

# 混凝土结构耐久性

# 与寿命预测

Durability and Life Forecast of Reinforced  
Concrete Structure

牛荻涛 著



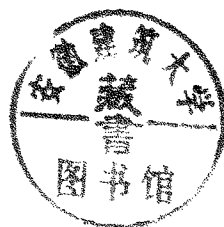
科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 混凝土结构耐久性与寿命预测

Durability and Life Forecast  
of Reinforced Concrete Structure

牛荻涛 著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是作者1992年以来完成的国家“八五”攻关子课题“服役结构抗力衰减模型与可靠性研究”、国家自然科学基金“服役结构可靠性分析与剩余寿命预测”及国家攀登计划(B)“混凝土结构耐久性设计与评估”等项目研究工作的总结。书中系统、深入地论述了一般大气环境混凝土结构耐久性与寿命评估问题,重点介绍了混凝土碳化与混凝土中钢筋锈蚀的评估模型、锈蚀钢筋混凝土构件的结构性能退化与承载力计算方法、现有结构的抗力衰减模型与可靠性分析及基于各种功能要求的使用寿命与剩余寿命评估方法。

本书可供土木工程专业的科学研究人员、工程技术人员、高等院校的教师及研究生、本科生参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

混凝土结构耐久性与寿命预测/牛荻涛著. —北京:科学出版社,2003  
ISBN 7-03-010793-4

I. 混… II. 牛… III. ①混凝土结构-耐久性-研究 ②混凝土结构-寿命-预测-研究 N. TU37

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第071806号

---

策划编辑:刘宝莉/ 文案编辑:孙克玮/ 责任校对:包志虹  
责任印制:钱玉芬/ 封面设计:张 放

**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>

**源海印刷厂** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2003年2月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2003年2月第一次印刷 印张:13¼

印数:1-3 000

字数:261 000

**定价:28.00元**

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

# 序 言

近年来,混凝土结构的耐久性与寿命预测是国际结构工程学科研究的热点问题,受到工程界的普遍关注与重视。混凝土结构广泛应用于工业与民用建筑、道路与桥梁工程、港口工程与水利工程等各种工程结构中。长期以来,人们认为混凝土是一种耐久性能良好的建筑材料,忽视了钢筋混凝土结构的耐久性问题,在设计上,只注重建设阶段的低造价,使得结构的维修加固费用远远高于建设成本。国内外许多工程结构由于耐久性不足,导致结构出现破坏并为此付出了惊人的代价。在我国,服役三四十年的建筑仍占有相当大的比例,这些建筑物在长期的使用过程中,材质老化、结构损伤积累,造成结构性能退化,影响建筑物的安全使用,降低了结构的使用寿命。研究混凝土结构的耐久性与寿命预测,对于防止建筑物倒塌事故的发生,减少经济损失具有十分重要的意义。

从1992年开始,牛荻涛教授与他的研究小组在国家“八五”攻关子课题“服役结构抗力衰减模型与可靠性研究”、国家自然科学基金“服役结构可靠性分析与剩余寿命预测”和国家攀登计划(B)专题“混凝土结构耐久性设计与评估”等的支持下,围绕一般大气环境混凝土结构的耐久性与寿命预测开展了系统深入的研究,取得了丰硕的研究成果,在这一领域做出了可贵的贡献。论著总结了他们近10年在混凝土结构耐久性评估方面的研究成果,同时对国内外的相关最新研究成果也作了简要介绍。

与国内外已出版的相关书籍相比,本书具有以下特点:

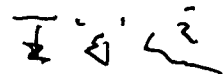
1) 在分析总结近十年来混凝土结构耐久性研究成果基础上,从材料的耐久性入手,系统深入地论述了混凝土结构耐久性评估所涉及的内容,内容广泛、丰富。

2) 既注重理论基础,又切合工程实际应用,有较高的理论价值和实用价值,在很多方面填补了国内外的空白。

3) 有大量的实际工程耐久性调查结果和锈蚀构件的承载力试验分析,有理论模型,又有实际工程验证。

本书涉及领域广泛、内容丰富,有较高的学术价值和工程实用价值,对进一步从事混凝土结构耐久性研究与实际工程耐久性评估有重要参考价值。我衷心祝贺科学出版社出版这本专著,并相信本书的出版将对混凝土结构耐久性领域的研究与应用起到有力的推动作用。

