

DAXING HAIGONG
HUNNINGTU JIEGOU
NAIJIUXING YANJIU YU SHIJIAN

大型海工 混凝土结构 耐久性研究与实践

■ 徐强 俞海勇 著

中国建筑工业出版社

大型海工混凝土结构 耐久性研究与实践

徐强 俞海勇 著

责任编辑：俞海勇
封面设计：俞海勇
文字编辑：俞海勇

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大型海工混凝土结构耐久性研究与实践/徐强, 俞海勇著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2008

ISBN 978-7-112-10311-9

I. 大… II. ①徐… ②俞… III. 海洋工程-混凝土结构-耐用性-研究 IV. P75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 133518 号

参编人员: 徐 强 俞海勇 王 琼 张 贺

责任编辑: 徐 纺 黄珏倩

责任设计: 董建平

责任校对: 兰曼利 孟 楠

大型海工混凝土结构耐久性研究与实践

徐 强 俞海勇 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14 字数: 350 千字

2008 年 11 月第一版 2008 年 11 月第一次印刷

定价: 32.00 元

ISBN 978-7-112-10311-9

(17114)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

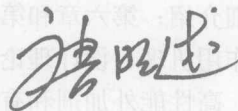
言 序

改革开放以来,我国社会经济发展取得了举世瞩目的成就,东部沿海地区的发展速度和经济规模更是领先于我国其他地区。伴随着经济不断发展,东部沿海地区已经并且仍将在未来的10~20年内继续进行有史以来最大规模的基本建设,其中最为引人注目的是大量新建或者计划建设的跨海桥梁、隧道、公路、港口码头、公共建筑等大型海工工程。海工工程的大量兴建既是对工程学的挑战,也是其创新、前进的原动力之一。随着海工混凝土耐久性研究的不断深入,工程应用经验的不断积累,有必要对我国目前大型海工混凝土工程耐久性的实践与发展进行总结和提炼,以满足国内外研究、应用领域技术交流的需要。

《大型海工混凝土结构耐久性研究与实践》一书全面翔实地介绍了近年来我国一些大型海工混凝土工程耐久性的基本理论、研究成果和工程应用效果,是上海市建筑科学研究院从事混凝土耐久性研发攻关团队集体的智慧结晶。这支攻关团队已经从事混凝土耐久性研究和应用工作多年,主持了多项重大科研攻关项目,也主持和参与了以东海大桥为代表的一大批重大海工工程的耐久性设计及工程实践工作,有一定的理论基础和实践经验。该书由该团队根据其多年研究成果和工程实践经验而编写,既有坚实的创新性实践基础,又有系统的理论概括和创新成果,不仅是科技成果的展示,更是一本可为相关领域学者、研究人员、工程技术人员提供参考的具有相当价值的读物。

当然,海工混凝土结构耐久性的研究与实践还有大量值得探讨的问题,需要大量的科研和工程技术人员对其进行进一步深入研究和创新。希望通过本书的出版和交流,推动我国混凝土结构耐久性技术的发展和进步!

南京工业大学教授
中国工程院院士



2008.06.10

前 言

东部沿海地区是我国人口、经济相对集中的区域，经济发达且发展迅速。近十年来，随着我国宏观经济的快速增长以及海洋资源的开发，港口码头、跨海桥梁、濒海建筑物等各类大型海工工程建设需求日益旺盛，且在未来的 10~20 年内仍将不断增长。然而，多种环境侵蚀作用会损害混凝土结构，其中最为普遍的是钢筋锈蚀引起的混凝土结构破坏，尤以处于海洋环境下的建筑物、码头、公路、桥梁等海工工程因氯盐侵蚀引起的钢筋锈蚀最为严重。经济发展、工程需求与环境条件之间存在的矛盾，进一步促进了我国海工混凝土工程应用技术的发展，并初步形成了高性能海工混凝土、海工混凝土结构耐久性及其防护技术、耐久性评价和施工应用技术等技术体系。

本书提炼了各种海工混凝土耐久性技术及防护措施在工程应用实践中的成熟经验和科研心得，展示了我国在大型海工工程混凝土结构耐久性研究中的最新科技成果，以期更好地推进和发展高性能海工混凝土、海工混凝土结构耐久性及防腐措施、海工混凝土结构耐久性评测与寿命评估等技术。

