



桥梁病害诊断 与加固设计

QIAOLIANG BINGHAI
ZHENDUAN YU JIAGU SHEJI

张树仁 编著



人民交通出版社
China Communications Press

Qiaoliang Binghai Zhenduan yu Jiagu Sheji

桥梁病害诊断与加固设计

张树仁 编著

内 容 提 要

本书从桥梁带载加固必须考虑分阶段受力特点的基本观点出发,对现有桥梁加固方法的作用原理、关键技术、加固效果和适用范围进行综合评述分析,明确提出了积极倡导预应力主动加固的设计思想,重点介绍了体外预应力加固的构造和设计要点;在总结桥梁病害调查资料的基础上,针对我国公路常用中、小跨径桥梁的典型病害,给出了可供参考选择的加固设计建议,并附有计算例题和设计方案的评述分析。

本书对从事桥梁改造加固设计和科研人员有指导意义和实用价值,对从事桥梁施工、监理及管理工作人员也有参考价值,还可做桥梁工程专业研究生和本科生的教学辅导材料。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁病害诊断与加固设计 / 张树仁编著. — 北京 :
人民交通出版社, 2013.6

ISBN 978-7-114-10705-4

I. ①桥… II. ①张… III. ①钢筋混凝土桥 - 病害 -
诊断②钢筋混凝土桥 - 加固 IV. ①U448.337

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 121685 号

书 名: 桥梁病害诊断与加固设计

著 作 者: 张树仁

责任编辑: 刘永芬

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.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)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: 720 × 960 1/16

印 张: 17.75

字 数: 300 千

版 次: 2013 年 9 月 第 1 版

印 次: 2013 年 9 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10705-4

定 价: 48.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

桥梁是架起来的路,飞越深沟峡谷、横跨江河湖海,使“天堑变通途”。

过去的30年,我国开展了全球最大规模的桥梁建设。1980年底我国公路桥梁总数130 003座,合计总长3 686 111延米;2011年底桥梁总数已达658 126座,合计长度30 483 094延米。换句话说,30年间每年平均新建桥梁17 604座(计893 233延米长)。国家高等级公路网络的完善,支撑起国民经济的持续快速发展,也便利了老百姓的出行。

另一方面,如此大量的新建桥梁投入使用带来了养护管理的繁重任务。大规模建设中建设队伍技术素质参差不齐、管理粗放、合理工期得不到保证等现象,导致了一些工程过早地出现“病变”。例如:混凝土劣化、钢线材腐蚀、构造细部与附属设施病害等质量通病。与此同时,“大交通量、超重载车、高速行驶”的新形势,对桥梁安全服务造成了新的威胁。此外,20世纪80年代以前修建的较低荷载标准的桥梁工程(约占现有桥梁总数量的1/4.5和总长度的1/7)还面对着承载能力的严峻考验。

对现役桥梁承载能力的评估和病桥加固与危桥改造是安全运营管理的重要任务。“十一五”期间全国共改造了危桥11 296座,“十二五”期末,力争基本完成国、省、县、乡公路上的中桥、大桥、特大桥梁的危桥改造任务。受需求的拉动,当前从事桥梁检测和维修加固的企业越来越多。

众所周知,有如给人查体、看病、下药和治疗一样,庸医害人,而名医凭借丰富的实践经验和高超的技能对症下药、治病救人。桥梁病害诊断和改造、加固设计是一项高技术含量的工作,直接关系到加固工程的质量和有效服务,是一项涉及桥梁养管成本和效益的大事。

张树仁教授是桥梁病害诊断与改造加固领域的资深专家。几十年来,他孜孜不倦地开展理论研究、教学实践和桥梁改造实践,成果卓著。这本不断充实新内容编著完成的《桥梁病害诊断与加固设计》是一部针对性、科学性、实用性



