

混凝土结构 耐久性设计与应用

邢 锋 编著

GB/T 50082-2009 GB/T 50476-2008 GB 50010-2010
GB 50164-2011 JGJ/T 193-2009 CCES 01-2004
ECS 220:2007 JTG D62-2004 JTG/T B07-01-2006
JTT 275-2000 EN 206-1:2000 JTT 275-2000
ECS 220:2007 JTG D62-2004 JTG/T B07-01-2006
50164164-2011 JGJ/T 193-2009 CCES 01-2004
50050082-2009 GB/T 50476-2008
50010010-2010 JTG D62-2004 JTG/T B07-01-2006
JTT 275-2000 中国建筑工程出版社 GB 50010-2010
GB 50010-2010 GB/T 50476-2008
JTG/T B07-01-2006 JTT 275-2000

混凝土结构耐久性设计与应用

邢 锋 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土结构耐久性设计与应用/邢锋编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011.9

ISBN 978-7-112-13243-0

I. ①混… II. ①邢… III. ①混凝土结构-耐用性-结构设计
IV. ①TU370.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 093451 号

本书围绕现行混凝土耐久性相关规范的内容展开, 汇集了混凝土耐久性领域的最新研究成果和最新技术。针对实际应用的需要, 本书以工程应用为目标, 结合现行规范和工程实践案例, 融入先进的土木工程使用寿命 (再) 设计理论框架 (PRSLD: Performance and Reliability Based Service Life Design), 分别从机理研究、材料性能、结构设计、施工技术、检测评估、维修加固、工程应用等几个层次对混凝土结构的耐久性进行系统性剖析和论述, 以帮助工程业主、技术和管理人员理解、掌握并在实际工作中自觉运用耐久性设计理论与技术, 保障混凝土结构服役的可靠性, 延长其使用寿命。同时, 本书对未列入规范、处于发展中的新技术和某些特殊条件下的混凝土结构耐久性问题的机理、设计、检测和加固等方法也进行了简要介绍; 对工程应用中提出的大量疑难问题也作了简要释义, 以供工程技术人员参考应用。

本书既是混凝土耐久性相关规范的配套读本, 又是混凝土结构设计、施工、检测和加固技术的工具书, 可供混凝土结构工程科研、设计、施工、监理、质量监督、检测、咨询等相关人员及高校土建专业师生参考使用。

责任编辑: 何玮珂

责任设计: 赵明霞

责任校对: 陈晶晶 赵颖

混凝土结构耐久性设计与应用

邢 锋 编著

*

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: 21½ 字数: 520 千字

2011 年 8 月第一版 2011 年 8 月第一次印刷

定价: 49.00 元

ISBN 978-7-112-13243-0

(20669)

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)

本书编写人员组成

编 著 者 邢 锋

主 审 韩宁旭

编者单位 深圳大学

深圳市土木工程耐久性重点实验室

编写成员 邢 锋 王卫仑 王险峰 隋莉莉 丁 铸

李大望 董必钦 罗启灵 丁小波 陆 晗

序

混凝土是当今世界上应用最为广泛的建筑材料。混凝土结构因性能劣化而导致的安全性和适用性的危害，与早期人们较少关注其耐久性，未做出合理预期密切相关。由于分布于世界范围内的混凝土材料组成成分多样化，种类繁多的侵蚀作用覆加到结构上，造成了混凝土结构劣化发生机制的复杂性。结构性能随时间的劣化机制与控制成为现代混凝土耐久性问题及其研究的主要特征。

混凝土结构耐久性问题需要人们用全新的视角审视。科研人员从不断发生的混凝土结构腐蚀劣化所导致的结构突然失效的惨痛代价中强烈意识到，必须深化混凝土结构耐久性基础研究，从整体化角度合理设计混凝土结构以保证系统的服役可靠性。通过开展对钢筋混凝土结构耐久性的研究，一方面能对已有的建筑结构进行科学的耐久性评定和剩余寿命预测；另一方面也可对新建工程项目进行耐久性设计与研究，揭示影响结构寿命的内部与外部因素，从而提高工程的设计水平和施工质量，确保混凝土结构寿命全过程的正常工作。

《混凝土结构耐久性设计与应用》一书以材料性能为基础，工程应用为目标，结合规范和最新工程实践经验，融入先进的土木工程使用寿命（再）设计理论框架（PRSLD: Performance and Reliability Based Service Life Design），分别从机理研究、材料性能、结构设计、施工技术、检测评估、结构加固等几个层次对混凝土结构的耐久性进行系统性论述。这本论著是深圳市土木工程耐久性重点实验室众多科研人员长期从事混凝土结构耐久性研究与应用的智慧结晶。编写组成员在学科带头人、实验室主任邢锋教授的带领下，通过对包括国家自然科学基金杰出青年基金项目在内的十数个国家级项目的研究成果的凝练与提升，形成了滨海重大混凝土结构服役寿命保障应用理论的工作构架和研究思路，掌握了滨海混凝土基础设施可靠度分析、劣化识别与控制的基本方法，利用参与的多个滨海重大土木工程项目积累了大量的现场监测、检测数据。本书内容丰富、体系完整、同时兼备系统而创新的理论概括和翔实的工程实践经验，不仅是最新科研成果的展示，更是一本可作为大专院校师生、科技人员及工程技术人员参考的高水平专业读物。

