

HUNNINGTU QIAOLIANG NAIJIUXING YU BIAOZHUNHUA SHIGONG

混凝土桥梁

耐久性与标准化施工

李清富 郑连群 靳九贵 戚佳飞 张 铎 编著



黄河水利出版社

混凝土桥梁耐久性与标准化施工

李清富 郑连群 靳九贵 戚佳飞 张 铎 编著

黄河水利出版社

· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书系统地分析了混凝土桥梁耐久性病害成因及各种因素对桥梁耐久性的作用机制,依据弹塑性力学理论和断裂力学理论建立了钢筋混凝土临界锈胀力计算模型,给出了混凝土桥梁耐久性病害防治的对策和建议;通过大量试验,系统地研究了粉煤灰、硅粉、纤维等分别在“单掺”和“混掺”情况下对高性能混凝土材料性能的影响规律,推荐了不同掺和条件下各掺和料的合理掺和比例;提出了提高混凝土桥梁耐久性的主要技术参数和构造措施,提出了混凝土桥梁施工参数控制的工序能力控制法、灰色预测控制法和灰色神经网络预测控制法等;将桥梁标准化施工与桥梁的耐久性要求有机结合,形成了满足桥梁耐久性要求的混凝土桥梁标准化施工技术,为耐久性混凝土桥梁的建设提供了重要的技术保障。

本书可供从事桥梁工程建设行业的工程技术人员和研究人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土桥梁耐久性与标准化施工/李清富等编著. —郑州:黄河水利出版社,2017. 11

ISBN 978 - 7 - 5509 - 1913 - 6

I. ①混… II. ①李… III. ①钢筋混凝土桥 - 耐用性②钢筋混凝土桥 - 桥梁施工 - 标准化管理 IV. ①U448. 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 300645 号

组稿编辑:王路平 电话:0371 - 66022212 E-mail:hhsllwlp@126.com

出版社:黄河水利出版社

网址:www.yrcp.com

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:虎彩印艺股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:16

字数:370 千字

版次:2017 年 11 月第 1 版

印次:2017 年 11 月第 1 次印刷

定价:48.00 元

前 言

经过近几十年的快速发展,我国桥梁的数量急剧增加。但其中有不少桥梁已经出现了不同程度的病害,更有一些桥梁在远没有达到预期使用寿命时,就出现耐久性严重退化的现象,甚至发生倒塌等毁灭性事故。引起桥梁病害、降低桥梁使用寿命的原因是多方面的,但最根本的原因在于设计和施工不合理。改善设计和施工水平,提高桥梁的使用寿命和耐久性将是 21 世纪桥梁建设面临的重要技术问题。

公路混凝土桥梁的耐久性设计、耐久性施工及后期的检测与维护是提高桥梁耐久性的三个主要方面。对已有的公路混凝土桥梁进行科学的耐久性检测、评定,采取正确的处理措施进行维护,在材料、结构和构件方面对新建项目进行耐久性设计,对耐久性施工关键技术进行研究,在一些构造细节上给予足够重视,充分提高施工质量等,均对提高公路混凝土桥梁的耐久性具有重要意义。其中,在施工阶段,树立耐久性施工理念,严格按照耐久性要求进行标准化施工,确保施工质量,可以起到事半功倍的效果。

本书以混凝土桥梁施工过程为主线,将桥梁耐久性与桥梁施工有机结合,开展了混凝土桥梁耐久性与标准化施工技术的系统研究。全书共分为 6 章,主要包括:较为系统地分析了环境因素、人为因素、自然灾害等对桥梁耐久性影响的机制及其后果,对混凝土桥梁工程中最具代表性的钢筋锈蚀和裂缝病害、桥面铺装病害,以及伸缩缝病害等的成因、影响因素和病害防治对策进行了详细的阐述,并分别依据弹塑性力学理论和断裂力学理论推导出了钢筋混凝土的临界锈胀力计算公式;提出了从混凝土材料品质、桥梁施工过程控制、桥梁构造体系等方面提高混凝土桥梁耐久性的措施,以及防止混凝土桥梁劣化的其他措施;针对耐久桥梁主体结构采用高性能混凝土的实际,研究了粉煤灰、硅粉、纤维等分别在“单掺”和“混掺”情况下对高性能混凝土耐久性的影响规律,推荐了不同掺和条件下各掺和料的合理掺和比例,为高性能混凝土在桥梁工程中的推广应用提供了技术支持;标准化施工作为提高桥梁耐久性最直接和最重要的技术举措,本书系统地论述了从桥梁施工准备、桥梁施工通用技术、桥梁基础施工、桥梁下部结构施工、桥梁上部构造施工、桥面整体化及调平层施工,以及桥梁附属工程施工的标准化施工流程和施工工艺,并在实际混凝土桥梁工程施工中进行了应用,取得了显著效果,为混凝土耐久桥梁的建设提供了技术保障。

