

Durability Design

of Concrete Structure



刘秉京 编著

混凝土结构耐久性设计



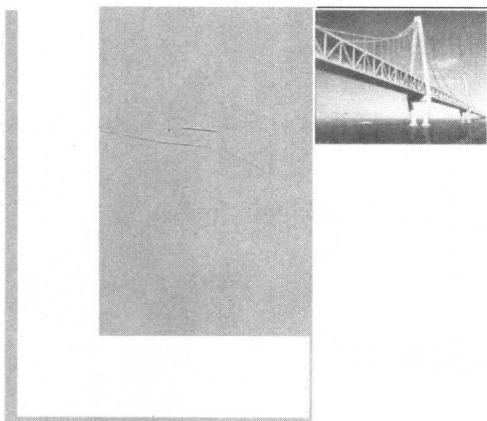
人民交通出版社

China Communications Press



刘秉京 编著

混凝土结构耐久性设计



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

本书主要研究混凝土耐久性和结构使用寿命设计,全面讨论了氯盐环境下钢筋混凝土结构的耐久性问题。全书包括四部分:混凝土耐久性、氯盐环境钢筋混凝土耐久性设计、提高混凝土抗锈蚀性能、国内外混凝土结构耐久性设计。本书将有助于我国混凝土结构耐久性设计方面的研究和应用工作。

本书可供混凝土结构耐久性研究、设计及工程施工人员和相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构耐久性设计/刘秉京编著. —北京:人民交通出版社, 2007.1
ISBN 978-7-114-06347-3

I.混... II.刘... III.混凝土结构-耐用性-结构设计 IV.TU370.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 153349 号

书 名: 混凝土结构耐久性设计

著 译 者: 刘秉京

责任编辑: 陈志敏

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店、交通书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×960 1/16

印 张: 26.25

字 数: 435 千

版 次: 2007 年 2 月 第 1 版

印 次: 2007 年 2 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-06347-3

印 数: 0001 - 3000 册

定 价: 45.00 元

(如有印刷、装订质量问题, 由本社负责调换)



21世纪结构工程领域重要著作书系

总序

在过去的几十年乃至未来很长一段时间,我国已经进行并将继续进行着有史以来最大规模的基本建设,其中最引人注目的如大跨度桥梁、大型体育场馆、高层建筑、深埋地下空间结构、大坝结构以及新型结构等等,代表了我国结构工程学科的蓬勃发展和巨大成就。作为土木工程领域中一个重要学科体系,结构工程学科涉及面广、发展迅速、从业人员众多,在21世纪中,为开创具有中国特色、具有国际一流水平的土木工程领域的新纪元,结构工程学科必将在其中起到决定性作用。

与时俱进,一直是结构工程学科的主旋律。

首先是社会需求的变化,随着经济的发展和功能要求的提高,从最初的低层建筑、小型结构,发展到现在的高层建筑、跨河跨海桥梁、大型体育场馆与会展中心、越江隧道、巨型拱坝,这些都为结构工程提供了新的要求和发展契机,正是在大规模基础建设的推动下,结构工程学科取得了巨大进步。

在新世纪里,社会需求必将会对结构工程学科提出新的挑战,学科本身更将在不断创新和满足社会需求中获得进步。从传统的砌体结构、混凝土结构、钢结构,到现在的预应力混凝土结构、大跨空间结构,乃至预应力钢结构、钢—混凝土组合结构,实现了我们以前不能想像的建筑形式,优化了工程技术本身,为我们展现了结构工程学科广泛深入的应用空间。而且随着各个学科的不断深入研究,随着新材



料、新技术、新理论不断发展,各种结构体系还将有新的发展。

21 世纪的结构工程领域,对人才的要求有了更高的标准,专业技术人员应该具备完整的知识结构以适应现代工程科技发展的需要,在工程实践、理论修养和计算能力等方面继续学习新知识、掌握新技术,加强分析问题、解决问题的能力,同时具备较强的创新能力。

科研工作者除了本身的科研与实践工作外,还应该致力于知识传播。因此本书系应该包括老一辈专家的成果和经验总结及新一代中青年专家的创新成就。编著一本好书用以影响一个领域,影响几代人,这也是作为学者的使命和历史责任。