确保混凝土结构的服役可靠性具有重大的社会、经济意义。希望本书的出版除对混凝土结构耐久性最新科研成果起到展示、总结作用外，同时能为我国混凝土结构耐久性研究起到积极的推动作用。

孫偉
2011.4.21

前 言

混凝土结构的耐久性、安全性和适用性并列构成了结构可靠性保障的基本范畴。传统的混凝土结构可靠性设计着重于安全性和适用性条件的满足，与耐久性关联的时变因素的考量主要针对荷载效应，而结构性能的时间衰变则被隐化。

传统的混凝土结构设计方法通常高估结构的服役可靠性和使用寿命。在严重腐蚀环境下，这种高估偏差会导致难以承受的社会经济后果：包括滨海重要基础设施和关系国计民生的建筑物与构筑物在内的重大土木工程的性能劣化广泛显现，大量的混凝土结构过早地面临大规模的检测评估、维修加固甚至被迫提前拆除。

近些年来，混凝土结构耐久性问题受到了世界各国政府、专业技术人员的高度关注，混凝土耐久性设计理论和应用技术取得了长足发展。我国正处于大规模的基本设施建造时期，促成工程业主、技术和管理人员理解并自觉运用耐久性设计理论与技术，对于保障混凝土结构服役可靠性、延长其使用寿命至关重要。随着社会的进步，全寿命周期成本管理的重要性逐渐为人们接受，以性能和可靠度理论为基础的设计理念日趋成熟，其应用逐渐扩大，将传统的结构设计 with 耐久性设计集成为一个更为合理的设计框架具有现实的必要性和可行性。渐进形成的土木工程使用寿命（再）设计理论框架（PRSLD: Performance and Reliability Based Service Life Design）为此制定了一种较好的设计模式。

本书共分7章，围绕 PRSLD 框架展开。从混凝土结构劣化性能、耐久性设计、施工控制、检测鉴定、维修加固等涉及结构全寿命周期的各个阶段进行了阐释，在此基础上，列举了新建混凝土工程及既有混凝土工程耐久性设计与应用的实例。

第1章 混凝土结构耐久性概述 主要综述了当前混凝土结构耐久性的现状和重要性，阐释了 PRSLD 理论框架的基本环节和要点。

第2章 混凝土结构性能劣化机理 描述了混凝土材料组成和微观结构特点与缺陷，介绍了物理和化学环境作用对硬化混凝土基体的结构损伤原理。

第3章 混凝土结构耐久性设计 介绍了建筑结构、道路桥涵、海港工程等多部最新规范的主要内容；介绍了确定混凝土结构耐久性的主要环节与步骤，阐述了各现行规范有关耐久性设计的规定，作为内容提升，进一步介绍了半概率及全概率的使用寿命设计方法。

第4章 混凝土结构耐久性施工质量控制 强调了原材料、生产施工、混凝土保护层、裂缝和验收等方面对于提高产品质量、降低生产不定性、确保获得设计期望的抗力水平的重要性，简述了混凝土工程施工质量验收方法与标准。

第5章 混凝土结构耐久性检测评估 描述了耐久性检测涉及的环境作用调查分析、结构几何参数与外观损伤检查评定、混凝土材料力学与耐久性能的通用测试手段以及混凝土结构劣化状况的定量检测方法等，以及结构剩余寿命预测的确定性方法的基本过程。

第6章 混凝土结构耐久性维修加固 描述了混凝土结构耐久性维修加固基本原则、

程序和方法,给出了混凝土结构维修加固的基本要求、设计计算原则以及维修加固的基本工作程序,介绍了目前一些先进的耐久性修复方法。

第7章 混凝土结构耐久性工程应用 从“设计”、“检测与评估”和“维修加固”三个角度介绍了保证新建和既有混凝土结构使用寿命的耐久性技术应用实例。

附录部分 主要性能参数的试验方法 重点介绍在耐久性设计与应用中,不同劣化环境下混凝土结构耐久性保障策略所涉及的材料性能参数的获取方法。

本书力图将耐久性的理念贯穿于混凝土结构耐久性的设计、评估、修复、加固补强等各个环节,可作为土木工程专业本科生、研究生以及从事混凝土结构设计科技人员、施工技术管理人员学习教材或参考书。

在本书付诸出版之际,首先要感谢孙伟院士对我们的关心和帮助并为本书作序;感谢荷兰混凝土专家、深圳大学客座教授韩宁旭博士在本书撰写过程中对书稿结构的把握、对书稿内容的建议及对耐久性技术上的指导;对本书所引用文献的作者表示衷心的感谢。感谢深圳大学学术出版基金的资助。最后,对深圳市土木工程耐久性重点实验室(深圳大学)在本书编撰过程中所提供的大力协助与人力物力方面的支持致以诚挚的谢意。

