



氯盐环境下 混凝土结构耐久性 理论与设计方法

金伟良 袁迎曙 卫 军 王海龙 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

氯盐环境下混凝土结构耐久性 理论与设计方法

金伟良 袁迎曙 卫 军 王海龙 著

科学出版社

北 京

序 一

2010年10月,浙江大学金伟良教授来访大连,谈到了他正在编写的海洋环境混凝土结构耐久性方面的书稿事宜,我非常关注书稿的编写进展和内容。之后,金教授将书稿的电子文档发给了我,使我有机会在该书出版以前先睹为快。我认真地阅读了全部书稿,深为我国科技工作者在混凝土结构耐久性方面取得卓有成效的研究成果而感到高兴,欣然同意为该书作序。

由于影响混凝土结构耐久性的因素众多,作用机制复杂,就目前所取得的研究成果而言,要真正实现混凝土结构生命全过程的耐久性设计和寿命预测等要求尚有一定的距离。究其原因,主要在于传统的研究往往将混凝土结构的耐久性失效归属于材料问题,而忽视了混凝土结构耐久性所应具有“结构”属性。而《氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法》一书,则在材料层次的研究成果基础上,全面考虑研究对象的“结构”特点,从材料工程、结构工程和非均质材料力学等学科的交叉领域,对混凝土结构耐久性退化机制、试验模拟、设计方法、动态评估和剩余寿命预测等方面进行了深入研究,解决了混凝土结构耐久性设计、评估和寿命预测中的关键理论问题,将理论分析、实验研究和检/监测方法融合为一体,建立与时间效应相一致的混凝土结构耐久性全生命周期研究体系,这对于完善混凝土结构耐久性理论体系具有重要的作用,对指导实际混凝土工程设计、施工和维护也具有重要的应用价值。

《氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法》研究内容非常全面和深入,既涵盖了混凝土结构全寿命过程的基础理论,又涉及了混凝土结构耐久性设计与评估的方法和理论体系;研究工作有深度,有独到见解,如该书提出的多重环境时间相似理论与相似的试验方法,为混凝土结构耐久性研究提供了一种崭新的研究思路;提出的混凝土结构耐久性设计区划,可为工程结构设计提供新的途径;还有将结构的安全可靠与经济、可持续发展等联系在一起,提出了全寿命的混凝土结构设计三大核心指标:结构的使用寿命指标、全寿命的可靠性能指标和全寿命经济指标,为混凝土结构全寿命设计理论的建立奠定了基础。该书是目前国内外研究氯盐环境下混凝土结构耐久性的最为深入而全面的学术专著之一,具有极高的学术水平和应用价值。

赵国藩

中国工程院院士

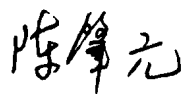
2011年1月10日

序 二

混凝土结构是世界上用途最广的结构形式,近几十年,众多混凝土工程向海洋环境发展并需要有更长的使用寿命,同时也面临耐久性不足的问题,急需解决,氯盐侵入混凝土对钢筋的严重腐蚀尤为突出。浙江大学金伟良教授和他的合著者,从2005年起承担国家自然科学基金重点项目“氯盐侵蚀环境的混凝土结构耐久性设计与评估基础理论研究(50538070)”,经过多年努力,已取得丰硕成果,得到国内同行的高度评价。《氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法》详细介绍了这一重点项目的具体研究内容以及他们圆满完成这一项目的研究成果。

该书针对海洋氯盐环境条件下混凝土结构的耐久性,提出了一种新的多重环境时间相似理论(METS),为混凝土结构的耐久性试验与设计、评估提供了可行的依据。书中深入探讨了氯离子在混凝土中的多机制输运机制;研究了混凝土中钢筋的锈蚀行为过程以及锈后钢筋混凝土各类构件(压、弯、剪等)的力学性能;建立了混凝土结构耐久性健康监视系统和评价标准;最后结合工程应用,给出了混凝土结构耐久性动态评估与寿命预测方法,提出了基于全寿命的混凝土结构耐久性设计理论。这些都为进一步认识氯盐环境下混凝土结构的耐久性作出了可贵贡献。

