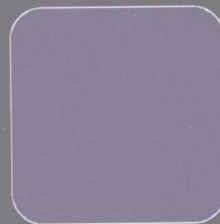
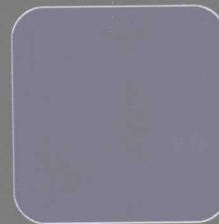




建筑工程全寿命安全 经济决策理论与应用

王增忠 施建刚 张新华 于金兰 编著

JIANZHU GONGCHENG
QUANSHOUMING
ANQUAN
JINGJI JUECE
LILUN YU YINGYONG



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

建筑工程全寿命安全 经济决策理论与应用

王增忠 施建刚 编著
张新华 于金兰



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

建筑工程项目,特别是大型基础设施建设项目投资巨大,对社会的政治、经济和环境等各个方面有着相当大的影响,对这些工程进行全寿命管理决策具有战略意义。本书初步建立了建筑工程全寿命安全经济决策的理论框架;重点分析了由于混凝土耐久性不足,导致建筑结构安全性能降低、使用性能劣化对建筑工程全寿命的影响;系统研究了建筑工程结构初始可靠度水平的设置、维修策略的选择及其对项目经济效益的影响与对策,提出了建筑工程全寿命安全可靠性评估的系统方法,并附有案例分析和讨论。

本书在理论和应用层面将建筑工程技术、经济与管理两个学科融为一体,可为从事土木工程和建设工程管理的技术、科研和管理人员,提供双学科理论结合实践的应用性指导。

图书在版编目(CIP)数据

建筑工程全寿命安全经济决策理论与应用/王增忠,施建刚,张新华等编著. 上海:同济大学出版社,2007.12

ISBN 978-7-5608-3631-7

I. 建… II. ①王…②施…③张… III. 建筑工程—全寿命—研究 IV. TU746

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 156398 号

建筑工程全寿命安全经济决策理论与应用

王增忠 施建刚 张新华 于金兰 编著

责任编辑 沈志宏 高晓辉 责任校对 徐春莲 装帧设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 13.75

印 数 1—3100

字 数 343 000

版 次 2007 年 12 月第 1 版 2007 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-3631-7/TU·760

定 价 30.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪,科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略,上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”,资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

序

可持续发展是我国现代化建设的一项重大战略。对建筑工程而言,可持续发展原则必然要覆盖建筑工程的全过程——规划、设计、建造和建成后的运营、使用、管理、甚至拆除,以最大限度地节省投资、保护自然生态环境,并考虑工程寿命期(Life Cycle)的费用-效益分析。特别是大型基础设施建设项目投资巨大,对社会的政治、经济和环境等各个方面有着相当大的影响,对这些工程项目的全寿命安全、经济和管理决策的深入研究具有战略意义。

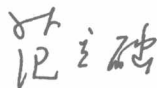
建筑结构的安全与项目的投资是一对相互影响、相互制约的矛盾统一体,建筑结构在整个寿命期内必须满足一定的安全要求。同时,结构的安全程度也对建设项目的经济指标影响很大,所以建筑工程全寿命的安全和经济分析决策是密不可分的。

建筑工程全寿命安全和经济决策是目前我国土木工程界和建设管理部门迫切需要解决的关键问题。

本书作者结合多年的研究积累,并借鉴已有的研究成果,充分结合土木工程技术和建设项目经济管理的关键问题,建立了建筑工程全寿命安全经济决策的理论框架,初步为建筑工程项目全寿命决策提供了科学合理的理论、方法和应用指南。

本书内容涉及土木工程和建设工程管理两大学科,显著的特点是在理论和应用层面将这两个学科融为一体,该书不仅具有较好的学术价值,而且还有广泛的应用价值。

本书思路清晰,特色鲜明,强调理论与实际工程的结合,是我国从事土木工程和建设工程管理的科研、教学、设计和管理等相关人员不可多得的参考书。



中国工程院院士

2007年2月6日于同济

前 言

安全和经济是建筑工程项目的两大核心问题,如何解决好安全和经济这一对矛盾始终是工程技术和经济管理领域的主要研究课题。国内外建筑工程的最主要结构形式是钢筋混凝土结构,本书围绕钢筋混凝土结构的安全和经济问题进行研究分析,探索建筑工程项目安全和经济决策的相关理论和方法。

