

文章编号:1672-3961(2025)02-0106-08

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.022

基于 Wiener 退化过程的纤维混凝土抗冻性

银英姿,魏景涛*,泽里罗布,董伟

(内蒙古科技大学土木工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘要:为探究玄武岩纤维(basalt fiber, BF)对风积沙混凝土(aeolian sand concrete, ASC)耐久性及其使用寿命的影响,本试验采用风积沙等质量取代河砂,取代后风积沙质量占混凝土中河砂质量的20%,ASC中BF的体积分数选取0、0.05%、0.10%、0.15%、0.20%,制备玄武岩纤维风积沙混凝土(BF-ASC)。在冻融条件下,研究不同BF体积分数对ASC质量、相对动弹性模量的影响,并通过扫描电镜(scanning electron microscopy, SEM)分析BF-ASC的损伤劣化机理。以BF-ASC试块相对动弹性模量作为退化指标,选用一元Wiener函数进行退化过程建模,预测BF-ASC寿命。结果表明:BF的掺入能够降低ASC的孔隙率,增强粗细骨料之间的黏结力,明显提高混凝土的抗冻性能,降低混凝土冻融损伤程度,当BF体积分数为0.20%时,质量损失率最低,相对动弹性模量评价参数降幅最小,抗冻效果最佳;基于Wiener随机分布以BF-ASC相对动弹性模量作为退化指标所得到的BF-ASC可靠度函数,能够有效预测BF-ASC在盐冻环境下的使用寿命,且当ASC中BF体积分数为0.20%时,最长使用寿命约达2500h。

关键词:风积沙混凝土;玄武岩纤维;耐久性;寿命预测;一元Wiener

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A

引用格式:银英姿,魏景涛,泽里罗布,等.基于Wiener退化过程的纤维混凝土抗冻性[J].山东大学学报(工学版),2025,55(2):106-113.

YIN Yingzi, WEI Jingtao, ZELI Luobu, et al. Frost resistance of fiber reinforced concrete based on Wiener degradation process[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(2):106-113.

Frost resistance of fiber reinforced concrete based on Wiener degradation process

YIN Yingzi, WEI Jingtao*, ZELI Luobu, DONG Wei

(School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to explore the impact of basalt fiber (BF) on the durability and service life of aeolian sand concrete (ASC), this experiment used aeolian sand to replaced river sand, and the mass of aeolian sand accounts for 20% of the mass of river sand in the concrete after replacement, and the basalt fiber aeolian sand concrete (BF-ASC) was prepared under the conditions of 0, 0.05%, 0.10%, 0.15%, and 0.20% BF content. The effects of different BF content on concrete mass and relative dynamic elastic modulus were studied, and the damage and deterioration mechanisms of BF-ASC was analyzed by scanning electron microscopy (SEM). With the relative dynamic elastic modulus of BF-ASC test block as the degradation index, a single Wiener function was used to model the degradation process and predict the life of BF-ASC. The results showed that adding BF could reduce the porosity of ASC, enhance the bonding strength between coarse and fine aggregates, significantly improve the frost resistance of concrete, and reduce the freeze-thaw damage degree of concrete. When the volume fraction of BF was 0.20%, the mass loss rate was the lowest, the relative dynamic elastic modulus evaluation parameter had the smallest decrease, and the frost resistance effect was the best; The reliability function of BF-ASC obtained based on Wiener random distribution with BF-ASC relative dynamic elastic modulus as the degradation index could effectively predict the service life of BF-ASC in salt freezing environment, and the longest service life could reach about 2500 hours when the BF volume fraction was 0.20%.

Keywords: wind sand concrete; basalt fiber; durability; life prediction; unary Wiener

收稿日期:2024-01-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52268044,52168033);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);内蒙古自治区包头市昆都仑区科技计划资助项目(YF2022021)

第一作者简介:银英姿(1968—),女,内蒙古包头人,教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为绿色建筑材料。E-mail:811489571@qq.com

***通信作者简介:**魏景涛(1997—),男,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向为混凝土耐久性。E-mail:3041411884@qq.com

0 引言

随着我国西北地区基础设施建设的加快,混凝土用量增大,河砂作为混凝土的细骨料难以满足建设需要,对西北地区建筑行业正常发展产生影响^[1-2]。中国西北地区存在大面积沙漠,对环境造成巨大危害。若能充分利用该地区沙漠资源,将风积沙替代部分河砂制备风积沙混凝土(aeolian sand concrete, ASC),既可以解决河砂资源短缺问题,同时也可以改善当地生态环境,降低运输成本^[3-5]。学者们对 ASC 力学性能和耐久性展开了研究,结果表明:适量的风积沙替代河砂能够改善混凝土内部结构,提高其力学性能及耐久性^[6-9]。我国西北地区对混凝土结构抗冻性能有较高要求,因此,提高 ASC 的抗冻性能具有重要的研究意义。

