

对基于动弹性模量的海工混凝土抗冻损伤评价

陆春华, 冯晨阳, 平安, 杨钰婷

(江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 为分析冻融环境下海工混凝土性能的退化规律, 对三种配合比的海工混凝土进行了快速冻融试验, 并对其物理力学性能及氯离子渗透性能进行分析与评估。试验结果表明: 当冻融循环分别超过 25 次和 50 次后, 海工混凝土的内部损伤和表面损伤先后出现明显的加剧; 总掺量不变但矿粉含量较多时, 海工混凝土的抗冻性较优, 且掺入适量纳米 SiO_2 能进一步有效提高混凝土的抗冻性; 以动弹性模量损伤度为依据, 对冻融循环作用下海工混凝土的抗压强度损失率及氯离子迁移系数增长率进行分析; 并对动弹性模量损伤度与冻融循环次数的直接关系进行了探讨。分析结果表明经历冻融作用的海工混凝土, 其动弹性模量损伤度与抗压强度损失率、氯离子迁移系数增长率之间存在较好的线性关系, 且幂函数能有效地反映动弹性模量损伤度与冻融循环次数之间的关系。

关键词: 冻融循环; 海工混凝土; 抗压强度; 动弹性模量; 氯离子迁移系数

中图分类号: TU502⁺.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)04-0563-08

Damage evaluation of frost resistance of marine concrete based on dynamic elastic modulus

LU Chunhua, FENG Chenyang, PING An, YANG Yuting

(College of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Jiangsu Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to analyze the degradation law of marine concrete properties under freeze-thaw environment, the rapid freeze-thaw test was carried out on three kinds of marine concrete mixtures, and the physical and mechanical properties and chloride penetration properties were analyzed and evaluated. The results show that when the freeze-thaw cycles exceed 25 times and 50 times, the internal damage and surface damage of marine concrete are significantly aggravated successively. The frost resistance of marine concrete is better when the total dosage is constant but the content of mineral powder is more, and the frost resistance of concrete can be further improved by adding appropriate amount of nano- SiO_2 . Based on the damage degree of dynamic elastic modulus, the loss rate of compressive strength and the growth rate of chloride migration coefficient of marine concrete under freeze-thaw cycle were analyzed. The direct relationship between the damage degree of dynamic elastic modulus and the number of freeze-thaw cycles was also discussed. The analysis results show that there is a good linear relationship between the damage degree of dynamic elastic modulus and the loss rate of compressive strength and the growth rate of chloride migration coefficient for marine concrete subjected to freeze-thaw, and the power function can effectively reflect the relationship between the damage degree of dynamic elastic modulus and the number of freeze-thaw cycles.

Key words: freeze-thaw cycle; marine concrete; compressive strength; dynamic elastic modulus; chloride migration coefficient

处于我国东北, 华北等寒冷地区的沿海混凝土结构在其服役过程中往往受冻融循环作用的影响, 导致其内部孔隙水结冰及体积膨胀, 造成混凝土开裂甚至剥落^[1], 严重影响混凝土结构的安全使用及长期寿命^[2]。因此, 针对我国严寒地区的沿

海混凝土结构在冻融循环作用下的性能退化等相关问题, 亟待进一步研究及有效解决。

国内外学者对冻融环境下混凝土性能退化进行了一定的试验研究与理论分析。多数研究和规范以动弹性模量以及质量的变化作为混凝土冻融

收稿日期: 2022-11-11

修回日期: 2023-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878319)

第一作者: 陆春华(1979—), 男, 教授, 主要从事混凝土结构耐久性等方面研究。E-mail: lch79@ujs.edu.cn

损伤的主要评价指标^[3-4]。Ge 等^[4]指出质量损失率和相对动弹性模量分别代表混凝土表面和内部的损伤程度。Zhang 等^[5]通过试验发现混凝土的抗压强度基本随冻融次数线性下降。另有学者提出复掺掺合料的混凝土的抗压强度较单掺混凝土更高^[6]。Ferreira 等^[7]提出随冻融次数的增加,混凝土动弹性模量降低,进一步研究表明粉煤灰、高炉矿渣和纳米 SiO₂ 均能有效提高混凝土的抗冻性^[7-8]。海工混凝土正是以矿物掺合料、改性材料、外加剂等组成的具有高耐久性、良好的工作性等特性的混凝土^[9]。因此,针对于冻融环境下海工混凝土的性能退化研究就显得尤为重要。

鉴于此,本文以海工混凝土为研究对象,将不同配合比、不同冻融次数作为试验变量,通过测定冻融循环作用后海工混凝土的质量、动弹性模量、抗压强度和氯离子迁移系数,深入探讨冻融循环作用下海工混凝土材料的退化规律;将动弹性模量损伤度分别与抗压强度损失率与氯离子

