

# 毛细作用下风积沙混凝土水分和氯离子 传输特性试验

董伟<sup>1</sup>,付前旺<sup>1</sup>,刘鑫<sup>2,3</sup>,薛慧君<sup>2</sup>,肖阳<sup>1</sup>

(1. 内蒙古科技大学土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3. 鄂尔多斯应用技术学院土木工程系, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

**摘要** 目的 研究毛细作用下水分和氯离子在风积沙混凝土中的传输特性, 探讨风积沙掺量、氯盐质量浓度对水分和氯离子侵入的影响规律。方法 试验制备了5组不同掺量的风积沙混凝土, 按照比例为0%、25%、50%、75%、100%等质量替换普通河砂, 通过自然扩散法进行风积沙混凝土毛细吸水/盐试验。结果 风积沙混凝土毛细吸收曲线前1 d内均呈线性增长, 而后逐渐趋于水平; 混凝土在氯化钠溶液中的毛细吸收量和毛细吸收系数大于清水溶液, 毛细吸收系数随风积沙掺量的增加呈现先减小后增大的趋势, 最小值出现在风积沙掺量为25%。风积沙混凝土中水分和氯离子传输深度呈明显线性关系, 当水分传输趋于稳定时, 氯离子由于扩散作用依旧向内部传输。通过水分和氯离子侵入深度及两者关系, 毛细作用下风积沙混凝土中风积沙掺量宜控制在20%~30%。结论 风积沙混凝土中水分和氯离子传输非同步, 水分渗透速率大于氯离子渗透速率。当水分渗透逐渐稳定时, 氯离子会继续向混凝土内部渗透。

**关键词** 风积沙混凝土; 水分和氯离子; 氯盐浓度; 载体; 非同步; 毛细吸收系数

中图分类号 TU528

文献标志码 A

## Transmission Characteristics of Water and Chloride Ions in Aeolian Sand Concrete under Capillary Suction

DONG Wei<sup>1</sup>, FU Qianwang<sup>1</sup>, LIU Xin<sup>2,3</sup>, XUE Huijun<sup>2</sup>, XIAO Yang<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou, China, 014010; 2. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, China 010018; 3. Department of Civil Engineering, Ordos Institute of Technology, Ordos, China 017000)

**Abstract:** The purpose of this paper is to study the transmission characteristics of water and

收稿日期: 2021-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51769025); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2020BS05008); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY17408); 内蒙古科技大学创新基金项目(2019QDL-B48); 鄂尔多斯应用技术学院科研重点项目(KYZD2020003)

作者简介: 董伟(1987—), 男, 副教授, 博士, 主要从事绿色建筑材料方面研究。

chloride ions in aeolian sand concrete under capillary action, and the influence of aeolian sand content and chloride salt concentration on the intrusion of water and chloride ions. In this experiment, five groups samples of aeolian sand concrete were prepared by 0%, 25%, 50%, 75%, 100% mass ratio of aeolian sand replacing the ordinary river sand. And on these samples the capillary water absorption / capillary salt tests were carried out by the natural diffusion method. The results show that the capillary absorption curve of aeolian sand concrete increases linearly in the first 1 d, and then gradually tends to level; The capillary absorption and capillary absorption coefficient for concrete in sodium chloride solution are both greater than that of in clear aqueous solution. The capillary absorption coefficient first decreases and then increases with the increase of the aeolian sand content, when the aeolian sand content is 25%, it reaches the minimum. The transmission depth of water and chloride ions in the aeolian sand concrete is obviously linear. When the transmission of water becomes stable, the chloride ions are still into the The transmission of water and chloride ions in aeolian sand concrete is asynchronous, and the penetration rate of water is greater than that of the chloride ion. due to diffusion. Based on the intrusion depth of water and chloride ions and their relationship, the amount of aeolian sand in the aeolian sand concrete should be controlled at 20% to 30% under capillary action. The transmission of water and chloride ions in aeolian sand concrete is asynchronous, and the penetration rate of water is greater than that of the chloride ion. When the moisture penetration gradually stabilizes, chloride ions is still penetrated continuously to the inside of concrete.

