

# 地下混凝土衬砌结构的 损伤劣化与耐久性

潘洪科○著

## D amage Deterioration and Durability of Underground Concrete Lining Structure

本书围绕隧道与地下工程结构在建设施工或运营过程中可能出现的耐久性损伤积累问题及寿命分析与预测课题开展研究，侧重于介绍研究采用的思想理念、方法手段、范围与角度及取得的理论与应用方面的成果。全书主要包括：绪论、工程结构可靠度的基本理论介绍、地下混凝土结构劣化度及耐久性研究体系的建立、基于碳化作用的地下结构损伤劣化模型建立、细观损伤理论在地下结构耐久性研究及寿命分析预测中的应用、地下结构耐久性寿命智能预测研究、地下混凝土结构基于耐久性与劣化度的可靠性分析、基于氯离子渗流耦合作用的地下混凝土结构耐久性研究。

# 地下混凝土衬砌结构的 损伤劣化与耐久性

潘洪科◎著



东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

## 内容简介

本书围绕隧道与地下工程结构在建设施工或运营过程中可能出现的耐久性损伤积累问题及寿命分析与预测课题开展研究,侧重于介绍研究采用的思想理念、方法手段、范围与角度及取得的理论与应用方面的成果。全书共分八章,主要包括:绪论、工程结构可靠度的基本理论介绍、地下混凝土结构劣化度及耐久性研究体系的建立、基于碳化作用的地下混凝土结构损伤劣化模型建立、细观损伤理论在地下混凝土结构耐久性研究及寿命分析预测中的应用、地下混凝土结构耐久性寿命智能预测研究、地下混凝土结构基于耐久性与劣化度的可靠性分析、基于氯离子渗流耦合作用的地下混凝土结构耐久性研究。

本书可供从事混凝土结构或隧道及地下工程损伤与耐久性研究,以及相应设计、施工及运营管理相关人员交流、学习或参考,也可供高等院校相关专业教师、研究生和高年级本科生使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

地下混凝土衬砌结构的损伤劣化与耐久性 / 潘洪科  
著. —南京:东南大学出版社,2016.12  
ISBN 978-7-5641-6853-7

I. ①地… II. ①潘… III. ①地下工程-混凝土衬砌-  
衬砌结构-损伤(力学)-劣化-研究②地下工程-混  
凝土衬砌-衬砌结构-耐用性 IV. ①TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 273354 号

---

出版发行	东南大学出版社
出版人	江建中
责任编辑	陈潇潇
社址	南京市四牌楼2号
网址	<a href="http://www.seupress.com">http://www.seupress.com</a>
经销	新华书店
印刷	虎彩印艺股份有限公司
开本	787 mm×1092 mm 1/16
印张	7.75
字数	230千字
版次	2016年12月第1版
印次	2016年12月第1次印刷
书号	ISBN 978-7-5641-6853-7
定价	38.00元

---

\* 本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系,电话:025-83791830。

# 序

闻悉潘洪科博士的著作《地下混凝土衬砌结构的损伤劣化与耐久性》即将问世,感到非常高兴。

耐久性是工程结构的重要属性,但在我国对其引起重视则尚历时较短,尤其是地下建筑结构的耐久性。原因之一是国内大型建筑结构的大量建设起步较晚,尤其是诸如城市地下铁道、越江隧道及水电站地下厂房等大型地下建筑结构的建设,至今历史不长,使人们对工程结构可由耐久性不足引起安全问题的严重性缺乏感性认识。

我因世纪之交参加上海长江隧道方案设计竞赛而涉足这类课题,通过参阅一些材料开始了解其重要性,并自此开始对其开题研究。潘洪科博士是我在这一领域招收的第一位博士研究生(2002.9~2005.11),所选课题为“基于碳化作用的地下工程结构的耐久性与可靠度”,属于国内首篇在这一方向选题研究的博士学位论文。论文研究开创性强,开展研究的难度也大,但他能克服困难,通过潜心研究完成学位论文,取得了丰硕成果。

课题研究的特色主要包括:结合对课题当时研究状况的调研,分析了地下结构耐久性的影响因素及亟需加强研究的重点方向;作为学术思想率先提出了广义耐久性及劣化度函数的理念,使可涵盖广义研究领域和定量研究地下结构的耐久性问题;自行设计和进行了可考虑多因素综合影响的室内快速碳化试验,包括考虑应力水平、材料性能(水灰比)及作用龄期等因素对混凝土结构碳化腐蚀的影响,据以建立了可考虑多因素交互影响的耐久性评判模型及经验公式;提出了地下结构耐久性寿命的评判准则和预测方法;结合地下工程的特点和由试验得到的碳化评判模型,建立了地下混凝土结构基于碳化深度的寿命准则和基于锈胀开裂的寿命准则,以及二者的失效概率与可靠度的计算理论。