玄武岩纤维(basalt fibre, BF)具有相容性好、抗拉强度高、弹性模量大等优点,广泛应用于混凝土中^[10-12]。BF 的掺入可以显著增强骨料之间的黏结力、抗渗性,能够防止多种因素导致的内部裂纹的发展,有效提高混凝土的抗冻性能^[13-14]。文献[15-17]研究了 BF 体积分数对混凝土性能的影响,结果表明:BF 的掺入能够降低混凝土的孔隙率,并且在 BF 体积分数为 0.20% 时,混凝土质量损失率最低,抗盐冻能力最佳。文献[18]通过单面冻融循环试验,研究了混凝土中不同 BF 体积分数及冻融

次数对混凝土性能及微观结构的影响,结果表明:当混凝土中 BF 体积分数为 0.20% 时,混凝土的抗冻效果最佳。

综上,学者们对玄武岩纤维混凝土及风积沙混凝土进行了大量研究并取得了丰硕成果,但对于玄武岩纤维风积沙混凝土(basalt fiber aeolian sand concrete, BF-ASC)抗冻性能的研究较少。风积沙质量为河砂质量的 20% 时,混凝土冻融循环后的抗压强度、孔隙率和束缚流体饱和度的抗损伤劣化提升效果最明显^[19],因此本研究选取 20% 的风积沙代替传统河砂,并探究 ASC 中不同体积分数的 BF(0、0.05%、0.10%、0.15%、0.20%)对 ASC 抗冻性能的影响规律。一元 Wiener 模型具有计算方便、稳定等特点,可以较为真实地反映混凝土退化过程^[20-21]。本研究利用一元 Wiener 模型对冻融循环作用下的 BF-ASC 进行寿命预测,以期为 BF-ASC 实际工程应用提供理论依据。

1 试验概况

1.1 原材料

本试验采用的原材料为 P·O42.5 级普通硅酸盐水泥、天然河砂、响沙湾沙漠表面风积沙、粒径 5~25 mm 连续级配碎石、II 级粉煤灰、包头市自来水、羟系减水剂(减水率为 23%)。骨料的物理性能指标如表 1 所示,BF 性能指标如表 2 所示。

表 1 骨料物理性能指标

Table 1 Physical performance index of aggregate

骨料	粒径/mm	表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	堆积密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	含水率/%	细度模数	含泥质量分数/%
石子	5~25	2 680	1 650	0.3		0.7
风积沙	0.075~0.250	2 650	1 580	0.3	0.7	0.8
河砂	<4.75	2 630	1 530	2.2	2.9	0.4

表 2 BF 性能指标

Table 2 Performance index of BF

断裂伸长率/%	断裂强度/MPa	直径/ μm	长度/mm	含水率/%	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
3.1	1 650	16	20	0.1	2 836	95	2.65

1.2 试验设计

本试验混凝土强度等级为 C40,水胶比为 0.45,砂率为 0.40,使用 20% 的风积沙代替普通

河砂,ASC 中 BF 体积分数分别为 0、0.05%、0.10%、0.15% 和 0.20%。各组混凝土配合比如表 3 所示。

表 3 混凝土配合比及基本性能

Table 3 Mix ratio and basic properties of concrete

编号	每 m^3 混凝土中各物质的质量/kg								28 d 强度/MPa	
	粉煤灰	水泥	风积沙	河砂	石子	水	外加剂	纤维	抗压	劈裂抗拉
A-0	40	360	145.6	582.3	1 092	180	8	0	46.6	3.85
A-1	40	360	145.6	582.3	1 092	180	8	1.33	48.6	4.02
A-2	40	360	145.6	582.4	1 092	180	8	2.65	52.3	4.64
A-3	40	360	145.6	582.3	1 092	180	8	3.98	50.2	4.38
A-4	40	360	145.6	582.3	1 092	180	8	5.30	47.3	4.10

注:A-0~A-4 分别为 ASC 中 BF 体积分数为 0、0.05%、0.10%、0.15% 和 0.20% 的试块编号。

1.3 试验方法

参照 GB/T50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[22]中的“快冻法”进行冻融循环试验,将试块标准养护 24 d 后放入 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、3.5%NaCl 溶液中浸泡 4 d,进行冻融循环试验。每次冻融循环时间为 2.5~4.0 h,共冻融循环 200 次,每 25 次冻融循环后对试块所需数据进行采集,通过电镜扫描(scanning electron microscope,