欣闻人民交通出版社将组织出版“21 世纪结构工程领域重要著作书系”,并已经在过去两年中做了许多工作,甚感欣慰。他们的想法总结起来有以下几点:

(1) 面向 21 世纪百年时间,收录这期间结构工程各专业领域中具有较大影响的重要著作,将其做成品牌书系,为专家学者和读者搭建一个写好书读好书的平台。

(2) 面向最广泛的结构工程科研、技术人员及师生,面向工程应用,为科研实践与工程实践服务。

(3) 倡导严谨务实,推动技术应用和学科进步,保证书系中各图书均为各领域研究与实践中的经典图书。

(4) 本书系既包括国内专家的图书,又关注国外本领域重要著作,以达到提高与交流的目的。

这个书系的想法非常好,我相信会在土木工程领域产生重大影响,对结构工程学科的进步起到很大的推动作用,会为广大技术人员提供一批好书,帮助他们在工程实践中继续取得更大的成就。

中国工程院院士 大连理工大学

赵国藩

2003 年 4 月 13 日

前言

应用高性能混凝土可使结构的耐久性得到很大提高，但由高性能混凝土建成高性能混凝土结构还需要依靠精细施工来实现。国内外经验表明，混凝土对环境作用的抗力不够只是一个方面，施工质量差则是混凝土结构耐久性不良的主要原因之一。挪威的工程经验表明，做好工程结构的施工，海洋严酷环境下的混凝土结构耐久性比陆上混凝土要好，其原因是增加了保护层厚度、应用了优质混凝土、具有良好的质量保证体系和严格的质量控制措施，从而保证了高性能混凝土的质量，得以建成高性能的混凝土结构。

多种环境侵蚀会损害混凝土耐久性，但其中最主要的是钢筋锈蚀引起的混凝土开裂、剥落，钢筋断面减小，粘结力丧失，最终导致使混凝土结构破坏，缩短使用寿命。钢筋锈蚀现象中最多最严重的是由氯盐引起的钢筋锈蚀，可使结构不能使用或需重新修复，造成巨大的经济损失。

海工建筑物和公路桥梁常因氯盐引起钢筋锈蚀而使结构遭到破坏，我国东南沿海的海港码头建成 10 年即有部分构件开始锈蚀开裂，虽然混凝土材料选择、组成设计和结构施工都在规范的要求下进行，但没有保证耐久性。

各行业有关混凝土规范都提出了耐久性要求，例如规定了最大水灰比、最少水泥用量、保护层厚度等，遵守这些相关规定，可使混凝土的耐久性得到一定程度的改善，但是在使用环境下能够“耐久”多长时间，能够安全使用多少年则没有明确提出。

由多次工程失败的教训认识到，提高初建费用、完善保护措施、减少修复费用是最经济的结构设计，从而使工程经验和耐久性研究进展到一个新阶段——使用寿命设计。

无论是氯盐引起的钢筋锈蚀、碳化引起的锈蚀,还是硫酸盐侵蚀或冻融破坏,都是侵蚀离子或物质经过表层侵入混凝土,积聚到一定浓度引起腐蚀发生。而钢筋外层有足够的厚度,混凝土有好的抗力就可以延缓离子的侵入,保证结构的耐久性。因此,有足够厚度的优质混凝土保护层是保证结构有预期使用寿命的基础。

如果把环境中影响混凝土耐久性的物理作用和化学反应视作一种破坏力,那么混凝土结构在环境荷载作用下逐渐劣化,失去其使用性能,甚至对结构安全构成危害。虽然结构设计保证有足够的承载能力,但最终结构是因为耐久性不良而受到破坏,这说明在结构设计的同时需要做好耐久性设计。例如临界浓度的氯离子侵入到钢筋而使钢筋锈蚀,锈蚀发展导致混凝土开裂剥落,如果知道海洋环境的氯荷载、侵入速度、锈蚀速度,知道混凝土的锈蚀抗力,就可根据保护层厚度计算出结构混凝土的使用年限。

