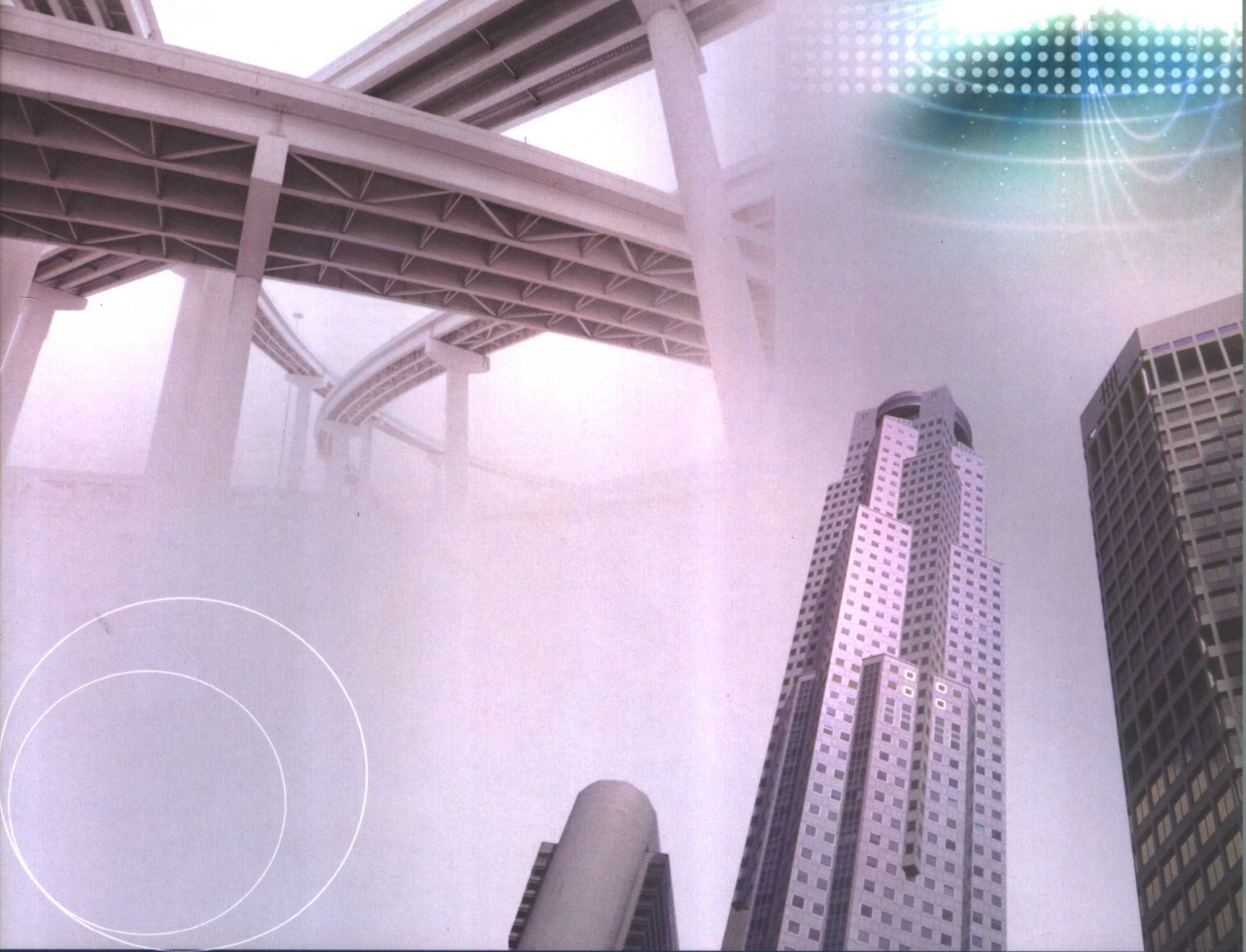




受腐蚀混凝土结构 耐久性检测诊断

赵卓 蒋晓东 著



黄河水利出版社

受腐蚀混凝土结构耐久性检测诊断

赵 卓 蒋晓东 著

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书通过采用理论分析、试验研究和实际工程检测、评估相结合的研究方法,围绕混凝土结构的耐久性问题,系统介绍了混凝土结构的基本腐蚀机理、主要腐蚀影响因素、氯离子的侵蚀作用、钢筋锈蚀的现场电化学检测技术及检测实例、服役混凝土结构腐蚀损伤的多级模糊综合评判、混凝土中钢筋锈蚀的分阶段速率模型、受腐蚀混凝土结构的抗力时变特性分析、受腐蚀混凝土结构的动态可靠性分析、基于结构耐久性的结构优化设计及方案评估、主动和被动腐蚀控制、受腐蚀混凝土结构的优化维修决策及工程评估实例。

本书可供土木工程专业的科研人员、工程技术人员、高等院校的教师及研究生、本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