SEM)分析冻融循环前后微观形貌。

2 试验结果与分析

2.1 表观形态

表观形态能够直接反映混凝土试块表面破坏程度,A-0、A-1、A-2、A-3、A-4 五组试块在冻融循环 100 次和 200 次后表观形态如图 1 所示。

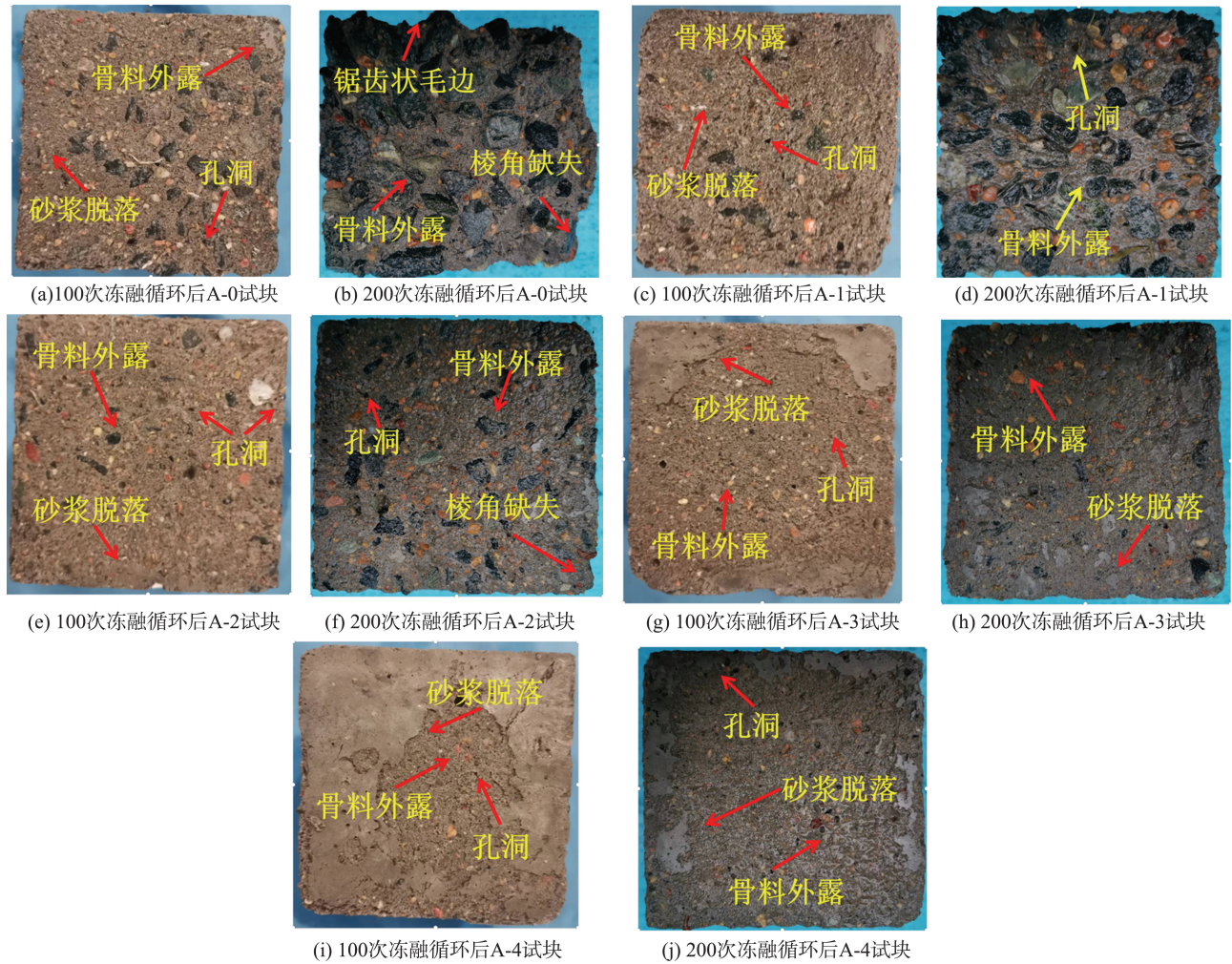


图 1 冻融损伤表观形态

Fig.1 Apparent morphology of freeze-thaw damage

由图 1 可知,100 次冻融循环后,A-0 试块表面砂浆脱落,粗细骨料外露,有孔洞出现,表面凹凸不平;A-1 和 A-2 试块表面砂浆脱落及粗细骨料外露程度相对较轻;A-3 试块大面积砂浆脱落,细骨料外露,无粗骨料外露,且出现较少的孔洞;A-4 试块中心区域出现砂浆脱落,少量细骨料外露,但外观仍较为完整。由于冻融 100 次相对较少,冻胀应力的反复生成导致 BF-ASC 的内部生成大量微裂纹,表层砂浆出现脱落等现象。随着冻融循环次数的不断增加,当循环次数达到 200 次时,BF-ASC 表层微裂缝等缺陷进一步发展并扩大延伸,冻融损伤进一

步加剧,导致 BF-ASC 出现冻融破坏。

200 次冻融循环后,A-0 试块出现表面砂浆剥离严重,粗骨料大面积外露,试块周围出现不同程度的锯齿状毛边和整体结构松散的现象;A-1 和 A-2 试块砂浆大面积脱落,粗骨料外露,棱角缺失,但是试块整体性较好;A-3 试块表面砂浆脱落,仅有较少的粗细骨料外露;A-4 试块表面浆体脱落较轻,有较少孔洞,损伤程度较低,试块仍保持相对完整的形态。由 BF-ASC 外部形态能够看出:BF 能够改善混凝土的抗冻性,且当 ASC 中 BF 体积分数为 0~0.20%时,ASC 抗冻性与 BF 体积分数成正比。