该书内容丰富,论点新颖,研究水平处于国际同类研究的前沿。我有幸能提前阅读原稿,得益良多。该书的出版发行,应能推进海洋环境中混凝土结构耐久性的深入研究,也有助于提高工程技术人员对混凝土结构耐久性的认识。



中国工程院院士

2010年12月20日

前 言

混凝土结构耐久性是指混凝土结构及其构件在可预见的工作环境及材料内部因素的作用下,在预期的使用年限内抵抗大气影响、化学侵蚀和其他劣化过程中,不需要花费大量资金维修,也能保持其安全性、适用性和外观要求的功能。由于混凝土结构材料自身和使用环境的特点,混凝土结构不可避免地存在耐久性问题,由此造成的直接和间接损失之大,已远远超出人们的预料,这给发达国家和发展中国家均已带来严重的财政负担。而处于基本建设和维修高峰期的中国,由混凝土结构耐久性失效而引发的资源、能源和环境保护问题也日益突出。因此,如果不充分认识混凝土结构耐久性问题的重要性,就有悖于我国可持续发展和环境保护的基本国策,制约我国经济整体健康快速的发展。

本书是作者完成的国家自然科学基金重点项目“氯盐侵蚀环境的混凝土结构耐久性设计与评估基础理论研究(50538070)”的工作总结。全书的研究以海洋气候环境和氯盐侵蚀环境为背景,以人工环境模拟试验加速混凝土耐久性劣化为手段,以混凝土结构“受到氯盐侵蚀—混凝土中钢筋锈蚀—钢筋锈蚀层形成及锈胀—混凝土开裂—纵裂开展—混凝土构件性能退化—混凝土结构整体性能退化”为研究主线,重点研究氯盐侵蚀环境条件下多因素对混凝土结构的作用机制,建立混凝土构件抗力失效的演变规律和结构性能退化模型,确定混凝土结构耐久性性能指标和耐久性失效极限状态,建立混凝土结构耐久性设计理论和混凝土结构耐久性评估与寿命预测体系。

全书共 11 章:

第 1 章:从环境、材料、构件和结构 4 个层次论述了混凝土结构耐久性研究的现状和进展,指出混凝土结构耐久性失效是自然环境、使用环境及结构材料内部因素物理与化学作用和结构受力作用的共同结果,混凝土结构耐久性的研究正逐步由局部分析向整体分析、由定性分析向定量分析发展。

第 2 章:介绍了多重环境时间相似理论(METS)的基本模型,并在此模型的基础上建立了多重环境的相似试验方法,采用人工气候环境方法对混凝土构件中的钢筋进行了加速锈蚀,研究了气候环境下混凝土微环境响应理论与规律。

第 3 章:分析了氯离子在混凝土内的传输动力学问题,分别讨论了饱和状态下和非饱和状态下氯离子在混凝土内输运机制,研究了电渗对氯离子输运的影响,建立了氯离子在混凝土内的多机制输运模型。

第 4 章:研究了钢筋锈蚀速率的时变现象与机制,讨论了钢筋锈蚀速率的时变过程模式,给出了钢筋坑蚀发展与演变规律,研究了锈蚀钢筋力学性能退化规律并给出了锈蚀钢筋名义屈服强度计算模型。

第5章:研究了基于钢筋锈蚀的混凝土与钢筋界面区演变机制以及钢筋锈蚀层分布和生长规律,给出了钢筋锈蚀层和锈胀力分布模型,通过试验研究了不同环境下钢筋锈蚀物力学性能,分析了混凝土保护层锈胀开裂全过程。

第6章:对混凝土材料/结构的耐久劣化的损伤全过程进行了研究。提出了基于双参数和三参数统一强度理论的混凝土损伤破坏准则,并对混凝土开裂前的细观损伤进行了分析,讨论了混凝土保护层损伤规律,对混凝土保护层锈胀过程的应力分布与演变过程进行了研究,最后,建立了混凝土锈胀裂缝宽度与钢筋锈蚀率关系模型。

第7章:通过试验研究了锈蚀钢筋与混凝土黏结性能退化规律;采用“电渗—干湿循环—恒电流通电”方法对钢筋混凝土抗弯梁、抗剪梁以及大小偏心受压柱进行了加速锈蚀试验,分别给出了计算锈蚀钢筋混凝土梁抗弯、抗剪以及大小偏心受压柱的承载力的退化模型。研究了预应力钢筋混凝土梁的锈后性能退化规律。