中国工程院院士



2002年10月

## 前 言

长期以来,结构工程领域研究的重点是如何使结构的设计理论与方法更合理,而对现有结构重视不够。在结构设计上,过分追求初始造价最低,而忽视了结构的长期损失,对结构的耐久性考虑不够。目前,我国存在大量的老旧房屋,这些建筑物受当时设计、施工及其他因素的影响,普遍存在着一定程度的先天不足;在结构长期使用过程中,由于材料老化、不利环境(如高温、高湿、腐蚀介质等)的影响以及使用管理不当,给结构造成某种程度的损伤,这种损伤积累必然导致结构性能退化、承载力降低、耐久性降低、寿命缩短,影响结构的安全使用。国内外许多工程结构由于耐久性不足而导致结构出现破坏,并为此付出了惊人的代价。因此,开展混凝土结构的耐久性与寿命预测研究,对于防止建筑物倒塌事故的发生,保障人民生命财产的安全具有十分重要的意义,不仅为现有结构的维修加固决策提供科学依据,也将为混凝土结构的耐久性设计提供科学依据。

自 20 世纪 80 年代末以来,我国已依据《工业建筑可靠性鉴定标准》正式开展现有结构的可靠性检测鉴定工作,并对结构的耐久性问题给予足够的重视,国家科委、自然科学基金委员会设立了多个课题,对混凝土结构耐久性的基础理论进行研究。我们从 1990 年开始,对全国冶金企业的工业建筑与民用建筑进行耐久性调查与可靠性鉴定,在 1992~1995 年承担完成了劳动部主持的国家“八五”科技攻关专题“在用危险建(构)筑物实时监测和评价技术研究”的子课题“服役结构的抗力衰减模型与可靠性研究”的研究工作;1996~1998 年承担并完成了国家自然科学基金项目“服役结构的可靠性分析与剩余寿命预测”的研究工作;1996~1999 年参加完成了国家攀登计划(B)专题“混凝土结构耐久性设计与评估”的研究;1998~2002 年负责编制中国工程建设标准化协会下达的《混凝土结构耐久性评定标准》。经过近 10 年的工作,我们采取理论分析、试验研究与实际工程调查相结合的研究方法,从材料耐久性到结构耐久性、从材料性能退化到结构性能退化、从定性分析到定量计算、从抗力衰减到服役结构的可靠性分析及结构寿命预测等,围绕混凝土结构的耐久性评估进行了较为全面、系统、深入的研究,取得了一系列的研究成果,基本建立了混凝土结构耐久性评估的理论与方法。

本书是对我们近 10 年研究工作与研究成果的总结。本书以结构在其生命周期过程的性能退化为主线,从材料耐久性分析入手,以理论分析、试验研究与实际工程调查相结合,系统深入地论述了一般大气环境混凝土结构的耐久性评估问题。全书共分七章:

第一章:从耐久性对结构的危害和造成的巨大经济损失,论述了混凝土结构耐

久性研究的重要意义,简单分析了结构耐久性损伤的原因与影响因素,给出了一般大气环境混凝土结构耐久性评估的基本框架。

第二章:分析了混凝土碳化的机理和影响因素,介绍了国内外影响混凝土碳化速度的研究成果,对目前已经提出的碳化预测模型进行了分析评述,在此基础上重点论述了预测混凝土碳化深度的实用随机模型和混凝土碳化深度的概率分布与统计参数,最后通过大量实际工程的碳化数据对给出的碳化深度预测模型进行了分析验证。

第三章:简单介绍了混凝土中钢筋锈蚀的机理,全面系统论述了混凝土中钢筋锈蚀量的估计与预测模型。主要包括以下内容:

1) 混凝土中钢筋开始锈蚀条件的建立。分析了混凝土部分碳化区和碳化残量,通过混凝土中钢筋开始锈蚀条件的试验研究、实际工程碳化残量的调查和已有文献资料的综合分析,建立了混凝土碳化残量的计算公式。