2.2 相对动弹性模量

BF-ASC 相对动弹性模量变化曲线如图 2 所示, N 为冻融循环次数。

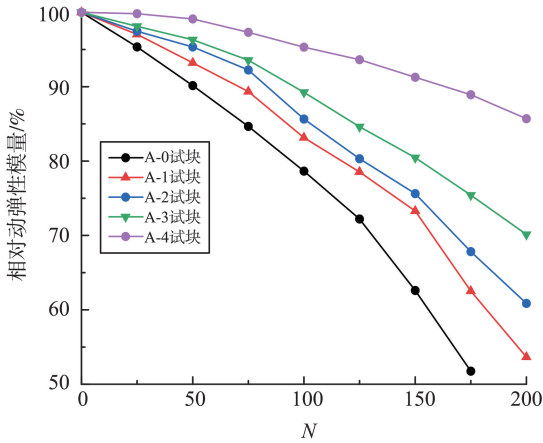


图2 BF-ASC 相对动弹性模量变化曲线
Fig.2 Relative dynamic elasticity modulus variation curve of BF-ASC

由图 2 可知,随着冻融循环的不断累加, BF-ASC 相对动弹性模量均不断下降。175 次冻融循环后 A-0 试块相对动弹性模量为 51.76%, 试块失效。当冻融循环次数达到 200 次时, A-4 试块相对动弹性模量为 85.69%, 比 A-2 和 A-3 试块相对动弹性模量分别提高 24.83%、15.56%。相同的冻融循环次数下, ASC 中 BF 体积分数与相对动弹性模量成正比。由此可知, BF 体积分数对 ASC 的抗冻性能具有较大影响。

相对动弹性模量数据表明, ASC 中掺入 BF 能够在一定程度上延缓相对动弹性模量的损失, 且当 ASC 中 BF 体积分数在 0~0.20% 时, 体积分数越大, 抗冻能力越强。这是因为 BF 在 ASC 中交错分布, 相互搭接, 在胶凝材料之间起骨架作用, 增强了混凝土的整体性, 且 BF 的掺入填充了 ASC 内部孔隙, 使其密实度得到提高, 进一步提高混凝土的抗冻能力^[23]。

2.3 质量损失率

BF-ASC 质量损失率变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知, 冻融循环前期 ($N < 50$) 试块质量损失率小于冻融循环后期 ($N > 50$) 试块质量损失率, 原因为冻融循环作用下, BF-ASC 由表及里发生破坏, 而冻融前期循环次数较少, BF-ASC 损伤较轻, 试块表面砂浆轻微脱落, 质量损失率较小。冻融后期随着循环次数的不断增加, 反复的冻胀应力使微裂缝逐渐演变为相互贯通的大裂缝, 削弱了粗细骨料间的黏结力, 导致骨料砂浆出现大面积脱落, 质量损失程度加剧。

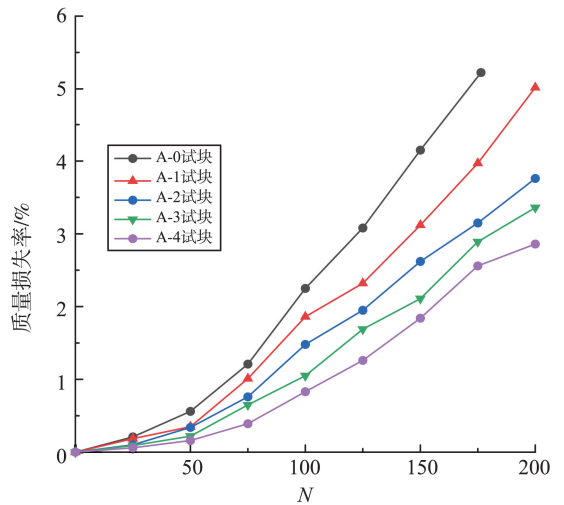


图3 BF-ASC 质量损失率变化曲线
Fig.3 Mass loss rate variation curve of BF-ASC

冻融循环达到 175 次时, A-0 试块质量损失率为 5.16%, 已达到破坏标准。A-1、A-2、A-3 及 A-4 试块质量损失率分别为 3.97%、3.15%、2.89%、2.56%, 均小于 5.00%, 未达到失效条件。可见 BF-ASC 的质量损失率均小于 ASC 的质量损失率, 掺入 BF 能够降低 ASC 的质量损失。当冻融循环 200 次时, A-1、A-2、A-3、A-4 试块的质量损失率分别为 4.98%、3.76%、3.36%、2.86%, A-4 试块的质量损失率最小。由此可知, 当 ASC 中 BF 的体积分数为 0.20% 时, BF-ASC 抗冻性能最佳。这是由于 BF 在 ASC 中均匀分布, 填充了风积沙混凝土孔隙, 提高了风积沙混凝土的密实度, 此外 BF 在 ASC 中起到了“桥接效应”, 增强了骨料与砂浆之间的黏结力, 阻碍了风积沙混凝土在冻融作用下粗细骨料的剥落, 约束了裂缝的扩张, 从而降低了混凝土在冻融循环过程中的质量损失。

