

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.044



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



结构型钢纤维对盐-冻融耦合作用下 混凝土损伤的影响

丁一宁,葛茂林,刘倩文,朱昊

(大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室,辽宁大连116024)

摘要:为探究钢纤维在氯盐侵蚀与冻融循环耦合作用下对混凝土损伤的影响,对多组不同钢纤维掺量的混凝土试件进行快速盐-冻融循环试验。利用超声波法和激光扫描法分析不同掺量盐-冻融后混凝土损伤的效应,通过分析超声波速变化得到混凝土的盐-冻融损伤度 D ,并建立 D 与盐-冻融循环次数 n 之间的韦布尔分布;利用混凝土表面的粗糙度表征混凝土表面损伤,并研究了不同掺量钢纤维混凝土试件表面在盐-冻融循环作用后粗糙度变化率 ΔR 的作用,以及 ΔR 与 D 的函数关系。结果表明:混凝土盐-冻融损伤随着钢纤维掺量的增加而减小;基于超声波法建立的损伤度 D 与盐-冻融循环次数之间较好地满足两参数韦布尔分布,决定系数大于0.95;混凝土试件损伤度 D 随粗糙度变化率 ΔR 的变化规律满足指数函数关系,决定系数大于0.80。

关键词:钢纤维;盐-冻融循环;混凝土损伤;超声波法;损伤度;粗糙度

中图分类号: TU528.572 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)04-0159-08

Effect of macro steel fiber on damage of concrete after salt freeze-thaw cycle

DING Yining, GE Maolin, LIU Qianwen, ZHU Hao

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China)

Abstract: In order to reveal the influence of salt erosion and freeze-thaw cycle coupling effect of steel fiber on concrete damage evolution, four groups of concrete specimens with different mass fractions of steel fiber were tested under salt freeze-thaw test. The damage of concrete after salt freeze-thaw cycles was analyzed by ultrasonic method and laser scanning method. The damage degree D of concrete after salt freeze-thaw cycles was obtained by analyzing the change of ultrasonic wave velocity. The Weibull distribution model between D and freeze-thaw cycles n was established. The surface roughness was used to characterize the surface damage of the concrete. The change rate of roughness ΔR of concrete with different steel fiber dosage was studied as a function of freeze-thaw cycles. The results indicate that the damage of concrete decreases with the increase of steel fiber dosage. The relationship between D and n established by ultrasonic method satisfied the two-

收稿日期: 2022-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(51578109); 大连市科技创新基金(2020JJ27SN108)

作者简介: 丁一宁(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高性能混凝土研究, E-mail: ynding@hotmail.com。

Received: 2022-01-06

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51578109); Science and Technology Innovation Foundation of Dalian (No. 2020JJ27SN108)

Author brief: DING Yining (1962-), PhD, professor, doctoral supervisor, main research interest: high performance concrete, E-mail: ynding@hotmail.com.

parameter Weibull distribution model, and the determination coefficient is higher than 0.95. It has an exponential relationship between D and ΔR due to its determination coefficient higher than 0.80.

Keywords: steel fiber; salt freeze-thaw cycle; concrete damage; ultrasonic test; damage degree; roughness

在中国北方地区,大量混凝土建筑长期遭受冻融循环的破坏,桥梁结构以及采用除冰剂来化除表面的冰雪时的混凝土路面桥面,还会产生“盐冻”现象。冻融循环加剧了钢筋混凝土结构由荷载导致的裂缝扩展,而盐溶液从裂缝渗入混凝土内部,使钢筋锈蚀,因此,钢筋混凝土结构在盐-冻融的共同作用下加速劣化。

