

城市地下混凝土结构 耐久性检测及寿命评估

唐孟雄 陈晓斌 编著

中国建筑工业出版社

013029641

TU9
05

城市地下混凝土结构耐久性检测及寿命评估

唐孟雄 陈晓斌 编著



中国建筑工业出版社



北航

C1635490

TU9
05

173028010

图书在版编目(CIP)数据

城市地下混凝土结构耐久性检测及寿命评估/唐孟雄,陈晓斌
编著. —北京:中国建筑工业出版社,2012. 4
ISBN 978 - 7 - 112 - 14127 - 2

I. ①城… II. ①唐…②陈… III. ①城市建设—地下建筑物—
混凝土结构—耐用性—研究 IV. ①TU9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 041981 号

《城市地下混凝土结构耐久性检测及寿命评估》一书是广州市建筑科学研究院有限公司城市地下空间结构耐久性科研攻关课题组的主要研究成果。针对南方沿海城市地下结构耐久性侵蚀环境特点,在工程调查、试验研究和理论分析基础上,较系统地阐述地下结构耐久性环境侵蚀因素、地下结构耐久性检测技术、地下结构耐久性剩余寿命评估理论与应用技术。全书主要内容:城市地下结构耐久性状况调查、检测方法、耐久性环境侵蚀因素分类、氯盐侵蚀机理及寿命预测关键技术、氯盐及硫酸共同侵蚀特征、城市地下结构耐久性寿命预测方法、全周期寿命预测评估方法在城市地下结构中的应用。

全书较系统地介绍了城市地下结构耐久性研究、检测技术和剩余寿命评估理论和应用案例,该书可作为地下结构、市政工程专业相关地下结构耐久性研究、设计、施工和检测的工程技术人员和高校师生参考使用。

* * *

责任编辑 常 燕

城市地下混凝土结构耐久性检测及寿命评估

唐孟雄 陈晓斌 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

广州恒伟电脑制作有限公司制版

北京京丰印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:10% 字数:259 千字

2012 年 8 月第一版 2012 年 8 月第一次印刷

定价:28.00 元

ISBN 978 - 7 - 112 - 14127 - 2
(22174)

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)

前言

全球环境恶化,气候变暖,温室效应日益严重,过度消耗地球有限资源,威胁人类生存环境。调查表明,导致全球气候变暖罪魁祸首的 CO_2 总量有 1/4 来源于工程行业,其中最重要的部分来自混凝土消耗。提高混凝土的耐久性有利于延长混凝土的寿命,对减少结构的修补及拆除、减少建筑垃圾、提高资源利用率具有重要意义。国内外已有工程实践证明,由于耐久性导致混凝土结构使用寿命缩短的损失巨大。所以,提倡混凝土结构耐久性具有重要的现实意义。城市地下结构所处环境复杂,需要在更多的环境因素(包括地下水、盐、电流、 CO_2 等)作用下抵抗耐久性侵蚀,所以,城市地下结构耐久性更加值得引起关注。

本书针对南方沿海城市地下结构耐久性侵蚀环境特点,在工程调查、试验研究和理论分析基础上,阐述地下结构耐久性环境侵蚀因素、地下结构耐久性检测技术、地下结构耐久性剩余寿命评估理论与应用技术,全书共分为 9 章。第 1 章概述,主要论述了混凝土结构耐久性研究概况,指出了城市地下结构耐久性研究及技术应用中存在的问题。第 2 章针对不同类型的城市地下结构,提出了耐久性检测的基本方法。第 3 章综合调查了广州典型地下结构的耐久性状况,分析了城市地下结构耐久性破坏环境因素,并划分了破坏因素的强度等级。第 4 章着重分析了城市地下结构混凝土碳化环境特点,对常用的碳化预测模型进行了工程适用性分析,提出了城市地下结构碳化防护措施建议。第 5 章在工程调查、理论分析及模拟侵蚀环境的室内试验基础上,论述了城市地下结构在氯盐侵蚀条件下的劣化特征,从影响因素、劣化机理等方面进行了详细阐述。综合考虑了混凝土对氯离子的结合及吸附性影响,通过试验对比推荐了地下结构混凝土钢筋锈蚀临界浓度值为 0.05%,为工程应用中氯离子侵蚀寿命预测提供了依据。第 6 章论述了城市地下结构在硫酸盐及氯盐共同侵蚀下的劣化特征及劣化机理,提供城市地下结构耐久性混凝土配比设计要素。第 7 章采用力学模型模拟了钢筋混凝土锈胀开裂过程,建立混凝土保护层钢筋锈胀开裂模型,探讨了钢筋锈蚀发生到保护层开裂阶段寿命预测计算问题。第 8 章将城市地下结构的耐久性寿命组成划分为初始锈蚀阶段和锈胀开裂阶段,论述了针对碳化侵蚀、氯离子侵蚀和硫酸盐侵蚀的城市地下结构耐久性剩余寿命预测方法。第 9 章探讨在地下空间结构建设和维护中全周期结构寿命评估方法,可有效指导城市地下结构建设和耐久性维护。

全书主要针对南方沿海城市地下结构主要耐久性侵蚀因素,系统地介绍了城市地下结构耐久性研究的内容和技术应用案例,该书可作为地下工程和市政工程相关地下结构耐久性研究、设计、施工、检测技术人员和高校师生参考使用。

