

文章编号:1007-9629(2025)03-0202-08

基于 Weibull 分布多壁碳纳米管混凝土盐冻损伤分析

程 续, 田 威*

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:开展了不同多壁碳纳米管(MWCNTs)掺量混凝土的硫酸盐侵蚀和冻融循环耦合试验,分析了 MWCNTs 混凝土的耐久性劣化规律,同时基于 Weibull 分布建立了 MWCNTs 混凝土的可靠性分析模型.结果表明:掺入 MWCNTs 可提高混凝土的抗盐冻性能,掺入 0.05% MWCNTs 的混凝土经历 200 次耦合循环后抗压强度比对照组提高了 14.5%,此掺量下 MWCNTs 对混凝土的抗盐冻性改善效果最好;建立的基于 Weibull 分布可靠性模型能较好地预测盐冻环境下 MWCNTs 混凝土的损伤劣化情况,预测结果与试验结果一致.

关键词:多壁碳纳米管混凝土;冻融损伤;硫酸盐侵蚀;Weibull 分布;可靠性分析

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.03.002

Salt Freezing Damage Analysis of Multi-walled Carbon Nanotubes Concrete Based on Weibull Distribution

CHENG Xu, TIAN Wei*

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Coupled tests of sulfate corrosion and freeze-thaw cycling were conducted on concrete with different dosages of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs). The durability degradation behavior of MWCNTs concrete was investigated. Meanwhile, the reliability analysis model of MWCNTs concrete was established based on Weibull distribution. The results indicate that the incorporation of MWCNTs effectively enhances the salt freezing resistance of concrete. After 200 coupled cycles, the compressive strength of concrete with 0.05% MWCNTs is 14.5% higher than that of plain concrete, achieving the best improvement effect on salt freezing resistance under this dosage. The proposed reliability model based on Weibull distribution can predict the deterioration of MWCNTs concrete in a salt freezing environment, and the predicted results are in good agreement with the experimental data.

Key words: multi-walled carbon nanotubes concrete; freeze-thaw damage; sulfate corrosion; Weibull distribution; reliability analysis

中国西北盐湖地区的基础设施项目面临盐碱和冻融环境的挑战^[1-3],这对混凝土材料的耐久性提出了更高的要求.将纳米材料掺入混凝土是提升其耐久性的有效方法之一^[4-6].在众多纳米材料中,多壁碳纳米管(MWCNTs)因其优异的性能引起了广泛关

注.前期研究表明,MWCNTs能够细化孔结构,不仅可以提高混凝土的力学性能,还可以减缓外界侵蚀性离子向混凝土内部扩散的速率^[6-8].此外,MWCNTs还能作为水化产物的成核点,促进水化反应,进一步增强混凝土的早期强度^[9-10].这些研究成果

收稿日期:2024-04-09;修订日期:2024-06-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52479115);陕西省重点研发计划项目(2024SF-YBXM-615);中央高校基本科研业务费专项资金-长安大学优秀博士学位论文培育资助项目(300102283721);陕西省高校青年创新团队项目([2022]943);长安大学研究生科研创新实践项目(300103723013)

第一作者:程 续(1996—),男,河南信阳人,长安大学博士生.E-mail:chengxu2019@chd.edu.cn

通讯作者:田 威(1981—),男,陕西西安人,长安大学教授,博士生导师,博士.E-mail:tianwei@chd.edu.cn

初步证实了MWCNTs对提高混凝土耐久性的积极作用.但是,现有研究主要集中于单一环境条件下MWCNTs对混凝土性能的影响,对于MWCNTs混凝土在更加恶劣的复杂环境下的耐久性影响,还缺乏深入且系统的研究.此外,对于如何量化MWCNTs的增强效果以及如何预测MWCNTs混凝土在侵蚀环境下可靠性寿命,相关的研究仍相对有限.

针对混凝土可靠性寿命预测的问题,学者们提出了多种预测模型.其中,基于Weibull分布函数的方法在可靠性分析和寿命预测方面具有明显的优势,并被广泛应用于混凝土材料的寿命预测^[11-13].为应对MWCNTs混凝土在耐久性评估与寿命预测中面临的挑战,本文开展了不同MWCNTs掺量混凝土

的硫酸盐侵蚀与冻融循环耦合(后文简称盐冻耦合)试验,并基于Weibull分布建立了可靠性分析模型.

1 试验

1.1 原材料

胶凝材料为P·O 42.5普通硅酸盐水泥,粉煤灰采用密度为 2.09 g/cm^3 的Ⅱ级粉煤灰,其化学组成(质量分数,文中涉及的掺量、比值等除特殊说明外均为质量分数或质量比)见表1.减水剂采用高效引气减水剂;细骨料为细度模数2.75的河砂;粗骨料为粒径 $5\sim 30\text{ mm}$ 连续级配碎石.在试件制备时,使用聚乙烯吡咯烷酮K30(PVP)来分散MWCNTs;盐溶液为质量分数为5%的 Na_2SO_4 溶液.MWCNTs的物理性能见表2.

