

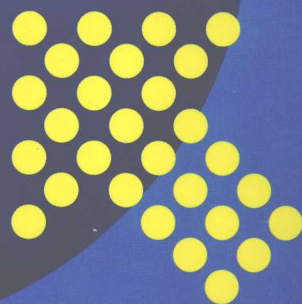
21世纪高等学校规划教材



GONGCHENG JIEGOU NAIJIUXING

工程结构耐久性

赵卓主 编
赵军 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

21世纪高等学校规划教材



GONGCHENG JIEGOU NAJIUXING

工程结构耐久性

主编 赵卓
副主编 赵军
编写 李大望
主审 邢力锋

李晓克 马亚丽
滕海文 李广慧



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材,是在吸取国内外近年来工程结构耐久性的相关研究成果及耐久性相关标准、规范,以及教学实践经验的基础上,遵循理论结合工程实际、系统性与先进性并重的原则编写的。全书共八章,着重论述工程结构耐久性的基本概念、理论、原则、方法及其工程应用,主要内容有:腐蚀性环境分类与环境作用等级、混凝土结构的腐蚀及主要成因、结构混凝土耐久性相关试验检测方法、混凝土结构的耐久性设计、混凝土结构的腐蚀防护、服役混凝土结构的耐久性评估、钢结构的腐蚀与防护。为便于读者自主学习、思考及应用,本书各章后均附有思考题。

本书可作为普通高等院校土木工程及相关专业的本科生及研究生教材,也可作为成人教育、科研及相关工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程结构耐久性/赵卓主编. —北京:中国电力出版社, 2012. 7

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 3346 - 8

I. ①工… II. ①赵… III. ①工程结构—耐用性—高等学校—教材 IV. ①TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 169914 号

中国电力出版社出版、发行
(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 [http://www. cepp. sgcc. com. cn](http://www.cepp.sgcc.com.cn))
北京市同江印刷厂印刷
各地新华书店经售

*

2012 年 8 月第一版 2012 年 8 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 15 印张 363 千字
定价 27.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

工程结构耐久性能的衰退是目前我国工程建设领域所面临的非常严峻的问题,它极大地危害了结构的安全性和可靠性,随着我国大规模基础设施工程建设的持续,工程结构的耐久性问题日益引起人们的高度重视。

工程结构耐久性是工程结构可靠性的重要分支,本书是在吸取国内外近年来工程结构耐久性的相关研究成果、国内先后发布的耐久性相关标准规范,以及教学实践经验的基础上,遵循理论结合工程实际、系统性与先进性并重的原则编写的。在内容上循序渐进、适当取舍、符合教学规律。

全书着重论述工程结构耐久性的基本概念、理论、原则、方法及其工程应用,主要内容包括腐蚀性环境分类与环境作用等级、混凝土结构的腐蚀及主要成因、结构混凝土耐久性相关试验检测方法、混凝土结构的耐久性设计、混凝土结构的腐蚀防护、服役混凝土结构的耐久性评估和钢结构的腐蚀与防护等。为便于读者自学,本书各章后均附有思考题。

本书由郑州大学赵卓主编、赵军副主编,编写分工如下:第1章由赵卓、曾力(郑州大学)编写,第2章由赵卓、李大望(深圳大学)编写,第3章由赵军、滕海文(北京工业大学)编写,第4章由赵卓、曾力编写,第5章由赵卓、李大望编写,第6章由赵军、李广慧(郑州航空工业管理学院)、李晓克(华北水利水电学院)编写,第7章由赵卓、马亚丽(郑州航空工业管理学院)编写,第8章由曾力编写。

全书由深圳大学邢锋教授审阅,提出了许多宝贵意见。郑州大学硕士研究生郝志超、王健、申磊、苏新辉等承担了部分文稿的录入和校核工作,在此一并表示衷心的感谢!

本书得到了国家自然科学基金(51078334)、国家自然科学基金(50978166)和国家杰出青年科学基金(50925829)的资助,在此表示感谢。

由于水平有限,书中难免存在不当与错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

2012年6月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 耐久性问题的产生	1
1.2 混凝土结构耐久性研究的主要内容	4
1.3 目前研究中存在的问题	7
1.4 基本定义与术语	10
思考题	13
第 2 章 腐蚀性环境分类与环境作用等级	14
2.1 典型腐蚀性环境	14
2.2 环境分类与环境作用等级	21
思考题	35
第 3 章 混凝土结构的腐蚀及主要成因	37
3.1 混凝土的材料组成	37
3.2 混凝土中钢筋的基本腐蚀机理	51
3.3 主要腐蚀成因和机理	53
思考题	63
第 4 章 结构混凝土耐久性相关试验检测方法	64
4.1 混凝土耐久性试验检测	64
4.2 结构钢筋锈蚀检测	87
4.3 混凝土结构的耐久性检测实例	94
思考题	100
第 5 章 混凝土结构的耐久性设计	101
5.1 耐久性设计的基本要求	101
5.2 设计使用年限	118
5.3 基于可靠性的耐久性设计	121
思考题	127
第 6 章 混凝土结构的腐蚀防护	129
6.1 电化学防护	129
6.2 高性能混凝土	132
6.3 混凝土表面涂层	138
6.4 环氧涂层钢筋	141
6.5 钢筋阻锈剂	143