Berkowski等^[1]发现钢纤维的掺入可以明显改善混凝土盐冻融后的表面剥蚀情况。Wang等^[2]、Niu等^[3]、何锐等^[4]、Zhang等^[5]、徐丽娜等^[6]通过对混凝土的相对动态弹性模量、质量损失率、抗压性能等性能的测试,发现钢纤维可以改善混凝土盐-冻融循环后的耐久性,但缺乏对损伤量化的研究。部分学者寻求降低混凝土受盐-冻融循环破坏的措施,首要问题是如何快速客观地评估其损伤程度。然而,目前缺乏对钢纤维增强混凝土盐-冻融损伤的量化,也没有解决建立损伤量化指数评价标准的问题。部分学者采用超声波法来评估混凝土的损伤。Dong等^[7]、Ma等^[8]研究发现超声波速能反映混凝土内部结构的变化规律,并且可以利用超声波法定义混凝土的损伤程度^[9];Stauffer等^[10]对比了超声波法与共振法在检测混凝土损伤评估中的有效性,研究表明超声波法具有更高的准确性;刘卫东等^[11]发现超声波速作为损伤参量,易于检测且可与混凝土的其他宏观量建立联系,反映混凝土的冻融损伤规律。张峰等^[12]、龙广成等^[13]基于威布尔分布对混凝土冻融损伤进行了研究,并建立了冻融损伤模型,该模型可用于在冻融环境下对混凝土结构进行寿命预测。Yu等^[14]研究发现,在冻融循环作用下混凝土寿命预测模型及其累积模型能够较好地预测实际冻融环境下混凝土的自然疲劳寿命。因此,可利用威布尔分布来构建掺有钢纤维的混凝土冻融损伤模型。Ding等^[15]将混凝土裂缝表面粗糙度量,并分析不同纤维对裂缝表面粗糙度的影响;Tian等^[16]研究了在盐-冻融作用下高延性及复合材料混凝土界面损伤及其预测模型。

混凝土试件受盐-冻融循环破坏时,表面落渣或侵蚀等表面剥蚀是盐-冻融循环最为显著的破坏,而目前缺乏对盐-冻融损伤后混凝土试件表面粗糙度变化的研究。笔者对多组不同钢纤维掺量的混凝土试件进行快速盐-冻融循环试验,基于超声波法得到损伤度 D ,利用双参数威布尔分布建立相应的损

伤模型;通过对试件表面进行激光扫描试验,得到粗糙度变化率 ΔR ,研究 D 与 ΔR 的函数关系。

1 试验材料及方法

1.1 原材料与配合比

原材料:P·O 42.5R普通硅酸盐水泥,一级粉煤灰,粗骨料采用粒径为5~10 mm的连续级配碎石,细骨料采用细度模数为2.56的天然河沙,减水剂为聚羧酸高效减水剂。混凝土基准配合比如表1所示,其水胶比为0.35。试验采用端部弯钩型钢纤维如图1所示,物理参数如表2所示。

表1 混凝土基准配合比

Table 1 Basic mix proportion of self-consolidating concrete

kg/m ³					
水泥	水	粉煤灰	细骨料	粗骨料	减水剂
402	200	172	742	706	4.6



图1 结构型钢纤维

Fig. 1 Macro steel fiber

表2 结构型钢纤维相关物理参数

Table 2 Performance parameters of macro steel fiber

类型	长度/ mm	长径比	弹性模 量/GPa	抗拉强度/ MPa	纤维根数/ kg ⁻¹
钢纤维	35	65	200	>1 150	14 500

1.2 试件制备

抗压强度试验用100 mm×100 mm×100 mm立方体混凝土试件,快速盐-冻融试验试件尺寸为400 mm×100 mm×100 mm。按钢纤维的掺量(20、40、60 kg/m³)将试件分为3组,编号分别为SF20、SF40、SF60,另设一组素混凝土作为对照试件,编号NC。每组抗压强度试验及快速盐-冻融循环试验均取3个混凝土试件;混凝土抗压强度取3个立方体混凝土试件的抗压强度的平均值,各组混凝土试件的立方体抗压强度如表3所示。从表3可知,掺入钢纤维使混凝土内部的界面增加,同时引

起基体内的孔隙与含气量增多,因此掺入钢纤维可能会引起混凝土抗压强度的少许降低。

表 3 混凝土抗压强度

Table3 Compressive strength of concrete

类型	抗压强度/MPa	标准差/%
NC	65.4	3.8
SF20	63.2	4.2
SF40	62.1	4.8
SF60	60.7	4.6

1.3 快速冻融试验

参考《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[17]对混凝土试件进行快速盐-冻融试验,用毛巾吸干各组试件的表面水分后,测量各组试件的超声波速 v_0 ,然后对试件表面进行激光扫描试验;将试件置于快速冻融试验机中,并加入浓度为 3.5% 的 NaCl 溶液。以 4 h 为单次循环时长;每 25 次循环后,测量试件的超声波速 v_n ,然后进行激光扫描试验,直到 200 次循环完成,盐-冻融试验结束。