本书由唐孟雄、陈晓斌编著,本书的科研工作由唐孟雄任总负责人,现场调查和检测工作由陈晓斌博士牵头。唐孟雄起草第 2 章,其他各章主要由陈晓斌起草,全书由唐孟雄统稿和校稿。参与本书内容相关科研项目研究人员还有史海鸥、田美存、马昆林、周治国、邹扬帆、胡贺松、李冠东等,史海鸥组织和参与广州地铁一、二号线耐久性调查工作,田美存组织和参与广州九号工程的耐久性调查和现场检测工作,中南大学马昆林博士负责地下结构耐久性室内试验工作,周治国、邹扬帆、胡贺松、李冠东等参与广州地铁一、二号线耐久性调查

工作及广州九号工程的耐久性调查工作。本书的研究工作得到了广州市建设科技基金项目“广州地下结构剩余寿命评估预测技术研究”的资助,特表感谢。此外,在其他学者研究成果基础上,引申入城市地下结构工程领域,并引用他们在混凝土结构耐久性方面的研究成果,特别是金伟良教授、刘秉京教授、牛荻涛教授、张誉教授等研究成果,凡引用处分别给予了标注,特表感谢。

由于本书作者水平有限,旨在抛砖引玉,寄予希望更多的研究人员和工程技术人员一起来关注百年大计的城市地下结构耐久性问题,不当之处还请指正。

唐孟雄 陈晓斌

2011年7月

目 录

第1章 概 论	1
1.1 引 言	1
1.2 城市地下结构类型	2
1.3 结构耐久性概况	4
1.4 寿命预测方法	5
1.5 城市地下结构耐久性	7
1.6 主要内容	8
第2章 城市地下结构耐久性检测	11
2.1 引言	11
2.2 矿山法隧道结构耐久性检测	13
2.3 盾构法隧道耐久性检测	14
2.4 隧道结构耐久性评估	16
2.5 地下平面结构物耐久性检测	20
2.6 地下平面结构物耐久性评估	24
第3章 城市地下结构耐久性调查实例	27
3.1 广州耐久性环境因素	27
3.2 广州九号工程耐久性调查	28
3.3 广州地铁一号线隧道耐久性调查	43
第4章 城市地下结构碳化侵蚀分析	54
4.1 地下结构碳化环境	54
4.2 混凝土碳化机理	55
4.3 碳化速度影响因素	56
4.4 碳化深度计算模型	57
4.5 地下结构防碳化措施	64
第5章 城市地下结构氯盐侵蚀劣化	67
5.1 氯盐危害及侵蚀机理	67
5.2 氯离子扩散基本理论	69
5.3 氯盐侵蚀机理实验	73

5.4 氯离子扩散影响因素	75
5.5 临界氯离子浓度值	84
5.6 微观结构分析	98
5.7 氯盐侵蚀保护技术	101
第6章 城市地下结构硫酸盐侵蚀劣化	105
6.1 引言	105
6.2 硫酸盐侵蚀实验设计	106
6.3 侵蚀影响因素	109
6.4 硫酸盐侵蚀分析	114
6.5 与氯盐共同侵蚀分析	117
6.6 微观结构分析	119
第7章 混凝土保护层锈胀开裂分析	124
7.1 引言	124
7.2 锈胀开裂模拟	124
7.3 基于弹性的开裂模型	125
7.4 基于弹塑性的开裂模型	127
第8章 城市地下结构耐久性寿命预测方法	134
8.1 引言	134
8.2 地下结构寿命组成	135
8.3 碳化侵蚀寿命预测	136
8.4 氯盐及硫酸盐侵蚀寿命预测	140
8.5 工程应用实例	141
第9章 城市地下结构全周期寿命经济评估	147
9.1 引言	147
9.2 经济评价理论	147
9.3 经济评价算例	149
9.4 实例分析	156
附录A 探地雷达检测方法	158
A.0.1 工作原理	158
A.0.2 电磁波传播理论	160
A.0.3 介电常数	160
A.0.4 测线布置	162
结 语	163

第1章 概 论

1.1 引 言

全球环境恶化,气候变暖,温室效应日益严重,过度消耗地球有限资源,威胁人类生存环境。调查表明,导致全球气候变暖罪魁祸首的 CO_2 总量有 $1/4$ 来源于工程行业,其中最重要的部分来自混凝土消耗。提高混凝土的耐久性有利于延长混凝土的寿命,对减少结构的修补及拆除、减少建筑垃圾、提高资源利用率具有重要意义。国内外已有工程实践证明,由于耐久性导致混凝土结构使用寿命缩短的损失巨大。资料表明^[1]美国混凝土工程总造价 6 万亿美元,每年用于混凝土工程维修和重建的费用约 3000 亿美元,仅 2001 年修复由于耐久性劣化而损坏的桥梁就耗资 910 亿美元。英国每年用于修复钢筋混凝土结构的费用达 200 亿英镑。目前,日本每年仅用于混凝土房屋维修的费用为 400 亿日元。正因为如此,欧美发达国家对混凝土结构的耐久性问题十分关注,开展了许多科学研究。所以,提高混凝土结构耐久性具有重要的现实意义,研究混凝土结构耐久性意义重大。