6.6 其他腐蚀防护措施	144
6.7 工程实例	145
思考题	160
第7章 服役混凝土结构的耐久性评估	161
7.1 民用建筑的可靠性鉴定	161
7.2 工业建筑的可靠性鉴定	169
7.3 公路梁桥的技术状况及耐久性检测评定	180
7.4 混凝土结构的耐久性评定	187
思考题	193
第8章 钢结构的腐蚀与防护	194
8.1 主要的钢材种类和规格	194
8.2 钢材的腐蚀	198
8.3 钢结构的防腐蚀涂装	202
8.4 钢结构的热喷涂防护	223
思考题	230
参考文献	231

1. 耐久性问题产生

① 什么是耐久性

② 发达国家的发展历程及中国现阶段的现状

先使用混凝土结构而逐渐使用 → 说明耐久性问题以混凝土来解决

③ 混凝土结构的问题

④ 某问题所引起之类型及说明混凝土结构不坏之主要原因

其问题的复杂性

⑤ 混凝土结构的耐久性研究之主要内容

环境
材料
构件
结构

第 1 章 概 述

1.1 耐久性问题的产生

任何结构的兴建都是为了使用,也就是使新建结构完成其预定的功能。而结构预定的功能能否实现,则主要取决于它在整个设计服役期内的表现。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,则称为结构的可靠性。它包括结构的安全性、适用性和耐久性。

GB 50153—2008《工程结构可靠性设计统一标准》中明确指出,结构在规定的设计使用年限内应满足以下功能要求:

- (1) 能承受在施工和使用期间可能出现的各种作用;
- (2) 保持良好的使用性能;
- (3) 具有足够的耐久性能;
- (4) 当发生火灾时,在规定的时间内可保持足够的承载力;
- (5) 当发生爆炸、撞击、人为错误等偶然事件时,结构能保持必需的整体稳固性,不出现与起因不相称的破坏后果,防止出现结构的连续倒塌。

在工程结构必须满足的上述 5 项功能中,第 (1)、(4)、(5) 项是对结构安全性的要求,第 (2) 项是对结构适用性的要求,第 (3) 项是对结构耐久性的要求,三者可概括为对结构可靠性的要求。

①所谓足够的耐久性能,系指结构规定的工作环境中,在预定时期内,其材料性能的劣化不致导致结构出现不可接受的失效概率。从工程概念上讲,足够的耐久性能就是指在正常维护条件下结构能够正常使用到规定的设计使用年限。

发达国家在土木工程业的发展上大体经历了三个阶段:即从大规模新建阶段,新建与维修并举阶段,到重点转向旧建筑物的维修、改造加固阶段。当前,我国土木工程业的发展基本处于第一和第二的过渡阶段,在第一个大规模新建阶段,由于经济等条件的限制,混凝土结构被普遍采用。我国土木工程业的发展现状

混凝土一直被认为是一种省能、经济、用途极为广泛的人工耐久性材料,而混凝土结构则是目前工程建设中应用最为广泛的结构形式之一,它的应用与发展已有 100 多年的历史。

然而长期以来,人们对混凝土结构的耐久性问题一直未能给予足够的重视。由于勘探、设计、施工、技术发展水平以及使用过程中的多种因素影响,很多混凝土结构都先后出现病害和劣化,使结构不可避免地出现各种不同程度的隐患、缺陷或损伤,其承载力、刚度、延性和稳定性不断下降,进而导致结构的安全性、适用性和耐久性的降低,并最终导致结构失效,造成巨大的生命财产损失。混凝土耐久问题

近百年来,世界各国大型桥梁坍塌事故频繁发生,每一次事故都造成了重大的人员伤亡和财产损失。例如:1916 年 9 月 11 日,加拿大魁北克大桥由于设计缺陷两度坍塌,死亡总人数为 95 人;1967 年 12 月 15 日,美国连接西佛罗里达州波因特普莱森特与俄亥俄州

Kanauga的吊桥,由于某个链环断裂而发生坍塌,死亡人数为46人;1981年7月17日,美国堪萨斯州海厄特-雷根西饭店的高架人行桥发生坍塌,死亡人数为114人;1983年6月28日,美国康涅狄格州格林威治镇米勒斯大桥由于桥体某连接铁栓发生松动而发生结构坍塌,死亡人数为3人;1994年10月21日,韩国首尔桑苏大桥由于在维护过程中出现的焊接失误及大桥的设计缺陷和施工期间的种种问题导致大桥坍塌,死亡人数为32人;1999年1月4日,我国重庆市綦江县虹桥由于施工质量等相关问题而发生坍塌,死亡人数为49人;2001年3月4日,葡萄牙北部的Hintze-Ribeiro大桥由于设计缺陷、年久失修等原因而发生坍塌,死亡人数为59人;2003年8月28日,印度达曼西部沿海区域一座大桥发生坍塌,死亡人数为25人;2005年11月7日,西班牙格兰纳达Almuñecar地区的高速公路桥发生坍塌,死亡人数为6人;印度比哈尔邦帕戈尔布尔火车站一座150年桥龄的旧桥,由于年久失修在拆除过程中发生坍塌,地面一列火车被压,死亡人数为33人;2007年8月1日,美国明尼苏达州密西西比河桥发生突然坍塌,坍塌的主要原因为结构长期老化。

目前,工程结构的耐久性问题已引起了广泛的关注。在1991年召开的第二届混凝土耐久性国际会议上,P.K. Mehta教授在题为《混凝土耐久性——五十年进展》的报告中指出:“当今世界,混凝土破坏的原因,按重要性递降顺序排列是:钢筋锈蚀、寒冷气候下的冻害、侵蚀环境的物理化学作用。”在2001年“土建结构工程的安全性及耐久性”工程科技论坛上,有关专家也明确指出我国混凝土破坏的主要因素是“南锈北冻”。