许多钢筋混凝土结构,特别是处于恶劣环境条件下的基础设施建筑工程项目,由于混凝土耐久性不足,导致结构性能劣化,安全性能降低,造成大量的项目远远达不到预期的使用寿命或预期的使用功能。有的项目在使用过程中不得不投入大量资金经常进行维修,有的甚至发生结构坍塌事故,带来了严重的经济损失和不良的社会影响。因此,建筑工程项目必须充分重视混凝土的耐久性问题,并从全寿命的角度,对项目进行安全评估和经济分析。

建筑工程项目的安全问题极其重要,同时建筑结构的安全程度对项目的经济指标有直接影响,所以建筑工程项目全寿命经济分析绝不仅仅是经济问题。全寿命经济分析离不开建筑结构的安全问题,特别是由于混凝土耐久性问题引起的结构安全性能的降低以及结构的维护维修问题。对于建筑工程项目来讲,最终目标是在建筑结构安全可靠的约束条件下,使项目全寿命的净收益期望值最大或全寿命费用(LCC)最小。

本书围绕安全和经济两大主题,重点研究由于混凝土耐久性不足导致的安全、经济问题及其对策。全书共分九章,主要内容介绍如下:

(1) 介绍混凝土耐久性不足造成的严重安全、经济问题和混凝土耐久性的研究进展。讨论全寿命周期不同阶段对 LCC 的影响程度,论述建筑工程项目全寿命安全、经济分析的作用和意义。

(2) 论述建筑工程项目全寿命经济分析的基本内容和常用方法,分析建筑工程项目经济分析中的费用和效益的范围及内容。探讨研究周期、折现率、价格等主要参数的选择问题,重点分析建筑工程项目使用寿命的影响因素及其确定方法。

(3) 分析混凝土耐久性问题,主要探讨混凝土碳化、钢筋锈蚀、混凝土冻融破坏和混凝土碱-骨料反应等的原理、影响因素和对结构性能的影响。

(4) 综合分析提高混凝土耐久性的保证措施和对策。重点分析和探讨改善混凝土结构耐久性的技术措施和管理措施,并总结混凝土耐久性的检测方法。

(5) 论述建筑结构可靠度理论以及结构安全指标的选择,讨论结构可靠性分析的不确定性。探讨不同阶段结构可靠度的内涵及其差别,研究已有结构由于混凝土耐久性问题导致的时变可靠度及其分析计算方法。

(6) 分析混凝土结构的耐久性极限标准及选择方法、耐久性的等级划分、评估方法和使用寿命的评估准则以及寿命预测方法。并通过工程案例说明混凝土结构使用寿命的评估以及寿命预测的方法和步骤。

(7) 论述建筑工程项目全寿命经济分析的基本方法,分析建筑工程结构最优初始可靠度的确定和选择方法、结构初始造价与初始可靠度的关系、结构的维修和拆除准则、结构失效损失的分析 and 计算方法。提出了使用功能不充分系数的概念,并用以分析结构功能失效的期望损失、估计结构维修的效益。

(8) 分析建筑工程项目耐久性设计的原则、方法和理念,建立基于混凝土耐久性的建筑工程项目全寿命经济分析的框架体系。重点研究拟建建筑工程项目、连续运营的建筑工程项目和已有建筑工程项目的全寿命经济分析的目标、思路、方法和步骤。探讨拟建建筑工程结构初始可靠度水平的设置、维护维修策略的选择和耐久性设计水平的确定等问题,提出了建筑工程项目全寿命可靠性评估框架、思路和系统分析方法,将贝叶斯方法应用于建筑结构性能评估和预测。

(9) 以海洋环境中的某一钢筋混凝土结构的桥梁为例,从技术、经济和管理等几个方面,论述基于混凝土耐久性的建筑工程项目全寿命经济分析的主要方法和步骤。

本书由王增忠和施建刚共同策划、编写,张新华参与第三章和第四章的编写,于金兰参与第五章和第九章的编写,最后由王增忠统稿。本书引用了大量的参考文献,其中部分参考资料为内部资料,未能一一列出,在此对本书所引用参考文献的作者表示衷心感谢。

