

张建仁 王磊
彭建新 蒋友宝

著

服役钢筋混凝土桥梁时变 可靠性评估与剩余寿命预测



服役钢筋混凝土桥梁时变可靠性 评估与剩余寿命预测

张建仁 王 磊 彭建新 蒋友宝 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是国家自然科学基金委员会和交通运输部等单位资助的研究成果。本书共 10 章,内容包括:桥梁结构性能退化机理和影响因素,材料概率退化模型,锈蚀钢筋混凝土构件承载力,既有桥梁承载力估算方法,既有桥梁破坏性试验,服役桥梁车辆荷载效应随机过程模型,服役桥梁承载能力可靠性评估及寿命预测,服役桥梁正常使用可靠性评估及寿命预测,以及维修加固策略决策优化。

本书可作为高等学校土建类本科生和研究生的教材,也可供从事桥梁工程耐久性管理的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

服役钢筋混凝土桥梁时变可靠性评估与剩余寿命预测/张建仁等著. —北京:科学出版社,2017. 1

ISBN 978-7-03-050047-2

I. ①服… II. ①张… III. ①钢筋混凝土桥-可靠性-评估 ②钢筋混凝土桥-预期寿命 IV. ①U448. 34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 232851 号

责任编辑:杨向萍 周 炜 / 责任校对:赵桂芬

责任印制:张 倩 / 封面设计:左 讯

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 1 月第一次印刷 印张:19 1/2

字数:390 000

定价:125.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

桥梁作为交通线路的咽喉要道,对于保证公路交通的安全营运起着重要的作用,是关系社会和经济协调发展的生命线工程。随着桥梁建设的快速发展、巨大的资金投入,以及桥梁在经济社会中显赫作用的显现,人们越来越重视桥梁的健康状况。截至2012年,我国有公路桥梁71万余座,并以每年2万余座的速度递增,其中混凝土桥梁占90%以上。在71万余座桥梁中约有13%的桥梁存在严重问题(技术状况评定为四类桥、五类桥),如结构设计先天不足、设计期已到、结构损伤和自然劣化严重等。近年来,混凝土桥梁服役过程中的事故时有发生,给人民生命财产安全带来严重危害。

混凝土桥梁服役期间的可靠性与寿命评估面临诸多问题,使桥梁结构的经济性和安全性的矛盾更为突出。如何在经济性和安全性之间取得最佳平衡是一个非常棘手的问题,怎样确保我国服役桥梁的可靠性,最大限度地延长其使用寿命,进而取得最好的经济社会效益,是摆在专家学者和工程师面前的紧迫任务。合理的办法是在对现有桥梁的运营状况、损伤程度、承载潜力及剩余寿命等问题有一个正确评价与评估的基础上,再采取相应的加固、维修对策,努力挖掘现有桥梁的承载潜力,对不安全的桥梁进行维修加固。

随着一大批20世纪八九十年代建造的桥梁面临寿命到期问题,揭示这些桥梁的承载力退化机理,建立基于时变可靠度理论的寿命预测方法,提出合理维修加固时机的判断方法和维修加固决策优化方法,将为确保桥梁服役安全提供科学依据和技术支撑。在国家自然科学基金项目、交通运输部西部交通建设科技项目、湖南省科技厅和交通厅等多个项目支持下,经过10余年的长期研究,长沙理工大学在混凝土桥梁服役性能评价、剩余寿命评估、维修加固决策方法等方面取得了一些成果,本书是作者对这些工作的总结。

全书共10章:第1章介绍了服役混凝土桥梁退化机理和影响因素,论述了可靠性评估和维修加固决策的发展动态。第2章通过大量试验,建立了锈蚀钢筋强度退化模型,分析了锈蚀对钢筋与混凝土间黏结性能的主要影响。第3章考虑参数的不确定性,建立了材料力学指标的概率模型。第4章通过自制快速腐蚀钢筋混凝土构件,研究了腐蚀后钢筋混凝土构件的力学性能,测试腐蚀后构件的承载力,建立了腐蚀钢筋混凝土梁承载力计算方法。第5章通过实桥构件的承载力试验,提出了信息缺失条件下既有桥梁承载力的估算方法。第6章主要介绍了既有桥梁的全桥破坏性试验研究,测试了服役桥梁的抗超载能力。第7章利用贝叶斯

