



氯盐与冻融共同作用下 引气高性能混凝土氯离子渗透性

高 军¹, 杨海成², 熊建波², 王胜年²

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 中交四航工程研究院有限公司, 水工构造物耐久性技术交通行业重点实验室, 广东 广州 510230)

摘要: 通过引气高性能混凝土在3%NaCl溶液中自然浸泡及盐水快速冻融试验, 测试了不同冻融次数后混凝土中氯离子含量分布和相对动弹性模量的变化; 利用损伤力学原理, 研究了冻融损伤与氯离子扩散系数、冻融循环次数的关系。研究表明: 冻融循环导致混凝土性能劣化, 增大了混凝土氯离子扩散系数, 当冻融300次时混凝土的冻融损伤度为5%, 氯离子扩散系数增大了1倍; 混凝土冻融损伤度与氯离子扩散系数、冻融循环次数之间均符合指数关系。

关键词: 引气高性能混凝土; 氯盐; 冻融损伤; 氯离子扩散系数

中图分类号: TU 528.36; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)05-0031-04

Chloride penetration of air-entrained high-performance concrete subjected to chloride and freeze-thaw

GAO Jun¹, YANG Hai-cheng², XIONG Jian-bo², WANG Sheng-nian²

(1. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 2. Key Laboratory of Harbor & Marine Structure Durability Technology of the Ministry of Transport, CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Naturally immersion in 3% NaCl solution and fast freeze-thaw were tested for the air-entrained high-performance concrete. Contents of chloride ion in concrete and relative dynamic elastic modulus after different freeze-thaw cycles were investigated. According to the principle of damage mechanics, the relationship between the freeze-thaw damage and chloride diffusion coefficient, freeze-thaw cycles are studied. Test result indicates that the freeze-thaw cycle leads to degradation, and increases the chloride diffusion coefficient of concrete. The diffusion coefficient is 1 time of undamaged concrete when the damage degree is 5%. The relationship between the damage degree of freeze-thaw, chloride diffusion coefficient and freeze-thaw cycles conforms to the exponential relationship.

Keywords: air-entrained high-performance concrete; chloride; freeze-thaw damage; chloride diffusion coefficient

我国由南到北气候环境差异显著, 但氯盐腐蚀仍是影响我国海工混凝土结构耐久性最主要的问题^[1]。北方海水环境下的混凝土结构由于遭受冻融与氯盐共同作用, 其耐久性问题更为突出。冻融与氯盐共同作用下混凝土结构耐久性劣化进程及机理是目前研究的热点问题。汪在芹等^[2-4]采用压汞、SEM等手段研究了冻融过程中混凝土

孔结构和微观形貌的演变过程; Shang等^[5-6]研究了冻融后混凝土力学性能的变化规律; 洪雷等^[7-9]采用先对混凝土进行不同冻融循环、再将受冻混凝土浸泡在氯盐溶液的方法, 分析了冻融循环对混凝土氯离子扩散系数的影响。实际结构服役过程中往往处于冻融与氯盐的同时作用, 研究冻融与氯盐同时作用时有害介质的侵蚀规律,

收稿日期: 2015-12-10

作者简介: 高军 (1982—), 男, 工程师, 研究方向为港工结构物、波浪对结构物的影响和混凝土性能等。

对实际工程更具有指导意义。王月等^[10-11]研究了冻融与氯盐同时作用时氯盐在混凝土中的传输过程,认为冻融损伤提高了混凝土氯离子扩散系数,但李强^[12]的研究结论与此矛盾,可能是由于混凝土性能、冻融介质差异等因素导致矛盾,总体而言,冻融与氯盐同时作用下混凝土氯离子渗透性能的研究成果相对较少。本文采用北方海工结构常用的引气海工高性能混凝土开展盐水快速冻融试验,研究了冻融与氯盐共同作用下混凝土中氯离子扩散性能及动弹性模量的变化规律,为我国冰冻海水环境下混凝土结构耐久性设计提供参考。