很强的技术专著,是一本提高桥梁养护管理队伍整体技术素质的极好教材。本书的出版将有助于提升桥梁养护管理工作的品质。

架桥铺路,造福社会。在建设桥梁的同时,加强学习,转变桥梁工程建养管发展方式,促进桥梁工程的可持续发展,将是我们面临的共同任务。

交通运输部原总工程师

2013年8月

前言

笔者编著的《桥梁病害诊断与改造加固设计》已使用5年多了。这几年我国桥梁加固事业发展很快,加固设计理念和加固技术取得了突破性的进步。笔者提出的“坚持桥梁带载加固必须考虑分阶段受力特点的基本观点,从解决后加补强材料应变滞后,提高材料利用效率的根本目的出发,积极倡导预应力主动加固技术的推广应用”的桥梁加固设计思想,已逐渐被同行专家所认同,并在多座桥梁加固工程中应用。就全国范围而言,已有越来越多的从事桥梁维修加固设计与施工的工程技术人员和管理工作者,从“不分加固性质,盲目乱贴碳纤维布”的桥梁加固误区解脱出来,在认真思考和积极实践“预应力主动加固技术”设计思想的真实含义和实用价值,这是我国桥梁加固事业逐步走向理性化的良好开端。

近5年来,笔者参与了北京市和辽宁省的桥梁病害调查分析和桥梁加固设计指南的编制工作,开展了有黏结预应力加固技术应用研究,参与指导了多座桥梁加固设计与施工,进行了多次讲学、桥梁加固方案评审和咨询工作。其间我收到了很多读者通过函电或直接交流方式提出的有关桥梁病害诊断和加固设计与施工等方面的疑难问题的咨询意见和建议。广大读者勇于思考的探索精神,激励和启发我去认真思考自己所写的东西还有哪些不足,萌生了要对原著进行修改补充的想法,以答谢广大读者的信任和关怀。

全书共分8章,主要修改特点是:

(1)从桥梁加固设计的实际需要出发,对混凝土桥梁结构的病害诊断和裂缝分析作了较为系统的介绍。简述病害破坏机理,突出病害破坏特征及危害分析,以提高读者对桥梁病害的诊断分析能力。裂缝是反映混凝土结构病害的晴雨表,裂缝分析是桥梁养护、管理和维修加固工程师的基本功。书中详细介绍了裂缝的成因和分类,突出强调不同裂缝的分布特征,并选取若干工程实例,从结构构造、受力特征、材料性能、施工和养护维修等方面,对裂缝成因及危害进行综合分析,以提高读者的裂缝分析能力。

(2)分清加固性质,科学地选择加固方法是桥梁加固方案设计的核心。本



书从桥梁带载加固必须考虑分阶段受力特点的基本观点出发,对现有桥梁加固方法从作用原理、关键技术、加固效果和适用范围等方面进行了评述分析,以提高读者桥梁加固方案设计能力。

对目前仍较为普遍采用的直接粘贴碳纤维布(板)的被动加固方案从作用原理上作了量化分析,提出了“分清加固性质,明确加固目的,在弄清加固作用机理的基础上,有针对性地合理应用高强复合纤维材料”的新建议。

针对桥梁加固后加补强材料应变(应力)滞后的“先天不足”,对预应力加固技术在桥梁加固中的应用的必要性进行了充分有说服力的论证分析,明确提出了“正截面抗弯加固要加预应力,斜截面抗剪加固更要加预应力”的新思想。

(3)体外预应力加固是笔者倡导的主动加固方法之一,特别适用于大跨径预应力混凝土连续箱梁桥和连续T构箱梁桥的加固。本书对体外预应力加固的关键技术——后增设的体外预应力筋(束)的锚固和转向装置的构造作了较为详细的介绍。从加固设计工作实际需要出发,对体外预应力加固设计的特点和实用计算方法作了较为详尽的论述分析。体外预应力加固结构是一个带柔性拉杆的内部(或内、外部)超静定混合体系,这种体系的最大特点是预应力筋与梁体混凝土之间无黏结。书中对由此而引发的体外预应力加固结构设计两个特殊问题[体外预应力筋(束)极限应力的合理取值和活载作用下体外预应力筋应力增量计算],从概念上作了较为详尽的论述分析。在此基础上参照《公路钢筋混凝土与预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)的有关规定,详细介绍了体外预应力加固构件的承载能力极限状态计算、正常使用极限状态计算和使用阶段应力验算的有关公式与实用计算方法。

(4)有黏结预应力加固体系是笔者提出并积极倡导的预应力主动加固的新结构构思,以其预应力筋锚固简单、张拉施工方便和结构耐久性高的综合技术经济优势,特别适用于中、小跨径钢筋混凝土及预应力混凝土桥的加固。本书用较大篇幅详细介绍了有黏结预应力加固的构造、关键技术和设计与计算问题,并附有设计例题。书中介绍了笔者开展的《有黏结预应力斜截面抗剪加固试验研究》研究成果,该项试验的最大特点是采用带载加固,模拟桥梁加固构件的实际受力情况。书中还详细介绍了笔者于2010年提出《横向张拉环氧涂层钢筋有黏结预应力加固关键技术》研究成果(该项技术已申报国家专利)。横向张拉环氧涂层钢筋有黏结预应力加固技术是有黏结预应力加固设计思想的