2.4 SEM 分析

为了从微观方面研究 BF 的掺入对 ASC 抗冻性能的影响机理, 混凝土试块养护 28 d 后, 分别对 A-0、A-1、A-2、A-3 和 A-4 的 BF-ASC 试块进行 SEM 试验。BF-ASC 的 SEM 扫描图如图 4 所示。

由图 4(a) 可知, A-0 试块内部有较多孔洞和裂缝, 界面过渡区裂纹较大, 密实度较差; 盐冻条件下, 初始缺陷的存在更容易为冻胀应力及盐结晶膨胀应力的发展提供有利条件, 造成 ASC 宏观性能退化且更早发生冻融破坏。由图 4(b)、(c) 可知, 随着 BF 的掺入, A-1 和 A-2 试块内部的孔隙、裂纹、孔洞逐渐减小, 骨料与浆体界面过渡区密实度逐渐提高。由图 4(d) 可知, BF 的掺入, 填充了孔洞和裂纹, 使有害孔向无害孔演变, 降低了孔隙率, 骨料与

浆体界面过渡区得到改善。这是由于BF纤维具有较好的亲水性,均匀分布的纤维能够有效促进水泥颗粒在骨料及纤维表面发生水化反应,生成C-S-H凝胶等水化产物,且纤维的桥接作用能够增强骨料与基体之间的黏结性能,形成致密的界面过渡区,使微观结构得到优化,从而提高BF-ASC的抗盐冻侵蚀能力^[24-25]。由图4(e)可知,BF的随机分布在ASC内部呈现三维骨架结构,阻碍了微裂缝的发展,减弱了应力集中现象。由图4(f)可知,BF与周围水泥基紧密相连,起到了桥接作用,约束了混凝土浆体和骨料的脱落,从而提升了BF-ASC的抗冻能力。在ASC中不同BF体积分数下,BF-ASC的SEM微观形貌与宏观性能表现一致,这也验证了BF的掺入能够有效优化BF-ASC的微观结构,延缓冻融循环作用下宏观性能退化,从而达到提升抗盐冻侵蚀效果的目的。

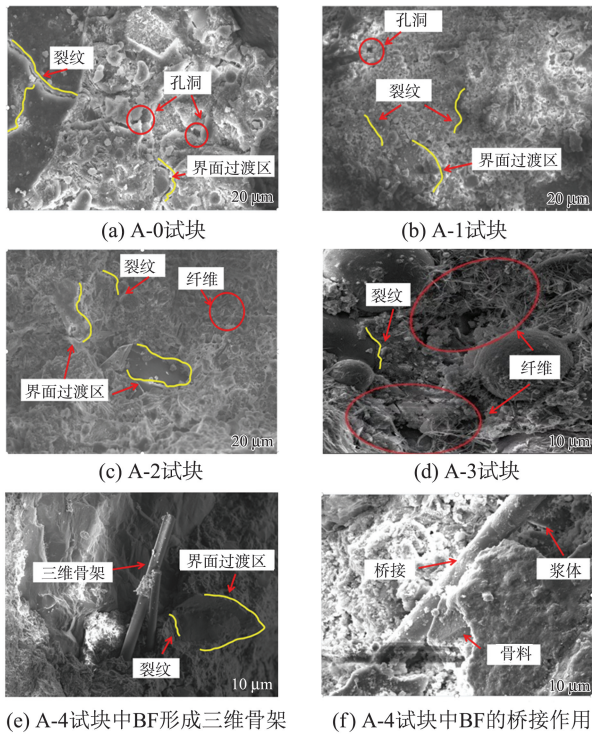


图4 BF-ASC的SEM扫描图
Fig.4 SEM of BF-ASC

3 基于Wiener退化过程下BF-ASC寿命预测

Wiener过程又称Brown过程,1918年由维纳(Wiener)首次给出数学定义。Wiener过程拥有独立增量的随机过程,能够有效地描述非单调退化过程。随着科学家对Wiener过程的不断深入研究,Wiener过程已经广泛应用于航天、生物、金融、医学

等领域。混凝土耐久性具有不确定性、随机性、可变性等特点。混凝土的退化过程是损失量逐渐积累的过程,是不确定的随机过程。运用随机过程描述混凝土的退化过程,能够真实描述混凝土退化的实际情况。因此,本研究利用Wiener过程对混凝土进行可靠度寿命预测。试验过程中以试块的相对动弹性模量为指标,通过一元Wiener过程预测BF-ASC的退化趋势,公式为

$$X(t) = \alpha t + \beta(t), \quad (1)$$

式中: $X(t)$ 为独立增量函数; α 为BF-ASC耐久性漂移参数; β 为扩散系数; t 为时间; $\beta(t)$ 为标准的Wiener过程,表示BF-ASC退化过程的状态。