受腐蚀混凝土结构耐久性检测诊断/赵卓,蒋晓东著.
郑州:黄河水利出版社,2006.9
ISBN 7-80734-119-X

I. 受… II. ①赵… ②蒋… III. 混凝土结构-耐久性-检测 IV. TU370.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 096034 号

组稿编辑:王路平 电话:0371-66022212 E-mail:wlp@yrp.com

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940 传真:0371-66022620

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:8.75

字数:210 千字

印数:1—3 000

版次:2006 年 9 月第 1 版

印次:2006 年 9 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-80734-119-X/TU·72

定价:20.00 元

前 言

混凝土一直被认为是一种节能、经济、用途极为广泛的人工耐久性材料。但是,近年来却发现很多混凝土结构,尤其是处于海洋环境、化学工业腐蚀性介质或其他特殊环境(如冲刷、磨损、干湿、冷热等)下的结构,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锈蚀或其他原因而引起的混凝土结构开裂破损,甚至崩溃。

混凝土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可靠性能和安全性能,必须予以高度关注。目前,我国正处于大规模工程建设期,如果不重视混凝土结构的耐久性问题,几十年后,恐怕也会出现国外那样的维修高潮。因此,需要对混凝土结构的耐久性相关问题进行研究,并基于结构的受腐蚀损伤特点,提出相应的检测、诊断、设计、施工及使用维护措施,以保证混凝土结构在设计使用寿命内的正常使用。

我们从 1995 年开始,先后承担了由英国皇家学会、中国国家自然科学基金委联合资助的中英合作项目“腐蚀环境下在役钢筋混凝土结构的安全性评估”、河南省自然科学基金项目“化工钢筋混凝土结构物的维修决策理论研究”、河南省高校青年骨干教师资助计划项目“预应力混凝土连续梁桥结构的健康研究”、河南省杰出青年科学基金项目“工业建筑基于耐久性的优化设计理论研究”等与混凝土结构耐久性相关的科研课题。经过 10 余年的工作,在国内外相关研究成果的基础上,我们通过采取理论分析、试验研究和实际工程检测评估相结合的研究方法,围绕混凝土结构的耐久性问题,进行了较为深入、系统、全面的研究,取得了一定的研究成果,本书是这些课题研究成果的部分内容。

本书首先对混凝土结构耐久性研究的重要性及必要性进行了阐述,并对相关研究现状进行了综述,结合自身的研究成果,对混凝土结构耐久性研究中存在的一些问题进行了分析探讨;第 2 章对混凝土结构的腐蚀机理、氯离子的侵蚀作用、影响混凝土结构耐久性的主要因素及典型腐蚀性环境等进行了介绍及分析研究;第 3 章对氯离子侵蚀的相关问题,如氯离子含量的临界值、氯离子的扩散以及混凝土渗透性的检测技术等进行了分析研究;第 4 章结合试验研究和实际工程检测结果,重点对钢筋锈蚀的现场电化学检测技术进行了分析研究,为受腐蚀混凝土结构的耐久性诊断提供了依据;第 5 章主要针对服役混凝土结构的腐蚀损伤特点,结合实际工程检测经验,采用多级模糊综合评判的方法,对受腐蚀混凝土结构的可靠性进行了鉴定分级,为实际工程的耐久性检测评估提供了具体方法;第 6 章提出了钢筋锈蚀的分阶段速率模型,对受腐蚀混凝土结构的抗力时变特性进行了分析,并基于后续使用期内的荷载危险性分析,对受腐蚀混凝土结构的动态可靠性进行了分析研究,为受腐蚀混凝土结构的耐久性评估提供了理论依据;第 7 章主要针对腐蚀环境下的新建混凝土结构,基于结构耐久性,开展了结构方案选型及优化设计研究,并提出了混凝土结构方案的耐久性评估方法;第 8 章提出了腐蚀环境下混凝土结构的主动控制及被动控制方法,并基于腐蚀控制,对受腐蚀混凝土结构的优化维修决策进行了分析研究,

为进一步的维修加固决策、设计提供了依据;第9章介绍了我们所开展的两个实际工程的检测及耐久性评估实例;附录介绍了欧洲标准 EN12696:2000《混凝土中钢筋的阴极保护》的部分内容。