1.4 超声波试验和激光扫描试验

超声波试验使用超声波检测仪(Pundit Lab),其发射和接收频率为 54 kHz,采样数据周期 0.4 μ s。利用混凝土表面形貌测量方法,将盐-冻融循环后的试件表面看作由有限个点组成的面,采用三维激光扫描设备(见图 2)扫描试件指定区域;混凝土试件扫描区域为中心 140 mm \times 80 mm 范围,扫描间隔为 1 mm。

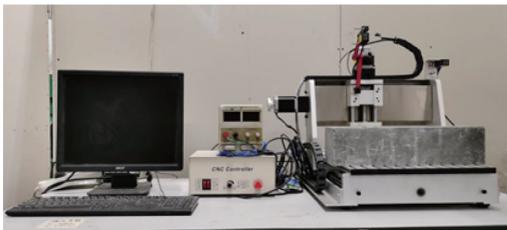


图 2 三维激光扫描设备

Fig. 2 Three dimensional laser scanning device

1.5 SEM 试验

分别从盐-冻融循环 0、50、100、200 次混凝土试件内部制取基体孔壁试样,用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope,型号为 QUANTA-450)对孔壁微观结构进行扫描,观察盐-冻融循环后混凝土基体微观形貌的变化。

2 结果与讨论

2.1 表面形貌

图 3(a)~(d)分别为盐-冻融循环 0、50、100、200 次后,NC、SF20、SF40、SF60 试件表面的剥蚀情况。

未经盐-冻融循环的混凝土试件表面光滑;50 次盐-冻融循环后,各组试件表面出现麻坑,但未显露团聚体;100 次盐-冻融循环后,NC 试件表面磨砂、砂浆剥落,掺入钢纤维的混凝土试件表面出现麻坑;200 次盐-冻融循环后,NC、SF20 试件表面骨料完全暴露,SF40、SF60 试件表面仅部分露出骨料。混凝土在盐-冻融循环条件下出现损伤,损伤由表及里、不断深入^[18],不断累积恶化导致混凝土破坏。钢纤维可以束缚混凝土+表面浆体^[19],从而降低混凝土表面的浆体剥离、骨料暴露等损伤。

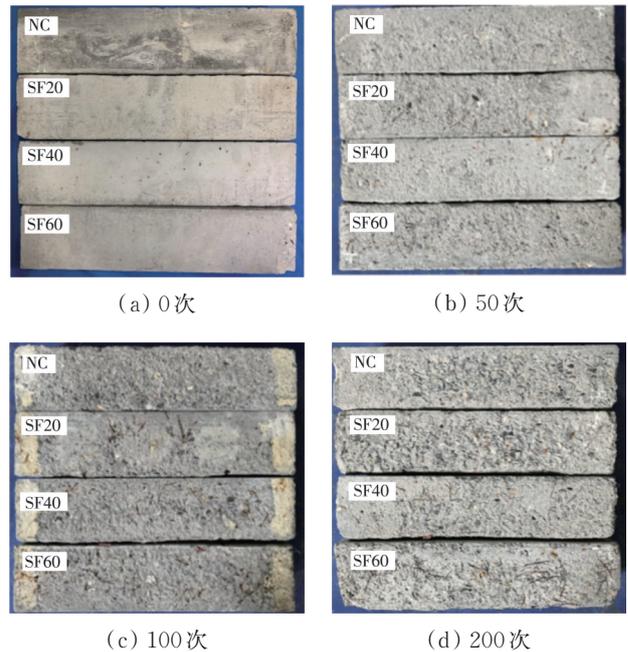


图 3 盐-冻融循环后各组试件表面形态

Fig. 3 Surface of specimens subjected to salt freeze-thaw cycles

2.2 微观形貌

图 4 对比了盐-冻融循环 0、50、100、200 次后 SF20 试件的孔壁微观结构。由图 4 可知,混凝土孔壁在盐-冻融循环作用下产生裂缝,且随着循环次数的增加,孔壁裂缝的数量增多且裂缝宽度逐渐增大。例如,在盐-冻融循环 50、100、200 次后,通过 SEM 电镜扫描可知,混凝土孔壁的裂缝宽度分别为 1.31、1.82、2.14 μ m。在冻融循环作用中,混凝土的劣化可分为吸水阶段、水冻结阶段和混凝土剥落阶段 3 个阶段^[9]。在水冻结阶段,混凝土孔隙中的水分结冰、体积增大,对孔壁产生冻胀压力;当温度回升后,孔隙中冻结的冰发生融化、体积减小,对孔壁的冻胀压力消除,如此完成一次冻融循环^[18]。在内部静水压力与渗透压^[20-21]的作用下,损伤不断累积导致混凝土耐久性严重降低。掺入钢纤维可以限制混凝土的裂缝扩展^[1],同时增加了混凝土基体的

