

钢筋混凝土结构 锈蚀损伤

检测与评估

吴瑾 著



 科学出版社
www.sciencep.com

钢筋混凝土结构锈蚀 损伤检测与评估

吴 瑾 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍钢筋混凝土结构锈蚀损伤检测与评估的内容和方法。全书共分8章,内容包括绪论、钢筋混凝土锈蚀破坏形态、钢筋混凝土结构锈蚀损伤参数检测、钢筋混凝土结构锈蚀损伤定位与识别、锈蚀钢筋混凝土构件承载力评估、锈蚀钢筋混凝土构件可靠度评估、锈蚀钢筋混凝土结构寿命评估和钢筋混凝土结构锈蚀损伤评估方法等。

本书可供从事土木工程、水利工程、海港工程和桥梁市政工程专业科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢筋混凝土结构锈蚀损伤检测与评估/吴瑾著. —北京:科学出版社, 2005

ISBN 7-03-014625-5

I. 混… II. 吴… III. 混凝土结构—损伤—评估 N. TU37

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第134200号

责任编辑:童安齐 何舒民 / 责任校对:赵桂芬
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2005年1月第一次印刷 印张:9 3/4

印数:1—2 500 字数:185 000

定价:20.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

钢筋锈蚀是导致混凝土结构耐久性降低的主要原因。钢筋锈蚀引起混凝土结构的过早破坏,已成为世界各国普遍关注的一大灾害。大量混凝土结构由于钢筋锈蚀,不得不维修或拆除,甚至发生倒塌,造成巨大的经济损失。尤其是在氯离子环境下,混凝土结构受到侵蚀作用,普遍存在钢筋锈蚀引起的顺筋胀裂,有的已非常严重。这些锈蚀损伤的结构安全性如何,能否继续正常使用,还能使用多长时间,是钢筋混凝土结构锈蚀损伤评估时必须解决的问题。

国内外学者对混凝土中钢筋锈蚀问题进行了大量研究,主要侧重于钢筋锈蚀速度、锈蚀构件性能等方面的研究,并取得了许多成果,但对钢筋锈蚀后混凝土结构或构件的评估,如损伤程度、可靠度、剩余寿命等方面的研究较少。目前我国尚未颁布混凝土结构耐久性设计标准,对混凝土结构的耐久性评估也未有统一的规范或规程。混凝土结构的损伤(含钢筋锈蚀引起的损伤)鉴定评估一般均是按照有关鉴定标准或规范进行的。这些标准或规范均是采用分层次的模糊综合评级方法,未给出混凝土结构或构件可靠度指标和剩余寿命的评估方法,也未考虑钢筋混凝土结构锈蚀损伤的特性。

作者结合近年来从事钢筋混凝土结构锈蚀损伤评估研究的成果,在本书中系统地介绍了钢筋混凝土结构锈蚀损伤检测评估的内容和方法,主要包括国内外研究和应用现状,钢筋混凝土锈蚀破坏形态,钢筋混凝土结构锈蚀损伤参数检测,锈蚀钢筋混凝土构件承载力评估,锈蚀钢筋混凝土构件可靠度评估,锈蚀钢筋混凝土结构寿命评估和钢筋混凝土结构锈蚀损伤评估方法。

在本书的写作过程中,得到了吴胜兴教授的帮助和指导,在此表示衷心的感谢。本书参考了一些国内外同行发表的研究成果和论著,在此对被引用研究成果的同行和作者表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,加之钢筋混凝土结构锈蚀损伤问题的复杂性,因此本书中难免存在一些错误和不妥之处,恳请同行专家和读者提出宝贵意见,作者将不胜感谢。

南京航空航天大学土木工程系

吴 瑾

2004年10月

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 钢筋锈蚀的严重性	1
1.2 钢筋锈蚀研究概况	4
1.3 钢筋混凝土结构锈蚀损伤评估研究的重要性	6
第二章 钢筋混凝土锈蚀破坏形态	7
2.1 概述	7
2.2 混凝土中钢筋锈蚀机理再认识	8
2.3 钢筋混凝土锈蚀破坏过程	13
2.4 工程实例	16
2.5 锈蚀破坏形态的理论分析	24
第三章 钢筋混凝土结构锈蚀损伤参数检测	27
3.1 混凝土裂缝检测	27
3.2 混凝土强度检测	28
3.3 混凝土碳化深度检测	43
3.4 混凝土中氯离子含量检测	44
3.5 氯离子扩散系数检测	45
3.6 钢筋位置和保护层厚度检测	50
3.7 钢筋锈蚀程度检测	50
第四章 钢筋混凝土结构锈蚀损伤定位与识别	61
4.1 概述	61
4.2 结构损伤定位与识别的理论	62
4.3 试验装置和测试系统	66
4.4 试验模态分析	68
4.5 钢筋混凝土结构锈蚀损伤定位与识别	72
第五章 锈蚀钢筋混凝土构件承载力评估	84
5.1 概述	84
5.2 锈蚀钢筋混凝土构件破坏模式	85
5.3 锈蚀开裂前钢筋混凝土构件承载力评估模型	86
5.4 锈蚀开裂后钢筋混凝土构件承载力评估模型	88
第六章 锈蚀钢筋混凝土构件可靠度评估	96
6.1 概述	96