新突破,其核心内容是采用具有防腐保护的环氧涂层钢筋替代钢绞线或普通热轧钢筋做预应力筋,这样可降低对后喷的复合砂浆的抗裂性要求,以抗拉强度相对较低的复合砂浆(或混凝土)替代价格昂贵的高性能复合砂浆(或聚合砂浆),使加固成本大幅度降低。书中对横向张拉环氧涂层钢筋有黏结预应力加固的关键技术作了详细的论述和分析。

(5)笔者在总结分析辽宁省桥梁加固工程实践经验的基础上,提出了“多跨简支梁(板)桥的简支转连续加固特别适用于公路网改造的桥梁提载加固”的新建议。书中对多跨简支梁(板)桥的简支转连续加固的工作原理、构造要点和设计与计算特点作了较为详细的介绍。对简支转连续加固的关键技术——中间支点墩顶连续段承受负弯矩的钢筋设置,进行了多方案对比分析,首次提出了将横向张拉环氧涂层有黏结预应力加固技术用于简支转连续加固的新建议。这样,可以大大简化墩顶连续段预应力筋的锚固构造,张拉施工更为方便,将会进一步提高简支转连续加固方案的竞争力。

(6)本书在总结北京市和辽宁省公路桥梁病害调查资料的基础上,对我国公路常用中、小跨径主要桥型桥梁的典型病害进行了较为系统的分析,给出了可供参考选择的加固设计建议,对设计者合理地选择加固方法,制定加固设计方案具有参考价值。

本书的出版要特别感谢交通运输部原总工程师凤懋润先生对《桥梁病害诊断与加固设计》编写工作的指导、重视与支持,并在百忙之中亲自为本书作序。

北京捷路通科技公司、北京市政工程质量监督站、辽宁大通公路工程科技有限公司、河北省道路桥梁养护检测中心和山西交通科学研究院桥梁与道隧加固公司等单位为本书的编写提供了宝贵的检测与加固设计资料,感谢他们的大力支持。本书的出版立项得到人民交通出版社韩敏总编辑、张征宇主任的大力支持,刘永芬编辑为本书的出版做了大量的工作,对编辑人员为本书出版的辛勤付出表示衷心的感谢。

由于笔者理论水平有限,实际工程经验不足,书中难免有不妥和疏漏之处,敬请读者批评指正。

张树仁
2013年8月于北京

目 录

第一章 混凝土结构损伤与裂缝分析	1
第一节 环境因素引起的混凝土结构损伤	1
一、混凝土结构碳化	1
二、氯离子侵蚀	3
三、混凝土碱集料反应	6
四、混凝土集料膨胀反应	9
五、混凝土的冻害破坏	9
六、钢筋锈蚀	12
第二节 混凝土结构裂缝分析	17
一、混凝土结构裂缝类型和成因	17
二、裂缝对混凝土耐久性的影响	23
三、混凝土结构典型裂缝实例分析	23
第二章 桥梁结构的承载力及耐久性评估	29
第一节 基于规范(或标准)的综合评估方法	29
一、基于桥梁养护规范的综合评估方法	29
二、基于公路桥梁技术状况评定标准的综合评估方法	31
第二节 基于检测结果以检算分析为主的承载力评估方法	34
一、旧桥承载力检算基本公式	34
二、基于检测结果的旧桥检算系数 Z_1	35
三、基于检测结果的承载力恶化系数 ξ_e	38
四、基于检测结果的截面折减系数(ξ_c 、 ξ_s)	39
五、基于荷载试验的承载力检算系数 Z_2	41
第三节 考虑钢筋腐蚀影响的承载能力评估方法	42
一、钢筋腐蚀对结构承载力的影响	42
二、考虑钢筋腐蚀影响的承载力计算	44
第四节 结构耐久性评估的概念	46
一、耐久性综合评定	47
二、剩余使用寿命预测	47
第五节 混凝土结构耐久性综合评估	47