第8章:给出了耐久性环境区划标准的定义,分析了耐久性环境区划标准指标,收集了影响结构耐久性的环境因素基础数据,确定了结构标准内部条件,给出了适用于区划的结构耐久性极限状态及可靠指标,在全国范围内对混凝土结构耐久性环境进行了区域划分。

第9章:进行了混凝土模拟液中钢筋微电池腐蚀实验、混凝土结构内外金属宏电池腐蚀趋势实验、混凝土中钢筋电解腐蚀行为的实验。建立了混凝土结构耐久性监测原理与系统,并在实际结构中进行了耐久性监测系统设计与安装。

第10章:建立了路径概率分析法(PPM)模型,给出了对服役混凝土结构的耐久性进行动态评估的方法;研究了混凝土结构耐久性的层次分析评估法,给出了基于可靠度理论混凝土结构使用寿命的预测模型、基于多重环境时间相似的氯盐侵蚀使用寿命预计以及基于 METS 理论与贝叶斯方法的混凝土结构耐久寿命预测。

第11章:研究了混凝土结构全寿命设计理论框架,分别对工程结构的使用寿命指标、工程结构的全寿命可靠性能指标、工程结构的全寿命经济指标进行了分析。

参加本项目研究的单位是浙江大学、中国矿业大学和中南大学,其中浙江大学是牵头负责单位。

本书编写分工如下:第1章为金伟良,第2章为袁迎曙(2.3、2.4节)、金伟良(2.1、2.2节),第3章为金伟良(3.1~3.4节)、董荣珍(3.5节),第4章为袁迎曙(4.1~4.3节)、夏晋(4.4、4.5节),第5章为袁迎曙(5.1、5.2节)、赵羽习(5.3、5.4节),第6章为卫军(6.1~6.4节)、王海龙(6.5节),第7章为金伟良(7.1~7.4节)、袁迎曙(7.5节),第8章为金伟良、吕清芳、武海荣,第9章为干伟忠、王海龙,第10章为金伟良、王晓舟、朱平华,第11章为金伟良、胡琦忠、王海龙。全书由金伟良、王海龙和夏晋负责统稿。在本书的编写过程中,浙江大学的研究生吕清芳、金立兵、张奕、夏晋、延永东、武海荣、许晨、李志远等,中国矿业大学的姬永生、耿欧、李果、李富民等,中南大学的研究生王青、曾艳霞等协助完成了本书相关章节的编排并提出了许多宝贵的意见,在此表示感谢。

感谢国家自然科学基金委员会等单位对本书研究工作的资助和国家科学技术学术著作出版基金对本书出版的资助。

由于混凝土结构耐久性问题的复杂性,目前还有许多问题需要进一步完善,加之作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作者

2010年10月

主要符号说明

本书所用符号若无特殊说明,均以本说明为准:

A_s	受拉区纵筋截面积	f	钢筋混凝土梁跨中挠度
A'_s	受压区纵筋截面积	f_c	混凝土轴心抗压强度
$A_{s,0}$	钢筋的原始截面面积	f_{cm}	混凝土抗折强度
A'_{sc}	受压区纵筋锈蚀后截面积	f_{cu}	混凝土立方体抗压强度
ΔA_s	锈蚀钢筋的锈蚀截面积	f_t	混凝土抗拉强度
$B(\cdot)$	累积二项分布函数	f_u	钢筋极限抗拉强度
$b(z)$	距截面形心 z 处的截面的 宽度	f_y	钢筋屈服强度
C	混凝土中二氧化碳浓度	g	重力加速度
C_t	混凝土中总的氯离子浓度	h	混凝土试件截面高度
C_b	混凝土中结合氯离子浓度	h_0	混凝土有效截面高度
C_f	混凝土中自由氯离子浓度	I	腐蚀电流
C_0	内部氯离子初始浓度	i	腐蚀电流密度
C_s	混凝土表面的氯离子浓度	k_p	混凝土抗渗系数
C_{cr}	导致钢筋锈蚀的临界氯离子 浓度	l_b	钢筋与混凝土黏结长度
c	混凝土保护层厚度	M	钢筋混凝土梁截面弯矩
c_0	溶液中的氯离子浓度	M_c	压区混凝土和受压钢筋对形 心轴的弯矩
D_{28}	28d 龄期氯离子的表观扩散 系数	M_u	钢筋混凝土梁抗弯强度
D_a	氯离子表观氯离子扩散系数	M_{u0}	未锈钢筋混凝土梁抗弯强度
D_{nssm}	非稳态电迁移氯离子扩散系数	M_{Fe}	铁的摩尔质量,取 56g/mol
d	钢筋直径	N	钢筋所受拉力
d_v	箍筋直径	N_c	受压区混凝土和受压钢筋共 同承受的压力
Δd_s	钢筋的锈蚀深度	N_s	钢筋所受拉力
E	电场强度	n	铁锈膨胀率
E_c	混凝土弹性模量	P	钢筋拉伸试验中钢筋所受拉力
E_s	受拉钢筋弹性模量	P_u	钢筋拉伸试验中钢筋所受最 大拉力
E_r	铁锈的名义弹性模量	$P_{u,0}$	完好钢筋达到极限强度时拉力
E'_s	受压纵筋弹性模量	$P_{u,c}$	锈蚀钢筋达到极限强度时拉力
$\operatorname{erf}(z)$	误差函数	P_y	钢筋拉伸试验中钢筋屈服时 所受拉力
F	法拉第常量,取 96500A·s		

$P_{y,0}$	完好钢筋达到屈服强度时拉力	β	可靠指标
$P_{y,c}$	锈蚀钢筋达到屈服强度时拉力	γ	结构重要性系数
T_0	参考温度	γ'	锈蚀钢筋混凝土梁抗弯强度 综合折减系数
T_a	环境年平均温度	δ	钢筋锈层厚度
T_L	结构设计使用年限	δ_1	混凝土受锈胀力作用的变形
t	时间	δ_2	铁锈受锈胀力作用的变形
V_{u0}	完好未锈蚀抗剪梁极限抗剪 承载力	ϵ'_s	受压纵筋应变
V_{uc}	锈蚀抗剪梁极限抗剪承载力	θ	水分和混凝土基体的接触角
ν_r	铁锈的名义泊松比	κ_b	相对极限抗弯承载力
W_p	混凝土抗渗等级	κ_c	相对极限抗压承载力
w	横向裂缝宽度	κ_p	相对极限黏结强度
w_z	纵向裂缝宽度	$\kappa_{r,u}$	锈蚀钢筋的相对极限强度
w_c	锈胀裂缝宽度	$\kappa_{r,y}$	锈蚀钢筋的相对屈服强度
$w_{c,average}$	锈胀裂缝平均裂缝宽度	κ_s	相对极限抗剪承载力
$w_{c,eq}$	锈胀裂缝等效宽度	λ	碳化指数
$w_{c,max}$	锈胀裂缝最大裂缝宽度	η	按钢筋截面质量损失计算的 钢筋锈蚀率
w'_c	钢筋表面锈胀裂缝宽度	η^*	混凝土保护层胀裂时刻的钢 筋锈蚀率
Δw_s	钢筋锈蚀质量损失	ρ_{con}	混凝土密度
X_{CO_2}	碳化深度	ρ_s	钢筋密度
x	位置	ρ_v	配箍率
Z	钢筋混凝土构件功能函数	σ_s	钢筋应力
Z_{Fe}	铁的化合价,取 2	τ	钢筋与混凝土的黏结应力
z_s	受拉钢筋截面中心到截面形 心轴的距离	τ_u	钢筋与混凝土的极限黏结应力
z'_s	受压纵筋中心到截面形心处 的距离	τ_{u0}	未锈钢筋与混凝土的极限黏 结应力
z_t^0	中性轴到混凝土梁截面形心 的距离	τ_u	极限黏结强度
α	碳化速度系数	ϕ	混凝土连通孔隙率