界面,缓解了因水分结冰而产生的冻胀压力。

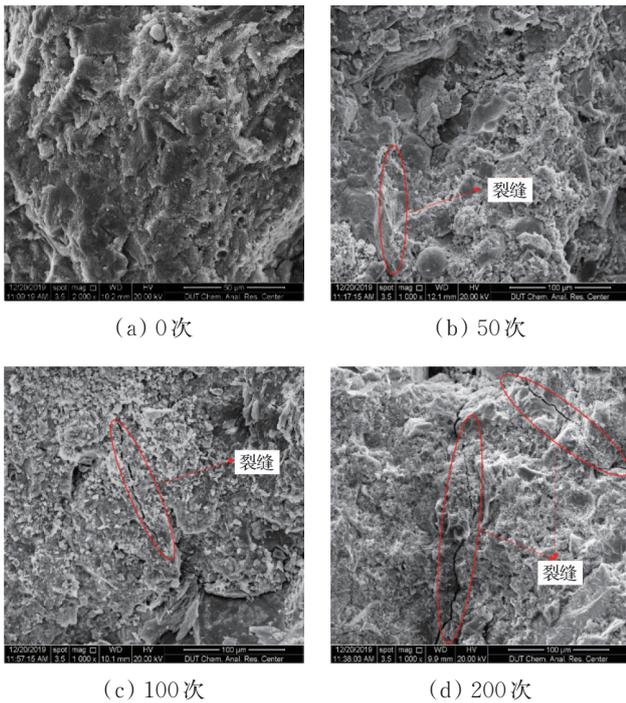


图4 盐-冻融循环作用下混凝土孔壁的微观结构

Fig. 4 Microstructure of pore wall of concrete subjected to salt freeze-thaw cycles

2.3 基于超声波法的韦布尔分布盐-冻融损伤模型

超声波在混凝土基体中传播时混凝土的盐-冻融损伤度 D 与超声波速 v_n 的关系^[22-23]如式(1)所示。

$$D_n = 1 - \frac{v_n^2}{v_0^2} \quad (1)$$

式中: D_n 为盐-冻融循环 n 次后混凝土的损伤度; v_n 为盐-冻融循环 n 次后混凝土的超声波速, m/s; v_0 为未进行盐-冻融循环时混凝土的超声波速, m/s。表4为盐-冻融循环作用后混凝土试件超声波检测试验结果。

表4 混凝土的相对超声波速
Table4 Ultrasonic velocity of concrete

盐-冻融 循环次数	相对超声波速/%			
	NC	SF20	SF40	SF60
0	100.000	100.000	100.000	100.000
25	99.789	99.789	99.783	99.663
50	97.955	98.648	96.828	98.716
75	96.016	93.60	95.807	97.726
100	91.800	92.905	94.612	94.989
125	84.296	84.945	83.967	88.695
150	78.330	80.785	78.710	83.916
175	67.580	72.889	67.391	74.653
200	56.914	62.352	62.025	68.758

注: 相对超声波速为盐-冻融循环 n 次时的超声波速与未进行盐-冻融循环的超声波速的比值。

采用两参数的韦布尔分布预测混凝土在钢纤维掺量不同时的损伤发展, 其概率密度函数^[24]如式(2)所示, 失效概率如式(3)所示。

$$f(n) = \frac{K}{\lambda} \cdot \left(\frac{n}{\lambda}\right)^{K-1} e^{-\left(\frac{n}{\lambda}\right)^K} \quad (2)$$

$$P_f(n) = F(n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n}{\lambda}\right)^K\right] \quad (3)$$

式中: n 为盐-冻融循环次数; λ 为尺度因子; K 为形状因子。

在盐-冻融循环作用下, 混凝土试件在 n 次循环后完全失效, 则失效概率为1。假设此时损伤度 D 值为1, 则失效概率可等效为混凝土的损伤度, 如式(4)所示。

$$D_n = 1 - e^{-\left(\frac{n}{\lambda}\right)^K} \quad (4)$$

对式(4)进行变换可得式(5)。

$$\ln\left(\frac{1}{\ln(1 - D_n)}\right) = K \ln n + K \ln \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