潘洪科博士学位论文研究取得的成果超过了开题报告提出的预期要求,嗣后开展的研究更是持久深入。十余年间他已发表论文 30 余篇,不仅数量众多,而且内容涵盖所研

研究的学术领域的主要方面。

随后的课题研究陆续得到国家自然科学基金项目、湖北省自然科学基金项目及河南省科技攻关项目等的资助,考虑因素目前已延伸涉及地下水渗流耦合作用(多场耦合)对地下混凝土结构耐久性的影响,以及耐久性失效风险评估的关键技术。地下混凝土结构的耐久性涉及诸多因素的综合影响,地下水的渗流耦合作用是复杂因素之一,将其列为研究方向,可见潘博士的研究正引向深入。耐久性的失效风险评估也是前沿课题,其中不仅涉及分析理论,而且涉及应用科学,成果可为工程建设奠定基础。

在工程结构耐久性研究领域,地下结构耐久性的研究是自 21 世纪初开始形成的学科分支。潘洪科博士在不长的时间内,已通过研究写出专著,实属难能可贵。预期专著的出版不仅可为地下建筑结构耐久性的继续研究指明方向,而且可供当前通过采取设计施工措施提高在建地下建筑结构的耐久性的工程参考,将有较大的意义和价值。

期望通过专著的出版,地下建筑结构耐久性的研究能获得更好的发展,成果并可用于指导工程建设快速发展。

是为本书序。

杨林德

2016 年 11 月



# 前 言

随着工程结构耐久性问题的日益严重,对其研究工作也越来越为人们所重视,也取得了较丰硕的研究成果。但目前研究工作仍存在很多的不足之处,尚难以有效地解决各种实际问题和满足工程建设的需要,尤其是在地下结构耐久性研究领域取得成果极少,近三四十年来大型地下工程建设的大量涌现使这一问题愈发突出和重要,然而由于经验上的不足及相关基础理论研究的欠缺与滞后,该领域在设计、施工与使用过程出现较多因耐久性引起破坏的实际问题且缺乏相关理论、措施及规范的指导。本书也是基于此而著作的。

笔者所在研究团队十余年来坚持对地下工程结构的耐久性问题开展研究工作,迄今已在国内外核心期刊公开发表研究成果论文 20 余篇,并先后主持或参与国家自然科学基金项目“地下混凝土衬砌结构的耐久性与使用寿命”及“软岩多元分析的智能化随机模糊决策与工程控制”及湖北省自然科学基金项目“基于地下水渗流耦合作用的地下混凝土结构耐久性的研究”、河南省科技攻关项目“重大地下工程项目耐久性失效风险评估的关键技术研究”等项目的研究工作,本书的写作即是在上述课题研究成果的基础上进一步归纳、总结和延展而成的,同时也得到了其中的湖北省自然科学基金项目及所在单位学科建设资金的资助。

本书从不同的耐久性影响因素耦合作用的情形,以及不同的研究手段与目标角度出发,对一般地下混凝土工程结构在建设使用过程中可能遇到的常见耐久性问题进行较全面的考虑和系统研究。旨在对该领域进行一些探索性和开创性的研究工作并获得一定的基础理论成果或可供借鉴的研究思路与方法,并努力将这些成果与实际工程问题联系起来且能最大限度地解决这些问题或提供一些有益思路及方法措施。本书研究的主要内容包括:对地下工程结构耐久性的研究现状及区别于地面结构的特点进行全面的总

结、归纳和评析；对影响地下结构耐久性的各因素进行归类、分析；提出广义耐久性及劣化度函数的理念，建立地下结构耐久性的研究、分析与评价体系；考虑几种典型环境下的多因素耦合作用情形，开展试验及理论建模研究，其中尤其对于外荷载作用下混凝土的碳化腐蚀及钢筋锈蚀破坏，以及地应力、地下水渗流耦合作用时的氯离子侵蚀破坏进行了较深入的研究及说明，以探寻其耐久性劣化的机理规律及建立结构耐久性损伤的劣化模型；应用损伤力学、可靠度理论或人工神经网络的方法原理开展地下结构耐久性寿命评判与预测的相关研究工作。