全书共9章,第1、3、6、7、8章由赵卓编写,第2、4、5章由蒋晓东、张晓萍编写,第9章由蒋晓东、刘念龙编写,附录由赵卓、张晓萍编写,赵卓负责统稿。

在本书的撰写过程中,北京工业大学霍达教授给予了大力支持和帮助,并予以鼓励,在此表示衷心感谢。

在本书完稿之际,郑州大学刘立新教授对本书提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

参与相关项目研究工作的主要人员有王东炜教授、郭院成教授、马亚丽博士、博士研究生曾力、张海廷硕士、刘扬和王伟工程师、硕士研究生李锋和赵永伟等,在此表示感谢。

混凝土结构的耐久性是一项很复杂的课题,有许多基础工作尚需进一步解决。限于作者的研究水平,本书在很多方面还存在着不足及疏忽之处,恳请各位读者批评指正。

作 者

2006年6月

目 录

前 言

第 1 章 概 述	(1)
1.1 混凝土结构的耐久性问题	(1)
1.2 相关研究现状	(3)
1.3 关于耐久性问题研究的一些认识	(4)
参考文献	(7)
第 2 章 混凝土结构的腐蚀及主要成因	(10)
2.1 混凝土结构的基本腐蚀机理	(10)
2.2 氯离子的侵蚀作用机理	(13)
2.3 影响混凝土结构耐久性的其他因素	(13)
2.4 典型腐蚀性环境	(17)
参考文献	(20)
第 3 章 氯离子侵蚀的相关问题	(22)
3.1 混凝土中氯离子含量的临界值	(22)
3.2 氯离子在混凝土中的扩散	(24)
3.3 混凝土渗透性的快速检测技术	(25)
参考文献	(27)
第 4 章 混凝土中结构钢筋锈蚀的现场检测	(28)
4.1 钢筋锈蚀的现场检测技术	(28)
4.2 酸性环境下混凝土受弯构件的腐蚀试验	(33)
4.3 工程检测实例	(41)
4.4 关于常规半电池电位法的改进分析	(63)
4.5 小 结	(65)
参考文献	(66)
第 5 章 混凝土结构腐蚀损伤的模糊综合评判	(68)
5.1 影响因素论域的划分	(68)
5.2 各层次论域子集中影响因素的确定	(69)
5.3 各因素论域子集评语等级的确定	(70)
5.4 上部结构各因素子集的模糊综合评判	(71)
5.5 受腐蚀混凝土结构的可靠性鉴定评级	(74)
参考文献	(75)
第 6 章 受腐蚀混凝土结构的动态可靠性分析	(76)
6.1 钢筋锈蚀的分阶段速率模型	(76)

6.2	受腐蚀混凝土结构的抗力分析·····	(81)
6.3	受腐蚀混凝土结构的可靠性分析·····	(85)
	参考文献·····	(87)
第7章	基于耐久性的混凝土结构优化设计·····	(88)
7.1	结构方案选型及优化设计的数学模型·····	(88)
7.2	混凝土结构方案的耐久性评估·····	(92)
	参考文献·····	(98)
第8章	混凝土结构的腐蚀控制及其维修决策·····	(99)
8.1	混凝土结构腐蚀的消极控制和积极控制·····	(99)
8.2	基于腐蚀控制混凝土结构优化维修决策·····	(104)
	参考文献·····	(107)
第9章	工程耐久性诊断评估实例·····	(109)
9.1	某中心医院病房楼的可靠性鉴定·····	(109)
9.2	某电厂冷却塔的结构可靠性鉴定·····	(115)
	参考文献·····	(117)
附录	欧洲标准 EN12696:2000 部分内容简介·····	(118)

第1章 概述

1.1 混凝土结构的耐久性问题

任何结构的兴建都是为了使用,也就是使已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。王光远院士指出^[1.1]:“当前力学工作者与结构工作者的精力主要集中于研究结构分析、设计和施工的理论和办法(其目的是提高结构设计和施工的质量),而对于结构系统的方案论证以及服役后的评估和维修理论则研究较少,这是力学界与结构工程界研究的一个薄弱环节。”

大量混凝土工程实例表明,很多结构在服役期内总的维修费用远大于它的初始造价。因此,减少结构在服役期内的总维修费用在目前是更现实、更迫切的任务。所以应该重视研究服役结构的损伤评估方法,并根据服役结构在服役期间所提供的大量宝贵的反馈信息,反过来促进设计理论的进步,使设计、施工和使用维护更趋于合理。

混凝土结构一直被认为是一种节能、经济、用途极为广泛的人工耐久性材料,是目前应用较为广泛的结构形式之一。随着结构物的老化和环境污染的加剧,混凝土结构的耐久性问题越来越引起国内外广大研究者的关注。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。”^[1.2]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原因是“南锈北冻”^[1.3]。

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、施工及使用过程中的多因素影响,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,进而导致结构的安全性、适用性、耐久性的降低,并最终导致结构失效,造成资金的巨大浪费。对于处在海洋环境、化学工业腐蚀性介质或其他特殊环境(如冲刷、磨损、干湿、冷热等)下的混凝土结构,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。

据1994年铁路部门的统计,我国正在运营的有病害桥梁共6137座,占总数的18.8%,其中预应力混凝土桥梁占2675座^[1.4]。而我国已建成的大型海湾桥梁,部分也已出现氯离子腐蚀的迹象^[1.5]。1981年的调查表明,华南地区18座使用7~25年的海港钢筋混凝土码头中因钢筋锈蚀而导致结构耐久性降低的占89%,大连港务公司的煤机廊道投产仅5年,部分混凝土就因钢筋锈蚀而产生开裂^[1.6]。

