

Yanhai Diqu Hunningtu Qiaoliang Naijiuxing

Pingjia yu Fanghu

沿海地区混凝土桥梁 耐久性评价与防护

赵尚传
左志武

张劲泉
梁奎基

编著



人民交通出版社
China Communications Press

Yanhai Diqu Hunningtu Qiaoliang Naijiuxing

Pingjia yu Fanghu

沿海地区混凝土桥梁 耐久性评价与防护

赵尚传 张劲泉 编著
左志武 梁奎基



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

本书重点阐述了沿海地区混凝土桥梁的主要病害及成因、耐久性评价方法以及耐久性恢复的设计与施工技术。全书分六章:第一章介绍了混凝土桥梁耐久性现状与研究进展;第二章论述了沿海地区混凝土桥梁典型耐久性病害及影响因素;第三章阐述了沿海地区混凝土桥梁耐久性评价技术;第四章论述了沿海地区混凝土桥梁耐久寿命预测;第五章主要介绍了沿海地区混凝土桥梁耐久性提升改善设计技术;第六章介绍了金山港大桥耐久性检测与评价及恢复设计、施工与质量检验。

本书可供从事混凝土桥梁养护管理、设计与施工的工程技术人员使用,也可供相关专业的高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

沿海地区混凝土桥梁耐久性评价与防护 / 赵尚传等
编著. —北京:人民交通出版社, 2010.6
ISBN 978-7-114-08234-4

I. ①沿… II. ①赵… III. ①钢筋混凝土桥—耐用性—检测②钢筋混凝土桥—维护 IV. ①U448.33

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第091523号

书 名: 沿海地区混凝土桥梁耐久性评价与防护
著 作 者: 赵尚传 等
责任编辑: 李 农
出版发行: 人民交通出版社
地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号
网 址: <http://www.ccpress.com.cn>
销售电话: (010) 59757969, 59757973
总 经 销: 人民交通出版社发行部
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京市密东印刷有限公司
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 10.75
字 数: 253 千
版 次: 2010年6月 第1版
印 次: 2010年6月 第1次印刷
书 号: ISBN 978-7-114-08234-4
印 数: 0001—2000 册
定 价: 28.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

桥梁是重要的交通基础设施,是公路网的咽喉工程,在经济社会发展中起着重要作用。我国公路网中绝大多数桥梁系配筋水泥混凝土(本书简称“混凝土”)结构,从实际使用情况来看,混凝土桥梁并不像设想的那么耐久。特别是在沿海地区,混凝土桥梁投入使用10年左右,即出现因钢筋锈蚀引起的耐久性病害。耐久性不足,使用寿命偏短,已成为影响我国公路桥梁建设发展的主要症结。

本书以“海潮区混凝土桥梁耐久性评价与防腐技术研究”项目的科研成果为基础,着重阐述了沿海地区混凝土桥梁的主要病害及成因、耐久性评价方法以及耐久性恢复的设计与施工技术,以期为桥梁养护管理人员及相关工程技术人员提供一定的技术指引。

本书由赵尚传、张劲泉、左志武、梁奎基编著,共六章:第一章介绍了国内外混凝土桥梁耐久性现状与研究进展和热点问题;第二章论述了沿海地区混凝土桥梁耐久性劣化的主要影响因素以及典型的耐久性病害和表现特征;第三章就沿海地区混凝土桥梁耐久性评价指标体系、构件与结构耐久性状态评价方法进行了阐述;第四章结合海洋环境中氯离子侵蚀随机性,论述了采用概率理论的混凝土桥梁耐久寿命预测方法,并就海洋环境中氯离子侵蚀和混凝土碳化引发的耐久性失效进行了对比分析;第五章主要介绍了恢复服役混凝土桥梁耐久性的基于可靠度的设计方法与技术措施,并列举了国外近期几项重大工程的耐久性保护措施;第六章结合实体工程着重介绍了沿海地区混凝土桥梁的耐久性检测评价、耐久性恢复设计与施工、质量控制与检验的具体实施技术,以期方便读者加深对本书第三~五章内容的理解与应用。

本书吸纳了交通部西部交通建设科技项目“混凝土桥梁长期性能演变规律与跟踪观测技术研究”的部分研究成果,是集体智慧的结晶。在付梓之际谨向项目参加单位和参研人员表示衷心感谢。人民交通出版社的领导和编辑们为本书出版付出了辛勤的劳动,在此一并表示感谢。

由于作者学识水平有限,书中难免存在疏漏与错误,敬请读者批评指正。

作 者

2010年4月

目 录

第一章 混凝土桥梁耐久性状况与研究进展	1
第一节 混凝土桥梁耐久性状况	1
一、国外混凝土桥梁耐久性状况	1
二、我国混凝土桥梁耐久性状况	3
三、耐久性失效损失	5
第二节 混凝土结构耐久性研究进展	6
一、混凝土耐久性劣化机理研究进展	6
二、高性能混凝土研究进展	7
三、混凝土结构耐久性设计方法研究进展	8
第三节 混凝土桥梁耐久性研究热点问题	9
一、环境作用研究	10
二、材料层次耐久性研究	11
三、构件层次耐久性研究	12
四、结构层次耐久性研究	13
五、在役桥梁耐久性评估研究	14
第二章 沿海地区混凝土桥梁典型耐久性病害及影响因素	15
第一节 典型耐久性病害	15
一、钢筋锈蚀	15
二、混凝土裂缝	15
三、空鼓起翘剥落	16
四、混凝土蜂窝麻面	16
五、混凝土溶蚀	17
六、混凝土酥化	17
第二节 主要侵蚀因素	18
一、混凝土碳化	18
二、氯离子侵蚀	19
三、硫酸盐腐蚀	20
四、镁盐腐蚀	20
第三节 氯离子含量对混凝土桥梁耐久性的影响	20
一、海水环境	20
二、河流入海口水域	20
三、海洋大气影响区域	21
第三章 沿海地区混凝土桥梁耐久性检测评价技术	23
第一节 耐久性评价模型	23

