

文章编号:1007-9629(2023)06-0623-08

碳化-盐冻作用下风积沙混凝土损伤劣化机理 及寿命预测

董 伟^{1,2,*}, 王雪松¹, 计亚静¹, 王 栋¹, 薛 刚¹

(1. 内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古科技大学 内蒙古自治区建筑结
构防灾减灾工程技术研究中心, 内蒙古 包头 014010)

摘要:为评估风积沙混凝土碳化-盐冻作用后的耐久性能,以质量损失率、相对动弹性模量、抗压强度为指标,分析碳化作用对风积沙混凝土抗冻性能的影响,通过扫描电镜(SEM)与核磁共振(NMR)技术分析碳化-盐冻后其内部结构和孔结构变化特征,采用 Wiener 随机过程概率分布预测碳化作用后风积沙混凝土盐冻循环寿命。结果表明:碳化作用提高了混凝土强度,且使得盐冻循环作用下质量损失率增加,相对动弹性模量下降;无害孔与有害孔的比值反应了混凝土内部结构损伤特征;相对动弹性模量对混凝土盐冻环境最敏感,碳化 28 d 混凝土经受 372 次盐冻循环后完全失效。

关键词:风积沙混凝土;碳化作用;Wiener 随机过程;寿命预测

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.06.007

Damage Deterioration Mechanism and Life Prediction of Aeolian Sand Concrete under Carbonization and Salt Freezing

DONG Wei^{1,2,*}, WANG Xuesong¹, JI Yajing¹, WANG Dong¹, XUE Gang¹

(1. College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. Inner Mongolia Autonomous Region Engineering Technology Research Center of Building Structure Disaster
Prevention and Reduction, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: In order to evaluate the durability of aeolian sand concrete after carbonation and salt freezing, the mass loss rate, relative dynamic elastic modulus and compressive strength were used as indicators to analyze the effect of carbonation on the frost resistance of aeolian sand concrete. The internal structure and pore structure change characteristics after carbonation-salt freezing were analyzed by scanning electron microscope (SEM) and nuclear magnetic resonance (NMR) techniques, and the freeze-thaw cycle life of aeolian sand concrete after carbonation was predicted by Wiener stochastic process probability distribution. The results show that carbonation could improve the strength of concrete under the situation of the freeze-thaw cycles, and the mass loss rate is increased after the carbonation. At the same time the relative dynamic modulus of elasticity is reduced. The ratio of harmless hole to harmful hole reflects the damage characteristics of concrete internal structure. The relative dynamic elastic modulus of concrete is the most sensitive index to freeze-thaw environment, and after 28 days of carbonation, the concrete is completely invalidated after 372 cycles of salt freezing.

Key words: aeolian sand concrete; carbonization; Wiener stochastic process; life prediction

收稿日期:2022-07-19; 修订日期:2022-09-12

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);内蒙古科技大学建筑科学研究所开放基金项目(JYSJJ-2021Q01)

第一作者(通讯作者):董 伟(1987—),男,内蒙古包头人,内蒙古科技大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail:dw617@126.com

中国西部有着丰富的风积沙资源,若将其就地取材运用到工程实际中,不仅会改善天然河砂短缺的现状,也有利于环保.盐湖寒冷地区混凝土不仅会遭受冻融循环破坏,还受到 CO_2 与 Cl^- 等环境侵蚀^[1-3].

碳化对混凝土结构产生密实作用,而冻融使其结构松散化.肖前慧等^[4]和Li等^[5]发现碳化处理后的混凝土更加密实,碳化时间越长,混凝土抗冻性能越好,碳化提升了混凝土的抗冻融循环能力.有学者探究表明碳化作用延缓了冻融过程中混凝土孔径孔隙结构衰变^[6-7],有利于提高抗冻耐久性能;但在后期碳化破坏了气孔稳定性,加剧了混凝土结构劣化.邹欲晓^[8]通过风积沙混凝土冻融碳化试验发现,冻融会使混凝土孔隙呈现“两极化”分布,碳化会使孔隙呈现“均一化”分布.

综上所述,碳化作用产生的碳化产物能够改变

混凝土孔隙分布,提升混凝土密实度,冻融和碳化作用对混凝土孔径产生不同的影响.为了进一步研究碳化-盐冻作用下风积沙混凝土的耐久性能,试验选用风积沙掺量¹⁾为100%的风积沙混凝土进行研究(文献[9]表明风积沙掺量100%的混凝土抗冻性能最优),以期为风积沙混凝土在严寒盐渍地区的使用提供更多参考.

1 试验

1.1 原材料与配合比

水泥采用普通硅酸盐水泥P·O 42.5;粉煤灰采用Ⅱ级粉煤灰;风积沙来自鄂尔多斯市库布奇沙漠;粗骨料为5~20 mm连续级配碎石;外加剂采用减水率为23%的聚羧酸减水剂.骨料主要物理性能见表1.

表1 骨料主要物理性能
Table 1 Main physical properties of aggregates

Type	Apparent density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Bulk density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Mud content (by mass)/%	Moisture content (by mass)/%	Fineness modulus	Crush index(by mass)/%
Aeolian sand	2 660	1 560	0.39	0.2	0.8	
Coarse aggregate	2 590	1 620	0.20	0.2		3.8

本文以100%的风积沙替代普通河砂来制备风积沙混凝土,以C30普通混凝土配合比为基准组,水胶比取0.55,砂率取0.39,坍落度不小于150 mm,含气量为4.5%.混凝土配合比见表2.