扩散系数联系起来,提出用动弹性模量损伤度来衡量海工混凝土材料的抗冻性能。

1 试验材料与方法

1.1 混凝土材料与配合比设计

借鉴杭州湾跨海大桥部分结构构件的混凝土配合比设计方法^[9],以粉煤灰、矿粉、纳米 SiO₂ 为主要考虑因素,共设计了不同配合比三类海工混凝土,具体见表 1。其中,水泥为 P.O42.5 级普通硅酸盐水泥,粗骨料采用粒径为 5~25 mm 的连续级配碎石,细骨料选用细度模数为 2.6 的中砂(河砂);矿物掺合料选用Ⅱ级粉煤灰和 S95 级矿粉,两者的化学组成见表 2;改性材料采用镇江德为化学品有限公司生产的粉末状纳米二氧化硅(粒径 25-30 nm,纯度 99.5% 以上);减水剂采用上海臣启化工科技有限公司生产的聚羧酸类减水剂。各海工混凝土标准试块的 28 d 立方体抗压强度 f_{cu}^{28} 实测值见表 1。

表 1 海工混凝土配合比及力学性能参数

Tab. 1 Mix proportion and mechanical properties indexes of marine concrete

配合比 编号	水胶比	复掺比 (F : S)	材料用量/kg · m ⁻³								28 d 立方体
			胶凝材料用量			纳米 SiO ₂	砂	石子	水	聚羧酸类 减水剂	抗压强度 <i>f</i> _{cu} ²⁸ /MPa
			水泥	粉煤灰	矿粉						
F2S3	0.40	2 : 3	200.50	80.20	120.30	0	698	1 139	160	0.80	50.5
F3S2	0.40	3 : 2	200.50	120.30	80.20	0	698	1 139	160	0.80	53.1
F2S3N	0.40	2 : 3	196.49	80.20	120.30	4.01	698	1 139	160	0.80	49.9

注: F 表示粉煤灰, S 表示矿粉; 配合比“F2S3”表示粉煤灰 F 和矿粉 S 用量分别占胶凝材料总用量的 20% 和 30%。

表 2 粉煤灰及矿粉的化学组成

Tab. 2 Chemical composition of fly ash and mineral powder

矿物种类	SiO ₂ /%	CaO/%	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	Na ₂ O/%	MgO/%	SO ₃ /%	其它/%
粉煤灰	60.82	3.86	23.74	6.76	/	0.55	0.63	3.64
矿粉	33.98	36.91	15.22	0.62	0.39	9.27	/	3.61

1.2 试件设计

本试验共浇筑了 3 种不同尺寸的海工混凝土试件, 具体如下:

(1) 冻损试件, 主要用来测定冻融循环后混凝土试件的质量损失及相对动弹性模量; 试件采用 100 mm × 100 mm × 400 mm 的棱柱体(见图 1a), 每种配合比制作 1 组 3 个试件;

(2) 抗压试件, 主要用来测定冻融循环后混凝土的抗压强度; 由于受冻融箱试件盒尺寸的限制, 抗压试件采用 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试块(见图 1b), 每种配合比制作 3 组(每组 3 个)抗压试件;

(3) RCM(Rapid Chloride Migration)试件, 主要用来测定冻融作用后混凝土的氯离子迁移系数; 试件采用直径 100 mm、高为 50 mm 的圆柱体(见图 1c), 每种配合比制作 5 组(每组 3 个)RCM 试件。



(a) 冻损试块

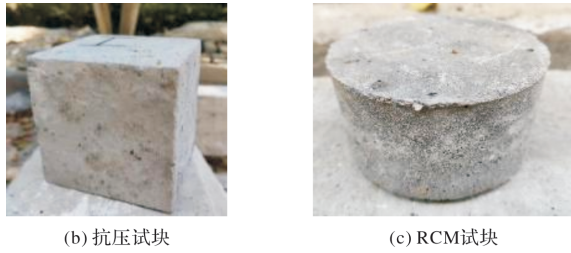


图1 三种海工混凝土试件

Fig. 1 Physical objects of three types of marine concrete specimens

1.3 冻融试验方案及性能评价

参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[10]中的快冻法,采用CABR-HDK9型混凝土快速冻融试验机开展水冻水融条件下的冻融试验;在冷冻和融化过程中,测温试件的中心温度分别控制在 $-18\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $5\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,每次冻融循环在4 h内完成,共进行100次循环。

对于冻损试件,分别测定冻融循环0、25、50、75以及100次后试件的质量和横向基频(见图2),并以质量损失率 ΔW_n 和动弹性模量损伤度 D_E 来评价三类海工混凝土冻融损伤程度。对于抗压试件,分别测定0、50以及100次循环后试块的抗压强度;对于RCM试件,分别测定0、25、50、75以及100次循环后试件的氯离子迁移系数(RCM试验,见图3);最后以抗压强度损失率 Δf_c 以及氯离子迁移系数增长率 ΔD_{RCM} 来评价受冻后海工混凝土性能退化情况。