本书在写作过程中，既注重理论及基础知识的阐述，又重视其在实际工程中的应用和基本方法、操作过程与步骤等的介绍；既总结介绍国内外最新研究成果、发展趋势，又详细说明著作者的研究思路与成果。编者们在编辑成书过程也力求全书研究内容及章节知识的系统性，相信该书的出版将在一定程度上推动我国在地下工程结构耐久性研究领域的关注和发展。

本书在编著过程中参考和引用了相关领域内较多专家、学者及工程师的研究成果，在此一并表示感谢。

限于笔者水平和时间仓促，难免有疏漏和不妥之处，恳请读者指正。

笔者

2016年11月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	001
1.1 混凝土结构损伤及耐久性定义 .....	001
1.2 地下混凝土结构损伤与耐久性研究的现状及存在问题 .....	002
1.3 本书主要研究内容 .....	007
参考文献 .....	010
<b>第 2 章 工程结构可靠度的基本理论及方法</b> .....	014
2.1 基本概念及相关知识 .....	014
2.2 工程结构可靠性分析与计算的基本方法 .....	020
2.3 结构体系可靠性分析 .....	025
参考文献 .....	028
<b>第 3 章 地下混凝土结构劣化度及耐久性研究体系的建立</b> .....	029
3.1 地下结构耐久性的影响因素分析 .....	029
3.2 劣化度函数建立 .....	039
3.3 耐久性寿命评判标准及分析方法 .....	041
3.4 可靠性理论方法应用于结构耐久性的研究 .....	044
参考文献 .....	044
<b>第 4 章 基于碳化作用地下混凝土结构损伤劣化耐久性模型建立</b> .....	046
4.1 研究现状 .....	046
4.2 碳化试验方案及设计方法 .....	047
4.3 试验结果的整理与分析 .....	050
4.4 基于碳化深度(劣化)模型的寿命预测 .....	057



4.5	工程实例对比验证 .....	058
	参考文献 .....	061
<b>第5章</b>	<b>细观损伤理论在混凝土结构耐久性研究及寿命分析预测中的应用 .....</b>	<b>062</b>
5.1	损伤力学应用在地下混凝土结构耐久性中的研究现状 .....	062
5.2	地下混凝土结构细观损伤模型 .....	064
5.3	地下结构损伤数值模拟与耐久性分析 .....	066
5.4	钢筋锈胀破坏耐久性寿命预测 .....	072
	参考文献 .....	073
<b>第6章</b>	<b>地下混凝土结构耐久性寿命智能预测研究 .....</b>	<b>075</b>
6.1	概述 .....	075
6.2	人工神经网络预测原理 .....	076
6.3	地下结构耐久性寿命预测网络模型建立及应用 .....	079
	参考文献 .....	088
<b>第7章</b>	<b>地下混凝土结构基于耐久性的可靠性分析 .....</b>	<b>090</b>
7.1	概述 .....	090
7.2	极限状态法计算可靠度 .....	091
7.3	两种劣化度模型 .....	093
7.4	基于两种劣化度模型的可靠性分析 .....	094
7.5	工程实例分析 .....	098
	参考文献 .....	098
<b>第8章</b>	<b>基于渗流耦合作用的地下混凝土结构耐久性研究 .....</b>	<b>100</b>
8.1	概述 .....	100
8.2	岩土应力场与地下水渗流场双场耦合作用研究 .....	102
8.3	多场耦合作用下地下混凝土结构氯离子渗流及结构劣化研究 .....	110
8.4	地下混凝土结构基于氯离子渗流的耐久性寿命预测研究 .....	111
	参考文献 .....	114

# 第1章 绪论

## 1.1 混凝土结构损伤及耐久性定义

钢筋混凝土结构是目前世界范围内应用最为普遍、范围最广的结构形式,由于长期暴露在大气环境或与其他外部介质紧密接触,以及作为主要承重结构而受到的各种复杂外力作用,其耐久性问题也相伴而生并日益显示出严重性。近几十年来,国内外都有大量混凝土结构因耐久性不足而过早失效甚至彻底破坏的现象,巨额的重建与维修费用使混凝土结构的耐久性问题越来越受到关注和重视,成为世界各国土木工程界的前沿课题。

钢筋混凝土材料的耐久性破坏正是在外界荷载及外界环境作用下形成的一种损伤劣化效应,严重威胁了钢筋混凝土结构的安全、适用与耐久性能。因而,损伤与耐久性是密不可分的,可以说,一切形式的耐久性破坏最后都可转化到物理或化学形式的损伤上来,因此,以损伤理论与方法作为研究工程结构耐久性的手段是很合理的。然而,国内外这方面的研究工作开展得虽然较多,但仍不够深入和不便于工程实际应用,而且大多是以平面问题的研究方法进行分析,三维损伤理论用于实际问题的研究尚很少,在地下结构的耐久性研究中更是尚未开展。本文首次将损伤理论用于地下结构的钢筋混凝土受外荷载和碳化腐蚀共同作用下的耐久性损伤三维分析中,以对其耐久性寿命进行评判、预测。