在本书完稿之际,要特别感谢我的博士后导师、中国工程院院士、同济大学教授范立础先生,他为本书作序予以鼓励。上海科技专著出版资金管理委员会给予大力支持和资助,同济大学出版社的沈志宏、高晓辉老师给予了热情的帮助,本书还得到了上海市教育委员会科学研究项目(批准号为 06DZ023)的资助,在此一并表示衷心感谢。

由于本书作者水平有限,书中难免存在不妥、疏漏甚至错误,恳请读者批评指正。

王增忠

2007 年 9 月

目 录

序	I
前言	III
第一章 概论	1
1.1 混凝土耐久性问题及研究进展	1
1.1.1 混凝土耐久性问题造成的经济损失	2
1.1.2 混凝土耐久性的研究进展	5
1.2 全寿命安全经济决策的内容	6
1.2.1 建筑工程项目全寿命周期的阶段划分	7
1.2.2 建筑工程项目全寿命费用分析	7
1.2.3 全寿命安全经济决策的提出	9
1.2.4 全寿命经济分析的内涵和特点	10
1.3 全寿命安全经济决策的研究进展	11
1.3.1 费用-效益分析	11
1.3.2 全寿命经济分析的研究现状	12
1.3.3 全寿命安全经济决策的意义	13
1.4 本书研究目的和主要内容	15
1.4.1 研究目的	15
1.4.2 研究的主要内容	16
第二章 建筑工程项目全寿命经济分析的内容和方法	19
2.1 建筑工程项目评价的内容和目标	19
2.1.1 建筑工程项目评价的主要内容	19
2.1.2 建筑工程项目管理的目标	21
2.2 建筑工程项目经济评价的内容和指标	22
2.2.1 经济评价的目的和内容	22
2.2.2 建筑工程项目的财务评价	23
2.2.3 建筑工程项目的不确定性分析	25
2.3 建筑工程项目经济评价中的成本及参数选择	26

2.3.1	建筑工程项目全寿命成本及其组成	26
2.3.2	全寿命经济分析中的参数选择与讨论	28
2.4	建筑工程的使用寿命	29
2.4.1	使用寿命的内涵及确定方法	30
2.4.2	设计使用寿命及其概率含义	31
第三章	混凝土耐久性问题	35
3.1	混凝土耐久性问题概述	35
3.1.1	混凝土耐久性的影响因素及特点	35
3.1.2	混凝土耐久性的研究内容	37
3.2	混凝土碳化	39
3.2.1	混凝土碳化的机理	39
3.2.2	碳化对混凝土结构性能的影响	42
3.2.3	影响混凝土碳化的主要因素	44
3.2.4	混凝土碳化深度的预测	46
3.3	混凝土中钢筋的锈蚀	47
3.3.1	混凝土中钢筋锈蚀的机理	48
3.3.2	混凝土中钢筋锈蚀的条件	49
3.3.3	钢筋锈蚀的过程	49
3.3.4	混凝土中钢筋锈蚀的主要影响因素	50
3.3.5	钢筋锈蚀对混凝土结构性能的影响	51
3.4	混凝土冻融破坏	51
3.4.1	混凝土的冻融破坏机理	52
3.4.2	混凝土的抗冻性评价	52
3.4.3	提高混凝土抗冻性的措施	53
3.5	混凝土碱-骨料反应	53
3.5.1	混凝土碱-骨料反应的分类	53
3.5.2	混凝土碱-骨料反应的机理	55
3.5.3	混凝土碱-骨料反应的条件	56
3.5.4	碱-骨料反应的破坏特征	57
3.5.5	碱-骨料反应的主要影响因素	59
3.6	耐热性、耐火性	61
3.6.1	混凝土受热时的破坏	61
3.6.2	高温对混凝土性能的影响	62
3.6.3	混凝土的耐热性及耐火性	64

