

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

环境和荷载共同作用下的 海工混凝土结构耐久性

王胜年 黎鹏平 范志宏 等 著



科学出版社

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

环境和荷载共同作用下的 海工混凝土结构耐久性

王胜年 黎鹏平 范志宏 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对海水环境下混凝土结构,研究其在荷载作用下氯离子的侵蚀行为,即研究在“受力”情况下海工混凝土结构的耐久性。主要介绍了我国典型海水腐蚀环境、典型环境下海港工程混凝土结构耐久性调查情况及耐久性研究国内外现状;选择了部分实体工程,调查与分析了混凝土结构在荷载作用下的实际应力水平;介绍了荷载和氯盐耦合作用的试验方法;分别详细叙述了恒定荷载与氯盐耦合、恒定荷载与盐冻耦合及交变荷载与氯盐耦合作用下混凝土结构耐久性的劣化进程及损伤行为;分析了结构裂缝对混凝土耐久性劣化的影响;利用研究所取得的成果,建立了荷载-氯盐耦合作用下混凝土结构耐久性寿命的预测模型。

本书适用于从事混凝土结构耐久性研究方面的科研人员,也可供相关专业的工程技术人员及大学生、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境和荷载共同作用下的海工混凝土结构耐久性/王胜年等著. —北京:科学出版社, 2017.2

(中国腐蚀状况及控制战略研究丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-051773-9

I. ①环… II. ①王… III. ①海洋工程-混凝土结构-耐用性-研究 IV. ①P75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 027510 号

责任编辑:李明楠 程雷星/责任校对:贾伟娟

责任印制:张 伟/封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 2 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2017 年 2 月第一次印刷 印张: 13 3/4

字数: 277 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书
顾问委员会

主任委员：徐匡迪 丁仲礼

委 员（按姓氏笔画排序）：

丁一汇	丁仲礼	王景全	李 阳	李鹤林	张
金翔龙	周守为	周克崧	周 廉	郑皆连	孟 伟
郝吉明	胡正寰	柯 伟	侯立安	聂建国	徐匡迪
翁宇庆	高从堦	曹楚南	曾恒一	缪昌文	薛群基
魏复盛					

“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书
总编辑委员会

总 主 编：侯保荣

副总主编：徐滨士 张建云 徐惠彬 李晓刚

编 委（按姓氏笔画排序）：

马士德	马化雄	马秀敏	王福会	尹成先	朱锡昶
任小波	任振铎	刘小辉	刘建华	许立坤	孙虎元
孙明先	杜 敏	杜翠薇	李少香	李伟华	李言涛
李金桂	李济克	李晓刚	杨朝晖	张劲泉	张建云
张经磊	张 盾	张洪翔	陈卓元	欧 莉	岳清瑞
赵 君	胡少伟	段继周	侯保荣	宫声凯	桂泰江
徐玮辰	徐惠彬	徐滨士	高云虎	郭公玉	黄彦良
常 炜	葛红花	韩 冰	雷 波	魏世丞	

丛 书 序

腐蚀是材料表面或界面之间发生化学、电化学或其他反应造成材料本身损坏或恶化的现象,从而导致材料的破坏和设施功能的失效,会引起工程设施的结构损伤,缩短使用寿命,还可能导致油气等危险品泄漏,引发灾难性事故,污染环境,对人民生命财产安全造成重大威胁。

由于材料,特别是金属材料的广泛应用,腐蚀问题几乎涉及各行各业。因而腐蚀防护关系到一个国家或地区的众多行业 and 部门,如基础设施工程、传统及新能源设备、交通运输工具、工业装备和给排水系统等。各类设施的腐蚀安全问题直接关系到国家经济的发展,是共性问题,是公益性问题。有学者提出,腐蚀像地震、火灾、污染一样危害严重。腐蚀防护的安全责任重于泰山!