现阶段的使用寿命设计具有不确定性,为保证结构的耐久性,需要做大量的工程调查和试验,需要对结构实时检验测定影响其使用寿命的各个参数,修正使用寿命设计,及时维护与修复以保证结构达到设计的使用寿命。

本书主要讨论氯盐环境下钢筋混凝土结构的耐久性,共分四个部分;

第一部分介绍了外界环境引起的混凝土耐久性问题,如抗冻性、硫酸盐侵蚀、碳化引起的钢筋锈蚀,同时简单地讨论了传输过程。在大型混凝土工程中碱集料反应已经引起了广泛的注意。基础、桥梁工程中常遇到较大尺寸的混凝土结构,水泥用量较多,混凝土温度较高,本书也讨论了滞后钙矾石生长引起的膨胀危害。

第二部分详细、深入地讨论了氯盐引起的钢筋锈蚀。氯离子对混凝土的侵入是一个复杂的过程,有表面吸收、渗透、抽吸、扩散等,但一般结构是经表层吸收后在较长时间内经过扩散侵入到保护层内部的。氯离子在混凝土中传输的同时产生结合,混凝土成分与水化产物结合,吸附氯离子,延缓氯离子的侵入,推迟其在钢筋处到达临界浓度的时间,即延缓了钢筋开始锈蚀的时间。临界氯离子是一个范围,不是一个数值,本章介绍了氯盐环境下钢筋混凝土结构的耐久性并初步提出了使用寿命设计。由于影响使用寿命的因素和环境作用较为复杂,尚难明确判定,因此使用寿命设计具有不确定性,需要继续完善。

第三部分介绍了当今提高混凝土性能抵抗氯盐侵蚀的一些技术。采用高性能混凝土和控制渗透性模板衬里可以大大提高混凝土抗氯离子侵入的性能,阻锈剂可以

保护阳极、提高临界氯离子浓度或保护阴极和阳极、提高抗氯盐腐蚀的能力。许多体积较大的混凝土结构常因存在温度梯度而产生裂缝，避免或减少混凝土早龄期开裂，对于提高混凝土耐久性十分必要。本书还介绍了自密实混凝土，优质自密实混凝土可以减少人为失误对质量的损害。

第四部分摘译了欧盟的“混凝土耐久性设计与再设计”（Duracrete）及其应用实例，同时介绍了国内外几座跨海大桥为保证 100 年使用寿命的混凝土耐久性技术。

本书部分内容是中交集团和中交集团桥隧重点实验室的研究成果，同时本书引用了大量的参考文献，谨此对这些文献的作者表示感谢。

刘秉京

2006 年 7 月

目 录

第一部分 混凝土耐久性

第 1 章 混凝土的传输性质	3
1.1 孔隙与传输过程	3
1.2 影响传输的因素	7
参考文献	10
第 2 章 抗冻性	11
参考文献	18
第 3 章 碱-集料反应	19
参考文献	23
第 4 章 滞后钙矾石生成	24
4.1 DEF 反应机理	24
4.2 DEF 试验	26
4.3 温度界限	32
参考文献	33
第 5 章 碳化引起的钢筋锈蚀	34
5.1 碳化及影响因素	34
5.2 使用寿命估算	39
5.3 碳化和氯离子的共同作用	42
参考文献	44

第二部分 氯盐环境钢筋混凝土耐久性设计

第 6 章 氯盐引起的锈蚀	47
---------------------	----



6.1 锈蚀机理	47
6.2 影响因素	50
6.3 碱含量对混凝土化学环境和钢筋锈蚀的影响	54
参考文献	58
第7章 氯离子在混凝土中的扩散	59
7.1 氯离子的侵入	59
7.2 龄期影响	66
7.3 水灰比	69
7.4 粉煤灰、矿渣和集料	72
7.5 干湿循环对氯盐侵入的影响	79
7.6 裂缝	84
7.7 海洋环境的暴露试验	94
7.8 除冰盐环境公路暴露试验	107
7.9 测定扩散系数的试验方法	115
参考文献	117
第8章 混凝土结合氯离子的性能	121
8.1 拌和时引入的氯离子	122
8.2 外界氯离子侵入	133
8.3 结合对氯离子扩散和结构使用寿命的影响	147
8.4 暴露试验与工程调查	151
参考文献	156
第9章 临界氯离子浓度	159
9.1 引起钢筋开始锈蚀的氯离子浓度	159
9.2 影响因素	164
9.3 波特兰水泥协会的试验	179
9.4 有关氯离子临界值的规定	188
9.5 标准与规范	188
参考文献	192
第10章 表面氯离子浓度	194
参考文献	200
第11章 氯盐环境钢筋混凝土结构使用寿命	201