第四章 混凝土耐久性的保证措施和检测技术	68
4.1 原材料选用的保证措施	68
4.1.1 合理选择混凝土材料和配合比	68
4.1.2 使用性能良好的外加剂	74
4.2 结构、构造设计中的保证措施	76
4.2.1 保证有足够的混凝土保护层厚度	76
4.2.2 合理地设计结构及构造	77
4.3 提高混凝土耐久性的措施	79
4.3.1 施工阶段的质量保证	79
4.3.2 对混凝土表面处理改善其耐久性	83
4.3.3 钢筋防护的措施和方法	86
4.3.4 提高工程结构的耐久性	93
4.4 钢筋混凝土耐久性的检测方法	95
4.4.1 混凝土耐久性检测	95
4.4.2 从氯离子侵蚀进程看耐久性检测	97
4.4.3 混凝土氯离子的检测方法	100
4.4.4 钢筋的检测	104
第五章 建筑结构的安全分析与评估	108
5.1 结构可靠度理论及其应用	108
5.1.1 结构可靠度理论	108
5.1.2 结构安全性指标的选择	113
5.2 结构可靠性分析的不确定性和可靠度的划分	115
5.2.1 可靠度分析中的不确定性	115
5.2.2 作用效应和结构抗力的不确定性	116
5.2.3 不同阶段结构可靠度的划分	117
5.3 已有结构的动态可靠度	119
5.3.1 已有结构动态可靠度的定义及特点	119
5.3.2 已有结构动态可靠度分析的简化方法	120
第六章 混凝土结构耐久性评估和使用寿命的预测	124
6.1 混凝土结构耐久性的评估	124
6.1.1 混凝土结构耐久性极限标准	124
6.1.2 耐久性极限标准的选择及耐久性损伤程度的调查和等级划分	126
6.2 混凝土结构耐久性分级加权评判	128
6.2.1 混凝土结构耐久性指标分级加权评定法	128

6.2.2	混凝土结构耐久性三级模糊综合评判	130
6.3	混凝土结构使用寿命预测	134
6.3.1	混凝土结构使用寿命的评估准则	134
6.3.2	混凝土结构使用寿命的预测方法	135
6.3.3	混凝土结构使用寿命的预测案例	137
第七章 建筑工程项目全寿命经济分析的基本方法		140
7.1	建筑工程项目全寿命经济分析的目标及最优可靠度	140
7.1.1	建筑工程项目的总体目标	140
7.1.2	建筑工程项目的经济目标	141
7.1.3	建筑工程最优初始可靠度	142
7.2	结构初始造价与可靠度的关系	143
7.2.1	结构初始造价与可靠度关系分析的常用方法	143
7.2.2	结构初始造价与可靠度的关系函数	144
7.3	结构的维修和拆除准则	146
7.3.1	预防性维修和维修加固	147
7.3.2	影响结构维修和拆除策略的经济因素分析	148
7.3.3	维修、修复准则和拆除准则	149
7.4	结构失效损失分析	150
7.4.1	结构失效等级划分和损失评估	151
7.4.2	使用功能不充分造成的损失	153
7.4.3	结构失效损失期望值	156
第八章 混凝土耐久性设计和建筑工程项目全寿命经济分析		159
8.1	混凝土结构耐久性设计	159
8.1.1	混凝土结构耐久性设计的原则	159
8.1.2	建筑工程的设计使用寿命	160
8.1.3	混凝土结构的工作环境	160
8.1.4	混凝土结构设计的全寿命理念	162
8.1.5	全寿命质量保证与规范	162
8.2	拟建建筑工程项目全寿命经济分析	163
8.2.1	拟建项目全寿命的费用组成和总目标	163
8.2.2	拟建建筑工程项目全寿命现金流和维修策略	165
8.2.3	项目的初始可靠度、耐久性水平和维修策略	167
8.2.4	混凝土耐久性措施的全寿命经济分析比较	170
8.2.5	全寿命过程中的非确定性变量分析	171