**Key words:** Aeolian sand concrete; water and chloride ions; chloride salt concentration; carrier; asynchronous; capillary absorption coefficient

混凝土作为一种应用广泛的人造石材,随着消耗量呈现逐年增加的趋势,混凝土原材料资源匮乏逐渐凸显。风积沙是经受风吹、积淀作用形成的一种特细砂,主要存在于沙漠和戈壁,其特点是天然含水率低,颗粒均匀细小,主要化学成分是  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。若将风积沙替代普通河砂制备混凝土,可以产生良好的社会效益和经济效益。混凝土材料是由气体、液体和固体三相组合而成的混合物,内部存在大量孔隙,环境中的有害离子会渗透到混凝土内部与混凝土水化产物发生一系列物理、化学反应,导致混凝土结构性能劣化,进而影响混凝土结构的耐久性<sup>[1-2]</sup>。氯离子在混凝土中的迁移与内部孔隙和水分密切相关,随着氯离子在混凝土中的迁移,部分氯离子会改变混凝土水化产物的微观形貌及其孔结构,某种程度上对氯离子在混凝土中的传输存在一定影响<sup>[3-4]</sup>。混凝土的耐久性性能劣化呈现形式多种多样,而大多数混凝土耐久性能与冻融、干湿循环、碳化、干燥收缩

等劣化现象的发生和机理都在某种程度上与水分存在和迁移密切相关。氯离子等有害离子渗透到混凝土材料孔隙结构内部是通过水分子作为运载体,进而引起一系列混凝土材料性能劣化反应。罗大明等<sup>[5-6]</sup>研究表明:混凝土种类、水胶比、养护条件等因素对混凝土水分传输的影响主要是因为水泥水化和混凝土材料的孔隙率不同而造成;建立了孔结构与毛细吸收系数的函数关系。ZHANG Peng<sup>[7]</sup>发现夹带空气会大大降低毛细管吸水率和氯离子渗透;溶解在水中的氯离子从渗透的盐溶液中过滤出来,并保持浓缩在表面附近。由于钢筋混凝土结构大多数都处于非饱和状态,然而非饱和状态下毛细吸附力的存在,使得氯离子更容易侵入混凝土材料空隙内部。混凝土材料在非饱和状态下毛细吸附力起主导作用,然而混凝土材料孔隙液中毛细吸附力的大小是由混凝土材料内部相对湿度决定<sup>[8-9]</sup>。近年来,风积沙混凝土的工作性能、物理力学性能和耐久性能得到广

泛研究。风积沙掺量在 20% ~ 30% 时,对混凝土的性能提升较为明显;当风积沙全部替代普通河砂时,混凝土的性能下降较为显著<sup>[10]</sup>。产生这样的原因主要是因为风积沙颗粒有别于普通河砂,适量的风积沙掺入使得混凝土的孔结构和界面区得到改善。而过多的风积沙加入使得孔隙率和有害孔数量增加,进而降低了混凝土的性能<sup>[11]</sup>。风积沙混凝土及水分和氯离子在普通混凝土中的传输已经得到了广泛研究并取得了丰硕的研究成果,但是针对水分和氯离子在风积沙混凝土中的传输特性鲜有报道。为此,笔者对毛细吸收作用下水分和氯离子在风积沙混凝土中的迁移规律进行研究,探讨风积沙掺量、氯盐

浓度对水分和氯离子侵入深度的影响规律。

# 1 试 验

## 1.1 试验原材料

水泥:P·O42.5 普通硅酸盐水泥。粗骨料:5 ~ 25 mm 连续级配普通碎石。细骨料包括普通河砂和风积沙,其中普通河砂取自内蒙古包头市周边砂厂,细度模数为 2.9;风积沙取自内蒙古鄂尔多斯市库布齐沙漠腹地,主要粒径为 0.075 ~ 0.25 mm,细骨料主要物理性能如表 1 所示。粉煤灰:Ⅱ级粉煤灰。水:普通自来水。外加剂:聚羧酸复合高效减水引气剂,减水率为 23%。

表 1 细骨料主要物理性能指标  
Table 1 Main physical performance indexes of fine aggregate

细骨料	表观密度 / ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	堆积密度 / ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	含泥量/%	含水率/%	细度模数	氯质量分数/ %
河砂	2 610	1 550	0.9	2.0	2.9	0.25
风积沙	2 660	1 570	0.3	0.2	0.8	0.02