2) 混凝土保护层锈胀开裂前的锈蚀量预测。利用腐蚀电化学原理对混凝土中的钢筋锈蚀进行了理论分析,结合试验研究结果与大量实际工程检测结果,建立了保护层锈胀开裂前混凝土中钢筋锈蚀量预测的实用模型,并利用大量实际工程的检测数据进行了分析验证。

3) 混凝土保护层锈胀开裂条件的建立。给出了锈胀开裂的工程定义,通过对目前锈胀开裂时的钢筋锈蚀量计算公式和试验结果的分析比较,建立了混凝土保护层锈胀开裂时的锈蚀深度计算公式。

4) 混凝土保护层锈胀开裂后的锈蚀量估计。介绍了基于锈胀裂缝宽度的锈蚀量估计方法和基于电化学理论分析的预测模型及应用人工神经网络技术估计钢筋锈蚀量的方法。

第四章:分析了钢筋锈蚀对结构构件性能退化的影响,建立了锈蚀构件的承载力计算方法。主要包括以下四个方面的内容:

1) 锈蚀钢筋的力学性能分析。通过锈蚀钢筋的力学性能试验,分析了钢筋锈蚀对钢筋力学性能的影响,建立了锈蚀钢筋的屈服强度和极限强度的计算公式。

2) 锈蚀构件的黏结性能退化。

3) 锈蚀构件的承载力试验。重点介绍了我们做的 10 根实际工程拆换的梁柱承载力试验、6 根长期暴露梁的承载力试验、8 根模拟黏结力丧失梁的承载力试验、20 根快速锈蚀的柱承载力试验,同时,也简单介绍了其他一些试验结果。

4) 分析了锈蚀构件的破坏特征,给出了锈蚀构件承载力计算的原则与基本方法,建立了锈蚀梁的承载力计算模型,并用 50 多个试验数据进行了验证。

第五章:分析了现有结构可靠性的特点,建立了现有结构可靠性的数学模型,提出了现有结构可靠性的简化分析方法;建立了结构的抗力衰减模型,分析了抗力的概率分布和统计参数;提出了现有结构荷载的取值标准和具体方法。以受弯构件为例,对结构的动态可靠性进行了分析。

第六章:对目前的寿命评估准则进行了评述,以结构可靠性理论为基础,提出了结构的碳化耐久年限、混凝土保护层锈胀开裂耐久年限和承载力耐久年限的分析方法。

第七章:工程应用。开展了两个实际工程耐久性检测,并对其进行了适用耐久性评估和安全耐久性评估。

参加相关项目研究工作的主要人员有:王庆霖教授、姚继涛教授、博士研究生徐善华、董振平工程师、王林科工程师。在本书编写过程中,博士研究生徐善华、硕士研究生孙彬帮助完成了计算与插图绘制工作,在此表示感谢。王庆霖教授对本书进行了全面的审阅,提出了许多宝贵的意见与建议,在此表示衷心的感谢。

感谢国家自然科学基金委员会等机构和单位对研究工作的资助。

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进一步完善,由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

# 目 录

序言

前言

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 混凝土结构耐久性损伤的现象 .....	4
1.3 一般大气环境混凝土结构耐久性评估的基本框架 .....	7
参考文献.....	8
<b>第二章 混凝土碳化及其预测模型</b> .....	10
2.1 混凝土碳化机理.....	10
2.2 混凝土碳化的影响因素.....	11
2.3 混凝土碳化深度的预测模型.....	18
2.4 预测混凝土碳化深度的随机模型.....	23
参考文献 .....	32
<b>第三章 混凝土中的钢筋锈蚀及锈蚀量估计</b> .....	34
3.1 混凝土中钢筋锈蚀的机理与条件.....	34
3.2 混凝土中钢筋开始锈蚀时间的确定.....	36
3.3 混凝土保护层锈胀开裂前钢筋锈蚀量的评估模型.....	52
3.4 混凝土保护层锈胀开裂时间的确定.....	74
3.5 锈胀开裂后的钢筋锈蚀量预测.....	84
参考文献 .....	93
<b>第四章 锈蚀构件的承载力试验与计算方法</b> .....	95
4.1 锈蚀钢筋混凝土构件的结构性能退化.....	95
4.2 锈蚀钢筋混凝土梁的承载力试验 .....	105
4.3 锈蚀钢筋混凝土梁的破坏特征分析 .....	118
4.4 锈蚀钢筋混凝土梁的承载力计算方法 .....	119
4.5 锈蚀钢筋混凝土柱的承载力试验 .....	127
参考文献.....	138
<b>第五章 现有结构的可靠性分析</b> .....	139
5.1 现有结构可靠性的数学模型与定义 .....	140
5.2 现有结构可靠性的分析方法 .....	143
5.3 现有结构抗力的随机过程模型 .....	145