8.3	连续运营的建筑工程项目全寿命经济分析	173
8.3.1	不采取维修策略时的经济分析	173
8.3.2	连续运营的建筑工程项目经济分析案例	176
8.4	已有建筑工程项目的全寿命经济分析	178
8.4.1	已有建筑工程项目经济分析的特点和总目标	178
8.4.2	已有建筑工程项目的维修及经济分析	179
8.5	建筑工程项目全寿命可靠性评估的系统方法	182
8.5.1	项目全寿命可靠性评估框架	182
8.5.2	贝叶斯方法的应用	183
8.5.3	结构性能检测的经济分析	185
第九章	案例分析研究	189
9.1	案例背景与条件	189
9.1.1	案例背景	189
9.1.2	案例工程条件及案例分析中的有关假定	189
9.2	不考虑维修情况的全寿命经济分析	191
9.2.1	方案说明和结构性能劣化模型	191
9.2.2	年日常检测维护费用和年结构失效损失计算公式	192
9.2.3	甲方案全寿命经济分析	193
9.2.4	乙方案全寿命经济分析	195
9.2.5	丙方案全寿命经济分析	197
9.2.6	三种方案的比较和分析讨论	199
9.3	考虑维修情况的全寿命经济分析	200
9.3.1	预防性维修 PM 方案的经济分析	200
9.3.2	维修加固 EM 方案的经济分析	202
9.3.3	考虑维修情况经济分析的讨论	203

第一章 概论

土建工程是桥梁、道路、铁路、隧道、码头等土木工程与房屋建筑工程的总称,目前有关名称尚不统一。在西方各国,土木工程包括房屋建筑工程和水利工程;在我国,从历史传统上将土木工程与水利工程并列;到近代,在提到土木工程时又往往将其限于桥、隧、路等工程,而将房屋建筑及其附属构筑物除外。但不管怎样划分,土木、水利和房屋建筑工程本属同源,其学科基础是一致的。本书所说的建筑工程包括上述所有具体工程对象。

安全和经济是建筑工程项目的两大核心问题,安全和经济这一对矛盾始终是工程技术和经济管理领域的主要研究对象。需要特别指出的是,建筑工程的安全和经济密不可分,必须同时考虑。国内外建筑工程的最主要结构形式是钢筋混凝土结构,因此,本书主要针对钢筋混凝土结构的建筑工程项目进行安全和经济决策的讨论。

许多钢筋混凝土结构,特别是处于恶劣环境条件下的基础设施建筑工程项目,由于混凝土耐久性不足,造成大量的项目远远达不到预期的使用寿命或预期的使用功能,有的在使用过程中不得不投入大量资金经常进行维修,有的甚至发生结构坍塌事故,带来了严重的经济损失和不良的社会影响。因此,建筑工程项目必须充分重视混凝土的耐久性问题,并从全寿命的角度,对项目进行安全评估和经济分析。我国目前正处于基础设施建设的高峰时期,大量的建筑工程项目面临着如何保证在其使用期间的安全、经济问题,即从建筑工程全寿命的视角关注其安全性和经济性,这具有深刻的现实意义和应用价值。

本章主要介绍由于混凝土耐久性导致的安全和经济问题,以及建筑工程全寿命安全经济决策的背景、意义,简要介绍国内外的有关研究现状,并概括本书的主要研究内容。

1.1 混凝土耐久性问题及研究进展

由于混凝土耐久性不足,造成了大量的安全事故、经济损失,并引发若干社会问题,教训十分深刻,这引起了国内外学术界和工程界的高度重视。建筑工程项目的安全问题和经济问题是密不可分的,以往对全寿命期的安全经济问题重视不够,才导致了严重的后果。

本节简要介绍混凝土耐久性问题给国内外造成的经济损失,综述混凝土耐久性研究的概况和存在的问题。

1.1.1 混凝土耐久性问题造成的经济损失

1. 国外混凝土耐久性问题概况

当今世界混凝土结构破坏的原因,按其重要性递降排列的顺序依次是^[1]:钢筋锈蚀、寒冷气候下的冻害、侵蚀环境中的物理和化学作用。事实上,由于混凝土耐久性不足,特别是钢筋腐蚀引起的混凝土结构过早破坏,已成为世界各国普遍关注的一大灾害,大量混凝土结构不得不花费巨资予以维修,许多不得不拆除重建,有的甚至发生倒塌破坏,造成巨大经济损失和社会影响^[2,3]。