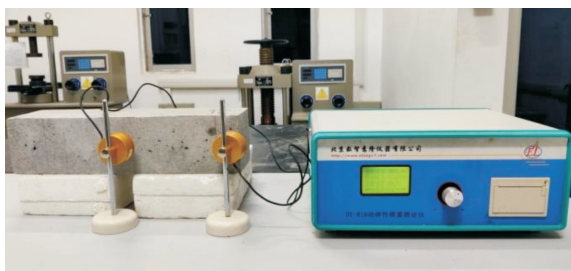


图2 横向基频测定

Fig. 2 Measurement of transverse fundamental frequency

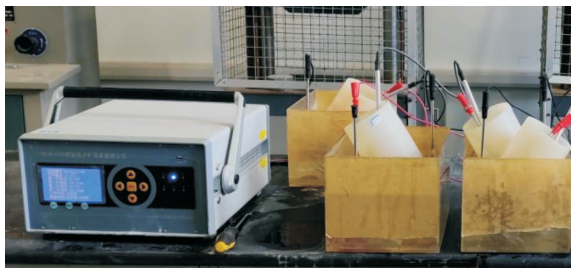


图3 RCM试验

Fig. 3 RCM test

2 试验结果与分析

2.1 质量损失率

在冻融试验过程中,每经历25次循环后将冻损试件从试验机中取出,清除试件表面浮渣并擦去表面积水后,观察混凝土表面损伤并称量试件的质量。与冻融前混凝土完好的表面形貌相比,冻融后混凝土表面的小坑蚀逐渐增多;50次冻融循环后,混凝土表面砂浆剥落程度开始加剧;达到100次时,试件表层粗骨料开始脱落,甚至出现了角部缺失的现象。

参照规范GB/T 50082—2009^[10]及文献[3, 5, 11, 12],采用式(1)计算冻损试件的质量损失率 ΔW_n ;最后取每组3个试件测定结果的算术平均值作为最终质量损失率。

$$\Delta W_n = (1 - W_n / W_0) \times 100\% \quad (1)$$

式中: ΔW_n 为 n 次冻融循环后试件的质量损失率(%); W_0 和 W_n 分别为冻融循环前和 n 次冻融循环后试件的质量(kg)。

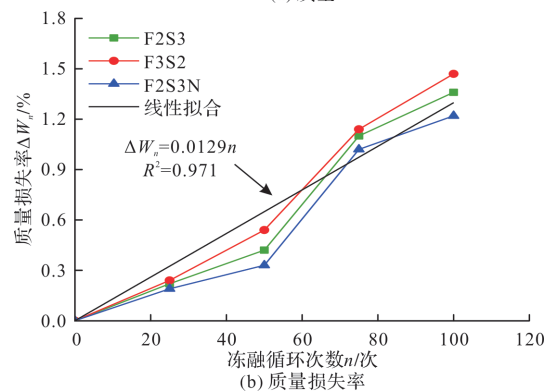
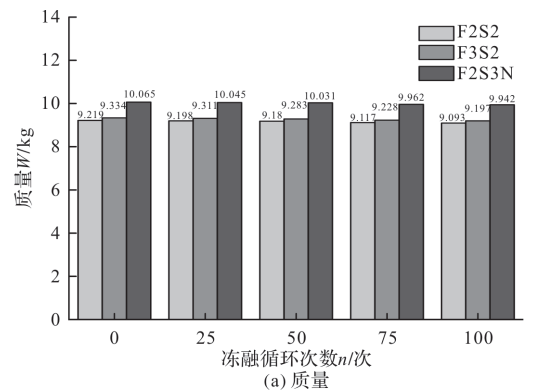


图4 冻融循环后冻损试件的质量分析

Fig. 4 Mass analysis of test specimens after freeze-thaw cycles

三类海工混凝土冻融循环后的质量及质量损失率如图4所示。从图4中可以看出:(1)三类海工混凝土试件的质量均随冻融循环次数的增加而减少,质量损失率随冻融循环次数的增加而增加;(2)当冻融循环次数小于50次时,试件的质量损

失较为缓慢;当超过 50 次后,试件质量损失的增幅明显增大,这说明当冻融循环次数超过 50 次后,冻融循环作用对混凝土造成的损伤逐步加剧;(3)对比三类海工混凝土,可以看出在冻融循环次数相同的情况下,试件的质量损失率从大到小排列依次为 $F3S2 > F2S3 > F2S3N$ 。其原因主要在于,虽然粉煤灰、矿粉等矿物掺合料都具有后期火山灰活性,但矿粉的火山灰活性要高于粉煤灰、且早于它发生二次水化反应,故 $F2S3$ 混凝土的抗冻性优于 $F3S2$ 混凝土;此外,纳米 SiO_2 具有高早期火山灰活性并能促进水泥的水化反应和粉煤灰的二次水化反应^[13],从而进一步提升了 $F2S3N$ 混凝土的抗冻性。

Hong 等^[14]认为混凝土的质量损失率与冻融循环次数呈现一定的线性关系。鉴于此,对本试验三类海工混凝土的质量损失率 ΔW_n 与冻融循环次数 n 进行线性拟合(结果见图 4b),两者的关系公式如下。

$$\Delta W_n = 0.0129n, R^2 = 0.971 \quad (2)$$

对比图 4(b)中试验结果和拟合曲线来看,虽然线性拟合曲线的相关系数很高($R^2 = 0.971$),但它不能反映质量损失率在不同冻融循环阶段的变化特性;此外,对于不同种类的海工混凝土,需要考虑混凝土抗冻性的差异而分别进行拟合。

