

海洋环境中混凝土抗冻融循环试验研究

陈迅捷^{1,2}, 欧阳幼玲^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 模拟海水盐溶液来研究海洋环境中混凝土的抗冻融循环性能. 海水与淡水环境中混凝土冻融循环对比试验结果表明, 海水加速高水胶比混凝土的腐蚀速度, 主要表现为混凝土试件表面冻胀剥落, 质量损失率增大. 控制新拌混凝土含气量在 $6\% \pm 1\%$, 同水胶比的普通混凝土和高性能混凝土抗冻耐久性相当. 矿渣微粉的二次水化作用会降低硬化高性能混凝土的含气量, 但气泡间隔系数仍低于 $200 \mu\text{m}$. 为满足混凝土在海洋环境中抗冻耐久性要求, 在保证混凝土气泡间隔系数低于 $300 \mu\text{m}$ 的同时, 混凝土水胶比不宜大于 0.40.

关键词: 海洋环境; 混凝土; 冻融循环; 气泡间隔系数; 水胶比

中图分类号: TV431

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)02-0068-04

在高纬度海域, 冬季气温常低于零度, 而大洋暖流的存在使得海洋表层之下的海水不会结冰. 但在潮差区和浪溅区, 由于每日两次潮汐作用, 混凝土仍遭受冻融循环破坏, 同时还遭受海水中盐类结晶-溶解循环, 盐类结晶压力产生的应力将导致混凝土开裂和剥落^[1].

混凝土的冻害, 是由于混凝土细孔中的水分冻结, 伴随着这种相变, 产生膨胀压力; 剩余的水分流到附近的孔隙和毛细管中, 在水运动的过程中, 产生液体压力; 膨胀压力和液体压力使混凝土破坏^[2]. 混凝土在不同环境条件下的抗冻性不同. 盐溶液对混凝土抗冻有正、负两种效应, 主要取决于盐溶液的种类与浓度^[3]. 在氯化钠溶液中冻融时, 混凝土表面产生严重剥落, 而在硫酸钠溶液中冻融时, 质量损失较小; 在盐溶液中冻融时, 混凝土的相对动弹性模量下降比在水中略为缓慢, 但水灰比较低的混凝土在硫酸钠溶液中冻融后期相对动弹性模量下降很快, 过早破坏^[4]. 强度相对较低的混凝土在硫酸钠溶液中的抗冻性能略好于在水中的抗冻性, 而强度相对较高的混凝土在硫酸钠溶液中的抗冻性能与在水中的抗冻性基本相当, 一些强度较高的混凝土试件在硫酸盐溶液中冻融时发生突然的中部断裂而破坏^[5]. 但是, 实际混凝土环境中往往是多种盐类并存, 比如海洋环境中主要就是氯盐和硫酸盐. 关于氯盐和硫酸盐溶液共同对混凝土抗冻性的影响目前尚未见有研究报道. 本文将模拟海水盐溶液(2.5% 氯化钠+0.5% 硫酸钠溶液), 研究海洋环境中混凝土的抗冻融循环性能.

对混凝土抗冻性起决定作用的是混凝土的孔隙结构、饱水状态、水灰比、含气量等, 其他因素都是通过对这几种因素的影响而改变混凝土的抗冻性能^[6]. 在混凝土中引入适当的含气量, 降低气泡间隔系数, 同时降低混凝土水胶比, 可提高混凝土抗冻耐久性. 耐冻混凝土的气泡间隔系数一般不超过 $400 \mu\text{m}$ ^[7]. 为了探讨海水环境中混凝土冻融循环破坏机理和破坏形态, 本文开展了海水与淡水环境中混凝土冻融循环对比试验研究, 寻求提高海洋环境中混凝土结构抗冻耐久性的措施.

1 试验方案设计

不同水胶比的普通水泥混凝土和海工抗氯离子渗透高性能混凝土试验配合比见表 1. 水泥为海螺

收稿日期: 2008-07-05

作者简介: 陈迅捷(1963-), 男, 上海人, 教授级高级工程师, 主要从事水工混凝土试验研究. E-mail: xjchen@nhri.cn

P·O42.5水泥,矿渣为安徽朱家桥水泥有限公司产 S95 级矿渣微粉,砂的细度模数为 2.80,碎石粒径为 5~20 mm.

表1 普通混凝土试验配合比

Tab.1 Testing mix proportion of normal concrete

编 号	混凝土原材料用量/(kg·m ⁻³)						
	水	水 泥	矿 渣	砂	碎 石	减水剂(激发剂)	引 气 剂
P1	190	345		760	1 040	2.76	0.041
P2	190	422		700	1 010	3.38	0.05
P3	190	542		640	970	4.34	0.065
G4	190	190	265	670	980	24	0.063
G5	190	217	302	635	955	27	0.075

参照《水工混凝土试验规程》(SL352-2006)^[8]进行混凝土基本物理力学性能试验和混凝土冻融循环试验.按表1所示的混凝土配比成型 10 cm×10 cm×10 cm 的抗压试件和 10 cm×10 cm×40 cm 的抗冻试件各 5 组,养护至龄期后进行相应性能试验.混凝土基本物理力学特性见表2.新拌混凝土含气量 6%±1%,硬化混凝土含气量 2.53%~8.38%,气泡间隔系数 119~201 μm.硬化混凝土含气量和混凝土气泡间隔系数采用德国产 Rapid Air 457 型空隙率分析仪检测.混凝土冻融循环试验中,混凝土试件分别采用淡水和模拟海水(2.5%氯化钠+0.5%硫酸钠溶液)浸泡.模拟海水盐溶液浓度根据在江苏省连云港市海岸线取样检测结果取值.