## 1.2 风积沙混凝土配合比及试验方法

根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55—2011)的规定进行配合比设计。以 0%、25%、50%、75%、100% 的风积沙替代等质量的普通河砂配制风积沙混凝土,风积沙混凝土配合比如表 2 所示。试验根据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/

T50080—2016)中混凝土制备工艺,采用强制式搅拌机进行风积沙混凝土的搅拌制作,并依照规范进行混凝土拌合物工作性能的测试,而后将混凝土拌合物注入试模,用塑料薄膜覆盖防止水分蒸发,待 24 h 后脱模、编号,将混凝土试件放入温度  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、湿度 95% 以上的标准环境养护室中养护 28 d。

表 2 风积沙混凝土配合比及基本性能  
Table 2 Mixture ratio and basic performance indexes of aeolian sand concrete

组别	掺量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )							28 d 抗压 强度/MPa	坍落度/mm
	水泥	粉煤灰	河砂	风积沙	石子	水	外加剂		
A0	297	33	800	0	1 090	180	3.3	33.8	195
A25	297	33	600	200	1 090	180	3.3	36.0	210
A50	297	33	400	400	1 090	180	3.3	34.6	185
A75	297	33	200	600	1 090	180	3.3	32.9	170
A100	297	33	0	800	1 090	180	3.3	30.7	155

试验选用长宽高为 100 mm × 100 mm × 100 mm 立方体试件,将试件放置  $(85 \pm 5)^\circ\text{C}$

烘箱烘干至恒重,然后冷却至室温,最后用铝箔胶带将试件 4 个侧面封闭仅留成型面和底

面。各试件毛细吸收之前用精度 0.01 g 电子秤称量并记录其初始质量,试件接触水分开始计时,毛细吸收不同时间点称量试块的重量并记录,3 个试块为 1 组取平均值。毛细吸盐试验中,将试块浇筑面向上未密封面朝下放置于尼龙棒上,缓慢加入质量分数为 3.5% 和 10% 的 NaCl 溶液腐蚀溶液,直至液面高出试块底面 ( $4 \pm 1$ ) mm,然后分别在毛细吸收 1 d、7 d、14 d、28 d 时间点劈开试件,用直尺测量水分侵入深度,接着在劈开的表面喷洒浓度为 0.1 mol/L 的硝酸银溶液,然后测量氯离子的平均侵入深度。

2 结果与分析

2.1 风积沙掺量对混凝土毛细吸收量的影响

图 1 为不同风积沙掺量下混凝土毛细吸收量随时间平方根的变化关系。从图 1 可知,随着风积沙掺量的增大,毛细吸收量呈先减小后增大的趋势。同一溶液作用下,风积

沙掺量 100% 和 75% 的风积沙混凝土毛细吸收量较大,而风积沙掺量 25% 和 50% 的风积沙混凝土毛细吸收量较小。各组风积沙混凝土毛细吸收量随着时间平方根增长而增大,毛细吸收前 24 h,混凝土毛细吸收量随时间平方根呈现线性增加,而在毛细吸收 24 h 之后,随着毛细吸收的进行,混凝土毛细吸收量增长缓慢,毛细吸收曲线逐渐趋向水平。原因是在烘干试块至恒重后,试块刚接触到不同浓度盐溶液时,水分和氯离子在毛细吸附力作用下快速渗入混凝土内部,而随着毛细吸收时间的推移,试块孔隙内部相对湿度逐渐增大,毛细管作用力减小,同时由于溶液自身重量的存在,导致毛细吸收速度减缓,毛细吸收曲线逐向趋于水平。水分吸入后在水和空气界面区会形成稳定或半稳定的半月板形态,阻碍水分的进入,且作为亲水材料的混凝土随着水分不断侵入,毛细孔壁和水摩擦力增大,使得吸水减缓<sup>[12]</sup>。