在美国,最普遍的耐久性破坏形式是混凝土桥梁、路面、停车场及海港等结构中的钢筋锈蚀。美国 1984 年报道,仅就桥梁而言,57.5 万座钢筋混凝土桥梁中一半以上出现钢筋锈蚀问题,40%承载力不足必须进行修复与加固处理。1987 年,美国国家材料顾问团的一份报告指出,在美国约有 25.3 万座桥梁的面板使用已超过 20 年,结构性能逐步劣化,而且以每年 3.5 万座的速度递增。1989 年,美国运输部门给国会的一份关于美国公路与桥梁状况的报告中指出:“现在积压着有待修补的混凝土桥梁的维修费是 1 550 亿美元(是这些桥梁当初建造费用的 4 倍)。”1992 年时,仅在美国,因撒除冰盐引起钢筋锈蚀破坏而不得不限载通车的公路桥就占 1/4,其中已不能通车的占 1%(约 5 000 座)。仅这些桥梁的维修费,即高达 900 亿美元,如果再加上车库、公路、房屋等因钢筋锈蚀而需要的修补费,则估计高达 2 580 亿美元。美国许多城市或地区的混凝土基础设施和港口工程,建成后不到二三十年甚至在更短的时间内就出现严重劣化。据 1998 年 4 月美国土木工程师学会(American Society of Civil Engineers, ASCE)的一份材料估计,大概需要 1.3 万亿美元来处理美国国内基础设施存在的问题,仅修理与更换公路桥梁的混凝土桥面板一项就需 800 亿美元,美国整个混凝土工程的价值约为 6 万亿美元,而今后每年用于维修或重建的费用预计将高达 3 000 亿美元^[4]。

美国土木工程师学会近年对全美基础设施工程所作的调查^[5],评级情况如表 1-1 所示。其中包括航空(aviation)、桥梁(bridges)、水坝(dams)、饮用水(drinking water)、能源电力(energy)、有害废弃物处置(hazardous waste)、航道(navigable waterways)、公园海滩娱乐场所(parks and recreation)、铁路(rail)、公路(roads)、学校(schools)、安全防范设施(security)、固体废料处理(solid waste)、城市大容量交通(transit)、废水处理(wastewater)等 15 个领域,按照工程的运转状况、能力和资金供需关系分别予以评级,共分 A(优)、B(良)、C(一般)、D(差)、E(失效)、F(不完善)6 个级别。

表 1-1

美国基础设施工程的评级情况汇总表^[5]

序 号	类 别	2005 年	2001 年	1998 年	1988 年
1	航空	D+	D	C-	B-
2	桥梁	C	C	C-	C+
3	水坝	D	D	D	n/a

(续表)

序 号	类 别	2005 年	2001 年	1998 年	1988 年
4	饮用水	D—	D	D	B—
5	能源电力	D	D+	n/a	n/a
6	有害废弃物处置	D	D+	D—	D
7	航道	D—	D+	n/a	n/a
8	公园海滩娱乐场所	C—	n/a	n/a	n/a
9	铁路	C—	n/a	n/a	n/a
10	公路	D	D+	D—	C+
11	学校	D	D—	F	n/a
12	安全防范设施	I	n/a	n/a	n/a
13	固体废料处理	C+	C+	C—	C—
14	城市大容量交通	D+	C—	C	C—
15	废水处理	D—	D	D+	C

注:n/a表示当年没有进行评级,I表示不公开

美国基础设施 2005 年的总体评级为 D(差),该年的调查报告认为,要使美国所有的基础设施工程达到良好状态,5 年内需要为此投资 1.6 万亿美元(安全防范设施的费用除外)。