对于处在海洋环境、化学工业腐蚀性介质或其他特殊环境下(如冲刷、磨损、干湿、冷热等)的混凝土结构,由于设计、施工或使用维护不当,少则几年,多则十几年就会出现因钢筋(普通钢筋和预应力钢筋)锈蚀或其他原因而引起的混凝土结构开裂破损,甚至崩溃。

1989年,建设部科技发展司混凝土结构耐久性综合调查组对北京、西宁、贵阳和杭州的一些建筑物进行了调查,结果表明,建国初期的建筑均已达到必须大修的状态,现有大多数工业建筑不能满足安全、经济使用50年的要求,一般使用25~30年就需大修加固;在某些化工和冶金工业建筑中,最严重时,刚建成的厂房尚未投产使用就需废弃,有的使用2、3年后就丧失工作能力,有的在使用2~10年后,为保持工作性能而消耗的维修、加固费用,早已超过结构造价本身。我国的大量工程实践表明,耐久性不足是很多结构物破坏的主要原因。据1994年铁路部门的统计,我国正在运营的有病害铁路桥梁共6137座,占总数的18.8%,其中预应力混凝土桥梁占2675座。

在英国,根据运输部门1989年的报告:英格兰和威尔士有75%的钢筋混凝土桥梁受到氯离子侵蚀,维护维修费用是原来造价的200%,为解决海洋环境下混凝土结构锈蚀与防护问题,英国每年花费近20亿英镑。葡萄牙海洋环境下的码头、桥梁等由于氯离子侵蚀造成钢筋锈蚀,结构服役较短时间即发生严重损伤。处于海湾地区的混凝土结构,由于所处的环境恶劣,钢筋锈蚀现象特别严重,是混凝土结构破坏的主要原因。

为保障道路交通的通畅,各国在冬季向道路、立交桥等撒除冰盐,使得盐中含有的氯离子侵蚀到混凝土内部,引起钢筋锈蚀,造成了巨大的损失。在瑞士,由于使用除冰盐导致钢筋锈蚀,每20年就有3000座桥梁需要维修。英国英格兰岛中部环形快车道上11座混凝土高架桥,当初建造费用2800万英镑,因为撒除冰盐引起的钢筋锈蚀使得混凝土胀裂,为此维修耗资了近4500万英镑,是造价的1.6倍,估计以后15年还要耗资1.2亿英镑,累计接

近当初造价的6倍。

在我国沿海地区,处于水位变动区或受水浸润的混凝土结构中钢筋锈蚀引起的破坏相当严重。天津港码头上部结构在使用十几年后,就出现不同程度的锈蚀破损、保护层严重剥离或脱落等,破损程度非常严重。我国山东沿海地区的混凝土桥梁耐久性状况调查结果表明:主体结构均有不同程度的损坏,钢筋严重锈蚀,混凝土严重开裂,甚至成块脱落;许多桥梁的钢筋锈蚀已经到了非常严重的程度,混凝土成片剥落,于1989年建成的某桥梁,长期处于海水的干湿作用下,约有10cm的混凝土被腐蚀掉。

据2006年美国联邦公路局的统计报告显示,全美有27%的桥梁被鉴定存在类似明尼苏达州密西西比河桥的“结构性缺陷”。在我国,由于历史的种种原因,如技术标准、设计、施工、运营管理、后期监控、管养资金等的落后和缺乏,以及随着社会经济快速发展而带来的车流量增长和运营车辆长期普遍严重超载等问题,使桥梁结构病害问题日益严重和突出。到2005年底,我国通车公路中现有的各种桥梁已达32万座,而普查出的危桥达到10万座。据交通部《2006年全国公路养护统计年报》,截至2006年年底,全国有6282座公路危桥。这些桥梁均属于第五类,即“技术状况处于危险状态,部分重要构件出现严重缺损,桥梁承载能力明显降低并直接危及桥梁安全”。

目前,工程结构的耐久性问题已越来越引起更多工程师及研究人员的关注。美国研究人员曾用“五倍定律”来形象地说明了结构耐久性的重要性,特别是设计对耐久性问题的重要性,即:设计时,对新建项目在钢筋防护方面每节省一美元,就意味着,发现钢筋腐蚀时采取措施多追加维修费5美元,顺筋开裂时多追加维修费25美元,严重破坏时则多追加维修费125美元。这一可怕的放大效应,使得各国政府投入大量资金用于工程结构的耐久性问题的研究。

有专家估计,我国“大干”基础设施工程建设的高潮还将持续若干年,由于忽视耐久性,迎接我们的还会有“大修”若干年的高潮,而这个高潮可能不用很久就将到来,其耗费将数倍于当初这些工程施工建设时的投资。

工程结构耐久性能的衰退是工程建设领域所面临的非常严峻的问题,它极大地危害了结构的可靠性和安全性能,必须予以高度关注。近年来,随着我国大规模基础设施工程建设的持续,工程结构的耐久性问题得到了高度的重视,GB/T 50283—1999《公路工程结构可靠度设计统一标准》、JTJ 275—2000《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》、GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》、GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》、JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》、CCES 01—2004《混凝土结构耐久性设计与施工指南》、JTG/T B07—01—2006《公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范》、CECS 220:2007《混凝土结构耐久性评定标准》、JTS 153—3—2007《海港工程钢结构防腐蚀技术规范》、GB 50046—2008《工业建筑防腐蚀设计规范》、GB 50153—2008《工程结构可靠性设计统一标准》、GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》、GB 50144—2008《工业建筑可靠性鉴定标准》、JGJ/T 193—2009《混凝土耐久性检验评定标准》、GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》、GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》以及TB 10005—2010《铁路混凝土结构耐久性设计规范》等相继出台的规范标准,均对工程结构的耐久性问题提出了相应的设计、施工以及试验检测等方面的要求,对于提高我国工程结构的耐久性将起到一个有利的推动作用。