令 $y = \ln \frac{1}{1 - D_n}$, $x = \ln n$, $k = K$, $b = K \ln \frac{1}{\lambda}$, 得到一次方程, 如式(6)所示。

$$y = kx + b \quad (6)$$

对试验数据以及文献[22]数据进行拟合处理, 拟合结果如表5及图5所示。

表5 盐-冻融损伤演变方程的参数和决定系数

Table5 Parameters and determinants of salt freeze-thaw damage evolution equation

参数	NC	SF20	SF40	SF60	文献[22]
k	2.606	2.549	2.467	2.325	1.656
b	-13.701	-13.526	-13.075	-12.734	-9.924
R^2	0.994	0.986	0.963	0.983	0.982

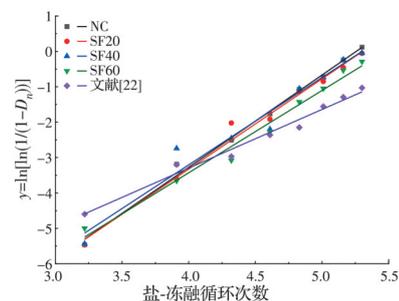


图5 基于韦布尔概率分布的损伤度变化

Fig. 5 Changes in damage degree based on the Weibull probability distribution

由图5可知, 随着钢纤维掺量逐渐增加, 拟合直线的斜率增大、截距减小, 说明混凝土损伤度逐渐减小。将拟合直线的斜率及截距代入式(5)、式(6), 可求得尺度因子 λ 与形状因子 K , 并得到各组试件及文献[22]试件的盐-冻融损伤演变方程, 如式(7)~

式(11)所示。

试件 NC:

$$D_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{192.00} \right)^{2.61} \right] \quad (7)$$

试件 SF20:

$$D_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{201.20} \right)^{2.55} \right] \quad (8)$$

试件 SF40:

$$D_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{200.33} \right)^{2.47} \right] \quad (9)$$

试件 SF60:

$$D_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{238.56} \right)^{2.33} \right] \quad (10)$$

文献[22]:

$$D_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{399.07} \right)^{1.66} \right] \quad (11)$$

从式(7)~式(10)可知,演变方程的尺度因子与形状因子变化较小,拟合曲线的决定系数均大于

0.95,可以很好地预测混凝土的损伤度 D 与循环次数 n 的关系。从式(11)可知,对于文献[22]中混凝土损伤度的演变方程,拟合曲线的决定系数为 0.982,说明在盐-冻融循环作用下混凝土损伤度与循环次数满足韦布尔分布。当循环次数为 0~50 时,钢纤维可以改善混凝土盐-冻融循环后的耐久性^[3],文献[22]中混凝土的损伤度较试验更大;当循环次数为 50~200 时,由于文献[22]中水灰比为 0.4,低于试验的水灰比 0.5,水灰比越高,胶凝基质越弱^[25-27],盐-冻融循环后混凝土的损伤度越大。

2.4 基于激光扫描试验的盐-冻融损伤模型

盐-冻融循环次数越多,试件表面剥蚀、泛砂越严重,表面越粗糙。通过激光扫描试验测得 n 次盐-冻融循环后混凝土表面的粗糙度 R_n ,其计算式为

$$R_n = \frac{S_t}{S_o} \quad (12)$$

式中:在裂缝表面一个单元网格(如图 6 所示)中, R_n 为粗糙度; S_t 为扫描区实际面积; S_o 为扫描区域投影面积。

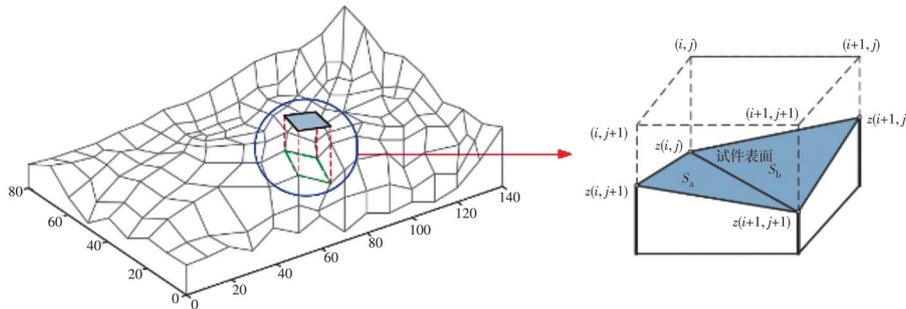


图 6 混凝土表面形态示意^[26]
Fig. 6 Morphology of concrete surface^[26]