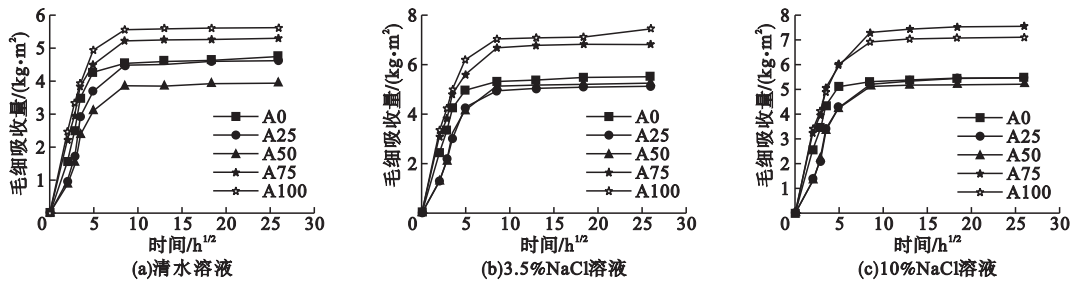


图 1 不同风积沙掺量下混凝土的毛细吸收量

Fig. 1 Capillary absorption of concrete under different aeolian sand content

混凝土胶凝材料水泥水化过程中,由于水化过程产物比反应物要大,反应产物会占据一定的充水空间,反应完成后未填充的空间就变成毛细孔。随着混凝土二次水化及水分的蒸发作用消耗了混凝土中部分水分,毛细孔处于非饱水状态。适量风积沙掺入混凝土之中,会导致混凝土内部更加密实,堵塞了水分传输通道,而随着风积沙掺量越来越多,混凝土中胶凝材料不足以覆盖细骨料,产生较多孔洞,水分侵入通道增多,毛细吸收作用

更加明显<sup>[13]</sup>。

2.2 氯盐溶液浓度对混凝土毛细吸收量的影响

为了更佳直观的表述氯盐溶液质量浓度对风积沙混凝土毛细吸收速率的影响规律,选取 3 组 A0、A25、A100 混凝土进行分析(见图 2)。从图 2 可知,相同吸收时间,相对于 NaCl 溶液浓度为 0% 的清水溶液中的毛细吸附作用,在 3.5% NaCl 溶液和 10% NaCl 溶液作用下,风积沙混凝土毛细吸附量较大。



其原因是 NaCl 溶液密度大于清水的密度,当水分通过毛细吸附力作用下进入混凝土孔隙内部时,水分作为载体把氯离子运输到混凝土孔隙内部,一方面氯离子通过物理吸附在混凝土的毛细孔壁和 C-S-H 上;另一方面氯离子与水化产物化学结合生成 Friedel's 盐,而其他侵入的氯离子则继续向混凝土内部深处侵入。从图 2 可知,相同风积沙掺量混凝土中,毛细吸收前期 10% NaCl 溶液中

毛细吸收量大于 3.5% NaCl 溶液,而后期 3.5% NaCl 溶液和 10% NaCl 溶液两者对混凝土毛细吸收量的影响不大,甚至在部分风积沙掺量的混凝土中,10% NaCl 溶液中毛细吸收量小于 3.5% NaCl 溶液中毛细吸收量。分析其原因是随着 NaCl 溶液浓度的提高,后期随着溶液侵入量的累积,溶液易在混凝土内部孔隙中产生结晶,阻碍 NaCl 溶液的进一步传输,因而毛细吸收量减小。

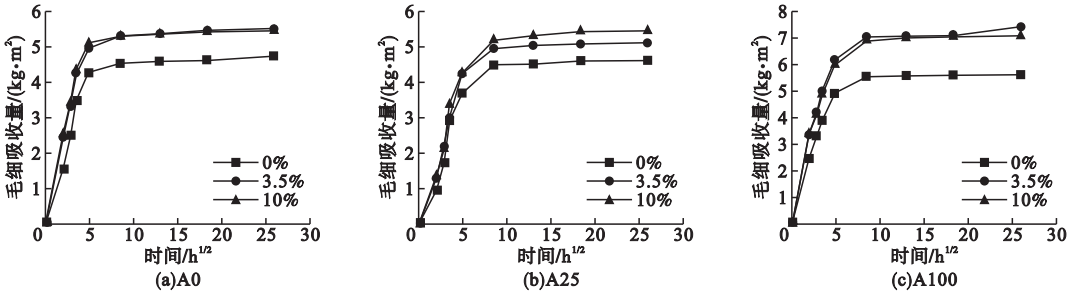


图 2 不同 NaCl 溶液浓度对混凝土毛细吸收的影响

Fig. 2 Influence of different NaCl solution concentration on capillary absorption of concrete

