

# 不同冻融介质作用下混凝土力学性能衰减模型

赵燕茹<sup>\*</sup>, 范晓奇, 王利强, 时金娜

(内蒙古工业大学 土木工程学院, 呼和浩特 010051)

**摘要:** 通过快速冻融试验, 研究了三种不同冻融介质(水、3.5wt%NaCl、飞机除冰液)对混凝土质量损失、动弹性模量以及力学性能的影响, 比较三种冻融介质对混凝土损伤程度的大小, 分析了混凝土相对动弹性模量与相对剩余抗压强度和相对剩余抗折强度之间的关系, 基于相对动弹性模量建立了相对剩余抗压强度和相对剩余抗折强度衰减方程。结果表明: 3.5wt%NaCl溶液对混凝土的损伤度要远大于单纯水冻融循环对混凝土的损伤度, 飞机除冰液对混凝土冻融损伤具有抑制作用; 混凝土抗压、抗折强度以及相对动弹性模量随着冻融循环次数的增加而降低; 三种冻融介质下混凝土抗压、抗折强度损失率大小关系为: 3.5wt%NaCl>水>飞机除冰液; 相对动弹性模量与相对剩余抗压强度、相对剩余抗折强度相关性好, 可以通过测定混凝土相对动弹性模量来评估混凝土相对剩余强度。

**关键词:** 衰减方程; 抗折强度; 抗压强度; 不同冻融介质; 损伤度

中图分类号: TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2017)02-0463-08

## Attenuation model of mechanical properties of concrete under different freezing and thawing

ZHAO Yanru<sup>\*</sup>, FAN Xiaoqi, WANG Liqiang, SHI Jinna

(School of Civil Engineering, Inner Mongolia of Technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** The influence of mass loss, dynamic elastic modulus and mechanical properties of concrete in different solutions (Water, 3.5wt%NaCl, Aircraft Deicing fluid) were studied through accelerated cyclic freeze-thaw tests, whose damage degree to concrete was also compared. The relationship between relative dynamic elastic modulus and relative residual compressive strength relative residual flexural strength was analyzed. Meanwhile, the attenuation equation was also established on account of relative dynamic elastic modulus. The study shows that the freeze-thaw damage to the concrete in 3.5wt%NaCl solution is much worse than in the water, but its damage can be restrained in the Aircraft Deicing fluid. With the increase of the freeze-thaw testing times, the compressive strength, flexural strength and relative dynamic elastic modulus of concrete decrease. The loss ratio of the compressive strength and the flexural strength in different solutions ranges in a descendant sequence is from 3.5wt%NaCl solution to water and then to Aircraft Deicing fluid. The relative residual strength can be evaluated by the relative dynamic elastic modulus due to its good relativity to the relative residual compressive strength and relative residual flexural strength.

**Keywords:** Attenuation equation; flexural strength; compressive strength; different media; damage degree

在中国北方地区, 为了保证交通的正常运行, 需要对结冰的混凝土道路和机场跑道喷洒除冰液, 道路除冰液主要成分为NaCl溶液, 飞机除冰液(Aircraft Deicer-AD)主要成分为乙二醇。关于三

种不同冻融介质(水、NaCl溶液、AD)对混凝土抗冻性能和力学性能的影响, 国内外学者做了大量研究。洪锦祥等<sup>[1]</sup>研究了水冻和盐冻作用下混凝土动弹性模量、抗折强度、抗压强度和劈裂抗拉强度与损伤变

收稿日期: 2016-02-22; 录用日期: 2016-04-15; 网络出版时间: 2016-04-25 14:19

网络出版地址: [www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20160425.1419.002.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20160425.1419.002.html)

基金项目: 国家自然科学基金(11362013)

通讯作者: 赵燕茹, 博士, 教授, 硕士生/博士生导师, 研究方向为纤维混凝土复合材料 E-mail: zhaoyanru710523@126.com

引用格式: 赵燕茹, 范晓奇, 王利强, 等. 不同冻融介质作用下混凝土力学性能衰减模型[J]. 复合材料学报, 2017, 34(2): 463-470.

ZHAO Y R, FAN X Q, WANG L Q, et al. Attenuation model of mechanical properties of concrete under different freezing and thawing[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(2): 463-470 (in Chinese).