混凝土和钢筋并非无限耐久性建筑材料,它具有一定使用寿命,需要进行保养维护,有耐久性概念。根据资料调查^{[2][3]},混凝土结构设计寿命一般为 50~70 年,大多数国家对其使用寿命作了明确规定。欧洲共同体规范定为:临时结构为 10 年,可替换结构构件为 10~15 年,农用及类似结构为 15~30 年,房屋建筑及其他普通结构为 50 年,纪念性建筑物、桥梁及其他土木结构为 100 年。美国标准对桥梁使用寿命规定为 75~100 年。《结构可靠性原则》标准(ISO/DIS2394)规定临时结构小于 5 年,一般房屋建筑 25~75 年,设计工作年限较长的建筑物为 50~150 年。日本建筑学会对结构使用寿命要求分为 3 个等级:长期等级的年限为 100 年,标准等级的年限为 65 年,一般等级的年限为 30 年。英国规定桥梁、隧道等交通运输结构使用寿命为 120 年,海洋工程为 40 年,一般房屋为 60 年,国家机构及纪念性建筑为 200 年。

中国《建筑结构可靠度设计统一标准》^[4]规定:临时结构为 5 年,易于替换的结构为 25 年,普通房屋和构筑物为 50 年,纪念性或者重要的建筑物为 100 年。某些重要建筑在耐久性方面提出了更高的要求 and 设想,其中新建英国国家图书馆寿命为 250 年,三峡工程提出了使用寿命 500 年的要求(图 1-1)。这些设计要求都建立在混凝土结构耐久性科研成果的基础上。

许多学者对混凝土结构耐久性破坏因素进行了总结。早在第二届混凝土耐久性国际学术会议上,P. K. Mehta^[5]归纳了影响混凝土耐久性的主要因素:钢筋腐蚀、冻融破坏和侵蚀环境的物理化学作用。英国在全国调查统计了 271 个混凝土结构工程破坏事例^[6],统计结果见表 1-1 所示。统计结果得出氯离子和混凝土碳化引起的钢筋腐蚀破坏占 50%,冻融循环破坏占 10%,碱骨料反应破坏占 9%,环境介质化学侵蚀破坏占 4%。佐证了 Mehta 教授



图 1-1 标志性建筑物的高耐久性寿命要求

(a) 英国国家图书馆;(b) 中国三峡大坝

总结的规律,其中氯离子及碳化引起的钢筋锈蚀是耐久性破坏的主要因素。

英国混凝土结构耐久性破坏因素概率统计

表 1-1

耐久性因素	氯离子引起锈蚀	碳化引起锈蚀	钢筋腐蚀	冻融循环	碱骨料反应	内部氯引起锈蚀	收缩和沉降	化学侵蚀	其他
破坏比例	33%	17%	10%	10%	9%	5%	5%	4%	7%

城市地下结构所处环境复杂,需要在更多的环境因素(包括地下水、盐、电流、 CO_2 等)作用下抵抗耐久性侵蚀,所以,城市地下结构耐久性研究显得更有意义。

广州地处华南地区,属亚热带季风气候的沿海地区,距海 100 km 左右,常年炎热,四季多雨潮湿,有着较高概率的干湿循环变化。广州地区地下水受海水影响,氯离子和硫酸根离子含量较高,并且区域复杂的地质构造,有利于地下水的渗透。这些自然条件营造了较复杂的地下结构侵蚀环境。城市地下结构耐久性破坏较严重,典型的地下空间混凝土结构耐久性破坏见图 1-2 所示。