一、评价程序	23
二、桥梁耐久性评价模型	23
三、构件耐久性评价模型	25
第二节 耐久性检测	26
一、各国检测标准	26
二、检测指标	28
三、耐久性检查程序	43
四、检测区域选择	44
五、检测内容和方法	44
第三节 耐久性评价	46
一、评价等级划分	47
二、主要承重构件指标等级评价标准	47
三、其他构件指标等级评价标准	54
四、指标隶属函数	55
五、因素权重	58
六、构件耐久性评价方法	61
七、桥梁耐久性评价方法	63
第四章 沿海地区混凝土桥梁耐久寿命预测	66
第一节 抗氯离子侵蚀耐久寿命预测	66
一、氯离子临界浓度	67
二、氯离子侵蚀深度的随机性	73
三、氯离子侵蚀概率模型	74
四、抗氯离子侵蚀寿命预测	77
五、经济优化分析	77
第二节 氯盐侵蚀与混凝土碳化诱发混凝土结构耐久性失效对比	79
一、混凝土碳化深度概率模型	79
二、混凝土碳化失效概率	80
三、氯离子侵蚀与混凝土碳化诱发钢筋腐蚀概率对比	82
第五章 沿海地区混凝土桥梁耐久性提升改善设计技术	86
第一节 概述	86
第二节 混凝土桥梁耐久性维护原则	87
一、与环境条件的适用性	87
二、与耐久性状态的适用性	87
第三节 技术措施与设计理论	88
一、与耐久性相关的混凝土结构性能	88
二、高抗渗性混凝土	89
三、含钡硫铝酸盐水泥混凝土	102
四、阻锈剂	123
五、表面涂层	128

六、电化学法	132
七、阴极保护	133
八、不锈钢筋	136
第四节 耐久性恢复设计	137
一、设计方法	137
二、指数参数	137
第五节 国外近期几项重大工程的保护措施	140
一、荷兰三角洲东谢尔德巨型挡潮闸	140
二、跨中东海湾法哈德亲王高速公路	140
三、跨英吉利海峡海底隧道	140
四、丹麦大贝尔特海峡大桥和海底隧道	141
五、美国佛罗里达州阳光大桥	141
六、加拿大东海岸跨诺森堡朗德海峡大桥	141
第六章 金山港大桥耐久性检测与评价及恢复设计、施工与质量检验	143
第一节 工程概况	143
第二节 耐久性检测与评价	143
第三节 耐久性恢复设计	145
一、设计依据	145
二、恢复设计与技术措施	145
三、恢复施工及工艺	147
第四节 耐久性恢复质量控制与检验	150
一、硅烷浸渍施工质量控制与检查	150
二、渗透型阻锈剂施工质量控制与检查	150
三、高抗氯离子混凝土质量控制与检验	151
第五节 耐久性恢复质量检测结果	152
一、结构几何尺寸检测结果	152
二、混凝土强度检测结果	153
三、钢筋分布及混凝土保护层厚度检测结果	154
四、混凝土吸水率及硅烷浸渍深度检测结果	155
参考文献	157

第一章 混凝土桥梁耐久性状况与研究进展

第一节 混凝土桥梁耐久性状况

所谓混凝土桥梁的耐久性,是指在设计确定的环境作用和维修、使用条件下,桥梁构件在规定期限内保持其适用性和安全性的能力,即在正常设计、施工、使用和维护条件下,在规定的时间内,虽然构件性能随时间逐渐劣化,但桥梁仍能满足预定功能的能力。

水泥混凝土是当今世界上用量最大的人造材料。自 1824 年波特兰水泥问世以来,混凝土材料以其广泛的适用性和低廉的造价而成为土木建筑工程中不可缺少的材料,其用量越来越大。水泥混凝土自 19 世纪末期开始用于房屋、桥梁等结构工程,到了 20 世纪 50 年代初,就已确立了它在整个土建工程领域中作为最大宗材料的地位,并为建设 20 世纪的人类物质文明做出了不可估量的贡献。几乎所有的现代基础设施工程都离不开混凝土,绝大部分土建工程都用混凝土结构建造。全球混凝土的年消耗量从 20 世纪 60 年代初的人均 1t 增加到 80 年代初的人均 1.5t 和现在的接近 2t。目前我国水泥的年产量已飞速增长到 7 亿 t,可以配制混凝土约 23 亿 m^3 ,人均近 4t,并将继续上升。

混凝土问世后被称为人造石,人们认为它能像石材那样坚固耐久。对于早期的混凝土工程,很少有关于钢筋锈蚀和混凝土开裂的报道。在美国,20 世纪 30 年代以前出现的混凝土劣化现象主要是由于冻融引起的剥落和施工振捣不良引起的混凝土在水渗漏下析出白浆。1944 年美国当时的公共道路管理局曾对几个州的桥梁进行普查,发现 1930 年以后修建的桥梁在耐久性上不如 1930 年以前修建的,前者的使用时间虽然较短,但尚无劣化现象处于良好状态的仅占 27%,而后者虽然使用时间较长,处于良好状态的却有 67%。分析其原因认为,这种情况是由 1930 年以后水泥产品的颗粒变细、水泥中的早强矿物成分增加以及混凝土的早期强度发展变快所致。美国最常用的 ASTM I 型水泥的 7d 强度从 1927 年的 17MPa,上升到 1956 年的 23MPa,再到 1994 年的 33MPa,增加近一倍。早在 1922 年,美国一座水电站上就发现了混凝土碱—集料反应引起的腐蚀现象。1935 年就有学者根据岩相研究得出结论,认为水泥与某种集料发生化学作用使混凝土膨胀开裂。1936 年的美国文献也曾提到硫酸盐对混凝土的腐蚀。