1.2 混凝土结构耐久性研究的主要内容

最初的混凝土耐久性研究主要是为了了解海上构筑物中混凝土的腐蚀情况。20 世纪 20 年代初,随着钢筋混凝土结构的大规模应用,结构在腐蚀条件下的耐久性问题也随之而来。进入 20 世纪 60 年代,混凝土结构的耐久性研究进入了一个高潮,朝着系统化、国际化的方向发展。混凝土结构的耐久性问题已成为国际学术机构或国际学术会议讨论的主要课题之一。近年来,在工程界的共同重视下,混凝土结构耐久性研究不断取得重大进展。

工程混凝土结构的耐久性研究是一项较为复杂的课题,其中涉及混凝土基本理论、电化学腐蚀、结构可靠性理论、结构耐久性分析、随机理论、试验检测技术以及环境科学等多个方面,存在很多模糊及不确定性的因素,这些模糊及不确定性随着人们对工程结构耐久性问题认识的不断深入而日显突出。

目前针对混凝土结构耐久性的研究,主要集中在材料层次的耐久性机理研究、受腐蚀构件承载能力的相关研究、服役结构的耐久性评价和剩余寿命预测、受腐蚀结构的维修决策、结构腐蚀的控制与防护、高性能材料的应用及相关耐久性检测技术研究等方面。工程结构的耐久性课题可分为两部分:对未建混凝土结构进行耐久性设计和对服役混凝土结构进行耐久性评估。而对服役结构进行耐久性评估,则需在分析结构已服役期内所提供的大量反馈信息的基础上,根据结构在预定后续使用期内的荷载危险性分析,对其后续使用期内的耐久性能

进行评估,并进一步总结归纳,对未建混凝土结构的耐久性设计提供经验和依据。

工程混凝土结构的耐久性研究应考虑服役环境、建筑材料和结构性能等方面的因素,因此结构耐久性的研究可划分为环境、材料、构件和结构等四个层次,如图 1-1 所示。

1.2.1 环境层次的研究

工程结构设计时,应考虑结构上可能出现的各种作用(包括直接作用、间接作用)和环境影响。环境影响可以具有机械的、物理的、化学的或生物的性质,而且有可能使结构的材料性能随时间发生不同程度的退化,从而影响结构的安全性和适用性。工程结构所处的环境可以划分为大气环境、海洋环境、冻融环境、土壤环境以及工业环境等。

环境影响对结构的效应主要是导致材料性能的降低,它与结构材料本身性能有着密切的关系,因此,环境影响的效应应根据材料特点加以规定。在多数情况下主要是涉及化学的和生物的危害,其中环境湿度是最关键的影响因素。

环境影响对结构的效应主要是导致材料性能的降低,它与结构材料本身性能有着密切的关系,因此,环境影响的效应应根据材料特点加以规定。在多数情况下主要是涉及化学的和生物的危害,其中环境湿度是最关键的影响因素。

环境影响在很多方面与作用相似,而且同样可以进行分类,特别是关于其在时间上的变异性,可将环境影响分类为永久、可变和偶然影响三类。例如,对处于海洋环境中的混凝土结构,氯离子对结构钢筋的腐蚀作用是永久影响,空气湿度对木材强度的影响是可变影响等。

基于环境影响的混凝土结构耐久性设计可分为传统的经验方法和定量计算方法。传统经验方法是将环境作用按其严重程度定性地划分成几个作用等级,在工程经验类比的基础上,

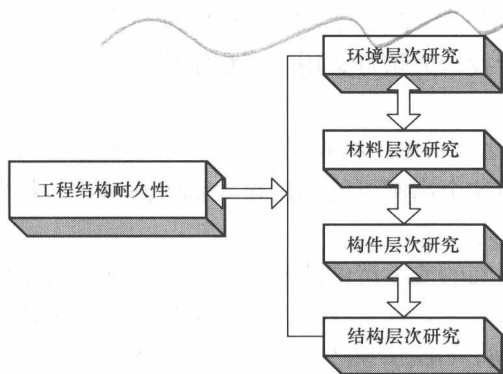


图 1-1 工程结构耐久性研究的主要层次

对于不同环境作用等级下的混凝土结构构件,直接规定混凝土材料的耐久性质量要求和钢筋保护层厚度等构造要求。近年来,传统的经验方法有很大的改进:即按照材料的劣化机理确定不同的环境类别,在每一类别下再按温、湿度及其变化等不同环境条件区分其环境作用等级,从而更为详细地描述环境作用。基于环境影响的定量计算方法中,环境作用需要定量表示,然后选用适当的材料劣化数学模型,求出环境作用效应,列出耐久性极限状态下的环境作用效应与耐久性抗力的关系,进而求得相应的使用年限。

目前,环境作用下耐久性设计的定量计算方法尚未成熟到能在工程中普遍应用的程度。在各种劣化机理的计算模型中,可供使用的主要局限于定量估算钢筋开始发生锈蚀的年限等。因此,在国内外现行的混凝土结构设计规范中,对环境的影响只能根据材料特点,按其抗侵蚀性的程度来划分等级,以便在结构耐久性设计时按等级采取相应措施。

1.2.2 材料层次的研究

材料层次的研究是工程结构耐久性研究的基础部分,对混凝土结构而言,主要包括对混凝土和钢筋两种材料的研究。材料层次的耐久性研究主要从影响结构耐久性的因素入手,分析它们在单因素或多因素作用下的破坏机理,建立耐久性损伤的预报模型和经验公式,以实现由定性分析到定量分析的转变。