更新方法和随机过程理论,建立了适用于服役桥梁可靠性评估的汽车荷载模型。第8章建立了服役桥梁抗力退化概率模型,提出了服役桥梁时变可靠性评估方法和承载能力寿命预测方法。第9章通过改进既有的腐蚀开始时间模型,建立了一般大气环境下和氯盐环境下服役钢筋混凝土桥梁基于时变可靠度的正常使用寿命预测方法。第10章通过定义描述服役桥梁安全承载和耐久使用的指标模型,结合预防性维护策略,考虑维护直接成本和间接成本,建立了服役钢筋混凝土桥梁维修加固策略决策优化方法。

本书撰写分工如下:第1章由张建仁撰写;第2章由王磊和马亚飞撰写;第3章由张建仁、马亚飞和王磊撰写;第4章由张建仁和马亚飞撰写;第5章由王磊和蒋友宝撰写;第6章由张建仁撰写;第7章由王磊和张建仁撰写;第8章由张建仁、王磊和蒋友宝撰写;第9章由彭建新和马亚飞撰写;第10章由彭建新撰写。全书由张建仁和马亚飞统稿。在本书撰写的过程中,长沙理工大学的张克波、彭晖、钟惠萍等协助完成了相关章节的编排,在此向他们表示感谢。

感谢国家自然科学基金委员会等单位对本书研究工作的资助。

限于作者水平,书中难免存在疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 公路桥梁现状	1
1.2 桥梁材料性能退化机理	3
1.2.1 混凝土劣化	3
1.2.2 钢筋锈蚀	4
1.3 桥梁结构服役期性能退化	7
1.3.1 钢筋锈蚀对黏结性能的影响	7
1.3.2 承载力退化	8
1.4 服役桥梁时变可靠性	9
1.5 桥梁寿命预测和维修加固策略	10
1.5.1 寿命预测	10
1.5.2 维修加固策略	11
参考文献	13
第 2 章 材料性能退化研究	16
2.1 锈蚀钢筋力学性能	16
2.1.1 锈蚀钢筋拉伸试验概况	16
2.1.2 拉伸试验结果分析	18
2.1.3 自然锈蚀和快速锈蚀差异性	23
2.2 混凝土强度退化	24
2.2.1 劣化混凝土本构关系模型	24
2.2.2 混凝土强度时变模型	29
2.3 钢筋与混凝土间黏结力退化	30
2.3.1 锈蚀钢筋黏结性能对比试验研究	30
2.3.2 锈胀开裂对黏结退化影响	38
参考文献	46
第 3 章 不完备信息下钢筋锈蚀率预测概率分析方法	48
3.1 钢筋锈蚀模型	48
3.1.1 钢筋锈蚀开始时间	49
3.1.2 钢筋锈蚀电流密度	49

3.1.3	锈蚀钢筋截面面积	50
3.2	基于信息更新的锈蚀率预测	51
3.2.1	Bayes 更新理论	52
3.2.2	锈蚀率更新过程	53
3.2.3	工程实例分析	53
3.3	钢筋截面面积模糊随机时变概率模型	59
3.3.1	钢筋截面面积模糊随机性	59
3.3.2	均匀锈蚀下钢筋截面面积	60
3.3.3	局部锈蚀下钢筋截面面积	61
3.3.4	截面面积时变概率模型数值模拟	61
	参考文献	71
第 4 章	锈蚀 RC 梁承载力试验与计算方法	73
4.1	锈蚀钢筋混凝土受弯构件试验研究	73
4.1.1	锈蚀光圆钢筋混凝土受弯构件试验研究	73
4.1.2	锈蚀变形钢筋混凝土受弯构件试验研究	85
4.2	RC 梁桥承载力计算	94
4.2.1	不同锈蚀程度梁的抗弯承载力变化规律	94
4.2.2	正截面抗弯承载力计算方法分析	95
	参考文献	99
第 5 章	实桥构件承载力试验与评估方法	100
5.1	实桥构件承载力试验研究	100
5.1.1	梁桥构件试验	100
5.1.2	拱桥构件试验	106
5.2	RC 桥梁构件承载力评估方法	111
5.2.1	确定综合折减系数因素集及其隶属函数	111
5.2.2	建立综合折减系数备择集及模糊关系矩阵	115
5.2.3	影响因素权向量的确定	115
5.2.4	实例分析	117
5.3	RC 拱桥承载力评估方法和有限元模拟	120
5.3.1	损伤 RC 拱桥承载力有限元数值模拟	120
5.3.2	基于模态的损伤拱桥承载力计算方法	122
	参考文献	131
第 6 章	服役旧桥整桥破坏性试验	132
6.1	模拟超限车载作用试验研究	132
6.1.1	初始检测	132