1 试验方案

1.1 原材料及配合比

采用山东山水水泥有限公司 P. I 52.5 水泥,

物理性能指标见表 1。采用山东沂水产石灰岩碎石, 5~10 mm 及 10~20 mm 组合级配, 小石与大石的质量比为 3:7, 含泥量 0.3%, 压碎值 11.8%, 表观密度 2 700 kg/m³, 堆积密度 1 480 kg/m³; 细骨料采用莱西大沽河砂, 表观密度 2 600 kg/m³, 含泥量 1.0%, 细度模数 2.9。采用日照华能电厂 I 级粉煤灰; 采用青岛家樑足球工贸有限公司生产的 S95 级粒化高炉矿渣粉。减水剂为巴斯夫化学建材(中国)有限公司生产的 RHEOPLUS 326 缓凝高效减水剂, 减水率 25%。引气剂为巴斯夫 MICRO AIR 202。采用低水胶比、大掺量粉煤灰、磨细矿渣粉等活性矿物掺合料, 并引入适当的含气量等技术配制的引气海工高性能混凝土, 可有效提高北方冰冻海水环境下混凝土结构的耐久性^[13], 因此本试验采用上述技术配制引气高性能混凝土, 配合比见表 2, 混凝土性能测试结果见表 3。

表 1 水泥物理性能

样品及要求	标准稠度 用水量/%	凝结时间		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
山水 P · I 52.5	29.6	02 h15 min	03 h35 min	6.8	8.8	38.4	62.8
技术要求		≥45 min	≤6.5 h	≥4.0	≥7.0	≥23.0	≥52.5

表 2 水胶比 0.35 时混凝土配合比 kg/m³

水泥	矿粉	粉煤灰	中砂	石子	水	引气剂	减水剂
180	180	90	716	1 075	158	0.16	4.95

表 3 混凝土性能测试结果

坍落度/ mm	含气量/ %	混凝土抗压强度/MPa		
		7 d	28 d	90 d
210	4.6	43.2	53.5	64.8

1.2 试验方案

成型 10 cm×10 cm×40 cm 棱柱体及 10 cm×10 cm×10 cm 立方体试件, 标准养护 24 d, 保水养护 4 d 后, 采用 3%NaCl 溶液开展快速冻融和氯盐浸泡试验。棱柱体试件主要测试混凝土不同冻融次数时动弹性模量, 立方体试件在氯盐溶液中冻融 75、125、175、230 及 300 次时, 从冻融试验机中取出测试混凝土不同深度处的氯离子浓度值, 同时将浸泡在 3%NaCl 溶液中同时间未冻试件取

出, 测试混凝土不同深度处氯离子浓度值。立方体试件开展试验前, 采用环氧树脂封闭除测试面以外的其余面。

1.3 氯离子含量测试

参照 NT Build 443 《硬化混凝土氯离子渗透快速试验方法》规定的方法逐层制取混凝土粉样。并参照 JTJ 270—1998 《水运工程混凝土试验规程》中“砂浆中酸溶性氯离子含量测试方法”对粉样进行浸泡处理, 采用化学分析法测量混凝土中的总氯离子含量。