本书在编写过程中得到了河南省交通运输厅、河南省南林高速公路南乐段建设有限公司、河南省德商高速公路建设有限公司和郑州大学等单位的大力支持与帮助,许多同志

参与了本书研究内容的调研、试验、数据整理和工程应用工作。另外,本书在编写过程中还引用了大量的文献资料。在此,谨向为本书完成提供支持和帮助的单位、参考文献的作者及所有参与人员表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中尚有许多不妥之处,敬请各界读者朋友批评指正。

作 者

2017 年 7 月于郑州

目 录

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 研究的背景与意义	(1)
1.2 国内外研究现状与发展趋势分析	(2)
1.3 目前混凝土桥梁耐久性研究存在的主要问题	(6)
1.4 本书主要开展的研究工作	(7)
第2章 混凝土桥梁结构耐久性损伤机制研究	(8)
2.1 引 言	(8)
2.2 公路混凝土桥梁结构常见耐久性病害形式	(8)
2.3 影响混凝土桥梁结构耐久性的因素与耐久性损伤机制分析	(9)
2.4 混凝土桥梁常见耐久性病害分析	(20)
2.5 本章小结	(35)
第3章 混凝土桥梁耐久性技术参数与构造	(37)
3.1 引 言	(37)
3.2 桥梁工作环境条件与环境作用等级	(37)
3.3 桥梁结构材料的耐久性质量要求	(38)
3.4 桥梁结构耐久性构造	(41)
3.5 桥梁结构构件的可检性、可修性和可替换性	(44)
3.6 后张法预应力混凝土桥梁结构的耐久性构造	(45)
3.7 耐久性混凝土桥梁的施工控制	(47)
3.8 防止混凝土桥梁结构劣化的其他措施	(75)
3.9 本章小结	(79)
第4章 桥梁用高性能混凝土的耐久性	(80)
4.1 高性能混凝土的含义	(80)
4.2 高性能混凝土的制备	(81)
4.3 高性能混凝土的工作性	(87)
4.4 高性能混凝土的基本力学性能	(92)
4.5 高性能混凝土的断裂性能	(104)
4.6 高性能混凝土的耐久性	(115)
4.7 本章小结	(133)
第5章 基于耐久性的混凝土桥梁标准化施工技术	(135)
5.1 引 言	(135)

5.2	桥梁标准化施工一般要求	(135)
5.3	工程应用	(194)
5.4	本章小结	(240)
第6章	结论与展望	(241)
6.1	研究的主要结论	(241)
6.2	研究展望	(244)
参考文献		(245)

第1章 绪论

1.1 研究的背景与意义

经过近几十年的快速发展,我国桥梁的数量急剧增加。但其中有不少桥梁已经出现了不同程度的病害,更有一些桥梁在远没有达到预期使用寿命时,就出现耐久性严重退化的现象,甚至发生倒塌等毁灭性事故。引起桥梁病害、降低桥梁使用寿命的原因是多方面的,但最根本的原因在于设计和施工不合理。我国目前的桥梁设计中存在着设计标准偏低、结构和构造细节不合理、材料选择不当、设计考虑不周等问题,再加上施工质量差、管理制度不完善、后期检测维护不规范,很容易导致桥梁事故,给国家的经济建设带来较大的经济损失与负面影响,甚至造成严重的社会后果。因此,改善设计和施工水平,提高桥梁的使用寿命和耐久性将是21世纪桥梁建设亟待解决的重要技术问题。

公路混凝土桥梁的耐久性设计、耐久性施工及后期的检测与维护是提高桥梁耐久性的三个主要方面。对已有的公路混凝土桥梁进行科学的耐久性检测、评定,采取正确的处理措施进行维护,在材料、结构和构件方面对新建项目进行耐久性设计,对耐久性施工关键技术进行研究,在一些构造细节上给予足够重视,充分提高施工质量等,均对提高公路混凝土桥梁的耐久性具有重要意义。其中,在施工阶段,树立耐久性施工理念,严格按照耐久性要求进行标准化施工,确保施工质量,可以起到事半功倍的效果。