我国在腐蚀防护领域的发展水平总体上仍落后于发达国家,它不仅表现在防腐蚀技术方面,更表现在防腐蚀意识和有关的法律法规方面。例如,对于很多国外的房屋,政府主管部门依法要求业主定期维护,最简单的方法就是在房屋表面进行刷漆防蚀处理。既可以由房屋拥有者,也可以由业主出资委托专业维护人员进行防护工作。由于防护得当,许多使用上百年的房屋依然完好、美观。反观我国的现状,首先是人们的腐蚀防护意识淡薄,对腐蚀的危害认识不清,从设计到维护都缺乏对腐蚀安全问题的考虑;其次是国家和各地区缺乏与维护相关的法律与机制,缺少腐蚀防护方面的监督与投资。这些原因就导致了我国在腐蚀防护领域的发展总体上相对落后的局面。

中国工程院“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目工作的开展是当务之急,在我国经济快速发展的阶段显得尤为重要。借此机会,可以摸清我国腐蚀问题究竟造成了多少损失,我国的设计师、工程师和非专业人士对腐蚀防护了解多少,如何通过技术规程和相关法规来加强腐蚀防护意识。

项目组将提交完整的调查报告并公布科学的调查结果,提出切实可行的防腐蚀方案和措施。这将有效地促进我国在腐蚀防护领域的发展,不仅有利于提高人们的腐蚀防护意识,也有利于防腐技术的进步,并从国家层面上把腐蚀防护工作的地位提升到一个新的高度。另外,中国工程院是我国最高的工程咨询机构,没有直属的科研单位,因此可以比较超脱和客观地对我国的工程技术问题进行评估。把这样一个项目交给中国工程院,是值得国家和民众信任的。

这套丛书的出版发行,是该重大咨询项目的一个重点。据我所知,国内很多领域的知名专家学者都参与到丛书的写作与出版工作中,因此这套丛书可以说涉及

了我国生产制造领域的各个方面,应该是针对我国腐蚀防护工作的一套非常全面的丛书。我相信它能够各领域的防腐蚀工作者提供参考,用理论和实例指导我国的腐蚀防护工作,同时我也希望腐蚀防护专业的研究生甚至本科生都可以阅读这套丛书,这是开阔视野的好机会,因为丛书中提供的案例是在教科书上难以学到的。因此,这套丛书的出版是利国利民、利于我国可持续发展的大事情,我衷心希望它能得到业内人士的认可,并为我国的腐蚀防护工作取得长足发展贡献力量。

徐匡迪

2015年9月

丛书前言

众所周知,腐蚀问题是世界各国共同面临的问题,凡是使用材料的地方,都不同程度地存在腐蚀问题。腐蚀过程主要是金属的氧化溶解,一旦发生便不可逆转。据统计估算,全世界每 90 秒钟就有一吨钢铁变成铁锈。腐蚀悄无声息地进行着破坏,不仅会缩短构筑物的使用寿命,还会增加维修和维护的成本,造成停工损失,甚至会引起建筑物结构坍塌、有毒介质泄漏或火灾、爆炸等重大事故。

腐蚀引起的损失是巨大的,对人力、物力和自然资源都会造成不必要的浪费,不利于经济的可持续发展。震惊世界的“11·22”黄岛中石化输油管道爆炸事故造成损失 7.5 亿元人民币,但是把防腐蚀工作做好可能只需要 100 万元,同时避免灾难的发生。针对腐蚀问题的危害性和普遍性,世界上很多国家都对各自的腐蚀问题做过调查,结果显示,腐蚀问题所造成的经济损失是触目惊心的,腐蚀每年造成损失远远大于自然灾害和其他各类事故造成损失的总和。我国腐蚀防护技术的发展起步较晚,目前迫切需要进行全面的腐蚀调查研究,摸清我国的腐蚀状况,掌握材料的腐蚀数据和有关规律,提出有效的腐蚀防护策略和建议。随着我国经济社会的快速发展和“一带一路”战略的实施,国家将加大对基础设施、交通运输、能源、生产制造及水资源利用等领域的投入,这更需要我们充分及时地了解材料的腐蚀状况,保证重大设施的耐久性和安全性,避免事故的发生。

为此,中国工程院设立“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目,这是一件利国利民的大事。该项目的开展,有助于提高人们的腐蚀防护意识,为中央、地方政府及企业提供可行的意见和建议,为国家制定相关的政策、法规,为行业制定相关标准及规范提供科学依据,为我国腐蚀防护技术和产业发展提供技术支持和理论指导。