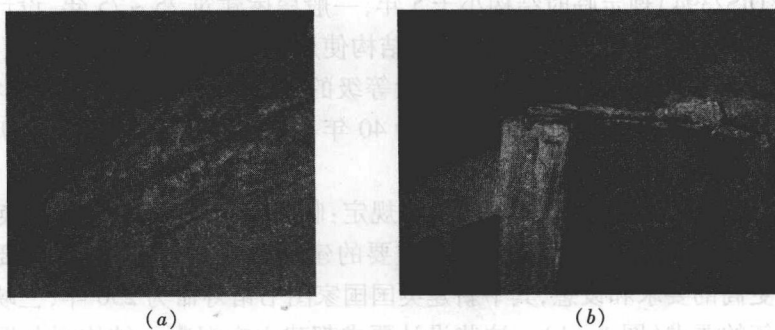


图 1-2 地下混凝土结构耐久性破坏实例

1.2 城市地下结构类型

21 世纪是城市地下空间开发和利用大发展的时代,不同用途和形式的城市地下结构不断涌现。按照地下结构的用途分类主要有民用用途、公用用途、军事用途和一些特殊埋藏用

途的城市地下空间。城市地下结构的主要表现形式有地下室、地下车库、大型地下商场、地下影院、各种用途的市政隧道、地铁隧道、人防工程、大型储仓洞室等,见图 1-3。

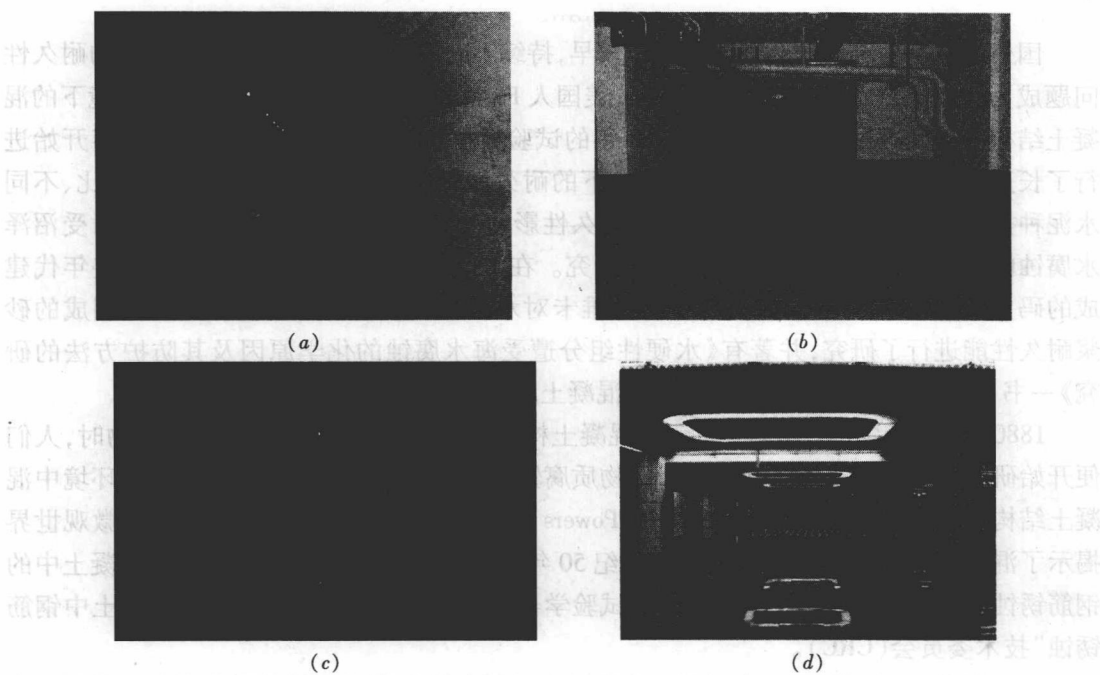


图 1-3 常见的城市地下结构形式

(a) 人防地道; (b) 民用地下室; (c) 地铁隧道; (d) 大型地下商场

耿永常认为^[7]城市地下空间结构的主要结构形式有以下几种,包括:矩形结构、圆形结构、直墙拱形结构、敞开式结构等,见图 1-4。

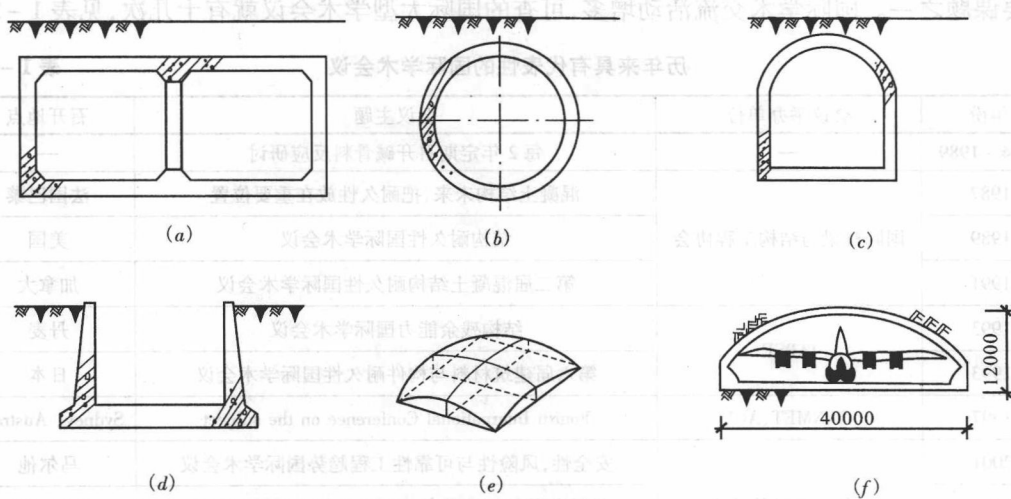


图 1-4 城市地下空间结构形状

(a) 矩形; (b) 圆形; (c) 直墙拱形; (d) 敞开式结构; (e) 正方形底球壳; (f) 40m 跨轰炸机库拱结构

1.3 结构耐久性概况

国外对混凝土结构耐久性研究起步较早,持续不断的日益关注,使得混凝土结构耐久性问题成为研究热点^{[8][9]}。早在1925年,美国人F. M. Miller开始了在硫酸侵蚀环境下的混凝土结构长期腐蚀试验,获得了长达50年的试验数据。Kwapis和Glover从1934年开始进行了长达30年的混凝土结构在海水环境下的耐久性试验,提出了不同混凝土配合比、不同水泥种类及施工缺陷对港口混凝土结构耐久性影响的见解。德国混凝土结构协会对受沼泽水腐蚀的混凝土结构耐久性破坏进行了研究。在19世纪40年代,为了探索在那些年代建成的码头被海水破坏的原因,法国工程师维卡对水硬性石灰以及用石灰和火山灰制成的砂浆耐久性能进行了研究,并著有《水硬性组分遭受海水腐蚀的化学原因及其防护方法的研究》一书,是研究海水对水硬性胶凝材料混凝土腐蚀破坏的第一部专著。

1880~1890年期间,当第一批钢筋混凝土构件问世,并首次应用于工业建筑物时,人们便开始研究钢筋混凝土能否在化学活性物质腐蚀条件下安全使用以及在工业大气环境中混凝土结构的耐久性能问题^[10]。1945年,Powers研究了混凝土冻融破坏机理,他从微观世界揭示了混凝土结构冻融破坏过程。20世纪50年代,前苏联学者莫斯科文等人对混凝土中的钢筋锈蚀进行了研究。国际材料与结构试验学会(RILEM)于1960年成立了“混凝土中钢筋锈蚀”技术委员会(CRC)。