工程建设标准化是我国社会主义现代化建设的一项重要基础工作,是组织现代化建设的重要手段,是对现代化建设实行科学管理的重要组成部分。只有实施标准化的施工管理与施工技术,才能建立和维护正常的生产与工作秩序、保证各工序的工作质量,从而大幅度提高工程建设水平。同时,积极推行工程建设标准化,对规范建设市场行为,促进建设工程技术进步,保证工程质量,加快建设进度,节约土地、原材料、能源和水资源,合理使用建设资金,保护人身健康和人们生命财产安全,提高投资效益都具有重要作用。施工流程标准化是建筑行业发展必由之路,特别是在当前基础设施建设高起点、大规模发展的形势下,必须大力推进施工关键技术标准化,确保项目“安全、质量、效益”目标的全面实现,促进企业健康发展、科学发展和可持续发展。

目前,我国的交通运输事业正处于快速和稳步发展时期,高速公路网四通八达,总里程已跃居世界第二位,成为我国经济建设必不可少的基础设施。公路交通在国民经济中的地位和作用也越来越重要。桥梁作为道路的重要组成部分,在社会和国民经济发展中占有举足轻重的地位。然而,伴随着交通运输量的大幅度增长,交通工具的大型化、重型化,环境的长期影响,现有的很多桥梁处于带病超负荷的工作状态,耐久性病害导致的桥梁安全和正常使用问题日益凸显,如再不着手提高公路桥梁的耐久性,那么30~50年甚至更短时间之后我们必将为此付出惨重的代价!

综上所述,开展基于耐久性的混凝土桥梁标准化施工技术的研究,不仅可以完善我国工程建设标准规范体系,大力提升我国桥梁工程建设水平,而且能极大地延长桥梁寿命,最大限度地节约维护费用,产生巨大的经济效益、社会效益和环境效益。耐久性技术正在成为 21 世纪我国土木、水利等学科的重要研究领域。

1.2 国内外研究现状与发展趋势分析

从 20 世纪 80 年代中期起,为解决混凝土的耐久性问题,众多发达国家投入大量的人力和物力,掀起了以耐久性为基本要求的高性能混凝土材料的研究。混凝土结构的耐久性设计方法也成为研究的重点。1990 年,日本土木工程协会提出了混凝土结构耐久性设计建议,其中采用评分方法将有关混凝土结构耐久性的各种因素分别加以量化并与结构的使用年限相联系。1996 年,国际材料与结构研究实验联合会(RILEM)的 130-CSL 委员会提出了“混凝土结构的耐久性设计”的报告,对基于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^[1]。1995 年,欧共体资助了一项名为 Dura Crete 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,欧洲各国共有 12 个单位参加,出版了许多研究报告,并在 2000 年提出了一份名为《混凝土结构耐久性设计指南》的技术文件。1998 年,美国国家标准与技术研究院(NIST)、美国混凝土学会和美国材料与试验协会(ASTM)召开了混凝土结构使用年限和全寿命使用预测的专题研讨会,决定由 ACI365 委员会组织研究,目标是提出混凝土使用寿命预测的“标准计算模型”,并资助发展相应的计算程序。1998 年,欧共体又资助成立了为期 3 年的 Dura Net 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工作网”,欧洲各国共有 19 个单位参与,旨在改善欧洲混凝土结构的耐久性设计、评估与维修水平。2000 年出版的国际标准 ISO15686-1《建筑物及建筑资产使用年限规划》中,提出了用因子法估计建筑构件的使用年限。对于现有混凝土结构设计规范中的耐久性设计,在拟订的欧共体结构设计规范初稿^[2]中也有重大变化,其中对环境作用类别及其腐蚀作用等级做了更精细的划分。2001 年,亚洲混凝土模式规范国际委员会(ICCMC)公布了《亚洲混凝土模式规范》(ACMC2001),提出了基于性能的设计方法。21 世纪以来,国际上对混凝土耐久性的研究向高性能混凝土及耐久性的数值方法研究方向转变。2003 年 8 月,第三届国际自密实混凝土会议^[3]在冰岛召开,会议聚集了来自 20 多个国家和地区的专家和学者,针对自密实高性能混凝土的理论及应用展开了深入的讨论。在随后的 2004 年,国际材料与结构研究实验联合会(RILEM)成立了 SCC 耐久性专门技术委员会(RILEM TC205-DSC)^[4]。美国混凝土学会 365(使用寿命预测)委员会开发了数值模拟系统以研究混凝土耐久性^[5],其最初于 1999 年开发的程序“life-365”已经逐步发展成一种标准寿命的预测模型,通过数值模拟分析混凝土内部氯离子浓度的分布情况来预测使用寿命,并在 2008 年发布更为完善的第二版本(life-365v2)。2006 年 Laumet Pascal^[6]综合考虑了混凝土徐变及环境侵蚀对钢-混凝土组合梁桥正常使用极限状态耐久性的影响,利用蒙特卡罗法分析了组合梁桥正常使用极限状态下的时变可靠度。Darmawan^[7]针对印度尼西亚地区的钢-混凝土组合梁桥,基于蒙特卡罗法对钢筋混凝土桥梁的时变可靠度做了进