6.2	锈蚀钢筋混凝土构件抗力的随机过程	97
6.3	锈蚀钢筋混凝土构件可靠度分析方法	102
6.4	算例	106
第七章	锈蚀钢筋混凝土结构寿命评估	108
7.1	概述	108
7.2	锈蚀钢筋混凝土结构寿命的定义	110
7.3	氯离子环境下钢筋混凝土结构寿命评估	112
7.4	大气环境下钢筋混凝土结构寿命评估	126
7.5	寿命评估实例	126
第八章	钢筋混凝土结构锈蚀损伤评估方法	129
8.1	钢筋混凝土结构锈蚀损伤评估内容和程序	129
8.2	钢筋混凝土结构锈蚀损伤评估方法	130
参考文献	137

第一章 绪 论

1.1 钢筋锈蚀的严重性

混凝土材料以其较强的适应性和低廉的造价而成为土木工程中不可缺少的材料。钢筋混凝土结构已成为一种主要结构形式,在土木工程中得到了广泛的应用。然而由于不良的使用条件(海洋环境和工业环境)、环境污染(CO_2 浓度增加和酸雨)、不当的使用方法(公路和桥梁路面撒化冰盐)等的影响,造成钢筋锈蚀已成为混凝土结构中的普遍现象,轻则影响结构的使用性和耐久性,重则降低结构承载力,甚至导致结构失效,如柏林议会大厅倒塌(1982)^[1]和美国北卡罗来纳州高速公路桥坍塌(2000)^[49]。美国加州大学 P. K. Mehta 教授^[2]在第二届混凝土耐久性国际学术会议上指出:“当今世界,混凝土破坏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、侵蚀环境下的物理化学作用”。因此,钢筋锈蚀引起混凝土结构的过早破坏,已成为世界各国普遍关注的一大灾害,大量混凝土结构由于钢筋锈蚀,不得不维修或拆除,甚至发生倒塌,造成巨大的经济损失。

在美国,最普遍的耐久性破坏形式是混凝土桥梁、路面、停车场及海港结构中的钢筋锈蚀,每年总损失高达 1260 亿美元^[3],铁路由于钢筋锈蚀每年维修费用约 200 亿美元^[4],仅撒化冰盐引起的钢筋锈蚀每年所造成的损失就达 10 亿美元^[5]。截止 1980 年,因钢筋锈蚀有 50 万座桥梁面板需要维修^[6]。

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两倍^[7],为解决海洋环境下钢筋混凝土结构锈蚀与防护问题,每年花费近 20 亿英镑^[8]。

在日本,大约有 21.4% 的钢筋混凝土结构损失是因钢筋锈蚀引起的^[8]。著名的新干线使用不到 10 年,就出现大面积混凝土开裂、剥落现象^[9]。

前苏联有关统计资料表明^[10]:仅厂房受钢筋锈蚀损坏的总额就占其固定资产的 16%,有些厂房的钢筋混凝土结构使用 10 年左右即严重破坏,经常需要维修,有些建筑维修费用已超过其原始造价。

在瑞士,由于使用化冰盐导致钢筋锈蚀,每 20 年就有 3000 座桥梁需要维修^[4]。

阿拉伯海湾地区由于高温($20\sim 50^\circ\text{C}$)、高湿($60\%\sim 100\%$),大气中及混凝土拌合物骨料和水中氯化物含量高,使得混凝土中钢筋锈蚀特别严重,混凝土结构的平均使用寿命仅 $10\sim 15$ 年^[11]。调查表明:钢筋锈蚀是科威特及其他海湾国家混

土破坏的主要原因^[12~14]。

韩国曾发生一系列建筑物破坏、倒塌事故,其中也与引起钢筋锈蚀的盐害有关。

我国台湾重修澎湖大桥和不断发生的“海砂屋”事件,也是氯盐腐蚀钢筋所造成的^[15]。

在我国大陆,近年来也日益暴露出严重的因钢筋锈蚀的混凝土结构破坏,如20世纪50年代初建的大坝,许多已成为陷入危境的“病坝”。截止到1997年底,佛子岭、梅山、响洪甸三座老坝共亏损1亿多元^[16]。20世纪80年代原水电部水工混凝土耐久性调查组对全国32座大型混凝土坝进行了调查,结论为:被查坝体全部存在裂缝^[17]。2001年河海大学对处于内陆河的江苏省淮阴闸工程调查,也发现明显的钢筋锈蚀引起的裂缝,并有发展趋势。