量之间的关系，并建立了抗折强度衰减方程。曹大富等<sup>[2]</sup>测定了水冻后混凝土受压强度，分析了相对动弹性模量、冻融循环次数、混凝土强度等级对混凝土受压性能的影响。郑晓宁等<sup>[3]</sup>研究发现，在冻融循环和盐类混合侵蚀共同作用下，加速了混凝土力学性能的衰减。JANSSEN 和 MARCHAND<sup>[4-5]</sup>研究发现加入 NaCl 溶液加速了混凝土冻融破坏过程。余红发、孙伟等<sup>[6]</sup>通过盐蚀环境下混凝土冻融循环试验，建立了双因素作用下混凝土损伤模式的判别函数。白康<sup>[7]</sup>将混凝土试件放入机场道路除冰液中进行冻融循环试验，研究发现低浓度的飞机除冰液冻融破坏与水中冻融破坏程度接近。陈继超等<sup>[8]</sup>发现混凝土经中低浓度乙二醇溶液浸泡后，冻融破坏严重，当乙二醇浓度为 3wt% 时冻融破坏达最大值。混凝土在不同冻融介质作用下抗冻性能和力学性能有较大差别。目前，研究多集中于同种试验条件下单种或两种冻融介质对混凝土性能的影响，试验均建立在冻融循环次数与相对动弹性模量、力学性能的关系上<sup>[9-12]</sup>，对于相同试验条件下不同冻融介质对混凝土

抗冻性和力学性能的损伤衰减研究较少，也未直接建立相对动弹性模量与相对剩余强度之间的关系。

本文采用快速冻融试验，研究水、3.5wt% NaCl 和飞机除冰液对混凝土冻融破坏的影响，通过定义相对损伤度  $\beta$  来对比两种除冰液对混凝土的损伤程度，结合强度损失率（抗压、抗折）比较三种不同冻融介质对冻融后混凝土力学性能的影响，并基于相对动弹性模量  $E_r$  建立不同冻融介质下混凝土冻融损伤力学衰减模型。

## 1 配合比与试验方法

### 1.1 原材料与配合比

水泥(C)：内蒙古冀东水泥生产的 P. O42.5 硅酸盐水泥，物理力学性能见表 1。粗集料(CA)：碎石与卵石，公称粒径为 5~20 mm，表观密度为 2 808 kg·m<sup>-3</sup>。细集料(FA)：天然河沙，公称直径<4.75 mm。水(W)：呼和浩特市自来水，符合《混凝土拌合用水标准》(JGJ 63—2006<sup>[13]</sup>) 要求。混凝土强度为 C30，配合比见表 2。

表 1 水泥的物理力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of cement

Initial Setting time/Final Setting time/h	Rupture strength/MPa		Compression strength/MPa		Water requirement of normal consistency (by mass)/%
	3 d	28 d	3 d	28 d	
2.91/3.83	5.9	8	29.8	48.9	27.4

表 2 混凝土配合比

Table 2 Mix proportion of concrete

Code	$m_w/m_c$	Mix proportion of concrete/(kg·m <sup>-3</sup> )			
		W	C	FA	CA
NC	0.48	185	385.42	695.24	1 134.34

Notes: NC — Normal concrete;  $m_w/m_c$  — Water cement ratio; W — Water; C — Cement; FA — Fine aggregate; CA — Coarse aggregate.

### 1.2 冻融介质

水(W)：呼和浩特市自来水，符合国家标准。NaCl 溶液：质量分数为 3.5wt% 的 NaCl 溶液。飞机除冰液 (Aircraft Deicer-AD)：主要成分为乙二醇。

### 1.3 试验方法

由于试验内容和方法的不同，分别制作了两种尺寸的试件。一种用于测定抗压强度和冻融试验，尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块；另一种用于抗折强度测定和冻融试验，尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体试件。冻融

介质分为水冻、盐冻和飞机除冰液三种。混凝土冻融试验按照 ASTM 快速冻融法进行，依据我国《普通混凝土长期性能及耐久性试验方法标准》(GB/T 50082—2009<sup>[14]</sup>) 规定，每次冻融循环时间为 2~4 h 完成，本实验冻融循环时间设定为 3.5~4 h 内完成，且融化时间为 1 h。最高温度和最低温度分别为 7 °C 和 -19 °C。在冻融试验过程中每隔冻融循环 25 次时取出试件测定冻融后混凝土动弹性模量、质量损失率和部分试件的抗压、抗折强度。当冻融循环过程中出现下列情形之一，可停止试验：(1)达到规定的冻融循环 250 次；(2)试件的质量损失率达到 5%；(3)相对动弹性模量下降到 60%。