这套丛书包括了公路桥梁、港口码头、水利工程、建筑、能源、火电、船舶、轨道交通、汽车、海上平台及装备、海底管道等多个行业腐蚀防护领域专家学者的研究工作经验、成果以及实地考察的经典案例,是全面总结与记录目前我国各领域腐蚀防护技术水平和发展现状的宝贵资料。这套丛书的出版是该项目的一个重点,也是向腐蚀防护领域的从业者推广项目成果的最佳方式。我相信,这套丛书能够积极地影响和指导我国的腐蚀防护工作和未来的人才培养,促进腐蚀与防护科研成果的产业化,通过腐蚀防护技术的进步,推动我国在能源、交通、制造业等支柱产业上的长足发展。我也希望广大读者能够通过这套丛书,进一步关注我国腐蚀防护技术的发展,更好地了解和认识我国各个行业存在的腐蚀问题和防腐策略。

在此,非常感谢中国工程院的立项支持以及中国科学院海洋研究所等各课题承担单位在各个方面的协作,也衷心地感谢这套丛书的所有作者的辛勤工作以及科学出版社领导和相关工作人员的共同努力,这套丛书的顺利出版离不开每一位参与者的贡献与支持。

侯保荣

2015年9月

序

众所周知，海水腐蚀环境恶劣，氯盐侵蚀引起钢筋锈蚀最终导致的混凝土结构破坏是海水环境基础设施中最普遍和严重的破坏形式。海水环境下混凝土结构耐久性不足而导致的腐蚀破坏情况已远超出人们预料，造成的直接和间接经济损失惊人。对此，欧美等发达国家和地区已有过沉痛教训；从我国的调查情况来看，腐蚀状况也令人堪忧。当前，国家实施海洋开发战略，沿海、近海及远海重大基础设施相继建设，在这些基础设施中，混凝土结构是最基本、也是最重要的工程结构形式，加强海工混凝土结构耐久性基础性研究，对提高我国海洋环境基础设施建设工程耐久性设计施工水平、提高工程建设品质和寿命，以及降低工程全寿命成本意义重大。

混凝土结构长期服役引起的结构性能劣化是一个长期渐进的、由量变到质变的物理化学变化过程，因为过程长、影响因素复杂，所以耐久性研究是热点，也是难点。中交四航工程研究院有限公司长期从事海水环境混凝土结构的耐久性研究，在海工混凝土结构耐久性方面做了大量的工作，积累了不少经验。本书介绍了他们近些年在海工混凝土结构耐久性方面取得的又一新的成果，即在有“荷载”作用下研究海工混凝土结构的耐久性，相对于以往从材料层面研究海工混凝土的耐久性，该成果又前进了一步，尤其是采用实体工程调查得出的荷载应力水平及分别采用静、动两种加载方式，使研究揭示的混凝土结构耐久性劣化进程及损伤行为更符合在役工程实际情况。该书具有较强的创新性，较高的学术水平和应用价值。

该书内容新颖，条理清楚，突出理论与工程实践相结合，具有较强的工程特色，值得从事混凝土结构耐久性的研究人员及工程技术人员学习、借鉴和参考。

侯保荣

2017年1月

前 言

对土木工程混凝土结构而言,海水环境被公认为是最恶劣的腐蚀环境。国内外大量已建工程调查表明,结构耐久性不足,氯离子侵蚀导致钢筋锈蚀,继而引起构件损伤是海水环境下混凝土结构最普遍且严重的破坏形式,腐蚀破坏的直接后果就是结构的使用功能降低甚至危及使用安全,使结构物往往达不到设计使用年限而不得不进行维修甚至报废,从而造成巨大的直接和间接经济损失。

结构的耐久性决定了结构物的“健康”和“寿命”,耐久性问题越来越被重视,相关研究也早已成为热点,尤其对于海工混凝土结构,近些年来在耐久性理论、海工高性能混凝土、腐蚀防护措施及耐久性技术标准等方面取得了大量成果,也在实际工程中得到了很好的应用,对提高海工混凝土结构耐久性和工程寿命发挥了重要作用。然而,实际工程在遭受环境介质侵蚀作用时,是始终处于荷载作用之下的,对于海水环境土木工程来讲,混凝土结构同时遭受海水环境侵蚀和荷载的共同作用,而北方地区还遭受冻融作用,可见,相对于以前大多从未受力的材料层面进行的氯盐腐蚀研究,荷载和环境耦合作用更符合在役工程实际情况,虽然影响因素多,过程复杂,但因能反映实际工程耐久性劣化过程,所以考虑荷载和环境耦合作用下的耐久性研究越来越引起工程界的重视。