表2 混凝土基本物理力学特性

Tab.2 Physic-mechanical performance of concrete

编 号	水 胶 比	坍 落 度 / mm	新拌砼含气量 / (%)	硬化砼含气量 / (%)	气泡间隔系数 / μm	抗压强度/ MPa	
						7 d	28 d
P1	0.55	185	7.0	8.38	201	28.7	37.4
P2	0.45	180	6.8	7.88	154	33.9	51.7
P3	0.35	140	5.0	5.53	119	60.8	64.6
G4	0.40	230	6.0	4.02	143	36.1	43.7
G5	0.35	230	5.1	2.53	168	41.1	51.6

2 试验结果及分析

混凝土试件在淡水和模拟海水环境中的 300 次冻融循环试验结果见表3.可见,在淡水和模拟海水环境中,混凝土试件经 50~300 次冻融循环试验后,相对动弹模量基本一致.

表3 淡水及模拟海水冻融循环试验结果

Tab.3 Results of freezing and thawing cycle test in fresh water and simulated sea water

编 号	相对动弹模量/ (%)						质量损失率/ (%)					
	50	100	150	200	250	300	50	100	150	200	250	300
P1	90(93)	89	86	86	89	86	0.04	0.44	0.81	1.85	2.75	3.68
P2	100(93)	95	95	95	91	91	0	0.04	0.11	0.36	0.43	0.52
P3	98(100)	98	95	95	95	95	0.03	0.02	0.02	0.04	0.01	0.06
G4	95(98)	93	91	91	93	93	0.12	0.15	0.18	0.28	0.35	0.41
G5	100(98)	100	100	95	98	98	0.04	0.06	0.06	0.06	0.09	0.11

注:()中为模拟海水冻融循环试验结果.

试验结果表明,淡水和模拟海水冻结时,由于硬化混凝土气泡间隔系数均低于 300 μm(见表2),混凝土

试件内部冻胀压力和液体压力得以缓解,混凝土内部损伤较小.经50~300次冻融循环后,混凝土试件在模拟海水环境中质量损失率大于淡水环境中.在淡水环境中,混凝土试件经300次冻融循环后质量损失率均不大于5%,均满足F300抗冻指标.但在模拟海水环境中,水胶比为0.55的混凝土试件150次冻融循环后质量损失率已达6.82%,仅满足F100抗冻指标;水胶比为0.45的混凝土试件250次冻融循环后质量损失率已达5.62%,仅满足F200抗冻指标;水胶比为0.40以下的混凝土试件经300次冻融循环后质量损失率均不大于5%,满足F300抗冻指标.混凝土水胶比对混凝土试件冻融循环质量损失率的影响见图1.

由图1可见,海水中盐类结晶压力和冰冻膨胀压力的共同作用,加速了混凝土试件表面毛细孔膨胀,混凝土试件表面疏松剥落.随着混凝土水胶比的增大,混凝土试件冻融循环质量损失率增大,加快了腐蚀破坏速度.

同水胶比的普通混凝土和高性能混凝土试验对比表明,其抗冻耐久性相当.由于矿渣微粉的二次水化作用,水化产物充填混凝土孔隙,标准养护28d的硬化高性能混凝土含气量降低,但气泡间隔系数仍低于200 μm .

《水工建筑物抗冰冻设计规范》^[9]规定F200抗冻混凝土的适宜水灰比小于0.50,F300抗冻混凝土的适宜水灰比小于0.45;《水运工程混凝土施工规范》^[10]规定海洋环境水位变动区受冻条件下的最大水灰比为0.50,严重受冻条件下的最大水灰比为0.45.试验表明,规范中混凝土的限制水灰比取值偏大.水胶比0.50的混凝土在模拟海水环境中仅满足F150抗冻指标,水胶比0.45的混凝土在模拟海水环境中仅满足F200抗冻指标.海洋环境中,氯盐和硫酸盐的共同作用加速了混凝土的冻融腐蚀速度.为保证混凝土在海洋环境中的抗冻耐久性,混凝土水胶比不宜大于0.40,同时硬化混凝土气泡间隔系数应控制不超过300 μm .

3 结 语

在海水潮差区和浪溅区,混凝土遭受冻融循环和盐类结晶-溶解循环的双重破坏.海水与淡水环境中混凝土冻融循环对比试验表明,海水加速了高水胶比混凝土的腐蚀速度,主要表现为混凝土试件表面冻胀剥落,质量损失率增大.