本书由邢锋负责组织分工编写,各章节的主要编著者为:第1章,李大望、董必钦;第2章,丁铸、邢锋;第3章,隋莉莉、王卫仑、邢锋;第4章,王卫仑、罗启灵;第5章,邢锋、王险峰、陆晗;第6章,王险峰、王卫仑、隋莉莉;第7章,邢锋、王卫仑、丁小波;附录A~附录L,董必钦、陆晗。全书由董必钦、王险峰、陆晗、丁小波、罗启灵、崔宏志、龙武剑、张鸣等校对编排。

混凝土结构耐久性研究任重道远,我们决心以更具“耐久性”的工作精神面对持续不断的挑战。同时,殷切希望各位读者对本书在所难免的错误和疏漏批评指正,共同为提高混凝土结构可靠性和社会的可持续发展作出贡献。

目 录

第 1 章 混凝土结构耐久性概述	1
1.1 混凝土结构的耐久性问题	1
1.2 混凝土耐久性研究的国内外概况	2
1.3 混凝土结构耐久性的研究内容	5
本章参考文献	11
第 2 章 混凝土结构性能劣化机理	13
2.1 硬化混凝土的组成结构与缺陷.....	13
2.1.1 硬化水泥混凝土的组成结构	14
2.1.2 混凝土中的结构缺陷	17
2.1.3 荷载作用下的混凝土体积变化与破坏	19
2.2 环境作用对混凝土的结构损伤.....	21
2.2.1 对混凝土造成损伤的物理作用	21
2.2.2 化学侵蚀对混凝土的损伤.....	28
2.2.3 碱骨料反应引起的混凝土损伤	32
2.3 混凝土中钢筋的锈蚀.....	33
2.3.1 钢筋锈蚀的类型与机理	33
2.3.2 混凝土中性化（碳化）诱导的钢筋锈蚀	35
2.3.3 氯盐环境下的钢筋混凝土的性能劣化	37
2.3.4 海砂混凝土的耐久性问题.....	41
2.4 多因素共同作用下混凝土的应力腐蚀.....	46
2.4.1 混凝土结构的应力腐蚀	46
2.4.2 氯离子作用下混凝土的应力腐蚀	46
2.4.3 硫酸盐溶液作用下混凝土的应力腐蚀	49
2.4.4 二氧化碳作用（碳化）下混凝土的应力腐蚀	50
2.4.5 冻融等因素作用下混凝土的应力腐蚀问题.....	50
本章参考文献	51
第 3 章 混凝土结构耐久性设计	53
3.1 耐久性设计基本原则与内容.....	53
3.1.1 混凝土结构耐久性设计存在的问题	53
3.1.2 混凝土结构耐久性设计的实质	54
3.1.3 结构设计使用年限	56
3.1.4 结构设计使用年限与设计基准期的区别	58
3.1.5 耐久性设计原则	59

3.2 规范设计法之一：与环境作用有关的规范规定	62
3.2.1 《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010 的有关规定	62
3.2.2 《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476—2008 的有关规定	62
3.2.3 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62—2004 的 有关规定	66
3.2.4 《公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTG/T B07—01—2006 的 有关规定	67
3.2.5 《铁路混凝土结构耐久性设计暂行规定》铁建设〔2005〕157 号的有关规定	69
3.2.6 《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTJ 275—2000 的有关规定	71
3.3 规范设计方法之二：与混凝土技术有关的规范规定	71
3.4 规范设计方法之三：与混凝土结构设计有关的规范规定	79
3.4.1 保护层厚度的规范规定	79
3.4.2 裂缝宽度的规范规定	83
3.4.3 有关问题讨论	87
3.5 规范设计法之四：与预应力混凝土结构有关的规范规定	108
3.5.1 预应力混凝土耐久性失效的原因	109
3.5.2 保障耐久性的有效措施	111
3.5.3 《混凝土结构耐久性设计规范》的设计规定	114
3.6 基于性能与可靠度的混凝土结构使用寿命设计	117
3.6.1 概述	117
3.6.2 混凝土结构使用寿命极限状态	119
3.6.3 半概率使用寿命设计法——分项系数法	122
3.6.4 全概率极限状态设计	128
本章参考文献	129
第4章 混凝土结构耐久性施工质量控制	133
4.1 混凝土结构耐久性施工质量控制概述	133
4.2 原材料控制	135
4.2.1 胶凝材料（水泥、矿物掺合料）	135
4.2.2 骨料	139
4.2.3 混凝土用水	143
4.2.4 混凝土外加剂	144
4.3 混凝土质量控制	145
4.3.1 混凝土质量的初步控制	146
4.3.2 常规混凝土质量的生产控制	149
4.3.3 耐久性混凝土质量的生产控制	156
4.3.4 混凝土质量合格控制	160
4.4 保护层厚度质量控制	161
4.5 混凝土裂缝控制	162
4.5.1 水泥水化热产生的裂缝（温度裂缝）	163