一步的量化分析。在2008年的混凝土结构耐久性国际学术会议(International Conference on Durability of Concrete Structures, ICDCS2008)^[8]上,专家们将结构耐久性机制研究划分为材料与构件两个层次,材料层次的研究包括钢筋锈蚀、碱-集料反应、冻融循环等的机制;而构件层次的研究主要以结构中的受力构件为研究对象,考虑耐久性下降的承载力计算方法,构件锈蚀前后各种形态对比分析以及锈蚀构件裂缝和变形的发展规律等,会议为此后的耐久性研究指出了两个可持续的研究方向。此外,德国的 Folker. H. Wittmann 教授介绍了钢筋混凝土结构的收缩机制、裂缝形成及使用寿命,从复杂的物理化学相互作用中总结出了一个简单的模型,形象地阐明了孔隙液的组成对混凝土收缩的影响作用。来自意大利的 Mario Collepardi 曾任意大利混凝土工程组织主席,他的研究引入整体分析的方法,以硫酸盐侵蚀和碱硅酸反应引起的混凝土损伤为例,通过评价混凝土的连通孔隙、侵蚀介质及水等三个主要因素来检验混凝土的耐久性。日本的 Fuminori Tomosawa 教授介绍了日本在钢筋混凝土结构的耐久性问题上的经验与规范,指出前后20年日本混凝土耐久性研究的进展。瑞典的 Prof. Lars-Olof Nilsson 教授综述了氯盐侵入混凝土的各种模型的发展,分析各种模型的局限性,并给出了使用建议。2010年,欧洲混凝土委员会颁布了《欧洲混凝土结构设计规范》(CEB-FIP Model Code)^[9],它给出了一个全寿命周期的设计框架,引入了考虑可持续发展的性能要求,是一本面向未来的规范。2012年,SSCS(用于可持续发展混凝土结构的数学建模策略)国际会议在法国普罗旺斯艾克斯市召开,此次会议从以下两个方面展开:①理论和数学建模:流变性和铸造,混凝土早期行为,混凝土的干燥、收缩和蠕变,混凝土的开裂(静态、疲劳和动态)、化学老化(化学反应和转变)、黏结问题;②结构应用和可持续发展性能:桥梁、建筑、核结构和存储设备、隧道、道路、铁路及其他应用。2013年8月,可持续发展建筑材料和技术国际会议在日本东京召开,会议围绕混凝土结构的维护和可循环性控制,对混凝土及钢筋等材料的耐久性、长期暴露测试和损害机制、裂缝控制及锈蚀问题进行全面的研究和讨论,并对结构的修补技术、结构强度和抗震加固提出了指导性建议。2014年10月,第九届海峡两岸材料腐蚀与防护研讨会在武汉召开,基于混凝土结构表面钝态与局部腐蚀、自然环境腐蚀,依据腐蚀机制,提出了关于建筑材料和设备的防腐新技术。随着研究的进一步深入,在混凝土结构耐久性设计中,环境影响因素和使用寿命逐步有了明确规定;在耐久性的定量设计与测算中开始逐渐引入由实验室和野外获得的材料劣化模型,并结合了混凝土结构设计极限状态理论^[10];基于性能劣化规律的混凝土结构全寿命周期理论正在成为混凝土结构最优化维护与管养策略的理论基础^[11];学术界和工程界也在不断研发和更新能够监测混凝土中钢筋锈蚀与混凝土劣化进程的新型探测装置,并不断探索如何更切实可行地在实际工程中采用。

我国混凝土结构的耐久性研究始于20世纪50年代,属于当时国家自然环境腐蚀整体研究计划的一部分,20世纪50年代末全国建立了包括混凝土材料在内的“全国大气、海水、土壤腐蚀试验网站”,混凝土材料腐蚀的研究主要针对南方沿海地区的氯离子腐蚀、北方地区的混凝土冻融和西北盐渍土地区的硫酸盐腐蚀。20世纪60年代,南京水利科学研究院对混凝土结构的碳化和钢筋锈蚀等耐久性问题进行了研究。从20世纪80年代起,我国对混凝土结构的耐久性日益重视,并为此进行了广泛而深入的研究。1994年