表1 水泥和粉煤灰的化学组成
Table 1 Chemical compositions(by mass) of cement and fly ash

Material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Cement	63.28	22.12	6.56	3.50	2.10	1.52	0.37	0.55
Fly ash	3.93	55.25	28.75	6.32	1.70	1.59	0.54	1.92

Unit: %

表2 MWCNTs的物理性能
Table 2 Physical properties of MWCNTs

Diameter/nm	Length/ μm	Purity(by mass)/%	Ash content(by mass)/%	Specific surface area/($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)
10-20	5-15	>97	<3	100-160

1.2 试件制备

混凝土中水泥、粗骨料、细骨料、水、减水剂和粉煤灰的用量分别为276.00、1 162.00、707.00、155.00、10.05、69.00 kg/m^3 ,设置MWCNTs的掺量 w_m (以水泥和粉煤灰的总质量计)为0%、0.05%、0.10%、0.15%,制备的试件分别记为MCNT-0、MCNT-5、MCNT-10、MCNT-15.

试件制备前对MWCNTs进行分散处理:将PVP和MWCNTs按质量比2:1在水中混合,用磁力搅拌器搅拌10 min后,用超声分散器对混合溶液进行60 min的分散.分散时间和强度的选择主要依据本课题组前期的研究成果^[8,10].MWCNTs混凝土试件制备过程为:(1)将称取的粗骨料、细骨料、水泥和粉煤灰投入SJD30强制式单卧轴混凝土搅拌机中,干拌30 s;(2)缓慢加入预先配制的MWCNTs溶液和减水剂,持续湿拌90 s至均匀;(3)将搅拌好的混凝土注入尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 和 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 已涂抹脱模剂的试模中,经振动台振实成型;(4)在混凝土初凝末期进行抹面处理,24 h后脱模,并移至 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度95%以上的标准养护室养护至24 d.

1.3 测试方法

将试件置于 Na_2SO_4 溶液中浸泡4 d后,置入含有 Na_2SO_4 溶液的冻融机中进行盐冻耦合试验.设置盐冻耦合循环总次数为200次,每25次取出试件,干燥后测试其动弹性模量和抗压强度,每组3个试件,结果取平均值.从破碎试件中选取代表性样品开展扫描电镜(SEM)试验和压汞(MIP)试验.

为了更加直观地展示MWCNTs对盐冻耦合作用下混凝土损伤的抑制作用,根据宏观损伤力学原理,定义了盐冻耦合循环次数为 N 时MWCNTs混凝土的盐冻损伤度 D_t ^[14-15].其计算式为:

$$D_t = \frac{1 - E_t}{0.4} \quad (1)$$

式中: E_t 为混凝土经过 N 次盐冻耦合循环后的相对动弹性模量. D_t 的取值范围为 $[0, 1]$.当 $D_t \geq 1$ 时,试件已经被破坏.

2 结果与讨论

2.1 抗压强度

不同MWCNTs掺量下试件的抗压强度及损失率见图1.由图1可见:在经历盐冻耦合作用前,试件

MCNT-5、MCNT-10和MCNT-15的抗压强度分别比试件MCNT-0提高了5.15%、3.05%和3.95%，表明MWCNTs的掺入提高了混凝土的抗压强度，这与前人的研究结果一致^[16-19]；在经历200次盐冻耦合循环后，试件MCNT-5、MCNT-10和MCNT-15的抗压强度分别比试件MCNT-0提高

了14.5%、6.2%和9.5%，试件MCNT-5的残余力学性能最高；从抗压强度损失率可以看出，在75~175次盐冻耦合作用过程中，未掺MWCNTs混凝土的抗压强度衰减幅度大于MWCNTs混凝土。由此可见，MWCNTs的掺入可以抑制混凝土在盐冻耦合作用下的损伤。

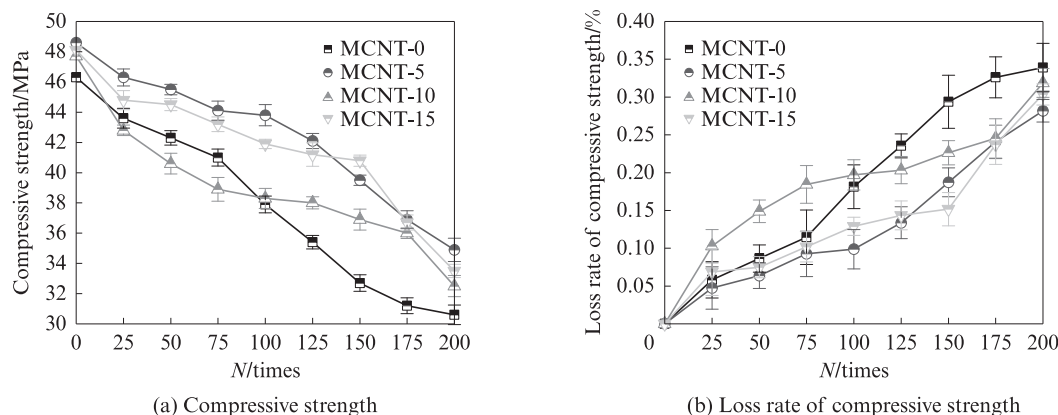


图1 不同MWCNTs掺量下试件的抗压强度及损失率

Fig. 1 Compressive strength and loss rate of specimens with different MWCNTs dosages

