

Reliability Assessment of Performance
Deterioration and Whole-life Design Method for
Concrete Bridge Structures

混凝土桥梁结构性能 退化可靠性评估及 全寿命设计方法

彭建新 邵旭东 编著
张建仁 主审



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

Reliability Assessment of Performance Deterioration and Whole-life
Design Method for Concrete Bridge Structures

混凝土桥梁结构性能退化可靠性评估 及全寿命设计方法

彭建新 邵旭东 编著
张建仁 主审



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书主要介绍大气环境下混凝土桥梁的退化规律、可靠度评估、维修加固优化以及在全寿命设计等方面所取得的研究成果,建立了混凝土桥梁时变性能可靠度评估方法,提出了桥梁结构多目标组合维修方法,构建了混凝土桥梁全寿命设计框架和具体流程,对开展混凝土桥梁服役性能概率评估和全寿命设计有重要的指导意义。

本书可供从事桥梁管理及科研的技术人员使用,也可作为桥梁工程方向研究生的教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土桥梁结构性能退化可靠性评估及全寿命设计方法/彭建新,邵旭东编著. —北京:人民交通出版社股份有限公司,2014. 10

ISBN 978-7-114-11771-8

I. ①混… II. ①彭…②邵… III. ①钢筋混凝土桥—桥梁结构—可靠性—评估②钢筋混凝土桥—桥梁结构—结构设计 IV. U448. 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 232400 号

书 名:混凝土桥梁结构性能退化可靠性评估及全寿命设计方法

著 作 者:彭建新 邵旭东

责任编辑:王文华(125976580@qq.com)

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:11.25

字 数:256 千

版 次:2014 年 10 月 第 1 版

印 次:2014 年 10 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-11771-8

定 价:38.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

我国经济进入第十一个五年规划期之后,在发展经济的同时,节约资源、保护环境已成为全社会的共识,桥梁建设也不例外。交通运输部提出要建设节约型行业,必须坚持交通发展与自然和谐统一,在公路建设中体现“以人为本”的原则,就是要改变“建设就是发展”的传统观念,坚持把“用户需求置于公路工作的核心”作为交通工作的最终目的。我国现在正处于交通建设大发展的时代,如何以新的理念建设桥梁,达到既节省投资,又能获得业主、用户、环境和谐共赢的局面,是一个重大的课题。

经过 20 多年的快速发展,中国桥梁的数量已十分庞大。成绩喜人也忧人,喜人的是我国的桥梁建设取得了巨大的成就且后劲十足,忧人的是长期存在着只注重初期投入,不考虑今后维护的成本,只考虑业主成本,不考虑桥梁使用过程中的社会成本的现象。这一现象的长期存在导致或加剧了桥梁使用寿命短,耐久性差,维护成本高、难度大,交通经常受扰等问题。由于外界环境的作用,桥梁性能劣化虽然是必然的,但是如何在设计阶段就预测并避免今后维护可能带来过高的业主成本和社会成本是一个值得深入研究的课题。

土木工程中寿命周期成本分析的总目标是提供一个成本—效益分析的工程方法,能够用经济学的方法分配不同的成本,包括设计、营运、检测、养护、维护、改造和整个设计基准期的劣化与失效。这种将优化技术和概率方法结合在一起的分析方法能够为决策者提供一个有效的经济评估工具,在收支平衡的基础上判断维护方案和设计方案的优劣。

全书共 6 章:第 1 章介绍寿命周期成本分析方法和桥梁全寿命设计方法的现状,论述碳化腐蚀下桥梁结构性能退化和可靠性评估的发展动态。第 2 章开展了大气环境下受碳化腐蚀的桥梁结构锈胀损伤和承载能力时变可靠性评估。第 3 章推导维护活动和桥梁结构性能指标的关系,并计算在单一和组合维护下结构的性能指标值以及年度和累计的寿命周期成本值;使用粒子群优化算法,基于多目标的优化技术,得到最优的维护组合策略。第 4 章推导桥梁在维护过程中的直接维护成本和间接维护成本的概率计算模型;建立基于寿命周期成本的全寿命优化设计模型,提出了全寿命设计理论体系框架,编制全寿命设计决策分析程序。第 5 章结合湖南省衡炎高速公路的窑背大桥工程设计实践,对桥梁全寿命优化设计理念进行实践,验证了本文提出的桥梁全寿命优化设计方法的合理性和可操作性。第 6 章以一座桥梁车道数(宽度)的决策为研究对象,结合桥面铺装的时变劣化—维护策略规律,对桥梁设计方案的决策进行了新的尝试,进一步证明了全寿命设计方法的有效性和合理性。