5.4	现有结构的荷载模型 .....	152
5.5	现有结构的动态可靠性分析与评定 .....	156
	参考文献 .....	162
<b>第六章</b>	<b>混凝土结构寿命预测与剩余寿命预测</b> .....	<b>164</b>
6.1	混凝土结构寿命评估的准则 .....	164
6.2	混凝土结构使用寿命的预测方法 .....	167
6.3	混凝土结构碳化寿命分析 .....	169
6.4	混凝土结构锈胀开裂寿命分析 .....	173
6.5	混凝土结构承载力寿命分析 .....	179
	参考文献 .....	180
<b>第七章</b>	<b>工程应用实例</b> .....	<b>181</b>
7.1	武汉钢铁公司江心水站适用耐久性评估 .....	181
7.2	福建三明钢厂露天栈桥柱耐久性评估 .....	191

# CONTENTS

## PREFACE

<b>CHAPTER 1 INTRODUCTION</b> .....	1
1.1 Background .....	1
1.2 Phenomenon Caused by Durability Loss of RC Structure .....	4
1.3 Basic Frame of Assessing the Durability of RC Structure under Normal Air Environment .....	7
References .....	8
<b>CHAPTER 2 CONCRETE CARBONATION AND IT'S FORECASTING     MODEL</b> .....	10
2.1 Mechanism of Concrete Carbonation .....	10
2.2 Factors Influencing the Concrete Carbonation .....	11
2.3 Forecasting Model of the Carbonation Depth .....	18
2.4 Random Model of Forecasting the Carbonation Depth .....	23
References .....	32
<b>CHAPTER 3 CORROSION OF THE REINFORCEMENT IN CONCRETE     AND ASSESSMENT OF CORRODED AMOUNT</b> .....	34
3.1 Mechanism and Condition of Corrosion of the Reinforcement in Concrete .....	34
3.2 Determination of Start Time When the Reinforcement Begins corroded .....	36
3.3 Assessing Model of the Corrosive Amount before Concrete Cover Cracks due to Corrosion Expansion .....	52
3.4 Determination of the Crack Time of the Concrete Cover Due to Corrosion Expansion .....	74
3.5 Forecast of the Corrosion Amount after Cracks due to Corrosion Expansion .....	84
References .....	93
<b>CHAPTER 4 EXPERIMENT AND CALCULATION OF THE BEARING     CAPACITY OF CORROSIVE MEMBERS</b> .....	95
4.1 Deterioration of the Structural Properties of Corrosive RC Members .....	95