混凝土材料的耐久性又可分为混凝土的中性化、氯离子侵蚀、硫酸盐侵蚀、冻融破坏和碱—骨料反应等,其中,混凝土的碳化是较为普遍且不可避免的。这是因为随着社会工业化的发展,大气中的二氧化碳浓度一直在急剧增加。在1800年前,南极大气中的二氧化碳浓度一直保持为280ppm,1999年上升到350ppm,而2030年则预计达到460ppm。

混凝土的碳化将降低混凝土内部的碱度,破坏钢筋表面的钝化膜,使混凝土失去对钢筋的保护作用,给混凝土中钢筋锈蚀带来不利的影响。同时,碳化还会影响混凝土收缩、强度、结构、离子迁移等诸多性质。混凝土碳化的经典理论模型是基于Fick第一扩散定律的碳化模型,这一模型认为混凝土的碳化深度与时间的平方根成正比。除时间因素外,影响混凝土碳化的因素还包括环境因素和混凝土材料本身的因素。由于不同结构所处的环境不同,空气中二氧化碳含量和空气的湿度也不同,因此混凝土碳化的速度也不同,在混凝土碳化深度公式中都用地地区环境影响系数加以区别。结构所处的环境因素还有,空气中二氧化碳含量、空气的湿度、风压等。但在这众多的因素下,衡量其量化影响的程度还不高,尤其是预测模型,还存在着一定的不确定性和不确知性。

氯离子的侵蚀通常发生在海洋环境下、北方地区冬天撒除冰盐地区、化工环境以及盐碱地区等,氯离子的侵蚀将破坏钢筋表面的钝化膜,导致结构钢筋的锈蚀,其对混凝土结构的危害程度远远大于二氧化碳等所引起的混凝土中性化。对结构混凝土而言,氯离子的来源主要由两部分组成:一部分是由拌和水、水泥、细骨料、粗骨料、矿物掺和料以及各种外加剂等各种混凝土组成材料带进混凝土的氯离子;一部分是通过混凝土保护层由外界环境通过不同方式进入混凝土内部的氯离子。基于所处环境的不同,外部的氯离子一般通过渗透、扩散以及毛细作用等方式侵入混凝土。在许多情况下,扩散仍然被认为是一个最主要的传输方式之一,其经典理论模型是基于Fick第二扩散定律的氯离子扩散系数模型。氯离子侵蚀的研究目前主要包括以下几个方面:氯离子侵蚀的扩散机理、影响氯离子扩散的因素分析、氯离子临界含量、氯离子扩散系数模型等。通常情况下,影响氯离子扩散的因素主要为混凝土材料本身和环境因素。

混凝土的碱—骨料反应，是混凝土内部成分之间进一步化学反应的一种。混凝土原材料中的水泥、外加剂、混合材和裂隙水中的碱与骨料中的活性成分反应，在混凝土浇筑成型后若干年（数年至 20、30 年）逐渐反应，反应生成物吸水膨胀使混凝土产生内部应力，膨胀开裂。碱—骨料反应是影响混凝土耐久性最主要的因素之一，其开裂破坏是整体性的，且难以被阻止，因此被称为混凝土的“癌症”。混凝土结构发生碱—骨料反应需要具备三个条件：首先是混凝土的原材料水泥、混合材、外加剂和水等含碱量高；第二是骨料中有相当数量的活性成分；第三是潮湿环境，有充分的水分或湿润空气供给。依据反应机理的不同，碱—骨料反应主要分为碱硅酸反应、碱碳酸盐反应和碱硅酸盐反应。针对混凝土的碱—骨料反应，目前的研究主要集中于骨料活性检测技术及抑制碱—骨料反应等方面。

长期与水体直接接触并会发生反复冻融的混凝土结构构件，由于饱水的混凝土在反复冻融作用下会造成内部损伤，发生开裂甚至剥落，导致骨料裸露。与混凝土冻融破坏有关的环境因素主要有水、最低温度、降温速率和反复冻融次数等。混凝土的冻融损伤一般只发生在混凝土内部含水量比较充足的情况下。

硫酸盐侵蚀通常发生于地下土壤（水）环境、化工环境以及其他一些特殊环境，其侵蚀作用将导致混凝土的开裂破坏。水、土中的硫酸盐对混凝土的腐蚀作用，除硫酸根离子的浓度外，还与硫酸盐的阳离子种类及浓度、混凝土表面的干湿交替程度、环境温度以及土的渗透性和地下水的流动性等因素有很大关系。腐蚀混凝土的硫酸盐主要来自周围的水、土，也可能来自原本受过硫酸盐腐蚀的混凝土骨料以及混凝土外加剂等。在常见的硫酸盐中，对混凝土腐蚀的严重程度从强到弱依次为硫酸镁、硫酸钠和硫酸钙。化学环境作用对混凝土的腐蚀，至今尚缺乏足够的数据积累和研究成果可供实际工程应用。

1.2.3 构件层次的研究

构件层次的耐久性研究是结构层次研究的前提和基础。对混凝土结构而言，构件层次的研究通常包括混凝土锈胀损伤、黏结性能退化、损伤识别诊断以及构件承载能力等的研究。混凝土中钢筋发生锈蚀后，锈蚀产物的体积膨胀作用产生锈胀力导致混凝土保护层胀裂甚至剥落，严重影响结构的正常使用；锈蚀产物的生成、钢筋与混凝土黏结性能的降低以及钢筋锈蚀后的截面损失等，使钢筋混凝土结构或构件的承载能力降低。锈胀开裂目前研究的重点在于锈胀前锈胀力模型和锈蚀胀裂前后钢筋锈蚀量模型的研究，而黏结性能退化研究是研究锈蚀构件和结构性能的基础，也是腐蚀混凝土结构进行有限元非线性分析时不可避免的问题。锈蚀钢筋与混凝土黏结性能的研究，有助于恰当的评估服役结构的实际承载能力，经济合理的确定维修加固方案。