表2 混凝土配合比
Table 2 Mix proportion of concrete

Cement	Fly ash	Aeolian sand	Stone	Water	Superplasticizer
320.0	35.0	720.0	1 130.0	195.0	7.1

1.2 试验方法

按照GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行混凝土试件成型及养护,养护28 d后对风积沙混凝土进行碳化试验.碳化试验依据GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行,碳化时间取0、14、28 d,对应试件分别记作C0、C1、C2,测得其碳化深度分别为2.8、6.7、17.8 mm.随后采用质量分数为3.5%的NaCl溶液进行快速盐冻循环试验,盐冻循环次数(n)取0、50、100、150、200次,分别记作D0、D1、D2、D3、D4.对应试件编号以C-D来表示,如试件C0-D4表示碳化0 d、盐冻循环200次的风积沙混凝土.探究碳

化-盐冻作用下风积沙混凝土抗压强度、质量损失率、相对动弹性模量的变化规律.通过扫描电镜(SEM)与核磁共振(NMR)等微观手段分析盐冻循环前后混凝土的微观形貌变化和孔隙特征.抗压强度试验选用尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件,质量损失率与相对动弹性模量试验选用尺寸为100 mm×100 mm×400 mm的棱柱体试块,核磁共振分析选用 $\phi 50\times 48$ mm的圆柱体试件.

2 结果与分析

2.1 抗压强度

图1给出了试件C0、C1、C2在盐冻作用下的抗压强度变化趋势.由图1可知:随着盐冻循环的进行,3组混凝土抗压强度不断减小,盐冻循环前期抗压强度下降速度更慢;盐冻循环0次时,试件C2、C1的抗压强度分别是试件C0的1.13、1.09倍;盐冻循环200次时,试件C2、C1抗压强度分别是试件C0的1.50、1.33倍.由此可见,碳化作用能够缓解混凝土盐冻后的抗压强度损失.

CO_2 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 CaCO_3 ,从而填充混凝土孔隙,降低渗透性,提高强度^[10].随着盐冻循环的不断进行,碳化作用对混凝土抗压强度增强效果

1)文中涉及的掺量、比值等除特别说明外均为质量分数或质量比.

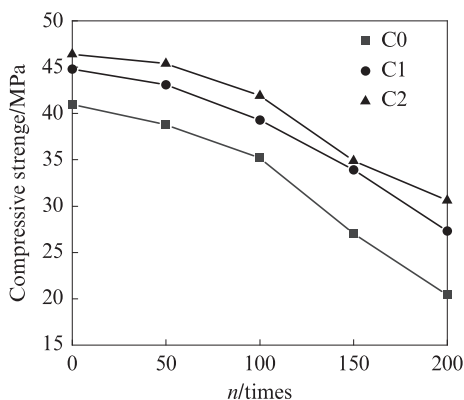


图1 抗压强度

Fig. 1 Compressive strength

逐步放大,缓解了混凝土在盐冻循环中的强度损失,并且碳化时间越长,碳化作用在盐冻循环过程中的积极效果越明显.但盐冻循环后期,裂缝不断发展,混凝土内部封闭孔洞不断减少,对冻胀力缓解降低,故碳化在盐冻后期对混凝土抗压强度损失的缓解效果不明显.

2.2 质量损失率

图2给出了试件C0、C1、C2在盐冻作用下的质量损失率.由图2可知,试件C0的质量损失率在盐冻前期呈负增长,随着盐冻的进行,质量损失率为正增长.冻结过程水相变产生的膨胀应力会引起团聚体微裂缝,水分通过裂缝进入混凝土导致质量增加;融化过程中,随着温度的升高,孔隙内冰融化,部分微裂缝闭合.随着盐冻循环不断累计,试件表面裂缝不断形成,表面出现剥落现象,质量损失率增加^[11].

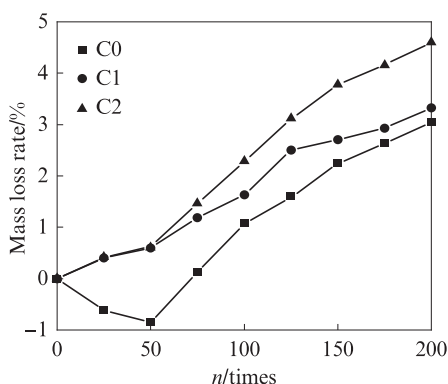


图2 质量损失率

Fig. 2 Mass loss rate

试件C1、C2质量损失率在整个盐冻循环过程中不断增加,混凝土碳化后,表层收缩裂纹的产生与盐冻水的渗入使孔隙因静水压力与渗透压力多重作用而相互贯通^[12],外界介质更容易进入混凝土内部,加速混凝土损伤进程,使其质量损失率增加^[13].盐冻作用导致混凝土表面砂浆脱落,致使其内部发生损伤,

生成裂隙和孔洞,结构酥松,因此混凝土抗压强度、相对动弹性模量下降,质量损失率增加.