4.2	Bearing Capacity Experiments of Corrosive RC Beams .....	105
4.3	Analysis of the Failure Characteristics of Corrosive RC Beams .....	118
4.4	Method to Calculate the Bearing Capacity of Corrosive RC Beams .....	119
4.5	Bearing Capacity Experiment of Corrosive RC Column .....	127
	References .....	138
<b>CHAPTER 5 ANALYSIS OF THE PROBABILITY OF EXISTING</b>		
	<b>STRUCTURES .....</b>	<b>139</b>
5.1	Mathematics Model and Definition of the Probability of Existing Structures .....	140
5.2	Analyzing Method of the Probability of Existing Structures .....	143
5.3	Random Process Model of the Resistance of Existing Structures .....	145
5.4	Load Model of Existing Structures .....	152
5.5	Analysis and Evaluation of the Dynamic Probability Analysis of Existing Structures .....	156
	References .....	162
<b>HAPTER 6 FORECASTING THE LIFE AND THE REMAINING</b>		
	<b>LIFE OF CONCRETE STRUCTURES .....</b>	<b>164</b>
6.1	Criterion of Assessing the Life of RC Structure .....	164
6.2	Life Forecast of Concrete Structure .....	167
6.3	Analysis of the Carbonation Life of RC Structures .....	169
6.4	Analysis of the Concrete Cover Cracking Life Structures .....	173
6.5	Analysis of the Capacity Life for RC Structure .....	179
	References .....	180
<b>CHAPTER 7 PRACTICAL ENGINEERING EXAMPLE .....</b>		
	<b>181</b>	
7.1	Applicable Durability Assessment of the Jiangxin Water Station in Wuhan Steel Company .....	181
7.2	Durability Assessment of the Exposure Platform in the SanMing Steel Company in Fujian .....	191

# 第一章 绪 论

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 结构可靠性与耐久性

我国《建筑结构可靠度设计统一标准》<sup>[1]</sup>中对结构可靠性的定义为:结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的能力。这里的规定时间是指结构的设计使用年限,规定条件是指正常设计、正常施工、正常使用和正常维护,而预定功能则指结构的安全性、适用性和耐久性。

所谓结构的耐久性是指结构在正常设计、正常施工、正常使用和正常维护条件下,在规定的时间内,由于结构构件性能随时间的劣化,但仍能满足预定功能的能力<sup>[2]</sup>;结构耐久性还可定义为结构在化学的、生物的或其他不利因素的作用下,在预定的时间内,其材料性能的恶化不致导致结构出现不可接受的失效概率<sup>[3]</sup>;或指结构在要求的目标使用期内,不需要花费大量资金加固处理而能保证其安全性和适用性的能力<sup>[4]</sup>。

从结构可靠性与耐久性的定义可以看出,结构可靠性主要表征结构的能力问题,而结构的耐久性则主要反映时间问题。

### 1.1.2 耐久性不足对结构的危害

建筑物在长期使用过程中,在内部的或外部的、人为的或自然的因素作用下,随着时间的推移,将发生材料老化与结构损伤,这是一个不可逆的过程,这种损伤的累积将导致结构性能劣化、承载力下降、耐久性能降低。

长期以来,人们受混凝土是一种耐久性能良好的建筑材料的影响,忽视了钢筋混凝土结构的耐久性问题,造成了钢筋混凝土结构耐久性研究的相对滞后,并因此付出了巨大的代价。由于耐久性不足导致结构破坏的事故时有发生,其中因混凝土碳化和钢筋锈蚀需要处理的工程具有普遍性,造成的损失也是难以估量的。因此,钢筋混凝土结构的耐久性问题已受到国内外土木工程界和学术界的高度重视。

美国标准局(NBS)1975年的调查表明,美国全年各种因腐蚀造成的损失为700多亿美元,其中混凝土中钢筋锈蚀造成的损失约占40%<sup>[5]</sup>。在美国州际公路网56万座桥中,处于严重失效的就有9万座,1969年一年用于修复因钢筋锈蚀而损坏公路桥面板的费用高达26亿美元,1978年增至63亿美元<sup>[6]</sup>。美国材料咨询委

员会(NMAB)1987年的报告中指出,有253 000座混凝土桥处于不同程度的损伤状态,且以每年35 000座的速度在增加;1991年用于修复由于耐久性不足而损坏的桥梁就耗资910亿美元<sup>[7]</sup>。

英国为解决海洋环境下钢筋混凝土构筑物的腐蚀与防护问题,每年就花费将近20万英镑。英国英格兰岛中部环形线的快车道上有11座混凝土高架桥,建于1972年,建造费为2800万英镑,建成两年后就发现钢筋锈蚀造成的混凝土顺筋裂缝现象;1974~1989年的15年间,其修补费用已高达4500万英镑,为初始造价的1.6倍<sup>[5]</sup>。英国每年用于修复钢筋混凝土结构的费用达200亿英镑。