构件的损伤识别主要包含损伤存在检测、损伤位置（类型）识别和损伤程度识别等内容。目前国内外对工程结构损伤识别的方法主要有静力识别法、动力识别法以及静—动力综合法等。静力识别法一般是将结构试验的结果与初始的模型分析结果进行综合比较，通过一定的条件优化约束，不断地修正模型的某些参数，使测试值与计算分析值最大程度地吻合，从而得到结构参数变化的信息，达到对结构构件损伤识别的目的。常用的静力参数有刚度、位移、应变、残余力、弹性模量、单元面积及惯性矩等。基于动力的损伤识别法是目前研究的热点，其理论核心是基于振动的损伤识别技术，在损伤产生的位置区域结构的质量特性一般不会受到影响，结构（构件）的刚度和承载能力将会有所下降，而结构的模态参数（模态频率、模态振型、模态阻尼等）也随之改变。通过研究结构的振动特性，就能识别结构是否

发生损伤,并确定损伤的位置和程度。动力识别方法利用结构动态参数对损伤的敏感性、对结构的整体性能进行检测和监测,现场工作量小,可做到实时监控。但由于受环境干扰等因素影响,对测试仪器及识别方法的精度要求较高。其中,根据是否使用数值仿真模型,还可将基于动态数据的损伤识别方法分为有模型法和无模型法两类。

1.2.4 结构层次的研究

结构层次研究的开展主要是基于构件层次的研究。结构层次的耐久性研究一般来说包括:新建结构的耐久性设计、在役结构的耐久性评估以及维修决策等。目前,新建结构的耐久性设计内容主要包括预测分析、构造处理、结构材料以及防护措施的采用等。而对服役结构进行耐久性评估,则需在分析结构已服役期内所提供的大量反馈信息的基础上,明确其损伤状态,并根据结构在预定后续使用期内的荷载危险性分析,对其后续使用期内的耐久性性能进行评估,为在役结构的优化维修决策以及新建结构的耐久性设计提供经验和依据。

1.3 目前研究中存在的问题

工程结构的耐久性研究是一项非常复杂的课题,其中涉及很多模糊及不确定性的因素,而且这些模糊及不确定性随着人们对耐久性问题认识的不断深入而日显突出。总结工程结构耐久性研究的主要内容,可以看出,目前的研究中仍存在较多问题。

1.3.1 环境层次的研究

环境一般是对我们要考虑的主体而言、指与之有某些关系的事物和现象。在这里,工程结构是我们需要考虑的主体,围绕着结构的大气圈、水圈等自然圈以及城市、交通、人类活动等则构成了结构周围的环境。工程结构所处的工作环境条件变化多端,影响因素复杂,不同的环境条件直接关系着结构耐久性的退化。无论是新建结构设计还是服役结构的评估加固,考虑结构所处的工作环境,并据此做出相应的结构材料和构造等规定都是必要的。

目前,国内外相关规范和规程均以环境的侵蚀性大小为依据,对工程结构的各类工作环境进行分类,如JTJ 275—2000《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》、GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》、CCES 01—2004《混凝土结构耐久性设计与施工指南》、JTG/T B07—01—2006《公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范》、CECS 220:2007《混凝土结构耐久性评定标准》、GB 50046—2008《工业建筑防腐蚀设计规范》、GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》、GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》、TB 10005—2010《铁路混凝土结构耐久性设计规范》以及欧洲的《混凝土结构耐久性设计指南》等。其中,2001年颁布的《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》在海洋腐蚀性环境区划方面,为其他土木工程行业起到了较好的带头示范作用。

然而,上述规范(程)中所作的相应规定,更多局限于环境分类、材料和设计构造等方面,结构设计中耐久性及使用年限等的要求只能通过材料和构造层面间接体现,而对耐久性影响因素如环境变化、混凝土性能以及施工误差等的不确定性则较少涉及,使基于可靠性的耐久性设计(或耐久性再设计)目标的量化很难达到。同时,确定性分析所带来的问题和隐患则是显而易见的。因此,工程结构相关工作环境基础数据的调查统计分析及其耐久性区划标准的建立,是目前环境层次所面临的主要问题,需要大量的基础工作。

1.3.2 材料层次的研究

材料层次的研究是工程结构耐久性研究的基础,目前针对单一因素的侵蚀机理研究较为充分。但对于复杂环境下结构的耐久性研究,则主要采用还原论,即将复杂影响分解为多因素的综合影响或某主导因素的主要影响,这从一定程度上割裂了各因素间的相互关联。例如在混凝土的腐蚀研究中,通常假定结构仅处于一种介质的侵蚀环境,而实际中的混凝土通常处于多种介质侵蚀环境的共同作用。大量破坏实例证明,混凝土常受到多种侵蚀破坏因素作用而导致加速破坏,如除冰盐侵蚀实际上包含冻融、温差、盐蚀、机械作用、钢筋锈蚀等多种破坏作用。目前,针对多因素共同侵蚀作用机理的研究相对仍处于起步阶段。