全书由长沙理工大学彭建新副教授和湖南大学邵旭东教授编写,长沙理工大学张

建仁教授主审。在本书编写的过程中,研究生李炬、夏伟和蔡明文等协助完成了相关章节的编排和文字编辑工作,在此表示感谢。

感谢国家重点基础研究发展计划(2015CB057700)、国家自然科学基金项目(51008037)、交通运输部应用基础主干学科项目(2014319825160)和湖南省交通运输厅创新项目(200614)等对本研究工作的资助,感谢长沙理工大学学术著作基金的资助。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

彭建新

2014年5月

目 录

第1章 概述	1
1.1 提出问题	1
1.2 研究现状	2
1.2.1 桥梁寿命周期成本分析方法	2
1.2.2 桥梁全寿命设计方法	4
1.2.3 碳化环境下桥梁结构腐蚀	4
1.2.4 碳化环境下桥梁结构性能退化模型	7
1.2.5 碳化腐蚀下预应力混凝土结构的概率时变可靠度模型	18
1.3 研究意义	19
1.4 小结	20
本章参考文献	20
第2章 气候变化、受碳化腐蚀混凝土梁桥腐蚀损伤和安全时变可靠度评估	27
2.1 概述	27
2.2 气候变化和时变 CO_2 浓度	28
2.3 材料模型	29
2.3.1 混凝土材料模型	29
2.3.2 钢筋材料模型	30
2.4 腐蚀模型	31
2.4.1 劣化过程	31
2.4.2 腐蚀开始时间	31
2.4.3 钢筋腐蚀速率模型	33
2.4.4 腐蚀扩展模型	35
2.4.5 时变抗力模型	36
2.5 腐蚀开裂模型	40
2.5.1 锈胀开裂过程	40
2.5.2 开裂开始时间	41
2.5.3 严重开裂模型	42
2.6 荷载模型	42
2.7 时变可靠度模型	43
2.8 算例	44
2.8.1 算例描述	44
2.8.2 抗力和极限状态	46

2.8.3 计算过程	48
2.8.4 算例分析	50
2.8.5 参数敏感性分析	55
2.9 小结	57
本章参考文献	58
第3章 基于多目标的桥梁最优组合维护策略	64
3.1 概述	64
3.2 计算原理	64
3.3 基于指标的桥梁性能描述	66
3.3.1 桥梁性能定义	66
3.3.2 基于指标的劣化规律	67
3.4 维护方法介绍	69
3.5 桥梁性能与维护策略的关系研究	71
3.5.1 可靠指标与维护策略的关系	71
3.5.2 状态指标与维护策略的关系	76
3.6 计算分析	82
3.6.1 单一维护活动作用下桥梁结构性能和寿命周期成本分析	82
3.6.2 组合维护活动作用下桥梁结构性能和寿命周期成本分析	86
3.7 多目标的组合维护策略优化分析	90
3.7.1 设计变量和约束条件	90
3.7.2 算法描述	92
3.7.3 多目标的维护工况分析	94
3.8 原设计的组合维护策略优化分析	101
3.9 小结	102
本章参考文献	103
第4章 基于寿命周期成本的桥梁全寿命优化设计框架体系	105
4.1 概述	105
4.2 桥梁全寿命优化设计的设计框架	106
4.3 全寿命优化设计的研究内容	109
4.4 全寿命优化设计和基于现有规范设计的关系	110
4.5 全寿命优化设计的原则和注意事项	111
4.6 折现率模型	112
4.7 全寿命设计的优化模型	113
4.7.1 设计变量	113
4.7.2 优化目标函数	113
4.7.3 约束条件	115
4.8 寿命周期成本的构成以及计算模型	116
4.8.1 业主成本	117

4.8.2 用户成本	118
4.8.3 社会成本	119
4.8.4 失效成本	119
4.8.5 基于概率模型的用户成本	119
4.9 算例分析	120
4.9.1 维护概率的计算	120
4.9.2 维护成本的计算	121
4.9.3 交通仿真软件	123
4.9.4 成本计算	124
4.9.5 参数研究	129
4.10 小结	131
本章参考文献	131
第5章 试验桥全寿命设计	133
5.1 工程概况	133
5.2 试验桥定性全寿命优化设计	135
5.2.1 铰缝的处理提高桥梁的横向稳定性	135
5.2.2 墩梁固结处理对桥梁整体性的影响	138
5.3 试验桥全寿命优化设计	139
5.3.1 设计变量的选取	140
5.3.2 目标函数	140
5.3.3 约束条件	141
5.4 试验桥劣化模型	142
5.4.1 可靠指标	142
5.4.2 状态指标	143
5.5 最优组合维护策略	143
5.6 试验桥的静力分析	145
5.6.1 原设计	145
5.6.2 修改设计	147
5.7 试验桥参数优化分析	151
5.7.1 参数设置	151
5.7.2 成本计算	151
5.7.3 优化分析	156
5.8 小结	156
本章参考文献	157
第6章 基于全寿命成本的桥梁车道数决策研究	158
6.1 概述	158
6.2 基于全寿命成本的桥梁优化设计方法	159
6.2.1 优化函数	159