## 2 不同冻融介质下混凝土性能比较

### 2.1 混凝土质量损失和相对动弹性模量分析

图 1(a) 为混凝土试件在水、3.5wt% NaCl 溶液、飞机除冰液(AD)三种冻融介质中质量损失与冻融循环次数关系图。可知，三种不同冻融介质下混

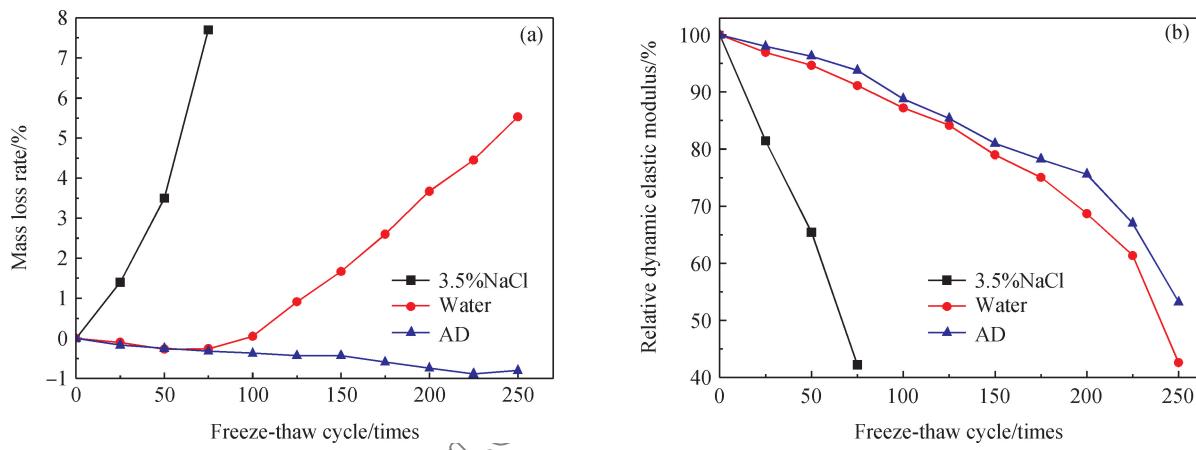


图 1 三种不同介质下混凝土冻融次数与质量损失率和相对动弹性模量的关系

Fig. 1 Relationship between freeze-thaw times and mass loss rate/relative dynamic elastic modulus of concrete under three different circumstances

混凝土质量损失的演化规律不同。在3.5 wt% NaCl冻融介质下,随着冻融次数的增加,质量损失率急剧增大,几乎呈指数增长,经过75次冻融循环,质量损失接近8%。在水冻条件下,在冻融循环75次之前,随着冻融次数的增加,质量损失率为负数,并呈现下降趋势,这表明75次冻融循环之前,混凝土质量不断增加,75次冻融循环后,混凝土质量损失率随着冻融次数的增加而增大,几乎呈正比例函数增长,其原因在于随冻融次数增加,试件表面出现裂缝,进一步出现层状水泥砂浆剥落,直至粗骨料掉落,质量损失不断增加,经过250次冻融循环,质量损失接近6%。在AD冻融介质下,随着冻融次数的增加,混凝土的质量损失率始终为负数,并呈现缓慢下降过程,几乎与横坐标轴平行,表明混凝土的质量一直处于增加状态,其原因在于AD中混凝土表层水泥砂浆剥落很少且孔洞数量不断增多,这时吸水饱和状态下的裂缝和孔洞吸水量大于冻融前,所以在质量损失方面上表现为质量的增加。三种冻融介质下混凝土质量损失速率的大小关系是:3.5 wt% NaCl>水>AD。

图1(b)为混凝土试件在水、3.5 wt% NaCl溶液、飞机除冰液(AD)三种冻融介质中相对动弹性模量与冻融循环次数关系图。可知,三种不同冻融介质下混凝土相对动弹性模量随冻融次数的增加表现出不同程度的下降。在3.5 wt% NaCl冻融介质下,随着冻融次数的增加,相对动弹性模量呈直线下降趋势,仅经过75次冻融循环后,混凝土相对动弹性模量就下降到50%以下。在水和AD冻融介质下,随着冻融次数的增加,相对动弹性模量下降呈抛物

线趋势,经过250次冻融循环后,混凝土相对动弹性模量才降到60%以下,并且AD对应的曲线始终在水对应的曲线之上,说明AD对混凝土的冻融损伤程度要小于水冻,AD对混凝土冻融具有抑制作用。分析三条折线斜率可知,三种冻融介质下混凝土相对动弹性模量下降速度的大小关系是:3.5 wt% NaCl>水>AD。

## 2.2 抗压强度与抗折强度分析

图2(a)和2(b)分别为混凝土试件在水、3.5 wt% NaCl溶液、飞机除冰液(AD)三种冻融介质中冻融循环次数与混凝土抗压、抗折强度的关系。可以看出,混凝土在三种冻融介质中的抗压、抗折强度均随着冻融循环次数的增加而降低。同一冻融循环次数下,混凝土在3.5 wt% NaCl溶液中抗压、抗折强度下降程度最大,其次是水溶液,强度下降最小的是AD。在75次冻融循环条件下,3.5 wt% NaCl中混凝土抗压强度、抗折强度分别为9.2 MPa、2.53 MPa,水中混凝土抗压强度、抗折强度分别为33.3 MPa、3.99 MPa,AD中混凝土抗压强度、抗折强度分别为43.9 MPa、4.71 MPa,3.5 wt% NaCl中混凝土抗压强度下降程度大约是水中的2.8倍、AD中的12.6倍,抗折强度下降程度大约是水中的1.9倍、AD中的3.5倍。说明3.5 wt% NaCl对混凝土强度破坏最严重,水次之,AD对混凝土强度破坏程度最小。比较图2(a)和2(b)中三条折线斜率可知,3.5 wt% NaCl溶液在两幅图中所对应的折线斜率绝对值最大,表明混凝土在3.5 wt% NaCl冻融介质中抗压、抗折强度下降速度最快,3.5 wt% NaCl加速了混凝土强度损失;水