4.5.2	施工缝处理不当引起的裂缝	164
4.5.3	早期收缩裂缝	164
4.5.4	干燥收缩裂缝	164
4.5.5	环境温度变化产生的裂缝	165
4.5.6	化学反应引起的裂缝	165
4.5.7	沉陷裂缝	165
4.6	施工质量控制新方法	165
4.6.1	简化权重成熟度法预测现场混凝土早期强度	165
4.6.2	Consensor [®] 系统预测混凝土早期强度	168
4.6.3	TEM 双电极电阻法预测混凝土 RCM 氯离子扩散系数	169
4.7	施工质量验收方法与标准	171
4.7.1	混凝土施工质量验收方法	171
4.7.2	相关施工质量验收标准	171
	本章参考文献	174
第 5 章	混凝土结构耐久性检测评估	176
5.1	混凝土结构耐久性评估的目的及意义	176
5.2	混凝土结构耐久性检测评估的基本程序和内容	177
5.3	混凝土结构的耐久性检测	178
5.3.1	环境条件的调查	178
5.3.2	外观损伤状况的检查	179
5.3.3	混凝土结构几何参数的测定	179
5.3.4	混凝土抗压强度	179
5.3.5	混凝土渗透性	183
5.3.6	钢筋位置、保护层厚度、钢筋直径	185
5.3.7	钢筋力学性能	186
5.3.8	混凝土构件钢筋锈蚀状况检测	186
5.3.9	碳化深度	188
5.3.10	混凝土氯离子含量及分布情况	188
5.3.11	碱骨料反应检测	189
5.4	耐久性评价方法及评价标准	191
5.4.1	耐久性评定的基本准则	192
5.4.2	大气环境下钢筋锈蚀耐久性评定	194
5.4.3	氯盐侵蚀环境下钢筋锈蚀耐久性评定	201
5.4.4	冻融环境混凝土耐久性评定	207
5.4.5	碱骨料反应与杂散电流腐蚀评定	209
5.4.6	剩余寿命预测	211
	本章参考文献	214
第 6 章	混凝土结构耐久性维修加固	216
6.1	混凝土结构耐久性维修加固相关标准规范	216

6.2	维修加固的基本原则和程序	216
6.2.1	结构维修加固的基本要求	216
6.2.2	结构加固的设计原则	218
6.2.3	结构加固的工作程序	219
6.3	维修加固的方法及选择	220
6.3.1	混凝土加固结构的受力特征	220
6.3.2	维修加固的方法及选择	221
6.4	混凝土结构的维修加固技术	223
6.4.1	增大截面加固法	223
6.4.2	置换混凝土加固法	225
6.4.3	外粘型钢加固法	226
6.4.4	粘贴钢板加固法	228
6.4.5	纤维复合材加固法	231
6.4.6	绕丝加固法	236
6.4.7	钢丝绳网片—聚合物砂浆外加层加固法	237
6.5	重点用于耐久性修复的措施	241
6.5.1	植筋技术（特殊钢筋）	241
6.5.2	混凝土表面涂层和防腐蚀面层	245
6.5.3	阴极保护	247
6.5.4	其他电化学措施	250
6.5.5	钢筋阻锈剂	251
6.5.6	裂缝修补技术	256
6.6	硅烷保护层应用技术实例	259
6.6.1	概述	259
6.6.2	材料	259
6.6.3	材料贮存	259
6.6.4	提交	259
6.6.5	喷涂设备	260
6.6.6	表面处理（新建结构）	260
6.6.7	对现有或修改后的结构表面处理	260
6.6.8	硅烷应用于钢筋混凝土结构	260
6.6.9	染料示踪法	261
6.6.10	性能要求	261
6.6.11	预喷涂试验	261
6.6.12	浸渍喷涂期间及此后的测试	264
6.6.13	保证	264
6.6.14	材料制造厂方的监理	264
	本章参考文献	264

第 7 章 混凝土结构耐久性工程应用	266
7.1 新建混凝土结构耐久性设计与应用案例	266
7.1.1 台湾彰化某工业区车辆测试中心	266
7.1.2 深圳万科中心工程	268
7.1.3 荷兰绿心隧道	277
7.2 既有混凝土结构耐久性检测与评估案例	279
7.2.1 某大厦耐久性评估	279
7.2.2 某电站耐久性评估	285
7.3 混凝土结构耐久性维修加固工程实例	296
7.3.1 工程概况	296
7.3.2 环境作用	296
7.3.3 修复策略	297
7.3.4 实施措施	299
本章参考文献	301
附录 A 混凝土抗冻试验——慢冻法	303
附录 B 混凝土抗冻试验——快冻法	306
附录 C 混凝土早期抗裂试验方法	309
附录 D 混凝土受压徐变试验方法	311
附录 E 混凝土碳化试验方法	315
附录 F 混凝土中钢筋锈蚀试验方法	317
附录 G 混凝土抗压疲劳变形试验方法	319
附录 H 混凝土抗硫酸盐侵蚀试验方法	321
附录 J 混凝土碱骨料反应试验方法	323
附录 K 混凝土动弹性模量试验方法	325
附录 L 快速氯离子迁移系数法 (RCM 法)	327