6.1.2 整体破坏性试验	137
6.2 锈蚀钢筋混凝土旧桥破坏性试验研究	151
6.2.1 试验方案	151
6.2.2 试验现象及主要结果	153
6.3 破坏性试验研究结论与展望	164
参考文献	165
第7章 服役钢筋混凝土桥梁荷载模型	166
7.1 既有桥梁评估荷载的确定	166
7.2 桥梁恒载分析依据	166
7.3 基于贝叶斯更新的车辆荷载分析	168
7.4 车辆荷载效应概率分布分析	169
7.5 评估目标期和评估荷载取值	171
7.6 基于平衡更新过程车辆荷载效应模型	173
7.7 实例分析	179
参考文献	182
第8章 服役钢筋混凝土桥梁安全承载寿命预测方法	184
8.1 服役桥梁安全承载寿命预测的步骤	184
8.2 基于可靠度的梁桥寿命预测	185
8.2.1 随机信息下寿命预测	185
8.2.2 模糊及随机信息下寿命预测	199
8.3 RC拱桥安全承载寿命预测	218
8.3.1 偏压构件抗力的时变模型	218
8.3.2 基于可靠度的剩余寿命评估方法	223
8.3.3 寿命评估实例	225
参考文献	227
第9章 腐蚀环境下钢筋混凝土桥梁正常使用寿命预测	229
9.1 腐蚀环境下钢筋混凝土桥梁寿命过程及预测	229
9.2 钢筋混凝土桥梁锈胀开裂模型	230
9.2.1 腐蚀发生开始时间模型	230
9.2.2 锈胀开裂开始时间模型	234
9.2.3 锈胀严重开裂模型	234
9.3 基于时变可靠度的正常使用寿命预测	235
9.3.1 腐蚀环境下时变可靠度模型	235
9.3.2 腐蚀环境下正常使用寿命预测方法	236
9.4 工程案例分析	237

9.4.1	单一氯盐环境	237
9.4.2	多因素作用下氯盐环境	243
9.4.3	碳化腐蚀	248
	参考文献	254
第 10 章	服役钢筋混凝土桥梁维修加固决策理论与方法	257
10.1	劣化桥梁维修加固策略优化分析的流程	257
10.2	钢筋混凝土桥梁性能描述	258
10.2.1	概述	258
10.2.2	在用钢筋混凝土桥梁性能定义	259
10.3	维护模型	262
10.3.1	概述	262
10.3.2	维护策略	264
10.3.3	状态指标与维护策略的关系	270
10.4	维护技术和桥梁性能的关系	277
10.4.1	维护技术	277
10.4.2	基于可靠指标维护时间的确定	280
10.5	维护成本	288
10.5.1	直接维护成本概率模型	288
10.5.2	间接维护成本概率模型	288
10.5.3	维护优化模型	290
10.6	算例分析	290
10.6.1	算例描述	290
10.6.2	计算过程	290
10.6.3	结果分析	291
	参考文献	299

第 1 章 绪 论

1.1 公路桥梁现状

桥梁作为交通线路的咽喉要道,对于保证公路交通的安全运营起着重要的作用,是关系社会和经济协调发展的生命线工程。随着桥梁建设的快速发展、巨大的资金投入,以及桥梁在经济社会中显赫作用的显现,人们越来越重视桥梁的健康状况。同任何其他事物一样,桥梁结构也有一个生、老、病、死的过程。桥梁建成投入使用一段时间后,由于结构材料的自然老化、车辆荷载的不断增长、日益恶化的环境影响及养护维修的资金短缺,相当一部分桥梁不可避免地出现各种结构损伤和缺陷(图 1-1),从而导致结构承载能力和耐久性降低,使其运营状况不能满足社会的需求。