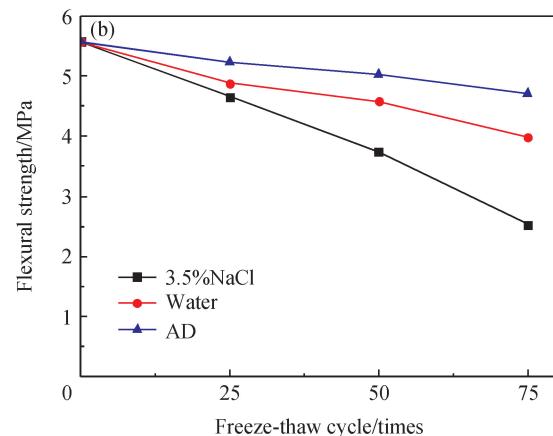
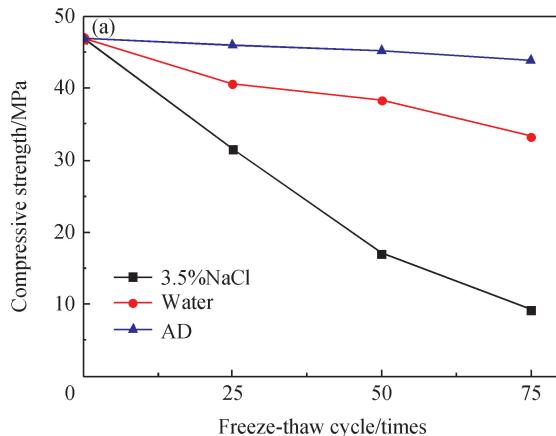


图 2 混凝土抗压和抗折强度与冻融循环次数的关系

Fig. 2 Relationship between compressive strength and flexural strength and the number of freeze-thaw cycles

冻次之,表明混凝土在水冻条件下抗压、抗折强度下降速度较缓慢。AD 在两幅图中所对应的折线斜率绝对值最小,折线与 X 轴近乎平行,表明混凝土在 AD 冻融介质中抗压、抗折强度下降速度最慢,AD 抑制了混凝土强度损失。

### 2.3 损伤度对比分析

根据混凝土损伤力学,混凝土冻融损伤变量  $D(N)$  定义为

$$D(N) = 1 - \frac{E(N)}{E_0} = 1 - E_r \quad (1)$$

式中:  $E(N)$  为  $N$  次冻融循环后混凝土动弹性模量;  $E_0$  为 0 次冻融循环后混凝土动弹性模量;  $E_r$  为相对动弹性模量。

定义混凝土冻融相对损伤度之比为

$$\beta_i(N) = \frac{D_i(N)}{D_0(N)} \quad (2)$$

式中:  $D_0(N)$  为冻融介质为水时  $N$  次冻融循环后混凝土损伤度;  $D_i(N)$  为  $N$  次冻融循环后混凝土损伤度 ( $i=1$  时冻融介质为 3.5wt% NaCl;  $i=2$  时冻融介质为 AD);  $\beta_i(N)$  为损伤度之比,其中,  $\beta_1(N)$  为 3.5wt% NaCl 溶液与水冻融损伤度之比,  $\beta_2(N)$  为 AD 与水冻融损伤度之比。冻融介质为 3.5wt% NaCl 溶液中的混凝土经过 75 次冻融循环后相对动弹性模量下降到 60%,故冻融试验停止,为了方便比较,只选取前 75 次冻融循环下各介质中混凝土的相对损伤度进行对比。

图 3 为混凝土相对损伤度与冻融次数的关系。可知,  $\beta_1(N)$ 、 $\beta_2(N)$  随着冻融次数的增加而不断增大,说明随着冻融次数增加,混凝土冻融损伤程度越来越大。在冻融循环 75 次条件下,  $\beta_1(N)$  数值始

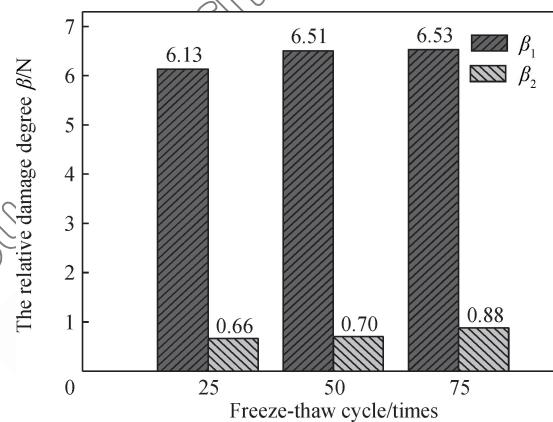


图 3 混凝土相对损伤度与冻融次数的关系

Fig. 3 Relationship between relative damage degree and freezing thawing times of concrete