目 录

序一

序二

前言

主要符号说明

第 1 章 绪论	1
1.1 混凝土结构耐久性的研究范围与意义	1
1.2 混凝土结构耐久性研究的简要历史回顾	2
1.3 混凝土结构耐久性研究的主要进展	3
1.4 混凝土结构耐久性研究的关键科学问题与重点方向	13
1.5 本书的主要内容	17
参考文献	17
第 2 章 混凝土结构耐久性的试验方法	25
2.1 多重环境时间相似理论的基本模型	25
2.2 多重环境时间混凝土结构耐久性的相似试验方法	31
2.3 混凝土构件中钢筋加速锈蚀的人工气候环境方法	83
2.4 气候环境下混凝土微环境响应理论与规律	97
参考文献	110
第 3 章 氯离子在混凝土内的多机制输运理论	114
3.1 氯离子在混凝土内的传输动力学分析	114
3.2 饱和状态下氯离子在混凝土内输运机制	122
3.3 非饱和状态下氯离子在混凝土内的输运机制	127
3.4 电渗对氯离子输运的影响研究	147
3.5 氯离子在混凝土内的多机制输运模型	153
参考文献	154
第 4 章 钢筋时变锈蚀速率和力学性能退化	157
4.1 钢筋锈蚀速率的时变现象与机制	157
4.2 钢筋锈蚀速率的时变过程模式	161
4.3 钢筋坑蚀发展与演变规律	164
4.4 锈蚀钢筋力学性能退化规律	173
4.5 锈蚀钢筋名义屈服强度计算模型	188

参考文献	189
第5章 钢筋锈蚀引起混凝土保护层锈裂机制	191
5.1 基于钢筋锈蚀的混凝土与钢筋界面演变规律	191
5.2 钢筋锈蚀物力学性能分析	196
5.3 混凝土保护层锈胀开裂全过程分析	209
5.4 钢筋锈胀力分布模型的深入研究	215
参考文献	218
第6章 混凝土耐久性损伤演变	219
6.1 混凝土材料/结构的损伤	219
6.2 基于双参数和三参数统一强度理论的混凝土损伤破坏准则	224
6.3 混凝土结构的损伤全过程	232
6.4 混凝土开裂前的细观损伤分析	234
6.5 混凝土锈胀裂缝宽度与钢筋锈蚀率关系模型	235
参考文献	238
第7章 混凝土基本构件的结构性能退化	241
7.1 锈蚀钢筋与混凝土黏结性能	243
7.2 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯性能	259
7.3 锈蚀钢筋混凝土梁抗剪性能	275
7.4 锈蚀钢筋混凝土压弯构件性能	286
7.5 预应力钢筋混凝土梁的性能	299
参考文献	319
第8章 混凝土结构耐久性设计区划	323
8.1 耐久性环境区划标准的定义	323
8.2 耐久性环境区划指标分析	327
8.3 影响结构耐久性的环境因素基础数据收集	337
8.4 结构标准内部条件的确定	339
8.5 适用于区划的结构耐久性极限状态及可靠指标	339
8.6 混凝土结构耐久性环境的区域划分	344
参考文献	359
第9章 混凝土结构耐久性健康监测	362
9.1 混凝土模拟孔溶液中钢筋微电池腐蚀实验研究	362
9.2 混凝土结构内金属的宏电池腐蚀表征	370
9.3 混凝土结构中钢筋电解腐蚀行为的实验研究	380
9.4 混凝土结构耐久性监测原理与系统	392

9.5 耐久性检测系统设计与安装	398
参考文献	408
第 10 章 混凝土结构耐久性动态评估与寿命预测	409
10.1 路径概率模拟分析模型	409
10.2 耐久性失效的动态演进模拟	411
10.3 服役混凝土的耐久性动态评估	415
10.4 混凝土结构耐久性的层次分析评估法	430
10.5 基于可靠度的混凝土结构使用寿命预测模型	443
10.6 基于 METS 理论的混凝土结构耐久性寿命预测方法	446
10.7 基于 METS 理论与贝叶斯方法的混凝土结构耐久寿命预测	450
参考文献	461
第 11 章 基于全寿命的混凝土结构耐久性设计理论	464
11.1 混凝土结构全寿命设计理论框架研究	464
11.2 工程结构的使用寿命指标分析	471
11.3 工程结构的全寿命可靠性能指标分析	479
11.4 工程结构的全寿命经济指标分析	497
11.5 工程结构全寿命设计基础优化	513
参考文献	523
后记	527
彩图	