为了研究环境和荷载耦合作用下海工混凝土结构耐久性影响因素及劣化损伤行为,交通运输部于2011年设立了交通运输建设科技项目“环境和荷载耦合作用下海工混凝土结构耐久性及其可靠度设计方法”,由中交四航工程研究院有限公司、天津大学、清华大学和中交第四航务工程勘察设计院有限公司共同承担,历时3年完成了课题研究工作。本书即是对所开展部分研究工作和取得成果的详细介绍和总结。

全书共分8章,第1章介绍了海水环境下混凝土结构耐久性劣化行为、我国典型海水腐蚀环境、海港工程混凝土结构耐久性调查情况及耐久性研究国内外现状;第2章结合工程案例,选择了部分实体工程,对混凝土结构在荷载作用下的实际应力水平进行调查与分析;第3章介绍了荷载和氯盐耦合作用的试验方法;第4、第5和第6章分别详细叙述了恒定荷载与氯盐耦合、恒定荷载与盐冻耦合及交变荷载与氯盐耦合作用下混凝土结构耐久性劣化进程及损伤行为;第7章分析了结构裂缝对混凝土耐久性劣化的影响;第8章应用上述研究成果,建立了荷载-氯盐及多因素耦合作用下混凝土结构耐久性寿命预测模型。

本书的主要研究内容在耐久性传统研究基础上增加了“荷载”因素,即在“受力”的情况下研究混凝土结构的耐久性。研究表明,荷载对海水环境氯离子渗透扩散的影响是十分显著的,部分实际工程调查也证明了这一点。本书中混凝土结构耐久性寿命预测模型关键参数主要来源于工程调查和长期暴露试验的经验统计值,因时间有限,荷载影响因子来源于室内试验,鉴于统计数据的不确定性,及室内试验不能完全反映实际工程的情况,所建立的耐久性寿命预测模型仍需要通过今后不断积累工程长期性能数据进行修正和完善。

参加本书撰写的人员为课题组部分成员,分工如下:第1章由黎鹏平、范志宏负责;第2章由应宗权、别社安负责;第3章和第4章由王胜年、熊建波负责;第5章由王胜年、黎鹏平负责;第6章由杨海成、应宗权负责;第7章由黎鹏平、范志宏负责;第8章由王胜年、范志宏负责。全书由王胜年构思、编排、审定。

除上述撰写人员外,课题组其他成员对本书的内容和部分研究成果也付出了努力,做出了贡献,未能一一列出,在此对所有的课题参加人员、对课题研究及本书编撰提供指导帮助的同行专家表示由衷的感谢。

感谢侯保荣院士对本书的举荐和指导。

由于作者水平有限,书中难免有不妥和疏漏之处,敬请读者批评指正。

著 者

2017年1月

目 录

丛书序

丛书前言

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 海工混凝土结构的耐久性劣化行为	2
1.2 耐久性劣化过程及影响因素	3
1.2.1 氯离子侵蚀导致的钢筋锈蚀	3
1.2.2 混凝土碳化引起的钢筋锈蚀	10
1.2.3 环境盐类对混凝土的腐蚀作用	12
1.2.4 混凝土内部膨胀反应——碱集料反应	13
1.2.5 混凝土内部膨胀反应——硫酸盐反应	15
1.2.6 冻融循环对混凝土的破坏	16
1.3 我国典型海水腐蚀环境分析	18
1.3.1 水文气候条件	19
1.3.2 环境腐蚀介质情况	20
1.4 我国典型海水腐蚀环境下混凝土结构耐久性	22
1.4.1 海工混凝土构件腐蚀情况	22
1.4.2 混凝土碳化情况	25
1.4.3 混凝土中氯离子渗透情况	26
1.4.4 混凝土中钢筋锈蚀临界氯离子浓度	30
1.5 海工混凝土结构耐久性研究现状	32
1.5.1 荷载与大气环境综合作用下混凝土碳化研究	33
1.5.2 荷载作用下混凝土中氯离子扩散行为研究	33
1.5.3 荷载作用下混凝土抗冻融性能研究	34
参考文献	35
第 2 章 实体工程混凝土结构应力水平调查与分析	41
2.1 概述	41
2.2 实体工程混凝土结构应力水平分析	41