第 1 章 混凝土结构耐久性概述

1.1 混凝土结构的耐久性问题

现代混凝土由胶凝性材料、水、骨料和外加剂拌合而成。由于具有良好的抗水性、可塑性和取材制作的相对便捷性，因而从年消耗体量、地域范围和适用的结构类别多样性诸方面，混凝土都堪称当今应用最为广泛的建筑材料。尽管人们尝试开发混凝土的外饰用途，但其更多地被作为一种结构基料加以使用。混凝土结构因在土木工程中的广泛应用，被赋予了极为特殊和显著的社会与经济属性，确保混凝土结构的服役可靠性具有重大的社会经济意义。

结构的可靠性应综合体现安全性、适用性和耐久性，要求结构的设计、施工、使用以及基于检测评估的维护加固措施科学合理。结构安全性和适用性的范畴界定较为明晰，由强度、变形和整体稳定性多方面的限制性要求加以体现，而耐久性概念的定义则存在异议或延伸空间。耐久性通常作为保证结构安全性和适用性的一种时效性能，在结构设计中不作专门考虑。但由于严重侵蚀性作用下混凝土结构劣化的加速与形态异化，结构性能随时间的劣化机制与控制体现了现代混凝土结构耐久性问题及其研究的主要特征。

混凝土结构包括素混凝土及其与钢材组合使用的结构形式，其中最具代表性的是钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构。钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构综合利用了混凝土较好的抗压能力和钢筋优良的抗拉性能，有效减少了结构体量并提高了系统安全性。预应力混凝土结构更以预设压应力以抵消工作过程中产生的拉应力来控制裂缝的产生和发展进而有效改善了结构的适用性。然而，结构整体性能的发挥应以混凝土和钢筋协同工作、保证两者良好的粘结性能为前提。

混凝土结构的时变劣化具有必然性。分布于世界范围内的混凝土组分取材与搭配的种类多样化，种类繁多的侵蚀作用覆加到民用与公共建筑、港工码头、跨海越江大桥、市政和地下工程等结构上，造成了混凝土结构劣化发生机制的复杂性。

混凝土结构劣化的原因可归并为物理和化学作用两大类。磨损、冲蚀等对结构表面混凝土的劣化属于物理作用；而化学侵蚀作用大多与水有关。长期以来，人们在混凝土结构浇筑成型和劣化调查研究中对水的作用产生了正与反的双重认识。首先，水是混凝土的基本组分之一，拌制混凝土必须添加适量的液态水以保证混凝土工程的施工质量并影响混凝土的后期性能；水泥与水经水化形成的碱性胶体在预埋钢筋的混凝土结构中能够保护钢筋免遭锈蚀。另一方面，水又是硬化混凝土劣化的主要介质和推手。水胶比影响各龄期混凝土强度并在混凝土内部形成不同形貌的孔隙结构和微裂缝展布，气态和液态水可通过这些孔隙结构和微裂缝通道向混凝土内部加速渗透，水及溶解其中的多种酸性侵蚀性介质通常会加速混凝土基体的损伤劣化；由于具有良好的抗水性能，大坝和堤防工程多采用混凝土结构，但在拉应力作用下，硬化混凝土呈现明显的脆性性质。为了保证结构的抗拉安全性

和整体稳定性，这些水工结构的断面必须具有足够的尺寸，由此产生了大体积混凝土结构设计和施工必须面对的内部水化所致的温度变化及潜在的严重收缩开裂问题；土壤和地下水中常存在的硫酸盐等腐蚀性介质可导致结构基础混凝土的膨胀与开裂，恶化了混凝土基础的力学性能、增大了渗透性进而加速了混凝土结构劣化过程；严寒地区混凝土中饱和水的季节性冻融变化会引起混凝土的开裂和表面剥落，而除冰盐的大量泼洒与水、气的交互作用将严重损害道路与桥梁结构的安全性和适用性，显著降低结构的耐久性能；混凝土骨料中某些活性矿物成分与碱性氢氧化物发生的碱骨料反应可产生引起混凝土强度和弹性模量损失的膨胀与开裂，形成网状裂纹、封闭和碎片状裂缝或结构的宏观错位，在富含水分的情况下其破坏作用被显化。