CONTENTS

FORWORD 1

FORWORD 2

PREFACE

SYMBOLS

CHAPTER 1 INTRODUCTION	1
1.1 Scope and Significance for the Durability Research of RC Structure	1
1.2 Review for the Durability Research of RC Structure	2
1.3 Progress for the Durability Research of RC Structure	3
1.4 Key Scientific Issues and Future Research for the Durability Research of RC Structure	13
1.5 Main Content and Frame	17
References	17
CHAPTER 2 TEST METHOD FOR DURABILITY OF RC STRUCTURE	25
2.1 Modeling of the Multiple Environmental Time Similarity (METS) Theory	25
2.2 Multiple Environmental Time Similarity Test Method for Durability of RC Structure	31
2.3 Artificial Climate Test Method for Accelerating Corrosion in RC Members	83
2.4 Micro-environment Response Theory and Law for Concrete in Climatic Environment	97
References	110
CHAPTER 3 MECHANICS OF CHLORIDE TRANSPORTATION IN CONCRETE	114
3.1 Chloride Transport Mechanics in Concrete Structures	114
3.2 Chloride Transport Mechanics in Saturated Concrete	122
3.3 Chloride Transport Mechanics in Unsaturated Concrete	127
3.4 Electro-osmosis's Effect on Chloride Transportation in Concrete	147

3.5	Multi-mechanistic Chloride Transport Model in Concrete	153
	References	154
CHAPTER 4 TIME-VARYING CORROSION RATE AND DETERIORATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE STEEL REINFORCEMENT		
		157
4.1	Time-varying Phenomena and Mechanism of the Corrosion Rate for the Steel Reinforcement	157
4.2	Time-varying Mode of the Corrosion Rate for the Steel Reinforcement	161
4.3	Development and Evolution of the Pitting Corrosion for the Steel Reinforcement	164
4.4	Mechanical Properties Deterioration for the Corroded Steel Reinforcement	173
4.5	Modeling of the Nominal Yield Strength for the Corroded Steel Reinforcement	188
	References	189
CHAPTER 5 CORROSION INDUCED CRACKING MECHANISM		191
5.1	Evolution Law of the Interface between the Concrete and Steel Reinforcement Based on the Corrosion of the Steel Reinforcement	191
5.2	Analysis of the Mechanical Properties of the Steel Corrosion Products	196
5.3	Analysis of the Cracking Progress Induced by Corrosion	209
5.4	Modeling of the Distribution of the Expansion Force Induced by Corrosion	215
	References	218
CHAPTER 6 DURABILITY DAMAGE EVOLUTION OF RC STRUCTURE		219
6.1	Concrete Material and Structural Damage	219
6.2	Unified Strength Theory of the Concrete Damage Criterion Based on Two Parameters and Three Parameters	224
6.3	Damage Process of RC Structure	232
6.4	Microscopic Damage Analysis before Cracking of the Concrete	234
6.5	Relationship between the Concrete Crack Width Induced by Corrosion and the Steel Reinforcement Corroding Ratio	235

References	238
CHAPTER 7 PERFORMANCE DEGRADATION FOR THE BASIC MEMBERS OF THE RC STRUCTURE	241
7.1 Performance of the Bond between the Corroded Steel Reinforcement and Concrete	243
7.2 Flexural Performance of Corroded RC Beams	259
7.3 Shearing Performance of Corroded RC Beams	275
7.4 Performance of Corroded Compression RC Member	286
7.5 Performance of Corroded Prestressed RC Beams	299
References	319
CHAPTER 8 ZONATION FOR DURABILITY DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES	323
8.1 Concept of Durability Environmental Zonation Standard	323
8.2 Analysis of Environmental Factors for Durability Zonation	327
8.3 Data Collection of Environmental Factors Affecting Structural Durability	337
8.4 Determination of Normal Inside Conditions for Structures	339
8.5 Limit States and the Target Reliability Index Compatible with the Zonation	339
8.6 Area Zonation of Environmental Area for Durability of Concrete Structures	344
References	359
CHAPTER 9 DURABILITY HEALTH MONITORING OF RC STRUCTURE	362
9.1 Test of Micro-cell Corrosion in Simulated Pore Solution in Concrete ...	362
9.2 Macro Cell Corrosion Characterization of the Metals in RC Structure ...	370
9.3 Test of Electrolytic Corrosion of Steel Reinforcement in RC Structure	380
9.4 Durability Monitoring Theory and System of RC Structure	392
9.5 Design and Installation for Durability Detection System	398
References	408
CHAPTER 10 DYNAMIC ASSESSMENT AND SERVICE LIFE PREDICTION ON DURABILITY BEHAVIOR OF CONCRETE STRUCTURES	409
10.1 Path Probability Model	409