终大于 1,而  $\beta_2(N)$  数值却未超过 1。由此表明 3.5wt% NaCl 溶液对混凝土的损伤度要远大于单纯水冻融循环对混凝土的损伤度,其损伤度大约是水冻的 6 倍以上。原因在于:首先,3.5wt% NaCl 的溶液增加了混凝土的饱和度,从而增大了冻结时产生的拉应力;其次,根据 Fick 第二定律<sup>[15]</sup>可知,由于扩散程度不同,混凝土表层到内部浓度依次递减,在冻结时会产生浓度差,在损伤破坏时,表层混凝土最先开始剥落;再次,由于低温冻结作用下孔隙之间会产生浓度差,溶液会在两孔之间迁移,由此会产生渗透压;最后,3.5wt% NaCl 融化冰需要从周围吸收大量热量,使冰下的混凝土温度降低,产生温度差,加剧了混凝土的破坏<sup>[16]</sup>。由图也可知,飞机除冰液相对损伤度均保持在 1 以下,说明飞机除冰液对混凝土冻融损伤具有抑制作用,原因在于:一方面加入乙二醇提高了混凝土水化程度,

使孔隙更加均匀, 冻融循环时产生的压力可以向附近孔隙进行卸荷, 从而改善了混凝土的抗冻性<sup>[17]</sup>; 另一方面飞机除冰液冰点低, 并随着浓度的增加冰点会逐渐降低, 从而降低混凝土中的结冰量, 有效抑制了孔隙水结冰产生的拉应力, 从而使混凝土的损伤程度也有所缓解。综合可知, 三种冻融介质损伤程度大小顺序为: 3.5 wt% NaCl > 水 > AD。

## 2.4 力学性能衰减对比分析

图 4(a) 为混凝土抗压强度损失率与冻融循环次数关系图。混凝土抗压强度损失率为

$$\frac{f_{c0} - f_c(N)}{f_{c0}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $f_{c0}$  为 0 次冻融循环后混凝土抗压强度;  $f_c(N)$  为  $N$  次冻融循环后混凝土抗压强度。

图 4(b) 为混凝土抗折强度损失率与冻融循环次数关系图。混凝土抗折强度损失率为

$$\frac{f_{r0} - f_r(N)}{f_{r0}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $f_{r0}$  为 0 次冻融循环后混凝土抗折强度;  $f_r(N)$  为  $N$  次冻融循环后混凝土抗折强度。

由图可知, 三种冻融介质下混凝土抗压强度损失率、抗折强度损失率均随着冻融次数的增加而增大, 表明混凝土冻融循环后抗压强度、抗折强度与冻融次数相关。比较图中曲线斜率可知, 3.5 wt% NaCl 对应曲线斜率最大, 水对应曲线次之, AD 对应曲线较平缓, 即在 3.5 wt% NaCl 中的混凝土强度损失率速率最大, 在 25 次冻融循环之前, 水中斜率大于 AD 中, 此时水冻中混凝土强度损失速率要高于 AD 中。25 次冻融循环之后, 两者斜率接近, 强度损失率速率相当。通过以上分析可知, 3.5 wt%

NaCl 中混凝土不但强度损失率数值最大, 而且速率也最快, 水中次之, AD 中混凝土强度损失率数值最小且速率最慢。原因在于: 混凝土冻融循环本质上是损伤积累过程, 混凝土抗压强度、抗折强度与混凝土内部损伤有关, 内部损伤程度越大, 混凝土抗压强度、抗折强度损失率数值也越大。冻融损伤使混凝土孔隙率增大, 有效受力面积  $A_n$  减少, 由  $f = \sigma A_n$  可知, 混凝土抗压强度、抗折强度损失率随着冻融循环次数的增加而增大。所以三种不同冻融介质中混凝土抗压强度、抗折强度损伤度和损失率大小关系均为: 3.5 wt% NaCl > 水 > AD, 且抗压强度损失率大于抗折强度损失率。