需要继续追寻水分对混凝土结构劣化的影响。由水气引入的过量氯离子会引起结构中的钢筋严重锈蚀——即便与冻融循环、碱骨料反应和硫酸盐侵蚀等重要诱因相比，钢筋锈蚀也被认为是混凝土结构劣化的最主要动因。滨海和近海岸钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构的腐蚀劣化为此展示了典型生动的客观场景：在外部催生环境作用驱动下，携带氯离子的水和气以渗透和扩散等方式通过混凝土微孔结构等内部缺陷和结构宏观损伤积聚。伴随着混凝土碳化，氯化物的存在不仅会破坏钢筋表面的钝化膜，也会降低混凝土的电阻率；当钢筋附近积聚的氯离子含量达到相应的阈值时将引起钢筋锈蚀：这不仅直接削减了钢筋有效承载面积，而且严重的锈蚀物膨胀将造成钢筋与混凝土粘结衰减失效、混凝土保护层开裂甚至脱落。与外渗氯离子的迁入方式不同，海砂或误用海水拌制的混凝土中则可同时具有内掺型氯离子，而后的腐蚀劣化发生条件一旦形成，其危害性往往更为严重。

劣化对于混凝土结构安全性和适用性的危害与早期人们较少关注其耐久性而未做出合理预期密切相关，劣化结构在强风、地震作用下的破坏常常导致灾难性后果。巨大的人民生命财产损失案例几乎遍布世界各大洲、发达和发展中国家，涉及所有结构类型和腐蚀环境。

需要用全新的视角审视混凝土结构耐久性问题。值得庆幸的是，世界各国政府、专业技术人员已就其重要性达成全面共识。人们从不断发生的混凝土结构腐蚀劣化所致的突然失效和高昂的维修加固成本等惨痛代价中强烈意识到，应该深化混凝土结构耐久性基础研究，从整体化角度合理设计混凝土结构以保证系统的服役可靠性。

1.2 混凝土耐久性研究的国内外概况

至今为止，混凝土结构一直是最主要的土木工程结构形式之一。但是，除了偶发的工程事故和偶然灾害以外，大量的钢筋混凝土结构由于各种各样的耐久性原因而提前失效，而达不到预定的服役年限。混凝土的耐久性问题主要是指混凝土材料（或结构）因受环境侵蚀作用而产生的损伤破坏。随着混凝土结构的更广泛应用，其使用环境日益多样化，工业污染日益加剧，受环境侵蚀的危害性也日益增加，混凝土结构的耐久性成为困扰土建基础设施工程的世界性问题。

国内外统计表明，混凝土结构的耐久性病害导致的损失是巨大的，而且耐久性问题会越来越严重。美国混凝土基建工程总价为6万亿美元，但今后每年用于维修和重建的费用

高达 3 千亿美元。1988 年美国材料顾问委员会提交的报告表明大约 253000 座混凝土桥梁的桥面板, 其中部分仅使用不到 20 年, 就已经有不同程度的破坏, 而且每年还将增加 35000 座。英格兰中部环形快车道上 11 座混凝土高架桥, 最初建造费 2800 万英镑, 到 1989 年因为维修而耗资 4500 万英镑, 是造价的 1.6 倍, 估计以后 15 年还要耗资 1.2 亿英镑, 累计接近最初造价的 6 倍, 结构耐久性造成的损失大大超过了人们的估计。许多海湾国家沿海地区建筑遭受腐蚀破坏迅速, 混凝土结构服役寿命一般都非常短。

我国的混凝土结构耐久性问题同样十分严重。据 1986 年国家统计局和建设部普查统计, 当时有城镇房屋约 46.8 亿 m^2 , 由于建筑标准低, 施工质量差, 劣化速度快, 估计半数需要分期分批进行鉴定、修缮或加固, 其中有 10 亿~12 亿 m^2 急待加固改造才能正常使用。据 1995 年统计, 当时在役的 60 亿 m^2 城镇民用建筑中, 有 30 亿 m^2 需要加固, 其中 10 亿 m^2 急需修缮处理。据 2000 年全国公路普查, 截至 2000 年年底, 公路危桥 9597 座, 达 323451 延米。公路桥梁每年实际需要维修费 38 亿元。全国铁路桥梁中, 据 1994 年铁路秋季检查统计, 当时有 6137 座存在不同程度劣化损害, 占当年铁路桥梁总数 (约 33600 座) 的 18.8%, 所需修补加固的费用约 4 亿元。到 2002 年年底, 铁路桥梁总数约 4 万多座, 其中混凝土桥梁约占 93%, 有碱骨料反应现象的约 3 千多万孔, 占 2.5%; 碳化深度在 20mm 以上的约 5 千多孔。2003 年我国混凝土基础设施的腐蚀损失已达到 1000 亿元。恶劣的腐蚀环境致使许多建于 20 世纪 90 年代的钢筋混凝土结构在远未达到期望使用寿命前, 过早地进入大规模维修、拆除阶段。