2.3 相对动弹性模量

图3给出了试件C0、C1、C2在盐冻作用下的相对动弹性模量.由图3可知,试件C0相对动弹性模量随盐冻循环进行而呈现先上升后下降趋势,试件C1、C2组混凝土相对动弹性模量随着盐冻循环的进行而不断下降,3组混凝土相对动弹性模量排序为C0>C1>C2.这是因为碳化作用引起混凝土体积减缩,在冻结压力作用下形成局部应力集中,加速微裂纹发展,从而导致混凝土在碳化后相对动弹性模量降低^[12].由图3还可知:盐冻循环进行到50次时,C0组相对动弹性模量达到最大值113.8%,比C1和C2组分别高20.5%、29.9%;盐冻循环进行到200次时,C0组相对动弹性模量为71.9%,比C1和C2组分别高3.1%、11.9%,这说明碳化使风积沙混凝土在盐冻循环前期相对动弹性模量明显下降,但对盐冻循环后期影响不大.

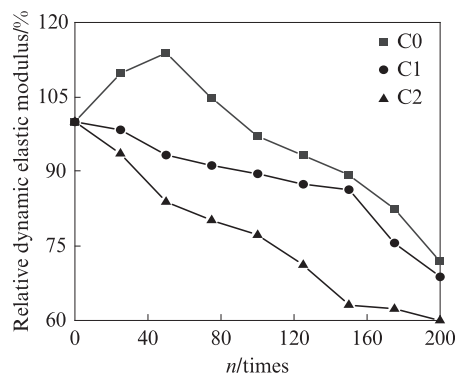


图3 相对动弹性模量

Fig. 3 Relative dynamic modulus of elasticity

由于盐冻初期内部水结冰,孔隙内盐溶液浓度升高,导致盐结晶填充内部孔隙,盐冻产生的膨胀应力释放于内部孔洞,故试件C0相对动弹性模量出现先增加后减少趋势.碳化后混凝土内有碳酸钙等产物的生成,阻碍氯离子入侵,延缓盐结晶形成,导致试件C1、C2相对动弹性模量下降;碳化使混凝土内部收缩,故碳化后混凝土相对动弹性模量在整个盐冻过程中均低于未碳化混凝土.

2.4 扫描电镜微观分析

图4为试件C0和C2盐冻循环200次后的SEM图.由图4(a)可知,盐冻循环200次时,试件C0内部存在不同尺寸的孔洞,骨料和砂浆剥离严重,存在贯通的长裂缝,裂缝长度大于50 μm.对比图4(b)可知,碳化作用后小孔数量明显减少,骨料和砂浆之间界面区被碳化产物包裹,密实度明显提升,盐冻损伤后试件C2的缝宽明显小于试件C0,且试件C2孔洞周

围有大量 CaCO_3 , 密实度优于 C0, 表明碳化作用可以削弱盐冻循环对混凝土的破坏, 此时混凝土微观结构破坏主要受到冻胀效应形成的静水压力的影响^[10].

界面过渡区 (ITZ) 作为混凝土内较为薄弱的范围, 往往成为混凝土最先破坏的区域. 风积沙颗粒较

小, 可以很好地形成挤压作用, 既可以减小气泡滞留数量, 又可以使滞留的大气泡分散成小气泡, 最终形成不连通的小孔隙, 从而使风积沙混凝土内部小孔隙增加^[14], 此时, ITZ 结构明显改善, 风积沙混凝土抗盐冻循环的能力得到提升.