本书以大型海工混凝土结构耐久性科研及应用实践为主线，主要讨论了海洋环境条件下混凝土结构耐久性研究、设计和应用，共分九章。第一章为概论，主要论述了混凝土结构耐久性的定义及其研究的必要性；第二章介绍了目前国内外海工混凝土结构耐久性研究和应用领域的最新动态和技术研究进展状况，便于读者相对全面地了解海工混凝土结构耐久性研究和应用技术的概况；第三章通过分析海工混凝土结构耐久性的影响因素、腐蚀机理以及我国海洋环境的特点，阐述了如何划分海工混凝土结构环境和确定环境荷载，为混凝土结构耐久性设计和寿命评价奠定基础；第四章分别列举了目前主要耐久性技术措施的技术特点、作用机理和经济性能，提出了综合耐久性措施的设计理念；第五章重点阐述了海工混凝土结构耐久性设计使用寿命的概念、基础理论及数学模型，并结合典型工程进行了详细介绍；第六章和第七章为高性能混凝土专题，系统地总结了高性能混凝土的技术发展、作用机理、设计理论、性能特点、工程应用和质量控制等方面的内容，介绍了复合掺合料、高性能外加剂和有机硅混凝土保护剂等辅助材料以及高性能混凝土在东海大桥等重大工程中的应用；第八章回顾了混凝土结构耐久性监测技术的发展，并以某跨海桥梁结构混凝土长期监测与预警方案为例系统地阐述了混凝土长期监测与预警系统的基本概念和实现框架；第九章简要总结了海工混凝土结构耐久性研究和实践中存在的问题和瓶颈，展望了海工混凝土结构耐久性研究应用的发展趋势和方向。

全书从研究和应用的角度，较为系统地介绍了海工混凝土结构耐久性的研究动态和工程应用实践，各章内容互相衔接，但又相对独立，可作为该领域研究、应用和教学的参考书籍。

本书由徐强、俞海勇编著。各章内容由徐强、俞海勇、王琼、张贺编写。张贺、王琼

校稿，全书由俞海勇统稿。参与与本书内容相关的科研项目研究者有邓咏梅、樊钧、宣怀平、张鑫、林国英、穆幼倩、莫继根等。

本书的编写出版得到了上海市科学技术委员会上海市优秀学科带头人计划项目“跨海工程结构混凝土寿命预测体系研究”的资助，特此表示感谢。此外，书中也涉及了上海市建筑科学研究院近年来所主持的一些重大科研课题相关内容，主要有上海市科委应用技术开发项目“濒海地区混凝土结构耐久性检测评估关键技术研究”，上海市建委项目“高性能混凝土在上海深水港工程中的应用技术研究”、“东海大桥高性能海工混凝土耐久性评估体系建立与应用”，建设部研究开发项目“混凝土抗氯离子侵蚀性能测试方法与应用技术研究”等科研课题等。本书对上海市建筑科学研究院近年来主持或参与的一些重大工程技术服务项目的相关内容进行了介绍，如东海大桥、青岛海湾大桥、杭州湾跨海大桥、上海沪崇苏越江通道等濒海工程的混凝土耐久性专题技术服务项目，在此一并表示感谢！同时本书也引用了大量的参考文献，谨以此书表达对这些文献作者的敬意！

本书作者的水平有限，不当之处恳请读者指正。

目 录

1 概论	1
1.1 混凝土耐久性的定义	1
1.2 混凝土耐久性研究的必要性	1
1.2.1 混凝土技术的发展需求	1
1.2.2 混凝土工程应用的发展需求	2
2 国内外海工混凝土耐久性研究及应用	4
2.1 混凝土耐久性研究的发展历程	4
2.2 国内外海工混凝土结构耐久性研究与应用现状	6
2.2.1 沿海混凝土劣化原因	6
2.2.2 不同环境作用区域对混凝土耐久性的影响	6
2.2.3 海洋环境下混凝土耐久性技术措施	7
2.2.4 国内外混凝土耐久性设计规范及标准要求	8
3 海工混凝土结构的环境荷载	12
3.1 海洋环境中混凝土结构耐久性问题	12
3.1.1 海洋环境中混凝土结构耐久性的破坏特点	12
3.1.2 国内外海洋腐蚀环境下钢筋混凝土结构使用现状	13
3.1.3 华东沿海地区海洋腐蚀环境及钢筋混凝土结构使用现状	16
3.2 我国海洋环境条件的特点	20
3.2.1 我国海洋环境的特点	20
3.2.2 我国海洋环境条件调查实例	22
3.3 混凝土结构在海洋环境下的腐蚀机理	34
3.3.1 钢筋锈蚀	34
3.3.2 氯离子引起钢筋锈蚀	35
3.3.3 碳化作用导致的钢筋腐蚀	36
3.3.4 盐腐蚀	37
3.3.5 冻融循环破坏	38
3.3.6 氯离子、硫酸根离子侵蚀和冻融循环联合作用	40
3.3.7 碱-骨料反应作用	41
3.4 海工混凝土环境划分与荷载确定	45
3.4.1 国内外有关海工混凝土环境荷载的划分标准	45
3.4.2 海工混凝土环境荷载确定及应用	46
4 提高海工混凝土耐久性技术对策与评价	52