利用粗糙度 R_n 计算表面粗糙度变化率 ΔR_n ,其计算式为

$$\Delta R_n = \frac{R_n - R_0}{R_0} \quad (13)$$

式中: ΔR_n 为盐-冻融循环 n 次后试件的表面粗糙度变化率; R_n 为盐-冻融循环 n 次后试件的表面粗糙度; R_0 为未进行盐-冻融循环的试件的表面粗糙度。表 6 列举了盐-冻融循环作用下各组混凝土试件的表面粗糙度变化率。

图 7 为混凝土试件表面的粗糙度变化率随盐-冻融循环次数的变化关系图。从表 6 及图 7 可知,当盐-冻融循环次数相同时,表面粗糙度变化率随着钢纤维掺量的增加而逐渐减小;盐-冻融循环 150 次后,试件 NC、SF20、SF40、SF60 的表面粗糙度变化率 ΔR 分别为 19.8%、20.7%、19.1%、14.2%,试件 SF60 的表面粗糙度变化率 ΔR 明显小于试件 NC、

表 6 盐-冻融循环作用下混凝土试件的表面粗糙度变化率
Table 6 Change rate of surface roughness of concrete subjected to salt freeze-thaw cycles

盐-冻融 循环次数	粗糙度变化率/%			
	试件 NC	试件 SF20	试件 SF40	试件 SF60
0	0	0	0	0
25	1.7	3.1	2.2	1.2
50	15.2	11.3	11.1	10.8
75	15.2	15.3	11.6	11.4
100	15.5	16.2	12.9	11.6
125	19.3	19.7	15.6	13.4
150	19.8	20.7	19.1	14.2
175	23.2	21.2	20.8	15.2
200	23.7	25.5	20.9	17.4

SF20、SF40,可见混凝土表面抗盐-冻融剥蚀的能力明显提高。

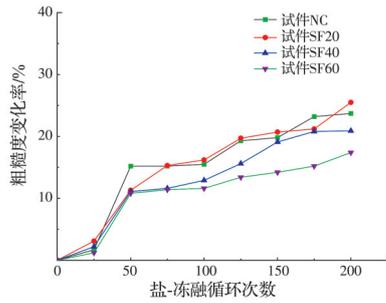


图 7 粗糙度变化率 ΔR 随盐-冻融循环次数的变化

Fig. 7 Change rate of surface roughness ΔR varying with salt freeze-thaw cycles

在盐-冻融循环作用下,粗糙度变化率 ΔR 与循环次数 n 之间的关系可分为 3 个阶段:第 1 阶段为迅速变化阶段,当盐-冻融循环次数小于 50 时,混凝土表面的水泥净浆开始剥蚀,试件表面逐渐泛砂,粗糙度变化率迅速增大;第 2 阶段为稳定阶段,当盐-冻融循环次数为 50~100 时,表面净浆几乎完全剥蚀、沙化明显,骨料及钢纤维开始外露,粗糙度变化

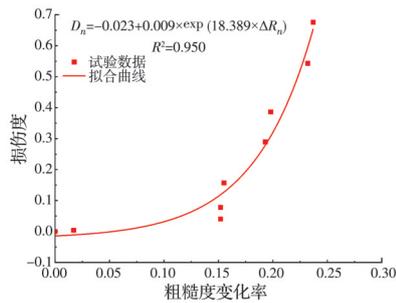
率变化不明显;第 3 阶段为缓慢增长阶段,当盐-冻融循环次数为 100~200 时,混凝土表面剥蚀加重,外露的骨料和钢纤维大幅增加,粗糙度变化率增长趋势放缓。

2.5 盐-冻融损伤度与粗糙度变化率的关系

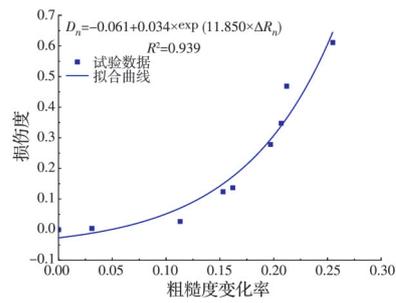
在盐-冻融循环条件下,混凝土因水分结冰产生的冻胀压力而出现基体损伤,基体损伤表现为基体内部孔壁开裂、超声波速减小的内部损伤和表面浆体剥离、粗糙度以及粗糙度变化率增大的表面损伤。基于指数函数关系(如式(14)所示),对混凝土损伤度与粗糙度变化率的关系进行曲线拟合。