交通部等有关单位分别于1963年、1965年、1980年、1996年,针对我国沿海港口工程混凝土结构破坏状况组织过四次调查,调查结果指出^[18]:80%以上都发生了严重或较严重的钢筋锈蚀破坏,出现锈蚀破坏的时间有的仅5~10年。南京水科院对1980年建成的宁波北仑港10万吨级矿石码头进行了调查^[19],发现该码头使用不到10年,其上部结构就发生了严重的锈蚀破坏。天津港客运码头1979年建成,使用不到10年,就发现前承台板有50%左右出现锈蚀破坏^[20]。天津新港从1958年到1985年共建25个码头泊位,岸线长达6000m,其结构均为高桩承台式,使用时间长的有30多年,短的只有5~6年,在使用过程中不断发现梁、板、桩等构件有不同程度的损坏,影响码头的正常使用^[21]。1996年,交通部四航局科研所对1986年后建成的华南地区的C港和E港的20个泊位进行了调查^[22],发现E港大部分纵、横钢筋的锈蚀年限均不足10年和5年,在码头建成5~6年后即发现大量锈蚀裂缝。2001年河海大学对某港西大堤钢筋混凝土护栏工程进行现场调查^[23],该工程虽运行不足4年,但已出现严重钢筋锈蚀、保护层开裂、混凝土剥落和钢筋锈断。江苏省水科所对华东84座沿海混凝土挡潮闸进行了调查,钢筋锈蚀严重需要维修或大修的为71座,其中有些挡潮闸胸墙、启闭机工作桥大梁钢筋已经锈断^[17]。

根据1994年铁路秋检统计^[24],我国铁路中有病害的混凝土桥为2675座,其中发生钢筋锈蚀损伤的为722座,占27%。我国北方路桥使用化冰盐,有的在一两个冬天后就出现混凝土剥落,五年后钢筋锈蚀和混凝土剥落就异常严重。1997年北京市市政工程设计研究总院对北京市城市立交桥梁耐久性进行普查发现^[25],钢筋锈蚀造成北京城市立交桥梁混凝土破坏具有普遍性。北京西直门立交桥使用仅19年,就因使用化冰盐导致钢筋锈蚀,而使结构破坏不得不报废重建^[26]。黑龙江省哈绥公路自1994年下半年开始摊铺水泥混凝土面层,到1995年8月完成,1997年2月在撒化冰盐路面和路肩板表面,出现大面积的剥蚀破坏,破损路段(K402-

K421+500)长度约 19.5km^[27]。

根据对我国各个时期工业厂房混凝土结构耐久性的调研结果^[28],由于耐久性破坏使结构丧失承载力的主要威胁之一来自于:在各种不同环境因素作用下,钢筋锈蚀后降低结构强度。如华北地区某发电厂,投资近 5 亿元人民币,该厂处于滨海盐渍地强腐蚀地区,1978 年正式进行投产,但至 1986 年,仅历时 8 年,其基础钢筋混凝土即发生严重的强腐蚀破坏,被迫重建新厂^[29]。又如某镀锌车间 1989 年修建,在 10 年内由于酸性气体的腐蚀,使其主要构件钢筋大量锈蚀,混凝土开裂,结构处于失效边缘^[30]。对福建三明钢厂、山西太原、甘肃金昌的露天桥调查发现^[31]:95%以上的柱存在钢筋锈蚀引起的顺筋锈胀裂缝。某煤矿钢筋混凝土井架,建于 1955 年,现场调查发现:混凝土开裂、剥落范围超过 50%,钢筋锈蚀超过 40%,钢筋断面最大锈蚀量超过 20%^[32]。

在我国民用建筑中也发现有钢筋锈蚀破坏的情况。在 1979 年 11 月到 1980 年 10 月期间,钢筋混凝土设计规范专题组对我国 11 个有代表性的城市进行了调查^[33],发现不少钢筋混凝土结构在设计基准期内,有的甚至不到 10 年就由于钢筋锈蚀而影响其正常使用,甚至完全报废。青岛市一座大楼 3 年内因楼盖钢筋严重锈蚀导致结构失效,16 层楼盖全部拆除^[34]。上海不少近代优秀保护建筑,如中山东一路 26 号,东大名路高安楼等发生梁柱主筋严重锈蚀、箍筋锈断、板底钢筋锈成粉状现象,造成梁板柱构件不能满足承载力要求,严重影响正常使用^[35]。

综上所述,从国内外对水利工程、海港工程、路桥结构、工业建筑、民用建筑等调查研究结果来看,混凝土中钢筋锈蚀,尤其是在海洋环境、化工车间、冬天撒化冰盐的氯化物污染环境中,导致混凝土结构的过早破坏,是当今影响混凝土结构耐久性的首要原因,钢筋锈蚀已经给国民经济带来巨大经济损失,见图 1.1~图 1.6。