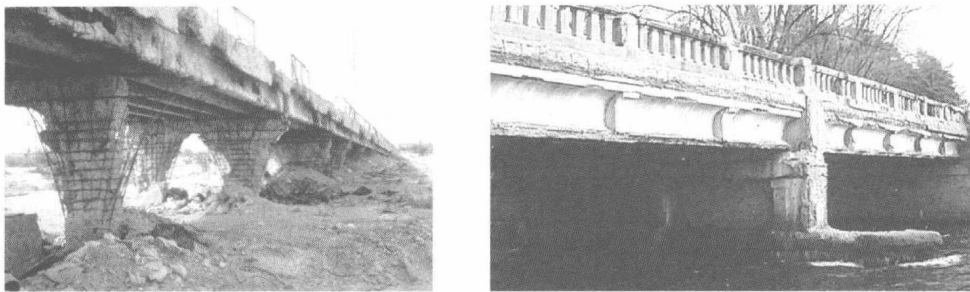


图 1-1 部分既有桥梁的典型损伤和缺陷

发达国家在经过了大规模的桥梁修建期后,目前已将重点转向对既有桥梁结构的评定、维护和改造上。据统计,美国的 60 多万座桥梁中,有 42%是在 1960 年以前建成的,采用较低的荷载标准^[1];约 8 万座桥梁具有结构缺陷,其中部分限于通行轻型车辆,部分关闭或需要立即修复才能开放;还有超过 8 万座桥梁丧失功能。美国每年仅因对公路桥梁钢筋锈蚀进行维护所产生的直接花费就达 83 亿美元,其中,大约 38 亿美元用于替代有缺陷的桥梁,20 亿美元用于维修桥面板,20 亿美元用于维修除桥面板以外的上部结构,其余 5 亿美元用于钢桥粉刷维护。用寿命周期方法分析评价由其带来的交通延迟和生产效率的损失等间接费用将超过用于桥梁锈蚀的养护、维修和加固等费用的 10 倍^[2]。

德国通过对一个州内主要受力梁是钢筋混凝土梁(RC)的桥梁和主要受力梁是预应力混凝土梁(PC)的桥梁进行全面调查,发现桥龄在 50~60 年的 RC 桥梁中,27%的桥梁上部结构至少有一处严重损伤,64%至少有一处重要损伤;30~35 年桥龄的 RC 桥梁中,13%至少有一处严重损伤,53%至少有一处重要损伤^[3]。英国约有 9.2 万座桥梁是在 1922 年以前建造的,当时尚未引入荷载标准,导致约有 1/4 的桥梁不能满足现代规范要求;如果采用重建、维修使之满足要求,则所需费用达 8 亿 3000 万英镑。在澳大利亚,仅就加固或更换新南威尔士州的有损伤缺陷的桥梁就需要至少 3.5 亿美元^[4]。

随着我国经济的飞速发展,国家将巨额资金投入基础设施建设,使交通事业得到了蓬勃发展,公路里程不断增加,大量低等级公路被改建和扩建,公路等级也不断提高。截至 2015 年底,在我国通车公路中,公路桥梁 77.92 万座,4592.77 万延米,其中,特大桥梁 3894 座,长度 690.42 万延米,大桥 79512 座,2060.85 万延米,已建成一大批结构新颖、技术复杂、设计和施工难度大、现代化品位和科技含量高的大跨径桥梁。其中混凝土桥梁占 90%以上。虽然我国桥梁数量、类型、跨径已经跃居世界前列,但桥梁设计水平和世界先进水平还有差距,特别是桥梁使用管理水平、监控检测技术和修复养护手段还远远落后于一些发达国家。不少刚刚投入使用的桥梁也存在不同程度的缺陷。

在我国的公路桥梁中,60%以上分布在技术标准低、通行能力差的公路上。其荷载标准大多为汽-13 级、拖-60 级或汽-15 级、挂-80 级,还有相当一部分桥梁的荷载标准仅为汽-10 级、履带-50 级,甚至低于汽-10 级。我国公路桥梁桥龄一般在 40 年左右,病害问题正在暴露,发生老化、损伤的桥梁数目巨大,危桥数目增长很快。除按交通部 1972 年和 1985 年版设计标准的荷载建造的桥梁尚能基本满足近期交通要求外,在此之前特别是 20 世纪 50 年代后期和 60 年代建造的一批桥梁大都承载力不足,已出现老化、破损、裂缝等现象。

服役桥梁面临诸多问题,使桥梁结构的经济性和安全性矛盾更为突出。如何在经济性和安全性之间取得最佳平衡是一个非常棘手的问题,怎样确保我国服役桥梁可靠性,最大限度地延长使用寿命,进而取得最好的经济社会效益,是摆在专家学者和工程师面前的紧迫任务,合理的办法是在对现有桥梁的运营状况、损伤程度、承载潜力以及剩余寿命等问题有一个正确评价与评估的基础上,再采取相应的加固、维修对策,努力挖掘现有桥梁的承载潜力,对不安全的桥梁进行维修加固。另外,我国的国情也决定了不能一味追求新建项目,应当重视既有桥梁结构在检测和可靠性评定、寿命预测基础上的维修和改建。