但是从整体上来说,混凝土劣化破坏现象在几十年前比较少见。究其原因是早期混凝土工程的数量较少,材料的劣化过程通常又需较长的时间,所以直到 20 世纪 70 年代以前,混凝土结构的耐久性还未引起世界各国的重视,人们依然相信混凝土应该具有良好的耐久性。

一、国外混凝土桥梁耐久性状况

从世界范围看,混凝土虽然已经有一百多年的历史,但大量并广泛地应用于各类土建工程

则不过 50 年。混凝土材料在很多环境中并不像当初设想的那样耐久。随着可持续发展理念的日益增强,以及土建工程规模不断地扩大并向海洋等更加恶劣的环境中延伸,人们对混凝土——全球用量最大的人造材料耐久性的需要变得更加迫切。

1. 美国混凝土桥梁的耐久性状况

发达国家桥梁混凝土结构等在基础设施中的大量应用是从 20 世纪 50 年代开始的,美国著名的艾森豪威尔高速公路建设计划也始自 50 年代初。大约从 20 世纪 60 年代起,在冬季的公路上普遍使用除冰盐来清除道路积雪以解决结冰引起的交通堵塞问题。此后 10~20 年,混凝土腐蚀现象大量涌现,其中由于氯盐引起的钢筋锈蚀和混凝土腐蚀成为最突出的问题,而混凝土的碱—集料反应、硫酸盐腐蚀等破坏现象也不断呈现。

据 1984 年报道,美国 57.5 万座钢筋混凝土桥梁中,一半以上出现钢筋腐蚀破坏,40% 承载力不足,需修补和加固。1930 年修建的美国俄勒冈州阿尔西厄海湾上的多拱大桥,钢筋严重锈蚀,用传统的局部修补方法修补,效果不大,不得不拆除更换。1960 年建造的美国旧金山第二座圣马特奥跨海湾大桥处于浪溅区的预制横梁,由于设计和施工不当,钢筋严重锈蚀,1980 年不得不进行耗资巨大的修补。

20 世纪 60 年代末期,美国公路桥面板结构出现腐蚀破坏的事例大幅增加。在喷洒除冰盐地区和海洋环境中,采用普通钢筋、保护层厚度为 40mm 的桥面板往往在建成 7~10 年后就出现钢筋锈蚀引起的混凝土胀裂,一般建成后 20 年左右就必须进行大修。因除冰盐引起钢筋锈蚀需限载通行的公路桥梁占桥梁总数的 1/4,其中不能通车的危桥占 1%。

桥梁性能迅速劣化最主要的原因是混凝土桥梁耐久性不足。1998 年美国土木工程师学会(ASCE)发表了一份报告,对美国国内已有的基础设施工程作了评估,认为美国现有 29% 以上的桥梁已经老化,并将桥梁的等级评为“差”,劣化结构的修理与更换现已成为公路机构的一个主要任务。

2. 英国混凝土桥梁的耐久性状况

英国调查统计了 271 项混凝土工程劣化破坏事例。其中,碳化锈蚀占 17%,环境氯盐锈蚀占 33%,内部氯盐(由配制混凝土的原材料带入)锈蚀占 5%,以上三项钢筋锈蚀总和占 55%;另外还有混凝土冻蚀占 10%,混凝土磨蚀占 10%,混凝土碱—集料反应破坏占 9%,硫酸盐化学腐蚀占 4%,其他很少发生的腐蚀破坏占 7%。

即使不在沿海地区,冬季寒冷地区的混凝土桥梁,冷天撒盐化冰雪所造成的钢筋锈蚀也与沿海地区桥梁类似。英国南威尔士跨阿凡河上的 Ynysy-Gwas 后张预应力混凝土桥,1953 年建造,1958 年就倒塌了,其原因是撒盐导致预应力筋的锈蚀破坏。

3. 日本混凝土桥梁的耐久性状况

在日本,混凝土桥梁早期劣化成为社会问题要比西方国家稍晚,大概到 20 世纪 80 年代初才引起媒体和学术界的关注,主要问题是碱—集料反应以及使用海砂和在海洋环境中氯盐引起的钢筋锈蚀。表 1-1 列举了日本 20 世纪六七十年代在沿海区域建造的遭受盐害的 15 座混凝土桥梁。

从 1975~1980 年的统计结果看,桥梁盐害大致有以下趋势:

(1)建成后 5~10 年,盐分从梁表面浸透进来,钢筋开始锈蚀,保护层薄的部分和金属隔离

物等因锈蚀而产生锈汁。根据环境状况,锈蚀进一步发展,因锈蚀产生的体积膨胀沿着钢筋发展使裂缝表面化。一旦产生裂缝,新的盐分更容易侵入内部,促进盐害的更进一步发展。

遭受盐害的桥梁

表 1-1

桥梁名称	形 式	桥长(m)	跨数	架设年份	架设场所
早田陆桥	PC 连续箱梁	98.2	3	1962	渔港上
小岩川陆桥	PC 后张法 T 形梁	235.9	9	1965	渔港上、分水线
岩川大桥	PC 后张法 T 形梁	336.9	9	1966	河口、分水线
港桥	PC 后张法 T 形梁	117.5	4	1966	渔港上
温海川桥	PC 后张法 T 形梁	70.0	3	1971	河口
大岛陆桥	PC 先张法空心板	43.6	3	1971	渔港上
温福陆桥	PC 后张法 T 形梁	156.7	6	1971	渔港上
米子陆桥	PC 后张法 T 形梁	35.7	1	1965	渔港上
暮坪陆桥	PC 后张法 T 形梁	144.0	5	1965	渔港上
坚苔泽一号桥	RC 空心板	20.0	1	1965	沿海岸斜面
坚苔泽二号桥	RC 空心板	45.3	3	1965	沿海岸斜面
坚苔泽三号桥	RC 空心板	220.0	11	1965	沿海岸斜面
小波渡陆桥	PC 后张法 T 形梁	86.9	3	1964	渔港上
三濑陆桥	PC 后张法 T 形梁	70.5	2	1964	渔港上
三濑桥	PC 后张法 T 形梁	34.7	2	1963	300m 内陆