日本目前每年仅用于房屋结构维修的费用即达400亿日元,大约有21.4%的钢筋混凝土结构损坏是因钢筋锈蚀引起的。引以自豪的新干线使用不到10年,就出现大面积混凝土开裂、剥蚀现象<sup>[8]</sup>。

前苏联有关资料表明<sup>[9]</sup>,仅工业厂房受钢筋锈蚀损坏的总额就占其固定资产的16%,有些厂房使用10年左右即严重破坏,经常需要维修,有些建筑维修费用已超过其原始造价。1980年,仅使用了23年的民主德国柏林会议大厦由于钢筋锈蚀造成其西南角塌陷<sup>[10]</sup>,引起国内外学者的关注。

我国的工业与民用建筑中,钢筋混凝土结构占有相当的比例,由于混凝土碳化和钢筋锈蚀引起的结构破坏问题非常严重。据1979年的调查<sup>[11]</sup>,已有36%的建筑物需要大修,一般的冶金、化工等工业建筑,其安全使用期一般为15~20年;而经常处于高温、高湿条件下的工业建筑,其安全使用期仅为5~7年。近年来的工程调查表明,钢筋锈蚀已成为导致我国钢筋混凝土结构耐久性失效的主要原因之一。如青岛市一座大楼3年内因楼盖钢筋严重锈蚀导致结构失效,16层楼盖全部拆除<sup>[12]</sup>;北京某旅馆使用2年,钢筋混凝土柱的纵向钢筋与箍筋均已锈蚀,箍筋截面损失率高达25%,最严重处箍筋断裂、保护层剥落<sup>[5]</sup>;1981年交通部第四航务局等对华南地区使用7~25年的18座海港码头的调查资料表明,在海溅区,梁、板底部钢筋普遍严重锈蚀,引起破坏的占89%(16座),其中有几座已不能正常使用<sup>[13]</sup>。

综上所述,由于混凝土耐久性造成的结构破坏是严重的,带来的经济损失是巨大的,因此,研究混凝土结构耐久性问题非常必要,是一项具有重大实际意义和社会经济效益的研究课题。

### 1.1.3 耐久性研究的必要性

世界上一般国家的基本建设大体上都可分为三个阶段:第一阶段为大规模新建,第二阶段为新建与维修改造并重,第三阶段为重点转向旧建筑物的维修改造。如美国自20世纪70年代开始,建筑业的新建就已不景气,而维修改造业却越来越兴旺,美国劳工部曾预言,2000年维修改造业将是最受欢迎的9个行业之一;前苏联“九五”和“十五”维修改造业的投资占工业建筑总投资的65%;英国1980年建

筑物维修改造工程占英国建筑工程总量的 $\frac{2}{3}$ ；瑞典 1983 年用于维修改造的投资占建筑业总投资的 50%<sup>[14]</sup>。

据有关资料<sup>[14]</sup>，我国“一五”期间维修改造投资仅占基本建设总投资的 4.2%， “三五”期间已达 27%， “四五”期间为 31.7%， “七五”则为 54%。据有关部门统计，我国既有的近  $70 \times 10^8 \text{m}^2$  的城镇建筑有 50% 进入老化阶段，其中约有  $(10 \sim 12) \times 10^8 \text{m}^2$  需维修加固才能使用。这些统计数字表明，我国建筑业的现状正处于新建与改造共存的阶段，因此，研究混凝土结构的耐久性与现有结构的安全性评估及维修决策理论和加固技术方法则显得极其重要。

从结构的危险率来看，进行结构耐久性研究也是非常必要的。结构的整个“生命周期”可以分为三个阶段，即建造阶段、使用阶段和老化阶段。结构在三个阶段的平均危险率  $\lambda(t)$  的变化情况如图 1.1 所示。