较长时期以来,人们观念中对耐久性失效的普遍的理解是:钢筋混凝土结构由于环境物理或化学作用,以及混凝土材料自身原因等非力学因素长期影响下造成的结构不能完成预期寿命的老化性破坏。

但分析可见,以往的耐久性研究主要集中在材料层次,而对结构和力学层次上的研究很少;研究的角度也主要以单因素研究为主而极少考虑多因素间的交叉综合影响。本书引入广义耐久性的概念,将结构的耐久性寿命定义为:在一切现实的(或潜在的)破坏因子(或称变异因子)作用下,工程结构具有的能在一定时期内保持其安全、正常地服役的能力。此概念中,“破坏因子”包括非力学因素和力学因素两方面的作用效应。该定义延伸了传统耐久性的涵义,体现了耐久性的实质性意义。所谓“耐久”,即是结构具备的穿过由各种“破坏效应”交织的“破坏力空间”而能较长时期生存和工作的能力<sup>[1]</sup>,力学因素对结构耐久性的影响自然应当予以考虑。

根据这一定义,在进行结构寿命预测之前,首先必须明确结构的“安全、正常地服役”所涵盖的预定功能是什么,如何判断结构的功能失效,即确定衬砌结构的耐久性极限标准、耐久性寿命评判准则,这是进行寿命预测的重要步骤。

## 1.2 地下混凝土结构损伤与耐久性研究的现状及存在问题

### 1.2.1 耐久性问题及研究现状

国内外对混凝土材料的耐久性已有了较长时期的研究,在理论和实践两方面均取得了很多有价值的成果,如混凝土碳化、氯离子侵蚀、钢筋锈蚀、冻融循环、盐类腐蚀、抗力衰减模型、时变可靠度分析等方面(因该类研究成果较多,在此不一一介绍,列举部分参考文献[2]~[13]附后),但仍不能满足飞速发展的工程建设的需求,而且该类成果主要集中在地面混凝土结构及海港、水工结构方面,而专门针对地下结构的耐久性研究工作极少、比较零散和不够深入。另一方面,目前对耐久性的研究工作多停留在材料层面和非力学因素上,主要考虑的是各类化学介质侵蚀、材料自身组分配比、冻融循环作用等影响因素,对结构力学层次(包括荷载、应力应变、差异沉降、地下水渗流、施工过程等)的研究还远远不够。此外,很重要的一点,从耐久性研究角度和方法来看,目前一般采用的是单一因素分析法,而对各因素间的交叉影响考虑极少,现有的一些多因素耐久性模型实际上仍主要为各单个因素作用下所得到的模型的简单叠加,这与地下工程混凝土结构经受了荷载和环境、气候等多种因素协同作用的实际情况存在较大差异。事实上,混凝土结构产生耐久性问题应该是一个损伤与劣化逐渐积累的过程,因此结合损伤理论分析混凝土内部微细观层次发生的物理化学变化与结构宏观上力学性能劣化之间的相互机理关系是很重要的,然而在这方面现有的研究成果还远远不够。

随着经济建设的快速发展,各类地下工程如铁路、公路隧道,水工隧洞和水电站地下厂房,城市地铁、市政管道、越江通道、大楼地下室和地下商业街等在国内已在短时期内大量涌现,该类地下工程普遍采用混凝土衬砌结构形式。但同时,由于这些地下工程结

构与有害气体、地下水、岩土介质或其他各种特殊环境紧密接触,加上各种突发灾害或不确定性因素影响,由此引发的各类耐久性问题越来越严重,例如构件或结构锈蚀、裂损、坍塌、漏水、差异沉降、变形过大等各种破坏现象频发,缩短了工程结构物的使用寿命,并因返修而耗费大量钱财,因而引起人们对这类课题的广泛关注。下面是几张有关地下结构耐久性损坏现象的照片(图 1.1~图 1.7)。可以预计,今后很长一段时间内地下工程结构物的大量返修都将是各国必须面对的沉重问题。然而由于经验上的不足及相关基础理论研究的欠缺,加之完全照搬地面或水工结构耐久性的理论与方法又明显存在差异,因而目前对该类课题加紧立项,开展深入而系统的研究,为延长拟建和现有地下工程结构物的使用寿命提供理论与方法不仅十分迫切与必要,而且意义重大。