6.2.2	寿命周期成本计算模型	159
6.2.3	基于时变状态指标的桥面铺装性能评估	160
6.2.4	在不同维护策略下的结构状态指标和成本计算	164
6.3	算例	167
6.3.1	桥梁寿命周期成本计算	167
6.3.2	维护策略下状态指标和成本计算	168
6.3.3	方案决策	169
6.4	小结	170
	本章参考文献	170

第 1 章 概 述

传统设计方法只考虑初期建设成本,而未考虑今后维护改造等措施造成的各种直接或间接成本,这往往造成桥梁后期维护成本过高、维修资源的分配不合理和服役期性能缺乏预见性,因而存在一定的缺陷。针对传统设计方法存在的不足,本书提出了基于寿命周期成本的桥梁全寿命优化设计方法,即在满足桥梁服务水平前提条件下,在寿命周期成本期望值总和最小的原则下决策最优的桥梁设计方案。也称桥梁“性价比”设计方法,或称基于性能的桥梁设计方法和全寿命优化设计方法。桥梁全寿命设计方法的创新,将是 21 世纪桥梁可持续发展和技术进步的一个重要标志。

1.1 提出问题

随着国民经济的快速发展,我国桥梁建设进入了一个极为辉煌的时期。截至 2013 年,在我国通车公路中,桥梁数量已达 73 万余座,已建成一大批结构新颖、技术复杂、设计和施工难度大、现代化品位和科技含量高的桥梁。在桥梁技术发展的同时,节约资源、保护环境已成为全社会的共识,桥梁建设也不例外。虽然我国桥梁数量、类型、跨径已经跃居世界前列,但桥梁管养、周边环境保护和交通智能化等还与发达国家有一定差距。跨越式发展也遗留了不少问题,如重建设、轻管养,重投资效益、轻环境保护等。我国桥梁数量众多、总体技术状况不容乐观,是目前我国桥梁的主要特点。因此,需要提出新的设计理念,以满足既能节省投资,又能达到业主、用户、环境和赢的局面。

自从改革开放以来,我国桥梁建设取得了巨大成就,而且在今后一段时间还要建设一大批桥梁。但是目前我国从事桥梁行业的人员长期以来只关心桥梁建设,注重初始成本投入,而忽视了运营期桥梁维修管理成本;另外,更多只关注业主成本,不考虑在使用期由于客观存在的维修改造而引发的社会成本。这种现象的长期存在导致我国桥梁使用寿命缩短,后期维修费用增长,突发事件概率提高等问题。桥梁在外界环境和车辆荷载作用下的退化是客观存在的,有必要在设计阶段就考虑桥梁后期性能并初步预测其维修成本和社会成本。

桥梁长期的服务水平、维护成本和寿命周期管理问题已引起全世界的关注。美国土木工程师协会(ASCE)在 1998 年 4 月的报道中指出:“ASCE 给美国的国家土木设施一个平均的等级为 D(状态较差),估计需要花费 13 000 亿美元才能够挽救这种长期忽略的问题”。

基于以上现状,湖南大学桥梁工程研究所^[1-2]提出基于寿命周期成本的桥梁全寿命优化设计方法的基本框架,研究基于寿命周期成本的全寿命优化设计方法的设计过程、桥梁劣化模型、成本计算模型和维护模型。该方法为基于全寿命性能的桥梁设计方法,也称桥梁“性价比”设计方法和基于成本效益的桥梁设计方法。

1.2 研究现状

1.2.1 桥梁寿命周期成本分析方法

寿命周期成本分析(life cycle cost analysis,缩写为LCCA)及全寿命经济观点首先由美国军方于20世纪60年代提出。经过几十年的不断努力发展完善,近年来,美国等国家对桥梁全寿命问题展开了系统研究,这对于在役桥梁的维护管理策略优化和待建桥梁的经济性评估具有重要的指导意义。

寿命周期成本分析方法就是在设计施工阶段,确定桥梁从建成到寿命终结时的总成本。在进行设计方案比选时,不仅要考虑初始建造成本,还要考虑服役期间桥梁检查、养护、维护等发生的各种成本,将“未来的成本”折现为“今天的钱”(即为净现值,net present value, NPV),才可以用于对设计方案评估。从本质上说,不论事先采取基于时间的养护措施还是以后基于性能的改造方案^[3],都要在设计阶段做出经济规划、预算和比较,得出最优的方案,建设单位要对基础设施项目的“全寿命”负责,这样,可避免“短期行为”给国家带来巨大的经济损失。