$$D_n = a + b \cdot \exp(k \cdot \Delta R_n) \quad (14)$$

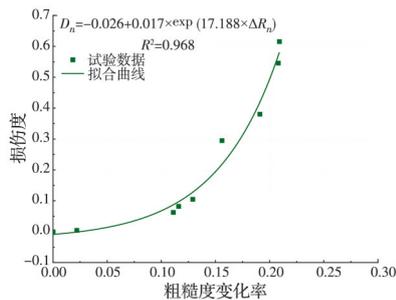
式中: a 、 b 、 k 为拟合参数。拟合曲线如图 8 所示。从图 8 可知,在盐-冻融循环作用下,混凝土的损伤度、粗糙度变化率均随循环次数的增加而增大;拟合曲线的决定系数均大于 0.95,说明试件 NC、SF20、SF40、SF60 的损伤度与粗糙度变化率之间较好地满足指数函数关系。



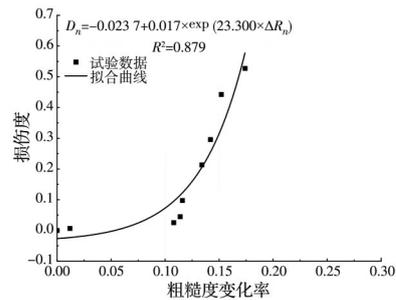
(a) 试件 NC



(b) 试件 SF20



(c) 试件 SF40



(d) 试件 SF60

图 8 盐-冻融条件下 D 与 ΔR 的变化曲线

Fig. 8 Relationship between D and ΔR of specimen subjected to salt freeze-thaw cycles

3 结论

研究了钢纤维在盐-冻融循环作用下对混凝土损伤演变的影响,得出如下结论:

1) 钢纤维降低了混凝土的裂缝扩展速率,增加了混凝土基体中的界面,缓解了因水分结冰、体积膨胀而产生的冻胀压力,显著改善了混凝土的抗盐-冻融损伤性能。

2) 当盐-冻融循环次数相同时,混凝土的损伤度会随着钢纤维掺量的增加而逐渐减小;基于韦布尔分布建立了混凝土在盐-冻融循环作用下的损伤预测模型。

3) 在盐-冻融循环作用下,混凝土表面粗糙度变化率包括迅速变化阶段、稳定阶段和缓慢增长阶段 3 个阶段;钢纤维有利于减少盐-冻融循环对混凝土表面的损伤,降低混凝土表面粗糙度变化率,提高