119	4.1	海工混凝土耐久性技术措施的现状和发展趋势	52
121	4.1.1	提高混凝土保护层厚度	52
121	4.1.2	控制混凝土裂缝	53
130	4.1.3	采用高性能混凝土提高混凝土密实度	53
132	4.1.4	混凝土结构表面保护	54
132	4.1.5	改善钢筋材质与涂层钢筋	56
133	4.1.6	钢筋腐蚀抑制剂	59
137	4.1.7	混凝土结构的电化学保护	60
140	4.2	综合耐久性措施的提出和应用	62
141	4.2.1	提高混凝土结构耐久性的根本措施	62
147	4.2.2	提高混凝土结构耐久性的补充措施	63
146	4.2.3	综合耐久性措施的提出及工程应用	64
	5	海工混凝土结构耐久性设计与应用	66
150	5.1	海工混凝土结构耐久性设计使用寿命	66
151	5.1.1	海工混凝土结构耐久性设计使用寿命的定义	66
152	5.1.2	海工混凝土结构设计使用寿命的确定	69
153	5.2	海工混凝土结构使用寿命预测	70
154	5.2.1	海工混凝土结构使用寿命预测的主要方法	70
155	5.2.2	海工混凝土使用寿命预测模型	71
159	5.2.3	海工混凝土结构使用寿命预测模型的建立和工程应用	78
158	5.3	海工混凝土结构工作环境荷载及相关参数	85
158	5.3.1	海工混凝土结构工作环境荷载及相关参数的选取	85
159	5.3.2	环境荷载及相关参数值的确定	86
159	5.4	海工混凝土结构耐久性设计及实例	89
159	5.4.1	海工混凝土结构工程耐久性设计的原则和主要内容	89
159	5.4.2	海工混凝土结构耐久性设计实例	90
	6	高性能海工混凝土设计与应用	105
171	6.1	混凝土技术的发展和應用	105
173	6.1.1	混凝土技术的发展历史	105
174	6.1.2	现代混凝土技术和发展趋势	106
175	6.2	高性能混凝土概念的提出及组成结构特点	108
176	6.2.1	高性能混凝土的定义及可持续发展的概念	108
177	6.2.2	高性能混凝土的组成及结构特点	108
177	6.2.3	高性能混凝土的微观结构与宏观性能的关系	110
178	6.3	高性能海工混凝土的设计理论及机理	112
178	6.3.1	高性能海工混凝土的性能要求	112
180	6.3.2	高性能海工混凝土配合比设计方法	113
181	6.4	高性能海工混凝土的性能及工程应用	116

6.4.1	原材料的选择和优化	116
6.4.2	高性能海工混凝土试配试验	122
6.4.3	高性能海工混凝土性能试验	124
6.4.4	高性能海工混凝土的工程应用	130
6.5	高性能海工混凝土用复合掺合材料	132
6.5.1	国内外发展趋势和应用现状	132
6.5.2	高性能混凝土复合掺合材料的机理	133
6.5.3	高性能混凝土复合掺合材料产品设计	136
6.5.4	产品性能	146
6.6	聚羧酸系高性能减水剂及其工程应用	147
6.6.1	技术发展现状	147
6.6.2	作用机理	147
6.6.3	产品性能特点	148
6.6.4	工程应用	150
6.6.5	存在的问题	151
6.7	有机硅混凝土保护剂及其工程应用	153
6.7.1	应用现状和发展趋势	153
6.7.2	作用机理	154
6.7.3	主要组分及原材料	155
6.7.4	主要性能	156
7	高性能海工混凝土的工程应用和质量控制	158
7.1	高性能海工混凝土配制	158
7.1.1	高性能海工混凝土的技术要求	158
7.1.2	特定环境下的高性能海工混凝土的配制	158
7.2	高性能海工混凝土耐久性能检测及评价方法	159
7.2.1	抑制碱-骨料反应的指标和检验方法	159
7.2.2	混凝土抗渗性能指标检验方法	161
7.2.3	混凝土抗碳化性能指标检验方法	172
7.2.4	混凝土抗冻性能指标检验方法	173
7.2.5	混凝土抗裂性能指标检验方法	174
7.3	高性能海工混凝土工程质量控制	176
7.3.1	原材料质量控制	176
7.3.2	混凝土配合比设计与调整	177
7.3.3	拌制、运输和浇筑	178
7.3.4	养护	178
7.3.5	裂缝控制措施	179
7.4	高性能海工混凝土技术的工程应用	180
7.4.1	高性能海工混凝土设计	180