假定BF-ASC退化指标的失阈值为 $Z_k (Z_k > 0)$,当试块相对动弹性模量达到60%时,试块失效,因此设 Z_k 为0.6,试块寿命 T 满足公式

$$T = \inf \{ t | X(t) \geq Z_k \}. \quad (2)$$

当BF-ASC达到失阈值 Z_k 时的概率密度函数 $f(t)$ 和可靠度函数 $R(t)$ 分别为

$$f(t) = \frac{Z_k}{\sqrt{2\pi\beta^2 t^3}} \exp\left[-\frac{(Z_k - \alpha t)^2}{2\beta^2 t}\right], \quad (3)$$

$$R(t) = \varphi\left(\frac{Z_k - \alpha t}{\beta\sqrt{t}}\right) - \exp\left(\frac{2\alpha Z_k}{\beta^2}\right) \varphi\left(\frac{-Z_k - \alpha t}{\beta\sqrt{t}}\right), \quad (4)$$

式中 φ 为标准正态分布函数。

Wiener退化过程的似然函数为

$$L(\alpha, \beta^2) = \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\beta^2 \pi \Delta t_{ij}}} \exp\left[-\frac{(\Delta X_{ij} - \alpha \Delta t_{ij})^2}{2\beta^2 \Delta t_{ij}}\right], \quad (5)$$

$$\Delta t_{ij} = t_{ij} - t_{(i-1)j},$$

式中 ΔX_{ij} 为第 j 个试块在 $t_{(i-1)j}$ 、 t_{ij} 时间的退化量。

对式(5)求解可得 α 、 β 的函数表达式

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^m X_{im}}{\sum_{i=1}^m t_{im}}, \quad (6)$$

$$\beta^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^m m} \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{(\Delta X_{ij})^2}{\Delta t_{ij}} - \frac{\left(\sum_{i=1}^m X_{im}\right)^2}{\sum_{i=1}^m t_{im}} \right], \quad (7)$$

$$\Delta X_{ij} = X_{ij} - X_{(j-1)i},$$

式中 ΔX_{im} 为某段时间内试块性能退化量。

根据式(6)、(7)计算可得出试块参数 α 、 β_2 ,如

表 4 所示。

表 4 基于 Wiener 模型参数

Table 4 Parameters based on Wiener model

编号	α	β_2
A-0	0.000 735 79	$7.908\ 034 \times 10^{-6}$
A-1	0.000 658 98	$7.000\ 540 \times 10^{-6}$
A-2	0.000 627 33	$5.614\ 200 \times 10^{-6}$
A-3	0.000 507 83	$3.192\ 110 \times 10^{-6}$
A-4	0.000 264 33	$2.983\ 130 \times 10^{-6}$

将各组的 α 、 β_2 代入式 (3)、(4) 中分别得到对应的可靠度函数和概率密度函数表达式,利用 Origin 软件对表达式进行拟合分析,A-0、A-1、A-2、A-3 及 A-4 拟合结果如图 5 所示。当 $R(t) < 0.6$ 时,试块达到失效状态,当 $R(t) = 0$ 时试块完全失效。

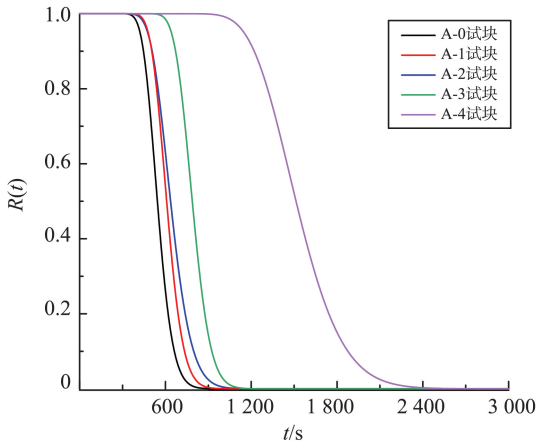


图 5 BF-ASC 可靠度函数曲线

Fig.5 Reliability function curve of BF-ASC

由图 5 可知,ASC 中不同 BF 体积分数的试块可靠度均呈现先平稳后下降的趋势。279 h 后,A-0 试块可靠度下降速率增大,A-1、A-2、A-3、A-4 试块分别在 297、323、650、1 050 h 前可靠度均为 1.0,说明 BF 的掺入能有效延缓试块在冻融循环过程中的劣化,提高混凝土的耐久性能。A-0 试块在 522 h 时可靠度为 0.6,达到失效状态,A-4 试块在 1 450 h 时达到失效状态。A-0、A-1、A-2、A-3、A-4 试块可靠度分别在 872、954、1 093、1 157、2 528 h 时降至 0,即试块完全破坏。A-4 试块的可靠度是 A-0 试块可靠度的 3 倍左右。各组试块的损伤加速度从大到小分别为 A-0、A-1、A-2、A-3、A-4。随着 ASC 中 BF 体积分数的增加,试块损伤加速度减小,说明 BF 的掺入能够提高混凝土的抗冻性能并延长其使用寿命,且当 ASC 中 BF 体积分数为 0~0.20% 时,BF 体积分数越大,ASC 抗冻效果越好,BF 体积分数为 0.20% 时试块抗冻性能表现