2.3 风积沙混凝土毛细吸收系数的变化规律

毛细吸收系数是评价混凝土材料耐久性的重要指标,表示外界侵蚀介质进入混凝土速率的快慢。图 3 为不同溶液中各掺量风积沙混凝土毛细吸收系数。从图 3 可知,各掺量风积沙混凝土随着毛细吸收 NaCl 溶液浓度的增大,其毛细吸收系数也逐渐增大。氯盐溶液作用下混凝土的毛细吸收系数远远大于清水溶液,10% NaCl 溶液较 3.5% NaCl 溶液作用下毛细吸收系数增长不大,部分试件的毛细吸收系甚至小于 3.5% NaCl 溶液。在 NaCl 溶液中,氯离子随着水分侵入混凝土内部,并慢于水分,因而在浓度梯度驱使下氯离子继续向内部侵入,导致在 NaCl 溶液中毛细吸收系数比清水作用下大。在 10% NaCl 溶液与混凝土试块接触时,混凝土内部孔隙会迅速充满氯离子和钠离子,一部分离子物理吸附在毛细孔内壁和 C-S-H 上,导致毛细孔通道缩小甚至堵塞,水分和氯离子侵入量减少。而 3.5% NaCl 溶液作用下

的混凝土试块,由于溶液中离子较少,虽然没有 10% NaCl 溶液中浓度梯度大,但所受阻碍较小,因而导致 10% NaCl 溶液中毛细吸收系数略大于甚至小于 3.5% NaCl 溶液中毛细吸收系数。

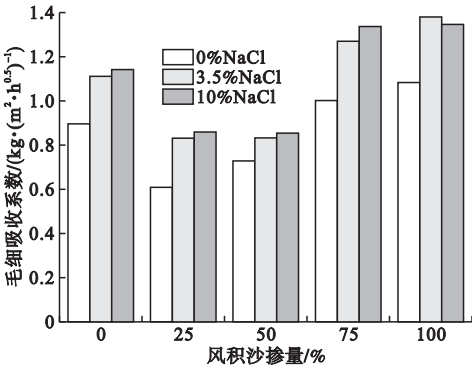


图 3 不同溶液中风积沙混凝土毛细吸收系数

Fig. 3 Capillary absorption coefficient of aeolian sand concrete in different solutions

从图 3 中可以看出,相同毛细吸收溶液作用下,随着风积沙掺量的增加,风积沙混凝土毛细吸收系数呈现先减小后增大趋势,最大值在风积沙掺量 100% 时,最小值在风积沙掺量 25% 时。在 3.5% NaCl 溶液作用下,

A0 的毛细吸收系数为  $1.1109\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h}^{1/2})$  ,而 A25 和 A100 混凝土的毛吸系数分别为  $0.8318\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h}^{1/2})$  和  $1.3798\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h}^{1/2})$  ,相对于基准组 A0 分别增长了  $-36.21\%$  、 $24.21\%$  。混凝土毛细吸收系数取决于混凝土砂浆中毛细孔的数量及孔径大小,适宜掺量的风积沙混凝土内部孔隙率较低,毛细孔之间连接性较差,水分不易于在混凝土内部迁移,因而导致风积沙掺量 25% 和 50% 的混