随着混凝土水胶比的增大,在模拟海水环境中混凝土试件冻融循环质量损失率增大,腐蚀破坏速度加快.控制新拌混凝土含气量在 $6\% \pm 1\%$,同水胶比的普通混凝土和高性能混凝土抗冻耐久性相当.矿渣微粉的二次水化作用降低硬化高性能混凝土含气量,但气泡间隔系数仍低于200 μm .为满足混凝土在海洋环境中抗冻耐久性要求,在保证混凝土气泡间隔系数低于300 μm 的同时,混凝土水胶比不宜大于0.40.

参 考 文 献:

- [1] 张 炜. 海洋环境中混凝土劣化的五个因素[J]. 水运工程, 1997, (1): 54-57. (ZHANG Wei. Five factors on concrete erosion and damage in ocean environment[J]. Port & Waterway Engineering, 1997, (1): 54-57. (in Chinese))
- [2] 冯乃谦, 邢 锋. 高性能混凝土技术[M]. 北京: 原子能出版社, 2000. (FENG Nai-qian, XING Feng. High performance concrete technology[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2000. (in Chinese))
- [3] 谢友均, 马昆林, 许 辉, 等. 混凝土在不同溶液中抗冻性能的研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, (3)4: 29-34. (XIE Yong-jun, MA Kun-lin, XU Hui, et al. Research on the frost-resistant capability of concrete in different solutions[J].

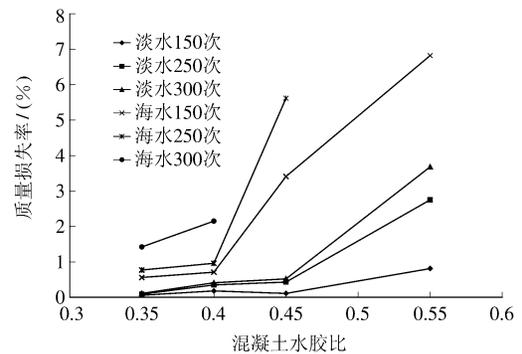


图1 水胶比对混凝土冻融循环质量损失率的影响
Fig. 1 Influence of water cement ratio on freezing and thawing mass loss of concrete

- Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3(4): 29-34. (in Chinese))
- [4] 慕 儒, 缪昌文, 刘加平, 等. 氯化钠、硫酸钠溶液对混凝土抗冻性的影响及其机理[J]. 硅酸盐学报, 2001, (29)6: 523-529. (MU Ru, MIAO Chang-wen, LIU Jia-ping, *et al.* Effect of NaCl and Na₂SO₄ solution on the frost resistance of concrete and its mechanism[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2001, 29(6): 523-529. (in Chinese))
- [5] 葛 勇, 杨文萃, 袁 杰, 等. 混凝土在硫酸盐溶液中抗冻性的研究[J]. 混凝土, 2005, (190)8: 71-74. (GE Yong, YANG Wen-cui, YUAN Jie, *et al.* Freezing resistance of concrete in sulfate solution[J]. Concrete, 2005, 190(8): 71-74. (in Chinese))
- [6] 李金平, 盛 煜, 丑亚玲. 混凝土冻融破坏研究现状[J]. 路基工程, 2007, (132)3: 1-3. (LI Jin-pin, SHENG Yi, COU Ya-ling. Research status of the frost resistance of concrete[J]. Bedroad Engineering, 2007, 132(3): 1-3. (in Chinese))
- [7] 李金玉, 曹建国. 水工混凝土耐久性的研究和应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. (LI Jin-yu, CAO Jian-guo. Research and Application on Durability of Hydraulic Concrete[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. (in Chinese))
- [8] SL352-2006, 水工混凝土试验规程[S]. (SL352-2006, Test Code for Hydraulic Concrete[S]. (in Chinese))
- [9] SL211-2006, 水工建筑物抗冻设计规范[S]. (SL211-2006, Design Code for the Frost Resistance of Hydraulic Structures [S]. (in Chinese))
- [10] JTJ268-96, 水运工程混凝土施工规范[S]. (JTJ268-96, Construction Code of Concrete for Port and Waterway Engineering [S]. (in Chinese))

Research on the frost-resistant durability of concrete under sea water conditions

CHEN Xun-jie^{1,2}, OUYANG You-ling^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Research Center for Climate Change, MWR, Nanjing 210029, China)

Abstract: The frost-resistant durability of concrete is researched in simulated sea water conditions. Results of the concrete freezing and thawing cycle tests under sea water and fresh water conditions show that sea water accelerates corrosion of concrete with high water cement ratio. It mainly behaves that the concrete surface flakes away, and mass loss increases. When fresh concrete air content in volume is controlled to $6\% \pm 1\%$, the frost-resistant capabilities of ordinary and high performance concrete with the same water cement ratio are equivalent. Because of the second hydration of blast-furnace slag, the air content of hard high performance concrete is depressed, but its air bubble distance coefficients are lower than $200 \mu\text{m}$. In order to meet a demand for concrete durability of frost-resistance under sea water conditions, concrete air bubble spacing coefficient should be lower than $300 \mu\text{m}$, and concrete ratio of water to cement should be less than 0.40.

Key words: sea water conditions; concrete; freezing and thawing cycle; air bubble spacing coefficient; water cement ratio