最优。

BF-ASC 概率密度曲线如图 6 所示。

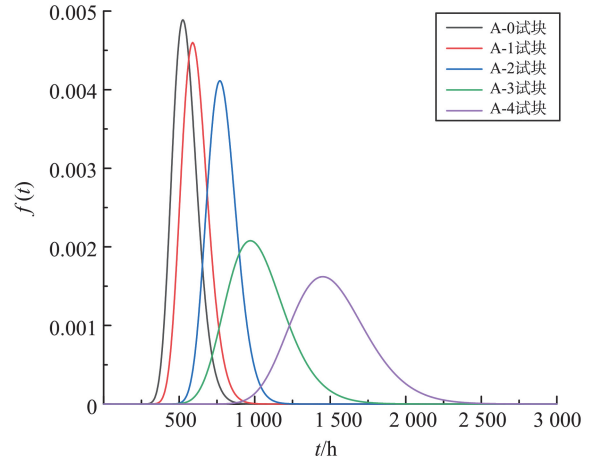


图 6 BF-ASC 概率密度曲线图

Fig.6 Probability density curve of BF-ASC

从图 6 可知,A-4 试块加速寿命约达 2 500 h,A-0 和 A-4 试块概率密度函数最大值分别为 0.004 68、0.001 62,A-0 试块概率密度曲线峰值是 A-4 试块的 2.9 倍,与可靠度函数曲线结果相符,进一步证明了 Wiener 退化过程能较准确地反映 BF-ASC 试块的耐久性退化趋势。

4 结论

(1)BF 掺入抑制了冻融循环过程中 ASC 裂缝的发展,提高了 ASC 结构的整体性。在 0~0.20% 时,BF 的体积分数与 ASC 抗冻性呈正相关,体积分数为 0.20% 时,BF-ASC 的抗冻效果最佳。

(2)BF 掺入延缓了 ASC 的质量损失和相对动弹性模量下降速率,冻融循环 200 次后 A-0 试块率先达到破坏,而掺入 BF 的 ASC 均未达到破坏。第 200 次冻融循环后,A-4 试块的质量损失率和相对动弹性模量分别为 2.86%、85.69%,分别是 A-0 试块质量损失率和相对动弹性模量的 0.6、1.7 倍。

(3)以 BF-ASC 相对动弹性模量的退化量为混凝土损伤劣化指标建立了 Wiener 退化模型,可反映 BF-ASC 的退化过程。同时,得出在冻融环境下,加入 BF 体积分数为 0.20% 的 ASC 最长使用寿命约达 2 500 h。

参考文献:

[1] 褚洪岩,蒋金洋,李荷,等. 环保型细集料对超高性能混凝土力学性能的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(24): 24029-24033.

- CHU Hongyan, JIANG Jinyang, LI He, et al. Effects of eco-friendly fine aggregates on mechanical properties of ultra-high performance concrete [J]. *Materials Reports*, 2020, 34(24): 24029-24033.
- [2] 薛慧君, 申向东, 刘倩, 等. 高寒灌区风沙吹蚀对农业水利工程混凝土抗冻耐久性的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(15): 133-140.
- XUE Huijun, SHEN Xiangdong, LIU Qian, et al. Effect of wind-sand erosion on frost resistance durability of hydraulic engineering concrete in cold irrigation area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(15): 133-140.
- [3] XUE H J, SHEN X D, LIU Q, et al. Analysis of the damage to the aeolian sand concrete surfaces caused by wind-sand erosion [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2017, 15(12): 724-737.
- [4] ZHANG M H, ZHU X Z, SHI J Y, et al. Utilization of desert sand in the production of sustainable cement-based materials: a critical review[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 327: 127014.
- [5] 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): 184-190.
- 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): 184-190.
- [6] ELIPE M G M, LÓPEZ-QUEROL S. Aeolian sands: characterization, options of improvement and possible employment in construction-the state-of-the-art [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 73:728-739.
- [7] 刘超, 林鑫, 刘化威, 等. 风积沙与再生复合微粉对超高性能混凝土力学性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(11): 5415-5422.
- LIU Chao, LIN Xin, LIU Huawei, et al. Effect of aeolian sand and recycled composite micro-powder on mechanical properties of ultra-high performance concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(11): 5415-5422.
- [8] 王尧鸿, 楚奇, 韩青. 库布齐风积沙对各分级河砂的填充效应[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(1): 191-198.
- WANG Yaohong, CHU Qi, HAN Qing. Filing effect of Kubuqi aeolian sand on different classifications of river sand[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(1): 191-198.
- [9] 刘超, 林鑫, 朱超, 等. 风积沙应用于混凝土的研究进展[J]. *材料科学与工程学报*, 2022, 40(4): 695-705.
- LIU Chao, LIN Xin, ZHU Chao, et al. Research progress on application of aeolian sand in concrete[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2022, 40(4): 695-705.
- [10] MONALDO E, NERILLI F, VAIRO G. Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering[J]. *Composite Structures*, 2019, 214: 246-263.
- [11] 宫亚峰, 吴树正, 毕海鹏, 等. 玄武岩纤维活性粉末混凝土与钢绞线粘结滑移过程声学特性表征[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2023, 53(6): 1819-1832.
- GONG Yafeng, WU Shuzheng, BI Haipeng, et al. Acoustic characterization of bond-slip process between basalt fiber reactive powder concrete and steel strand[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2023, 53(6): 1819-1832.
- [12] SHAIKH F U A, Taweel M. Compressive strength and failure behaviour of fibre reinforced concrete at elevated temperatures [J]. *Advances in Concrete Construction*, 2015, 3(4): 283-293.
- [13] YE W M K, MAHMUD H B, SHAFIGH P, et al. Effects of polypropylene twisted bundle fibers on the mechanical properties of high-strength oil palm shell lightweight concrete [J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(4): 1221-1233.
- [14] FU Q, XU W R, BU M X, et al. Orthogonal experimental study on hybrid-fiber high-durability concrete for marine environment [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 13: 1790-1804.
- [15] 李福海, 高浩, 唐慧琪, 等. 短切玄武岩纤维混凝土基本性能试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(2): 419-427.
- LI Fuhai, GAO Hao, TANG Huiqi, et al. Basic properties and shrinkage model of chopped basalt fiber concrete [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(2): 419-427.
- [16] 甘磊, 吴健, 沈振中, 等. 硫酸盐和干湿循环作用下玄武岩纤维混凝土劣化规律[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(11): 37-46.
- GAN Lei, WU Jian, SHEN Zhenzhong, et al. Deterioration law of basalt fiber reinforced concrete under sulfate attack and dry-wet cycle [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(11): 37-46.
- [17] CHEN X F, KOU S C, XING F. Mechanical and durable properties of chopped basalt fiber reinforced recycled aggregate concrete and the mathematical modeling [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 298: 123901.
- [18] 赵燕茹, 刘芳芳, 王磊, 等. 单面盐冻条件下基于孔结构的玄武岩纤维混凝土抗压强度模型[J]. *材料导报*,