图 1.1 贵州某隧道中的渗水及修补的裂缝



图 1.2 云南某隧道洞口偏压裂缝



图 1.3 某码头梁底板面钢筋严重锈蚀  
(张苑竹,2003)



图 1.4 上海黄浦江防汛墙某段钢筋  
锈蚀及混凝土裂损

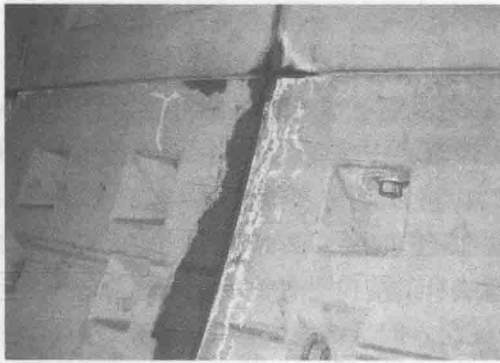


图 1.5 上海某越江隧道差异沉降造成的破坏及渗漏

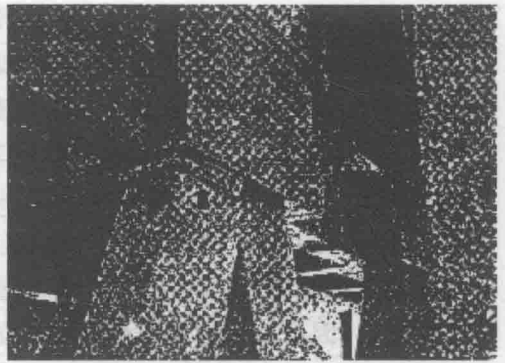


图 1.6 某码头不均匀沉降引起桩和桩帽脱落(张苑竹,2003)

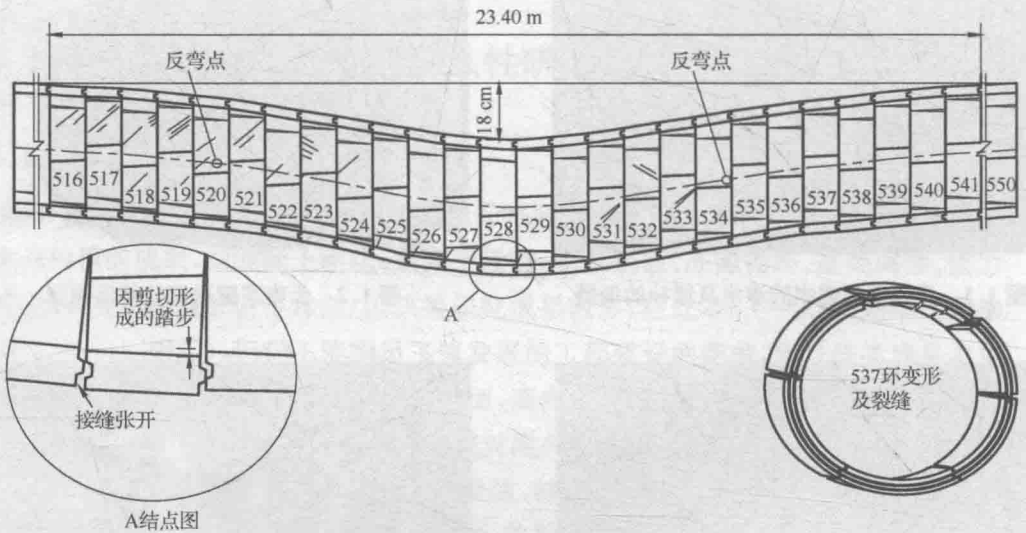


图 1.7 上海金山地下水沟隧道纵向不均匀沉降及横断面变形

导致这类耐久性问题的直接原因常是对工程建设面临的与复杂岩土和地层环境条件有关的各类难题缺乏设计、施工与管理的经验,根本原因则多为相关基础理论研究不够而缺乏知识储备。例如,对结合岩土介质环境下的耐久性影响因素及作用机理的深入研究不够,对地层介质中线形结构因空间不均匀变形而裂损的机理、影响因素与发展规律迄今仍研究尚少,对地下水渗流及其与侵蚀性环境的综合作用影响地下结构物使用寿命的机理与规律迄今仍知之不多,对由支护结构的施工质量问题引起混凝土材料性能劣化导致地下工程结构物使用寿命缩短的规律缺少量化评价方法等。