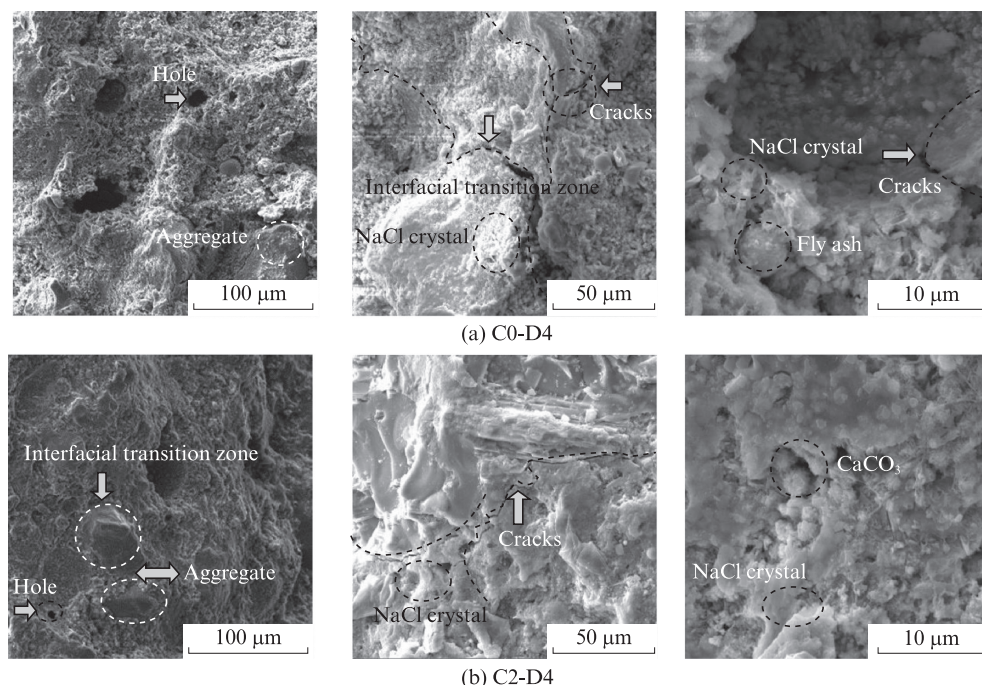


图4 试件 C0 和 C2 盐冻循环 200 次后的 SEM 图

Fig. 4 SEM images of specimen C0 and C2 after 200 cycles of salt freezing

2.5 核磁共振微观分析

图 5 为试件 C0、C1、C2 盐冻循环 0、100、200 次后的弛豫时间 (T_2) 谱图. 由图 5 可知: 3 组混凝土 T_2 谱图的峰宽、起峰位置、峰数量及各峰面积占比等有差异^[15]; 峰 1 的 T_2 谱面积占比明显高于其余 3 个峰, 表明在整个碳化和盐冻过程中小孔数量始终占比高; 碳化使各组试件弛豫时间在不同盐冻循环次数下出现左移, 小孔径孔隙占比增高, 盐冻循环使得各组试件弛豫时间向右移动; 试件 C0-D0、C0-D4 峰 1 起始弛豫时间分别为

0.57、0.75 ms, 盐冻循环 200 次时起始弛豫时间增大 0.18 ms; 试件 C2-D0、C2-D4 峰 1 起始弛豫时间分别为 0.43、0.75 ms, 盐冻循环 200 次时起始弛豫时间增大 0.32 ms; 盐冻循环 200 次后, C0 组试件峰 1、峰 2、峰 3 面积分别增加了 25.3%、32.5%、127.0%, C2 组试件峰 1、峰 2、峰 3、峰 4 面积分别增加了 91.8%、126.7%、763.2%、210.0%. 盐冻循环造成风积沙混凝土孔隙结构损伤严重, 小孔在冻胀应力作用下逐渐转向大孔, 碳化后混凝土内部微裂缝更多, 大孔发展速度更快.

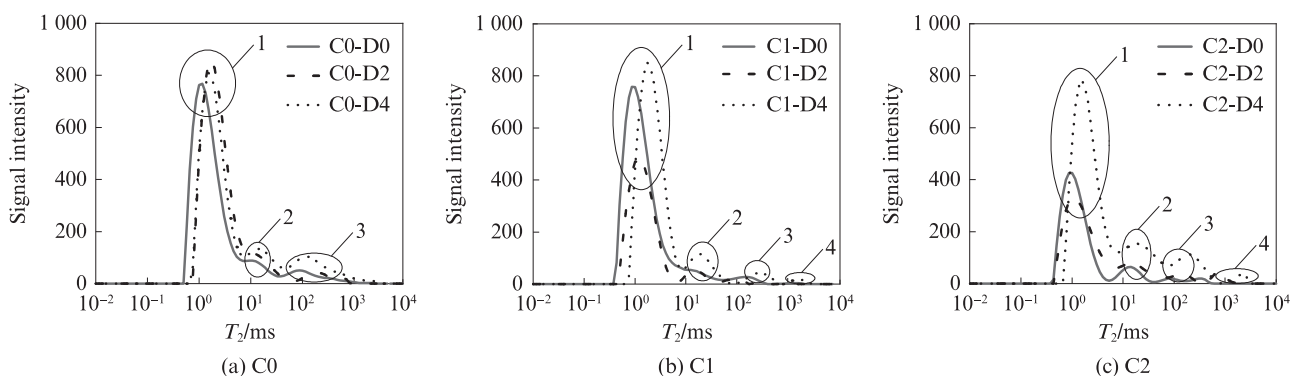


图5 试件 C0、C1、C2 盐冻循环 0、100、200 次后的 T_2 谱图

Fig. 5 T_2 spectra of specimen C0, C1 and C2 after 0, 100 and 200 cycles of salt freezing

盐冻循环0、100、200次后,试件C0、C1和C2的孔径分布见图6.将孔隙划分为无害孔d1(孔径小于20 nm)、少害孔d2(孔径为20~50 nm)、有害孔d3(孔径为50~200 nm)、多害孔d4(孔径大于200 nm)^[15].由图6可知:C0组盐冻循环200次后d1占比降低22%,d4占比提升11%;C2组盐冻循环200次后d1占比降低31%,d4占比提升15%.碳化后的试件在盐冻循环前后孔径分布规律相似,即盐冻过程使d1占比减少,d3和d4占比增大.3组混凝土相比,C2组d1占比最大,这是因为CO₂通过孔隙通道渗入内部并溶解于孔隙,与水泥水化产物生成碳酸盐等中性产物^[16],使d1占比较高.经过盐冻循环后,混凝土内

部破坏严重,造成d4占比较高.经历200次盐冻循环后,C2组d4占比最小,这表明碳化时间越长,风积沙混凝土在盐冻环境下的耐久性越好.