2.2 损伤度

不同盐冻耦合循环次数下MWCNTs混凝土的损伤度见图2。由图2可见：各组试件的 D_f 均随着盐冻耦合循环次数的增加而增大，且未掺MWCNTs混凝土的 D_f 始终大于MWCNTs混凝土；当盐冻耦合循环试验结束($N=200$ 次)时，各组试件的 $D_f < 1$ ，均未达到失效标准，此时试件MCNT-5、MCNT-10和MCNT-15的 D_f 分别比试件MCNT-0降低了28.37%、0.39%和12.81%。说明MWCNTs的掺入对混凝土盐冻耦合作用下的损伤起到了缓解的作用。产生上述作用的主要原因是MWCNTs的填充和桥接作用有效减少了混凝土内部的微裂纹，进而阻止了侵蚀性离子和水进入混凝土内部，使侵蚀产物和

水结冰引起的膨胀应力降低，混凝土耐久性提高。同时，混凝土中的MWCNTs可以作为水化产物的成核点，促进水泥的水化反应^[20]，使得混凝土变得更加均匀致密，可有效阻碍 SO_4^{2-} 扩散，从而改善混凝土的抗盐冻性能。此外，MWCNTs的自身强度很高，在载荷作用下只会从混凝土基体中拔出而不会断裂。MWCNTs的拔出过程会消耗外部能量，从而延缓裂纹扩展，这也是多次盐冻耦合循环后MWCNTs混凝土强度损伤减弱的原因之一。

2.3 SEM和孔隙结构特征

盐冻耦合作用后MWCNTs混凝土的SEM照片见图3。由图3可见，盐冻耦合作用后MWCNTs混凝土有明显的填充、桥接、成核和拔出效应，进一步验证了前文的分析。

不同MWCNTs掺量下混凝土的孔结构特征见图4(图中 d 为孔径)。由图4可见，试件MWCNTs-5和MWCNTs-10孔隙率(体积分数)显著降低，这验证了MWCNTs对混凝土孔结构的优化作用。总体而言，掺入MWCNTs有效抑制了混凝土在硫酸盐侵蚀和冻融循环耦合作用下的损伤。

通过对比相同盐冻耦合循环次数下混凝土的损伤度发现，当MWCNTs掺量为0.05%时，混凝土损伤度的增加量最小。由此可见，在本文掺量范围内，0.05%掺量的MWCNTs对混凝土的抗盐冻性能提升效果最好。Ramezani等^[21-23]也指出MWCNTs对混凝土的增强存在一个最佳掺量，且小掺量MWCNTs

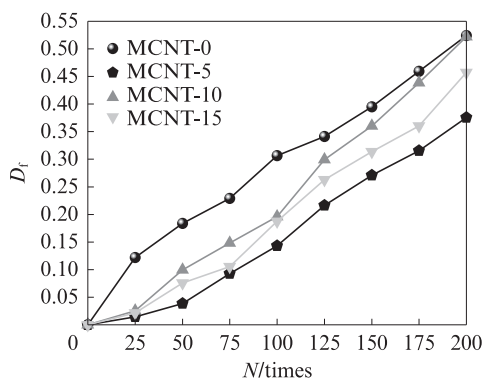


图2 不同盐冻耦合循环次数下MWCNTs混凝土的损伤度

Fig. 2 Damage degree of MWCNTs concretes under different salt freezing coupled cycles