10.2	Dynamic Routing Simulation of Durability Failure	411
10.3	Dynamic Assessment on Durability of Existing Reinforced Concrete ...	415
10.4	Analytic Hierarchy Process on Durability Behavior of Concrete Structures	430
10.5	Service Life Prediction on Durability Behavior of Concrete Structures Based on Reliability	443
10.6	Service Life Prediction on Durability Behavior of Concrete Structures Based on METS	446
10.7	Service Life Prediction on Durability Behavior of Concrete Structures Based on METS and Bayes Method	450
	References	461
CHAPTER 11 DURABILITY DESIGN THEORY FOR CONCRETE		
	STRUCTURE BASED ON LIFE-CYCLE	464
11.1	Framework of Life-cycle Design for RC Structure	464
11.2	Analysis of Life-cycle Indicators in Engineering Structures	471
11.3	Analysis of Life-cycle Reliability Indicators in Engineering Structures	479
11.4	Analysis of Life-cycle Economic Indicators in Engineering Structures	497
11.5	Life-cycle Optimization Design for Engineering Structures	513
	References	523
	POSTSCRIPT	527
COLOR FIGURES		

第1章 绪 论

1.1 混凝土结构耐久性的研究范围与意义

混凝土结构耐久性是指混凝土结构及其构件在可预见的工作环境及材料内部因素的作用下,在预期的使用年限内抵抗大气影响、化学侵蚀和其他劣化过程中,不需要花费大量资金维修,也能保持其安全性、适用性和外观要求的功能^[1~12]。

此定义实际上包含了三个基本要素^[3]:①环境。结构处于某一特定环境中,并受其侵蚀作用。②功能。结构的耐久性是一个结构的多种功能与使用时间相关联的多维函数空间,单纯地采用其中的一种或几种功能函数来表述结构的耐久性都是不全面的^[3,8]。③经济。结构在正常使用过程(设计要求的自然物理剩余寿命)中不需要大修。定义中的工作环境及材料内部因素的作用指的是物理或化学作用;根据结构的工作环境情况、破坏机制、形态及各行业传统经验,可将混凝土结构的工作环境分成六大类^[12]:①大气环境;②土壤环境;③海洋环境;④受环境水影响的环境;⑤化学物质侵蚀环境;⑥特殊工作环境。同时,结构耐久性是结构的综合性能,既涉及结构的承载能力,又涉及结构的正常使用及维修等,更反映了结构性能随时间的变化,不可简单地把耐久性归入为承载能力状态或正常使用状态^[3,4,8]。而耐久性的经济性则体现在以较小的维修成本达到混凝土结构基本功能的要求。若要求延长结构使用寿命,只需适当的维修成本就可达到目的。显然,本书对混凝土结构耐久性的定义是针对结构设计而言,但从结构的可修复性来说,通过适当的维修可以延缓结构的老化、延长结构的使用寿命,这也是混凝土结构耐久性需要考虑的问题。

混凝土结构产生耐久性失效是由于混凝土或钢筋的材料物理、化学性质及几何尺寸的变化,继而引起混凝土构件外观变化,不能满足正常使用要求,导致承载能力退化,最终影响整个结构的安全^[3,4]。其中,最普通、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、碱集料反应和延缓钙矾石生成^[11~17]。因此,混凝土结构的耐久性失效应考虑以下几个方面^[3]:①结构外观或表面破损已不能满足正常使用或美学要求;②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;③对结构进一步维修在技术上或经济上已经不可行。应当看到,混凝土结构耐久性的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。

从混凝土结构的耐久性的定义、要素和失效等方面来看,混凝土结构耐久性的研究应从环境、材料、构件和结构四个层次上展开^[3],而研究工作则涉及拟建结构的耐久性设计和已建结构的耐久性评估与寿命预测两个方面^[3]。

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”^[8,13],结构耐久