2.2 动弹性模量损伤度

规范 GB/T 50082—2009^[10]给出了快速冻融情况下混凝土动弹性模量 E 的计算公式,如公式(3)所示。考虑到冻融后 E 值的下降,可采用动弹性模量损伤度 D_E 来评价混凝土的冻融损伤程度^[11,15,16],具体见公式(4)。最后,同样以三个试件的平均值作为试验结果进行分析。

$$E = 13.244 \times 10^{-4} \times WL^3 f^2 / a^4 \quad (3)$$

式中: W 为试件质量(kg); L 、 a 分别为试件的长和正方形截面的边长(mm); f 分别为试件的横向基频(Hz)。

$$D_E = (1 - E_n / E_0) \times 100\% \quad (4)$$

式中: E_n 为 n 次冻融后混凝土动弹性模量(MPa); E_0 为冻融前混凝土动弹性模量(MPa)。

冻融循环后,三类海工混凝土的动弹性模量及其损伤度计算结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出:(1)掺入纳米 SiO_2 后海工混凝土的动弹性模量显著增大,其值约为未掺加时的 1.8 倍;(2)冻融循环次数小于 25 次时, D_E 相对较小,说明少量的冻融循环作用不足以对海工混凝土造成明显的冻融损伤;而当冻融循环超过 25 次后,三类试件

的 D_E 明显增大,说明内部损伤逐步积累、扩大;(3)对比三类海工混凝土试件,掺入适量纳米 SiO_2 的海工混凝土 D_E 最小;(4)与冻融后混凝土的 ΔW_n 相比,相同情况下 D_E 更大,这说明冻融作用对混凝土造成的内部损伤较外部损伤更为严重,Ge 等^[4]也得到类似的结论。

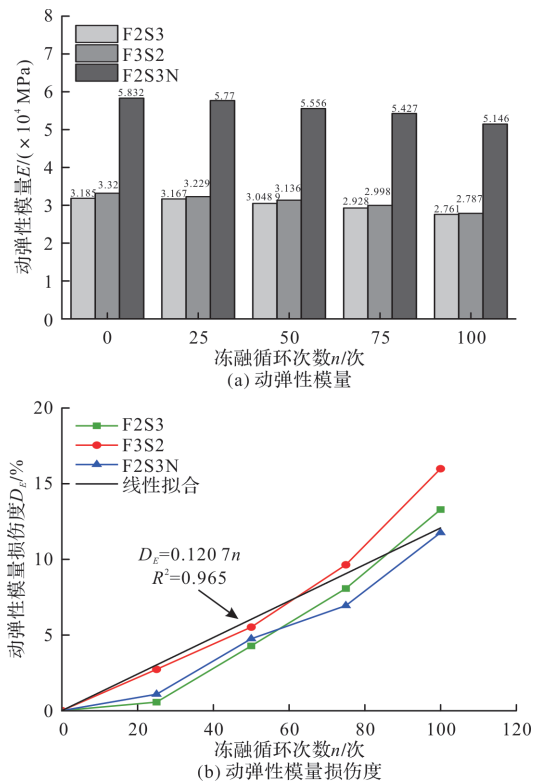


图5 冻融循环后冻损试件的动弹性模量分析

Fig. 5 Dynamic elastic modulus analysis of test specimens after freeze-thaw cycles

Shang 等^[17]研究认为混凝土的动弹性模量损伤度 D_E 与冻融循环次数 n 也存在线性关系;采用线性函数对上述试验结果进行拟合分析(见图 5b),相应的拟合公式如下。

$$D_E = 0.1207n, R^2 = 0.953 \quad (5)$$

与 ΔW_n 的线性拟合结果相似,混凝土 D_E 与冻融循环次数 n 之间的线性拟合也需要考虑不同冻融阶段以及混凝土种类的影响。

2.3 抗压强度损失率

对于边长 100 的立方体抗压试块,可按规范 GB/T 50081—2019^[18]给出的方法(见下式(6))推算其 150 mm 标准立方体试块抗压强度 f_{cu} (MPa),并取每组三个试件测定结果的算术平均值进行分析。这里,考虑到冻融后混凝土 f_{cu} 的下降,参照文献[2],同样提出用混凝土抗压强度损失率 Δf_c (%)来评价混凝土的冻融损伤程度,具体见公式(7)。

$$f_{cu}=0.95F/A \quad (6)$$

式中: F 为抗压试块的破坏荷载(N); A 为抗压试块的承压面积(mm^2).

$$\Delta f_c = (1 - f_{cu,n} / f_{cu,0}) \times 100\% \quad (7)$$

式中: $f_{cu,0}$ 和 $f_{cu,n}$ 分别为冻融循环前和 n 次冻融循环后试块的立方体抗压强度(MPa).

图6给出了冻融过程中三类海工混凝土的 f_{cu} 及 Δf_c 的变化情况. 需要说明的是, 考虑到大掺量矿物掺合料混凝土的水化进程相对较长, 故冻融试验是在试件养护 90 d 后进行的, 此时测得冻融循环前三类海工混凝土的 f_{cu} 分别为 55.47 MPa、61.92 MPa 和 50.40 MPa, 均高于表 1 中的 28 d 强度值. 从图 6 中还可以看出: 在冻融循环 50 次前后, 试件的 Δf_c 由慢变快, 说明随冻融循环次数的增加, 三类海工混凝土的冻融损伤程度逐步加快; 同样地, 掺入适量纳米 SiO_2 的海工混凝土 Δf_c 值最小.