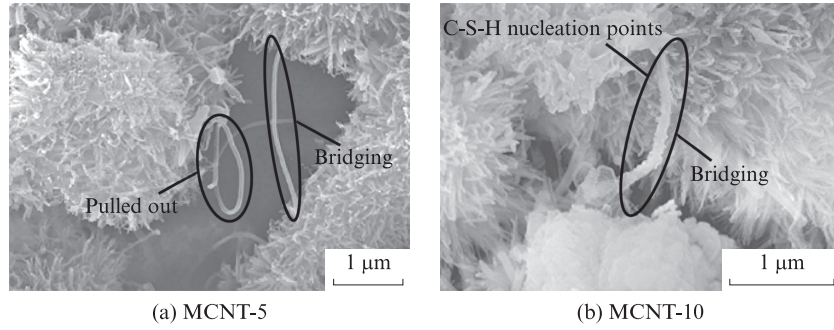


图3 盐冻耦合作用后MWCNTs混凝土的SEM照片

Fig. 3 SEM images of MWCNTs concretes after salt freezing coupled effect

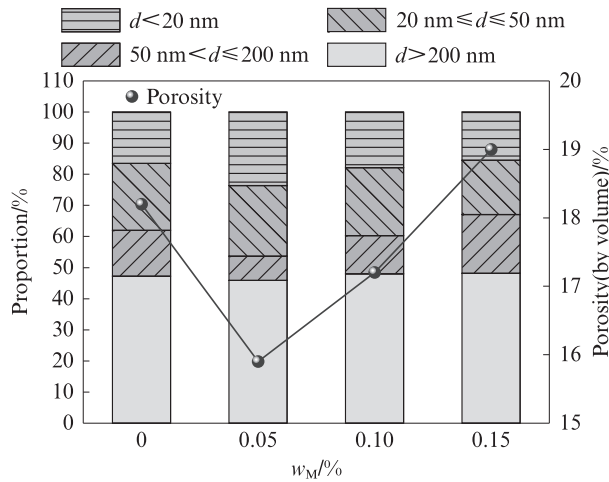


图4 不同MWCNTs掺量下混凝土的孔结构特征

Fig. 4 Pore structure characteristics of concretes with different MWCNTs dosages

对混凝土性能的提升更为显著.这主要是因为MWCNTs的提升效果依赖于其在混凝土中的有效分散程度.现有研究表明^[16-17],较大掺量MWCNTs通常分散性较差,导致MWCNTs发生团聚,从而在混凝土基体中产生薄弱带,使纳米材料与水泥基材料的黏结性能较差.因此,高掺量MWCNTs对混凝土的增强效果受到抑制,无法进一步提升混凝土的耐久性.不同MWCNTs掺量下盐冻耦合作用前混凝土的SEM照片见图5.由图5可见:0.15%掺量的MWCNTs在混凝土中出现了团聚现象;而0.05%掺量的MWCNTs在混凝土基体中分散较为均匀,没有观察到团聚现象.结合图4和图5可见,随着MWCNTs掺量的增加,缠绕的MWCNTs和过量的PVP使混凝土试件的孔隙率增加,从而降低了其对盐冻破坏的缓解作用.

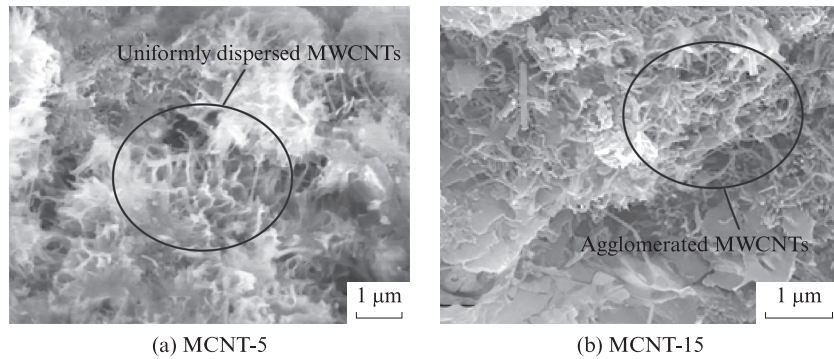


图5 不同MWCNTs掺量下盐冻耦合作用前混凝土的SEM照片

Fig. 5 SEM images of concretes with different MWCNTs dosages before salt freezing coupled effect

2.4 基于Weibull分布的MWCNTs混凝土盐冻损伤可靠性模型

2.4.1 基础理论

Weibull分布由于其对小样本的准确和可靠预测被广泛应用于混凝土材料的可靠性分析^[3,11-12,24-25],其分布函数 $F(t)$ 的表示形式为:

$$F(t) = \begin{cases} 1 - \exp \left[-\left(\frac{t-\gamma}{\beta} \right)^\delta \right], & t \geq \gamma \\ 0, & t < \gamma \end{cases} \quad (2)$$

式中: β 、 δ 、 γ 分别为尺度参数、形状参数和阈值参数,分别满足 $\beta > 0$ 、 $\delta > 0$ 、 $\gamma \geq 0$; t 为寿命产品失效首次达到失效阈值的时间.其分布密度函数 $f(t)$ 和可靠度函数 $R(t)$ 可以表示为:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\delta(t-\gamma)^{\delta-1}}{\beta^\delta} \exp \left[-\left(\frac{t-\gamma}{\beta} \right)^\delta \right], & t \geq \gamma \\ 0, & t < \gamma \end{cases} \quad (3)$$

$$R(t) = \exp \left[-\left(\frac{t-\gamma}{\beta} \right)^\delta \right], \quad t \geq \gamma \quad (4)$$

2.4.2 模型检验

对不同MWCNTs掺量下混凝土损伤度的数据进行检验,其概率分布见图6.由图6可见,不同

MWCNTs掺量下混凝土的损伤度 D_f 均处于95%置信区间内,初步说明本研究中数据满足Weibull分布.