采用LCCA方法对工程项目评估的原则是保证结构正常服役的前提下 $[BSI > BSI_{min}]$,BSI(bridge service index)为桥梁服务水平指标, BSI_{min} 为桥梁最低可接受服务水平,整个寿命周期内总成本的净现值最小。这样,可以实现技术可靠和经济合理相协调。

寿命周期成本主要由业主成本、用户成本和社会成本组成。业主成本包括初始建造成本、检查和检测成本、维护和加固成本、常规养护成本等;用户成本包括汽车营运成本、由于维护或改造导致交通耽搁所造成的成本损失和其他(汽车运行不舒适)等;社会成本包括事故成本、环境影响成本以及其他(图1.1)。

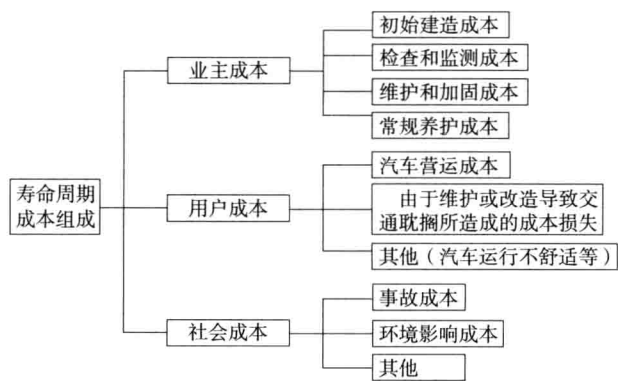


图 1.1 桥梁全寿命周期成本组成图

寿命周期成本计算模型可用式(1.1)表示^[4]:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{\sum_{k \in K} \sum_{j \in J} Cost(k, j, t)}{(1 + r_t)^t} \cdot p_c(k, j, t) \tag{1.1}$$

式中: NPV——一个工程寿命周期成本总和的净现值;
k——成本种类,包括业主成本、用户成本和社会成本;

j ——每一个成本种类的项目,比如业主成本包括材料、人工、设计和荷载试验等成本;
 t ——成本发生的时间;
 T ——分析周期;
 r_t ——该年的基准贴现率(%);
 $p_c(k,j,t)$ ——对应每一种成本发生的概率;
 $Cost(k,j,t)$ ——时间 t 发生的某一具体成本。

业主成本中,初始成本、设计成本和荷载试验成本比较容易确定,而养护成本、将来维护或改造成本比较难确定,目前已成为国内外学者研究的热点,且取得较多的成果。养护成本与桥梁寿命可靠度、将来采用的维护方案有关。

用户成本与桥梁结构所处的路线、桥梁位置、交通状况、桥梁结构的性能状态以及环境等因素相关,比较复杂。本研究通过使用美国交通仿真软件(TSIS),可以较好地模拟桥梁维护时车辆的运行情况、交通延误情况和燃油消耗等参数,可以进行用户成本评估。