2 结果分析

2.1 混凝土在氯盐冻融过程中氯离子分布情况

对经历不同冻融次数的混凝土试件以及同浸泡时间未冻融的混凝土试件取粉测试, 不同深度的氯离子浓度值见图 1。

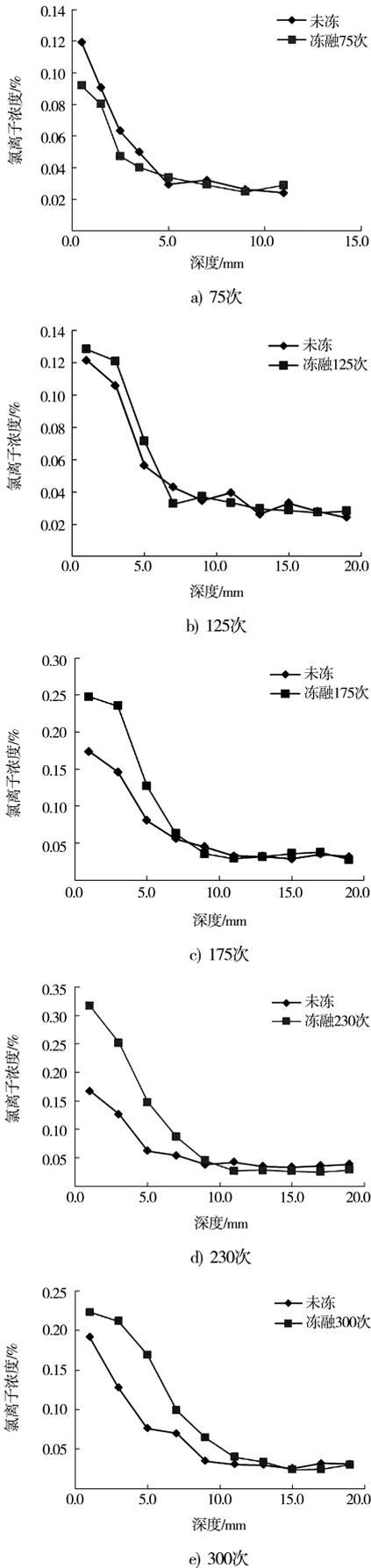


图 1 不同冻融循环时混凝土中氯离子浓度分布

分析图 1 可知: 1) 混凝土中氯离子浓度随深度的增加而不断降低, 并且随着浸泡时间的延长, 混凝土中氯离子渗透深度及各层混凝土中氯离子浓度值不断增大。2) 在冻融 125 次循环以前, 未冻混凝土中同深度处氯离子浓度总体高于受冻混凝土, 是由于冻融过程中环境温度较低, 低温环境降低了混凝土中氯离子的扩散速度^[12], 而在早期的冻融过程中, 冻融未对混凝土造成损失和劣化, 从而使得未冻混凝土中氯离子浓度高于受冻混凝土。3) 在冻融循环 175 次后, 受冻混凝土中氯离子浓度整体高于未冻混凝土, 并且随着冻融循环次数的增加, 相比同深度未冻混凝土, 受冻混凝土中氯离子浓度增加幅度不断扩大。在混凝土 5 mm 深度处, 受冻 125 次循环的混凝土中氯离子浓度比未冻混凝土高 0.02% 左右, 受冻 300 次循环的混凝土中氯离子浓度比未冻混凝土高了 0.10% 左右。冻融过程中, 由于混凝土孔隙受到冰胀力、渗透压力等, 使混凝土内部产生微裂缝^[2-4], 并在冻融过程中不断加剧, 从而增大了混凝土中氯离子的扩散速率, 与文献[4, 14]研究结果相同。

2.2 盐冻环境下混凝土的氯离子扩散系数

氯离子在混凝土中的传输机理非常复杂, 但在混凝土保水状态下扩散过程被认为是主要的传输方式。目前广泛采用 Fick 第二定律误差函数解析公式求解混凝土表面氯离子扩散系数, 见公式(1)。利用该公式拟合求出不同冻融循环下混凝土氯离子扩散系数, 见图 2。

$$c_{x,t} = c_0 + (c_s - c_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right] \quad (1)$$

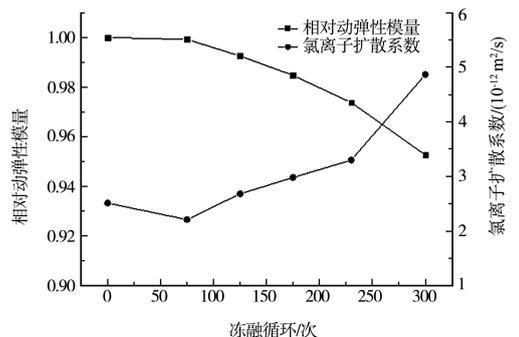


图 2 不同冻融循环下混凝土相对动弹性模量和氯离子扩散系数

1) 在混凝土经历 125 次冻融前, 氯离子扩散系数无明显增大, 并且在 75 次冻融循环时, 氯离子扩散系数存在小幅度降低。主要是由于采用引气高性能混凝土, 内部较致密, 尽管经历 75 次冻融循环, 混凝土内部并未出现明显的微裂缝, 同时由于氯离子扩散过程中受到温度的影响, 温度越低, 氯离子扩散速率越慢。因此, 混凝土在经历短期冻融循环时, 温度影响对氯离子的扩散起到主导作用。从图 2 中混凝土相对动弹性模量的变化也可以证实, 在冻融 75 次前相对动弹性模量没有明显降低, 且混凝土表层无砂浆剥落。