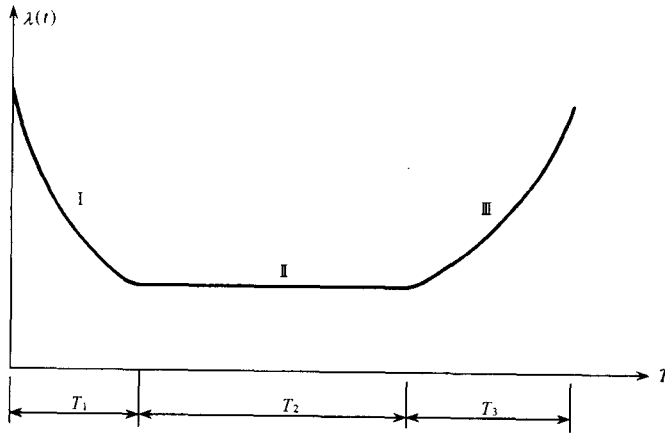


图 1.1 结构平均危险率的变化曲线

第一阶段(结构的建造阶段):该阶段的结构是一个形状、材料性能和荷载均随时间变化的“时变结构”<sup>[15]</sup>，结构在建造阶段的危险大多来自设计、施工的失误及其他人为错误<sup>[16]</sup>。这一阶段的平均危险率较高，如美国的统计资料表明，大约 60% 的事故发生在施工过程中，前苏联的统计资料为 70%<sup>[17]</sup>。

第二阶段(结构的使用阶段):该阶段为结构的正常使用阶段，平均危险率是最低的。其危险主要来自自然和人为的灾害，这些灾害的发生具有偶然性，这一阶段是工程减灾防灾研究的重点。

第三阶段(结构的老化阶段):该阶段结构的平均危险率呈上升趋势，其危险主要来自结构性能的劣化和各种损伤的积累。在这一阶段，各种自然和人为灾害发生的可能性依然存在，而建造阶段存在的各种隐患和结构在使用过程中所产生的各种损伤的累积，都将使结构的抗力下降。

长期以来，结构工程学科研究的重点是如何使结构设计理论与设计方法更合

理,其工作主要集中在结构的使用阶段,只管建房、建桥,不管修房、修桥,这一阶段的平均风险率却恰恰是最低的,而大量的安全事故发生在结构的老化阶段,且结构在老化阶段的维修加固费用之高往往超出了人们的想像。因此,考虑结构的建造、使用及维修全过程,对结构进行安全评估与控制将是非常必要的。

实际工程中大量存在的处于老化阶段的建筑物及结构在老化阶段的高风险率和巨大的维修加固费用,使得人们越来越重视对已有建筑的耐久性评定和剩余使用寿命预测,以选择科学的处理对策。这也是混凝土结构耐久性研究最主要的工程背景。

## 1.2 混凝土结构耐久性损伤的现象

混凝土结构耐久性的研究始于 20 世纪 40 年代,从 20 世纪 60 年代,混凝土结构的耐久性问题就已成为国内外土木工程界研究的重要领域。

### 1.2.1 引起结构耐久性损伤的原因

混凝土结构的耐久性是指结构在其使用过程中抵抗外界环境或内部自身所产生的侵蚀破坏的能力,而结构的耐久性损伤或耐久性破坏则指结构性能随时间的劣化现象。从产生耐久性损伤的直接原因来看,可以将混凝土耐久性损伤原因分为内部原因与外部原因。

所谓内部原因是指混凝土自身的一些缺陷,如在混凝土内部存在气泡和毛细管孔隙,这些孔隙为空气中的二氧化碳、水分与氧气向混凝土内部的扩散提供了通道。另外,当混凝土中掺加氯盐或使用含盐的骨料时,由于氯离子的作用将使混凝土中的钢筋产生锈蚀;当混凝土的碱含量过高,水泥中的碱与活性集料发生反应,即在混凝土中产生碱-集料反应,导致混凝土开裂。使混凝土自身存在缺陷的主要原因来自混凝土结构的设计、材料和施工的不足。

产生损伤的外部原因主要是指自然环境与使用环境引起的劣化,可以分为一般环境、特殊环境及灾害环境。一般环境中的二氧化碳、环境温度与环境湿度、酸雨等将使混凝土中性化,并使其中的钢筋产生锈蚀,而环境温度与环境湿度等则是影响钢筋锈蚀的最主要因素;特殊环境中的酸、碱、盐是导致混凝土腐蚀破坏与钢筋锈蚀破坏的最主要原因,如沿海地区的盐害、寒冷地区的冻害、腐蚀性土壤及工业环境中的酸碱腐蚀等;灾害环境主要指地震、火灾等对结构造成的偶发损伤,这种损伤与环境损伤等因素的共同作用,也将使结构性能随时间劣化。