目前对社会成本的计算缺乏成熟模型,通过仿真软件模拟,可以计算出由于维护造成交通堵塞所产生的尾气排放指标。

寿命周期成本、维护方案和桥梁服务水平的关系非常复杂,相互影响,可用图 1.2 来描述。

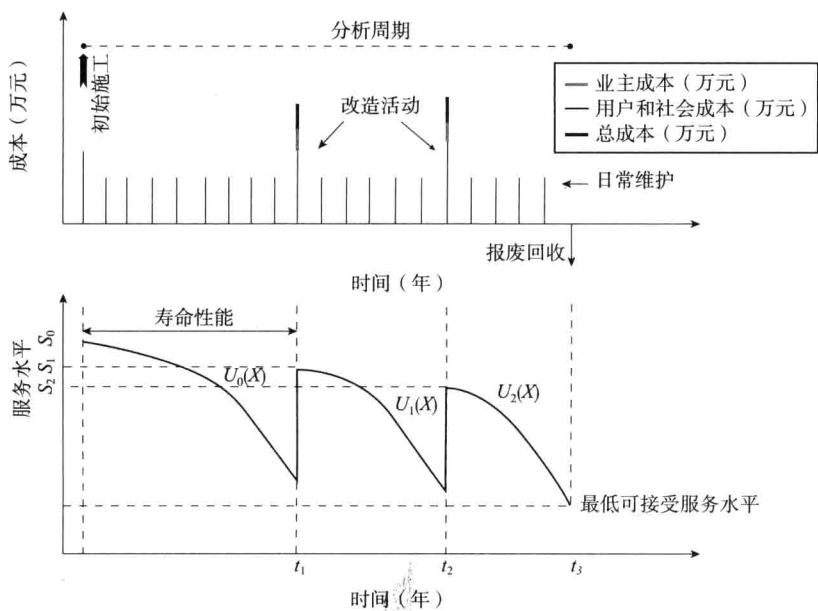


图 1.2 桥梁维护—成本—服务水平的综合关系

在近 20 年里,基于寿命周期成本的公路桥梁设计和分析取得了明显的进步,Frangopol (1999 年)^[5]提出了结合寿命可靠度和寿命周期成本方法的成本—效益桥梁管理方法。接着 Frangopol 等(2001 年)^[6]综述了桥梁管理系统取得的成绩和强调了在寿命周期桥梁管理中运用寿命可靠度和寿命周期成本的重要性。Hassanain 和 Loov(2003 年)^[7]讨论了钢筋混凝土桥梁构件和桥梁体系的成本优化,并综述了钢筋混凝土构件的寿命周期成本分析方法

和发展过程。由 Hawk(2003 年)^[8]主持的“寿命周期成本分析”工程报告(NCHRP)为交通管理部门提供了进行桥梁寿命周期成本分析的指南。Lee 和 Chang(2003 年)^[9]在土木结构寿命期间通过寿命周期总成本最小为目标选择最优维护方案,考虑维护时间和维护方法,得出了一个方便使用且行之有效的方法评估土木结构性能和决策最优维护方案,并指出管理系统中数据的准确性是非常关键的。

Frangopol 教授课题组^[10-11]用改进的事件树分析方法,通过实桥算例说明基于寿命周期成本期望值最小的最优桥梁维护方案的决策过程。Kong 和 Frangopol(2003 年)^[12]评估劣化公路桥梁的维护概率和寿命周期维护成本。而且,他们重点讨论了把桥梁寿命性能评估和寿命周期成本分析在融合在一起得到一个成本—效益平衡的维护方案的重要性。Kong 和 Frangopol(2004 年)^[13]认为,进行退化结构的寿命周期成本分析时,不仅要考虑影响时变可靠度的结构抗力和作用,而且要考虑维护活动的效益,研究了维护活动成本和结构体系可靠度的综合关系。邵旭东和彭建新等(2006 年)^[14]综述了目前使用全寿命成本优化的维护策略和设计方案比选以及所涉及的不确定性参数和方法研究所取得的成果。

1.2.2 桥梁全寿命设计方法

邵旭东和彭建新等(2008 年)^[15]研究了基于多约束的桥梁桥面铺装的维护优化,得出了桥面铺装的最优维护策略,他们^[16-19]提出了桥梁桥面铺装的全寿命优化设计理念,基于全寿命成本现值最小的原理,对桥梁的桥面宽度进行了新的尝试,得出了最优的桥梁车道数,为桥梁全寿命优化设计奠定了基础。

Stewart 和 Mullard(2007 年)^[20]研究了在海水环境或者除冰盐作用下结构的分布变异性,预测了基于随机场理论的桥梁开裂概率和结构第一次维护的时间分布概率。

目前,有不少学者对桥梁优化设计方法进行研究。禹智涛和韩大建^[21]介绍了基于可靠度的桥梁结构优化设计方法的基本思想,讨论了其优化模型,综述了该研究方向的发展动态。屈文俊和张誉^[22]、屈文俊和车惠民^[23]、Frangopol 教授等^[24]提出了劣化结构的优化设计思想,讨论了成本的计算模型,并通过算例验证其可行性。邵旭东和彭建新等^[25]提出了桥梁全寿命设计框架,没有考虑直接维护成本, Lee 和 Cho^[26]、Ang 和 Leon^[27]研究了结构优化设计的寿命周期成本模型以及优化设计框架。马军海的博士学位论文^[28]从桥梁结构、造型等多方面阐述了桥梁的全寿命设计理念,提出了桥梁全寿命设计框架,但是该研究对桥梁结构腐蚀劣化机理和维修成本的研究不够深入。

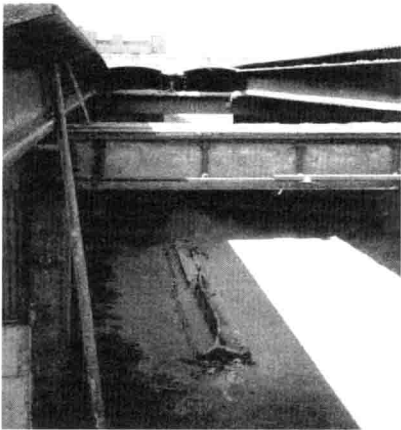
全寿命优化设计理论在国内研究起步较晚,涉及多门学科的交叉使用,将力学、概率论、统计学、经济学、桥梁工程和交通工程有机地结合在一起。此方法可以用于桥型方案的比选、设计参数的确定和材料的选用等不同桥梁决策情况。