凝土毛细吸收系数减小,而随着风积沙掺量的逐渐增大,砂浆显得不足,混凝土内部孔隙增多,混凝土密实性较差,导致毛细吸收系数增大<sup>[11]</sup>。

2.4 风积沙混凝土中水分和氯离子侵入深度

水分和氯离子侵入深度随时间平方根变化关系如图 4 所示。

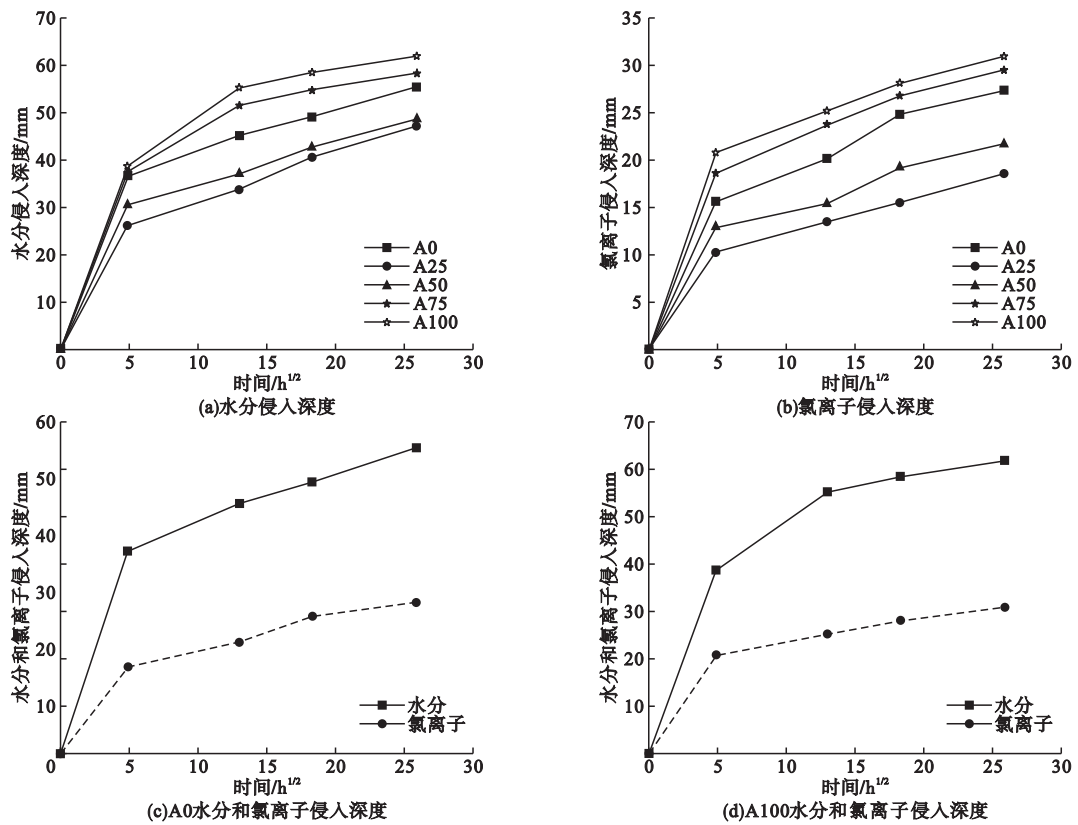


图 4 水分和氯离子侵入深度随时间平方根变化关系

Fig. 4 The relationship between the penetration depth of water and chloride ions with the square root of time

从图 4(a)、(b)中可以看出,随着毛细吸收时间的增长,水和氯离子侵入深度逐渐增大,前期增长较快,而后期增长缓慢。且 A75 和 A100 试验组后期水分侵入曲线比其他试验组平缓,这是因为风积沙掺量较大时,混凝土内部大孔隙较多,有更多的溶液被吸入,产生结晶堵塞孔洞。相同毛吸时间下, A25 混凝土水分和氯离子侵蚀深度最小,而 A100 侵蚀深度最大。如毛细吸收 28 d 时,基准组 A0 水分侵入深度为 55.3 mm,而 A25 和 A100 水分侵入深度分别为 47.1 mm、61.8 mm。这是因为风积沙掺量 100% 试验组混凝土内部密实性较差,孔隙率较大,孔隙之间的连通性较好,水分和氯离子更加容易在其内部传输。而风积沙掺量 25% 时混凝土内部较为密实,孔隙率较低,孔径较小,阻碍了水分和氯离子的侵入<sup>[14]</sup>。对比图 4(a)、4(b)可以发现,相同毛细吸收时