1.2 桥梁材料性能退化机理

桥梁结构在长期服役过程中,在环境等不良因素作用下,容易产生材质腐蚀和性能退化等问题,进而影响桥梁的可靠性和服役寿命。

1.2.1 混凝土劣化

1. 混凝土碳化

混凝土碳化是指大气中的 CO_2 或某些酸性气体与暴露在空气中的混凝土表面接触并且不断向混凝土内部扩散,与其中碱性水化物起反应的一个很复杂的多相物理化学过程。影响碳化的最主要因素是混凝土本身的密实性和碱性程度,如水灰比、水泥品种和用量、掺和料种类和掺量,以及混凝土养护等,此外还有一些环境因素。一般认为,混凝土碳化对混凝土本身没有太多的危害,相反会使混凝土强度提高。但是碳化会加剧混凝土的收缩,使混凝土表面产生拉应力而出现微裂纹,降低混凝土抗拉强度、抗折强度及抗渗能力。更严重的是,碳化作用会降低混凝土的碱度,当混凝土中 pH 降低到一定程度后,就会破坏混凝土中的钢筋钝化膜,造成钢筋锈蚀,而钢筋锈蚀又将导致混凝土保护层开裂、钢筋与混凝土之间黏结力破坏、结构耐久性降低等不良后果。另外,碳化使混凝土变脆,构件延性降低。

近年来,对混凝土碳化的研究主要集中在混凝土碳化的影响因素及控制措施、混凝土碳化深度计算等。目前,对于混凝土碳化机理及其影响因素的认识已相对成熟,各国学者已基本达成共识。关于碳化深度与碳化时间关系的表达式所采用的形式已基本得到了公认。多数学者针对不同影响因素下公式中的各参数进行了研究,通过试验研究了水灰比、水泥品种对混凝土碳化深度的影响^[5],探究了不同混凝土碳化指数分布及其影响因素,提出了碳化指数的不确定性模型,建立了更符合工程实际的碳化公式^[6]。在试验基础上,很多学者通过碳化机理建立碳化深度的计算模型^[7]。除此之外,一些学者还进行了多因素下的试验与理论研究,建立了考虑多因素共同作用的多系数的混凝土碳化方程^[8]。

目前对混凝土碳化的机理、影响因素、控制措施、深度预测模型等材料性质层次上的研究已经比较统一,但无论基于碳化机理还是基于试验研究的平均碳化深度预测模型,还与各种环境下实际工程中碳化深度模型存在偏差,只有在各种环境下的长期暴露性试验研究结果才更接近工程实际。另外,对碳化后混凝土力学性能的研究不多,如碳化混凝土本构关系、碳化混凝土构件和结构力学性能等,还有待进一步研究。

2. 混凝土硫酸盐劣化

硫酸盐也是破坏混凝土耐久性的一个重要因素,近年来在青海、甘肃等地的铁路、矿山、水电工程中的混凝土构筑物都出现了遭受硫酸盐不同程度腐蚀破坏的问题。混凝土硫酸盐侵蚀是指水泥水化产物与来自外界的硫酸盐以及混凝土内部硫酸盐之间发生反应,生成物吸水而体积膨胀,当膨胀应力达到一定程度时就会造成混凝土结构的破坏。在硫酸盐侵蚀过程中既有化学反应也伴随着物理变化,另外,自然环境的复杂性和混凝土骨料的多样性,使外界硫酸盐来源不确定;同时水泥水化产物也非常复杂,使混凝土受硫酸盐侵蚀成为一个非常复杂的过程。

尽管对混凝土硫酸盐侵蚀相关研究的历史已经超过 100 年,但对于其侵蚀破坏却没有统一的观点,如今对混凝土硫酸盐侵蚀的研究还没有取得一致的认识^[9]。Haynes^[10]指出造成混凝土硫酸盐侵蚀研究混乱的根本原因是实验室研究和实际破坏工程实例之间的差异,如实验室研究中采用试件的尺寸、硫酸盐的侵蚀环境程度、单一离子侵蚀和多种离子侵蚀之间的差别等。然而,有学者^[11]认为造成这种混乱的根本原因是没有对实际工程破坏实例做深度的分析和研究,对实际工程中混凝土硫酸盐侵蚀发生的条件没有清晰的认识,如环境中硫酸盐溶液的浓度和 pH 等,因为不同侵蚀条件对应于不同的生成产物。而实验室研究所采用的侵蚀环境和试验方法并不是在对实际破坏工程的分析的基础上而设置的,随意性和主观性强,从而产生了许多混乱的、脱离实际的、相互矛盾的试验结果和理论分析。另外人们往往根据这些脱离实际的研究结果,制定了一些相应的指导性标准和方法来指导位于硫酸盐环境中混凝土结构的耐久性设计。因此,不管是出于实际工程的迫切需要还是对理论研究的创新,都有必要对混凝土的硫酸盐侵蚀进行研究。