2.6 孔径分布与孔隙度、相对动弹性模量的关系

无害孔、少害孔与孔隙度、相对动弹性模量相关系数较高^[17],无害孔和少害孔占比越多,结构越致密,外界环境对混凝土造成影响越小.图7为无害孔占比(A)、少害孔占比(B)与孔隙度(φ)、相对动弹性模量(E_r)的拟合关系.由图7可知,无害孔占比、少害孔占比与孔隙度、相对动弹性模量关系不大.碳化作用是由表及里的过程,表层碳化会抑制后期碳化的进程.随着盐冻循环的进行,混凝土表层砂浆逐渐脱落,造

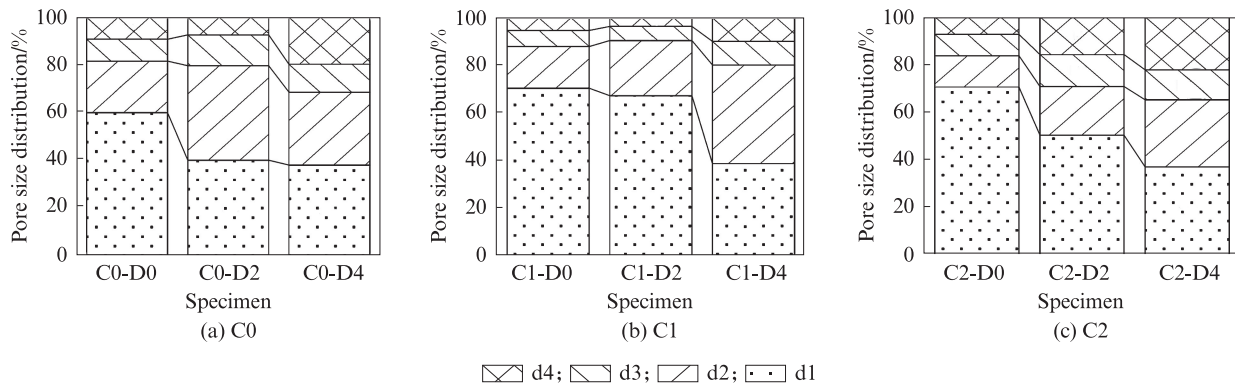


图6 试件C0、C1和C2的孔径分布

Fig. 6 Pore size distribution of specimen C0, C1 and C2

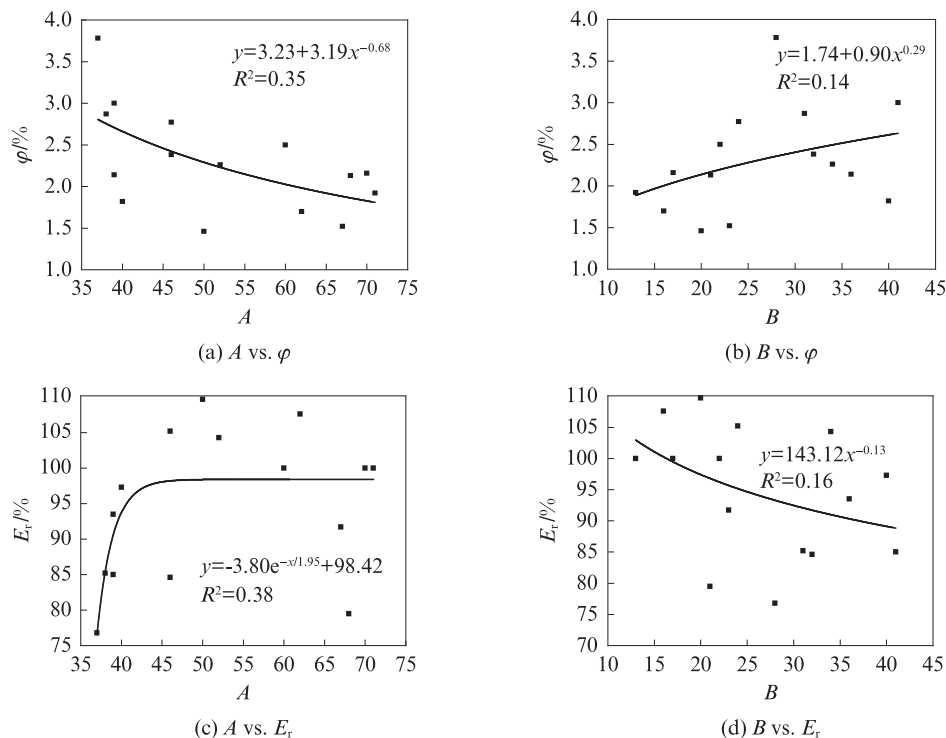


图7 无害孔占比、少害孔占比与孔隙度、相对动弹性模量的拟合关系

Fig. 7 Fitting relationship between harmless pore proportion, less harmful pore proportion and porosity, relative dynamic elastic modulus

成内部孔隙分布不均,混凝土中孔径分布与孔隙度、相对动弹性模量的拟合度不高.另外,由于未考虑临界孔径等影响,也造成其相关性不高.

碳化后混凝土相对动弹性模量比孔隙度的拟合度要好,说明无害孔和少害孔对风积沙混凝土相对动弹性模量敏感性更大.无害孔占比越大、少害孔占比越小时,混凝土相对动弹性模量越大、孔隙度越小,结构越致密.