1970年第六届国际预应力混凝土会议提出了耐久性与强度同等重要的观点。美国国家科学基金会(NSF)从1986年开始重点资助开展结构耐久性研究。美国混凝土学会(ACI)成立了混凝土耐久性委员会(ACI201),指导混凝土结构耐久性研究工作。日本从20世纪70年代开始重视混凝土结构耐久性研究,1988年日本土木学会混凝土委员会成立耐久性设计委员会。随着混凝土结构的广泛使用,混凝土结构的耐久性问题成为国际学术会议讨论的重要课题之一。国际学术交流活动增多,可查的国际大型学术会议就有十几次,见表1-2。

历年来具有代表性的国际学术会议

表 1-2

年份	会议举办单位	会议主题	召开地点
1974~1989	—	每2年定期召开碱骨料反应研讨	—
1987	国际桥梁与结构工程协会	混凝土结构未来,把耐久性放在重要位置	法国巴黎
1989		结构耐久性国际学术会议	美国
1991		第二届混凝土结构耐久性国际学术会议	加拿大
1993	IABSE	结构残余能力国际学术会议	丹麦
1993		第六届建筑材料与构件耐久性国际学术会议	日本
1997	CANMET、ACI	Fourth International Conference on the subject	Sydney, Australia
2001	国际桥梁结构协会	安全性,风险性与可靠性工程趋势国际学术会议	马尔他
2005		机械荷载与环境荷载作用下混凝土结构耐久性	中国青岛
2007		超高耐久性混凝土结构技术国际研讨会	中国武汉
2008	CI PREMIER LTD.	3rd International Conference on the Concrete Future	中国烟台

续表

年份	会议主办单位	会议主题	召开地点
2008	IA - CONCREEP and Japan Concrete Institute	8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability	日本
2008	ACI、CCES、JSCE、NSFC、RILEM	Conference on Durability of Concrete Structures. ICDCS 2008	中国杭州

经过长期不懈努力,不同领域颁布了众多的有关混凝土结构耐久性的设计技术标准^[11]。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》。1980年国际标准化委员会、混凝土和钢筋混凝土委员会、预应力混凝土委员会提出了影响混凝土耐久性的环境条件级别和指标。1994年国际标准组织成立 TC59/SC31WG9 工作小组,制定了结构耐久性设计的国际统一标准。ASTM 与 NBS(美国标准局)制定了混凝土耐久性研究条例。1988年日本土木学会混凝土委员会耐久性设计委员会提出了《耐久性设计基本方法指南》。英国、加拿大、德国等对混凝土使用寿命、设计使用寿命给出了明确定义,并提出了使用寿命预测方法。

我国对钢筋混凝土耐久性问题研究始于 20 世纪 60 年代初,当时南京水利科学研究院对钢筋锈蚀进行了研究。从 80 年代起,混凝土结构耐久性问题日益引起重视,开始有组织、系统地开展研究。中国土木工程学会于 1982 年、1983 年连续召开了两次全国混凝土耐久性学术会议,为混凝土结构规范的科学修订奠定了基础。铁道部、交通部和中國土木工程学会等有关单位结合工程的需要对混凝土结构的腐蚀进行了大量实验研究,积累了丰富的实验数据。1991 年 12 月在天津成立了全国混凝土耐久性小组,1994 年国家科委组织了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”。之后,清华大学、浙江大学及青岛理工大学等对混凝土结构耐久性进行了深入研究。目前,混凝土结构耐久性研究已成为我国工程的热点问题,研究课题延伸至各个领域。

我国混凝土结构耐久性研究已经走过了大半个世纪,混凝土耐久性研究可能呈现如下趋势:

- (1) 建立混凝土材料的全寿命周期的优化预测模型,为混凝土结构设计、施工和养护提供依据。
- (2) 对于混凝土耐久性由单因素作用下的耐久性劣化问题,将深入到多因素综合作用下混凝土耐久性研究。
- (3) 混凝土耐久性研究逐步从定性化向半定量化、定量化发展,取得能够较准确预测结构耐久性寿命及实用耐久性指标的成果。
- (4) 探索混凝土结构耐久性检测新方法,开发能够适应地方环境条件下的耐久性检测及评价方法,制定检测规程。
- (5) 开展极端条件下混凝土结构耐久性研究及开发极端条件下新混凝土耐久性材料。