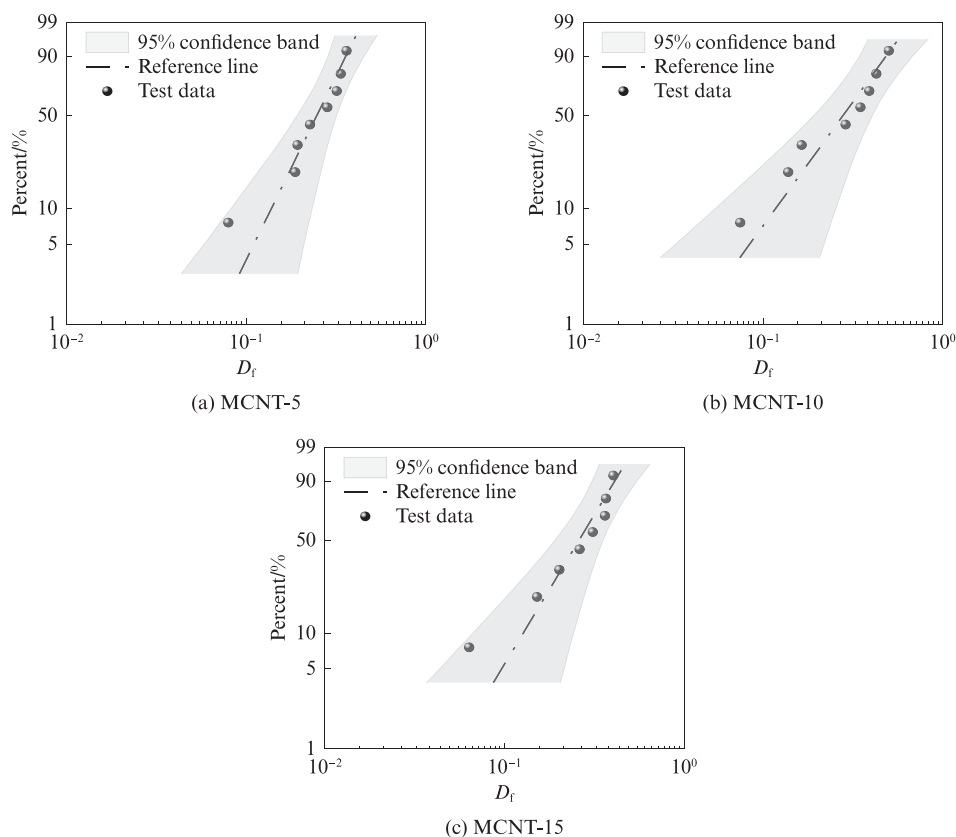


图6 混凝土损伤度的概率分布

Fig. 6 Probability distribution of damage degree of concretes

为了验证Weibull分布是否适用,采用K-S检验法对损伤度 D_f 进行假定分布检验,计算结果见表3.由表3可见,各组试件的检验统计量值均小于临界值 $0.457(D(8, 0.05))$,表明本研究中的 D_f 数据服从Weibull分布.

表3 K-S检验计算结果
Table 3 K-S test calculation results

Specimen	K-S test calculation value
MCNT-5	0.283
MCNT-10	0.381
MCNT-15	0.218

2.4.3 模型建立

在建立混凝土盐冻损伤可靠性模型时,为减小模型的复杂程度,将 γ 设定为0,即认为MWCNTs混凝土在盐冻耦合下的可靠性寿命服从二参数Weibull分布,则其可靠度函数变为:

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp \left[-\left(\frac{t}{\beta} \right)^\delta \right] \quad (5)$$

MWCNTs混凝土在盐冻耦合作用下的可靠度与

盐冻耦合循环次数成反比,即可靠度随着盐冻耦合循环次数的增加而降低,直到其可靠度降为0时,混凝土结构失效,因此 $0 < R(t) < 1$.由式(1)可知,当 $D_f \geq 1$ 时,MWCNTs混凝土已经达到了失效状态,可以利用Weibull分布可靠度函数反映MWCNTs混凝土的盐冻损伤情况.MWCNTs混凝土的盐冻损伤可靠性模型为:

$$1 - D_f = \exp \left[-\left(\frac{N}{\beta} \right)^\delta \right] \quad (6)$$

2.4.4 参数估计

本文采用最小二乘法对所建立的MWCNTs混凝土盐冻损伤可靠性模型参数进行估计.首先对式(6)两边同时取对数,得到:

$$\ln[-\ln(1 - D_f)] = \delta \ln N - \delta \ln \beta \quad (7)$$

令 $y = \ln[-\ln(1 - D_f)]$, $x = \ln N$, $a = \delta$, $b = -\delta \ln \beta$,则式(7)可以写为 $y = ax + b$ 的形式.通过线性回归分析来对可靠性模型的 δ 和 β 进行求解,结果见图7.将回归系数带入式(7)中,即可得到对应的Weibull分布相关参数,结果见表4.