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,新中国成立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^[1.7];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 10~20 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^[1.8]。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^[1.9~1.11]。

处于沿海及近海地区的混凝土结构,由于海洋环境对混凝土的侵蚀导致钢筋锈蚀而使结构发生早期损坏,丧失了结构的耐久性能,造成了极大的危害和巨大的损失。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%^[1.12],为解决海洋环境下混凝土结构的锈蚀与防护问题,每年花费近 20 亿英镑^[1.13]。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^[1.14]。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^[1.15,1.16]。

为保障道路交通的畅通,各国在冬季向道路、立交桥等撒盐,使得盐中含有的氯离子侵蚀到钢筋表面,引起锈蚀,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 3 000 座桥梁需要维修^[1.17]。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 2 800 万英镑,因为撒除冰盐引起的钢筋锈蚀使得混凝土胀裂,为此维修耗资近 4 500 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^[1.18]。

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现象,破损程度非常严重^[1.19]。冯乃谦、封孝信^[1.20,1.21]等对我国山东沿海地区的混凝土桥梁的耐久性状况进行了调查,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,由于长期处于海水的干湿作用下,约有 10 cm 厚的混凝土被腐蚀掉。

目前,混凝土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”来形象地说明了耐久性的重要性,特别是设计对耐久性的重要性,即:设计时,对新建项目在钢筋防护方面每节省 1 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混凝土结构耐久性问题的研究。

有专家估计,我国“大干”基础设施工程建设的高潮还将延续 20 年,由于忽视耐久性,迎接我们的还会有“大修”20 年的高潮,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^[1.22]。

混凝土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能和安全性能,必须予以高度关注。目前我国正处于大规模工程建设期,如果不重视混凝土结构的耐久性问题,几十年后,恐怕也会出现国外那样的维修高潮。因此,需要对混凝土结构的耐久性相关问题进行研究,并基于结构受腐蚀损伤的特点,提

出相应的检测、诊断、设计、施工及使用维护措施,以保证结构在设计使用寿命内的正常使用。近年来,我国正越来越多地关注混凝土结构的耐久性问题,在《公路工程结构可靠性设计统一标准》、《混凝土结构耐久性评定标准》(征求意见稿)以及《混凝土结构耐久性设计与施工指南》等标准中,对混凝土结构的耐久性都提出了明确的要求,耐久性设计规范也正在研究制定之中。这对于提高混凝土结构的耐久性将起到有力的推动作用。

1.2 相关研究现状

受腐蚀混凝土结构的耐久性检测诊断是一项跨学科的课题,涉及到混凝土基本理论、电化学腐蚀、结构耐久性分析、试验检测技术以及环境科学等多个方面。由于课题的复杂性,目前绝大部分的研究工作主要集中在以下几个方面。

1.2.1 电化学腐蚀机理及检测方法的研究

目前,电化学腐蚀基本理论的研究已趋于完善,针对结构混凝土,主要体现在混凝土材料层次的腐蚀机理及钢筋的锈蚀问题上^[1.23~1.27]。另外,不同类型的介质对结构材料所造成的腐蚀损伤速率以及相应材料力学性能改变情况的研究仍需进一步的工作,尤其是钢筋在不同腐蚀性环境中的锈蚀速率以及其力学特性随结构使用时间的变化情况。

已有的各种结构腐蚀检测方法,在试验室中大都取得了良好的效果。部分检测方法,如半电池电位法、混凝土电阻率法、线性极化电阻法以及地质雷达法等^[1.28~1.34],已开始应用于实际工程中,并获得了一定的成效。然而,由于在实际工程中所存在的种种困难(如与钢筋的连接、钢筋面积的不确定性、设备造价等),进一步的改进工作仍需进行,以提高设备的检测精度,为服役混凝土结构的耐久性评估提供有效的结构使用状况信息。

1.2.2 结构耐久性相关研究

王光远院士在文献[1.1]中提出了结构服役期间的动态可靠度及其维修理论的框架。针对新建结构与不维修结构的特点,提出了其可靠度的评估方法,并以服役期间的可靠度为基本变量,提出了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,确定其在后续使用期内动态可靠度的方法,为进行腐蚀环境下服役混凝土结构的可靠性评估及优化维修决策理论的研究提供了系统的理论指导。

1990年,王光远院士提出并建立了结构服役期间的动态可靠度分析及优化维修决策理论和在役结构强度储备评估方法^[1.35,1.36];1990年,C.Andrade^[1.37]等提出了基于线性极化电阻法检测的确定结构剩余寿命的预测方法;1991年,赵国藩院士提出了服役结构在剩余寿命内荷载及荷载效应的统计分析方法^[1.38];1992~1996年,段忠东等^[1.39]研究了结构概率损伤理论及构件抗力衰减规律;1993~1996年,王林科等^[1.40]、孙维章等^[1.41]、陶峰等^[1.42]通过试验研究了服役钢筋混凝土结构构件承载力的评估方法;1997年,屈文俊等^[1.43]根据混凝土裂缝宽度对混凝土结构耐久性影响的模糊特性,建立了裂缝宽度隶属耐久性失效的隶属函数,提出了混凝土桥梁耐久性未来状态的预测评估方法;1997年,赵