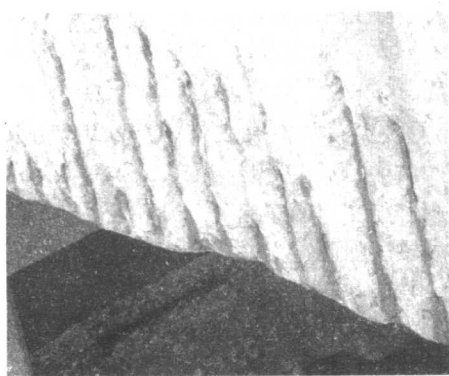


图 1.1 青岛某码头钢筋锈蚀破坏



图 1.2 某矿厂房柱钢筋锈蚀破坏



图 1.3 某桥梁钢筋锈蚀破坏

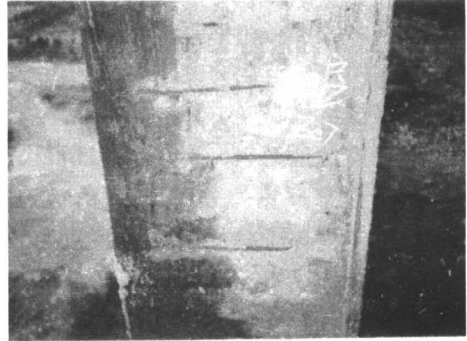


图 1.4 某民用建筑柱钢筋锈蚀破坏

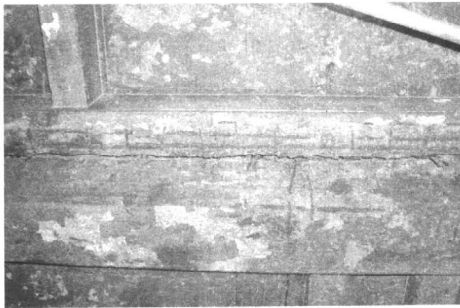


图 1.5 嘉峪关某厂房大梁锈蚀破坏

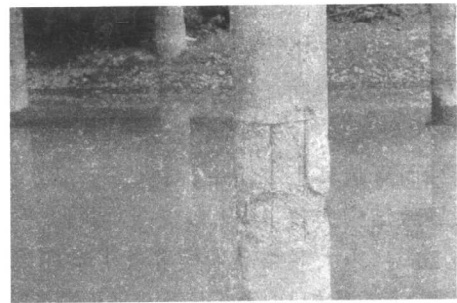


图 1.6 青海某桥墩钢筋锈蚀破坏

1.2 钢筋锈蚀研究概况

从 20 世纪 60 年代开始,混凝土结构的耐久性问题就已成为国际学术机构或国际学术会议讨论的重要课题之一。国际材料与结构试验学会(RILEM)于 1960 年专门成立了“混凝土中钢筋锈蚀”技术委员会(CRC),并设立了“混凝土结构损伤等级评定工作小组 104-DCC”,至今已举行了多次有关混凝土结构诊断的国际会议。1982 年 RILEM 和 CIB 联合成立的“共同工作委员会 RILEM-71/PSL/CIB80”,定期举行有关钢筋混凝土耐久性国际会议。1987 年 IABSE(国际桥梁与结构工程协会)在巴黎召开“混凝土结构的未来”国际会议^[36],会上对结构耐久性极为重视,提出考虑维修费的宏观造价概念;1988 年在丹麦召开“混凝土结构的重新评估”国际会议;1989 年在里斯本召开“结构耐久性”国际会议;1990 年欧洲 CEB 的 Model Code 增加耐久性一章。1992 年欧洲混凝土委员会颁布《耐久性混凝土结构设计指南》,反映了当今欧洲混凝土结构耐久性研究的水平。1994 年国际标准化组织 ISO 专门成立 TC59/SC 3/WG9 工作小组,旨在制定一套结构耐久性设计的国际统一标准。

美国混凝土协会 ACI 专门成立了混凝土耐久性委员会 ACI201,1991 年、1994 年、1997 年美国 ACI 举办了第二、三、四届混凝土结构耐久性国际会议,1992 年 ACI201 委员会编制了“耐久性混凝土指南”。美国国家科学基金委(NSF)从 1986 年开始重点资助结构耐久性研究。美国 1991 年颁布的“基本建设法案”中明确指出设计时要对结构物进行全寿命经济分析。

日本从 20 世纪 70 年代开始重视耐久性研究,建设省综合技术开发所 1980 年就着手制定“提高建筑物耐久性开发技术计划”。1986 年开始陆续出版“建筑物耐久性系列规程”。1988 年日本土木学会混凝土委员会成立“耐久性设计委员会”,提出“耐久性设计基本方法指南”,1988 年 4 月召开“有关混凝土结构寿命预测和耐久性设计”研讨会。

我国对钢筋锈蚀的早期研究始于南京水利科学研究院。从 20 世纪 80 年代开始日益引起重视,中国土木工程学会自 1982 年、1983 年连续召开两次全国耐久性学术会议。1990 年在中国标准化协会下成立“全国建筑物鉴定加固标准化委员会”,两年召开一次学术交流会。1992 年中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分科学会成立“混凝土耐久性专业委员会”,至今召开过六届学术交流会。