7.4.2	高性能混凝土施工应用技术	182
7.4.3	高性能海工混凝土施工质量	187
7.4.4	高性能混凝土耐久性设计参数优化	194
8	海工混凝土结构耐久性监测	195
8.1	海工混凝土结构监测技术的发展和應用	195
8.1.1	技术发展现状	195
8.1.2	主要监测内容	196
8.1.3	主要监测参数及传感器	196
8.2	海工混凝土结构耐久性监测系统设计和工程应用	197
8.2.1	系统构成	197
8.2.2	现场同条件模拟(大型暴露场)试验方案	198
8.2.3	结构实体耐久性长期在线监测方案	200
8.2.4	结构实体耐久性预警系统方案	203
9	发展与展望	205
9.1	海工混凝土耐久性研究与实践中存在的问题	205
9.1.1	混凝土材料耐久性研究中存在的一些问题	205
9.1.2	混凝土结构耐久性研究中存在的一些问题	206
9.1.3	混凝土结构耐久性实践中有关标准规范需深入的问题	206
9.2	海工混凝土结构耐久性研究应用的发展趋势	208
9.2.1	海工混凝土结构耐久性研究应用的主要趋势	208
9.2.2	其他一些在研究应用时需要注意的问题	209
	参考文献	213

1 概 论

混凝土耐久性是结构混凝土在其使用环境条件下抵御环境作用而保持其必要性能的能力的一种称谓。耐久性在多年前就受到了关注，但如何界定耐久性，为什么要进行耐久性研究等问题一直没有明确的答案。本章总结归纳了耐久性研究的进展，对耐久性的定义及其研究的必要性进行了阐述，以期

1.1 混凝土耐久性的定义

随着建筑业的蓬勃发展和建筑技术的进步，混凝土材料在工程中获得了更加广泛的应用。但普通混凝土在耐久性方面出现的许多问题和种种工程事故，使人们认识到在结构设计时，对使用材料的耐久性应像力学性质一样予以关注。

我国最新修订颁布的《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)的总则中，明确指出结构在规定的设计使用年限内应满足下列可靠性要求：

- (1) 正常施工和正常使用时，能承受可能出现的各种作用；
- (2) 在正常使用时具有良好的工作性能；
- (3) 在正常维护下具有足够的耐久性能；
- (4) 在设计规定的偶然事件发生时及发生后，仍能保持必要的整体稳定性。

其中，第(1)、(2)、(4)三项是结构安全性和使用性要求，第(3)项是结构耐久性的要求。

混凝土结构在环境侵蚀下的材料劣化过程，是一个不可逆的过程。它不是直接由力学因素引起的，而是混凝土材料的物理化学作用的结果。因此，对混凝土结构耐久性可定义为，结构在规定的使用年限内，在各种环境条件作用下，不需要额外的加固处理费用而保持其安全性、正常使用性和可接受外观的能力。对于海工混凝土结构而言，其耐久性可定义为在规定使用年限内，在海洋环境条件作用下，混凝土结构不需要额外的加固处理费用而保持其安全性、正常使用性和可接受外观的能力。

1.2 混凝土耐久性研究的必要性

1.2.1 混凝土技术的发展需求

从1824年波特兰水泥发明以来，现代水泥基混凝土材料至今已有近200年的使用历史。近200年来，混凝土的应用与发展过程是强度和性能不断提高的过程。如按照强度和

性能来划分其发展过程,可简单的划分为四个阶段,即普通混凝土阶段、高强混凝土阶段、高性能混凝土阶段以及高耐久性混凝土阶段。

宏观上,普通混凝土一般指强度等级不大于 C50、水灰比大于 0.40 左右的混凝土;微观上,普通混凝土硬化水泥石中不但有凝胶水和毛细管水,还有明显的连通毛细管和界面的水膜层,因而其强度较低、抗渗性较差、使用寿命较短。

二次世界大战后的经济恢复期,混凝土结构向大跨度、高层与超高层的方向发展,因而对混凝土强度提出了更高的要求。于是在普通混凝土大量应用的基础上,高强混凝土得以快速发展。宏观上,高强混凝土的水灰比一般小于 0.38,强度等级不小于 C50;微观上,高强混凝土硬化水泥石中存在部分未水化的水泥颗粒和凝胶水,但连通毛细管和界面的水膜层较少,且在界面上 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 结晶积聚并定向排列,大大提高了水泥石和骨料的粘结强度,提高混凝土的强度。在 20 世纪 40 年代,由于没有高效减水剂,高强混凝土向低水灰比干硬性方向发展,需要强力振捣;20 世纪 50 年代高效减水剂的出现,使高强高流态混凝土成为新的发展方向。