## 3 基于相对动弹性模量的力学性能衰减规律分析

### 3.1 基于相对动弹性模量的力学性能衰减模型建立

抗压强度损失率和抗折强度损失率随着冻融循环次数的增加而增大, 且强度损失率曲线是连续函数。抗压强度损失率、抗折强度损失率与冻融循环次数呈正比例关系, 如图 4 所示, 即单位冻融循环次数内抗压强度损失率、抗折强度损失率为常数。设冻融循环  $N$  次混凝土强度(包括抗压、抗折强度)为  $f(N)$ , 它是可微函数, 令未冻前强度为  $f_0$ , 令常数为  $\lambda_1$  ( $\lambda_1 < 0$ ),  $N$  到  $(N + \Delta N)$  内强度衰减率为

$$\frac{f(N + \Delta N) - f(N)}{f(N)} = \lambda_1 \Delta N \quad (5)$$

移向变形得

$$f(N + \Delta N) - f(N) = \lambda_1 f(N) \Delta N \quad (6)$$

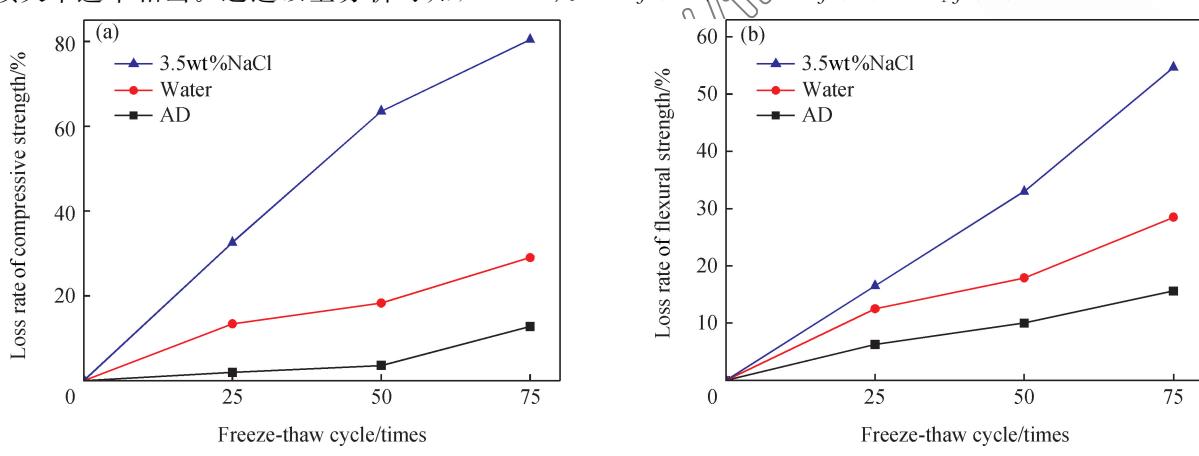


图 4 三种介质下混凝土抗压强度和抗折强度损失率与冻融循环次数关系

Fig. 4 Relationship between the loss rate of compressive strength and flexural strength and the number of freeze-thaw cycles under three solutions

即：

$$\frac{df(N)}{dN} = \lambda_1 f(N) \quad (7)$$

对上式积分得

$$\frac{f(N)}{f_0} = e^{\lambda_1 N} \quad (8)$$

基于动弹模量损失率与冻融循环次数呈正比，设冻融循环  $N$  次混凝土动弹性模量为  $E_n(N)$ ， $E_n(N)$  是连续可微函数，令未冻融前动弹性模量为  $E_0$ ， $E_r$  为相对动弹性模量。令常数为  $\lambda_2$  ( $\lambda_2 < 0$ )，则到  $(N + \Delta N)$  内动弹性模量损失率为

$$\frac{E(N + \Delta N) - E(N)}{E(N)} = \lambda_2 \Delta N \quad (9)$$

移项变形得

$$E(N + \Delta N) - E(N) = \lambda_2 E(N) \Delta N \quad (10)$$

即

$$\frac{dE(N)}{dN} = \lambda_2 E(N) \quad (11)$$

上式积分得

$$\frac{E(N)}{E_0} = e^{\lambda_2 N} \quad (12)$$

即

$$E_r = e^{\lambda_2 N} \quad (13)$$

对式(13)变形可得

$$N = \frac{1}{\lambda_2} \ln E_r \quad (14)$$

将式(14)带入式(8)中化解方程得

$$\frac{f(N)}{f_0} = (E_r)^{\frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \quad (15)$$

令  $b_i = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ ，考虑到不同冻融介质、不同混凝土强度

对强度损失率影响有所差别，故引入系数  $a_i$  对公式进行修正，则相对剩余强度为

$$\frac{f(N)}{f_0} = a_i (E_r)^{b_i} \quad (16)$$

从公式(16)可以看出，相对剩余强度变化率与相对动弹性模量服从幂函数，为了得到  $a_i$ 、 $b_i$  具体数值，考虑到强度(抗压强度、抗折强度)损失率和动弹性模量与冻融循环次数并非完全服从正比例函数，需要对上述模型根据试验数据进行拟合修正。