间,氯离子较水分入侵深度较浅,且相同掺量风积沙混凝土,随着毛细吸收时间的推移,前期水分和氯离子侵入深度曲线呈线性增长,后期水分和氯离子侵入深度曲线呈较为平缓增长趋势。当风积沙混凝土试件刚开始接触盐溶液时,水分和氯离子前期快速侵入风积沙混凝土内部。后期随着水分的不断侵入,风积沙混凝土内部相对湿度不断增大,其内部孔隙逐渐趋于饱和,使得其孔隙液毛细吸附力变小,水分侵入深度增加缓慢,水分侵入深度曲线趋于平缓,然而氯离子在浓度梯度作用下持续向风积沙混凝土孔隙内部侵入。当水分侵入风积沙混凝土孔隙内部,由于自身重力和毛细吸附力相当时,此时水分以扩散的方式向风积沙混凝土孔隙内部迁移。随着风积沙毛细吸收时间的增加,风积沙混凝土孔隙内部生成氯化钠结晶导致风积沙混凝土内部孔隙更加密实,使水分和氯离子在风积沙混凝土内部侵入速度变慢。相反,氯离子在浓度梯度作用下主要以扩散的方式不断向风积沙混凝土内部侵入。原因是在混凝土和砂浆中,氯离子扩散速率大于钠离子扩散速率,然而氯离子不能完全独立存在与混凝土和砂浆孔隙液中,周围钠、钾等阳离子不断与氯离子结合,保持孔隙液的电中性,当氯离子在混凝土砂浆中不断向前移动时,周围移动相对较缓的钠、钾等阳离子会和氯离子间形成反向电场,由于电场力作用使氯离子向相反方向移动<sup>[15]</sup>,因此水分和氯离子在风积沙混凝土中迁移出现不同步性。

图 5 为水分和氯离子侵入深度的关系,从图 5 中可以看出,随着风积沙混凝土中水分渗透深度的增加,风积沙混凝土中氯离子的渗透深度也逐渐增大,且水分和氯离子渗透深度近似呈现出线性关系。通过拟合得出水分和氯离子侵入深度的性函数方程,各组拟合结果如表 3 所示。从表 3 数据可以看出,随着风积沙掺量的增大水分和氯离子侵入深度的线性关系先增强后减弱,拟合相关

系数均大于 0.9,线性相关性良好。毛细吸收前期,混凝土内部水分和氯离子具有同步性,随着毛细吸收的进行氯离子和混凝土中水泥水化产物结合,而水分则继续向内部迁徙,导致二者出现非同步性。风积沙掺量 25% 的混凝土,由于内部密实,孔隙率较低,所以吸收溶液较少,故而氯化钠结晶较少<sup>[14]</sup>。而 100% 掺量试件由于内部孔隙较多,吸收大量的溶液,内部产生较多氯化钠结晶消耗氯离子,致使水分和氯离子侵入深度线性关系较弱。

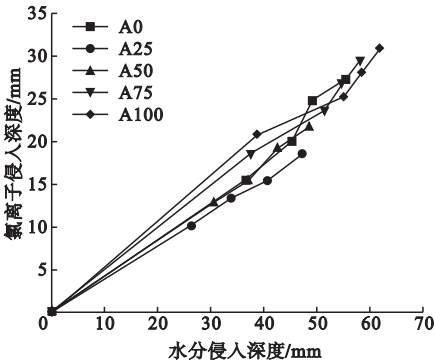


图 5 水分和氯离子侵入深度关系曲线  
Fig. 5 Relationship curve between water and chloride ions penetration depth

表 3 水分和氯离子侵入关系拟合方程  
Table 3 Fitting equation of relationship between water and chloride ions penetration

组别	拟合方程	$R^2$
A0	$y = 0.475\ 3x$	0.996
A25	$y = 0.391\ 6x$	0.999
A50	$y = 0.473\ 1x$	0.998
A75	$y = 0.488\ 4x$	0.998
A100	$y = 0.487\ 8x$	0.997

3 结 论

(1)各组混凝土毛细吸收曲线前期均呈线性增长,而后由于溶液自身重量和孔隙壁的摩擦,毛细吸收曲线逐渐趋向于水平。风积沙掺量大于 75% 时,混凝土的毛细吸收量较大;而风积沙掺量小于 50% 时,混凝土的

毛细收量较小,且变化幅度差异较小。

(2)混凝土在氯盐溶液中的毛细吸收量和毛细吸收系数大于清水溶液,且随氯盐浓度的增加而增大,但增幅较小。毛细吸收系数随风积沙掺量的增加呈现先减小后增大的趋势,最小值在风积沙掺量为25%时。