1.4 寿命预测方法

钢筋混凝土结构耐久性破坏的直接原因是钢筋锈蚀产生的锈蚀胀裂,城市地下结构中,

典型的钢筋锈蚀胀裂见图 1-5 所示。

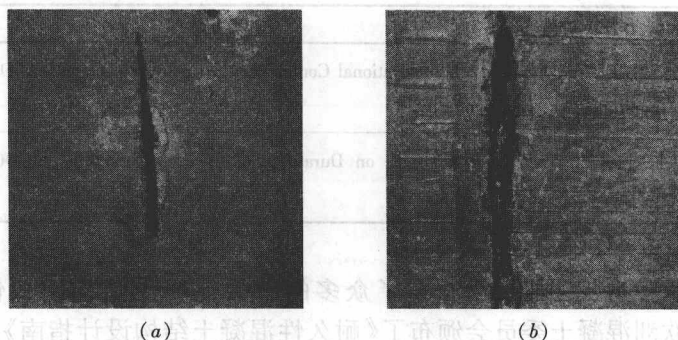


图 1-5 地下混凝土结构耐久性破坏实例

在钢筋锈蚀造成的混凝土结构损伤寿命预测方面,国内外许多学者进行了研究。Tuutti^[12]提出了基于钢筋锈蚀的结构构件使用寿命两阶段预测模型,Henrisen^[13]等学者后来对该模型进行了细化和改进。Morinaga^[14]以氯离子引起钢筋锈蚀以致混凝土出现裂缝为失效准则,由试验建立纵裂时的钢筋锈蚀量与钢筋锈蚀速度关系来预测构件寿命。Browne^[15]以 Fick 扩散定律为基础,建立混凝土中 Cl^- 浓度与扩散的时间、扩散深度之间关系的数学模型预测构件寿命。Funahashi^[16]针对停车场预应力构件的寿命问题,提出以钢筋开始锈蚀作为寿命终结的标志,通过有限差分法计算构件使用寿命。印度学者 Raju^[17]采用加速锈蚀试验方法,通过钢筋混凝土构件的阳极电解分析来预测使用寿命。Shamsad Ahmad^[17]等学者基于损伤累积理论,从现场钻取含锈蚀钢筋的芯样,通过简单的劈裂试验和快速锈蚀试验预测结构构件使用寿命。

国内,在钢筋开始腐蚀时间的研究方面,邱小坛^[18]、牛荻涛^[19]、许丽萍^[20]、黄土元^[21]、钱稼茹^[22]等根据试验分别提出了不同的计算模型。董振平^[23]对各种环境下混凝土中钢筋开始锈蚀和混凝土碳化深度之间的相对关系进行了试验研究,给出了钢筋开始锈蚀时不同碳化深度的具体结果。潘振华、牛荻涛^[24]利用电化学快速锈蚀方法,对钢筋锈蚀开裂的条件进行了试验研究。阎培渝^[25]等采用宏电池腐蚀方法研究了在不同湿度条件下氧气扩散对高含氯混凝土中钢筋腐蚀速率的影响,得到在不同条件下钢筋腐蚀反应的控制因素。刘西拉^[26]以纵向开裂截面损失率达 5% 作为寿命终点,采用数学模拟方法结合方差缩减技术进行寿命预测。屈文俊^[27]假设氯离子侵蚀的坑蚀数服从泊松过程和凹坑深度服从截尾指数分布,按随机变量极小值的统计分布理论,建立了氯离子侵蚀下的混凝土构件寿命模型。李田^[28]在单因素预测模型的基础上,采用 Monte - Carlo 法建立在多因素综合作用下的抗力衰减过程分析模型。

依据文献调研^{[17]~[26]},对于耐久性寿命终止条件问题,有的研究者提出以保护层出现 0.15~0.25mm 裂缝宽度或钢筋截面损失率达 1% 作为耐久性极限状态标志。有的研究者建议以纵向裂缝宽度达到 0.3mm 作为使用寿命的终止。也有人提出以钢筋腐蚀深度达到钢筋肋高 64% 作为判断粘结破坏的标准。日本建筑学会以因钢筋锈蚀引起截面减小,使钢筋应力达到屈服应力的时间作为耐久性极限。

国内外对结构构件寿命的预测方法做了很多研究,采用经验法、类比法、概率分析法、快速试验法、网络法、动态分析法、随机方法来预测结构构件的寿命。寿命准则是界定混凝土

土结构寿命的条件,对此也有多种意见和看法。在混凝土结构耐久性评估中,主要有碳化条件寿命准则、锈胀开裂条件准则、锈胀裂缝宽度与锈蚀量条件准则、承载力条件寿命准则、结构安全系数条件准则和综合条件寿命准则^[29]。

一般认为钢筋锈蚀、碱骨料反应、化学侵蚀、冻融、碳化等是影响混凝土材料耐久性的主要因素,其中氯离子渗透和混凝土碳化是造成钢筋锈蚀的主要因素。自20世纪80年代起,许多研究者着力于研究氯离子渗透环境下钢筋混凝土结构耐久寿命的预测问题,提出了不同的寿命预测方法。

英国, Somerville^[30]从使用寿命终结角度出发,将混凝土结构寿命分为技术性使用寿命、功能性使用寿命和经济性使用寿命。Geiker^[31]等人认为,钢筋混凝土耐久寿命应为: $t = t_1 + t_2 + t_3$, 其中, t_1 为稳定状态所经过的湿度迁移时间; t_2 为暴露于空气中的混凝土钢筋处氯离子达到临界浓度值所经过的时间; t_3 为达到必须大修状态所经过的时间。Maage^[32]等利用 Fick 第二扩散定律,得出了一个基于氯离子渗透的现有混凝土耐久寿命的半经验预测模型。在氯离子环境下混凝土的耐久寿命通常分为诱导期、发展期和失效期。从20世纪80年代以来,国内外关于氯离子耐久寿命研究主要集中在诱导期。

国内,余红发等人^[33],在 Fick 第二扩散定律、Clear 经验模型和 Maage 半经验模型的基础上,结合自己的现场观测和试验研究,提出了考虑混凝土氯离子结合能力、混凝土氯离子扩散系数时间依赖性以及混凝土材料在使用过程中内部缺陷的影响等多重因素作用下的混凝土氯离子扩散理论模型。牛荻涛等人对混凝土结构寿命预测进行了长期的研究,提出了碳化寿命准则、锈胀开裂准则、锈胀裂缝宽度与锈蚀量寿命准则,并在实际工程中进行了应用。