(2) 建成 10~15 年,盐害发展,随着裂缝的扩大,混凝土的一部分开始剥落。根据环境状况,混凝土剥落后的部分产生空白,更加深了盐害的发展。

(3) 建成 15 年以上,裂缝扩大,由于混凝土的落缺,盐分不断向梁的深部发展,剥落、空缺增大,按不同状况对预应力钢丝束产生损伤。

日本新干线使用不到 10 年,混凝土桥梁即出现大面积混凝土开裂、剥蚀现象。为了提高混凝土耐久性,1986 年日本建筑学会修订规范将混凝土最小保护层厚度普遍加大了 10mm,还补充了配制混凝土的单方拌和水量不超过 $185\text{kg}/\text{m}^3$ 等规定。

日本于 1986 年提出“考虑耐久性的建筑物设计、施工维护大纲”,在 1989 年制定了《混凝土结构耐久性设计准则(试行)》,把耐久性设计定义为:全面地考虑材料质量、施工工序和结构构造使结构在一定的环境中正常工作,在要求的期限内不需要维修。它采用了与结构设计相同的思路,要求构造各部位的耐久性指数大于或等于环境指数。

二、我国混凝土桥梁耐久性状况

1. 海洋环境中的钢筋锈蚀严重

我国有上万公里海岸线,而且沿海地区基本上是经济比较发达的地区,沿海基础设施建设比较早,规模非常大。沿海地区混凝土桥梁在运营过程中,除承受正常运营荷载外,还承受着海潮和风浪等自然环境的侵蚀作用,海水和海风中的氯离子将过早地诱发混凝土中钢筋锈蚀,缩短桥梁结构使用年限。处于海洋环境下的混凝土桥梁,钢筋锈蚀已被公认为全世界日益突

出的一大灾害。如山东烟威路沿线桥梁,虽然在运营过程中采取了积极的防护措施,但由于在建造过程中忽视了结构耐久性的设计,到现在运营 10 年后局部已经出现了严重的钢筋锈蚀和混凝土断面缺损。天津滨海的三座混凝土桥使用 8~10 年后,墩柱钢筋遭严重腐蚀,柱体混凝土保护层普遍剥落。华东、华南一带沿海桥梁,在海洋环境和高温高湿的双重作用下,更容易发生腐蚀破坏。台湾澎湖跨海桥过早发生破坏是跨海大桥耐久性差的典型事例。澎湖大桥以钢筋混凝土为主体,规模大,投资多,原设计寿命至少要超过 40 年,但在使用 7 年之后,就出现钢筋锈蚀问题,梁、板、柱等部位陆续出现顺筋开裂的现象。使用 17 年后,由于腐蚀破坏严重,承载力大幅下降以至处于不安全状态,最终不得不拆除重建。香港在 1994~1995 年对码头钢筋混凝土结构做过一次详细调查,共调查了 93 个码头,平均建成时间 23 年(从 2 年到 50 年),发现 93% 的损坏与钢筋锈蚀相关,造成保护层开裂剥落,有的新建成后还不足 5 年;氯盐是引发钢筋锈蚀的主要因素,在 25% 的码头上部结构中,发现锈蚀导致的钢筋截面损失造成了对结构安全的危害。

现有许多混凝土桥梁实例表明,在现有的桥梁混凝土技术下,沿海地区混凝土桥梁在 10~20 年内就需要大规模维修,远达不到设计寿命的要求。近几年,大型跨海桥梁开始兴建,并有快速发展的趋势,如已经建设完成的东海大桥、建设中的杭州湾跨海大桥、正在规划中的粤港澳大桥等。它们都处于典型的海洋环境中,必须加强桥梁混凝土在海洋环境中长期性能的研究,以便在建设初期采取完善可靠的措施,确保其百年使用寿命。

2. 撒除冰盐环境中的钢筋锈蚀严重

撒除冰盐环境主要在长江以北冬季结冰的地区。由于冬季需要保持道路畅通,在下雪以后,通常使用除冰盐融化道路积雪,除冰盐中的氯离子渗入混凝土中使公路桥梁钢筋迅速锈蚀。我国第一座城市大型立交桥——北京西直门立交桥,于 1980 年 12 月建成,1999 年 3 月即拆除重建,寿命还不到 19 年。虽然造成重建的原因是多方面的,但因撒除冰盐而导致的钢筋严重锈蚀是最主要的原因之一。

3. 一般大气环境中混凝土碳化导致钢筋锈蚀

除前述比较严酷的环境条件外,一般大气环境中的二氧化碳对混凝土中性化也可以导致钢筋锈蚀。从当前我国混凝土桥梁结构碳化情况来看,抗碳化耐久性也不容乐观。20 世纪 80~90 年代及以前桥梁混凝土设计强度都比较低,而且保护层厚度比较薄。调查发现,经过 20 年左右的时间,混凝土碳化深度基本上达到了保护层厚度,尤其是质量有缺陷的部位,碳化更加严重,大部分出现钢筋锈蚀,已经达到耐久性极限,迫切需要进行维护。

4. 酸雨环境对混凝土和钢筋的腐蚀

酸雨也可以使混凝土中性化,而且中性化的程度和速度都甚于“碳化”。酸雨对钢筋混凝土桥梁的腐蚀是双重的:一是腐蚀混凝土,使混凝土中性化,降低混凝土的碱性;二是直接腐蚀其接触到的钢筋。酸雨是由于大气环境过度污染、酸性物质过多造成的,如工业排放和汽车尾气中的氮氧化物、硫化物等。随着工业的发展和大气污染的加重,在一些地区出现酸雨不可避免。