沉重的代价使人们认识到混凝土结构耐久性研究及应用的重要性, 国外学者曾用“五倍定律”描述, 即设计阶段对钢筋防护方面节省 1 美元, 那么就意味着: 发现钢筋腐蚀时采取措施将追加维修费 5 美元; 混凝土表面顺筋开裂时采取措施将追加维修费 25 美元; 严重破坏时采取措施将追加 125 美元。因此, 钢筋混凝土结构耐久性问题是一个十分重要也是迫切需要加以解决的问题。通过开展对钢筋混凝土结构耐久性的研究, 一方面能对已有的建筑结构物进行科学的耐久性评定和剩余寿命预测, 以选择对其正确的处理方法; 另一方面也可对新建工程项目进行耐久性设计与研究, 揭示影响结构寿命的内部与外部因素, 从而提高工程的设计水平和施工质量, 确保混凝土结构生命全过程的正常工作。

对混凝土结构耐久性问题的研究最初是从沿海建筑物开始的, 研究方法主要是采取调查与自然环境下进行长期试验。1902 年著名的工程师 A. P. 舒良琴柯和 B. H. 察尔诺姆斯基调查了前苏联各港口码头和欧洲的港口码头的钢筋混凝土构筑物, 对混凝土密实性的影响有了初步的认识。1925 年美国的密勒对在硫酸盐含量极高的土壤内的建筑物进行长期试验, 其目的是为了获得 25 年、50 年以至更长时间的数据; 1934~1964 年比利时的坎皮斯对混凝土在海水中的耐久性进行了试验以及 O. 戈尔夫对海上码头建筑物的混凝土结构耐久性的研究, 初步得出了水泥品种、混凝土配合比和某些生产工艺等因素对混凝土耐久性影响方面的见解。

混凝土结构耐久性大规模、系统性的研究始于 20 世纪 50 年代: 为了解决混凝土保护层较小的薄壁结构中钢筋的防腐和使用高强度的钢材制作高效预应力问题, 前苏联首先开始对钢筋的腐蚀问题进行了研究, B. M. 莫斯克文等做了卓有成效的研究工作, 并出版了相关专著, 并在研究成果的基础上制定了建筑结构防腐标准 (CH 262—63、CH 262—67) 等, 为钢筋混凝土结构耐久性的提高奠定了基础。美国在钢筋混凝土耐久性方面是遭

受过惨重损失的，主要是桥梁遭受道路化冰盐的氯离子腐蚀，为了解决冬季交通问题，使用了大量的化冰盐，由于要大量修复各种受损的桥梁，美国在20世纪60年代开始展开了广泛和深入的研究。此后，混凝土耐久性及其相关领域的核心问题均受到世界各国的重视，尤其在欧洲、美国、日本等发达地区。Dhir等人通过试验研究过水灰比、水泥品种对混凝土碳化深度的影响；Papadakis等人通过 CO_2 在混凝土中的反应动力学方程来建立碳化速度与反应物质浓度的关系；Y. Masuda研究了 Cl^- 对混凝土的渗透机理，并考虑了混凝土表面 Cl^- 的随机性；H. K. Cook, W. J. Mc Coy, P. C. Peterson等研究了化冰盐对桥面的渗透破坏；Gjorv, Page、Gonzalez等人研究过混凝土氧扩散过程及其在钢筋锈蚀过程中的作用；Bazant Z. P建立了海洋环境下钢筋锈蚀量的模型；Mehta等人研究了水泥成分对 Cl^- 环境下钢筋锈蚀的影响；Mangat等人对混凝土中 Cl^- 含量与时间的关系进行了系统研究。

在众多混凝土界科学家和工程师的共同努力下，人们对混凝土耐久性问题的认识大大加深；从20世纪60年代开始，混凝土结构的耐久性问题是许多国际学术机构或国际学术会议讨论的重要课题之一。国际材料与结构试验学会（RILEM）于1960年专门成立了“混凝土中钢筋锈蚀”技术委员会（12-CRC），旨在推动混凝土结构耐久性研究的进展；并于1978年以后，每隔三年举行一次建筑材料与构件耐久性（DBMC）的国际会议。除此之外，各国已举办过多次有关混凝土碳化及钢筋锈蚀的学术讨论会，如ACI第222届委员会于1973年召开了混凝土中金属腐蚀问题讨论会，美国试验与材料学会（ASTM）召开过多次有关钢筋腐蚀的专题讨论会，1976年召开了氯化物腐蚀问题的讨论会，1990年召开了混凝土中钢筋腐蚀速率总问题研讨会。2001年国际桥梁与结构协会（IABSE）代表CIB、ECCS、FIB、RILEM等学术组织在马耳他岛召开了“安全性、风险性和可靠性——工程趋势”的国际学术会议。几届国际水泥化学会议都报道了混凝土碳化研究的进展，并有关于混凝土碳化的论文发表。