1.5 城市地下结构耐久性

提高混凝土结构耐久性的技术措施和结构使用寿命预测是耐久性研究的重要问题。从现有研究成果来看,针对城市地下结构耐久性研究工作开展比较少,部分研究成果主要来自城市的地铁隧道、海底隧道混凝土耐久性研究。

目前,国内学者主要从杂散电流产生和腐蚀机理出发,研究得到地铁杂散电流的计算方法,研制高阻抗混凝土,采取多种工程手段,减低杂散电流的产生,从而使地铁混凝土结构免遭破坏。孙钧^[34]等人以翔安海底隧道为工程背景,在衬砌结构服务寿命理论预测研究的基础上,通过室内试验,对海底隧道混凝土结构耐久性及寿命评估方面进行了研究。杜应吉^[35]专门研究了隧道混凝土结构在杂散电流作用下的耐久性问题,研制出能有效抵抗地铁杂散电流腐蚀的高性能混凝土。周晓军^[36]^[37]等人通过研究地铁杂散电流对钢筋的电化学腐蚀原理,得出钢筋的电化学当量和腐蚀速率受其所在腐蚀环境介质的影响。林江^[38]等人结合深圳地铁工程杂散电流的防护问题,较深入地分析了杂散电流的产生机理和现实危害,并研制出基于粉煤灰混凝土的地铁工程专用高阻抗混凝土。贺鸿珠、陈志源^[39]等人,通过掺加粉煤灰等掺合料后混凝土抗杂散电流腐蚀的试验研究,得出了混凝土中的杂散电流是离子流,杂散电流腐蚀破坏机理。虽然国内外学者对杂散电流对城市地铁隧道混凝土耐久性影响已有了一些研究成果,但是还不够深入。尤其是在杂散电流影响下地铁混凝土耐久性评价及其耐久寿命预测现有研究成果很少,尚未见到较成熟的杂散电流单因素下混凝土

耐久寿命的预测模型。

1.6 主要内容

针对南方沿海城市地下结构耐久性侵蚀环境特点,在工程调查、试验研究和理论分析基础上,阐述地下结构耐久性环境侵蚀因素、地下结构耐久性检测技术、地下结构耐久性剩余寿命评估理论与应用技术。全书主要内容:城市地下结构耐久状况调查方法、耐久性环境侵蚀因素分类、氯盐侵蚀机理及寿命预测关键技术、氯盐及硫酸共同侵蚀特征、城市地下结构耐久性寿命预测方法、全周期寿命预测评估方法在城市地下结构中的应用。

第1章概述,主要论述了混凝土结构耐久性研究概况,指出了城市地下结构耐久性研究及技术应用中存在的问题。第2章针对不同类型的城市地下结构,提出了耐久性检测的基本方法。第3章综合调查了广州典型地下结构的耐久状况,分析了城市地下结构耐久性破坏环境因素,并划分了破坏因素的强度等级。第4章着重分析了城市地下结构混凝土碳化环境特点,对常用的碳化预测模型进行了工程适用性分析,建议了城市地下结构碳化防护措施。第5章在工程调查、理论分析及模拟侵蚀环境的室内试验基础上,论述了城市地下结构在氯盐侵蚀条件下的劣化特征,从影响因素、劣化机理等方面进行了详细阐述。综合考虑了混凝土对氯离子的结合及吸附性影响,通过试验推荐了地下结构混凝土钢筋锈蚀临界浓度值为0.05%,为工程应用中氯离子侵蚀第一阶段寿命预测计算提供了依据。第6章论述了城市地下结构在硫酸盐及氯盐共同侵蚀下的劣化特征及劣化机理,提供城市地下结构耐久性混凝土配比设计要素。第7章采用力学模型模拟了钢筋混凝土锈胀开裂过程,建立混凝土保护层钢筋锈胀开裂模型,探讨了钢筋锈蚀发生到保护层开裂阶段寿命预测计算问题。第8章将城市地下结构的耐久性寿命组成划分为初始锈蚀阶段和锈胀开裂阶段,论述了针对碳化侵蚀、氯离子侵蚀和硫酸盐侵蚀的城市地下结构耐久性剩余寿命预测方法。第9章探讨地下空间结构建设和维护中全周期结构寿命评估方法,可有效指导城市地下结构建设和耐久性维护。

主要参考文献:

- [1] 陈改新. 混凝土耐久性的研究应用和发展[R]. 第七届全国混凝土耐久性学术会议论文集[C]. 2008: P22-29.
- [2] 周明华, 张蓓. 对结构耐久性影响因素的几点思考[R]. 第七届全国混凝土耐久性学术会议论文集[C]. 2008: P560-566.
- [3] 国际标准. 《结构可靠性原则》ISO/DIS 2394-46, 1994.
- [4] 国家标准. 《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068-2001.
- [5] P. K. Mehta, S. Langley, Monolith Foundation; Built to last a 100 years[R]. Concrete international, 2000, 07.
- [6] Collepardi M., Marciali A. and Tueeriziani R. The kinetics of chloride ions penetration in concrete[R]. in Italian, Il Cemento, No. 4(1970)157-164.
- [7] 耿永常, 李淑华. 城市地下空间结构[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [8] 王新友, 李宗津. 混凝土使用寿命预测的研究进展[J]. 建筑材料学报, 1999, 2(3): 249-256.
- [9] Cebera J. G. deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion[J]. cement and concrete compos-