鹏飞等^[1.44]根据钢筋混凝土构件耐久性评估的特点,借助于模糊数学的手段,提出了一种耐久性分级评定方法;1998年,卢木等^[1.45]以层次分析法为基础,根据熵的性质,把多指标评定体系的固有信息与专家经验判断量化的主观信息相结合,建立了结构耐久性多层次综合评判模型,并对结构耐久性进行了综合分级评定;1995~1999年,郭院成、李广慧、赵卓等^[1.46~1.48]对化工环境下钢筋混凝土结构的腐蚀机理进行了研究,并建立了受腐蚀服役混凝土结构的动态可靠性评估方法及相应的维修决策理论;2000年,易海平等^[1.49]提出了用概率法评估既有预应力混凝土桥承载能力及使用性能的方法;1999~2001年,张德峰等^[1.50]、王百成等^[1.51]、包琦玮^[1.52]、柴金义^[1.53]、陈昌伟等^[1.54]针对预应力混凝土结构的腐蚀耐久性进行了广泛的研究;2002年,王春生等^[1.55]提出基于损伤机理的结构损伤安全评定方法的设想,综合应用基于损伤力学、疲劳断裂、可靠度理论等多种方法和理论进行损伤安全评定;2002年,赵冬兵^[1.56]提出了基于动态有限元分析的桥梁快速评估方法;2002年,任宝双等^[1.57,1.58]将物元分析理论引入层次分析法,建立了多层次评估模型;2003年,仲伟秋等^[1.59]提出了基于碳化损伤的混凝土工业厂房耐久性评估方法;2003年,荀志远等^[1.60]以工业厂房为模型,将物元分析和层次分析法有机地结合起来建立工业厂房综合评估模型,能够克服传统方法中参评人员的主观不确定性和认识上的模糊性;2004年,夏宁等^[1.61]提出了基于模糊等价关系的动态聚类分析的一种构件耐久性评估方法。

目前,服役混凝土结构的耐久性问题引起了国内外各界越来越多的关注。美国ACI437委员会于1991年提交了“已有混凝土房屋抗力评估”的最新报告,并提出了检测试验的详细方法和步骤^[1.62];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》(ACMC2001),并提出了基于性能的结构设计方法;2000年6月在西班牙巴塞罗那召开了第五届混凝土耐久性会议;2000年9月在新加坡召开了结构的缺陷、耐久性和修补的第六次国际会议;2000年11月在法国召开了混凝土结构的寿命预测和耐久性设计国际会议;2001年3月在马尔他岛召开了安全性、风险性与可靠性——工程趋势的国际学术会议。我国于1991年12月在天津成立了混凝土结构耐久性学组;1992年11月在济南成立了混凝土耐久性专业委员会;2000年5月在杭州举行的土木工程学会第九届年会学术讨论会,混凝土结构的耐久性是大会的主题之一;2001年11月,国内众多相关专家学者在北京举行的工程科技论坛上,就土木工程的安全性与耐久性问题进行了热烈的讨论;建设部在“七五”、“八五”和“九五”期间都专门设立课题研究混凝土的耐久性问题:“七五”课题为“大气条件下钢筋混凝土结构耐久性及其使用年限”,“八五”课题为“预应力混凝土结构及混凝土耐久技术”、“工业厂房混凝土结构耐久性研究”,“九五”期间设立了“重点工程混凝土安全性的研究”的国家重点科技攻关项目,均取得了有益的成果。

1.3 关于耐久性问题研究的一些认识

混凝土结构的耐久性研究是一项非常复杂的课题,其中涉及到很多模糊及不确定性的因素,而且这些模糊及不确定性的因素随着人们对混凝土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、结构腐蚀的防护及检测技术研究等方面。金伟良等^[1.63]指出:“混凝土结构的耐久性课题包括两部分: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。

可以看出,是否能够对“结构已服役期内所提供的大量反馈信息”进行完全正确的检测、归纳、诊断,是研究混凝土结构耐久性课题的第一个关键,但这一方面的研究仍存在很多问题。

1.3.1 钢筋锈蚀检测技术的完善及相关评定标准的统一

如1.2节所述,目前针对混凝土中钢筋锈蚀程度的检测方法很多,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^[1.64],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,距工程的实际应用则仍有一段距离,如4.1节所述。另外,基于动力模态分析的损伤识别,仍需要进一步的理论分析和实际工程检验。

由于我国对混凝土结构耐久性问题的研究起步较晚,对混凝土中钢筋锈蚀检测结果的评判在一定程度上借鉴了国外的先进经验,也在不同程度上带来了评判标准的不一一致^[1.33,1.63~1.65],给后续的评判工作带来了困难,4.5节结合工程实例的检测,对此问题进行了研究。