一、影响结构耐久性的指标评定	48
二、混凝土桥梁结构耐久性综合评价方法	57
第六节 混凝土中钢筋腐蚀量估算和腐蚀特征时间预测	59
一、混凝土中钢筋开始腐蚀时间的确定	59
二、混凝土保护层锈胀开裂前钢筋腐蚀量的估算	62
三、混凝土保护层锈胀开裂时间的确定	64
四、混凝土保护层锈胀开裂后的钢筋腐蚀量预测	65
第七节 混凝土结构使用寿命评估	66
一、结构寿命的定义	66
二、混凝土结构使用寿命的评估准则	66
三、在役混凝土结构剩余寿命评估	69
第三章 桥梁加固方法综合评述分析	73
第一节 桥梁加固设计的特点及设计原则	73
一、桥梁加固设计的特点	73
二、桥梁加固设计的原则	75
第二节 间接加固方法评述分析	76
一、增加斜撑加固法	76
二、简支转连续加固法	77
三、增设(或更换)大边梁加固法	78
四、斜拉索结构加固法	80
第三节 直接加固作用原理及受力特点分析	82
一、直接加筋类被动加固	82
二、预应力主动加固	83
第四节 粘贴钢板加固法评述分析	83
一、粘贴钢板加固法施工的关键技术	83
二、粘贴钢板加固效果分析	84
第五节 粘贴高强纤维复合材料加固法评述分析	85
一、直接粘贴高强纤维复合材料加固效果分析	85
二、缠绕粘贴高强纤维复合材料加固效果分析	86
第六节 加大截面加固法评述分析	87
一、加大截面加固构件的受力特点	87
二、加大截面加固法的应用及加固效果分析	87
第七节 预应力主动加固法评述分析	89

一、体外预应力加固	89
二、高强复合纤维预应力加固	90
三、有黏结预应力加固	91
第八节 积极推广水泥基渗透结晶型防水材料是提高混凝土结构耐久性的 重要措施	92
一、水泥基渗透结晶型防水材料的作用机理及性能特点	92
二、水泥基渗透结晶型防水材料在桥梁加固工程中的应用	94
第四章 直接加筋类被动加固构件设计与计算	98
第一节 直接加筋类加固受弯构件承载力极限状态计算	98
一、正截面抗弯承载力计算	98
二、斜截面抗剪承载力计算	102
三、加固设计例题分析	104
第二节 压区加混凝土类加固受弯构件正截面抗弯承载力计算	113
一、正截面抗弯承载力计算	113
二、新、旧混凝土结合面抗剪承载力计算	114
第三节 桥梁加固偏心受压构件承载力计算	115
一、偏心受压构件加固设计特点	115
二、加固偏心受压构件正截面承载力计算基本方程式	116
三、加固偏心受压构件的实用设计方法	119
第四节 桥梁加固构件弹性分析容许应力设计法	121
一、弹性分析容许应力设计法的基本原理	121
二、桥梁加固受弯构件弹性分析计算基本公式	122
三、正截面应力计算基本方程	125
四、加固配筋设计方法和计算步骤	125
第五章 体外预应力加固设计与计算	128
第一节 体外预应力加固的一般构造	128
一、体外预应力筋的布置形式	128
二、体外预应力筋的锚固与转向	130
三、横向张拉在体外预应力加固中的应用	134
第二节 体外预应力加固结构的受力和设计特点	136
第三节 体外预应力加固受弯构件承载力计算	137
一、体外预应力筋(束)极限应力的合理取值	137
二、体外预应力加固受弯构件承载能力极限状态计算	139



第四节 体外预应力加固受弯构件正常使用极限状态计算	141
一、正常使用极限状态计算的特点	141
二、活载作用下体外预应力筋应力增量计算	141
三、正截面抗裂性验算	142
四、斜截面抗裂性验算	144
五、部分预应力混凝土 B 类构件的裂缝宽度计算	146
六、体外预应力加固构件的变形计算	147
第五节 体外预应力加固受弯构件使用阶段应力验算	149
一、正截面应力验算	150
二、斜截面主压应力验算	152
第六节 体外预应力加固预应力混凝土梁设计计算的特殊问题	153
第六章 有黏结预应力加固设计与计算	155
第一节 有黏结预应力加固的构造和关键技术	155
一、有黏结预应力加固的构造	155
二、有黏结预应力加固关键技术	156
第二节 有黏结预应力加固试验研究	160
一、试验方案设计	160
二、试验与资料整理	164
三、试验结果分析	167
四、工程应用情况	170
第三节 横向张拉环氧涂层钢筋有黏结预应力加固技术的研制与开发	171
一、横向张拉环氧涂层钢筋有黏结预应力加固关键技术	171
二、横向张拉环氧涂层钢筋有黏结预应力加固技术的应用	172
第四节 有黏结预应力加固受弯构件正截面设计与计算	176
一、有黏结预应力加固体系的设计特点	176
二、有黏结预应力加固受弯构件正截面承载力计算	176
三、有黏结预应力加固受弯构件正常使用极限状态计算	180
四、有黏结预应力加固受弯构件使用阶段应力验算	183
五、有黏结预应力加固设计例题分析	186
第五节 有黏结预应力加固受弯构件斜截面设计与计算	198
一、有黏结预应力加固斜截面抗剪承载力计算	198
二、有黏结预应力加固斜截面抗裂性验算	201
三、有黏结预应力加固斜截面使用阶段的主压应力验算	203