然而近 50 年来,片面提高强度而忽视其他性能的倾向造成水泥生产向大幅度增加细度和硅酸三钙、铝酸三钙的含量发展,水泥强度等级或 28d 胶砂抗压强度从 30MPa 提高到 60MPa,并越来越多地使用 50MPa 以上的混凝土。提高混凝土强度的方法除采用高强度等级水泥外,增加单方水泥用量、降低水灰比或单方用水量等措施也较为常用。到 20 世纪 80 年代前后,因混凝土材质劣化和环境等因素的侵蚀作用,常出现混凝土建筑物破坏失效甚至倒塌等事故,造成巨大损失。鉴于此,加上施工能耗、劳动与环境保护,尤其是均匀性对工程安全所具有的极端重要性,因此对混凝土的耐久性提出了愈来愈高的要求。传统的单一强化的主流思想受到批评,高性能混凝土逐渐成为合理的、科学的发展路线。高性能混凝土水灰比一般小于 0.38,并掺入矿物外掺料,例如粉煤灰、矿粉等,以及高效减水剂,其硬化水泥石结构致密,在施工过程中具有良好的工作性,硬化后具有高的体积稳定性、抗渗性和强度。

高性能混凝土在一般环境下体现出良好的耐久性。但在某些特殊环境下,例如海洋环境下,混凝土结构将遭受着远比内陆更为严峻的自然环境考验:诸如海风、海雾、海浪、海流、潮差、海冰、风暴潮以及海洋生物的污损与腐蚀作用,因而仅仅采用高性能混凝土技术已不能满足此类环境条件下对混凝土耐久性提出的更高要求,必须采用更为有效的耐久性设计策略。所谓高耐久性混凝土是一个宽泛的概念,并不仅仅针对混凝土本身的性能,通过设计合理的保护层厚度,根据不同工程的实际状况采取适当合理的补充措施,包括在混凝土表面涂覆抗渗涂料、抗碳化涂料,在混凝土中掺入阻锈剂等,结合高性能混凝土技术,使得混凝土结构能在恶劣的自然环境下达到设计的要求。

1.2.2 混凝土工程应用的发展需求

改革开放以来,我国的基础设施建设进入了高潮期,带动国民经济的高速发展,取得的成就举世瞩目。但是这一期间修建的许多混凝土结构,包括桥梁、道路、隧道、港口、大坝、建筑物等,在建期间或建成长时间后出现可见裂缝,不但影响外观,而且影响其在侵蚀性环境中运行的结构耐久性,还使一些结构的使用功能受到影响。

随着建筑结构要求的日益提高以及一些重大基础项目的建造，混凝土结构耐久性设计及其相应的检测评估维护越来越得到业界的重视，特别对于处在海洋环境下的基础设施工程更是如此。自 20 世纪 80 年代以来，中国沿海各地经济处于高速发展时期，海上或者濒海区域内的各种工业和民用建筑、桥梁、公路等基础设施大量兴建。例如，上海相继修建了包括东海大桥、洋山深水港、沪崇苏越江通道、临港新城等诸多混凝土结构工程，我国其他沿海地区也有大量在建或拟建的工程，如青岛海湾大桥、杭州湾大桥、杭州湾嘉绍通道等，这些工程均对混凝土结构的耐久性提出了 100 年使用寿命的要求。

建筑业消耗世界资源近 40%，若将建筑物的寿命延长一倍，资源能源消耗和环境污染就要减轻一半。为此，不少科学家主张延长结构工程寿命，如主张桥梁使用寿命按 100~125 年设计，港口工程使用寿命按 100 年设计。

强调混凝土的耐久性，目的是为了延长混凝土的使用寿命，这正是混凝土可持续发展的出路。混凝土的使用寿命得到延长，从而减少建筑物修补或拆除的浪费和建筑垃圾，提高资源和能源的利用率，缓解人类对原本就紧张的资金和能源需求所形成的巨大压力，减少资源浪费，避免经济损失；高性能混凝土大量利用优质的工业副产品和废弃物，减少了水泥用量，从而减少自然资源和能源消耗，减少对环境的污染，减轻生态环境负荷。以上两点均符合可持续发展战略。

1.2.1 混凝土耐久性的研究意义

混凝土的耐久性是指混凝土结构在预期的使用寿命内，在正常维护条件下，保持其外观、强度和性能的能力。随着混凝土结构在基础设施中的广泛应用，其耐久性问题日益受到重视。混凝土的耐久性研究对于延长结构的使用寿命、降低维护成本、减少资源消耗和环境污染具有重要意义。混凝土的耐久性研究涉及材料科学、结构工程、环境工程等多个领域。随着科学技术的进步，混凝土的耐久性研究取得了长足的进步。通过优化混凝土的配合比、采用高性能外加剂、改善施工工艺等措施，可以有效提高混凝土的耐久性。同时，建立完善的混凝土耐久性检测评估体系，对于确保混凝土结构的长期安全运行至关重要。未来，随着可持续发展理念的深入人心，混凝土的耐久性研究将得到进一步的重视和投入，为构建绿色、低碳、可持续发展的基础设施提供有力支撑。