由于各种原因,地下结构耐久性的研究历来为人们所忽视,极少对其展开专门、系统的研究。国内对地下结构耐久性的研究工作几乎为空白。国外现有的一些研究成果表



明该方面的研究工作尚不多,而且比较零散和不够深入,侧重于针对具体工程的应用性方面的研究,以及隧道与地下结构的位移变形、地下水渗流分布、冻胀作用及地下腐蚀环境等因素造成的衬砌结构受力上的变化和相应的对结构损伤与稳定性、可靠性方面的影响。涉及的范围主要为地下管线、地下贮藏室或填埋场、隧道工程、地下腐蚀环境对钢筋混凝土的腐蚀性及其耐久性水泥材料的开发等方面,并且研究内容仍主要局限在材料学科方面。总结目前已经完成的主要研究工作如下:

美国、法国、德国等 20 世纪 60 年代以来为提高地下管道、停车场、燃料贮藏库的耐久性而进行了系列的研究工作,主要是在材料性能和构造措施方面的努力<sup>[14~17]</sup>;日本于 1994 年寻求建立地下混凝土结构的水密性(抗渗性)耐久性评价模式<sup>[18]</sup>,以及 1986 年研究开发港口、码头用高性能水泥混凝土<sup>[19]</sup>;英国和我国台湾地区近年来对于地下水对地下工程结构的腐蚀性也做了部分研究工作<sup>[20,21]</sup>;美国于 20 世纪末研究火山灰、矿渣等掺杂物对降低混凝土渗透性的作用及碱骨料反应影响耐久性的试验<sup>[22~24]</sup>。1987 年美国学者 C. M. Jantzen 研究用浦尔拜图(Pourbaix Diagram)预测岩土环境中废玻璃耐久性的方法<sup>[25]</sup>;Lomax 等于 2002 年发表了阴极保护系统防治氯离子腐蚀地下蓄水池钢筋混凝土结构的研究成果<sup>[26]</sup>;Mogilevskaya 早年曾对土体流变影响地下连续墙稳定性及耐久性的方式进行了初步研究<sup>[27]</sup>;E. Escalante 于 1987 年对土壤中钢筋腐蚀进行了测试研究<sup>[28]</sup>;Clarke 和 William<sup>[29]</sup>研究超细微耐久性混凝土在地下工程中的应用。在地下侵蚀性环境中混凝土材料耐久性试验方面,美、英、韩等国也做了相应的研究工作<sup>[30~33]</sup>。日本曾建立雨水渗流系统,对地下管线、U 形沟、路基等的渗透性进行了近 20 年的观察研究<sup>[34]</sup>。在先进设备仪器、技术开发方面,美国的地下工程火灾探测器<sup>[35]</sup>、扫描电子显微镜法分析材料组分反应变化<sup>[36]</sup>、英国伦敦地铁结构修复与补强中对碳纤维复合材料的应用<sup>[37]</sup>、法国在地下工程结构灌浆施工中采用新技术以增加耐久性<sup>[38]</sup>、日本开发出新型光纤振动传感器用来检测与诊断工程结构的健康度<sup>[39]</sup>、瑞士总结了钢纤维湿喷工艺在大型地下工程中应用以增强抗力的实践经验<sup>[40]</sup>。此外,美国从 20 世纪 80 年代开始由能源部组织展开了对核废料及玻璃的地下掩埋场的隔离拱顶耐久性的系列研究<sup>[41~44]</sup>;国内关宝树、高波<sup>[45]</sup>曾总结日本在隧道剩余寿命研究中引入“健全度”的概念及方法,以及美国在工程结构损伤评估中引入“结构损伤度”的概念,这种“健全度”或“损伤度”是以隧道破坏、劣化现象的严重程度进行等级划分作为评定依据的,具有一定的粗糙性和主观性,有待进一步完善;李永和对采矿工程中的锚喷材料建立了损伤蠕变本构方程<sup>[46]</sup>及钢筋锈蚀性状和裂纹扩展轨迹<sup>[47]</sup>;全国土壤腐蚀网站于 20 世纪 60 年代初在全国多处地方埋设硅酸盐钢筋混凝土试件<sup>[48]</sup>,30 余年后分析发现腐蚀严重,不同地区试件抗压强度降低 7%~73%,混凝土中性化深度达 15.4~42.5 mm,混凝土中钢筋面积锈蚀率为 18%~92%,得出结论硅酸盐材料在地下的耐久性及耐腐蚀性能较差,不宜用于重点工程地下结构。