第七章 简支转连续加固设计与计算	205
第一节 简支转连续加固法的作用原理	205
第二节 简支转连续加固的构造要点	206
一、中间支点墩顶连续段钢筋布置方案	206
二、中间支点相邻跨梁端整体化构造	211
三、体系转换及单、双支座的选择	211
四、墩顶连续段腹板(梁肋)加宽处理	211
五、后加混凝土层的构造	212
第三节 简支转连续加固设计与计算特点	214
一、简支转连续加固的内力计算及荷载效应组合	214
二、承载力能力极限状态计算	215
第八章 中、小跨径桥梁病害分析与加固设计建议	217
第一节 中、小跨径实心板梁桥病害分析与加固设计建议	217
一、实心板梁桥的病害分析	217
二、实心板梁桥的加固设计建议	218
第二节 中、小跨径空心板梁桥病害分析与加固设计建议	221
一、空心板梁桥的病害分析	221
二、空心板梁桥加固设计思想和加固方法选择	224
三、空心板梁桥加固设计案例分析	229
第三节 T形简支梁桥的病害分析与加固设计建议	232
一、T形简支梁桥的病害分析	232
二、T形简支梁桥加固设计思想和加固方法选择	235
第四节 石拱桥的病害分析与维修加固设计建议	240
一、石拱桥的病害分析	241
二、石拱桥的维修	243
三、石拱桥加固设计建议	244
第五节 双曲拱桥病害分析与加固设计建议	249
一、双曲拱桥的病害分析	249
二、双曲拱桥加固设计建议	251
第六节 桥梁墩台和基础的病害分析与维修加固设计建议	255
一、桥梁墩台和基础的病害分析	255
二、桥梁墩(台)和基础的维修加固设计建议	256
参考文献	264

第一章 混凝土结构损伤与裂缝分析

桥梁病害诊断是对其进行加固改造的前提,只有诊断清楚才能“对症下药”,结构损伤分析是进行桥梁病害诊断的“病理学”基础。

在役桥梁结构,随着使用时间的延续,使用条件变化、环境侵蚀等因素的影响,加之设计和施工不当,使材料不断老化,甚至造成结构损伤,这是一个不可逆的过程。随着损伤的累积,逐步导致结构性能劣化、承载力下降和耐久性降低。

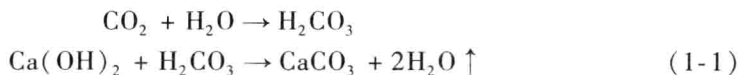
外界环境因素对桥梁混凝土结构侵蚀,使混凝土结构发生物理化学变化,从而引起其损伤或破坏,其主要表现有:混凝土碳化、氯离子侵蚀、碱集料反应、冻融破坏和钢筋腐蚀等。

实践表明,桥梁混凝土结构的任何损伤与破坏,首先表现为混凝土出现裂缝。可以说,裂缝是反映混凝土结构病害的晴雨表。所以,对桥梁病害的诊断,首先应从对混凝土结构裂缝调查、检测与分析入手。

第一节 环境因素引起的混凝土结构损伤

一、混凝土结构碳化

混凝土碳化是指混凝土中的氢氧化钙 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ 与渗透进混凝土中的二氧化碳(CO_2)或其他酸性气体发生化学反应的过程。混凝土碳化可用下列化学式表示:



碳化的实质是混凝土的中性化。水泥在水化过程中生成大量的氢氧化钙,使混凝土内部的孔隙中充满了饱和氢氧化钙溶液,其 pH 值为 12 ~ 13。在这样高的碱性环境里,埋置在其中的钢筋容易发生钝化作用,使钢筋表面生成一层难溶的三氧化二铁(Fe_2O_3)和四氧化三铁(Fe_3O_4),通常称为钝化膜。它能够阻止混凝土中钢筋的腐蚀。当有二氧化碳和水气从表面通过孔隙进入混凝土内部时,将和混凝土中

的碱性物质发生中和反应,导致混凝土的碱性(pH 值)降低。当 pH 值小于 9 时,埋置在混凝土中的钢筋表面的钝化膜被逐渐破坏,在水分和其他有害介质侵入的情况下,钢筋就会发生腐蚀(图 1-1)。

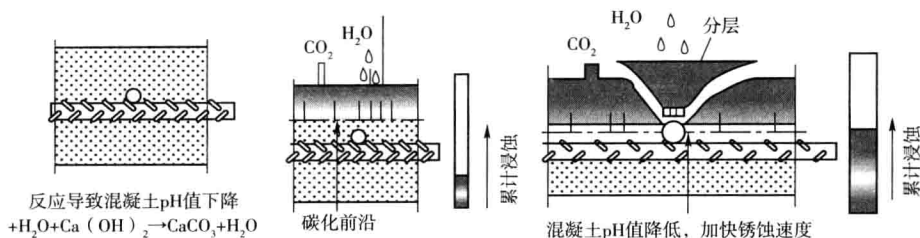


图 1-1 混凝土碳化过程示意图^[19]

处于自然环境里的混凝土桥梁,由于空气中 CO_2 的浓度很低,一般情况下,其体积浓度约为 0.03%,因而混凝土碳化的发展是一个非常缓慢而又漫长的过程。其碳化速度取决于 CO_2 气体的扩散速度和 CO_2 与混凝土成分的反应速度。在混凝土碳化初期, CO_2 与水生成碳酸气(H_2CO_3),它在混凝土中扩散和反应速度很快,即碳化深度增长快,但是随着时间的延长则逐步衰减,其变化规律如图 1-2 所示。

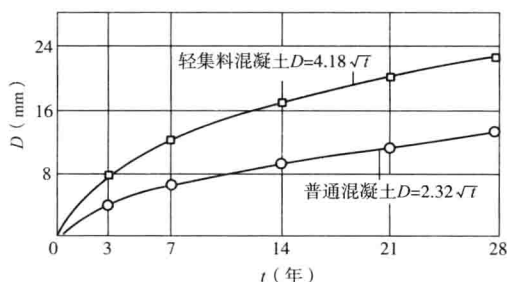


图 1-2 混凝土碳化特征曲线

国内外大量的研究资料表明,在非侵蚀性介质的正常大气条件下,混凝土碳化特征曲线可用幂函数方程表示

$$D = k\sqrt{t} \quad (1-2)$$

式中: D ——混凝土碳化深度(mm);

t ——混凝土碳化龄期(年);

k ——碳化速度系数。

式(1-2)中系数 k 是反映碳化速度的综合参数。影响碳化速度的最主要因素是:

混凝土本身的密实性和碱性储备的多少,即混凝土的渗透性和氢氧化钙 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性物质含量的多少。一般认为,混凝土孔隙率越小,渗透性越差;密实性越好、氢氧化钙 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量越大,则混凝土的抗碳化性能就越好;反之,则越差。

影响混凝土密实性和碱性储备的因素十分复杂,除了受周围环境因素(例如:相对湿度、温度、压力及 CO_2 浓度)和施工因素(混凝土搅拌、振捣和养护条件)的影响外,主要与混凝土的材料成分有关。

在桥梁检测工作中,混凝土碳化深度是检测的重要内容之一,通常采用在混凝土表面点滴1%的酚酞溶液的方法测试,未碳化的混凝土与酚酞液反应呈粉红色。从理论上讲,可通过对使用若干年后结构大量的实测碳化深度的统计分析,推算钢筋的混凝土保护层完全(或部分)碳化的时间,预测钢筋可能产生腐蚀的时间,为结构的耐久性评估提供必要的参考资料。

例如:某一钢筋混凝土桥,使用16年后实测混凝土碳化深度为20mm,若保护层厚度分别为30mm和40mm,可按下述方法求得保护层完全碳化,钢筋可能开始腐蚀的剩余使用寿命。