### 3.2 混凝土相对剩余抗压、抗折强度与相对动弹性模量拟合关系

图 5 为混凝土相对剩余抗压强度、相对剩余抗折强度与相对动弹性模量拟合关系图。拟合结果表明，混凝土相对剩余抗压、抗折强度与相对动弹性模量具有良好的相关性，可以通过测量冻融后混凝土相对动弹性模量来评估剩余抗压强度、剩余抗折强度，相关公式为 3.1 节式(16)，表 3 给出了三种冻融介质下各参数的对应值。

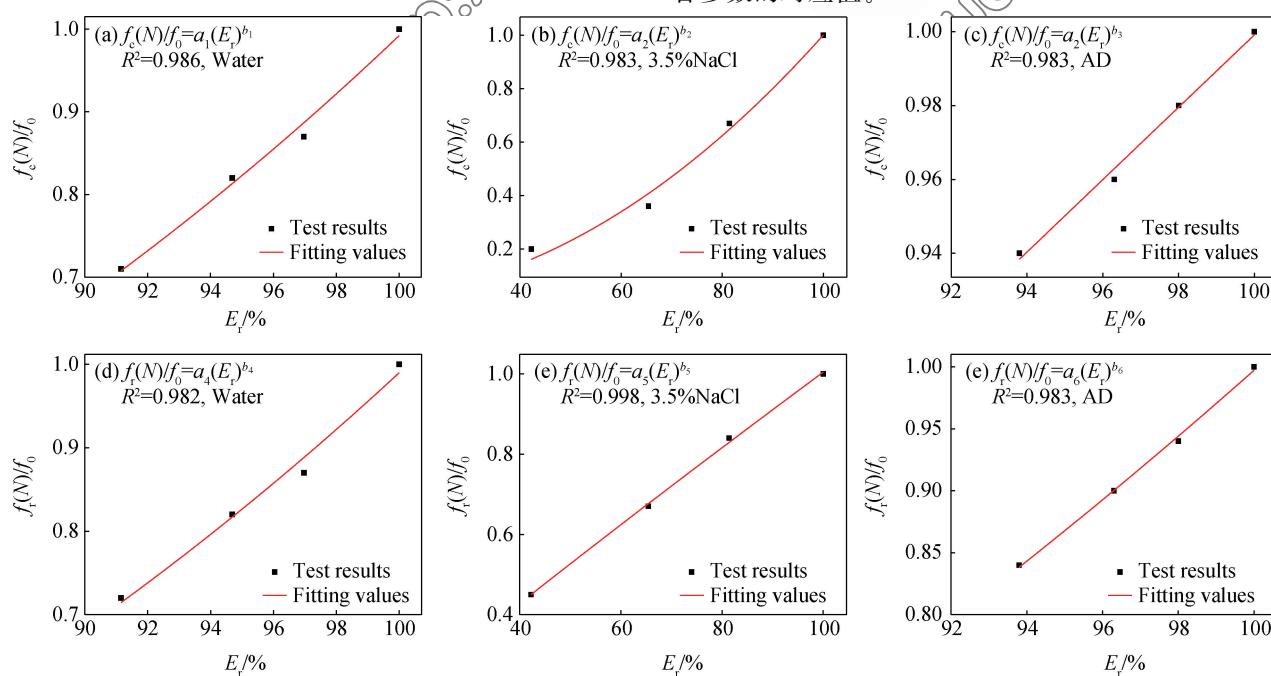


图 5 混凝土相对剩余抗压和抗折强度与相对动弹性模量的关系

表 3 混凝土相对剩余抗压和抗折强度与相对动弹性模量拟合常数值

Table 3 Fitting constant value of relative residual compressive strength and flexural strength and the relative dynamic elastic modulus

$i$	1	2	3	4	5	6
$a_i$	$5.01 \times 10^{-8}$	$5.87 \times 10^{-5}$	0.01	$9.01 \times 10^{-8}$	0.01	$3.76 \times 10^{-6}$
$b_i$	3.65	2.12	0.98	3.52	0.93	2.71

Notes:  $a_i$ ,  $b_i$ —Fitting constant values in Formula(16).

## 4 结 论

(1) 三种不同冻融介质中的混凝土随着冻融循环次数的增加都出现不同程度损伤, 3.5wt% NaCl溶液对混凝土的损伤度要远大于单纯水冻融循环对混凝土的损伤度, 其损伤度大约是水冻的6倍以上, 飞机除冰液相对损伤度均保持在1以下, 说明飞机除冰液对混凝土冻融损伤具有抑制作用。三种冻融介质对混凝土损伤程度大小顺序是: 3.5wt% NaCl>水>飞机除冰液(AD)。

(2) 混凝土抗压强度、抗折强度均随着冻融次数的增加而降低, 下降速率与冻融次数、冻融介质有关, 且抗压强度损失率大于抗折强度损失率。混凝土抗压强度、抗折强度损失率在三种冻融介质中大小关系为: 3.5wt% NaCl>水>飞机除冰液(AD)。