- 2020, 34(12): 12064-12069.
- ZHAO Yanru, LIU Fangfang, WANG Lei, et al. Modeling of the compressive strength of basalt fiber concrete based on pore structure under single-side freeze-thaw condition[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(12): 12064-12069.
- [19] 董伟, 付前旺, 申向东, 等. 盐冻作用后风积沙混凝土孔结构对抗压强度影响的灰熵分析[J]. *材料导报*, 2023, 37(2): 69-74.
- DONG Wei, FU Qianwang, SHEN Xiangdong, et al. Grey entropy analysis on effect of pore structure on compressive strength of aeolian sand concrete after salt-freezing[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(2): 69-74.
- [20] 乔宏霞, 苏睿, 李琼, 等. 基于 Wiener 过程寿命预测的再生骨料混凝土耐久性能变化规律的研究[J]. *工业建筑*, 2022, 52(6): 167-173.
- QIAO Hongxia, SU Rui, LI Qiong, et al. Research on variation law of durability of recycled aggregate concrete based on Wiener process life prediction[J]. *Industrial Construction*, 2022, 52(6): 167-173.
- [21] 蔡忠义, 陈云翔, 张净敏, 等. 非线性步进加速退化数据的可靠性评估方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(3): 576-582.
- CAI Zhongyi, CHEN Yunxiang, ZHANG Zhengmin, et al. Reliability assessment method of nonlinear step-stress accelerated degradation data[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(3): 576-582.
- [22] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土长期性能和耐久性性能试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [23] 薛维培, 刘晓媛, 姚直书, 等. 不同损伤源对玄武岩纤维增强混凝土孔隙结构变化特征的影响[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(9): 2285-2293.
- XUE Weipei, LIU Xiaoyuan, YAO Zhishu, et al. Effects of different damage sources on pore structure change characteristics of basalt fiber reinforced concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(9): 2285-2293.
- [24] KHANDELWAL S, RHEE K Y. Recent advances in basalt-fiber-reinforced composites: tailoring the fiber-matrix interface[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 192: 108011.
- [25] ZHOU M, HE X J, WANG H Y, et al. Experimental study of mechanism properties of interfacial transition zones in steel fiber reinforced concrete[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20: e02954.
- (编辑: 郭少华)
- (上接第 105 页)
- [25] GUO Y C, XIE J H, ZHENG W Y, et al. Effects of steel slag as fine aggregate on static and impact behaviours of concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 192: 194-201.
- [26] 过镇海, 张秀琴. 砼受拉应力-变形全曲线的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 1988, 9(4): 45.
- GUO Zhenhai, ZHANG Xiuqin. Experimental study on full tensile stress-deformation curve of concrete[J]. *Journal of Building Structure*, 1988, 9(4): 45.
- [27] YANG K H, MUN J H, CHO J H, et al. Stress-Strain model for various unconfined concretes in compression[J]. *ACI Materials Journal*, 2014, 111(4): 819-826.
- [28] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系: 原理与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- GUO Zhenhai. Strength and constitutive relationship of concrete: principle and application[M]. Beijing: China Building and Architecture Press, 2004.
- (编辑: 郭少华)