建设部把“混凝土结构耐久性及其耐久性设计”作为“八五”科技攻关项目,由清华大学、中国建筑科学研究院承担。国家“八五”科技攻关专题“在用危险建筑物实时监测和评估技术研究”也从材料和构件角度对结构的耐久性进行了深入研究。1995 年由清华大学、同济大学等高校和科研单位联合承担的“重大土木及水利工程可靠性与耐久性基础研究”是“国家攀登计划与技术科学重大基础研究”(攀登 B)中唯一的土木工程科研项目。该项目共有 5 个子项,含 15 个子课题,目前部分成果已获国家级科技奖 3 项、省级科技奖 13 项、发表论文 500 篇^[37]。经专家评审论证,该项目达国际先进水平,一些课题已达国际领先水平。国家科委、国家科技部在“九五”期间设立了国家重点科技攻关项目“重点工程混凝土安全性的研究”,由国家建材局、中国建筑材料科学研究院牵头,开展跨部门、跨行业的联合攻关,发表论文 200 余篇,在该项目中已获得了有关钢筋锈蚀方面的许多成果,项目成果应用于 80 多项工程^[26]。

中国工程院土木水利建筑学部于 2000 年立项启动了“工程结构的安全性与其耐久性”的咨询项目,并联合交通部、建设部和国家自然科学基金委员会于 2001 年、2002 年在北京连续召开了两次混凝土耐久性工程科技论坛,交流混凝土耐久性问题的研究状况,讨论《混凝土结构耐久性设计与施工指南》建议稿。

清华大学、浙江大学、同济大学、大连理工大学、西安建筑科技大学、中国矿业大学、河海大学、香港科技大学、台湾海洋大学等高校均投入了大量的科研力量进行钢筋锈蚀基本理论的研究。中国建筑科学研究院、中国建筑材料科学研究院、南京水利科学研究院、冶金建筑研究总院、广州四航局工程技术研究院、北京市政工程设计研究总院等科研机构结合本部门的特点,在实践中摸索出了一系列建筑物

检测、鉴定、评估和加固的技术和经验。这些工作为钢筋混凝土结构锈蚀损伤评估的系统研究打下了坚实的基础。

1.3 钢筋混凝土结构锈蚀损伤评估研究的重要性

国际上发达国家的基本建设大体分三个阶段：第一阶段为大规模新建，第二阶段为新建与维修改造并重，第三阶段重点逐渐转向旧建筑物的维修改造。美国自20世纪70年代起建筑业中新建建筑开始不景气，而维修改造业日益兴旺，美国劳工部曾预言2000年维修工作将是最受欢迎的九个行业之一。根据美国土木工程学会2001年的调查，现全美29%以上的桥梁、1/3以上的道路老化，2100个水坝不安全。估计美国在五年内需投入13000亿美金改善基础设施的不良安全状态。

建筑物使用过程中的安全性和耐久性，必须通过检测和评估加以保证。日本清水建设株式会社曾就用户对建筑物的鉴定意愿进行过统计，除灾害之后的特殊情况外，要求进行可靠性鉴定的用户数量一般在建筑物从建成初期到使用了20年左右以及60年左右分别达到一个高峰期；由此可见日本要求在结构服役20年时对结构进行一次检测是有一定根据的。新加坡的建筑物管理法规定，除业主自用的独立、半独立和单连的小型住宅和临时建筑物外，所有公寓、宿舍等居住建筑在建造后10年以及过后每10年必须进行强制检测，其他的公用、商业、工业等建筑物则为建造后5年及过后的每5年。这样的检测基本上都可通过目测调查完成，是否需要进一步对结构作全面测试，则要根据目测发现的缺陷程度和可疑情况而定。

我国“一五”期间新建建筑投资占基建总投资的95.8%，而“六五”期间已占45%，说明我国已进入第二阶段。我国解放以来，特别是改革开放以来大量已建的工程进入了维修期或老化期，形成新的安全隐患。据国家统计局统计，1986年以前的城镇房屋面积已达46.8亿 m^2 ；其中工业建筑折合固定资产连同容纳的设备，加上年总产值已占当时国民经济生产总值的70%以上。2000年我国至少有 $23.4 \times 10^8 m^2$ 的建筑物因安全度过低而退役^[36]。这个局面要求我们尽快大力加强已有建筑物的诊断、维修及加固技术的研究。对于已经发生钢筋锈蚀的混凝土结构，其损伤程度如何？能否继续正常使用？还能使用多长时间？是人们所关心的主要问题。因此，研究钢筋混凝土结构锈蚀损伤评估，具有明显的经济效益和重大的社会意义。

目前我国尚未颁布混凝土结构耐久性设计规范，对混凝土结构的耐久性评估也未有统一的规范或规程。

本书介绍钢筋混凝土结构锈蚀损伤检测与评估方法，依据现场检测的有关参数，即能对服役钢筋混凝土锈蚀破坏形态、构件承载力、可靠度指标和剩余寿命进行系统全面的评估，从而为结构的加固和维修提供依据。