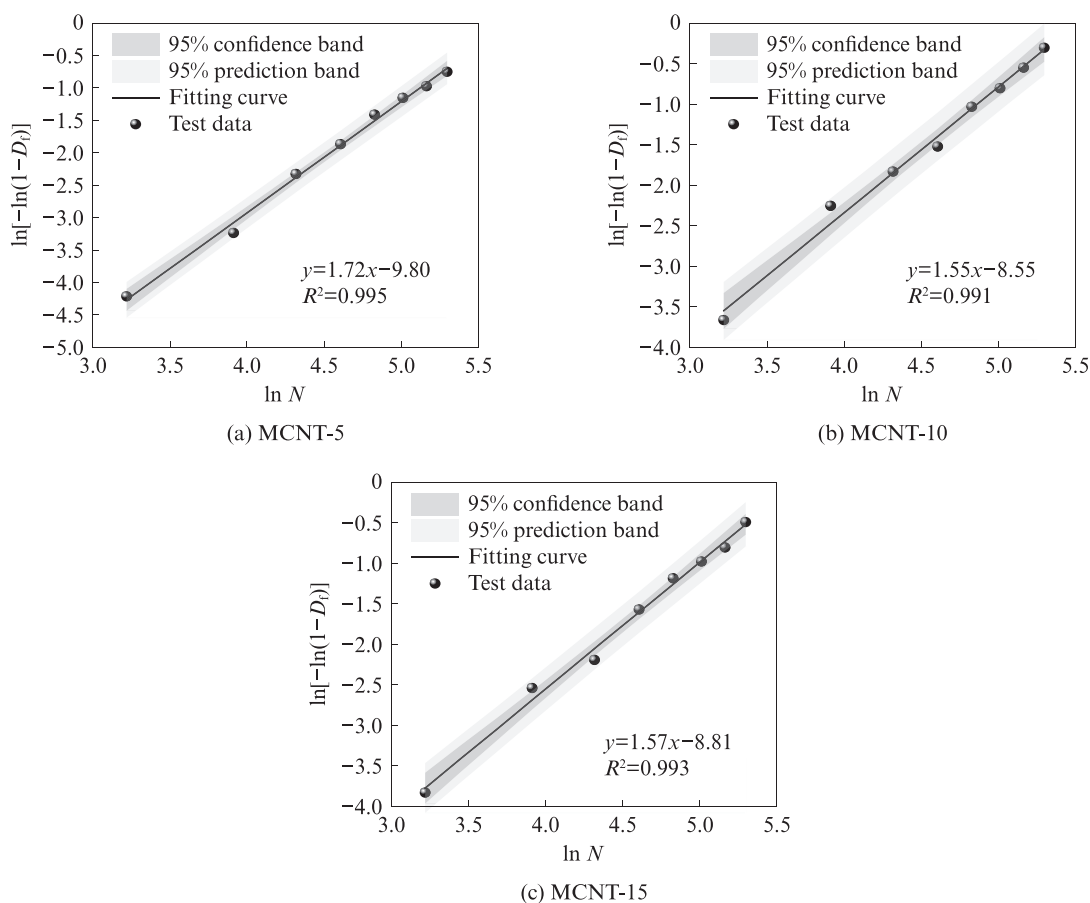


图7 混凝土损伤度回归分析结果

Fig. 7 Regression analysis results of damage degree of concretes

表4 Weibull分布的相关参数

Table 4 Related parameters of Weibull distribution

Specimen	δ	β
MCNT-5	1.72	298.17
MCNT-10	1.55	248.67
MCNT-15	1.57	273.54

2.5 碳纳米管混凝土可靠性寿命评估

将表4参数分别带入式(3)、(4)中,得到MWCNTs混凝土的可靠度函数 $R(t)$ 和概率密度 $f(t)$ 曲线,结果见图8.由图8可见,3种MWCNTs掺量下混凝土性能的劣化均呈现出3个阶段——可靠度缓慢下降的阶段Ⅰ、可靠度迅速下降的阶段Ⅱ以及可靠度为0的阶段Ⅲ.在阶段Ⅰ中,混凝土虽然受到硫酸盐侵蚀和冻融循环的双重作用,但是由于其时间较短且在冻结过程中由于低温效应会对 SO_4^{2-} 的侵蚀起到延缓作用^[26],此时侵蚀产物在混凝土内部积累,可靠度下降较慢.随着盐冻耦合循环次数的增加,混凝土在冻融循环作用下产生裂纹并逐渐扩展贯通,为 SO_4^{2-} 的迁移提供通道,在外部冻融应力和内部膨胀应力的双重作用下混凝土抵抗侵蚀的能力进一步减弱,出现可靠度迅速下降的阶段Ⅱ.在阶

段Ⅲ中,由于前期侵蚀产物的积累和冻胀应力的反复作用使得混凝土内部结构已被完全破坏,导致混凝土承载力丧失,其可靠度降低为0.

观察不同MWCNTs掺量下混凝土可靠度曲线可以发现,试件MCNT-5的可靠度曲线位置高于其他2组,即在相同可靠度水平下,试件MCNT-5所达到的盐冻耦合循环次数更多.这表明MWCNTs掺量为0.05%的混凝土抗盐冻侵蚀能力更强,其可靠度降为0时的盐冻耦合循环次数为900次.而MWCNTs掺量为0.10%和0.15%的混凝土可靠度降为0时的盐冻耦合循环次数分别为810、880次.对比抗压强度和损伤度的分析结果可知,使用Weibull分布进行可靠性寿命预测的结果与试验研究结果相吻合.

概率密度主要用来表征混凝土在单位时间内的失效概率,其峰值越高,材料可靠度开始出现下降的时间越早,材料的抗侵蚀性能越差.由图8还可见,不同MWCNTs掺量下混凝土损伤度的概率密度函数峰值大小顺序依次为MCNT-10>MCNT-15>MCNT-5,即试件MCNT-5的劣化速率最慢,这一结果与前文中混凝土宏观性能表现分析结果一致.