1.2.2 钢筋锈蚀

通常情况下,混凝土孔隙中充满着 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的过饱和溶液,混凝土具有很强的碱性,pH 一般在 12 以上。在这样的强碱环境中,混凝土和钢筋之间会形成一层钝化膜,对钢筋起到保护作用。但是由于混凝土的碳化,硫酸盐、氯离子等的侵蚀等作用,使钝化膜受到破坏,引起钢筋锈蚀。

锈蚀产物体积膨胀,对周围混凝土产生压应力,使混凝土产生顺筋裂缝,引起混凝土保护层剥落,而保护层剥落和裂缝又会进一步引起钢筋锈蚀。钢筋锈蚀后,除了有效截面积减小、屈服强度下降等变化外,其与混凝土的黏结性能也会发生变化。随着钢筋锈蚀量的增加,变形钢筋与混凝土的黏结强度比先期略有增加,而后期则有较大幅度的衰退。钢筋与混凝土之间黏结强度的衰退使钢筋的强

度不能被全部利用,从而与其他因素一起影响混凝土构件的使用性能和抗力,构件刚度有所减小,变形增大;横向裂缝表现为间距增大,裂缝变宽,从而使构件的适用性降低,甚至可能导致混凝土结构破坏。对钢筋锈蚀的研究,国外起步较早,大多成果已被国内引用,国内以此为基础进行了修正和补充。

混凝土中的钢筋锈蚀一般为电化学锈蚀。二氧化碳和氯离子对混凝土本身都没有严重的破坏作用,但是这两种环境物质都是混凝土中钢筋钝化膜破坏的最重要又最常遇到的环境介质。当二氧化碳、氯离子等腐蚀介质侵入时,混凝土的碱性降低或者混凝土保护层受拉开裂等都将造成钢筋表面的钝化状态全部或局部破坏,钢筋表面的不同部位会出现较大的电位差,形成阳极和阴极,在一定的环境条件下(如氧和水)钢筋开始锈蚀。

钢筋在混凝土结构中的锈蚀是在有水分子参与的情况下发生的,钢筋锈蚀的电极反应式如图 1-2 所示^[12]。在氧气和水汽的共同作用下,由图中电化学反应式可知钢筋表面的铁不断失去电子而溶于水,从而逐渐被腐蚀,在钢筋表面生成红铁锈。

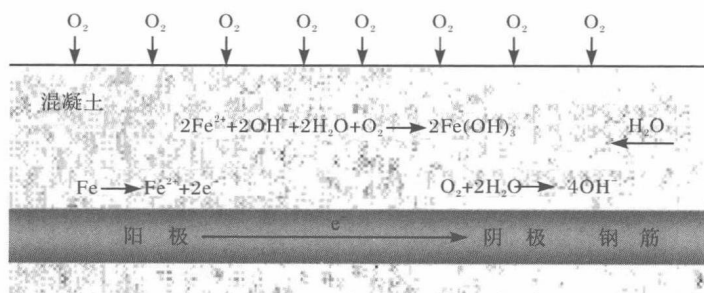


图 1-2 钢筋在混凝土中的锈蚀过程

混凝土中钢筋的腐蚀受很多因素的影响,周围环境中对结构有不良作用的介质(气体、液体、固体)、温度、湿度、冰冻等是影响钢筋锈蚀的外因;钢筋位置、钢筋直径、混凝土的种类、渗透性、裂缝情况、碱度、外加剂的使用、保护层厚度、混凝土的强度等级和质量等是影响钢筋锈蚀的内因^[6,13]。概括起来影响钢筋的锈蚀因素如下。

1. 混凝土液相 pH

对于混凝土中的钢筋,在周围环境 pH 大于 11.5 时,处于完全钝化状态,锈蚀不会发生,pH 在 9~10 时,钢筋完全脱钝,锈蚀速率不受 pH 影响;当 pH 由 11.5 逐渐下降至 9 时,钢筋钝化膜逐渐被破坏,锈蚀速率逐渐增大;而当 pH 小于 4 时,钢筋锈蚀速率急剧增加。