Zhang 等^[5]认为混凝土的抗压强度损失率 Δf_c 与冻融循环次数 n 之间也存在线性关系. 经线性拟合, 可得 Δf_c 与 n 的拟合结果如下式(8)所示.

$$\Delta f_c = 0.143 \, 1n, R^2 = 0.965 \quad (8)$$

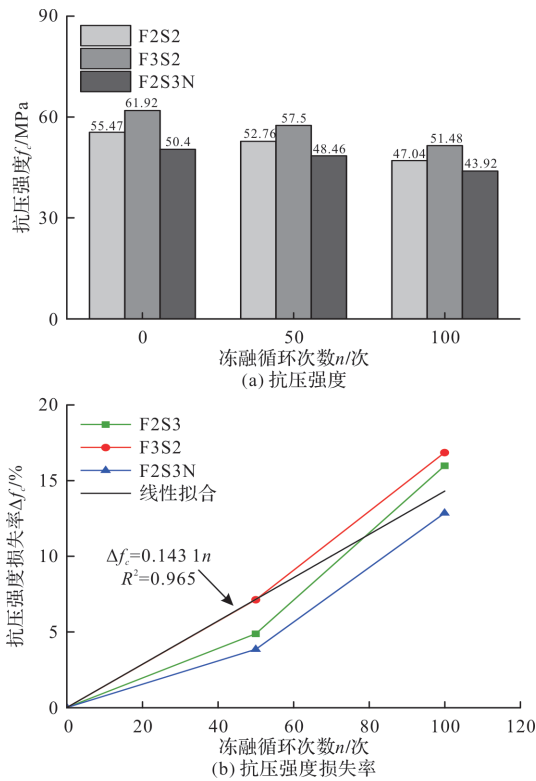


图6 冻融循环作用后试块的抗压强度分析

Fig. 6 Compressive strength analysis of test blocks after freeze-thaw cycles

2.4 氯离子迁移系数增长率

将完成一定冻融循环后的圆柱体试件进行

RCM 试验^[10], 并按下式(9)求得混凝土的非稳态氯离子迁移系数 D_{RCM} (m^2/s), 同样取三个试件测得的算术平均值进行分析. 对比冻融前后混凝土 D_{RCM} 值的变化, 采用公式(10)来计算冻融后混凝土氯离子迁移系数增长率 ΔD_{RCM} (%), 以此来表达冻融作用对混凝土损伤及渗透性能影响.

$$D_{RCM} = \frac{0.023 \, 9 \times (273 + T) L}{(U - 2) t} \left(X_d - 0.238 \sqrt{\frac{(273 + T) L X_d}{U - 2}} \right) \quad (9)$$

式中: T 为阳极溶液初始温度与结束温度的平均值($^{\circ}\text{C}$); L 为试块厚度(mm); U 为电压值(V); t 为试验持续时间(h); X_d 为氯离子渗透深度(mm).

$$\Delta D_{RCM} = (D_{RCM,n} / D_{RCM,0} - 1) \times 100\% \quad (10)$$

式中: $D_{RCM,0}$ 和 $D_{RCM,n}$ 分别为冻融循环前和 n 次后试块的非稳态氯离子迁移系数 D_{RCM} (m^2/s).

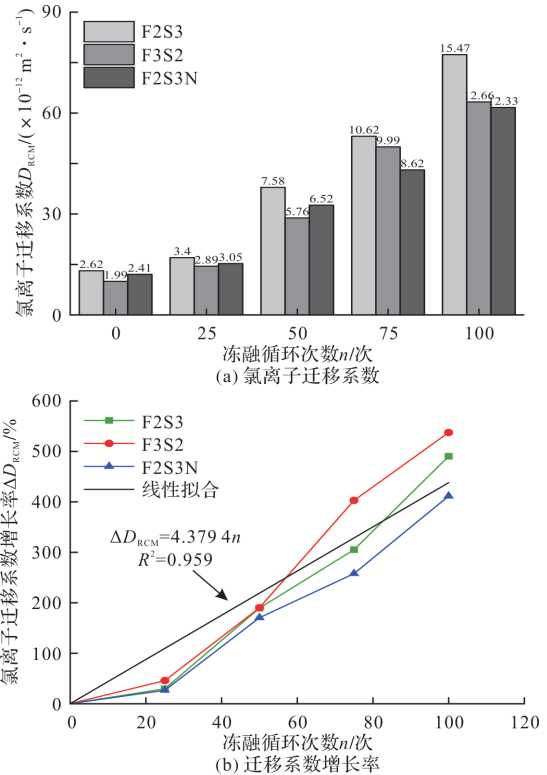


图7 冻融循环作用后试块的氯离子迁移系数分析

Fig. 7 Chloride migration coefficient analysis of test specimens after freeze-thaw cycles