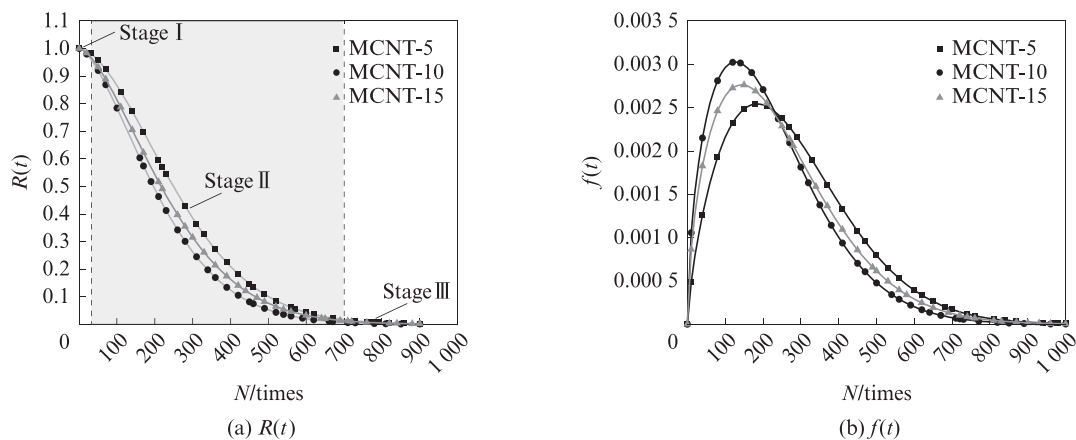


图8 MWCNTs混凝土的可靠度函数和概率密度曲线

Fig. 8 Reliability function and probability density curve of MWCNTs concretes

3 结论

(1)在混凝土中掺入适量的多壁碳纳米管(MWCNTs)可以提高混凝土的抗盐冻性能.在本文所设定的MWCNTs掺量范围(0%~0.15%)内,当MWCNTs的掺量为0.05%时,MWCNTs混凝土的抗盐冻性能最好,有利于提高混凝土的残余力学性能,降低其在盐冻环境下的损伤度.

(2)根据损伤度建立的MWCNTs混凝土盐冻损伤可靠性模型能够较好地描述不同MWCNTs掺量下混凝土可靠度的退化过程.在盐冻耦合循环作用下,MWCNTs混凝土的劣化经历了3个阶段:阶段Ⅰ侵蚀产物在混凝土内部积累;阶段Ⅱ混凝土可靠度急剧降低,混凝土内部损伤加剧导致其性能逐渐劣化;阶段Ⅲ混凝土的承载力丧失,可靠度为0.模型反映的变化趋势与试验中混凝土的性能劣化过程相吻合.

(3)由本文建立的可靠度函数得出在硫酸盐侵蚀与冻融循环耦合作用下,当MWCNTs掺量为0.05%混凝土的可靠度降为0时,其盐冻耦合循环次数长达900次,为MWCNTs混凝土在西北盐湖地区进行大规模应用提供了理论依据.

参考文献:

- [1] 张学鹏,张戎令,王小平,等.基于Wiener过程理论的盐渍土中混凝土损伤演化及寿命预测[J].建筑材料学报,2023,26(11):1192-1199,1206.
ZHANG Xuepeng, ZHANG Rongling, WANG Xiaoping, et al. Damage evolution and life prediction of concrete in saline soil based on Wiener process theory[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(11):1192-1199, 1206. (in Chinese)
- [2] GAO F F, TIAN W, WANG Y W, et al. Effect of the dosage of MWCNTs on deterioration resistant of concrete subjected to

combined freeze-thaw cycles and sulfate attack[J]. Structural Concrete, 2021, 22(S1):E955-E965.

- [3] 乔宏霞,冯琼,朱彬荣,等.西部地区混凝土基于Weibull分布的寿命预测研究[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(4):993-1005.
QIAO Hongxia, FENG Qiong, ZHU Binrong, et al. Study of lifetime prediction of concrete in western region based on Weibull distribution[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(4):993-1005. (in Chinese)
- [4] 程子扬,陈国夫,屠艳平.纳米 CaCO_3 对粉煤灰再生骨料混凝土性能及微结构的影响[J].建筑材料学报,2023,26(3):228-235.
CHENG Ziyang, CHEN Guofu, TU Yanping. Effect of nano CaCO_3 on properties and microstructure of fly ash recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(3):228-235. (in Chinese)
- [5] 徐阳晨,邢国华,黄娇,等.聚乙烯醇纤维和碳纳米管改性对混凝土力学性能的影响[J].建筑材料学报,2023,26(7):809-815,822.
XU Yangchen, XING Guohua, HUANG Jiao, et al. Effect of PVA fiber and carbon nanotubes modification on mechanical properties of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(7):809-815, 822. (in Chinese)
- [6] 牛荻涛,何嘉琦,傅强,等.碳纳米管对水泥基材料微观结构及耐久性能的影响[J].硅酸盐学报,2020,48(5):705-717.
NIU Ditao, HE Jiaqi, FU Qiang, et al. Effect of carbon nanotubes on microstructure and durability of cement-based materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(5):705-717. (in Chinese)
- [7] AZHARI F, BANTHIA N. Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(7):866-873.
- [8] GAO F F, TIAN W, WANG Z, et al. Effect of diameter of multi-walled carbon nanotubes on mechanical properties and microstructure of the cement-based materials[J]. Construction and Building Materials, 2020, 260:120452.
- [9] WANG H, GAO X J, LIU J Z. Effects of salt freeze-thaw cycles and cyclic loading on the piezoresistive properties of carbon nanofibers mortar[J]. Construction and Building Materials, 2018,