2.2.1	天津港北港池 5#~7#集装箱码头	42
2.2.2	天津港南疆港区专业化矿石码头	48
2.3	结构应力的现场检测与分析	52
2.3.1	惠州华德石化码头	52
2.3.2	中船大岗基地码头	56
第 3 章	混凝土构件荷载和环境耦合试验方法	59
3.1	概述	59
3.2	荷载类型分析	61
3.3	静荷载试验方法	63
3.3.1	静荷载设计思路	63
3.3.2	静荷载加载装置结构设计	65
3.3.3	应力松弛问题的解决	70
3.4	动荷载试验方法	72
3.4.1	动荷载与氯离子耦合试验装置的设计与制作	72
3.4.2	动荷载试验参数的选择和混凝土构件的设计	76
	参考文献	78
第 4 章	恒定荷载与氯盐耦合作用下混凝土耐久性劣化进程及损伤行为	80
4.1	概述	80
4.2	原材料和试验方法	82
4.2.1	试验原材料	82
4.2.2	混凝土配合比设计及拌制	82
4.2.3	混凝土试件的加载和试验	84
4.2.4	混凝土试件氯离子含量的测定	84
4.3	恒定荷载作用下氯离子在混凝土内渗透情况	86
4.3.1	弯拉荷载对混凝土内氯离子浓度分布的影响	86
4.3.2	单轴压荷载对混凝土内氯离子浓度分布的影响	94
4.4	恒定荷载对混凝土氯离子扩散系数的影响	102
4.4.1	弯曲荷载对混凝土氯离子扩散系数的影响	102
4.4.2	混凝土氯离子扩散系数的弯曲荷载影响因子	106
4.4.3	单轴压荷载对混凝土氯离子扩散系数的影响	107
4.4.4	混凝土氯离子扩散系数的轴压荷载影响因子	110
4.5	荷载对混凝土氯离子扩散系数的影响机理分析	114
4.5.1	弯曲荷载对混凝土界面过渡区的影响	114
4.5.2	荷载对浆体试件孔隙结构的影响	116

参考文献	117
第 5 章 恒定荷载与盐冻耦合作用下混凝土耐久性劣化进程及损伤行为	119
5.1 概述	119
5.2 试验方法	120
5.3 盐冻耦合作用对混凝土质量和动弹模量的影响	122
5.3.1 盐冻对混凝土质量变化的影响	122
5.3.2 盐冻对混凝土动弹模量变化的影响	123
5.4 荷载与冻融耦合作用下氯离子在混凝土中渗透情况	124
5.4.1 弯曲荷载与冻融耦合作用对混凝土氯离子浓度分布的影响	124
5.4.2 压荷载与冻融耦合对混凝土氯离子浓度分布的影响	126
5.5 荷载与冻融耦合作用对混凝土氯离子浓度扩散系数的影响	128
5.5.1 弯曲荷载与冻融耦合作用对混凝土氯离子扩散系数的影响	128
5.5.2 压荷载与冻融耦合对混凝土氯离子扩散系数的影响	132
5.6 混凝土氯离子扩散系数的荷载与盐冻耦合影响因子	134
5.6.1 弯曲荷载与盐冻耦合作用的影响因子	134
5.6.2 压荷载与盐冻耦合作用的影响因子	135
5.7 冻融循环对混凝土氯离子浓度扩散系数的影响分析	139
5.7.1 冻融对浆体试件孔隙结构的影响	139
5.7.2 荷载和冻融耦合对混凝土界面过渡区的影响	141
参考文献	142
第 6 章 交变荷载与氯盐耦合作用下混凝土结构耐久性劣化进程及损伤行为	144
6.1 概述	144
6.2 交变荷载与氯盐耦合作用试验方案	146
6.2.1 荷载水平和交变频率	146
6.2.2 构件成型及加载试验环境	146
6.3 交变荷载作用下氯离子在混凝土中渗透情况	148
6.3.1 交变荷载应力水平对氯离子渗透的影响	148
6.3.2 交变荷载加载频率对氯离子渗透的影响	149
6.4 交变荷载对混凝土结构氯离子扩散系数的影响	151
6.5 交变荷载对混凝土结构耐久性影响机理分析	153
参考文献	157
第 7 章 结构裂缝对混凝土耐久性劣化进程及损伤行为	158
7.1 概述	158
7.2 混凝土构件结构裂缝的制作	161