1.2.3 碳化环境下桥梁结构腐蚀

众所周知,钢筋的腐蚀是混凝土结构(含预应力混凝土结构)性能的主要威胁。一般来说,由于钢筋腐蚀引起的结构损伤是难以精确估计的,但又需要耗费大量的人力和财力进行维护以保持结构的正常功能。目前由于钢筋腐蚀会引发结构倒塌而备受关注^[29]。Uhlig 和 Revie(1985 年)^[30]和 Fontana(1986 年)^[31]通过研究,定义钢筋腐蚀为“在周围环境作用下钢

筋的劣化,是一个电化学反应。”尽管混凝土对钢筋提供了保护(例如混凝土保护层),但是在碳化影响下,腐蚀仍然可能发生。

据 Saetta 和 Vitaliani(2005 年)^[29],在意大利有一简支预应力混凝土梁在碳化腐蚀下发生了倒塌,该梁是“Y”形梁,高度 90cm,主跨为 16m,悬臂长为 5m。该梁位于意大利 Verona 省的一个企业厂房里面,处于高湿度和高温度状态下。该梁建于 1980 年,在 1997 年忽然倒塌,在服役 17 年后发生事故。现场照片如图 1.3 所示。



a)倒塌的预应力混凝土梁



b)关键截面

图 1.3 预应力混凝土梁的倒塌失效

Saetta 和 Vitaliani(2005 年)^[29]使用试验和数值方法研究该梁的关键截面倒塌原因,得出关键截面的混凝土缺陷和高水平的碳化是梁倒塌的主要原因。

Moreno 等(2006 年)^[32]通过现场调查研究认为,在热带非海洋环境下,碳化腐蚀是钢筋混凝土结构的主要腐蚀方式。通过目测法,研究建筑物在碳化腐蚀环境下的混凝土的破坏形式主要为开裂和剥落,如图 1.4 所示。根据报道,对于耐久性差的混凝土,碳化前端到达钢筋表面的时间为 18~25 年。

很难获得由于碳化导致预应力混凝土梁倒塌事故的准确数字,有些倒塌事故没有报道。而且由于预应力混凝土结构的使用时间并不长,少于 50 年历史,很多的问题还没有暴露。然而,据调查,例如:Szilard(1969 年)^[33]调查了 57 000 座桥梁,有 0.4% 的桥梁记录有腐蚀

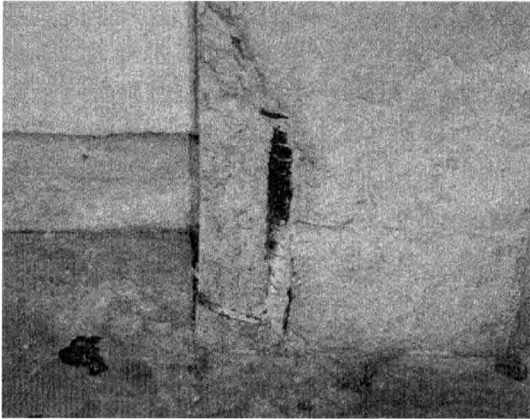


图 1.4 某建筑物的典型损伤^[32]

损伤,有 0.02% 的桥梁记载发生了倒塌事故,包括由腐蚀引起的。另外,Moore 等(1970 年)^[34]实施组织一个桥梁病害现场调查,对 12 000 座预应力混凝土桥梁进行目测,发现大约 0.007% 的桥梁有腐蚀损伤。此外,Schupack(1978 年)^[35]报道,在西方国家到 1977 年为止大约有 3 千万根应力松弛筋用于混凝土桥梁,其中有 0.000 7% 现在正遭遇腐蚀问题。Dunker 和 Rabbat(1990 年)^[36]对美国所有桥梁实施了大规模的状态调查,发现有 24% 的桥梁有结构性的缺陷,有缺陷的桥梁比例还在增长。Nürnberg(1980 年)^[37]通

过现场调查和分析评估了 242 个预应力混凝土结构的腐蚀倒塌事故,这些事故发生在 1951~1979 年。从调查可以看出,预应力混凝土结构具有很好的工作性能。Darmawan(2003 年)^[38]调查认为预应力混凝土结构中实际的倒塌事故是很少的,而且小于 4%。1994 年,Miller(1995 年)^[39]对美国 and 加拿大所有采用节段施工工法的后张拉预应力桥梁进行状态调查,发现 98% 以上的桥梁处于满意状态,几乎没有发现腐蚀问题。Moreton(2001 年)^[40]对欧洲许多国家采用节段施工工法和后张拉预应力混凝土桥梁进行状态调查,发现只有 2% 的结构暴露了腐蚀问题。