经计算, 三类海工混凝土的 D_{RCM} 和 ΔD_{RCM} 随冻融循环次数 n 的变化关系见图 7. 由图中结果可知, 当冻融循环次数小于 25 次时, 三类海工混凝土的氯离子迁移系数略有增长; 而当冻融循环次数超过 25 次后, ΔD_{RCM} 值迅速增大; 到 100 次冻融循环时, 三类海工混凝土的 ΔD_{RCM} 值在 400% (F2S3N 试件) ~ 540% (F3S2 试件) 之间. 上述结果表明, 快速冻融循环次数达到 25 次后, 海工混

凝土抗氯离子渗透能力的下降速度逐步加大。

由图7(b)给出的 ΔD_{RCM} 和 n 的关系曲线可知, 两者也存在一定的线性关系。经线性拟合, 两者关系如下式(11)所示。从拟合结果和试验结果对比来看, 两者的拟合效果较好(相关系数 $R^2 = 0.959$), 尤其是冻融循环超过 50 次后的情况。

$$\Delta D_{RCM} = 4.3794n, R^2 = 0.959 \quad (11)$$

3 基于动弹性模量损伤度分析受冻混凝土性能退化

一般而言, 动弹性模量和质量的变化均可作为混凝土冻融损伤的评价指标。但从图5和图7中的结果对比可知, 冻融循环作用下海工混凝土的质量损失率数值过小, 容易造成一定的误差, 故本文选用动弹性模量损伤度 D_E 作为混凝土冻融损伤的主要评价指标。

3.1 动弹性模量损伤度随冻融循环次数的变化分析

已有研究表明, 冻融作用下混凝土的动弹性模量损伤度 D_E 与冻融循环次数 n 存在一定的关系, 常见的有线性关系^[5]、幂函数关系^[15]、指数函数^[15]、多项式关系^[19]等。这里, 分别采用上述关系对本文试验结果进行回归分析, 结果如图8所示。

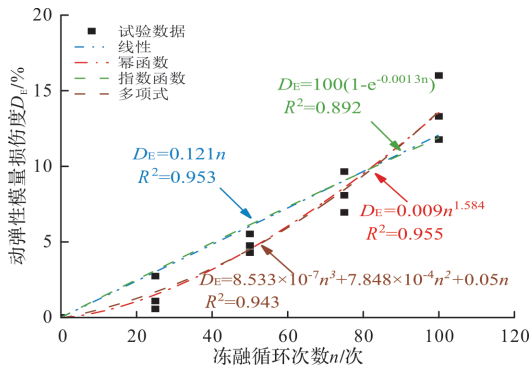


图8 D_E 与 n 之间关系模型

Fig. 8 Relation model of between D_E and n

从图8中可以看出, 对于本文中的海工混凝土试件, 采用幂函数来表达动弹性模量损伤度 D_E 与冻融循环次数 n 之间的关系时效果最好。鉴于此, 在本文试验数据基础上, 又收集了现有文献^[5, 19-23](均为掺有矿物掺合料的混凝土)共 35 个试验结果, 采用幂函数对 D_E 与 n 关系进行拟合(见图9), 结果见下式(12)。可以看出, 幂函数关系能较好地反映海工混凝土 D_E 与 n 两者之间的关系, 拟合效果较好。

$$D_E = 0.0941n^{1.1052}, R^2 = 0.8739 \quad (12)$$

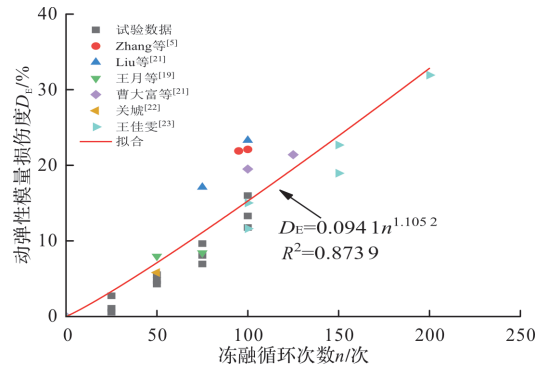


图9 D_E 与 n 之间幂函数模型

Fig. 9 Power function model between D_E and n

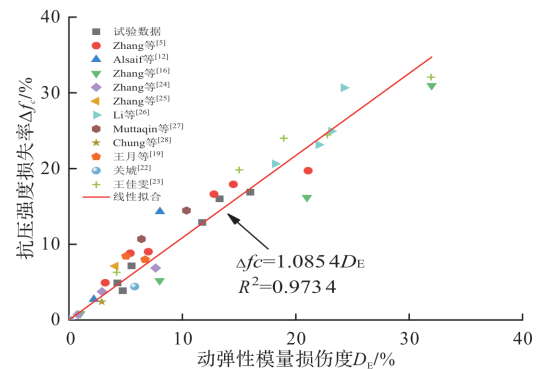


图10 Δf_c 与 D_E 之间的关系

Fig. 10 Relation between Δf_c and D_E

3.2 动弹性模量损伤度与抗压强度损失率的关系

对比图5b和图6b的相关结果, 可以看出在相同冻融循环次数下, 动弹性模量损伤度较低的海工混凝土, 其抗压强度损失率也较小, 即受冻混凝土的性能退化与动弹性模量损伤度存在一定的对应关系。鉴于此, 结合本文试验及现有文献^[5, 12, 16, 19, 22-28]共 49 个试验结果, 对冻融作用下混凝土的抗压强度损失率 Δf_c 与动弹性模量损伤度 D_E 之间的关系进行了分析, 结果如图10所示。