启动了国家基础性研究重大项目(攀登计划)“重大土木及水利工程安全性与耐久性的基础研究”,取得了很多有价值的研究成果^[12]。1993~1995年,台湾海洋大学对海洋环境中钢筋混凝土结构的耐久性进行了系统研究,研究分为三个阶段:第一阶段探讨海洋环境因素和材料因素对钢材的腐蚀作用;第二阶段研究腐蚀对构件力学行为的影响;第三阶段提出修订桥梁设计规范或施工准则的建议^[13]。2000年5月在杭州举行的中国土木工程学会第九届年会上,混凝土结构的耐久性是大会的主题之一,会议认为必须重视工程结构耐久性的研究^[14]。2001年“土建结构工程的安全性及耐久性”科技论坛在清华大学举办,本次论坛分析了我国土建结构工程的安全性及耐久性现状,交流了近年来的研究成果,探讨亟待解决的重大问题与应对途径,并积极提出建议为有关部门制定或修订相关的技术政策或技术标准提供参考依据。2002年6月在重庆召开的中国工程建设标准化协会混凝土结构委员会第四届第二次扩大会议上,确定了混凝土结构规范第六批课题,其中第一个子课题就是混凝土结构耐久性研究。2002年11月“混凝土工程耐久性及其耐久性设计”学术研讨会在北京举行,会议讨论了我国混凝土工程中的钢筋锈蚀和混凝土腐蚀的严重现状与对策、混凝土结构耐久性认识的历史演变与发展展望以及混凝土结构耐久性设计方法存在问题与改进建议等。2004年5月,“沿海地区混凝土结构耐久性及其设计方法科技论坛”与“全国第六届混凝土结构耐久性学术交流会”在深圳召开,会议吸引了数量众多的教育、科研和生产人员参加,并邀请了国外学者介绍国外在混凝土结构耐久性设计方面的经验教训,在土木工程界引起广泛关注和影响。2004年,由中国土木工程协会、清华大学等单位主编的《混凝土结构耐久性设计及施工指南》出版,该书在国内首次较全面、系统地提出了混凝土结构耐久性设计与施工的基本法则和较详细的方法,以及正常维修和必要的定期检测要求。2005年12月“工程科技论坛—混凝土结构耐久性”在杭州举行,此次论坛对混凝土耐久性设计规程、结构劣化理论模型、耐久性设计、检测与评估等多方面进行了相关报告和讨论。2006年,“第五届全国混凝土结构的设计使用年限与耐久性设计标准”学术会议在南京东南大学召开,会议研讨了混凝土结构的设计使用年限与混凝土结构耐久性设计标准问题。中国工程建设标准化协会组织编写的《混凝土结构耐久性评定标准》(CECS 220:2007),对我国桥梁、房屋等混凝土结构评定进行了详细规定。由中华人民共和国住房和城乡建设部与国家质量监督检验检疫总局联合编写的《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008)^[15],主要内容包括混凝土结构耐久性设计的主要原则、环境作用类别与等级划分、设计使用年限、混凝土材料的基本要求、有关的结构构造措施以及一般环境、冻融环境、盐环境和化学腐蚀环境作用下的耐久性设计方法,已于2009年5月1日正式实施,在一定程度上代表了我国混凝土结构的耐久性研究水平。2010年9月6日召开的第七届中美桥梁技术交流会“桥梁设计与安全”分会场上,我国学者梁新政做了题为“混凝土桥梁耐久性设计研究”的报告,介绍了耐久性病害及国内外耐久性设计方法的现状,并向与会桥梁专家阐述了正在起草中的公路混凝土结构耐久性设计规范的基本思路,并从多因素环境作用下混凝土结构耐久性设计方法、荷载与环境综合作用下混凝土结构耐久性设计方法、全概率服役寿命设计等方面对混凝土桥梁耐久性设计的发展趋势做了展望。在2011年11月召开的第二十届全国结构工程学术会议中,金伟良^[16]作为特邀学者,对工程结构耐久性与全寿命设计理论做了全面的报告,