- ites, 18, 1996.
- [10] Aguilar, Alberto. Corrosion measurements of reinforcing steel in partially submerged concrete slabs [J]. ASTM Special Technical Publication, n 1065, p 66 – 85, Aug 1990.
 - [11] 中国混凝土耐久性专业委员会. 第七届全国混凝土耐久性学术交流会论文集 [R]. 湖北, 宜昌, 2008.
 - [12] K. Tuutti, Effect of cement type and different additions on service life, in: R. K. Dhir, M. R. Jones (Eds.), Concrete 2000, vol. 2, E& FN Spon, London UK, 1993, pp. 1285 – 1296.
 - [13] Henrisen. Concrete durability fifty year's progress [A]. Proceeding of 2nd International Conference on Concrete Durability [C]. ACI SP126 – 1, 1991. 1 – 33.
 - [14] Morinaga F. J. Cover cracking as a function of bar corrosion; Part II – Numerical model [J]. Materials and Structures. 1993, 26: 932 – 548.
 - [15] R. D. Browne, R. Blundell. The behaviour of concrete in prestressed concrete pressure vessels. Nuclear Engineering and Design. Volume 20, Issue 2, July 1972, Pages 429 – 475.
 - [16] M. Funahashi, Predicting corrosion free service life of a concrete structure in a chloride environment [J]. ACI Material Journal, 87 (1990) 581 – 587.
 - [17] 肖从真. 混凝土中钢筋腐蚀的机理研究及数论模拟方法 [D]. 北京: 清华大学, 1995.
 - [18] 邱小坛, 周燕, 顾红祥. 结构耐久性设计方法研讨 [C]. 第四届混凝土结构耐久性科技论坛论文集“混凝土结构耐久性设计与评估方法”, 北京: 机械工业出版社, 2006.
 - [19] 牛荻涛等. 锈蚀钢筋混凝土梁的承载力分析 [J]. 建筑结构, 1999, (8).
 - [20] 许丽萍, 吴学礼. FCD 混凝土耐久性专家系统及其建立. 混凝土, 1994, 06.
 - [21] 黄土元, 蒋家奋等编著. 近代砼技术 [M]. 西安: 陕西科技出版社, 1998.
 - [22] 钱稼茹等. 土建结构工程的安全性及耐久性 [J]. 建筑技术, 2002, Vol33 (4) 248 – 253.
 - [23] 董振平, 牛荻涛, 浦聿修. 大气环境下混凝土中钢筋开始锈蚀条件的试验研究 [J]. 工业建筑, 2000. 7
 - [24] 潘振华, 牛荻涛, 王庆霖. 锈蚀率与极限粘结强度关系的试验研究 [J]. 工业建筑, 2000, 30 (5).
 - [25] 阎培渝. 高含氯混凝土中钢筋宏电池腐蚀速率控制因素 [J]. 工业建筑, 2000, Vol30 (5) 6 – 11.
 - [26] 刘西拉. 重大土木与水利工程安全性及耐久性的基础研究 [J]. 土木工程学报, 1998, 34 (6).
 - [27] 屈文俊, 张誉. 构件截面混凝土碳化深度分布的有限元分析 [J]. 同济大学学报, 1999, Vol27 (4): 412 – 416.
 - [28] 李田, 刘西拉. 混凝土结构耐久性分析与设计 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
 - [29] 陈雄元. 土建结构工程的安全性及耐久性 (R). 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
 - [30] G. Somerville. The design life of structures [M]. Blackie and Son Ltd, 1992.
 - [31] Geiker. Corrosion rate of steel in concrete: Evaluation of confinement techniques for on – site corrosion rate measurements. Materials and Structures/ Materiaux et Constructions, v 42, n 8, p 1059 – 1076, October 2009.
 - [32] Maage M., Service Life Prediction of Existing Concrete Structures Exposed to Marine Environment [J], ACI Materials Journal, 1996, 93 (6): 893 – 901.
 - [33] 余红发, 孙伟等. 混凝土使用寿命预测方法的研究 I – 理论模型 [J]. 硅酸盐学报, 2002. 30 (6): 686 – 690.
 - [34] 孙钧. 海底隧道工程设计施工若干关键技术的商榷 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, Vol25 (8): 1513 – 1521.
 - [35] 杜应吉, 张海燕, 李元婷. 地铁工程高性能混凝土耐久寿命评估初探 [J]. 西北水资源与水工程, 2003, Vol14 (1): 49 – 51.
 - [36] 周晓军. 地铁杂散电流对衬砌耐久性影响及防护的探讨 [J]. 地下空间与工程学报, 2007, 6, Vol3 (3): 522 – 528.

- [37] 周晓军,高波. 地铁迷流对钢筋混凝土中钢筋腐蚀的试验研究[J]. 铁道学报. 1999, 21(5): 99-105.
- [38] 林江,唐华,于海学. 地铁迷流腐蚀及其防护技术[J]. 建筑材料学报,2003,Vol5(1):72-74.
- [39] 贺鸿珠,陈志源等. 掺粉煤灰水泥基材料水化过程的交流阻抗研究[J]. 科学研究,2003,02,6-8.