参考文献	214
第 12 章 概率性能基础的使用寿命设计	215
参考文献	225
第三部分 提高混凝土抗锈蚀性能	
第 13 章 高性能混凝土	229
13.1 高性能混凝土的定义	230
13.2 高效减水剂	232
13.3 辅助胶凝材料	235
13.4 中交集团的试验	241
参考文献	249
第 14 章 阻锈剂	251
14.1 概述	251
14.2 亚硝酸钙	254
14.3 MCI	258
14.4 其他	264
参考文献	268
第 15 章 控制渗透性模板衬里	269
参考文献	275
第 16 章 防止混凝土早龄期热开裂	276
16.1 低热混凝土	276
16.2 温度-应力试验仪	278
16.3 中港桥隧实验室的试验	283
16.4 温度控制	290
参考文献	294
第 17 章 自收缩 (自干燥)	295
17.1 概述	295
17.2 欧盟 ConLife 的试验	302
17.3 孔隙相对湿度的影响	306
17.4 养护方法和收缩减低剂	309
参考文献	312

第 18 章 自密实混凝土	314
18.1 概述	314
18.2 中港桥隧实验室的试验	317
18.3 收缩、徐变和弹性模量	319
18.4 氯离子扩散系数	323
参考文献	325

第四部分 国内外混凝土结构耐久性设计

第 19 章 几座大桥的混凝土技术	329
19.1 大贝尔特工程	329
19.2 厄勒海峡大桥与隧道	345
19.3 加拿大联盟桥	354
19.4 杭州湾跨海大桥混凝土结构耐久性方案	361
参考文献	364
第 20 章 耐久性设计与再设计 (摘译自 Duracrete)	366
第 21 章 荷兰西谢尔德隧道使用寿命设计	398
参考文献	403

Contents

Preface

Part 1 Durability of Concrete

Chapter 1 Transport Properties of Concrete	3
1.1 Voids and Transport Process	3
1.2 Factors Influencing Transport	7
Chapter 2 Frost Resistance of Concrete	11
Chapter 3 Alkali-Aggregate Reaction	19
Chapter 4 Delayed Ettringite Formation	24
4.1 Mechanism of DEF	24
4.2 Testing DEF	26
4.3 Temperature Limits	32
Chapter 5 Carbonation-Induced Corrosion	34
5.1 Carbonation of Concrete and Factors Influencing Carbonation	34
5.2 Service Life Estimates	39
5.3 Synergetic Effects of Carbonation and Chlorides	42

Part 2 Durability Design of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides

Chapter 6 Chloride-Induced Corrosion	47
6.1 Mechanism of Corrosion	47
6.2 Factors Affecting Chloride Corrosion	50
6.3 Effects of Alkali Content on Corrosion	54
Chapter 7 Chloride Diffusion in Concrete	59
7.1 Chloride Ingress	59
7.2 Influence of Age	66
7.3 Water to Binder Ratio	69
7.4 Fly Ash, Slag, Silica Fume and Aggregate	72
7.5 Effects of Cyclic Wetting and Drying on Chloride Ingress	79



7.6	Influence of Crack on Chloride Ingress	84
7.7	Exposure Tests under Marine Environment	94
7.8	Field Exposure in Road Chloride Environment	107
7.9	Test Method for Determining Chloride Diffusion	115
Chapter 8	Chloride Binding Capacity of Concrete	121
8.1	Chloride Introduced Through Mix Ingredients	122
8.2	Chloride Enter Concrete From Outside Sources	133
8.3	Effect of Chloride Binding on Service Life Predictions	147
8.4	Exposure Tests and Structure Inspection	151
Chapter 9	Chloride Threshold Values	159
9.1	Chloride Concentration for Corrosion Initiation	159
9.2	Factors Affecting Chloride Threshold	164
9.3	The Tests of PCA	179
9.4	Chloride Threshold and Chloride Limits in Related Codes	188
9.5	Standard and Norm	188
Chapter 10	Surface Chloride Concentration	194
Chapter 11	Service Life of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides	201
Chapter 12	Probabilistic, Performance-Based Service Life Design of Concrete Structures	215