近年来一些科研工作者开始逐步开展多因素协同作用下混凝土损伤劣化及耐久性的研究,主要是考虑两种因素即荷载与其他因素共同作用的情形。这些研究均取得了一定的成果,通过试验分析定性地证实了拉应力的存在会加速混凝土的碳化或盐类侵蚀或冻融破坏等。然而,由于实验过程的复杂性,研究所得荷载(应力)与耐久性劣化程度的定量关系式均是建立在少数实验数据基础上,具有一定的局限性;对所得模型公式中多项式的系数的物理意义也无法做出合理解释。此外,荷载对混凝土结构的影响是和应力水平(荷载与极限强度的比值)相关,而不仅仅是应力值,荷载对混凝土耐久性劣化速度的影响显然也应与应力水平相关;而且实际的地下工程结构往往要承受更复杂的两种以上因素同时作用产生的劣化影响。潘洪科、杨林德、朱合华等<sup>[49-58]</sup>在近年的研究工作中开始考虑应力水平及其他几种因素的综合作用对地下混凝土结构的耐久性从劣化度角度开展量化的研究,并结合试验研究建立了耐久性劣化模型及使用寿命预测模型;同时,还研究了压力水头下带缝工作的隧道衬砌结构的渗流特征及渗流耦合效应的理论,获得了压力水头下侵蚀性物质在裂损混凝土结构中运移规律、材料性能劣化的机理与规律及结构耐久性的评估方法与预测模型。但这些研究仍然没有将地下结构中典型常见的复杂应力状况与地下空间的 $\text{CO}_2$ 及地下岩土介质和压力水中运移的侵蚀性离子等几种因素交叉作用的影响进行综合考虑和研究。此外,尚没有结合细观损伤理论开展对地下结构混凝土内部微细观层次发生的物理化学变化与结构宏观上力学性能劣化之间的相互机理关系的研究。

鉴于目前耐久性研究领域存在的如上所述的一些问题与不足,加强对该领域的立项研究很有其迫切性和必要性。对于地下工程结构,研究的重点应放在其区别于地面和水工结构的地方,也即应主要考虑各类岩土介质、侵蚀性离子( $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等)、复杂多变的应力状况、地下水渗流耦合效应、不均匀地层沉降及杂散电流等因素的综合作用对地下工程结构物耐久性的影响。

地面建筑物结构耐久性与地下工程结构耐久性既有相似和共通之处,又存在一定的差别。目前,因为对地面结构耐久性的研究相对较多,而地下结构耐久性的研究相对滞后,因此,在加快对地下结构耐久性研究的同时,应充分借鉴和引用地面结构耐久性研究的方法、经验、成果,两者相辅相成,共同构成对整个工程结构耐久性研究的体系。

为在研究中更好地区分和把握地下结构耐久性研究的特点,笔者总结地面结构与地下结构耐久性研究的主要区别如下:

①地面结构主要与空气介质接触,其环境影响主要取决于空气中 $\text{CO}_2$ 及其他侵蚀性物质含量;而地下结构由于处在地下条件中,含水丰富时,不可避免存在地下水压力及其渗透问题,同时水体中还将运移各种侵蚀性物质。因此,研究渗流场、地应力场耦合作用情形下对地下结构物耐久性的影响机理、方式、规律等有其深刻理论意义。

②地下结构物理置于岩土体中,其承受四周地应力及外荷载作用的特点及应力状态受多种不确定性因素影响而存在不稳定性变化的特点也是明显不同于地面结构的。应力状态将影响结构内力及孔隙率,从而影响渗透性和耐久性。岩土体的非线性和流变性等特点也是地面结构材料所不具有的。因此研究结构物在复杂岩土应力作用下及与岩土中侵蚀性物质共同作用下的耐久性破坏规律是很有必要的。

③地下结构尤其是线形地下结构物由于沿线及纵向岩土介质的不均质性,以及修建时的分步开挖扰动,可能的复杂地质运动及地应力重分布,运营期的外部不同步荷载或邻近施工影响,以及岩土体的流变和固结特性,都将造成结构物的不均匀沉降,而致结构裂缝的产生,甚至断裂破坏,裂纹也可使钢筋混凝土腐蚀进一步加剧。

④地下结构由于必须在复杂地下条件中施工修建,面临各种困难,因此施工工艺及质量问题对地下结构耐久性的影响研究将是不可回避的,主要涉及施工荷载干扰、应力变化对结构内力的影响,施工振捣、水泥浇筑等工艺方面对结构抗力的影响及对结构防腐性能的影响,以及其他各种影响结构耐久性的施工因素的分析及其影响机理、过程、控制方法的评价。