从图10中给出的 Δf_c 与 D_E 的对应关系来看, 两者之间存在较好的线性关系。经采用线性函数拟合, 可得 Δf_c 与 D_E 的关系公式如式(13)所示。

$$\Delta f_c = 1.0854D_E, R^2 = 0.9734 \quad (13)$$

从结果来看, 两者拟合效果很好(相关系数 $R^2 = 0.9734$), 且关系系数接近 1.0。这说明冻融循环作用后, 混凝土的 D_E 与 Δf_c 两者较接近, 由此可见用 Δf_c 也能很好的衡量混凝土的冻融损伤程度。

3.3 动弹性模量损伤度与氯离子迁移系数增长率的关系

相应地, 基于本文试验及现有文献^{[5, 7,}

29]共28个试验结果,图11给出了受冻混凝土的氯离子迁移系数增长率 ΔD_{RCM} 与动弹性模量损伤度 D_E 之间的关系。从图11中不难看出, ΔD_{RCM} 的值随损伤度 D_E 的增大而逐渐增大,两者之间呈现良好的线性关系。对图11中结果进行线性拟合,可得到 ΔD_{RCM} 与 D_E 的关系公式,见式(14)。

$$\Delta D_{RCM} = 30.937 D_E, R^2 = 0.9117 \quad (14)$$

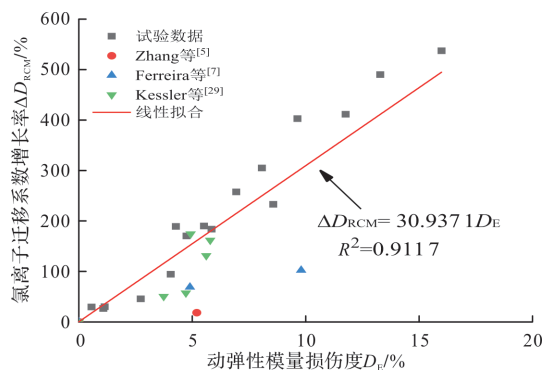


图11 ΔD_{RCM} 与 D_E 之间的关系

Fig. 11 Relation between ΔD_{RCM} and D_E

从结果来看,两者拟合效果也较好,说明冻融循环作用后混凝土的抗氯离子渗透性能的降低与其动弹性模量损伤度的增大有明显的线性对应关系,也能很好地反映冻融作用引起的混凝土损伤程度。

4 结论

通过对三种配合比的海工混凝土进行了快速冻融试验,研究了海工混凝土抗压强度损失率、氯离子迁移系数增长率和动弹性模量损伤度的关系及动弹性模量损伤度随冻融循环次数增长的退化规律,主要结论如下:

(1)冻融循环作用后,三种配合比的海工混凝土抗冻性能退化规律相似。将粉煤灰与矿粉的掺量从3:2调整至2:3,能提高海工混凝土的抗冻性能,且掺入纳米 SiO_2 可以进一步提高海工混凝土抗冻性能;究其原因,主要是矿粉会先于粉煤灰发生二次水化反应,增加矿粉含量可以生成更多C-S-H凝胶,填充微裂缝,提高抗冻性能;而纳米 SiO_2 的加入能促进水泥的水化反应及粉煤灰的二次水化反应,对提高抗冻性能有利;

(2)结合本文及已有的试验结果,建立冻融循环次数与海工混凝土动弹性模量的幂函数关系,该关系相对于线性与指数关系,拟合精度更高;