以上调查表明,预应力混凝土桥梁结构在腐蚀环境下的性能普遍良好。

FIP^[41-43]和 Allam 等(1994 年)^[44]均认为,基于目前的知识要准确定量地分析预应力钢筋的腐蚀机理和行为是不可能的,但定性分析是可行的。桥梁工程师们正采取措施改进预应力结构。例如:不使用对腐蚀敏感的钢筋;同时正在发展新的预应力系统,以提高预应力的使用效率和减少服役过程中的预应力损失,以邵旭东教授为首的湖南大学桥梁工程研究所提出的新型锚具和二次张拉低回缩预应力技术^[45]正试图解决这个问题。

尽管有诸多改进,但是,Lopes 和 Simões(1999 年)^[46]调查发现预应力结构还是由于腐蚀的存在发生了一些事故,而且趋势正在增长,其主要原因如下。

(1) Szilard(1969 年)^[33]、FIP(1986 年)^[47]和 Podolny(1992 年)^[48]研究认为预应力混凝土结构本身的老化,自从 1950 年预应力技术第一次使用以来,事故一直在发生。而且,根据 Moreton(2001 年)^[40]的调查,结构服役时间越长,腐蚀程度越重。

(2) Lopes 和 Simões(1999 年)^[46]认为更多的混凝土结构建在腐蚀环境下,例如人口密度大的城市, CO_2 的浓度相对高。

(3) 自从工业革命后,世界经济飞速发展,全球温室效应更加显著。由于全球经济的迅速发展和全球气候不断变化,政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)^[49]预测,在 2100 年大气中 CO_2 浓度将超过 $1.88\text{g}/\text{m}^3$ 。因此,碳化将会成为在城市环境影响下的混凝土结构劣化的主要因素之一。

(4) FIP(1996 年)^[50]高强预应力筋的大量使用和大跨桥梁的不断增多,桥梁的安全问题也就愈加重要。

(5) 早期很多预应力结构基于最小重量或最小造价设计,由于混凝土质量差和混凝土保护层厚度薄,导致目前很多预应力结构存在腐蚀问题。

预应力混凝土结构在腐蚀下的倒塌失效是没有预兆的,后果是灾难性的,对于预应力混凝土,目测法基本上是无效的,所以,发展准确的预测模型预测预应力混凝土结构在碳化腐蚀下的行为是非常需要的。到目前为止,还比较缺乏预应力混凝土结构在碳化腐蚀下的预测模型,而且预应力混凝土结构在均匀腐蚀下的结构时变可靠度理论使用的相关报道也是很少的。

1.2.4 碳化环境下桥梁结构性能退化模型

在一般情况下,钢筋混凝土在浇筑养护之后,混凝土孔隙中充满着水泥水解时产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 过饱和溶液,形成很强的碱性环境,pH 值一般在 12 以上。在这种强碱性的环境下,钢筋表面会生成一层致密的氧化膜,使钢筋处于钝化状态,此时钢筋是不会腐蚀的。

但是钢筋混凝土结构在使用过程中,钢筋表面的钝化膜会由于外界酸性物质侵入并与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生化学作用,使混凝土碱性环境下降,当下降至 pH 值为 9.5 以下时,钢筋的钝化膜会受到破坏,从而失去对钢筋的保护作用,造成钢筋钝化状态的丧失,在适当环境条件下引发钢筋的腐蚀,这一过程称为钢筋的脱钝。脱钝一旦发生,则认为开始腐蚀。

预应力混凝土碳化腐蚀一般分为两个阶段。腐蚀开始阶段: CO_2 渗入混凝土,碳化前端到达预应力筋表面;腐蚀扩展阶段:腐蚀发生后,引发混凝土开裂,甚至引起结构抗力降低。

Saetta(2005 年)^[51]综述了现有很多模型模拟 CO_2 渗入混凝土,部分为基于物理过程的分析模型,可以描述 CO_2 的扩散和吸收等。Montemor 等(2002 年)^[52]提出了基于试验的经验模型。Yoon 等(2007 年)^[53]、Alexander 等(2007 年)^[54]、Moreno 等(2006 年)^[32]和 Stewart 等(2002 年)^[55]根据实测数据得出经验模型,不同的模型强调的重点不一样,但是,真实的碳化过程非常复杂。