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。在我国,由于种种主观或客观因素的限制,相关检测数据的采集是非常困难的。而对相关检测数据的整理归纳,还需考虑宏观与微观环境、结构类型以及结构材料等因素的影响。

1.3.2 受腐蚀构件(或结构)抗力计算模式的研究

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—钢筋粘结性能的改变等,而这些改变将对受腐蚀构件(或结构)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(或结构)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新建混凝土结构的耐久性设计。

针对这一问题,文献[1.63,1.66~1.68]对目前国内外的研究现状进行了综述,并开展了相关试验和理论研究工作。4.2节和6.2节也对该问题开展了试验和理论分析研究工作。

然而,由于该问题的特殊性、复杂性及结构类型的多样性,进一步的理论和试验研究工作仍然是必要的。

1.3.3 受腐蚀混凝土结构耐久性失效准则的确定

结构的可靠性,是指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。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,才能称之为可靠的。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^[1.69,1.70],一般将结构的安全性归属于承载能力极限状态,将结构的适用性和耐久性归属于正常使用状态。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的,而缺乏完善的耐久性失效的判断准则。

虽然在一定程度上,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。5.3节结合工程实例检测经验,对这一问题进行了研究。

1.3.4 受腐蚀混凝土结构的优化维修决策理论研究

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,其前提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。8.2节在已有部分研究成果的基础上,对这一问题开展了理论研究工作。

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,并应对各类防护或维修方案的可靠性及经济性进行验证。

对于受腐蚀混凝土结构,由于其后续使用期内的诸多不确定性,全寿命经济分析观点的引入也是非常重要的。

1.3.5 混凝土结构的被动防护和主动防护

无论对于新建混凝土结构还是服役混凝土结构,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JTGD60—2004^[1.71]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。8.1节基于主动控制和被动控制的思想,对各类防护进行了归纳分析研究。

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^[1.72],为主动腐蚀控制技术在我国的

大型工程的应用提供了参考和借鉴。

参考文献

- [1.1] 王光远. 工程软设计理论. 北京: 科学出版社, 1992
- [1.2] 张誉, 等. 混凝土结构耐久性概论. 上海: 上海科学技术出版社, 2003. 4~5
- [1.3] 陈朝晖, 黄河. 混凝土劣化对结构性能的影响. 重庆大学学报, 2003, 26(2): 42~46
- [1.4] 张德峰, 等. 现代预应力混凝土结构耐久性的研究现状及其特点. 工业建筑, 2000, 30(11): 1~4
- [1.5] 张文忠, 等. 海洋环境混凝土结构中钢筋的腐蚀机理和防护实践. 华南理工大学学报(自然科学版), 1999, 27(11): 92~97
- [1.6] 战洪艳, 等. 沿海混凝土建筑破坏原因与修复办法. 青岛建筑工程学院学报, 2003, 24(1): 88~91
- [1.7] 杨静. 混凝土的碳化机理及其影响因素. 混凝土, 1995(6): 23~28
- [1.8] 贡金鑫, 赵国藩. 钢筋混凝土结构耐久性研究的进展. 工业建筑, 2000, 30(5): 1~5
- [1.9] 李家康, 董攀. 混凝土结构中钢筋腐蚀的分析. 工业建筑, 1998(1): 12~15
- [1.10] 王玲, 等. 北京西直门旧桥混凝土破坏原因分析. 见: 王媛俐, 姚燕编. 重点工程混凝土耐久性的研究与工程应用. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001
- [1.11] 刘来君, 赵小星. 桥梁加固设计与施工技术. 北京: 人民交通出版社, 2004
- [1.12] Dhir R K, Jones M R. Rapid estimation of chloride diffusion concrete. Magazine of Concrete Research, 1990(152): 177~185
- [1.13] 龚洛书, 柳春圃. 混凝土的耐久性及其防护修补. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990
- [1.14] Ant-onio Costa, J-ulio Appleton. Case studies of concrete deterioration in a marin environment in Portugal. Cement and Concrete Composite, 2002, 24: 167~179
- [1.15] Suad Al-Bahar. Investigation of corrosion damage in a reinforced concrete structure in Kuwait. ACI Materials Journal, 1998(3): 226~231
- [1.16] Vladimir Novokshchenov. Deterioration of reinforced concrete in the marine industrial environment of the Arabian Gulf-A case study. Material and Structures, 1995(28): 392~400
- [1.17] Rodriguez P. Methods for studying corrosion in reinforced concrete. Magazine of Concrete Research, 1994(167): 81~90
- [1.18] 罗福午. 建筑结构缺陷事故的分析及防止. 北京: 清华大学出版社, 1996
- [1.19] 邓冰, 竺存宏. 天津港高桩码头锈蚀损面板残余承载力试验及估算方法的研究. 港工技术, 1998(1): 25~31
- [1.20] 冯乃谦, 蔡军旺, 等. 山东沿海钢筋混凝土公路桥的劣化破坏及其对策的研究. 混凝土, 2003(1): 3~12
- [1.21] 封孝信, 冯乃谦, 等. 沿海公路桥梁破坏的原因分析及防止对策. 公路, 2002(1): 31~34
- [1.22] 陈肇元, 等. 土建结构工程的安全性及耐久性. 建筑技术, 2002, 33(4): 248~253
- [1.23] H.H 尤里克, 等. 腐蚀科学和腐蚀工程导论. 北京: 石油工业出版社, 1994
- [1.24] B.M 莫斯克文, 等. 混凝土和钢筋混凝土的腐蚀及其防护方法. 黄炯秋, 等译. 北京: 化学工业出版社, 1988
- [1.25] Tutti K. Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute Report, Stockholm, 1982
- [1.26] Eglinton M S. Concrete and its chemical behavior. Thomas Telford Ltd. 1987: 53~77