5. 北方混凝土桥梁冻融损伤严重

我国的寒冷环境主要分布于东北地区、西北地区、华北地区,这些地区的冻融损害非常严

重。除冰盐与冻融共同作用,是最严酷的冻融破坏,盐冻破坏比普通冻融破坏的严重程度甚至高达 10 倍。北京于 20 世纪 70 年代末 80 年代初兴建的立交桥,10 年左右即达到耐久性极限,其中除冰盐和冻融的共同作用是导致其耐久性严重不足的最主要原因之一。

6. 盐渍环境中混凝土桥梁耐久性不足

我国盐渍地区分布广阔,包括沿海岸线的滨海盐渍地区和西北部靠近盐田盐湖的内陆盐渍地区。土壤成分和地下水主要化学成分含量分析表明,这些地区的土壤和地下水含有大量对混凝土和钢筋具有腐蚀性的化学成分,如硫酸盐、镁盐、氯盐等,很多地区的腐蚀性化学成分甚至超出了强腐蚀指标的范围。近年来,随着我国经济建设的发展,土建基础设施建设已逐渐延伸到这些地方,但工程的设计标准依然套用常规地区的要求,结果许多混凝土桥梁建成后仅使用 7~8 年即遭强腐蚀而破坏。山东潍坊白浪河大桥按交通部《公路桥梁通用图》建造,因位于盐渍地区,受盐、冻侵蚀仅使用 8 年就已成为危桥,现已部分拆除并加固重建。

7. 碱—集料反应导致混凝土桥梁破坏

20 世纪 70 年代末以前,我国没有发现因碱—集料反应引起破坏的桥梁,其主要原因是水泥多掺矿渣、粉煤灰等混合材,对碱—集料反应有抑制作用,而且单方水泥用量少,水泥标号低,混凝土中含碱量少。直到 1984 年国家修订了不掺混合材的硅酸盐水泥标准以后,加上混凝土技术进步,泵送混凝土单方水泥用量大,各种含碱外加剂广泛应用,混凝土含碱量提高很多,增加了碱—集料发生的潜在危险性。在存在碱活性集料的地区,碱—集料反应是一种值得注意的、潜在的威胁。在铁路桥梁中,发现混凝土碱—集料反应破坏的现象较多。据 1994 年铁路秋季检查统计,有 2 300 多孔预应力混凝土梁发生碱—集料反应;到 2002 年年底,有碱—集料反应现象的达 3 000 多孔。

三、耐久性失效损失

在美国,由于各种腐蚀(包括基础设施工程、生产设备、交通运输工具等)每年带来的直接、间接损失分别约占国内生产总值(GDP)的 4.9%(1976 年)和 4.2%(1996 年)。美国腐蚀工程师协会(NACE)等几个组织联合调查表明,1999~2001 年间,在美国,腐蚀造成的直接经济损失每年平均达 2 760 亿美元,占 GDP 的 3.1%,其中,交通公共设施占 34.9%,建筑业占 18%,制造业占 31.5%,而间接损失比直接损失还要大得多。由除冰盐造成混凝土桥梁腐蚀的损失极其惊人。据美国公路战略研究计划估计,到 20 世纪末,除冰盐造成的美国公路结构损失达到 4 000 亿美元。美国交通部运输研究委员会在 1991 年的一份报告中指出,除冰盐造成的直接修理费用每年约为(2~5)亿元,其中桥面板(0.5~2)亿美元,桥梁下部结构及其他构件 1 亿美元。恢复结构耐久性的维修费用同样惊人。1989 年美国联邦公路管理局(FHWA)在向国会提交的报告《美国公路和桥梁现状》中指出,当时有待维修的混凝土桥梁需维修费 1 550 亿美元;1991 年提交给国会的报告中提出,为修复当时有缺陷桥梁的费用需 910 亿美元;在 1997 年报告中为(780~1 120)亿美元,如果仅是为了维持现有病害桥梁总数和比例不再增加,从此时起到 2011 年的费用支出也需每年 52 亿美元。另有报道,美国今后 10 年中每年直接用于公路桥梁腐蚀的修理费用估计为(64.3~101.5)亿美元,其中更换有缺陷结构或构件为 37.9 亿美元,混凝土桥面板维修为(10.7~29.3)亿美元,桥梁的其他混凝土构件(上、下部结构)(10.7~

29.3)亿美元,钢桥维护油漆为5亿美元。

英国30年来的腐蚀损失平均占GDP的3.5%。1972年英国在英格兰中部建造环形快车道,有11座混凝土高架桥,全长21km,当时总造价是2800万英镑。由于撒盐除冰,建成两年后就发现钢筋锈蚀造成的混凝土顺筋裂缝现象。1974~1989年的15年间,修补费用已高达4500万英镑,为初始造价的1.6倍。当时估计以后15年间(到2004年)的维修还需要耗费1.2亿英镑,累计接近最初造价的6倍。1998年,英国高速公路桥梁由于除冰盐引起腐蚀的损失仅在英格兰与威尔士两地就达6.2亿英镑。英国每年用于修复钢筋混凝土结构的费用达200亿英镑。在混凝土劣化的耐久性破坏因素中,钢筋锈蚀占一半以上。

澳大利亚的腐蚀损失平均占GDP的4.2%;而波兰则达到GDP的6%~10%,约为西方国家平均水平的2倍。

在这些腐蚀损失中,土建基础设施工程的劣化损坏占有较大比例,有可能达到40%,其中主要是混凝土结构的腐蚀。虽然不能消除腐蚀损失,但是可以采取各种措施尽量挽回和减少。研究结果显示,如果对桥面板采取全寿命费用分析的优化投资维修策略,就可以节省46%的费用。在某些情况下,使用过程中的长期维修费用可高达初期建造投资的10倍。