- 177:192-201.
- [10] 田威,高芳芳,贺礼.高温后碳纳米管混凝土力学性能及微观结构变化[J].浙江大学学报(工学版),2022,56(11):2280-2289. TIAN Wei, GAO Fangfang, HE Li. Variation of mechanical property and meso structure of MWCNTs concrete exposed to high temperature[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(11):2280-2289. (in Chinese)
- [11] 杨冬鹏,郭卫民,王宝民.基于Weibull模型的混凝土冻融损伤寿命预测及应用[J].水利学报,2022,53(8):977-983. YANG Dongpeng, GUO Weimin, WANG Baomin. Prediction and application of freezing-thawing damage life of concrete based on Weibull model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(8):977-983. (in Chinese)
- [12] 乔宏霞,郭向柯,朱彬荣.三参数Weibull分布的多因素作用下混凝土加速寿命试验[J].材料导报,2019,33(2):639-643. QIAO Hongxia, GUO Xiangke, ZHU Binrong. Accelerated life test of concrete under multiple factors based on three-parameter Weibull distribution [J]. Materials Reports, 2019, 33(2): 639-643. (in Chinese)
- [13] CHEN F L, QIAO P Z. Probabilistic damage modeling and service-life prediction of concrete under freeze-thaw action [J]. Materials and Structures, 2015, 48(8):2697-2711.
- [14] 路承功.西北盐渍环境下混凝土结构材料耐久性试验研究及寿命预测与评估[D].兰州:兰州理工大学,2022. LU Chenggong. Durability test research and life prediction and evaluation of concrete structural materials in the saline environment of northwest China [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [15] 路承功,魏智强,乔宏霞,等.盐渍土地区混凝土加速寿命试验可靠性分析方法[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(3):1017-1026. LU Chenggong, WEI Zhiqiang, QIAO Hongxia, et al. Reliability analysis method of accelerated life test of concrete in saline soil area[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(3):1017-1026. (in Chinese)
- [16] NAQI A, ABBAS N, ZAHRA N, et al. Effect of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) on the strength development of cementitious materials [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(1):1203-1211.
- [17] NALON G H, RIBEIRO J C L, DE ARAÚJO E N D, et al. Residual mechanical properties of mortars containing carbon nanomaterials exposed to high temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2021, 275:122123.
- [18] XU S L, LIU J T, LI Q H. Mechanical properties and microstructure of multi-walled carbon nanotube-reinforced cement paste [J]. Construction and Building Materials, 2015, 76:16-23.
- [19] LU L L, OUYANG D, XU W T. Mechanical properties and durability of ultra high strength concrete incorporating multi-walled carbon nanotubes [J]. Materials, 2016, 9(6): 419-421.
- [20] CUI H Z, YANG S Q, MEMON S A. Development of carbon nanotube modified cement paste with microencapsulated phase-change material for structural-functional integrated application [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16(4):8027-8039.
- [21] RAMEZANI M, KIM Y H, SUN Z H, et al. Influence of carbon nanotubes on properties of cement mortars subjected to alkali-silica reaction [J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 131:104596.
- [22] RAMEZANI M, KIM Y H, SUN Z H. Modeling the mechanical properties of cementitious materials containing CNTs [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 104:103347.
- [23] RAMEZANI M, KIM Y H, SUN Z H. Elastic modulus formulation of cementitious materials incorporating carbon nanotubes: Probabilistic approach [J]. Construction and Building Materials, 2021, 274:122092.
- [24] 陈守开,陈家林,汪伦焰,等.再生骨料透水混凝土关键性能统计及预测分析[J].建筑材料学报,2019,22(2): 214-221. CHEN Shoukai, CHEN Jialin, WANG Lunyan, et al. Key performance statistics of recycled aggregate pervious concrete and prediction analysis [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2):214-221. (in Chinese)
- [25] 李刊,魏智强,乔宏霞,等.耦合盐溶液环境下钢筋/混凝土Weibull耐久性寿命预测方法[J].复合材料学报,2021,38(7): 2370-2382. LI Kan, WEI Zhiqiang, QIAO Hongxia, et al. Weibull durability life prediction method of reinforced concrete in environment of coupled salt solution [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(7):2370-2382. (in Chinese)
- [26] 罗遥凌,王冲,彭小芹,等.电场及低温环境下不同镁盐和硫酸盐组合对水泥基材料碳硫硅钙石侵蚀的影响[J].建筑材料学报,2016,19(6):998-1003,1012. LUO Yaoling, WANG Chong, PENG Xiaoqin, et al. Effect of different magnesium salts and sulfates on thaumasite sulfate attack of cement-based materials under electrical field and low temperature [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6): 998-1003, 1012. (in Chinese)