Part 3 Protecting Reinforcing Steel From Chloride Corrosion

Chapter 13	High-Performance Concrete	229
13.1	Definition	230
13.2	Superplasticizers	232
13.3	Supplementary Cementitious Materials	235
13.4	The Tests of CCCG	241
Chapter 14	Corrosion-Inhibiting Admixture	251
14.1	Introduction	251
14.2	Calcium Nitrite Admixture	254
14.3	MCI	258
14.4	Others	264

Chapter 15	Controlled Permeability Formwork	269
Chapter 16	Avoidance of Early Age Thermal Cracking in Concrete Structure	276
16.1	Low Heat Concrete	276
16.2	Temperature-Stress Testing Machine	278
16.3	The Tests of Key Laboratory of Bridge and Tunnel CCCG	283
16.4	Temperature Control	290
Chapter 17	Autogenous Shrinkage	295
17.1	Introduction	295
17.2	The Tests of CONLife Project	302
17.3	Influence of the Relative Humidity	306
17.4	Curing Regime and Shrinkage Reducing Admixture	309
Chapter 18	Self-Compacting Concrete	314
18.1	Introduction	314
18.2	The Tests of Key Laboratory of Bridge and Tunnel CCCG	317
18.3	Shrinkage, Creep and Static Elastic Modulus	319
18.4	Chloride Diffusion Coefficients	323
Part 4	Durability Design of Concrete Structure in Domestic and International	
Chapter 19	Concrete Technology of Some Great Bridges	329
19.1	The Great Belt Link	329
19.2	Concrete for the Oresund Bridge and Tunnel	345
19.3	Confederation Bridge	354
19.4	Hangzhou bay Bridge	361
Chapter 20	General Guidelines for Durability Design and Redesign (Partial Translation)	366
Chapter 21	New Approach to Service Life Design of Concrete Structures (Partial Translation)	398

第一部分

混凝土耐久性

耐久性是指混凝土抵御环境作用的能力，是结构混凝土在使用环境中的性能表现。耐久性优良、好或不好，没有明确的定义，没有数量界限。耐久性研究逐步提出了结构使用寿命预测，才有了量的概念。

混凝土随时间有许多种形式的劣化，最常见的是混凝土中的钢筋锈蚀，其他如寒冷气候的冻融破坏、土壤中的硫酸盐侵蚀，以及由于混凝土成分的内部膨胀导致破坏，通常这种膨胀是由于反应产物的吸水所致。劣化基本上可以分为化学、物理和电化性质劣化的劣化。混凝土中的钢筋锈蚀是一种电化过程。化学侵蚀包括物质的溶解和混凝土成分与侵蚀物质之间的化学反应，如碱-集料反应、滞后钙矾石生成等。冻融作用属物理性质的侵蚀，许多劣化过程同时包含了物理作用和化学侵蚀作用。

侵蚀作用引起混凝土劣化，侵蚀性离子通过保护层侵入混凝土，保护层混凝土性质和保护层厚度是保证混凝土结构耐久性最重要的关键因素。保护层混凝土性质受到胶凝材料品种、水胶比、水化程度等的影响。混凝土的孔隙体系和传输性质直接影响混凝土的耐久性，例如氯离子通过孔隙溶液在浓度差的作用下向混凝土内部扩散，扩散系数是氯离子在混凝土内传输速度的指标，环境中的氯离子浓度、扩散系数和临界浓度的氯离子到达钢筋构成侵蚀荷载，使混凝土结构因钢筋锈蚀失效。扩散系数小可以延缓氯离子的侵入，而扩散系数小且足够厚的保护层混凝土又是保证使用寿命的结构抗力。