在取得系列研究成果的基础上，各国或地区开始颁布相应的规范规程：美国ACI437委员会在1991年“既有混凝土房屋抗力评估”的报告中，提出了检测实验的详细方法和步骤。1992年欧洲混凝土委员会颁布了《耐久性混凝土结构设计指南》，同期美国ACI201委员会编制了《耐久性混凝土指南》，日本1986年开始陆续颁发了《建筑物耐久性系列规程》，并于1989年制定了《混凝土结构耐久性设计准则（试行）》；英国混凝土结构规范（BS8110）及标准施工规范（CP110）中对耐久性作了明确的规定。2001年亚洲混凝土模式规范委员会公布了《亚洲混凝土模式规范（ACMC2001）》，提出了基于性能的设计方法。

我国对钢筋混凝土耐久性的研究开始于20世纪60年代，主要集中于混凝土的碳化和钢筋的锈蚀。较大规模的研究在20世纪80年代，中国土木工程学会于1982年、1983年连续召开了两次全国性的耐久性会议，为随后混凝土结构规范的科学修订奠定了基础，推动了耐久性研究工作的进一步进展。较系统的研究是在20世纪90年代，1991年全国成立了混凝土结构耐久性学组，1994年国家科委组织的国家基础性研究重大项目（攀登计划）“重大土木与水利工程安全性与耐久性的基础研究”也取得了大量研究成果，是我国在钢筋混凝土耐久性方面进行的最为系统性的研究，在这期间，还培养了一批从事钢筋混凝土耐久性研究的专业人才。近年来召开的混凝土材料科学和技术的学术会议，混凝土耐

久性都是重点议题。2001 年中国工程院土木水利与建筑工程学部发起混凝土结构耐久性科技论坛,到 2006 年已连续举办了 5 届。可以说,重视混凝土耐久性已成为共识,渗透到工程建设的各个阶段和层次,这对我国混凝土耐久性的研究和应用及混凝土技术的可持续发展而言是迈出的坚实而有力的一步。

混凝土的耐久性贯穿混凝土结构设计、材料选择、施工和运行管理等全过程。研究混凝土的耐久性不能脱离材料本质、结构形式、应力状态、环境条件(包括大环境和局部环境)。目前对钢筋混凝土结构的耐久性研究一般从环境层次、材料层次、构件层次和结构层次四个方面来进行,而对材料层次和构件层次的研究比较多些。材料层次的研究是混凝土结构耐久性研究的基础部分,包括对混凝土和钢筋两种材料的研究,其中混凝土材料的耐久性又分为混凝土碳化、氯离子侵蚀、冻融破坏、碱骨料反应等。

事实上,人们在研究钢筋混凝土耐久性问题时,通常都是先从寻找各种影响因素开始,然后研究这些因素的作用机理,建立模型,再进一步研究耐久性问题对研究对象性能的影响,最终建立结构耐久性的评估理论。因此,从研究路径出发,应可划分为影响因素、机理研究、性能研究、评估理论研究四个层次,从影响因素到评估理论是由低层次向高层次发展,在各层次内又有相互影响、相互依存的关系,高层次的每一元素受到低层次多个元素的综合影响。这样的划分更能反映各层次的复杂性关系。目前而言,混凝土耐久性领域的重点问题仍集中在如下几个方面:混凝土碳化机理及影响因素、氯离子(Cl^-)扩散机理及影响因素、钢筋锈蚀机理及影响因素、材料与结构性能关联性、评估加固理论与对策等方面。其中,美国 ACBM 新千年的水泥混凝土研究计划中,选择的两个主题之一是使用寿命的预测与性能设计,其中包括提高混凝土耐久性等多项研究课题;德国在混凝土研究计划上明确将高性能混凝土的高强度、高耐久性与高工作性列为今后混凝土研究的主攻方向。我国虽未看到明确的有关研究计划,但经过了 20 世纪 90 年代较大规模的系统研究,取得了一批研究成果,特别是培养了一批耐久性方面的研究人才,为今后耐久性的研究与成果的应用打下了较坚实的基础,而耐久性是一个需要长期努力的问题,其研究成果的应用需要长期的工程实践的考验,目前我国在耐久性研究成果的应用、检测新技术与新材料开发方面等仍落后于发达国家,可预计在 21 世纪,钢筋混凝土耐久性仍是我国在工程结构的研究与应用方面的一个重要课题。

因此,本书以材料性能为基础,工程应用为目标,结合规范和工程实践,融入先进的土木工程使用寿命(再)设计理论框架(PRSLD: Performance and Reliability Based Service Life Design),分别从机理研究、材料性能、结构设计、施工技术、检测评估、结构加固等几个层次对混凝土结构的耐久性进行系统性论述,这几个层次由低到高发展,各个层次又相互依存、相互影响。

1.3 混凝土结构耐久性的研究内容

混凝土结构耐久性的研究内容和成果涵盖基础理论及其工程应用技术两个方面。通过工程现场测试、室内试验和分析形成的理论研究成果是工程应用技术的基础和前提,而工程实践是理论研究的目标并为理论研究命题的科学化凝练和体系化发展提供方向和动力。

由于涉及材料、构件和结构系统的微观与宏观机制、作用时间跨度大、现实中又存在