(3)冻融循环作用后,海工混凝土的动弹性模量损伤度与抗压强度损失率和氯离子迁移系数增长率存在较好的线性关系,其中抗压强度损失率

与动弹性模量损伤度两者相接近,用抗压强度损失率也能很好地衡量海工混凝土的冻融损伤程度。

参考文献 References

- [1] 武海荣,金伟良,延永东,等. 混凝土冻融环境区划与抗冻性寿命预测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(4):650-657.
WU Hairong, JIN Weiliang, YAN Yongdong, et al. Freeze-thaw environment regionalization and prediction of freeze-resistance life of concrete[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(4): 650-657.
- [2] 关斌,牛荻涛,肖前慧. 考虑残余强度修正的混凝土冻融损伤层及轴心受压模型研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(3):175-182.
GUAN Xiao, NIU Ditao, XIAO Qianhui. Study on freeze-thaw damage layer and axial compression model of concrete considering residual strength correction[J]. Journal of Railway Science, 2021, 43(3):175-182.
- [3] LI G F, SHEN X D. A study of the durability of aeolian sand powder concrete under the coupling effects of freeze-thaw and dry-wet conditions[J]. JOM, 2019, 71(6):1962-1974.
- [4] GE Y, YANG W C, Yuan J, et al. Deterioration of concrete freezing-thawing in different salts solution[J]. Key Engineering Materials, 2009, 802:315-321.
- [5] ZHANG X, WANG L, ZHANG J. Mechanical behavior and chloride penetration of high strength concrete under freeze-thaw attack[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 142:17-24.
- [6] SAKTHIVEL T, GETTU R, PILLAI R G. Compressive strength and elastic modulus of concretes with fly ash and slag[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series A, 2019, 100:575-584.
- [7] FERREIRA M, KUOSA H, LEIVO M, et al. Concrete performance subject to coupled deterioration in cold environments[J]. Nuclear Engineering & Design, 2016, 323: 228-234.
- [8] HU Z, HU B, GUO M, et al. Improving recycled aggregate concrete by compression casting and nano-silica[J]. Nanotechnology Reviews, 2022, 11(1):1273-1290.
- [9] COLLEPARDI M. Concrete durability in a marine environment[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1175(1):012018.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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,2019:8-9.
MOHURD. Standard for test methods for long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T

- 50082-2009 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2019: 8-9.
- [11] WANG Y, LIU Z, FU K, et al. Experimental studies on the chloride ion permeability of concrete considering the effect of freeze-thaw damage[J]. Construction and Building Materials, 2020, 236: 117556.
- [12] ALSAIF A, BERNAL S A, GUADAGNINI M, et al. Freeze-thaw resistance of steel fibre reinforced rubberised concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 195:450-458.
- [13] ZAHEDI M, RAMEZANIANPOUR A A, RAMEZANIANPOUR A M. Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration[J]. Construction and Building Materials, 2015, 78:354-361.
- [14] HONG X, WANG H, SHI F. Influence of NaCl freeze thaw cycles and cyclic loading on the mechanical performance and permeability of sulphoaluminate cement reactive powder concrete[J]. Coatings, 2020, 10 (12): 1227.
- [15] SONG W L, Li X F, MA K F. The effect of freeze-thaw cycles on mechanical properties of concrete[J]. Advanced Materials Research, 2011, 163: 3429-3432.
- [16] ZHANG S, ZHAO B. Research on the performance of concrete materials under the condition of freeze-thaw cycles[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2013, 17(9): 860-871.
- [17] SHANG H S, YI T H, SONG Y P. Behavior of plain concrete of a high water-cement ratio after freeze-thaw cycles[J]. Materials, 2012, 5(9): 1698-170.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019:12-16.
- MOHURD. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081-2019 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2019: 12-16.
- [19] 王月, 安明喆, 余自若, 等. 氯盐侵蚀与冻融循环耦合作用下 C50 高性能混凝土的耐久性研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(3):41-46.
- WANG Yue, AN Mingzhe, YU Ziruo, et al. Study on Durability of C50 High Performance Concrete under the coupling effect of chlorine salt erosion and freeze-thaw cycle[J]. China Railway Science, 2014, 35(3): 41-46.
- [20] LIU M, WANG Y. Damage constitutive model of fly ash concrete under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24 (9): 1165-1174.
- [21] 曹大富, 葛文杰, 郭容邑, 等. 冻融循环作用后钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(6):137-144.
- CAO Dafu, GE Wenjie, GUO Rongyi, et al. Experimental study on flexural behavior of reinforced concrete beams subjected to freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(6):137-144.
- [22] 关斌. 冻融环境钢筋混凝土受弯构件的损伤分析与承载力研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.
- GUAN Xiao. Damage analysis and bearing capacity research of reinforced concrete flexure member in freeze-thaw environment[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [23] 王佳雯. 混凝土抗压强度与动弹性模量关系试验研究[D]. 武汉:湖北工业大学, 2017.
- WANG Jiawen. Experimental study on the relationship between compressive strength and dynamic elastic modulus of concrete[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2017.
- [24] ZHANG P, CONG Y, VOGEL M, et al. Steel reinforcement corrosion in concrete under combined actions: The role of freeze-thaw cycles, chloride ingress, and surface impregnation[J]. Construction & Building Materials, 2017, 148:113-121.
- [25] ZHANG P, WITTMANN F H, VOGEL M, et al. Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 100:60-67.
- [26] LI B, MAO J, NAWA T, et al. Mesoscopic chloride ion diffusion model of marine concrete subjected to freeze-thaw cycles[J]. Construction and Building Materials, 2016, 125:337-351.
- [27] MUTTAQIN H, KOUHEI N, YASUHIKO S, et al. Stress-strain behavior in tension and compression of concrete damaged by freezing and thawing cycles[C]// International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete. Essen, Germany: RILEM Workshop 2002: 335-342.
- [28] CHUNG C W, SHON C S, KIM Y S. Chloride ion diffusivity of fly ash and silica fume concretes exposed to freeze-thaw cycles [J]. Construction & Building Materials, 2010, 24(9):1739-1745.
- [29] KESSLER S, THIEL C, GROSSE CU, et al. Effect of freeze-thaw damage on chloride ingress into concrete [J]. Materials and structures, 2017, 50(2):121. 1-121.13.