在我国,处于露天环境下的桥梁耐久性与病害状况甚为严重。由于交通量与日俱增,车辆载重不断提升,加上缺乏日常维修,许多桥梁处于带病超负荷工作状态,因而进一步加快了损坏速度。截至2008年年底,我国公路危桥有97795座。公路桥梁每年实际需要的维修费接近40亿元,而实际到位的仅有1/4左右。

以上的数据和事例说明,混凝土结构耐久性不足造成的损失大大超过了人们的估计。国外学者曾经用“五倍定律”形象地描述混凝土结构耐久性设计的重要性,即设计阶段在钢筋防护方面节省1美元,那么就意味着:发现钢筋锈蚀时采取措施将追加维修费5美元;混凝土表面顺筋开裂时采取措施将追加维修费25美元;严重破坏时采取措施将追加维修费125美元。

第二节 混凝土结构耐久性研究进展

一、混凝土耐久性劣化机理研究进展

最初的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。19世纪二三十年代用素混凝土修建了海岸防波堤、码头和灯塔等沿海或海上构筑物。由于这些构筑物长期经受外部波浪冲击、泥沙磨蚀、冰冻的物理作用影响,以及海水中矿物盐与混凝土的化学作用影响,其使用期往往不能像人们预料的那样长,因此混凝土结构的耐久性问题逐渐引起了人们的重视。19世纪40年代,为了探索那些年代建成的码头被海水毁坏的原因,法国工程师、研究者维卡对海水环境中水硬性石灰以及用石灰和火山灰制成的砂浆的性能进行了研究,并著成《水硬性组分遭受海水腐蚀的化学原因及其防护方法的研究》一书,这是研究海水对水硬性胶凝材料制成的混凝土腐蚀破坏的第一部科研著作。在书中,他得出这样的结论:海水中的镁盐与氢氧化钙和含水硅酸盐发生反应,生成氢氧化镁和硫酸钙;硫酸钙继续与水泥石中的其他成分相互作用,造成水泥石的腐蚀破坏。1880~1890年,当第一批钢筋混凝土构件问世并首先应用于工业建筑物时,人们逐渐开始研究钢筋混凝土能否在化学活性物质腐蚀条件下安全使

用及其在工业区大气中的耐久性(主要是钢筋锈蚀)问题。20 世纪初,格尤恩、拉巴利德和克莱罗门等人对工业建筑中使用的混凝土和钢筋混凝土进行了基本研究和经验总结。

20 世纪 20 年代初,伴随着钢筋混凝土结构的大规模应用,逐渐出现了许多新的耐久性损伤类型,这促使学者们积极进行有针对性的研究。1925 年,在 Miller 的领导下,美国开始在硫酸盐含量极高的土壤内进行长期试验,其目的是为了获取 25 年、50 年甚至更长时间的混凝土腐蚀数据;德国钢筋混凝土协会依托混凝土构筑物遭受沼泽水腐蚀而损坏的事例,对混凝土在自然条件下的腐蚀情况进行了一次长期试验;1934~1964 年,卡皮斯和戈拉夫对混凝土在海水中的耐久性进行了试验研究,并提供了许多有关混凝土结构在自然条件下使用情况的可靠数据,以及有关水泥种类、混凝土配合比和某些生产因素对混凝土抗腐蚀性影响方面的见解。20 世纪 40 年代,美国学者 T. E. Stanton 首先发现并定义了碱—集料反应。1945 年, Powers 等人从混凝土亚微观结构入手,分析了孔隙水对孔壁的作用,提出了静水压假说和渗透压假说,开始了对混凝土上冻融破坏的研究。1951 年,前苏联学者 A. A. 贝科夫、B. M. 莫斯克文等人最先开始了混凝土中钢筋锈蚀问题的研究,最初目的是为了解决混凝土保护层最小的薄壁结构的防腐问题和使用高强度钢制作钢筋混凝土构件的问题。此后,他们又在这方面做了大量的工作,这些成果反映在 B. M. 莫斯克文的专著《混凝土的腐蚀》和《混凝土和钢筋混凝土的腐蚀及其防护方法》中,并在大规模研究工作的基础上制定了防腐标准规范(如建筑结构防腐设计标准 CH 262—63、CH 262—67),为建造足够耐久的混凝土和钢筋混凝土结构奠定了基础。

我国对混凝土结构的耐久性研究起步于 20 世纪 60 年代初南京水利科学研究院对混凝土碳化和钢筋锈蚀的相关研究。20 世纪 80 年代初,铁道部、交通部和中国土木工程学会等单位结合工程需要对混凝土结构的腐蚀组织进行了试验研究,收集了大量的试验数据。1994 年,国家科学技术委员会组织的国家基础性研究重大项目(攀登计划 B)“重大土木与水利工程安全性与耐久性的基础研究”促进了我国混凝土耐久性研究的迅速发展,经过为期 6 年的研究,至 2000 年已取得了关于混凝土碳化、氯盐侵蚀、混凝土冻融破坏、碱—集料反应、钢筋锈蚀等大量的基础性研究成果。

二、高性能混凝土研究进展

为了解决混凝土的耐久性,从 20 世纪 80 年代中期起,发达国家掀起了以耐久性为基本要求的高性能混凝土研究,旨在研发为基础设施工程提供 100 年以上的使用寿命,更适合工业化、自动化生产且有更高的施工质量可靠性的高性能混凝土。高性能混凝土是在现代高强混凝土的基础上发展起来的,其主要通过采用较低的水泥用量、较大的矿物掺合料用量和较少的拌和水用量,来增强混凝土的密实性、抗裂性、抗化学腐蚀性,改善其工作和易性,既能提高混凝土的耐久性,又能充分利用工业废料(粉煤灰和矿渣等矿物掺合料),减少水泥生产的能源消耗与污染。高性能混凝土的开发得到了各国政府的高度重视。