由此定义无害孔占比与少害孔占比的比值 w , $w=A/B$,以表征风积沙混凝土内部孔径分布变化规律.将 w 与相对动弹性模量、孔隙度进行拟

合,拟合结果见图8.图8中,沿 x 轴反方向代表混凝土试块由完整向损伤演变过程^[15].由图8(a)可知, w 值越大,代表混凝土内部结构越致密;相对动弹性模量越大, w 值与相对动弹性模量呈正相关.由图8(b)可知, w 值越大,孔隙度越小,表示内部损伤越严重, w 与混凝土孔隙度呈负相关.同时,当 $0 < w < 2.5$ 时,拟合曲线斜率较大,即随着盐冻循环的进行,混凝土破坏速度较快,当 w 达到一定值后,混凝土结构失效;当 $w > 2.5$ 时,拟合曲线趋势平缓,这是由于混凝土在碳化产物 CaCO_3 的填充下,孔隙结构细化,孔隙度较低,此时的孔径分布有利于结构耐久性.

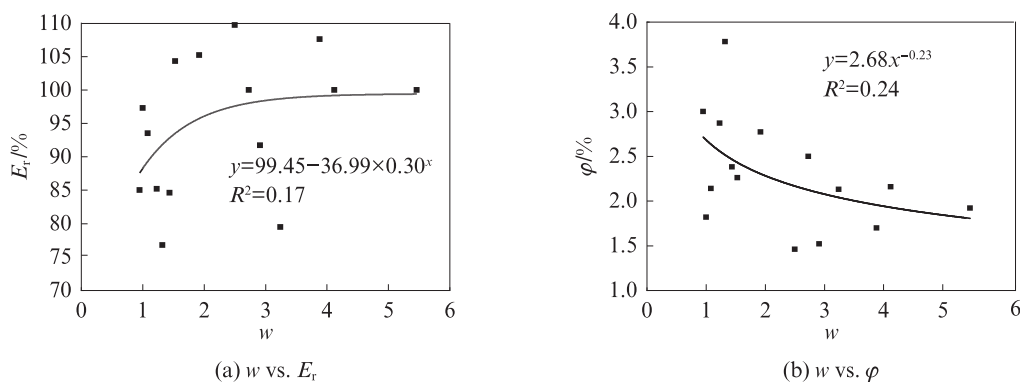


图8 w 值与相对动弹性模量、孔隙度的拟合图

Fig. 8 Fitting diagram of w value with relative dynamic elastic modulus and porosity

3 基于Wiener随机模型的风积沙混凝土寿命预测

风积沙混凝土受原材料影响在其成型养护过程中具有随机性,碳化-盐冻作用下混凝土损伤劣化带有诸多模糊性及信息不完备性.概率统计是度量随机事件发生可能性的最有效方法,可以弥补混凝土寿命评估中因损伤因子随机性及信息不完备性所致的不准确缺陷,使其寿命预测更具可靠性和科学性. Wiener随机过程模型是基于性能退化数据可靠性评估中应用最广的模型之一,可以更好描述混凝土性能退化过程中存在的不确定因素^[18]. Wiener随机过程适用于描述大量微小损伤而导致产品性能具有增加或减小趋势的非单调退化过程.因此,采用一元 Wiener随机模型来评价碳化-盐冻作用下风积沙混凝土的耐久性退化趋势^[19].

$$x_k = \alpha t + \beta B(t) \quad (1)$$

式中: x_k 为混凝土在 t 时刻的耐久性退化量; α 为风积沙混凝土耐久性漂移系数; β 为风积沙混凝土耐久性退化阶段扩散系数; $B(t)$ 为标准 Wiener随机过程.

假设风积沙混凝土各退化指标的失效阈值 $D_R >$

0,根据 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》规定,在试件抗压强度损失率达到25%、质量损失率达到5%或相对动弹性模量损失率达到60%时,混凝土即达到破坏标准,因此本文中抗压强度损失率、质量损失率和相对动弹性模量损失率的失效阈值分别取0.25、0.05、0.60.

依据文献[18]中公式,以碳化28 d风积沙混凝土(试件C2)为例,计算盐冻作用下其相邻测量时刻各性能退化量,结果见表3.根据表3,得到抗压强度损失率、质量损失率及相对动弹性模量损失率的均值 μ 分别为 1.25×10^{-3} 、 5.08×10^{-4} 、 3.90×10^{-3} ,方差 σ^2 分别为 1.58×10^{-2} 、 6.64×10^{-5} 、 3.74×10^{-4} .进而得到混凝土各退化参数的剩余可靠度函数 $R(t)$ 关系式.