2. 混凝土中 Cl^- 浓度

混凝土中 Cl^- 的来源有内掺和外渗两种。内掺的 Cl^- 主要来源于混凝土拌制过程中掺加的 CaCl_2 等防冻剂,一般情况下,钢筋混凝土结构中的氯盐掺量应少于水泥质量的 1%(按无水状态计算),而且掺氯盐的混凝土结构必须振捣密实,也不宜用蒸汽养护。这种氯离子大部分被水泥浆吸附,以结合氯离子的形式存在,对钢筋锈蚀的影响不大;海水环境中的混凝土及路面撒除冰盐的公路混凝土,环境中的 Cl^- 通过混凝土孔隙逐步向内渗透,为外渗型 Cl^- 的来源,外界环境中的 Cl^- 通过混凝土保护层到达混凝土-钢筋界面并逐渐聚积,使钢筋表面溶液中的 Cl^- 浓度逐渐增大,最终达到临界浓度,钢筋开始腐蚀。钢筋位置溶液中 Cl^- 游离浓度越大,则其对钝化膜的破坏作用越大,钢筋的活性越大,锈蚀速率也越大;混凝土中 Cl^- 含量对钢筋锈蚀的影响极大。

3. 环境条件

环境条件如温度、湿度及干燥交替作用、海水飞溅、海盐渗透等是引起钢筋锈蚀的外在因素,都对混凝土结构中的钢筋锈蚀有明显影响。特别是混凝土自身保护能力不符合要求或混凝土保护层有裂缝等缺陷时,外界环境因素的影响会更突出。实际调查结果表明,混凝土结构在干燥无腐蚀介质情况下,其使用寿命要比潮湿及腐蚀介质中的使用寿命长 2~3 倍。

4. 保护层厚度、完好程度及混凝土的密实度

混凝土保护层对外界腐蚀介质、氧气及水分等渗入结构内部有阻止作用,钢筋保护层厚度越大,氧气的浓度梯度越小,锈蚀速率越慢,但混凝土的保护层厚度过大不仅会降低混凝土构件的极限抗弯能力,而且会改变冲切破坏的斜截面角度,略微降低混凝土构件的极限抗冲切能力。混凝土保护层的完好程度对钢筋锈蚀有明显的影响,特别是对处于潮湿环境或腐蚀介质中的钢筋混凝土结构影响更大。调查表明,在潮湿环境中使用的钢筋混凝土结构,横向裂缝宽度达 0.2mm 即可引起钢筋锈蚀。混凝土的密实度影响混凝土的渗透性,渗透性高的混凝土中的钢筋更容易发生锈蚀。

5. 水泥品种和掺和料

粉煤灰等矿物掺和料能降低混凝土的碱性,从而影响钢筋的锈蚀。国内外的许多研究表明,掺用优质的粉煤灰等掺和料,能在降低混凝土碱性的同时,提高混凝土的密实度,改变混凝土的内部孔结构,从而能阻止外界腐蚀介质及氧气与水分的渗入,这无疑对防止钢筋锈蚀是十分有利的。近年来我国的研究工作还表

明,掺入粉煤灰可以增强混凝土抵抗杂散电流对钢筋的腐蚀作用。

6. 混凝土的碳化程度

大气中的二氧化碳时刻向混凝土内部扩散,与混凝土在硬化过程中产生的氢氧化钙发生反应,使水泥原有的强碱性减低,pH降到8.5左右,即发生混凝土的碳化现象,这给钢筋脱钝提供了可能;另外,钢筋的质量损失率与混凝土的碳化深度一般呈线性关系,由此可知混凝土的碳化程度对钢筋锈蚀有重大影响。

7. 其他因素

除了上述各种因素外,钢筋的应力状态对其锈蚀也有很大影响。这种应力腐蚀比一般腐蚀更危险,应力腐蚀不同于钢筋的坑蚀及均匀锈蚀,而是以裂缝的形式出现,并不断发展直到破坏,这种破坏又常常是毫无预兆的突然脆断。一般来讲,钢筋的应力腐蚀分为两个阶段:局部电化学腐蚀阶段和裂缝发展阶段。对此必须充分估计,以免钢筋发生事故性断裂。水灰比也对钢筋锈蚀有很大影响,当水灰比增大时,将导致混凝土的孔隙率增大、密实度降低,从而使混凝土中腐蚀离子的含量增加,加速钢筋的腐蚀。