1989 年,加拿大政府提出了一个协作网研究计划,专门用来资助对国家今后长远发展有影响的科研项目,发动全国提课题,并邀请国内外专家对涉及航天、医学、工程、社会、人文科学等的申报项目进行评选,最终从 158 项提议的项目中评选出 15 项,属于土木工程学科的仅占一项,这就是高性能混凝土,足见其被重视的程度。加拿大有 7 所大学、两家企业参与了政府的“高性能混凝土协作网”研究,1990 年获得 640 万加元资助进行了为期 4 年的研究;到 1994

年在原有的 15 个协作网中有 10 个继续取得资助以进行下一个 4 年的研究,其中高性能混凝土的资助额为 550 万加元,同时有更多的施工企业和顾问公司参与。

1986 年,法国政府部门组织国内 23 家单位(包括政府研究机构、大学、公司、承包商等),进行一项名为“混凝土的新途径”研究项目,进行高性能混凝土研究并建造示范工程。研究经费主要由企业提供,政府只资助其中的一部分。这一项目已于 1993 年完成,建成的样板工程有预应力混凝土桥、核电站反应堆的安全壳等。1996 年,法国政府公共工程部和教育与研究部又组织了为期 4 年的“高性能混凝土 2000”国家研究项目,研究经费折合 550 万美元,有 40 余个机构参与;与此有关的另两项国家研究项目“钢纤维混凝土”及“混凝土施工的自动控制方法”也同时启动,其 4 年的经费分别折合 330 万和 550 万美元。

1994 年,美国联邦政府 16 个机构联合提出了一项在基础设施工程建设中应用高性能混凝土和其他新材料的建议,计划 10 年内在混凝土项目方面投资 2 亿美元进行研究和开发。美国国家自然科学基金会(NSF)、美国国家标准与技术研究院(NIST)、美国联邦公路管理局,以及一些州政府的运输部、美国工程兵部等机构都一直资助高强、高性能混凝土的研究。美国国家标准与技术研究院每年固定资助美国西北大学的水泥基材料联合研究中心的研究经费就有 200 万美元。

德国、瑞典、挪威等国家在发展高性能混凝土上也有很大投入。挪威是较早对高强、高性能混凝土开展研究的国家之一,至今已建造了 20 多座混凝土海洋采油平台。挪威皇家科技研究院一直以“科学与工业研究基金(SINTEF)”资助高性能混凝土的研究。日本则在发展自密实免振混凝土方面取得了很大的成就。其初衷是为了消除混凝土振捣中的缺陷和增加混凝土的密实性,以改善混凝土的耐久性。

混凝土表面防护技术也是国际学术界重点研究的提高耐久性的措施之一。国际上自 1995 年起,每 3 年举办一次有关建筑物表面憎水处理的国际会议。

三、混凝土结构耐久性设计方法研究进展

除了耐久性混凝土材料研究外,混凝土结构耐久性设计方法也是各国研究的重点。部分科研成果已应用于工程实践并成为指导工程设计、施工、维护等的标准技术文件。

美国混凝土协会(ACI)437 委员会于 1991 年完成了“已有混凝土建筑抗力评估”的报告,提出了检测试验的详细方法和步骤。1998 年,美国国家标准与技术研究院、美国混凝土协会及美国材料试验学会(ASTM)共同主持召开了混凝土结构使用寿命和全寿命费用预测模型的研讨会,确定在美国混凝土协会使用寿命预测委员会的管辖下研究发展“标准模型”。

1989 年,日本土木工程学会混凝土委员会提出了以累积评分方法来估算混凝土结构使用寿命的耐久性设计技术文件《混凝土结构物耐久性设计准则(试行)》。针对不同类别的侵蚀作用,提出了材料性能劣化的理论或经验计算模型,并据此预测结构使用年限,已成为耐久性设计方法研究的主流。日本建筑学会于 1997 年通过修订规范,明确规定了结构物耐久使用年限和相应的混凝土最低强度。2000 年,日本建设省等部门共同提出了修订的建筑基准法,确定了各类结构物的使用年限。2002 年,日本土木工程学会新颁布的混凝土标准规范,专门列出了混凝土结构物耐久性复核的章节。

欧洲国家在这方面的研究更为活跃。设在欧洲的国际材料与结构试验研究实验室联合会(RILEM)、国际建筑和建设研究与创新理事会(CIB)、欧洲混凝土委员会(CEB)、国际预应力

混凝土协会(FIP)等学术团体的几个专业委员会都参与了这方面的研究。1989年,欧洲混凝土委员会发表了《混凝土耐久性结构设计指南》。1990年,欧洲混凝土结构模式规范(CEB-FIP)中有关“耐久性设计原则”(第一章)、“正常使用极限状态的验算”(第七章)及“耐久性”(第八章)的规定等内容就是以该指南为基础制定的。1996年,RILEM的130-CSL技术委员会提出了《混凝土结构的耐久性设计》的报告,对基于材料性能劣化计算模型的混凝土结构耐久性设计方法做了全面和系统的论述。1995年,欧共体资助了一项名为DuraCrete的研究项目,旨在发展以性能和可靠度分析为基础的混凝土结构耐久性设计方法,欧洲各国12个机构参加。这一项目于1999年结束,已经公布了名为DuraCrete的一套14本的研究成果报告,并在2000年出版了一份名为《耐久性设计与再设计指南》的技术文件。1998年,欧共体又资助成立了为期3年的DuraNet工作网,全名为“支持、发展与应用以性能为基础的混凝土结构耐久性设计与评估的工作网”,欧洲各国19个机构参与,旨在改善欧洲混凝土结构的耐久性设计、评估与维修水平。对于混凝土结构设计规范中的传统设计方法,在拟订的欧盟混凝土设计规范初稿中也做了重大的调整。