将全寿命设计理论拓展到结构的整个寿命周期,而不仅仅是结构的使用阶段,统筹考虑设计、施工、运营和管理各个环节以寻求恰当方法和措施,使结构的全寿命性能(安全、适用、耐久、经济、美观、生态等)达到最优或优化。该设计理念对于提高结构的耐久性和使用性能、降低全寿命总成本、促进结构技术水平的进步具有现实指导意义。在第二十届全国桥梁学术会议中,赵君黎^[17]阐述了基于性能的公路桥梁结构设计原则,指出未来性能目标和性能评定都是以可靠指标为基础予以量化的,以概率为基础的性能设计是未来桥梁工程的发展方向。2013年9月,赵君黎^[18]在第十六届全国混凝土及预应力混凝土学术会议暨第十二届预应力学术交流会中,就公路桥梁性能设计与长期性能做了探讨,从规划设计、施工建设、长期管养等全寿命周期的桥梁结构长期性能设计入手,以实现桥梁长期安全管理和服务社会这一理想目标。2014年5月,中国土木工程学会第十六届年会暨第二十一届全国桥梁学术会议在大连召开,会议以“经济、耐久、创新”为主题,整合了桥梁检测与加固技术的新方法以及高性能材料的应用,深化了基于性能的桥梁设计理念。2016年1月,交通运输部副部长冯正霖^[19]提出,面对我国桥梁长期性能研究和长大桥梁运营管理的技术需求,需要研发高精度、长寿命、智能化传感器,发展桥梁关键状态参数和性能指标长期跟踪监测技术,构建桥梁健康诊断及性能和抗力衰变监测技术体系与标准,研发基于BIM技术的桥梁管养系统,以推动我国公路桥梁养护管理技术的发展。

在混凝土结构耐久性施工技术研究方面,我国已有初步成果,主要包括混凝土配合比、高性能混凝土、施工工艺流程、养护方法等方面。罗守权^[20]在现场试验中发现,高性能耐久性混凝土在配制上不仅要控制低水灰比,而且必须掺加足够的矿物集料和高效减水剂,以达到减小混凝土内部孔隙率、减少体积收缩、提高强度及耐久性的目的。同时,发现泰诺内掺型迁移性阻锈剂对新拌混凝土性能的影响很小,如凝结时间、坍落度、含气量等,与高效减水剂相融性好,且使用前后不改变混凝土的物理力学性能,不降低混凝土中钢筋握裹力。此外,还有效抵抗氯离子的侵蚀,即使在高氯离子浓度环境中也同样有效。黄绍锋^[21]通过试验研究了大掺量矿粉的混凝土桥梁的施工配比,分析得出了矿粉与水泥之间的重量比对应于抗渗性(氯离子)的变化规律,并指导混凝土现场施工配比的调整,在节约成本的基础上保证了桥梁的抗腐蚀性。黄远超^[22]就预应力混凝土板桩的施工技术进行了概括和研究,指出预应力混凝土板桩不仅具备预制施工方便、经济的优点,而且在防腐、耐久性、受力方面仍具备很大的优势。张永革^[23]采用机制砂替代天然河砂,从机制砂混凝土配合比和性能测试入手,分析了机制砂对混凝土强度、耐久性等指标的影响,提出了C50机制砂混凝土T形梁设计原则,并在广西壮族自治区首次进行了现场试验段试验,服役性能良好。郑秀娟^[24]对沿海地区有抗拔要求钻孔灌注桩进行研究,在工程中采用有黏结后张预应力钻孔灌注桩施工技术,实现了原来普通钻孔灌注桩中加入高强预应力钢筋的工艺,形成了一整套后张预应力钻孔灌注桩施工方法。在桩体下端进行锚固,降低了抗拔的普通钻孔灌注桩配筋率,解决了一般抗拔桩安全性低的实际问题,提高地下结构的裂缝控制等级和结构的耐久性。通过有黏结后张预应力施工工艺的实施,保证了预应力筋、普通钢筋和混凝土的协同工作。孔中华^[25]通过对负压辅助注胶技术的研究,提出了一种先将空洞部位空气抽走使内部空间处于负压状态,再进行胶液灌注的混凝土空洞修复施工方案,解决了胶凝材料密实充盈混凝土内部缺陷的难题,可有效提高结构的

耐久性和安全性。张海霞阐述了综合取代技术在混凝土配比设计中的应用,对粉煤灰和矿渣粉及其掺量的确定、对机制砂与铁尾矿砂的掺量确定,均经过合理的计算和试验,从而保证了混凝土的可泵性能,以双掺粉煤灰和矿粉代替部分水泥,以大小粒径组合、混掺等技术措施配制的具有良好的级配和低的空隙率的混合砂代替天然砂,以沉淀池内回收水代替部分搅拌饮用水,相比于传统混凝土配合比设计,“综合取代”后的混凝土结构性能及耐久性均优于传统预拌混凝土,且成本降低,经济效益和环境效益明显。