(3) 混凝土抗压、抗折强度损失率与动弹性模量损失率有关, 推导出相对剩余强度与相对动弹性模量相关公式:  $f(N)/f_0 = a_i(E_r)^{b_i}$ , 对三种不同冻融介质下混凝土的相对抗压强度、相对抗折强度与相对动弹性模量试验值进行数学拟合, 相关度较高。因此, 可以通过测量相对动弹性模量来评估冻融后混凝土力学性能。

## 参考文献:

- [1] 洪锦祥, 缪昌文, 刘加平, 等. 冻融损伤混凝土力学性能衰减规律[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(2): 173-178.  
HONG J X, MIAO C W, LIU J P, et al. Degradation law of mechanical properties of concrete subjected to freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(2): 173-178 (in Chinese).
- [2] 曹大富, 富立志, 杨忠伟, 等. 冻融循环作用下混凝土受压本构特征研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 17-32.  
CAO D F, FUL H, YANG Z W, et al. Study on constitutive relations of compressed concrete subjected to action of freezing thawing cycles[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1): 17-32 (in Chinese).
- [3] 郑晓宁, 刁波, 孙洋, 等. 混合侵蚀与冻融循环作用下混凝土力学性能劣化机理研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(2): 111-116.  
ZHENG X N, D B, SUN Y, et al. Study of deterioration mechanism of concrete in multi-aggressive and freezing thaw environment[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(2): 111-116 (in Chinese).
- [4] JANSSEN D J, SNYDER M B. Mass loss experience with ASTM C666: With and without deicing salt[C]// Proceedings of the International Workshop in the Resistance of Concrete to Scaling Due to Freezing in the Presence of Deicing Salt. Quebec, Canada, 1997: 247-258.
- [5] MARCHAND J, PIGEON M, BAGER D, et al. Influence of chloride solution concentration on deicer salt scaling deterioration of concrete[J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(4): 429-435.
- [6] 余红发, 孙伟, 张云升, 等. 在冻融或腐蚀环境下混凝土使用寿命预测方法 I-损伤演化方程与损伤失效模式[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(S1): 128-135.  
YU H F, SUN W, ZHANG Y S, et al. Service life prediction method of concrete subjected to freezing-thawing cycles and/or chemical attack I-Damage development equation and degradation mode[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(S1): 128-135 (in Chinese).
- [7] 白康, 余红发. 水泥混凝土在机场道面除冰液作用下的抗冻性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.  
BAI K, YU H F. Research on freezing-thawing durability of concrete subjected to airfield pavement deicer[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009 (in Chinese).
- [8] 陈继超, 李玉香, 朱晓燕, 等. 除冰剂对机场跑道混凝土抗冻性能影响[J]. 混凝土, 2015, 304(2): 150-154.  
CHEN J C, LI Y X, ZHU X Y, et al. Effects of deicing agent on freezing resistance of air field pavement concrete[J]. Concrete, 2015, 304(2): 150-154 (in Chinese).
- [9] 肖前慧, 牛荻涛. 冻融环境多因素耦合作用混凝土结构耐久性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.  
XIAO Q H, NIU D T. Concrete structure durability in freezing-thawing circumstance based on multi-factor effects[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2010 (in Chinese).

- [10] 覃丽坤, 宋玉普, 陈浩然, 等. 冻融循环对混凝土力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S1): 5048-5053.  
QIN L K, SONG Y P, CHEN H R, et al. Influence of freezing and thawing cycle on mechanical properties of concrete [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S1): 5048-5053 (in Chinese).
- [11] 邹超英, 赵娟, 梁锋, 等. 冻融作用后混凝土力学性能的衰减规律[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 117-138.  
ZOU C Y, ZHAO J, LIANG F, et al. Degradation of mechanical properties of concrete caused by freeze-thaw action[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(1): 117-138 (in Chinese).
- [12] 安新正, 易成. 腐蚀环境下再生混凝土结构耐久性试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2012.  
AN X Z, YI C. Experimental study on durability of recycled concrete structure exposed in corroded environment [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2012 (in Chinese).
- [13] 中华人民共和国建设部. JGJ 63—2006 混凝土拌合用水标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China.
- [14] JGJ 63—2006 Standard of water for concrete[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006 (in Chinese).
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T50082—2009 Standard for text methods of long-term performance and durability of ordinary concrete[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009 (in Chinese).
- [16] TANG L, NILSSON L O. Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars[J]. Cement and Concrete Research, 1993, 23(2): 247-253.
- [17] VERBECK C J, KLIJGER P. Studies of salt scaling of concrete [J]. Highway Research Board Bulletin, 1957, 150: 1-13.
- [18] 曹文涛. 混凝土在飞机除冰液中的抗冻性[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.  
CAO W T. Frost resistance of concrete in aircraft deicing fluid[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008 (in Chinese).