- [1.27] 赵磊. 在役预应力混凝土桥梁的腐蚀研究:[学位论文]. 郑州:郑州大学, 2001
- [1.28] Gowers K R, et al. Programmable linear polarization meter for determination of corrosion rate of reinforcement in concrete structures. British corrosion Journal, 1994, 29(1): 25~31
- [1.29] A.S.T.M C-876 Standard Test Method for Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete
- [1.30] Paul Chess, et al. Corrosion Investigation a guide to half-cell mapping. Thomas Telford Services Ltd., 1996
- [1.31] Millard S G, et al. Assessing the electrical resistivity of concrete structure for corrosion durability studies, 3rd Int. Symp. On Corrosion of concrete in Concrete Construction, Wishaw, May 1990, Society of Chemical Industry, 1990
- [1.32] 赵卓,等. 实际化工混凝土结构的腐蚀检测. 华北水利水电学院学报, 2000, 21(2): 18~20
- [1.33] 赵卓,等. 受氯化物腐蚀钢筋混凝土结构的腐蚀检测与评价. 建筑结构, 2000, 30(12): 20~22
- [1.34] 李汝成,等. 地质雷达在探测郑洛高速公路路基沉陷中的应用. 河南交通科技, 1997(6): 20~24
- [1.35] 王光远. 结构服役期间的动态可靠度及其维修理论初探. 哈尔滨建筑大学学报, 1990, 23(2)
- [1.36] 王光远. 结构强度储备的评估及结构维修过程的跟踪决策. 哈尔滨建筑大学学报, 1993, 26(2)
- [1.37] Andrade C, et al. Approximate calculation of service Life of corroding structures using Polarization Resistance Measurements, Paper Number 319, April 23~27, 1990, Ballys, Las Vegas, Nevada
- [1.38] 赵国藩,等. 旧有结构性能评估. 大连理工大学学报, 1991, 31(6): 687~692
- [1.39] 段忠东,等. 基于概念疲劳等积损伤理论的构件抗力衰减分析. 哈尔滨建筑大学学报, 1996, 29(1): 1~8
- [1.40] 王林科,等. 锈后钢锚混凝土粘结锚固的试验研究. 工业建筑, 1996, 26(4): 14~16
- [1.41] 孙维章,等. 锈蚀钢筋剩余承载能力的研究. 水利水运科学研究, 1993(4)
- [1.42] 陶峰,等. 服役钢筋混凝土构件承载力的试验研究. 工业建筑, 1996, 26(4): 17~20, 27
- [1.43] 屈文俊,车惠民. 裂缝对混凝土桥梁耐久性影响的评估. 铁道学报, 1997, 19(4): 90~98
- [1.44] 赵鹏飞,王娟明. 模糊数学在混凝土构件耐久性评定中的应用初探. 工业建筑, 1997, 27(5): 7~10, 62
- [1.45] 卢木,王娟明. 结构耐久性多层次综合评定. 工业建筑, 1998, 28(1): 1~8
- [1.46] 郭院成. 化工钢筋混凝土结构可靠性评估与维修决策:[学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨建筑大学, 1997
- [1.47] 李广慧. 在役钢筋混凝土框架结构可靠性鉴定与维修加固决策:[学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨建筑大学, 1999
- [1.48] 赵卓. 受腐蚀钢筋混凝土结构的可靠性检测诊断与控制维修决策:[学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨建筑大学, 1998
- [1.49] 易海平,周履. 用概率法评估既有预应力混凝土桥. 国外桥梁, 2000(1): 72~75
- [1.50] 张德峰,等. 现代预应力混凝土结构耐久性的研究现状及其特点. 工业建筑, 2000, 30(11): 1~4
- [1.51] 王百成,等. 钢筋混凝土桥梁的耐久性. 公路, 2001(6): 33~36
- [1.52] 包琦玮,等. 北京地区混凝土桥梁耐久性若干问题及对策. 城市道桥与防洪, 2000(6): 16~20
- [1.53] 柴金义. 混凝土桥梁耐久性问题分析. 内蒙古公路与运输, 2000(1): 6~8
- [1.54] 陈昌伟,等. 桥梁钢筋锈蚀及其对策. 公路, 1999(6): 1~6
- [1.55] 王春生,等. 桥梁损伤安全评定与维护管理策略. 交通运输工程学报, 2002, 2(4): 21~28
- [1.56] 赵冬兵. 基于动态有限元分析的桥梁快速评估. 中国市政工程, 2002(3): 61~64
- [1.57] 任宝双,等. 在用钢筋混凝土简支梁桥结构综合评估方法. 土木工程学报, 2002, 35(2): 97~102