近年来,随着工程建设和管理水平的不断提高,标准化技术被提到议事日程并得到较快发展。在国际上,标准化施工管理在欧美以及日本发展较为成熟,20世纪末,英国施工行业开始了系统的整顿,充分学习制造业,加强标准化管理,极大地促进了英国施工行业的发展^[27]。英国施工行业采用模块化、流程化、信息化的标准化管理模式,不仅促进了英国施工领域技术上的进步,而且带动了英国经济的大力发展。美国通过在施工技术上做出标准化的改进,规范了施工管理,如预制标准化的桥梁结构模块,在保证桥梁结构满足形状和尺寸的要求下,更便于运输和施工,加快施工进度,而且提高了工程的质量,对结构的耐久性也十分有利^[28]。日本的标准化施工管理也是国际领先的,其标准化管理体系将3S原则和4M法则运用于施工管理中,使得施工过程更加规范化和合理化。在我国,2005年12月22日国家建设部正式发布了《关于开展建筑施工安全质量标准化工作的指导意见》,通过在建筑施工企业及其施工现场推行标准化管理,实现企业市场行为的规范化、安全管理流程的程序化、场容地貌的秩序化和施工现场安全防护的标准化,促进企业建立运转有效的自我保障体系。2010年,在谷竹高速公路建设中,实施了建设标准化工地、推行标准化施工和加强标准化管理的标准化建设要求,强化施工过程控制,创造性实施了“一个平台(统一信息化平台)、两个准入(大型模板和原材料准入)、三个集中(钢筋加工厂、预制梁场、混凝土拌和场集中)”的管理手段。吴江龙、王维海^[29]针对箱梁预制场,在箱梁模板、钢筋加工、混凝土养护、预应力施工等满足施工工艺的标准上做了尝试与改进。杨勇新、岳清瑞^[30]分析了我国FRP加固修复混凝土结构施工方法的标准化工作内容,并指出需要补充完善的新技术施工方法和需要纳入到标准体系中的施工方法。向科^[31]以上海S26高速公路主线高架桥施工为背景,研究了模块化和工厂化施工在桥梁工程中的应用。针对高架桥梁立柱和盖梁施工,分别提出了无落地脚手架和钢管桁架的模块化施工技术,具有提高施工效率和机械化施工水平、确保施工质量、降低工程造价等优点;针对钢筋笼制作,提出了在工厂内加工焊接成型的工厂化施工技术,实现了规范化、流程化、标准化的施工作业。目前,“标准化”理念已在我国许多桥梁工程建设中得到广泛认可。

1.3 目前混凝土桥梁耐久性研究存在的主要问题

现有的混凝土结构耐久性研究情况表明,目前的研究成果主要体现在不同环境条件下的材料与构件层次上,其中材料层次的研究包括钢筋锈蚀、冻融循环、碱-集料反应、化学作用以及高性能混凝土等,其目的主要在于解决混凝土材料选择和配合比设计问题。构件层次的研究主要以结构中的受力构件为研究对象,考虑的因素包括钢筋直径、保护层厚度、养护方式、钢筋的锈蚀程度和锈蚀速率等,研究内容涉及钢筋锈蚀后构件的各项力

学性能、考虑耐久性下降的承载力计算方法,构件锈蚀前后破坏形态的对比分析以及锈蚀构件裂缝和变形的发展规律等,采用的试验方法主要有快速试验法,使构件达到试验要求的劣化程度,或者采用老化的结构构件进行试验。如何建立考虑多种因素的构件承载力和变形的经时变化模型,准确描述构件乃至整个结构在使用周期中的耐久性的变化规律,是混凝土构件耐久性研究的重点、热点与难点,也是混凝土结构耐久性研究中至关重要的环节。结构层次上的混凝土结构耐久性研究才刚刚起步,主要是在混凝土结构的耐久性设计和在役混凝土结构的耐久性评估与寿命预测两个方面。

通过对现有混凝土结构耐久性研究成果的分析,结合桥梁工程耐久性问题的特点,目前混凝土桥梁耐久性研究中主要存在以下问题:

(1) 绝大多数的试验是在构件(试件)不受力的情况下进行的,不能正确反映桥梁运营期间的实际工作情况。少数已有的研究表明,结构受力状态对耐久抗力退化的影响是不可忽略的。