2 国内外海工混凝土耐久性研究及应用

随着人类对海洋的进一步开发,各种在海洋环境下使用的重大混凝土结构,如跨海大桥、海港码头、海上采油平台、海底隧道等工程的建造需要不断增加。而这些工程相对于其他陆上混凝土工程而言,其施工难度大、耐久性要求高且腐蚀环境严酷,一旦出现事故,则后果不堪设想,修补耗资巨大。各国的研究和实践表明,海洋环境是混凝土工程的众多使用环境中最为严酷的使用环境条件之一,海工混凝土耐久性的研究和应用是耐久性研究领域的难点和重点,海工混凝土耐久性研究与实践也是本书的核心内容。本章从混凝土耐久性研究的发展历程开始,简要介绍了国内外海工混凝土结构耐久性研究和应用领域的进展。

2.1 混凝土耐久性研究的发展历程

混凝土结构耐久性不良引发的经济损失极其惊人。资料表明,美国1975年由于结构腐蚀引起的损失为700亿美元,1985年为1680亿美元,1998年已达2500亿美元,而今后仅用于维修和重建的费用预计高达3000亿美元/年,其中仅混凝土结构腐蚀就占40%左右,由此引发的环境和社会问题不容忽视。因而自20世纪以来,欧美各国已开始研究混凝土结构的耐久性问题。

20世纪初,格尤恩、拉巴利德和克莱罗门等人对工业建筑中使用的混凝土和钢筋混凝土进行了基本研究和经验总结,这为混凝土耐久性的研究提供了最基本的一手资料;1925年,在密勒领导下,美国开始在硫酸盐含量极高的土壤中进行长期试验,其目的是为了获取25~50年以后乃至更长时间的混凝土结构腐蚀数据;前联邦德国钢筋混凝土结构协会利用混凝土构筑物受沼泽水腐蚀而破坏的事例,对混凝土在自然条件下的腐蚀情况进行了一次长期试验;1934~1964年间,卡皮斯和戈拉夫对混凝土在海水中的耐久性进行了试验研究,并提供了许多有关混凝土结构在自然条件下使用情况的可靠数据,以及有关水泥种类、混凝土配合比和某些生产因素对混凝土结构抗腐蚀性影响方面的见解;1945年,鲍尔斯(Powers)从亚微观角度研究了混凝土冻融破坏的机理,提出了静水压假说;1951年,前苏联学者贝科大、莫斯克文等研究了混凝土中钢筋锈蚀问题。

随着混凝土结构的广泛使用,混凝土结构耐久性研究也进入高潮,并开始朝系统化、国际化方向发展。自20世纪60年代以来,成立了各种结构耐久性学术机构,开展多种学术活动,出版大量研究论著。美国混凝土学会(ACI)于1957年成立了ACI201委员会,负责并指导混凝土耐久性方面的研究;国际材料与结构研究所联合会(RILEM)于1960成立了“混凝土中钢筋腐蚀”技术委员会(12-CRC),并于1961年、1969年分别召开了

国际混凝土结构耐久性学术会议,在1970年第六届国际预应力混凝土会议上明确提出了“混凝土耐久性与强度同样重要”的观点;1982年,国际材料与结构试验室联合会和国际建筑研究与文献协会联合组成了建筑材料及构件使用寿命预测委员会 CIBW80/RILEM 71-PSL,共同研究结构的寿命预测问题,1987年又成立了一个新的委员会 CIBW80/RILEM 100-PSL,以进一步推进委员会的工作和贯彻已取得的成果,同年日本土木工程师协会混凝土结构委员会提出了一个混凝土结构耐久性的实用设计方法;1989年欧洲混凝土结构委员会发表了《耐久性混凝土结构设计指南》。