美国的桥梁在 2005 年的评级中评定为 C 级,与 2001 年的级别相同。C 级表示大多数桥梁处于较好的状态,这是耐久性问题暴露后经过 30 年艰苦努力的结果。2003 年美国的桥梁总数达 590 750 座,从 1992 年到 2003 年的 12 年内,有结构缺陷或功能过时的桥梁比例已从 34.6% 稳步下降到 27.2%(即 160 570 座),其中,2000 年的这一比例为 28.5%。2003 年美国联邦公路署的战略计划是到 2008 年将全美桥梁的这一比例降到 25%。但是即使达到该目标,也意味着全美仍有四分之一的桥梁存在缺陷或不足。有结构缺陷的桥梁是指结构构件发生腐蚀,处于关闭状态或只准轻载车通行的状态,必须限速、限载行驶才能保证桥梁安全。功能过时的桥梁是指设计功能陈旧,虽然不是对所有通行车辆都不安全,但已不能适应当前的交通量、车辆体型和车载量。仅仅为了不使现有的这些问题继续累积,每年就需要投资 73 亿美元。如果要彻底消除所有桥梁存在的不足,需要在今后 20 年内每年耗费 94 亿美元。另外,美国存在结构缺陷或功能过时的桥梁的分布区域也存在着明显的差别,在 2005 年的调查中,美国的市区桥梁中有 31.2% 处于结构缺陷或功能过时的状态,农村地区桥梁的这一比例则为 25.6%。

2005 年,美国土木工程师学会曾上书国会,建议采取各种措施,增加桥梁的维修改造经费,争取到 2010 年,使美国桥梁中有结构缺陷或功能过时的比例降到 15% 以下,但近几年的进展并不大。2007 年 8 月 1 日傍晚,位于美国明尼苏达州密西西比河上的一座桥梁在交通高峰时段突然垮塌,造成 100 多人伤亡或失踪。该桥建于 1967 年,为钢梁混凝土结构拱

桥,属于交通要道 35 号州际公路一部分,每天通过汽车约 20 万辆,此次事故的主要原因是桥梁年久失修。这一悲剧发生后,桥梁的安全问题得到了美国各界的广泛关注和重视。

对于公路设施,2005 年美国公路的评级是 D(差),而 2001 年为 D+,表示情况有所恶化。恶劣的道路状况使美国每年总共耗费 540 亿美元用于道路的维修和养护。约有 67% 的交通高峰时间处于拥堵状态,浪费的时间和燃料所造成的经济损失在 85 个大城区内为每年 632 亿美元。美国人每年因交通被堵所耗费的时间为 35 亿 h,每年死于道路交通事故者达 43 000 人,汽车碰撞事故的年损失为 2 300 亿美元。在道路交通死亡事故中,约有 30% 是由于路面状况差和路桥设计的标准已经过时造成的。从 1970 年到 2002 年,美国公路旅客几乎上升 1 倍,在今后 20 年中估计还会增加 2/3。报告建议:为解决交通问题,不能总是简单地修建更多路桥;国家必须转变交通运输行为,增加各级政府投资,并应用最新技术;城市 and 社区的规划要能降低人们工作对于驾车出行的依赖,鼓励采取更柔性的上班方式和通过电子通讯工作。在美国 50 个州的评估中,每个州都将道路列为最受关注的 3 个基础设施领域之一,其中将道路列为首位关注的有 47 个州,其次是桥梁、废水处理、城市大容量交通(地铁轻轨等)和学校^[5]。

在英国,混凝土耐久性问题也很突出。值得一提的典型实例是英格兰岛的中环线快车道上有 11 座高架桥(全长 21 km),总建造费(1972 年建成)为 2 800 万英镑。由于冬季撒除冰盐,两年后即发现钢筋锈蚀使混凝土胀裂。到 1989 年的 15 年间,因维修而耗资已高达 4 500 万英镑(即为造价的 1.6 倍),专家估计以后 15 年间(到 2004 年)的维修还要耗费 1.2 亿英镑(即接近造价的 6 倍)^[6]。

2. 我国混凝土耐久性问题简述

我国有关混凝土耐久性问题尚缺乏严格的统计数据,但国家统计局和建设部于 20 世纪 80 年代进行的一项调查表明,我国大多数工业建筑物在使用 25~30 年后即需大修,处于严酷环境下的建筑物使用寿命仅为 15~20 年,个别建筑物的使用寿命不足 10 年。桥梁、港口等基础设施工程的耐久性问题更为严重,许多工程建成后几年就出现钢筋锈蚀、混凝土开裂。海港码头一般使用 10 年左右就因混凝土顺筋开裂和剥落而需要大修,国内的一座大桥,建成后仅 8 年,由于氯盐侵蚀,现已不得不部分拆除重建,东北地区的一条高等级公路只经过一个冬天就大面积剥蚀^[7]。