第二章 钢筋混凝土锈蚀破坏形态

2.1 概 述

混凝土顺筋胀裂破坏形态是钢筋混凝土结构锈蚀损伤评估的重要内容之一,在对结构锈蚀损伤外观评估时,必须研究混凝土顺筋胀裂破坏形态。

Bazant^[38,39](1979)根据电化学理论,建立了海洋环境下混凝土中钢筋锈蚀的物理模型,最早提出混凝土顺筋胀裂破坏形态的两种假定:混凝土保护层顺筋胀裂和沿着平行于钢筋层面方向胀裂,但未从理论上说明,也没有实验验证。Dagher等^[40](1992)分别描述了混凝土梁和板中钢筋锈蚀破坏形态。对于梁,随着钢筋锈蚀产物的膨胀,微裂缝扩展到离钢筋最近的表面,随着钢筋锈蚀进一步发展,疏松的混凝土剥落。对于板,当钢筋间距较小时,裂缝在钢筋之间形成,混凝土层状剥落;当钢筋间距较大且顶部保护层较小时,裂缝在板顶形成。模拟桥面板与梁的锈蚀开裂中未考虑疲劳的影响,因此不能反映桥面锈蚀开裂的实际情况。Andrade等^[41~42](1993)通过室内试验研究钢筋锈蚀与混凝土保护层开裂的关系,并建立了钢筋截面损失与保护层开裂的数值模型,通过有限元方法利用虚拟裂缝模型模拟了钢筋锈蚀引起的混凝土开裂。Allan^[43](1995)通过在混凝土与钢筋界面上施加油压力,模拟钢筋锈胀使混凝土开裂的破坏形态,并用概率统计的方法分析破坏压力数值,但未提出锈蚀破坏形态。Cabrera^[44](1996)室内快速锈蚀试验发现:只沿纵向配筋时,在横截面上裂缝只在竖向出现;纵横向都配筋时,在横截面上裂缝在水平方向出现。Weyers^[45](1998)把锈蚀开裂过程划分为自由膨胀阶段、膨胀应力产生阶段和混凝土开裂阶段。Williamson^[46](2000)通过在预留孔中施加液压模拟钢筋均匀锈蚀膨胀,分别得出 $\phi 8$ 和 $\phi 16$ 钢筋在不同 c/d 条件下,钢筋锈胀引起混凝土开裂破坏形态。由于管子弹性变形的影响,管子压力与作用到混凝土表面的压力是有差异的,因此实验模拟与实际锈蚀膨胀情况不完全一致。洪定海(1998)在其专著^[47]中指出,根据混凝土保护层厚度、钢筋直径、间距、所处位置等情况的不同,混凝土可能发生两种形态的胀裂破坏:一种是显示于构件表面的顺筋胀裂,另一种是起初隐藏于构件内部、沿着钢筋层面方向的胀裂,即所谓“层裂”。河海大学王军强^[48](2001)在其硕士论文中,通过静压扩孔试验,模拟混凝土胀裂的层裂破坏和角区破坏。研究表明:钢筋布置在角区,当保护层厚度较大时,裂缝首先在钢筋与混凝土接触面产生,随后由内向外扩展,裂缝宽度沿混凝土保护层厚度扩展不均匀,其中与钢筋较近的裂缝宽度大一些,而当保护层厚度较小时,裂缝首先在混凝土保护层表面产生,随后由外向内扩展,在远离钢筋的外围混凝土处裂缝宽度较

大, 胀裂破坏形态为角区破坏。当钢筋并排布置, 在保护层厚度较大, 钢筋间距适中的情况下, 会发生层裂破坏。

2.2 混凝土中钢筋锈蚀机理再认识

混凝土中钢筋锈蚀微观机理的研究是认识混凝土锈蚀破坏规律的前提是建立钢筋锈蚀模型的依据, 也是研究混凝土锈蚀损伤评估方法的基础。国内外对钢筋锈蚀微观机理的研究已取得了一些成果, 但还没有达成完全共识。本书在前人研究成果的基础上对锈蚀机理作进一步深入分析, 以期达到再认识的目的。

2.2.1 概述

根据热力学原理, 暴露于自然环境中的铁具有锈蚀的趋向, 即还原为低能量状态的氧化铁。但实践表明: 即使是在潮湿环境中或有可能氧化的环境中, 优质混凝土中的钢筋是不会锈蚀的, 这是由于混凝土孔隙中溶解的碱性 pH 为 12~13。钢筋在这种高 pH 条件下, 只要含有少量氧气, 由于初始的电化学腐蚀, 都会迅速形成一层非常致密、厚 $(2\sim 10)\times 10^{-9}\text{m}$ 的尖晶石固溶体 $\text{Fe}_3\text{O}_4\cdot\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ 膜^[47], 这层膜牢牢地吸附于钢筋表面上, 使钢筋很难继续进行阳极反应。从电化学上看, 就是由活态转化为钝态, 这层膜称为钝化膜。如果混凝土所固有的这种致钝特性能长期保持, 在钢筋混凝土结构的整个使用寿命期间, 钝化膜都是稳定的, 但是有两种不同的机理可能破坏钝化膜:

(1) 混凝土碳化。CO₂ 与混凝土孔隙中溶解的碱性物质起化学反应, 导致 pH 低于 10。

(2) 氯离子侵蚀。孔隙中溶解的氯离子含量超过临界值。

2.2.2 混凝土碳化^[47,164]

当水泥遇水后, 发生化学反应形成水化硅酸钙 CSH 凝胶和氢氧化钙。其中一部分氢氧化钙和其他碱性化合物会溶于孔溶液中, 但大部分仍以固状结合在硬化水泥浆体中。当空气中二氧化碳扩散到混凝土孔溶液中时, 与溶解的氢氧化钙起中和反应, 此时该孔溶液中的 pH 降低, 即混凝土发生碳化。

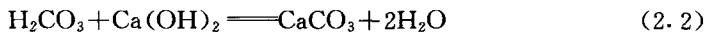
碳化过程可分为三个阶段:

第一阶段是 CO₂ 通过扩散到达混凝土中;

第二阶段是 CO₂ 溶解到孔溶液中而形成少量的碳酸:



第三阶段是碳酸与溶解到孔溶液中的氢氧化钙发生化学反应而形成碳酸钙和水:



当孔溶液中的氢氧化钙由上述反应消耗掉时,反应产物将周围毛细孔堵塞,不再有更多的氢氧化钙参与中和反应,此时孔溶液的 pH 便由原来的 12 降到 8.5 左右。在这种条件下,钢筋的保护层遭到破坏,即去钝化,从而导致钢筋的锈蚀。图 2.1 描述了钢筋锈蚀速度与孔溶液中 pH 的关系。

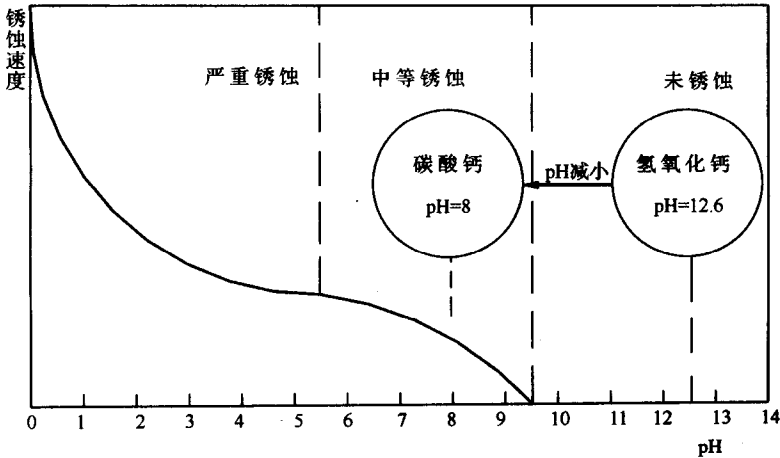


图 2.1 钢筋锈蚀速度与混凝土孔溶液 pH 的关系^[164]

碳化深度可通过 Fick 的时间开方定律来描述:

$$X = \sqrt{2D \frac{C_1}{C_2} t} \quad (2.3)$$

式中: X ——碳化深度, mm;

D —— CO_2 在混凝土中的扩散系数, $\text{mm}^2/\text{年}$;

C_1 ——在空气中 CO_2 的浓度, kg/m^3 ;

C_2 ——单位体积混凝土碳化所需 CO_2 量, kg/m^3 ;

t ——碳化时间, 年。

根据式(2.3), 影响碳化深度的因素可归纳为:

(1) 含水量。碳化速度与混凝土饱和状态有关, 若混凝土孔中充满了水分, 则 CO_2 无法扩散进去, 即 D 趋近于零。而在干燥的混凝土中, 尽管 CO_2 扩散系数很大, 但由于孔中的水量不足以发生碳酸反应, 混凝土碳化仍无法进行。最适宜混凝土碳化的相对湿度为 65%~75%^[47]。

(2) 混凝土养护条件。混凝土成型后, 若其表面没有足够的水分以保证继续水化, 则导致表面区域的高孔隙率, 从而降低了抵抗 CO_2 的扩散能力。

(3) 裂缝及缝隙。 CO_2 的扩散系数 D 在开裂或没有良好成型的混凝土中与密实混凝土相比要增大许多。

(4) 空气中 CO_2 的浓度。农村空气中 CO_2 的浓度约为 0.04%，城市空气中为 0.4%^[47]。在某些空间中如制奶、制酒厂房，停车场内 CO_2 的含量为自然空气中的 30 倍^[164]。

(5) 水泥种类。氢氧化钙的含量与水泥的种类有关。例如在高炉矿渣水泥或粉煤灰水泥的水化产物中，氢氧化钙的含量比普通波特兰水泥要低。

2.2.3 氯离子侵蚀^[47,164]