7.3	裂缝宽度对氯离子在混凝土中渗透的影响	164
7.3.1	裂缝宽度对浪溅区混凝土氯离子浓度分布的影响	164
7.3.2	裂缝宽度对水位变动区混凝土氯离子浓度分布的影响	168
7.4	裂缝宽度对混凝土氯离子扩散系数的影响	172
7.4.1	裂缝宽度对浪溅区混凝土氯离子扩散系数的影响	172
7.4.2	裂缝宽度对水位变动区混凝土氯离子扩散系数的影响	173
7.4.3	混凝土氯离子扩散系数的裂缝影响因子	175
7.5	裂缝宽度对混凝土内钢筋锈蚀起始时间的影响	178
7.5.1	混凝土试件的制作及钢筋腐蚀的检测方法	178
7.5.2	裂缝宽度与混凝土内钢筋开始锈蚀时间	178
7.6	裂缝宽度对混凝土内钢筋锈蚀率的影响	180
7.6.1	室内试验	180
7.6.2	华南海洋环境暴露试验研究	182
7.6.3	裂缝宽度对混凝土中氯离子渗透及钢筋锈蚀的影响机理分析	186
	参考文献	188
第 8 章	荷载-环境多因素耦合作用下混凝土结构耐久性寿命预测	190
8.1	概述	190
8.2	耐久性设计方程	191
8.2.1	海工混凝土结构耐久性极限状态的规定	191
8.2.2	海工混凝土结构耐久性设计方程	193
8.2.3	设计方程变量确定	194
8.3	考虑荷载的混凝土结构耐久性寿命预测模型	198
8.3.1	恒定静荷载作用下的混凝土结构耐久性寿命预测模型	198
8.3.2	恒定荷载-冻融-氯盐三因素耦合作用下的混凝土耐久性寿命预测模型	198
8.3.3	交变荷载-环境作用下的混凝土结构耐久性寿命预测模型	199
8.4	寿命预测算例	200
8.4.1	恒定静荷载作用下的混凝土结构耐久性寿命预测模型的算例	200
8.4.2	交变荷载-环境作用下混凝土结构耐久性寿命预测模型的算例	201
	参考文献	202

第1章 绪 论

钢筋混凝土的出现尚不足 200 年，由于其具有的诸多优点，如取材广泛、施工简便、维护简单、成本低廉等，被广泛应用于世界各地的土木工程领域。预测在今后很长一段时期内，作为一种价廉物美的建筑材料，钢筋混凝土还将获得更广泛的应用，尤其是在基础设施大力兴建的发展中国家。

近半个世纪以来，人们越来越发现钢筋混凝土并非是一种预期的、能够长时间服役的建筑材料，尤其是在一些不当的设计施工、恶劣的外部环境条件共同作用下，混凝土结构的性能劣化严重，使得承载能力下降、安全性降低，进而影响长期服役性能，甚至不得不拆除重建，已经给世界各国带来了巨大的经济损失。

混凝土结构性能退化的根本原因大致可以分为两类：一类为混凝土结构本身承载能力不足或者超载引起的性能退化或损伤，即短期承载力方面的原因；另一类为混凝土自身材料和外界自然环境的共同作用使得其物理、力学性能随着使用时间的推移逐步退化，进而使得承载力不足，即长期耐久性方面的原因^[1-5]。