(3)风积沙混凝土中水分和氯离子传输非同步,水分渗透速率大于氯离子渗透速率。当水分渗透逐渐稳定时,氯离子会继续向混凝土内部渗透。

参考文献

[1] 常洪雷,金祖权. 无碳化影响时干湿交替下水泥基材料中氯离子传输行为[J]. 东南大学学报(自然科学版),2019,49(6):1153-1161.  
(CHANG Honglei, JIN Zuquan. Chloride transport behavior in cementitious-based materials under cyclic drying-wetting condition without influence of carbonation [J]. Journal of southeast university ( natural science edition ), 2019,49(6):1153-1161. )

[2] 刘志勇,汤安琪,王加佩,等. 非饱和水泥基复合材料的氯离子传输性能研究进展[J]. 材料导报,2020,34(15):15083-15091.  
(LIU Zhiyong, TANG Anqi, WANG Jiawei, et al. Research progress on chloride ion transport properties in unsaturated cement-based composites [J]. Materials review, 2020, 34(15):15083-15091. )

[3] 张鹏,刘庆,耿文超,等. 水和氯离子在砂浆中的迁移规律[J]. 硅酸盐学报,2017,45(2):235-241.  
(ZHANG Peng, LIU Qing, GENG Wenchao, et al. Migration of water and chloride ions in mortar [J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2017,45(2):235-241. )

[4] 马颖. 凝石混凝土的抗氯离子渗透性能分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2014,30(1):126-130.  
(MA Ying. Analysis of anti-chloride ion penetration performance of condensate concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university ( natural science ), 2014,30(1):126-130. )

[5] 罗大明,牛荪涛. 不同水胶比及养护条件对内养护混凝土吸水性能的影响[J]. 建筑结构学报,2019,40(1):165-173.  
(LUO Daming, NIU Ditao. Influences of water-to-cement ratio and curing condition on water absorption of internal curing concrete [J]. Journal of building structures, 2019, 40

(1):165-173. )

[6] 郭秋生. 混凝土的毛细吸水特性及其与孔结构的关系[J]. 工业建筑,2020,50(3):119-123.  
(GUO Qiusheng. Capillary water absorption characteristics of concrete and its relationship with pore structure [J]. Industrial construction, 2020,50(3):119-123. )

[7] ZHANG P, WITTMANN F H, VOGELM, et al. Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete [J]. Cement and concrete research, 2017,100:60-67.

[8] SUN C T, YUAN L Q, ZHAI X F, et al. Numerical and experimental study of moisture and chloride transport in unsaturated concrete [J]. Construction and building materials, 2018,189:1067-1075.

[9] CHANG H L, JIN Z Q, ZHAO T J, et al. Capillary suction induced water absorption and chloride transport in non-saturated concrete; the influence of humidity, mineral admixtures and sulfate ions [J]. Construction and building materials, 2020,236:117581.

[10] LI Y G, ZHANG H M, LIU G X, et al. Multi-scale study on mechanical property and strength prediction of aeolian sand concrete [J]. Construction and building materials, 2020,247:118538.

[11] LIU Q, SHEN X D, WEI L S, et al. Grey model research based on the pore structure fractal and strength of NMR aeolian sand lightweight aggregate concrete [J]. Journal of the minerals, metals & materials society (TMS), 2020,72(1):536-543.

[12] BAO J W, LI S G, ZHANG P, et al. Influence of the incorporation of recycled coarse aggregate on water absorption and chloride penetration into concrete [J]. Construction and building materials, 2020,239:117845.

[13] DONG W, SHEN X D, XUE H J, et al. Research on the freeze-thaw cyclic test and damage model of Aeolian sand lightweight aggregate concrete [J]. Construction and building materials, 2016,123:792-799.

[14] 苏英. 盐冻环境下风积沙混凝土耐久性研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2019.  
(SU Ying. Research on durability of aeolian sand concrete in salt-freezing environment [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2019. )

[15] TANG L P. Chloride transport in concrete-measurement and prediction [D]. Sweden: Chalmers University of Technology, 1996.  
(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)