混凝土在盐-冻融循环作用下的耐久性;在盐-冻融循环条件下,混凝土损伤度与粗糙度变化率之间满足指数函数关系。

参考文献

- [1] BERKOWSKI P, KOSIOR-KAZBERUK M. Effect of fiber on the concrete resistance to surface scaling due to cyclic freezing and thawing [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 111: 121-127.
- [2] WANG J B, NIU D T. Influence of freeze-thaw cycles and sulfate corrosion resistance on shotcrete with and without steel fiber [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 122: 628-636.
- [3] NIU D T, JIANG L, BAI M, et al. Study of the performance of steel fiber reinforced concrete to water and salt freezing condition [J]. *Materials & Design*, 2013, 44: 267-273.
- [4] 何锐, 李丹, 王帅, 等. PE/HPP 混杂纤维混凝土的抗冻性能[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(4): 87-94.
HE R, LI D, WANG S, et al. Frost resistance of PE/HPP hybrid fiber-reinforced concrete [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45(4): 87-94. (in Chinese)
- [5] ZHANG W M, CHEN S H, ZHANG N, et al. Low-velocity flexural impact response of steel fiber reinforced concrete subjected to freeze-thaw cycles in NaCl solution [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 101: 522-526.
- [6] 徐丽娜, 张润泽, 牛雷, 等. 盐水与冻融耦合作用对玄武岩纤维水泥土性能影响研究[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(11): 3572-3583.
XU L N, ZHANG R Z, NIU L, et al. Coupling effect of saline solution and freezing-thawing cycles on performance of basalt fiber reinforced cemented soil [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(11): 3572-3583. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] MA H X, YU H F, LI C, et al. Freeze-thaw damage to high-performance concrete with synthetic fibre and fly ash due to ethylene glycol deicer [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 197-204.
- [9] ZHANG W H, PI Y L, KONG W P, et al. Influence of damage degree on the degradation of concrete under freezing-thawing cycles [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 260: 119903.
- [10] STAUFFER J D, WOODWARD C B, WHITE K R. Nonlinear ultrasonic testing with resonant and pulse velocity parameters for early damage in concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 2005, 102(2): 118-121.
- [11] 刘卫东, 苏文梯, 王依民. 冻融循环作用下纤维混凝土的损伤模型研究[J]. *建筑结构学报*, 2008, 29(1): 124-128.
LIU W D, SU W T, WANG Y M. Research on damage model of fibre concrete under action of freeze-thaw cycle [J]. *Journal of Building Structures*, 2008, 29(1): 124-128. (in Chinese)
- [12] 张峰, 李术才, 李守凯. 混凝土随机冻融损伤三维预测模型[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(1): 31-35, 134.
ZHANG F, LI S C, LI S K. Three-dimensional random damage prediction model of concrete caused by freeze-thaw [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2011, 33(1): 31-35, 134. (in Chinese)
- [13] 龙广成, 杨振雄, 白朝能, 等. 荷载-冻融耦合作用下充填层自密实混凝土的耐久性及其损伤模型[J]. *硅酸盐学报*, 2019, 47(7): 855-864.
LONG G C, YANG Z X, BAI C N, et al. Durability and damage constitutive model of filling layer self-compacting concrete subjected to coupling action of freeze-thaw cycles and load [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 47(7): 855-864. (in Chinese)
- [14] YU H F, MA H X, YAN K. An equation for determining freeze-thaw fatigue damage in concrete and a model for predicting the service life [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 137: 104-116.
- [15] DING Y N, LI D, ZHANG Y L. Quantitative analysis of macro steel fiber influence on crack geometry and water permeability of concrete [J]. *Composite Structures*, 2018, 187: 325-335.
- [16] TIAN J, WU X W, ZHENG Y, et al. Investigation of damage behaviors of ECC-to-concrete interface and damage prediction model under salt freeze-thaw cycles [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 226: 238-249.
- [17] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [18] 李果. 锈蚀混凝土结构的耐久性修复与保护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
LI G. Durable rehabilitation and protection to corroded concrete structure [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011. (in Chinese)
- [19] 李趁趁, 胡婧, 元成方, 等. 纤维/高强混凝土抗冻性能

- 试验[J]. 复合材料学报, 2019, 36(8): 1977-1983.
- LI C C, HU J, YUAN C F, et al. Experimental study on the freezing resistance of fiber reinforced high strength concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(8): 1977-1983. (in Chinese)
- [20] REN J G, LAI Y M. Study on the durability and failure mechanism of concrete modified with nanoparticles and polypropylene fiber under freeze-thaw cycles and sulfate attack [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, 188: 103301.
- [21] 王家滨, 牛荻涛, 袁斌. 冻融损伤喷射混凝土本构关系及微观结构[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(1): 30-39.
- WANG J B, NIU D T, YUAN B. Constitutive relation and microstructure on shotcrete after freeze and thaw damage [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2016, 38(1): 30-39. (in Chinese)
- [22] XIAO Q H, CAO Z Y, GUAN X, et al. Damage to recycled concrete with different aggregate substitution rates from the coupled action of freeze-thaw cycles and sulfate attack [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 221: 74-83.
- [23] 王鹏辉, 乔宏霞, 冯琼, 等. 氯氧镁水泥混凝土中涂层钢筋的耐久性退化研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3): 563-571.
- WANG P H, QIAO H X, FENG Q, et al. Study on durability degradation of coated steel bar in magnesium oxychloride cement concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(3): 563-571. (in Chinese)
- [24] 鲍威. 混杂纤维混凝土冻融损伤研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016.
- BAO W. Research on damage of hybrid fiber reinforced concrete in freeze-thaw cycles [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [25] AMINI B, TEHRANI S S. Combined effects of saltwater and water flow on deterioration of concrete under freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2011, 25(4): 145-161.
- [26] KIM M, KANG S H, HONG S G, et al. Influence of effective water-to-cement ratios on internal damage and salt scaling of concrete with superabsorbent polymer [J]. *Materials*, 2019, 12(23): 3863.
- [27] AL-AKHRAS N M. Performance of glass concrete subjected to freeze-thaw cycling [J]. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 2012, 6(1): 392-397.

(编辑 王秀玲)