1991年12月,我国在天津成立了全国混凝土结构耐久性研究小组,并开始着手制定混凝土结构耐久性设计规范和标准,使混凝土结构耐久性研究朝系统化、规范化的方向迈进了一步。在2002年4月1日实施的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)中新增了耐久性规定,供设计人员在新建结构时参考。我国水工、港工、海工设计规范及《海港工程混凝土结构防腐技术规程》(JTJ 275—2000)、《工业建筑防腐蚀设计规范》(GB 50046—2008)中也对混凝土结构耐久性设计做了相关规定。在防止碱—集料反应方面,我国制定的砂、石料质量标准,特别是1993年《混凝土碱含量限值标准》(CECS53:93),对防止碱—集料反应而引起的混凝土开裂有着重大意义。国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008)自2009年5月1日起正式实施。该标准在对混凝土的原材料要求、结构工程服役环境类别、设计使用年限全面考虑的基础上,对混凝土结构的构造设计、保护层厚度、混凝土掺合料的应用技术以及施工工艺都给出明确的规定。

在对已有结构耐久性评估、病害诊治方面,发达国家的做法值得借鉴。如美国混凝土协会专门出版了《混凝土修补手册》,对结构的评估、修复等方面有详细的指南;德国钢筋混凝土协会出版了《混凝土构件保护和维修指南》;日本涂装工业协会出版了《混凝土土木构造的修补手册》。

第三节 混凝土桥梁耐久性研究热点问题

进入20世纪60年代,混凝土耐久性研究进入了一个高潮,并开始朝系统化、国际化方向发展。RILEM于1960年成立了混凝土中的钢筋腐蚀技术委员会(12-CRC),推动了混凝土结构耐久性研究的发展,使得混凝土结构正常使用的问题逐渐成为国际学术机构和国际学术会议讨论的重要课题之一。RILEM于1961年和1969年召开了国际混凝土结构耐久性学术会议;1970年在布拉格召开了第六届、第七届国际水泥化学会议;1974~1989年,每隔两年召开一次碱—集料反应国际学术会议;1978~1993年,连续六次召开了建筑材料与构件的耐久性国际学术会议;1984年在巴黎召开了题为“建筑与结构材料使用寿命预测中存在的问题”的专题讨论会。

国际桥梁与结构工程协会(IABSE)于1987年在巴黎召开了“混凝土的未来”国际学术会议,把耐久性放在一个非常突出的位置;1988年在丹麦召开了“混凝土结构的重新评估”国际学术会议;1989年葡萄牙和美国都举行了大规模的有关混凝土耐久性的国际学术会议;1991年美国 and 加拿大联合举行了第二届混凝土耐久性国际学术会议;IABSE于1993年在丹麦哥本哈根召开了结构残余能力国际学术会议;在香港、新加坡等地区也召开了一系列的国际学术会议,重点讨论结构的可靠性与耐久性问题;2001年IABSE代表RILEM、CIB、FIB、欧洲钢结构协会(ECCS)、国际结构安全度联合会(JCSS)、欧洲安全度和可靠度协会(ESRA)、土木工程风险性和可靠度协会(CERRA)在马耳他召开了“安全性、风险性与可靠性——工程中的趋势”国际学术会议。这些学术活动的开展大大加强了各国学术界之间的合作与交流,取得了显著的成果。

混凝土结构的耐久性研究涉及环境、材料和结构等诸多方面。目前,对混凝土桥梁耐久性主要从环境、材料、构件和结构四个层次开展研究。其中,材料和构件层次上的研究相对较为深入。

一、环境作用研究

混凝土结构所处环境可以划分为一般大气环境、海洋环境、土壤环境及工业环境等。环境中的侵蚀性介质通过各种途径进入混凝土内部,使混凝土和钢筋发生劣化,造成混凝土与钢筋的黏结性能降低,从而导致混凝土结构的承载力、适用性下降,最终影响整个结构的工作性能,使结构可能先于设计基准期而提前发生破坏。

根据引起混凝土结构耐久性损伤的原因,又可以将环境划分为一般环境、特殊环境及灾害环境。一般环境中的二氧化碳、环境温度与环境湿度、酸雨等将使混凝土中性化,并使其中的钢筋产生锈蚀,而环境温度与环境湿度等则是影响钢筋锈蚀的最主要因素;特殊环境中的酸、碱、盐是导致混凝土腐蚀破坏与钢筋锈蚀破坏的最主要原因,如沿海地区的盐害、寒冷地区的冻害、腐蚀性土壤及工业环境中的酸碱腐蚀等;灾害环境主要指地震、火灾等对结构造成的偶发损伤,这种损伤与环境损伤等因素共同作用,也将使结构性能随时间劣化。如果说结构承载能力极限状态设计是用来解决荷载作用效应与构件或结构承载能力的问题,那么耐久性设计则是用来解决环境作用效应与混凝土抵抗环境作用能力的问题。

混凝土碳化是混凝土中的碱与所处环境中的二氧化碳发生化学反应生成碳酸钙的过程,它使混凝土的碱性降低,从而失去对钢筋的保护作用。建于大气中的混凝土结构必然也处于二氧化碳之中,混凝土的碳化是不可避免的,这个问题在早期就被认识到了。衡量混凝土碳化的指标为碳化深度。已经有许多学者对混凝土碳化模型进行了广泛、深入的研究,并取得了很多成果。需要进一步研究的问题是,目前各种碳化模型基本没有考虑使用过程中相对湿度的周期变化以及干湿交替的影响,而只能固定一种湿度进行分析。不同模型给出的结果也有较大的差别。

氯离子引起钢筋锈蚀主要发生在海洋和近海环境以及冬季撒除冰盐的环境中。氯离子对混凝土结构的危害程度远远大于二氧化碳。在氯离子侵蚀下,钢筋一旦发生锈蚀,发展速度就会很快。由于氯离子侵蚀的广泛性和严重性,针对氯离子在混凝土材料中的传输和侵蚀性能,国内外做了许多有意义的研究工作。Ervin Poulsen认为外界氯离子侵入混凝土的传输方式主要有以下3种:①毛细管吸附作用;②渗透;③扩散。通常,氯离子侵蚀是多种传输方式的组