在材料层次的研究中,结构钢筋锈蚀检测技术的完善及相关评定标准的统一是面临的问题之一。目前对混凝土中结构钢筋锈蚀的检测方法很多,但由于种种因素的限制,在工程实际检测中,仍只能以定性检测为主,如半电池电位法、混凝土电阻率法等。而定量的检测方法,如直流线性极化电阻法、交流阻抗法等,距工程的实际应用仍有一段距离。由于我国对结构耐久性问题的研究起步较晚,对钢筋锈蚀检测结果的评判从一定程度上借鉴了国外的先进经验,也从不同程度上带来了评判标准的不一致,给后续的评判工作带来了困难。应该指出的是,钢筋锈蚀检测结果评判标准的统一,在很大程度上也取决于大量的试验检测数据和现场调查数据的支持。

1.3.3 构件层次的研究

混凝土中钢筋的锈蚀将导致混凝土保护层的开裂、钢筋有效截面面积的减小、屈服强度的变化以及混凝土—钢筋黏结性能的改变等,而这些改变将对受腐蚀构件/结构的抗力计算模式产生影响,并随服役结构的使用时间及腐蚀损伤情况而发生变化。而抗力计算模式的确定则是受腐蚀构件/结构承载能力以及耐久性评估的关键,其研究成果也将进一步指导未建混凝土结构的耐久性设计。

然而,由于锈蚀后钢筋与混凝土间黏结关系的影响因素很多,其黏结滑移机理也较为复杂,而目前的研究成果绝大多数是基于某种特定试验条件基础,试验结果的离散性大且规律难以统一,故使其承载能力的确定遇到一定的困难,这方面的研究也还需进一步深入。

在构件的损伤检测方面,目前研究仍主要针对损伤构件的静力性能,针对动力性能(例如抗震性能、疲劳性能)的研究则相对较少,而且对损伤后构件的损伤检测手段,多是静力检测的常规手段。例如在钢筋锈蚀程度的检测中,多是采用电化学的检测手段,此类基于静力检测的方法工作量较大;而基于模态分析的参数识别法,既能做到锈蚀损伤定位、损伤范围的推断,又能定量地评估结构锈蚀损伤程度,但由于目前检测技术精度的限制,如何将此类动力检测的手段合理地运用到耐久性检测中,仍需要更多的理论研究和实际工程的检验。

结构的可靠性,是指结构在规定的条件和时间内,完成预定功能的能力。所谓预定的功能,是指安全性、适用性、耐久性。只有当结构的安全性、适用性和耐久性都得到了保证,才能称之为可靠。在新建混凝土结构设计和服役混凝土结构的可靠性鉴定中,一般将结构的安全性统归于承载能力极限状态,将结构的适用性和耐久性统归于正常使用状态。但由于耐久性问题研究的复杂性,正常使用状态一般是根据结构位移(或挠度)、振动和裂缝等进行判断,缺乏完善的耐久性失效的检测判断准则。

在一定程度上,混凝土结构的腐蚀损伤将会对结构的安全性和适用性产生影响,并通过其各项指标体现出来,但此影响仍然是间接的,且不利于耐久性问题的提早发现。当然,由

于主观或客观因素的限制,对服役混凝土结构的定期监测仍然存在一定的困难。因此,有必要结合受腐蚀混凝土结构的特点,进一步完善耐久性失效的判断准则,加强定期检测,及时发现问题,提前维护,以避免更大的投入和损失。

1.3.4 结构层次的研究

目前对于侵蚀环境下的寿命预测的分析,都是离散的、不连续的,且较少将结构的极限状态和寿命预测相关联,结构的性能水准也未能与侵蚀过程分析有效的联系起来。且目前对锈蚀钢筋混凝土结构的研究,多是从承载力极限状态的角度出发的,对正常使用极限状态的研究较少,实际上,随着钢筋锈蚀程度的增加,结构抵抗外界侵蚀的能力降低,首先会造成构件适用性能的下降。

当混凝土结构的腐蚀损伤已经明确时,结构的维修决策将是面临的主要问题。维修决策的前提是建立于结构的现状可靠性(或安全性)状态、维修后的目标可靠性(或安全性)状态、合理维修(护)加固方案的选择以及近、远期社会经济指标的控制等。这些因素的相互影响,使受腐蚀混凝土结构的维修决策并非仅是一个“拍脑袋”的问题。应该注意的是,在进行优化维修决策时,对结构后续使用期内的荷载效应及环境腐蚀性的预估,应建立于结构已服役期间所提供的反馈信息的基础上,并应对各类防护/维修方案的可靠性及经济性进行验证。

无论对于新建或服役混凝土结构,结构的防护越来越引起广泛的重视,高性能混凝土、环氧涂层钢筋及各类防护材料的研究及应用,在一定程度上,从被动防护的角度加强了混凝土结构对外界侵蚀性介质的防护能力。

然而,由于设计基准期的延长,如 JTG D60—2004《公路桥涵设计通用规范》中第 1.0.6 条明确规定:“公路桥涵结构的设计基准期为 100 年”,且结构后续使用期内存在的诸多不定性因素的影响,使主动的防护在某些情况下成为必要。杭州湾跨海大桥为目前我国最长的跨海湾桥梁,建设环境恶劣,耐久性问题突出,在设计施工中,除采用高性能混凝土、混凝土表面涂装以及环氧钢筋等技术措施外,还首次在国内大型桥梁工程中采用了外加电流阴极保护系统,为主动腐蚀控制技术在大型工程的应用提供了参考和借鉴。