1985 年交通部第一航务工程局对大连、天津、秦皇岛、青岛、威海等 5 个地区的 66 个码头泊位的钢筋混凝土结构的锈蚀情况进行了调查。调查结果表明,建国以前修建的工程均已接近破坏;20 世纪 50 年代修建的工程大部分已严重破坏;60 年代修建的工程部分破坏;70 年代及以后修建的工程存在一些问题。调查中发现钢筋的锈蚀破坏多发生于梁和板,而且多限于浪溅区以上。损坏的主要原因是混凝土强度较低,钢筋保护层厚度较小及冻融循环等^[8]。

根据 1994 年对我国铁路桥梁检查情况的统计,我国有 6 137 座桥梁存在着不同程度的损伤,占桥梁总数的 18.8%。调查发现,最普遍的问题是混凝土梁钢筋锈蚀严重,发生锈胀裂缝和竖向裂缝宽度超过规范允许值^[9]。

1.1.2 混凝土耐久性的研究进展

1. 混凝土耐久性的研究概况

1824年波特兰(Portland)水泥问世,人类开始了应用混凝土建造建筑物的历史^[10]。但直到20世纪20年代初,随着结构计算理论及施工技术的相对成熟,钢筋混凝土结构才开始被大规模采用,应用的领域也越来越广阔,到20世纪50年代,混凝土结构的使用进入高峰期。

混凝土材料以其较强的适应性和低廉的价格而成为国内外最重要的建筑材料,钢筋混凝土结构在土木工程中得到了广泛的应用,成为最主要的结构形式。在人们的传统观念中,混凝土是最耐久的建筑材料,从混凝土简写为“砼”(读音“tong”,意为“人工石”)即可见一斑。

钢筋混凝土结构是由混凝土浇筑而成,虽然其中的钢筋会锈蚀,但在混凝土保护下,钢筋一般不易锈蚀。然而,自20世纪40年代开始,发达国家逐渐发现已有的混凝土建筑物,特别是基础设施工程出现过早损坏,人们开始认识到混凝土的耐久性问题。由于不良的使用条件(如海洋环境和工业环境等)、环境的污染(CO_2 浓度增加、酸雨、污水等)、不当的使用方法(公路和桥梁路面在冬季撒除冰盐等)的影响,造成混凝土结构的性能劣化、钢筋锈蚀,轻则影响工程的使用性和耐久性,重则结构承载力下降、安全性能降低,甚至导致结构失效。

自20世纪60年代开始,发达国家的混凝土耐久性问题大量出现。许多建筑工程远远达不到预想的设计寿命,而且在使用过程中,维护维修、加固改造的费用相当大,每年花在建筑工程维修上的费用早就超过了建造费用^[11]。由于混凝土结构的耐久性问题而导致的经济损失相当巨大,混凝土耐久性研究也得到各国的重视,并且开始朝系统化、国际化方向发展^[12]。

国际材料与结构研究所联合会(RILEM)于1960年成立了“混凝土中钢筋锈蚀”技术委员会(CRC),旨在推动混凝土耐久性研究的发展,并逐渐成为国际学术机构和国际性学术会议讨论的重要课题之一。1991年,美国混凝土学会ACI 437委员会提出了“已有混凝土房屋抗力评估”的报告,以及检测实验的详细方法和步骤。1989年,日本土木学会混凝土委员会制订了《混凝土结构物耐久性设计准则(试行)》。1992年,欧洲混凝土委员会颁布的《耐久性混凝土结构设计指南》反映了当今欧洲混凝土结构耐久性研究的水平。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》(ACMC—2001),提出了基于性能的设计方法。

2001年3月,国际桥梁结构协会(IABSE)和其他学术组织联合召开了“安全性、风险性与可靠性”的国际学术会议。这些学术活动的开展,大大加强了各国学术界之间的合作与交流,取得了显著的成果,部分科研成果已应用于工程实践,并成为指导工程设计、施工、维护等的标准性技术文件^[13-15]。

我国从20世纪70年代末才逐渐认识到混凝土结构耐久性问题的严重性,80年代初,