⑤杂散电流也是地下工程结构物中所独有的,主要指城市轨道交通及地下变电站等其他需要地下电源的情况下,杂散电流对地下设施、地下管道、钢轨及地下结构钢筋的腐蚀作用,尤其在地下结构防水和绝缘不好及存在较强腐蚀性物质共同作用时,杂散电流的腐蚀破坏更甚。

## 1.3 本书主要研究内容

### 1.3.1 主要研究内容

随着重大地下工程建设的日益增多和耐久性问题的日益显现,其相关研究工作明显滞后的矛盾也日益突出。目前在地面及水工结构耐久性研究方面虽然已取得了较多的研究成果,但仍不足以有效地解决各种耐久性问题和满足工程建设的需要,而专门针对地下工程领域的特殊性开展该类研究更是非常少见,因此,对该类课题加紧立项、开展深入而系统的研究,为相关理论研究及知识储备的完善,以及实际工程中解决拟建和在役地下工程结构的耐久性问题提供研究方法、理论指导及实用措施不仅十分迫切与必要,而且意义重大。

本书拟从不同的耐久性影响因素耦合作用情形,以及不同的研究手段与目标角度出发,对一般地下混凝土工程结构在建设及使用过程中可能遇到的常见耐久性问题进行较全面的考虑和系统研究。旨在对该领域进行一些探索性和开创性的研究工作并获得一定的基础理论成果或可供借鉴的研究思路与方法,并努力将这些成果与实际工程问题

联系起来且能最大限度地解决这些问题或提供一些有益思路及方法措施。本书的研究成果是在两个国家基金项目及两个省级科研项目及相关博士论文研究课题的基础上总结而成的。具体说,本书研究涉及的主要内容包括:对地下工程结构耐久性的研究现状及区别于地面结构的特点进行全面的总结、归纳和评析;对影响地下结构耐久性的各因素进行归类、分析;提出广义耐久性及劣化度函数的理念,建立地下结构耐久性的研究、分析与评价体系;考虑几种典型环境下的多因素耦合作用情形,开展试验及理论建模研究,其中尤其对于外荷载作用下混凝土的碳化腐蚀及钢筋锈蚀破坏,以及地应力、地下水渗流耦合作用时的氯离子侵蚀破坏进行了较深入的研究及说明,以探寻其耐久性劣化的机理规律及建立结构耐久性损伤的劣化模型;应用损伤力学、可靠度理论或人工神经网络的方法原理开展地下结构耐久性寿命评判与预测的相关研究工作。

### 1.3.2 地下结构耐久性研究的不足与重点研究的方向

从前面的论述可见,目前国内外对地下结构耐久性的研究工作虽已有所涉及,但主要是针对一些具体工程进行的抗渗补强类防治措施方面的研究,及延缓材料老化等方面的研究。因此目前研究工作还存在很大不足和亟待深入之处,尤其是国内的研究工作几乎是一片空白。本文综合分析认为主要的不足之处有以下几方面:

①缺乏对地下结构耐久性的相关基础理论的深入、系统、专门的研究,例如对结合岩土介质环境下的耐久性影响因素及作用机理的深入研究不够,对地层介质中线形结构因空间不均匀变形而裂损的机理、影响因素与发展规律迄今仍研究尚少,对地下水渗流及其与地应力及侵蚀性物质的耦合作用影响地下结构物使用寿命的机理与规律迄今仍知之不多,对由支护结构的施工质量问题引起混凝土材料性能劣化导致地下工程结构物使用寿命缩短的规律缺少量化评价方法等,都是不同场合导致地下工程结构物裂损和耐久性失效的原因。显而易见,加强对这些基础理论的研究是十分必要的。

②目前对地下结构耐久性的研究工作尚缺乏统一长远的规划,仅有的为数不多的机构、部门及学者的研究工作都相对处于零星的独立操作之中,而且研究的范围和深度都远远不够,所取得的研究成果也未能统一起来,重复性工作较多。另外,在技术规范及标准的制定方面也极为不够,国内外尚没有系统的成文的标准规范(仅有一些部门的或地方性的标准有构造措施、裂缝控制、材料组分指标要求等近似耐久性方面的规定、说明),以致在地下结构耐久性设计、施工时仍参考地面结构进行。

③从耐久性研究角度和方法看,目前一般采用的是单一因素分析法,而不考虑各因素间的交叉影响,这与实际情况是有出入的。工程实际中,结构耐久性劣化一般是多种因素共同作用造成的,它们之间是相互激励和交叉影响的;现有已开展的一些考虑多因素综合作用的研究多是单一因素作用下结果的简单叠加。在耐久性研究范围和影响因素分析中,目前的研究工作主要考虑的是环境和材料因素及部分施工因素的影响,如温