2) 在混凝土经历 125 次冻融后, 氯离子扩散系数随冻融次数的增加明显增大。在冻融 300 次时, 混凝土动弹性模量降低了 5%, 而混凝土氯离子扩散系数增大 1 倍。主要是由于随冻融次数的增多, 混凝土损伤加剧、微裂缝增多, 从而加速氯离子在混凝土中的渗透。从图 2 可看出: 混凝土相对动弹性模量在 125 次冻融循环后有一定的降低, 说明在持续冻融循环作用下, 混凝土内部出现了一定程度的损伤。

2.3 冻融循环对混凝土耐久性的影响

根据损伤力学理论^[15], 混凝土冻融损伤可用损伤度 H 表示:

$$H = 1 - E_N / E_0 \quad (2)$$

式中: E_0 为混凝土的初始动弹性模量; E_N 为经历 N 次冻融循环次数后动弹性模量。根据测得的混凝土动弹性模量, 利用损伤度计算公式, 建立了冻融损伤度与混凝土氯离子扩散系数之间的关系, 见图 3 及式(3)。

$$\begin{cases} D_N / D_0 = 0.9345 e^{0.1493H} \\ R^2 = 0.9645 \end{cases} \quad (3)$$

式中: D_N 、 D_0 为经历 N 次冻融循环及未冻混凝土氯离子扩散系数。由式(3)可知, 混凝土冻融损伤度与氯离子扩散系数之间符合指数关系, 且相关性较好, 说明随着混凝土冻融损伤度的增加, 氯离子在混凝土中的扩散速度呈现非线性增大, 当混凝土冻融损伤为 5% 时, 混凝土氯离子扩散系数增大了 1 倍。因此, 对于我国北方冰冻海水环境下的混凝土

结构, 因其遭受氯盐侵蚀与冻融破坏的双重作用, 应考虑冻融损伤对氯离子扩散速率的影响。

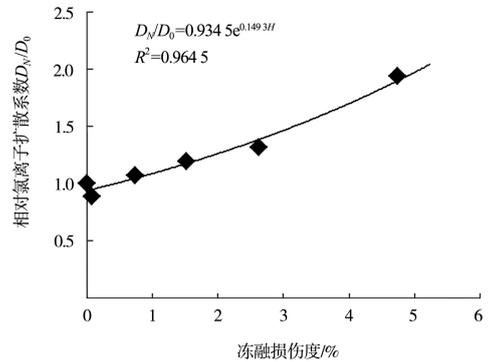


图 3 混凝土氯离子扩散系数与冻融损伤度的关系

图 4 建立了混凝土冻融损伤度与冻融循环次数之间的关系, 混凝土冻融损伤度与冻融循环次数同样符合指数关系:

$$\begin{cases} H = 0.0499 e^{0.0167N} \\ R^2 = 0.8523 \end{cases} \quad (4)$$

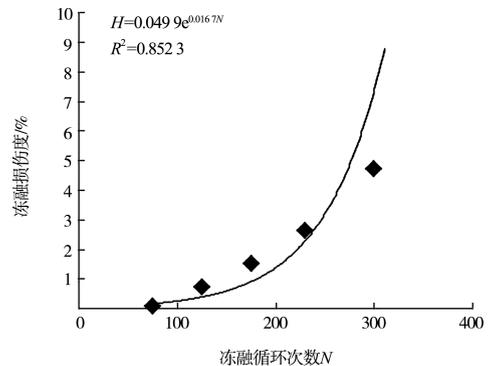


图 4 混凝土冻融损伤与冻融循环次数的关系

3 结论

1) 随着冻融次数的增大, 引气高性能混凝土的动弹性模量不断降低, 混凝土冻融损伤加剧, 氯离子扩散系数增大, 当混凝土冻融 300 次时的冻融损伤度为 5%, 而氯离子扩散系数增大了 1 倍。

2) 引气高性能混凝土氯离子扩散系数与冻融损伤度之间符合指数关系。随着混凝土冻融损伤度的增加, 氯离子在混凝土中的扩散速度呈现非线性增大。引气高性能混凝土冻融损伤与冻融循环次数同样符合指数关系。

3) 在冰冻海水环境下混凝土结构耐久性设计施工时, 应考虑冻融损伤对混凝土中氯离子扩散速率的影响。