- [1.58] 郭红仙,等.北京地区钢筋混凝土简支梁桥结构综合评估系统.清华大学学报(自然科学版),2002,42(6):825~831
- [1.59] 仲伟秋,等.基于碳化损伤的混凝土工业厂房耐久性评估.工业建筑,2003,33(3):21~23
- [1.60] 荀志远,吴广志.工业厂房可靠度评估的一种新方法.建筑技术开发,2003,30(8):20~23
- [1.61] 夏宁,任青文.基于模糊聚类分析法的构件耐久性评估.混凝土,2004,(3):14~16
- [1.62] ACI Committee 437.Strength Evaluation of Existing Concrete Buildings,1991
- [1.63] 金伟良,赵羽习.混凝土结构耐久性.北京:科学出版社,2002
- [1.64] GB/T50344—2004 建筑结构检测技术标准
- [1.65] 中华人民共和国交通部.公路旧桥承载能力鉴定方法(试行).北京:人民交通出版社,1988
- [1.66] 牛荻涛.混凝土结构耐久性与寿命预测.北京:科学出版社,2003
- [1.67] 赵卓,等.腐蚀混凝土结构的随机腐蚀损伤.中国港湾建设,2001(1):23~25,30
- [1.68] 赵卓,马亚丽,李锋.氯离子环境下钢筋腐蚀速度分阶段模型.工业建筑,2005,35(382):1~4
- [1.69] GB/T50283—1999 公路工程结构可靠度设计统一标准
- [1.70] GB50292—1999 民用建筑可靠性鉴定标准
- [1.71] JTGD60—2004 公路桥涵设计通用规范
- [1.72] 吕忠达.杭州湾跨海大桥的设计与施工.见:杭州湾大桥工程指挥部编.杭州湾跨海大桥建设技术.北京:人民交通出版社,2005.3~13

第2章 混凝土结构的腐蚀及主要成因

2.1 混凝土结构的基本腐蚀机理

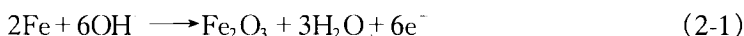
2.1.1 腐蚀的基本机理

混凝土是一种节能、经济并被广泛使用的耐久性人工材料。但是,处于腐蚀性环境或其他一些特殊环境(如冲刷、磨损、干湿、冷热等)下的混凝土结构,由于设计、施工、所处环境以及不合理使用等原因,通常需要在结构达到其设计使用寿命之前,对结构进行必要的检测诊断及维修养护。

在腐蚀环境下,环境中的有害介质、离子将会对混凝土结构进行侵蚀,造成钢筋截面损失、坑蚀、表面污染、混凝土开裂或脱落等,结构的安全性和可靠性将会大幅度降低,并导致结构在达到其预期的设计使用寿命之前就已经破坏,影响结构的正常使用。

针对混凝土结构中钢筋及混凝土的腐蚀机理,各方学者已经做了大量的工作^[2.1~2.6],指明钢筋的腐蚀是一种电化学的过程,包括在金属表面形成阳极(腐蚀)和阴极(钝化)区域以及不同区域间的电位差等。

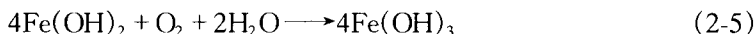
在坚实的混凝土内部,由于其孔隙液体中含有易溶性的氢氧化钾和氢氧化钠以及大量的微溶氢氧化钙,因此形成了 pH 值为 13 或更高的碱性环境。在这种环境中,在钢筋表面所形成的钝化膜,将阻止钢筋锈蚀的发生。如下式所示



但是,由于种种原因(如氯离子侵蚀或混凝土碳化),钢筋表面的钝化膜遭到破坏,导致钢筋的锈蚀。



阳极表面二次化学过程



在此,阳极反应产生的多余电子通过钢筋送往阴极,阴极产生的氢氧根离子通过混凝土的孔隙以及钢筋表面与混凝土间空隙的电解质被送往阳极,从而形成一个腐蚀电流的闭合回路,使电化学过程得以实现。环境中腐蚀性介质及构件种类的不同,将使钢筋去钝方式和电极面积有较大差别,但其基本腐蚀机理是相同的,如图 2-1 所示。

2.1.2 混凝土的化学组成及其微观结构

常规混凝土是由水泥、水、粗骨料、细骨料和其他掺和料按适当比例配合、拌制而成的