有关耐久性的国际会议也越来越频繁:1974~1989年,每隔两年召开一次碱-骨料反应国际学术会议;1987年,国际桥梁与结构工程协会在巴黎举行的“混凝土结构的未来”讨论会上,把耐久性放在一个突出的位置;1989年,葡萄牙和美国都举行了大规模的有关结构耐久性国际学术会议;1991年美国和加拿大联合举行了第二届混凝土结构耐久性国际学术会议;1993年2月,IABSE在丹麦哥本哈根举行了结构残余能力国际学术会议;1993年10月26日~1993年10月29日,在日本大宫市召开的第六届建筑材料与构件的耐久性国际会议上,重点讨论结构的可靠性与耐久性问题。2000年后,国际上有关结构耐久性 & 高性能混凝土的学术研究和讨论甚为频繁。2005年10月27日,“机械荷载与环境荷载联合作用下的钢筋混凝土耐久性”国际研讨会暨亚洲学术年会在青岛理工大学举行,来自16个国家50余名专家学者与会,共同探讨钢筋混凝土耐久性的研究现状及研究方向;2007年5月24日、2007年5月25日,超高耐久性混凝土结构技术国际研讨会在武汉举行,对国内外提高混凝土耐久性新措施及研究内容作了交流;2008年11月26日、2008年11月27日,ICDCS混凝土耐久性国际学术会议将在中国杭州召开,主办单位包括ACI、ACF、CCES、JSCE等多个不同国家协会和组织,届时将从环境、材料、构件和结构四个层次分别对混凝土结构耐久性展开讨论。

我国对混凝土结构碳化和钢筋腐蚀等耐久性问题的研究始于20世纪60年代中期,如南京水利科学研究院对钢筋锈蚀的研究。中国土木工程学会于1982、1983年连续召开了两次全国耐久性学术会议;1991年12月在全国成立了混凝土结构耐久性小组,并开始着手制定混凝土结构耐久性设计规范或标准。建设部把“混凝土结构耐久性及耐久性设计”作为“八五”科技攻关项目,由清华大学和中国建筑科学研究院承担并完成了“混凝土耐久性设计”初稿;1995年,国家科委正式批准并启动了攀登计划项目“重大土木及水利工程可靠性与耐久性研究”,是国家攀登计划中唯一的土建课题;近年来,由高校、研究机构、国家有关部门、行业协会等组织的各类学术会议、论坛密集召开,以分析我国土建结构工程的安全性 & 耐久性现状,交流研究成果,探讨亟待解决的重大问题 & 应对途径,从而为政府有关部门制定或修订相关的技术政策或技术标准提供参考依据,使土建工程结构的安全性 & 耐久性能够更好地适应我国现代化建设的需求,适应我国经济转型后面向市场经济的需求。

随着国内大量沿海工程的启动,海工混凝土的耐久性设计问题迫在眉睫,受到多方关注,上海也成为研究界和工程界关注的热点。上海市建筑科学研究院作为上海市建设科学研究的重要力量,在混凝土耐久性研究以及海工混凝土耐久性设计与实践等方面开展了大量的工作。从20世纪80年代开始,上海建科院致力于粉煤灰、高炉矿渣微粉混凝土技术及商品化研究,并在粉煤灰混凝土耐海水等腐蚀方面开展了专题研究。20世纪90年代末

以来,结合上海重点工程及物流枢纽港的建设等,开展了《高性能混凝土在上海深水港工程中的应用技术研究》、《跨海桥梁结构耐久性预测与评估体系》、《高性能聚羧酸外加剂研究》、《濒海地区混凝土结构耐久性检测与评估》等多个项目,主要研究成果涉及高性能混凝土配制实施及控制、混凝土耐久性设计、混凝土结构使用寿命预测及耐久性评估等多个领域。近年来,上海市建筑科学研究院在有关高性能混凝土以及混凝土结构耐久性研究方面一直处于前沿地位,在有关高性能混凝土应用技术、混凝土耐久性研究与评估、混凝土结构寿命预测、混凝土结构耐久性设计、粉煤灰材料在混凝土中的高值高效益利用、高炉矿渣微粉在混凝土中的应用、新型高效混凝土外加剂、混凝土矿物外加剂、混凝土防腐涂层、混凝土钢筋防锈等方面取得了重要的科研成果,形成了高混凝土配制与工程控制、混凝土结构耐久性设计、混凝土结构使用寿命预测和耐久性评估、混凝土耐久性检测、高性能复合掺合材料、聚羧酸高性能外加剂、有机硅烷涂层、防腐蚀涂装体系等多个优势技术体系和产品系列。

进入新世纪,随着大量重大工程的启动,混凝土结构耐久性设计与工程应用问题迫在眉睫,受到多方关注。上海市建筑科学研究院结合其在华东地区乃至全国地区重大工程混凝土耐久性方面的大量研究成果,先后为磁悬浮、卢浦大桥、东海大桥、洋山深水港、沪崇苏大桥隧道、杭州湾跨海大桥、青岛胶州湾大桥、浙江嘉绍杭州湾大桥、上海轨道交通地下结构等重大工程提供相关试验研究、设计咨询和工程应用技术,为提升我国混凝土耐久性研究水平作出了杰出贡献。

