名铠, 陈庆军, 等. 干湿循环下受弯钢筋混凝土梁的氯盐侵蚀[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(11): 2840-2850.

CAI Jian, LI Mingkai, CHEN Qingjun, et al. Chloride salt erosion of bent reinforced concrete beams under dry and wet cycles[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2019, 50(11): 2840-2850.

[8] JIANG L, NIU D. Study of deterioration of concrete exposed to different types of sulfate solutions under drying-wetting cycles [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 117: 88-98.

[9] LIU H, LIU C, BAI G, et al. Study on the effect of chloride ion ingress on the pore structure of the attached mortar of recycled concrete coarse aggregate[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 263: 120123.

[10] 陈克凡, 乔宏霞, 王鹏辉, 等. 基于 NMR 的再生混凝土干湿循环可靠性评估[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(7): 88-92.

CHEN Kefan, QIAO Hongxia, WANG Penghui, et al. Reliability assessment of wet and dry cycles of recycled concrete based on NMR[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(7): 88-92.

[11] 赵喜云, 吴建华. 氯盐干湿循环作用下混凝土力学性能与孔结构变化研究[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(4): 220-226.

ZHAO Xiyun, WU Jianhua. Study on mechanical properties and pore structure changes of concrete under chloride salt dry and wet cycling[J]. *Water Resources and Hydropower Technology*, 2020, 51(4): 220-226.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[13] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程混凝土试验检测技术规范: JTS/T236—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.

[14] YUAN J, LIU Y, TAN Z, et al. Investigating the failure process of concrete under the coupled actions between sulfate attack and drying-wetting cycles by using X-ray CT [J]. *Construction and Building Materials*, 2016,

- 108; 129-138.
- [15] 李永强, 巴明芳, 柳俊哲, 等. 干湿循环作用下水泥基复合材料抗氯离子侵蚀[J]. 复合材料学报, 2017, 34(12): 2856-2865.
- LI Yongqiang, BA Mingfang, LIU Junzhe, et al. Chloride ion erosion resistance of cementitious composites and their microstructural changes under dry and wet cycling [J]. Journal of Composite Materials, 2017, 34(12): 2856-2865.
- [16] LI Y, ZHANG H, LIU X, et al. Time-varying compressive strength model of aeolian sand concrete considering the harmful pore ratio variation and heterogeneous nucleation effect [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 1-15.
- [17] 韩学强, 詹树林, 徐强, 等. 干湿循环作用对混凝土抗氯离子渗透侵蚀性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(1): 198-204.
- HAN Xueqiang, ZHAN Shulin, XU Qiang, et al. Effects of dry and wet cycling on the resistance of concrete to chloride ion penetration and erosion [J]. Journal of Composite Materials, 2020, 37(1): 198-204.
- [18] 肖阳. 风积沙混凝土水分和氯离子传输行为及寿命预测[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2021.
- XIAO Yang. Water and chloride ion transport behavior and life prediction of aeolian sand concrete [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2021.
- [19] QU K, LI G, YU C, et al. Evaluation method of pore throat distribution in tight sandstones based on NMR  $T_2$  spectrum [J]. Mud Logging Engineering, 2023, 34(2): 1-8.
- [20] DU J, SHEN X, LI C, et al. Effect of dry-wet cycles on the strength and deformation of the red-bed rockfill material in western Yunnan [J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1192269.
- [21] LI Y, ZHANG H, LIU G, et al. Multi-scale study on mechanical property and strength prediction of aeolian sand concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 247: 118538.
- [22] 刘倩, 申向东, 薛慧君, 等. 氯盐侵蚀和干湿循环条件下浮石混凝土的耐久性 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 137-143.
- LIU Qian, SHEN Xiangdong, XUE Huijun, et al. Durability of pumice concrete under chloride salt erosion and dry-wet cycling conditions [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 34(21): 137-143.

(编辑:郭少华)

(上接第114页)

- [24] 朱遥, 刘春, 刘辉, 等. 颗粒形态对砂土抗剪强度影响的试验和离散元数值模拟 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(3): 490-499.
- ZHU Yao, LIU Chun, LIU Hui, et al. Experimental and discrete element numerical simulation of the effect of particle morphology on the shear strength of sandy soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 490-499.
- [25] 刘春. 地质与岩土工程矩阵离散元分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2020: 66-70.
- LIU Chun. Discrete element analysis of geological and geotechnical engineering matrices [M]. Beijing: Science Press, 2020: 66-70.
- [26] 刘春. 基于孔隙密度流的岩土体离散元流固耦合数值模拟方法; CN 110263362 A [P]. 2019-04-25.
- [27] YUAN C, CHAREYRE B. A pore-scale method for hydromechanical coupling in deformable granular media [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 318: 1066-1079.
- [28] VLEESHAUWE R P, MAERTEN S. Jet grouting: state of the art in Belgium [J]. Ground Improvement Geosystems, 2000(4): 145-156.
- [29] DABBAGH A A, GONZALEZ A S, PENA A S. Soil erosion by a continuous water jet [J]. Soils Found, 2002, 42(5): 1-13.
- [30] 王志丰, 沈水龙, 许焯霜. 基于圆形断面自由紊动射流理论的旋喷桩直径计算方法 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1957-1960.
- WANG Zhifeng, SHEN Shuilong, XU Yeshuang. A diameter calculation method for rotary jet piles based on the theory of free turbulent jet flow in circular cross-sections [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(10): 1957-1960.

(编辑:郭少华)