首先,根据使用16年后实测混凝土碳化深度为20mm,由式(1-2)求碳化速度系数 $k = 20 / \sqrt{16} = 5$ 。

保护层厚度30mm完全碳化所需的时间为 $t = (30/5)^2 = 36$ 年,剩余使用寿命为 $T = 36 - 16 = 20$ 年。

保护层厚度40mm完全碳化所需的时间为 $t = (40/5)^2 = 64$ 年,剩余使用寿命为 $T = 64 - 16 = 48$ 年。

应该指出:根据实测的碳化深度,推算结构剩余使用寿命的方法,从理论上讲是可行的,其计算结果的可靠性取决于式(1-2)的适用性和实测混凝土碳化深度的代表性。剩余使用寿命的预测,涉及多种影响因素,是一个极其复杂的问题。因此式(1-2)对实际工程的适用性,还需要通过大量工程实测资料验证,如何考虑裂缝对混凝土碳化深度和结构耐久性影响的量化分析,还是一个尚未解决的研究课题。对实际工程而言,上述“单纯根据实测碳化深度推算结构剩余使用寿命”的方法,考虑问题过于简单,预测结果只能作为结构的耐久性评估的参考,不能作为定量分析的依据。

二、氯离子侵蚀

一般认为,混凝土是一种耐久性较好的建筑材料。但是在化学侵蚀介质的作用下,它保持自身的能力却是较差。对于桥梁及港工结构,最危险的化学侵蚀是氯

离子的侵蚀。

1. 氯离子存在的广泛性

硅酸盐水泥本身只含有少量的氯化物。若在混凝土拌制时加入了含氯化物的减水剂,掺入用海水淬冷的高炉矿渣,或使用海水排湿的粉煤灰等,均可能会使混凝土含有相当多的氯化物。然而,就大多数情况而言,氯化物对混凝土结构的侵蚀,主要是氯离子从外界环境侵入已硬化的混凝土所造成的。

海水是氯离子的主要来源,海水中通常含有 3% 的盐,其中主要是氯离子。海风、海雾中也含有氯离子,海砂中更含有一定量的氯离子。我国的海岸线长,大规模基本建设多集中在沿海地区,尤其是海洋工程,如码头、护坡和防护堤等,由氯离子侵蚀引起的钢筋腐蚀破坏是十分突出的。同时,沿海地区已经出现河砂匮乏的情况,不经技术处理就使用海砂的现象日趋严重。国内、外的工程经验和教训表明,海水、海风和海雾中的氯离子和不合理地使用海砂是影响混凝土结构耐久性的重要原因之一。

近半个世纪以来,各国公路交通发展迅猛,为了保证交通畅通,大量使用氯化钠、氯化钙融雪除冰,使得氯离子渗透到混凝土之中,引起钢筋腐蚀破坏的工程实例是很普遍的。

另外,我国有一定数量的盐湖和大面积的盐碱地。沿海地区的盐碱地多以含氯离子为主;内陆地区的盐碱地有的以含氯离子为主,有的则以含硫酸为主,多数情况是含混合盐。这些地区的混凝土结构都会受到很强的腐蚀。

2. 氯离子对混凝土结构的危害

氯离子对混凝土结构的危害是多方面的,但是最终表现为钢筋的腐蚀。我国早期修建的港工和桥梁结构,混凝土强度等级低、抗渗性能差,氯化物造成的钢筋腐蚀破坏的情况触目惊心。混凝土遭受氯化物的侵蚀,形成大量可溶性盐类,并在混凝土的孔隙和毛细孔中反复积聚,引起膨胀性反应,使混凝土的孔隙加大,导致裂缝发生;而裂缝的发生又开通了氯化物渗入混凝土内部的通道,进一步加快了对钢筋的腐蚀。久而久之,随着钢筋腐蚀,出现锈胀裂缝,又会进一步加大氯离子侵入混凝土内部的通道,加剧氯化物对钢筋腐蚀,如此恶性循环,最终造成钢筋的严重腐蚀破坏。图 1-3 示出了氯离子渗入混凝土内部的途径,并对其进行腐蚀过程,以及导致其破坏的机理^[19]。

对于桥梁结构,特别是沿海地区的城市立交桥,海洋环境腐蚀融雪、除冰盐的氯化物侵蚀,已严重威胁着混凝土结构耐久性,造成了巨大的损失,应当引起设计、施工及养护管理部门足够重视。