1.3 桥梁结构服役期性能退化

1.3.1 钢筋锈蚀对黏结性能的影响

钢筋与混凝土两种材料共同作用的基础在于,它们之间具有足够的黏结强度使钢筋与混凝土两者之间可以传递应力并协调变形。锈蚀后钢筋与混凝土的黏结锚固性能下降会导致RC构件承载力的下降,因此锈蚀后的黏结退化是关系到钢筋与混凝土两者之间能否保持原有共同作用的重要问题。

钢筋锈蚀后与混凝土黏结力的退化主要体现在以下几个方面:

(1) 钢筋锈蚀后产生的铁锈在混凝土和钢筋之间形成一层结构疏松的隔离层,降低了钢筋与混凝土之间的胶结作用。

(2) 对于变形钢筋,锈蚀之后其变形肋将逐渐消退,从而降低了混凝土和变形肋之间的机械咬合力。

(3) 钢筋锈蚀发生体积膨胀,从而对周围的混凝土产生径向膨胀力,当锈蚀量达到某一限值时,混凝土保护层就会开裂,产生顺筋裂缝,从而导致混凝土与钢筋之间的约束减弱。

锈蚀钢筋与混凝土黏结性能的研究在国外开展较早,而国内在这方面的研究则始于20世纪90年代。由于问题的特殊性,对锈蚀钢筋黏结性能的研究需要解

决两个问题——钢筋锈蚀状态的模拟和黏结试验方法的确定。其中,对钢筋锈蚀状态的模拟存在自然暴露法、通电加速锈蚀法、人工气候加速法等多种选择;而黏结性能的试验方法则有拉拔试验、压出试验、梁式(半梁式)试验、柱式试验以及板式试验等多种方式。

早期的研究主要以钢筋的自然锈蚀为主。例如,1941年,Johnston等^[14]对锈蚀变形钢筋黏结强度的研究便是通过室外自然锈蚀和室内潮湿环境锈蚀两种方法进行的,虽然自然锈蚀效果与实际情况接近,但耗时太长。自1990年沙特阿拉伯的Al-Sulaimani等^[15]利用电化学方法首次实现混凝土中钢筋锈蚀全过程的模拟以来,国内外研究者大多选择恒电流通电法模拟钢筋的锈蚀,从而研究锈蚀率与混凝土结构性能退化之间的关系。可以说,电化学方法的实现为从定性角度认识锈蚀对钢筋混凝土结构性能退化的影响起到了很大的推动作用,但通电锈蚀与自然锈蚀之间的相关性仍有待进一步商榷。近年来人工气候加速锈蚀技术的发展为弥补上述不足提供了更好的选择。浙江大学、中国矿业大学、长沙理工大学等高校已经建立了人工气候环境实验室,可以实现温度、湿度控制,实现降水、日照、刮风过程模拟,实现酸性气体和氯盐侵蚀环境以及结构构件的加载环境,为混凝土研究的进一步发展奠定了基础。

1.3.2 承载力退化

混凝土性能劣化、钢筋锈蚀等因素影响下构件抗力(承载力)的变化研究,是将研究成果应用于实际工程最为关键和重要的一步。目前国内外的研究大多集中在快速锈蚀后的RC构件的力学性能研究,并进行了大量的试验。主要以结构中主要受力构件(梁、板、柱)为研究对象,考虑的影响因素有钢筋直径、保护层厚度、养护方式、钢筋腐蚀程度和速度等。试验内容包括锈蚀后构件各项力学性能的研究,构件腐蚀前后破坏形态的对比以及腐蚀构件裂缝和变形的特征等,进而研究考虑耐久性下降的承载力计算方法。

锈蚀构件的承载力研究中,多是通过破坏试验来认识锈蚀构件的破坏过程和结构性能退化机理,这些试验研究主要包括实验室加速腐蚀试验、天然暴露试验以及实际工程构件试验。快速腐蚀试验可以在短时间内考虑不同因素和不同腐蚀程度的影响,是目前研究构件力学性能试验的主要途径;天然暴露试验将RC构件置于自然侵蚀环境下,如大气环境、海洋环境、工业环境中,获取的试验数据真实可信,长期观测后形成试验成果可以弥补许多室内试验的不足,从而会更具说服力及实际应用价值,但其试验周期长,环境条件变化不定;实际工程构件试验是将长期处于各种环境尤其是恶劣环境下的实际工程中的构件从工作现场拆下来,进行各种力学性能试验。此方法最接近于实际构件劣化情况,能够真实反映实际环境中锈蚀构件的力学性能,其缺点是对于某一替换构件只能局限于反映特定的