混凝土结构产生耐久性失效是混凝土或钢筋的材料物理、化学性质及几何尺寸的变化，引起混凝土构件外观变化，不能满足正常使用的要求，导致承载能力退化，最终影响整个结构的安全^[6-13]。其中，最普遍、最严重的原因是氯化物侵蚀引起的锈蚀，其次是冻融侵蚀、硫酸盐侵蚀、碳化锈蚀、碱集料反应和延迟钙矾石生成。因此，混凝土结构的耐久性失效应考虑以下几个方面：结构外观或表面破损已不能满足正常使用；钢筋锈蚀或结构破损已导致结构承载力下降到不能允许的程度；对结构进一步维修在技术上或经济上已经不可行。所以，混凝土结构耐久性失效过程包含在混凝土结构的建造、使用和老化的结构生命全过程，以及与结构生命全过程相对应的结构设计、施工和维护的各个环节^[14, 15]。

结构耐久性不足所造成的后果是非常严重的。国内统计资料表明，由混凝土结构的耐久性问题而导致的损失是巨大的，而且耐久性问题将变得越来越突出。由于耐久性支配着混凝土结构在整个服役过程中的“健康”和“寿命”，因此，对结构耐久性的重视和工程建设前期投入尤其重要，国内外学者曾用“五倍定律”形象地描述了混凝土结构耐久性的重要性^[16, 17]，即新建工程项目在防止钢筋锈蚀这一耐久性措施投入方面每节省 1 元，则发现钢筋锈蚀时需要采取的措施费为 5 元，至混凝土构件开裂时需要采取的措施费为 25 元，而严重破坏至影响结构安全性时需要采取的措施费增加到 125 元。可见，混凝土结构的耐久性决定了工

程的建造品质,影响工程营运期的使用安全,关系工程建设的寿命成本。因此,混凝土结构的耐久性问题越来越受到土木工程界的重视,对混凝土结构的耐久性研究也逐渐成为热点。

1.1 海工混凝土结构的耐久性劣化行为

混凝土耐久性的好坏影响着混凝土结构的使用寿命。物理、化学等方面的影响使得混凝土的耐久性问题十分复杂,这些影响因素主要包括冻融循环、碳化、碱集料反应、化学腐蚀、海水及其他氯化物环境侵蚀、淡水溶蚀、机械力破坏及多种因素的共同作用。在上述所有因素中,海水环境被公认为是最恶劣的腐蚀环境,大部分地区的海工混凝土结构,从结构耐久性角度而言,混凝土构件可能发生的劣化如下。

1. 氯离子导致的构件内部钢筋锈蚀

海水环境、除冰盐及其他氯化物环境中的水溶氯离子通过扩散、渗透和吸附等途径从混凝土构件表面向混凝土内部迁移,在钢筋表面不断积聚,浓度逐渐增加,达到诱发钢筋锈蚀的电化学过程的临界浓度后,可引起钢筋的锈蚀。因为氯离子在钢筋锈蚀的电化学过程中起到催化和促进的作用,本身并不消耗,所以氯离子引起的钢筋锈蚀发展速度比碳化锈蚀快,而且不容易控制。

2. 大气中二氧化碳引起混凝土碳化导致内部钢筋锈蚀

一般环境对混凝土结构的腐蚀主要是碳化引起的钢筋锈蚀。混凝土呈高度碱性,钢筋在高度碱性环境中会在表面生成一层致密的钝化膜,使钢筋具有良好的稳定性。当空气中的二氧化碳扩散到混凝土内部后,会通过化学反应降低混凝土的碱度(碳化),使钢筋表面失去稳定性并在氧气与水分的作用下发生锈蚀。暴露在大气中的所有混凝土构件都会受到大气和环境温湿度作用,从而发生碳化和诱发锈蚀的进程,只是由于保护层混凝土特性与环境具体条件的差异,上述过程的发展速度差异很大。

3. 环境盐类对混凝土的侵蚀

盐类对混凝土的作用主要表现为化学反应作用和物理结晶作用。盐类中的 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 均可与混凝土中的相关化学成分反应。 Mg^{2+} 能和混凝土孔隙溶液中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应,生成疏松而无胶凝性的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,降低混凝土的密实性和强度。但是海水中相对高浓度 Cl^- 的存在使 Mg^{2+} 的作用减弱,可降低上述过程对混凝土的破坏。硫酸盐对混凝土的化学腐蚀主要是 SO_4^{2-} 与混凝土中的水化铝酸钙反应生