2.2 国内外海工混凝土结构耐久性研究与应用现状

2.2.1 沿海混凝土劣化原因

氯离子是海洋环境下引起钢筋锈蚀从而导致混凝土结构破坏最主要的因素。氯离子不但能穿透钝化膜使钢筋锈蚀,还能增强腐蚀电流进而加速钢筋锈蚀过程。氯离子可反复地侵蚀钢筋表面而自身并不消耗,锈蚀一般可使钢筋截面每年损失达1mm,局部坑蚀甚至可达2~3mm。

除了氯离子外,碳化也是造成钢筋混凝土结构破坏的主要因素。水泥水化生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等碱性物质吸收空气或海水中的 CO_2 进行反应,使混凝土碱性下降,引起钢筋表面钝化膜破坏,钢筋处于活性状态,水和氧的共同作用导致钢筋锈蚀。

盐类侵蚀也会导致混凝土结构破坏失效,其中硫酸盐的结晶膨胀导致混凝土先开裂,后剥蚀并逐渐崩溃;镁盐的侵蚀可破坏水泥水化产物的胶凝性,导致混凝土表面产生白色松软物质,强度下降。

其他原因诸如碱-骨料反应、冻融破坏、机械撞击及磨损、溶出性侵蚀、酸碱侵蚀等均会造成沿海混凝土结构的耐久性损伤。

2.2.2 不同环境作用区域对混凝土耐久性的影响

海洋环境通常可按其对结构的作用区域不同划分为大气区、浪溅区、潮汐区和水

下区。

处于大气区的混凝土结构主要受海风和海雾影响。碳化和氯离子扩散是耐久性损伤的主要原因。但海风不同于内陆风,其风速高、动压力大、施力点高而且更为频繁。同时其 Cl^- 含量高,对结构的影响更为严重。此外,沿海超高层建筑的兴起也使我们不得不更关注海风对结构的作用。

浪溅区的混凝土长期处于干湿交替状态,碳化与氯离子渗透的共同作用导致该部分结构更易破坏,同时由于海浪的机械撞击和磨蚀等原因,浪溅区是结构耐久性损伤最严重的区域。

潮汐区是平均高潮水位和低潮水位之间的区域。该区受海浪、海流甚至海洋生物的腐蚀作用最为显著。盐类的侵蚀和结晶膨胀、混凝土的溶析、冻融循环、干湿交替、钢筋锈蚀等使得该区的腐蚀也非常严重。

水下区是指低潮水位之下的区域。主要受海水的化学侵蚀作用。

2.2.3 海洋环境下混凝土耐久性技术措施

改善传统混凝土结构耐久性常需采取根本措施和补充措施。根本措施是从材质本身的性能出发,提高混凝土材料本身的耐久性能,即采用高性能混凝土,在设置合理的保护层厚度的情况下,保证混凝土结构工程的耐久性。补充措施是指环境侵蚀作用特别严重,或者设计、施工不当以及目前的技术条件无法满足需要,单靠根本措施无法保证混凝土结构的必要耐久性时采用的其他措施。国内外相关科研和长期工程实践调研显示,当前较为成熟的提高海工混凝土结构耐久性的主要技术措施如下:

2.2.3.1 提高混凝土保护层厚度

提高混凝土保护层厚度是提高钢筋混凝土使用寿命最为直接、简单而且经济有效的方法。但是保护层厚度并不能不受限制地任意增加。当保护层厚度过厚时,由于混凝土材料本身的脆性和收缩就会导致混凝土保护层出现裂缝反而削弱其对钢筋的保护作用,而且对于大型混凝土构件来说,外围保护层厚度的增加也意味着构件自重和钢筋用量的急剧增长。因此必须根据工程的实际需要设置合理的保护层厚度。

2.2.3.2 高性能混凝土

高性能混凝土是一种新型高技术混凝土,是在大幅度提高普通混凝土性能的基础上采用现代混凝土技术制作的混凝土,它以耐久性作为设计的主要指标。

高性能混凝土具有高耐久性,特别具有高的抗渗透性能,同时还具有高强度、高工作性能及高尺寸稳定性。高性能混凝土的力学性能和耐久性能远远优于传统混凝土,其主要原因在于低水胶比、高效减水剂以及高性能掺合材料的使用,使得混凝土基相密实度相对提高以及水泥颗粒的解聚和粒径范围的扩大所获得的良好微观结构。此外,通过其他一些改善措施,如透水模板布等技术措施,也可以有效避免高性能混凝土的早期裂缝、沙眼等表面缺陷,同时控制混凝土保护层水胶比,以达到提高高性能混凝土整体耐久性的效果。

2.2.3.3 钢筋混凝土构件封闭、涂层

完好的混凝土涂层或封闭层具有阻绝腐蚀性介质与混凝土的接触的特点,从而延长混凝土和钢筋混凝土的寿命。钢筋混凝土构件封闭、涂层作为一种混凝土结构防腐蚀技术,