1.3.5 研究技术和方法

从影响因素的数学分析上,目前的研究较多采用确定性的方法。如对于钢筋的腐蚀程度来说,一般采用锈蚀深度中某一确定性的值来表征腐蚀的程度,实际上由于腐蚀环境和构件等的变异性,钢筋的腐蚀程度通常呈现很大的离散性。无论是表征均匀腐蚀的腐蚀深度还是表征不均匀腐蚀的最大腐蚀深度,经过大量的工程实例和实际的试验数据分析,均表明了腐蚀程度的随机特性。

在各类侵蚀过程模型的建立方面,如氯离子侵蚀过程模型,很多研究都是在 Fick 第二扩散定律的基础上加以理论或实验分析的修改,将影响因素作为确定性的值,实际上由于因素的多样性、材料的离散性和环境条件的复杂性,侵蚀过程模型的建立应该是基于不确定性的模型。

由于客观条件的限制,目前研究大多局限于实验室模拟的加速实验,加速腐蚀实验通常是将试验构件浸泡(放置)于模拟的侵蚀环境中,或者是施加一定的电流来模拟构件的腐蚀情况,这种情况下得到的钢筋锈蚀程度通常是均匀分布的,而实际环境下的钢筋锈蚀通常是均匀分布和非均匀分布现象同时发生,而锈蚀坑的存在是影响受腐蚀构件承载力的一个关键因素。实验室模拟结果是否能够反映真实环境下钢筋的腐蚀情况,还有待于进一步的分析。

如何利用模拟试验结果来建立试验条件下与真实使用环境下性能劣化发展的相似准则,有待于更多试验研究和实际工程实例的分析。

总之,确定性分析向随机统计分析进化、静态分析向动态分析转变、室内试验向实际工程应用发展、单因素分析向多因素耦联分析发展,是进一步完善工程结构耐久性理论和保证工程结构可靠的主要方向。

1.4 基本定义与术语

可靠性 reliability

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。它包括结构的安全性、适用性和耐久性。

可靠度 degree of reliability (reliability)

结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的概率。

失效概率 probability of failure

结构不能完成预定功能的概率。

可靠指标 β reliability index β

度量结构可靠度的数值指标,可靠指标 β 与失效概率 p_f 的关系为 $\beta = -\Phi^{-1}(p_f)$, 其中 $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态分布反函数。

基本变量 basic variable

代表物理量的一组规定的变量,用以表示作用和环境影响、材料和岩土性能以及几何参数的特征。

设计基准期 design reference period

为确定可变作用等的取值而选用的时间参数。

设计使用年限 design working life

设计规定的结构或结构构件不需进行大修即可按其预定目的使用的年限。

极限状态 limit states

整个结构或结构的一部分超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一功能要求,此特定状态为该功能的极限状态。在结构或构件处于极限状态时,各有关基本变量的关系式称为极限状态方程。

抗力 resistance

结构或结构构件承受作用效应的能力。

作用 action

施加在结构上的集中力或分布力(直接作用,也称为荷载)和引起结构外加变形或约束变形的原因(间接作用)。

作用的代表值 representative value of an action

极限状态设计所采用的作用值。它可以是作用的标准值或可变作用的伴随值。

结构耐久性 structure durability

在设计确定的环境作用和维修、使用条件下,结构构件在设计使用年限内保持其适用性和安全性的能力。

腐蚀 deterioration

材料与环境因素发生物理、化学或电化学反应而呈现的渐进性损伤与破坏。对钢材常称为锈蚀 (corrosion)。

环境影响 environmental influence

环境对结构产生的各种机械的、物理的、化学的或生物的不利影响。环境影响会引起结构材料性能的劣化,降低结构的安全性或适用性,影响结构的耐久性。

劣化 degradation

材料性能随时间的逐渐衰减。描述材料性能劣化过程的数学表达式,则称为劣化模型。

耐久性损伤 durability damage

由化学、物理等因素作用造成结构功能随时间退化的累积损伤。

维修 maintenance

为维持结构在使用年限内所需性能而采取的各种技术和管理活动。

修复 restore

通过修补、更换或加固,使受到损伤的结构恢复到满足正常使用所进行的活动。

可修复性 restorability

受到损伤的结构或构件具有能够经济合理地修复的能力。

剩余使用年限 remained service life

结构使用若干年后,在限定的使用条件和正常维护条件下,无需采取修复措施,继续保持其预定功能的时间。

耐久性失效 durability failure

结构或其构件由耐久性损伤造成某项性能丧失而不能满足安全使用的要求。

耐久性极限状态 durability limit state

结构或其构件由耐久性损伤造成某项性能丧失而不能满足使用要求的临界状态。

混凝土侵入性 penetrability of concrete

表征外部物质(水、气及溶于水、气中的其他分子和离子等)入侵到混凝土内部难易程度的混凝土性能。根据入侵物质的不同传输机理与特征,常用渗透系数、扩散系数、吸收率等不同参数表示,作为混凝土材料耐久性的综合度量指标。混凝土侵入性又常被称为渗透性(permeability),但渗透性通常单指水性溶液在压力差驱动下的传输,并用渗透系数表示渗透性。

混凝土抗冻耐久性指数 DF (durability factor)

混凝土经规定次数快速冻融循环试验后,用标准试验方法测定的动弹性模量与初始动弹性模量的比值。

饱水度 degree of saturation

混凝土内部孔隙的充水程度是混凝土孔隙中水的总体积与孔的总体积的比值。混凝土的抗冻性能与其饱水度紧密相关。

含气量 concrete air content

混凝土中气泡体积与混凝土总体积的比值。对于采用引气工艺的混凝土,气泡体积包括掺入引起剂后形成的气泡体积和混凝土拌和过程中夹带的空气体积。

扩散 diffusion