由于混凝土结构在许多情况下与含有氯离子的溶液相接触，氯离子以扩散的方式或由毛细孔吸附而被传输到混凝土内部的钢筋表面。

氯离子导致的钢筋锈蚀是一个很复杂的电化学过程，这个过程可比作电池反应。电池的电极是起阳极或阴极作用钢筋的不同表面。与充电电池不同的是，锈蚀过程是不可逆的。锈蚀电池的电压是由钢筋表面的电位差所形成的。钢筋锈蚀所需的电位差是由混凝土组分与钢筋接触部分的局部不同的通风条件、钢筋表面的不均匀性或钢筋表面锈蚀产物的不均匀性所形成。在混凝土中的钢筋总存在电位差。如果由钢筋表面的阴阳极组成的锈蚀电池具有活性的话，那么电流就流过阴阳极。根据法拉第定律，电流与铁电离速度成正比。锈蚀过程见图 2.2。

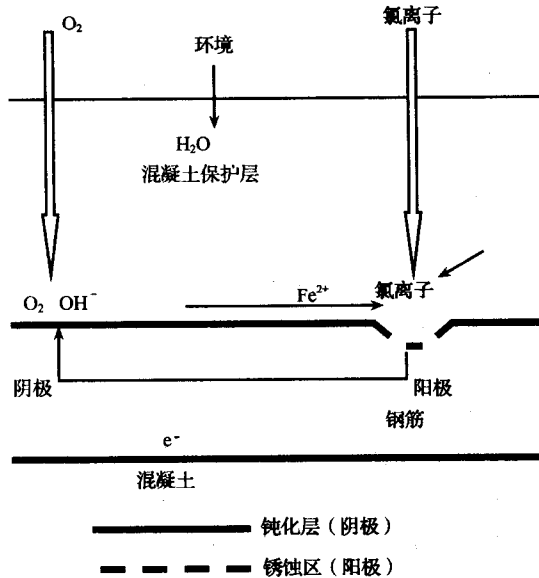
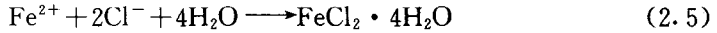
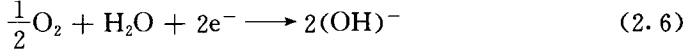


图 2.2 氯离子侵蚀钢筋锈蚀机理

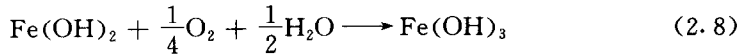
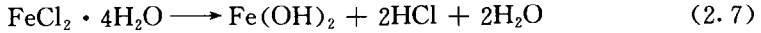
(1) 在阳极，铁失去电子变成铁离子，由于水溶性氯化铁 ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 的形成，钢筋表面钝化膜破坏。阳极反应如下：



(2) 在阴极,电子、水、氧转化成氢氧根离子。阴极反应并不引起钢筋的任何损伤,相反起到保护钢筋的作用,这称为阴极保护。阴极反应如下:



(3) 氢氧根离子通过阴阳极之间所产生的带电区域向阳极方向传递带有负电荷的离子。在阳极附近, $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 向含氧量较高的混凝土孔溶液中迁移,分解为 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 。根据湿度与通风条件,这些中间产物可能继续反应,生成最终的铁锈。



2.2.4 锈蚀电池的类型

由金属和电解质连接的阴阳极所组成的锈蚀电池分均匀电离的微电池和局部电离的宏电池。均匀锈蚀通常由钢筋附近大面积混凝土碳化或均匀的高含量的氯离子所引起。这就是所谓的微电池,它由非常靠近的阴阳极组成。由于在尺寸上是微观的,因此在外观上表现为均匀锈蚀。如果在不均匀的混凝土中,在很小的钢筋表面上,混凝土孔溶液具有较高的氯化物浓度,形成钝化膜的局部破坏,成为小阳极。此时钢筋表面的大部分仍具有钝化膜,成为大阴极。这种由大阴极和小阳极组成的锈蚀电池,有时阴极离阳极很远,故称为宏电池。由于大阴极供氧充分,使小阳极上铁迅速溶解而产生深坑,小阳极局部酸化;同时由于大阴极的阴极反应,生成 OH^{-} 使 pH 增高;氯化物混凝土的吸湿性,使阴极与阳极之间的电阻降低。这些方面的变化都使得局部锈蚀的宏电池以局部深入的形式继续进行,钢筋截面局部减小。因此,局部锈蚀的危害比均匀锈蚀更大。

在海洋浪溅区的钢筋混凝土板的底部,接触氯化物的机会较多,又比较潮湿,易成为阳极区;而板的顶部正好相反,易成为阴极区。它们之间具有大块混凝土体,既潮湿又含有渗入的氯化物,电阻率较低的电解质,这样就形成了锈蚀宏电池。在冬天撒除冰盐的桥面板上则形成板顶面为阳极、板底面为阴极的锈蚀宏电池。如果混凝土中含有大量的游离氯离子(如海水拌制的混凝土或掺入大量氯化物早强剂的混凝土),而且混凝土保护层又比较薄,足够多的氧到达钢筋表面,则会形成许多锈蚀宏电池的扩大和合并,从而导致大面积的严重锈蚀。

2.2.5 宏电池锈蚀电路模型

根据简化的宏电池锈蚀电路模型,电压、锈蚀体的电阻和宏电池电流的关系可