抗压强度损失率的剩余可靠度函数关系式为:

$$R(t) = \phi\left(\frac{0.25 - 0.00125t}{0.1257\sqrt{t}}\right) - \exp(0.11)\phi\left(\frac{-0.25 - 0.00125t}{0.1257\sqrt{t}}\right) \quad (2)$$

质量损失率的剩余可靠度函数关系式为:

表3 相邻测量时刻各性能退化量

Table 3 Degradation of each performance at adjacent measurement time

Index	n/times							
	25	50	75	100	125	150	175	200
Compressive strength loss rate	0.021 7	0.032 1	0.072 3	0.100 2	0.175 3	0.354 2	0.257 6	0.124 7
Mass loss rate	0.004 1	0.002 2	0.008 3	0.008 1	0.008 2	0.006 6	0.004 0	0.004 3
Relative dynamic elastic modulus loss rate	0.018 2	0.058 6	0.231 2	0.201 6	0.023 1	0.021 2	0.079 5	0.031 2

$$R(t)=\phi\left(\frac{0.05-0.000\,508t}{0.814\sqrt{t}}\right)-\exp(7.65)\phi\left(\frac{-0.05-0.000\,508t}{0.814\sqrt{t}}\right)\quad(3)$$

相对动弹性模量损失率的剩余可靠度函数关系式为:

$$R(t)=\phi\left(\frac{0.6-0.003\,9t}{0.019\,3\sqrt{t}}\right)-\exp(1.25)\phi\left(\frac{-0.6-0.003\,9t}{0.019\,3\sqrt{t}}\right)\quad(4)$$

式中:φ表示(0,1)的标准正态分布^[20].

根据式(2)~(4),得到可靠度变化曲线,结果如图9所示.

由图9可知,风积沙混凝土可靠度随着盐冻循环的进行而逐渐下降.风积沙混凝土可靠度曲线呈现3

个阶段:可靠度为1、可靠度迅速下降、可靠度为0.对于抗压强度损失率和相对动弹性模量损失率,其可靠度为1的阶段持续时间较长,CaCO₃、Cl⁻可与水化产物生成Friedel's盐(3CaO·Al₂O₃·CaCl₂·10H₂O)等,从而进入混凝土内部填补孔隙,细化混凝土内部孔隙^[18],对提高混凝土性能起到很大的作用,因此第1阶段持续时间较长;质量损失率主要是由盐冻作用引起表层砂浆脱落所致,整个盐冻过程表层砂浆会逐渐脱落,故质量损失率可靠度曲线第1阶段的持续时间较短且在整个过程缓慢下降.不同退化指标预测得到的混凝土寿命也不同,抗压强度损失率、质量损失率、相对动弹性模量损失率的可靠度为0时,对应盐冻次数分别为383、446、372次.表明相对动弹性模量对风积沙混凝土损伤劣化最敏感,故以相对动弹性模量为退化指标最为可靠.

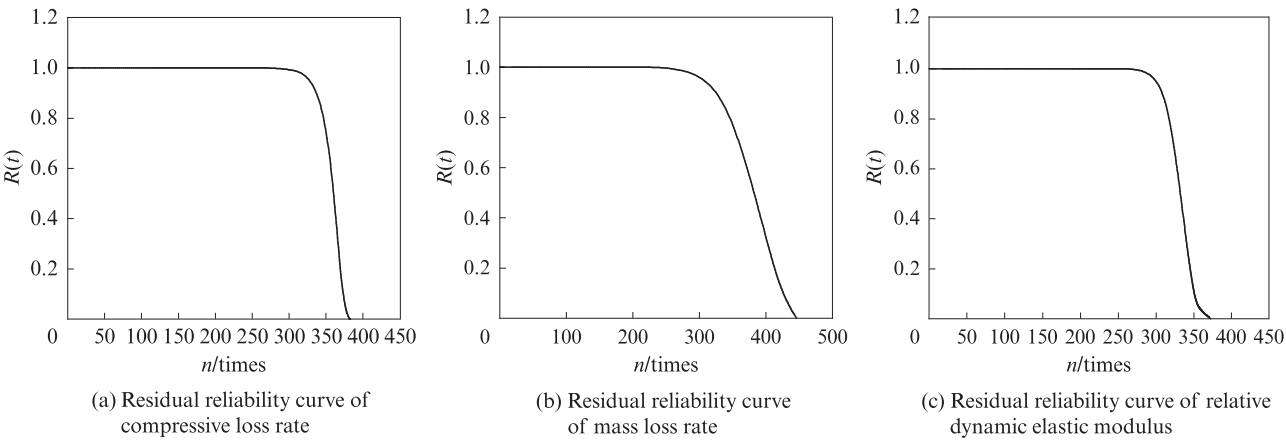


图9 不同退化指标下混凝土的可靠度

Fig. 9 Concrete reliability under different degradation indexes

4 结论

(1)碳化作用在盐冻循环前期可缓解混凝土内部破坏,但在后期却使得骨料外露更为严重.随着盐冻循环的进行,碳化14、28 d的风积沙混凝土质量损失率逐步增大,未碳化风积沙混凝土质量损失率先减少后增加,碳化作用使得风积沙混凝土的质量损失更加严重.

(2)碳化作用可缓解风积沙混凝土盐冻循环过程中的强度损失,但在盐冻后期效果明显减弱.随着盐冻循环的进行,未碳化风积沙混凝土相对动弹性模量呈现先上升后下降的趋势,碳化14、28 d的风积沙混凝土相对动弹性模量逐渐下降,碳化使得风积沙混凝土的相对动弹性模量明显下降,并且碳化时间越长,混凝土的相对动弹性模量损失越大.