### 1.2.2 结构耐久性损伤与结构劣化现象的分类

从混凝土结构耐久性损伤的机理来看,可以将混凝土耐久性损伤分为化学作用引起的损伤和物理作用引起的损伤两大类,另外,生物作用对混凝土耐久性也有

一定的影响。

由于化学作用与电化学作用使结构产生的劣化现象主要有：混凝土的碳化、混凝土中的钢筋锈蚀、碱-集料反应及混凝土的化学侵蚀（如硫酸盐侵蚀、酸侵蚀等）；由于物理作用使结构产生的破坏现象主要有：混凝土冻融破坏、磨损、碰撞、冲蚀等。耐久性损伤的分类如图 1.2 所示。

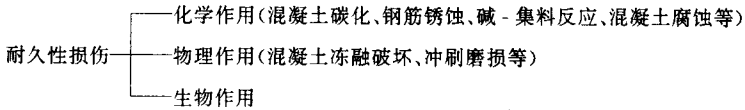


图 1.2 结构耐久性损伤原因分类

从混凝土结构耐久性损伤的劣化现象上，主要有以下几种类型：混凝土的碳化、混凝土中的钢筋锈蚀、混凝土冻融破坏、裂缝、混凝土强度降低及结构的过大变形等。

### 1. 混凝土的碳化

混凝土碳化是混凝土中的碱与环境中的  $\text{CO}_2$  发生化学反应生成  $\text{CaCO}_3$  的过程，它使混凝土的碱性降低，从而失去对钢筋的保护作用，是一般大气环境混凝土中钢筋锈蚀的前提条件。衡量混凝土碳化的指标为碳化深度。

### 2. 混凝土中的钢筋锈蚀

混凝土碳化后，在适当的条件下钢筋产生锈蚀。另外，有  $\text{Cl}^-$  存在时（如在海洋环境、工业建筑的盐环境、混凝土中掺加氯盐及除冰盐的路桥等），即使混凝土仍保持强碱性，钢筋也会发生锈蚀。钢筋锈蚀用钢筋锈蚀面积率、钢筋锈蚀截面损失率、钢筋锈蚀深度等指标表示。

### 3. 混凝土冻融破坏

混凝土冻融破坏是我国北方地区混凝土工程的常见劣化现象。造成混凝土冻融剥蚀的主要原因是混凝土微孔隙中的水，在温度正负交互作用下，形成冰胀压力和渗透压力联合作用的疲劳应力，从而使混凝土产生由表及里的剥蚀破坏，并导致混凝土强度降低。冻融破坏属于物理作用，混凝土产生冻融破坏必须有两个条件：一是混凝土必须与水接触或混凝土中有一定的含水量；二是混凝土建筑物必须经受反复交替的正负温度。

### 4. 混凝土裂缝

由于混凝土的收缩、温度应力、地基的不均匀沉降及载荷的作用，将会使混凝土产生裂缝；混凝土中的钢筋锈蚀将导致混凝土产生沿筋的纵向裂缝；混凝土冻



融、碱-集料反应也使混凝土产生裂缝。混凝土裂缝一般采用裂缝宽度作为度量指标。

### 5. 混凝土强度降低

随结构服役时间的增长,混凝土强度将产生下降。混凝土强度的劣化主要受使用环境的影响,如一般大气环境下混凝土强度在相当长时间以后才开始下降<sup>[18]</sup>,而海洋环境的混凝土强度在30年时约降低50%<sup>[19]</sup>。另外,混凝土冻融、碱-集料反应也将使混凝土强度降低。

### 6. 结构的过大变形

主要是荷载作用下(包括振动与疲劳)梁、板的过大变形及不均匀沉降引起的过大变形。

使结构产生劣化的主要原因与劣化现象的关系如图1.3所示<sup>[20]</sup>。