1) CO_2 浓度模型

在预测混凝土碳化损伤过程中评估将来的气候变化是非常重要的。在工业革命前, CO_2 浓度大约在 $0.498 \sim 0.545 \text{g/m}^3$ ^[56]。自从第二次工业革命后,全球经济快速发展,人口迅速增长,相应的 CO_2 浓度也保持稳定增长,如图 1.5 所示。自从 1950 年这种趋势越来越明显,大气中 CO_2 浓度以每年 0.5% 的比例增长。Keeling 和 Whorf(2000 年)^[57]研究发现,在南极其他无污染的地方平均 CO_2 浓度从 1971 年的 0.62g/m^3 增长到 2000 年的 0.696g/m^3 。长期的 CO_2 浓度数据是非常缺乏的。据 Stewart 等(2002 年)^[55]报道,1999 年捷克的布尔诺科技大学对环境和 CO_2 浓度采用红外线探测法进行跟踪测试,每一个小时测试一组数据,根据测试数据,最小的 CO_2 浓度为 0.658g/m^3 ,最大的 CO_2 浓度为 1.081g/m^3 。到 2000 年全球大气中 CO_2 浓度大约在 0.686g/m^3 ^[49]。文献[51-55]发现, CO_2 浓度是随时间和空间变化的。

预测混凝土结构碳化率时需要计算 CO_2 浓度和在计算中反应温度的影响。使用理想气体状态和 Boyle - Charles' 原理,用式(1.2)将 CO_2 浓度转化为物质的量浓度:

$$C_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2} P}{RT} \quad (1.2)$$

式中: C_{CO_2} ——是物质的量浓度 (mol/m^3);

V_{CO_2} —— CO_2 的体积分数;

p ——大气压力 (atm)^①;

T ——温度 (K);

R ——气体常数 ($= 82.06 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{atm} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)。

使用式(1.2),再结合 CO_2 的摩尔质量可以将物质的量浓度转化为气体质量浓度。

Yoon 等(2007 年)^[53]使用(www.me.go.kr)公布的数据得到了 21 世纪在温度为 12.2°C 时 CO_2 浓度的变化规律,如图 1.5 所示,并拟合了一个回归方程:

$$C_{\text{CO}_2}(t) = 12.61 \ln t - 95.172, 2\,000 < t < 2\,100 \quad (1.3)$$

式中: C_{CO_2} ——大气中 CO_2 的浓度 ($10^{-3} \text{ kg}/\text{m}^3$);

t ——时间。

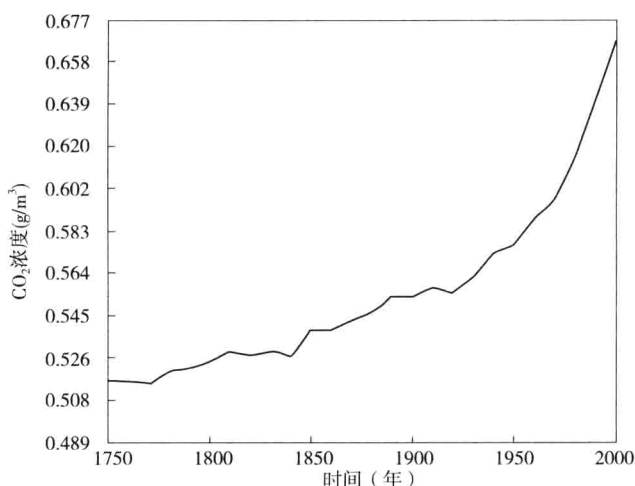


图 1.5 CO_2 浓度变化^[53]

2007 年,政府间气候变化专门委员会(IPCC)报告了将来在各种经济发展模式下 CO_2 浓度的变化规律,本书使用其提供的 CO_2 浓度数据,得到在未来 100 年 CO_2 浓度的变化规律和浓度变化的上界和下界,第 2 章将详细描述。

2) 腐蚀开始时间模型

CEB^[58]提出了 CO_2 的扩散模型,并利用 Fick 第一定律预测碳化深度。研究表明,碳化深度是时间的开方根函数。Kersner^[59]等综述了目前许多已有的碳化预测模型,同时文献[53,60]提出了一些碳化深度预测模型。Yoon 等(2007 年)^[53]提出的碳化模型可以考虑许多影响参数,更为重要的是,能够体现 CO_2 浓度的时间变异性。该数学模型假设碳化前端等于碳化深度,以及碳化前端的 CO_2 浓度等于 0。该模型能够体现 CO_2 的聚集、渗透和扩散。

大多数碳化模型使用 CO_2 扩散模型,该模型由 CEB^[58]提出,用 Fick 第一定律预测碳化深度,如式(1.4)所示。

① 1atm = 101.325kPa。