(3)风积沙混凝土内部无害孔占比、有害孔占比

与相对动弹性模量的相关性较好;无害孔占比与有害孔占比的比值 w 可以反映混凝土内部损伤,当 $0 < w < 2.5$ 时,混凝土迅速破坏, $w > 2.5$ 时混凝土孔隙结构细化,孔隙度较低。

(4)将抗压强度损失率、质量损失率、相对动弹性模量损失率作为退化参数,依据 Wiener 随机过程建立混凝土寿命预测模型。抗压强度损失率、质量损失率、相对动弹性模量损失率的可靠度分别在盐冻循环 398、446、372 次时降为零,说明相对动弹性模量作为碳化-盐冻作用下风积沙混凝土耐久性损伤劣化指标更为可靠。

参考文献:

- [1] LI Y G, ZHANG H M, LIU X Y, et al. Time-varying compressive strength model of aeolian sand concrete considering the harmful pore ratio variation and heterogeneous nucleation[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 21(5):1-15.
- [2] WANG Y H, CHU Q, HAN Q, et al. Experimental study on the seismic damage behavior of aeolian sand concrete columns[J]. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2020, 19(2):137-150.
- [3] 唐官保,姚燕,王玲,等.应力作用下混凝土碳化深度预测模型[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(2):304-308.
TANG Guanbao, YAO Yan, WANG Ling, et al. Prediction model of concrete carbonation depth under the combined actions of stress[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(2):304-308. (in Chinese)
- [4] 肖前慧,牛荪涛.冻融和碳化共同作用下混凝土损伤分析[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(5):763-766.
XIAO Qianhui, NIU Ditao. Damage model for concrete subjected to freeze-thaw cycles and carbonation[J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(5):763-766. (in Chinese)
- [5] LI X, LI M X, SHEN X M, et al. Effect of carbonization impact on compressive strength of cement-fly ash mortar subjected to freeze-thaw cycles[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 454(1):209-212.
- [6] 赵高升,何真,杨华美.冻融循环和碳化交替作用下的混凝土耐久性[J]. *武汉大学学报*, 2013, 46(5):604-609.
ZHAO Gaosheng, HE Zhen, YANG Huamei. Study of concrete durability under alternative effect of carbonation and freeze-thaw cycles[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2013, 46(5):604-609. (in Chinese)
- [7] LI G F, SHEN X D. A study of the deterioration law and mechanism of aeolian-sand powdered concrete in the coupling environments of freeze-thaw and carbonization[J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2019, 127(8):551-563.
- [8] 邹欲晓.多因素作用下风积沙混凝土冻融微观结构演变研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学, 2018.
ZOU Yuxiao. Study on the evolution of freeze-thaw microstructure of aeolian sand concrete under multi-factor action [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [9] 吴俊臣,申向东.风积沙混凝土的抗冻性与冻融损伤机理分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(10):1311-1315.
WU Junchen, SHEN Xiangdong. Analysis on frost resistance and damage mechanism of aeolian sand concrete[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(10):1311-1315. (in Chinese)
- [10] 张金喜,冉晋,马宝成,等.碳化对混凝土抗冻性的影响及机理[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(1):12-17.
ZHANG Jinxi, RAN Jin, MA Baocheng, et al. Influence of carbonation on frost resistance of concrete and its mechanism[J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(1):12-17. (in Chinese)
- [11] 邓祥辉,高晓悦,王睿,等.再生混凝土抗冻性能试验研究及孔隙分布变化分析[J]. *材料导报*, 2021, 35(16):16028-16034.
DENG Xianghui, GAO Xiaoyue, WANG Rui, et al. Study on frost resistance and pore distribution change of recycled concrete [J]. *Materials Reports*, 2021, 35(16):16028-16034. (in Chinese)
- [12] 王建刚,张金喜,党海笑,等.碳化、干湿与冻融耦合作用下再生混凝土耐久性[J]. *北京工业大学学报*, 2021, 47(6):616-624.
WANG Jiangang, ZHANG Jinxi, DANG Haixiao, et al. Durability of recycled concrete under the coupling of carbonation, dry-wet and freeze-thaw [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2021, 47(6):616-624. (in Chinese)
- [13] 周大卫,刘娟红,段品佳,等.混凝土超低温冻融循环损伤演化规律和机理[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(5):490-497.
ZHOU Dawei, LIU Juanhong, DUAN Pinjia, et al. Damage evolution law and mechanism of concrete under cryogenic freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(5):490-497. (in Chinese)
- [14] 李玉根,张慧梅,刘光秀,等.风积砂混凝土基本力学性能及影响机理[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(5):1212-1221.
LI Yugen, ZHANG Huimei, LIU Guangxiu, et al. Mechanical properties and influence mechanism of aeolian sand concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(5):1212-1221. (in Chinese)
- [15] 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 erosion and wet-dry cycling conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(21):137-143. (in Chinese)
- [16] 申向东,邹欲晓,薛慧君,等.风积沙掺量对冻融-碳化耦合作用下混凝土耐久性的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(2):161-167.
SHEN Xiangdong, ZOU Yuxiao, XUE Huijun, et al. Effect of aeolian sand content on durability of concrete under freezing-thawing-carbonization coupling[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(2):161-167. (in Chinese)
- [17] 薛慧君,申向东,邹春霞,等.基于 NMR 的风积沙混凝土冻融孔隙演变研究[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(2):199-205.
XUE Huijun, SHEN Xiangdong, ZOU Chunxia, et al. Freeze-thaw pore evolution of aeolian sand concrete based on