(2) 目前对材料耐久性的研究,主要侧重于某单一因素影响下的耐久性损伤,对多个因素的耦合作用研究较少。此外,对混凝土性能劣化规律的研究尚不深入,尚未达到能够直接测算现场混凝土结构劣化性能的程度。现有的许多研究成果与结构的设计、施工控制及结构寿命评估等存在脱节,即材料层面的研究未能与结构层次的研究有机结合,对实际工程中迫切需要解决的结构耐久性设计与施工问题缺乏有效的指导。事实上,材料耐久性只是保证实际结构耐久性的一个重要方面,过分强调混凝土材料自身耐久性的重要性可能会在一定程度上造成错误认识,例如,使用耐久年限为100年的混凝土建成的结构,其寿命可能达到或超过100年,也可能只有50年或更短,这是因为结构的耐久性不仅取决于材料本身,还与结构设计、构造、施工及使用、维护等结构全寿命过程的所有环节有密切关系。

(3) 目前对如何以施工人员易于接受和操作的方式来改善桥梁结构耐久性的研究较少。长期以来,人们一直偏重于结构设计方法的研究,较多地重视如何从材料和保护层的角度来考虑增强结构的耐久抗力,却忽视了对总体构造和细节处理方面的关注及施工过程的管理和控制。大量的桥梁病害实例证明,除了设计和材料方面的原因,施工缺陷也是影响结构耐久性的重要原因。

1.4 本书主要开展的研究工作

以公路混凝土桥梁结构为研究对象,通过理论研究、现场调研和试验等技术手段,分析混凝土桥梁结构耐久性损伤的机制,确定混凝土桥梁结构耐久性评定指标与控制标准,建立混凝土桥梁耐久性指标与施工技术参数的关系,提出确保桥梁耐久性和外观质量的施工技术、构造措施与施工过程控制方法,最终形成适合混凝土桥梁结构特点的、满足桥梁耐久性要求的混凝土桥梁标准化施工技术,用于指导桥梁工程建设实践。

第2章 混凝土桥梁结构耐久性损伤机制研究

2.1 引言

普遍意义上,结构的耐久性是指其能够维持初始性能(安全性、适用性及美观性)的能力^[32]。公路混凝土桥梁结构耐久性是结构在可能引起其性能变化的各种作用(荷载、环境、材料内部因素等)下,在预定的使用年限和适当的维修条件下,结构能够长期抵御性能劣化的能力^[33]。桥梁在使用过程中会出现各种各样的病害,桥梁病害是桥梁结构耐久性退化的直观表现,不断出现的病害不仅影响结构的正常使用性能,导致其耐久性降低,同时病害的累积可能威胁到桥梁结构的安全。桥梁结构的耐久性病害导致的损失是巨大的,美国大约有桥梁 60 万座,其中 27.1% 有缺陷或丧失功能,为此美国每年至少需要投入 94 亿美元进行维修^[34]。20 世纪 80 年代后期,我国南京水利科学研究院等单位曾对我国南方沿海地区使用 25 年以上的海工建筑物进行调查,发现钢筋锈蚀造成耐久性问题的达 80% 以上。目前,我国桥梁需要加固和维修的项目日益增多,桥梁结构耐久性问题越来越突出,公路桥梁结构设计使用年限一般为 100 年,但实际情况是钢筋混凝土桥梁中近 50% 在使用 20 ~ 30 年之后便出现了不同程度的病害,需要进行修补与加固。掌握混凝土桥梁耐久性损伤机制对于桥梁的养护维修至关重要。本章在对桥梁工程进行调研的基础上,分析总结桥梁结构耐久性病害形式和特征,并对公路混凝土桥梁结构耐久性影响因素和耐久性损伤机制进行研究。

2.2 公路混凝土桥梁结构常见耐久性病害形式

公路混凝土桥梁结构的耐久性受到很多因素的影响,有外部的环境因素,也有材料本身的原因,从而会产生各种耐久性病害。根据对实际桥梁工程的调查结果,公路混凝土桥梁结构(以最常用的混凝土梁式桥为例)常见的耐久性病害形式如表 2-1 所示。

表 2-1 混凝土梁式桥常见病害汇总

工程部位	病害形式
桥面铺装	1. 铺装层磨光、龟裂、壅包、脱皮露骨、坑槽、波浪等; 2. 防水层老化失效、断裂、渗水等; 3. 桥头跳车
伸缩缝	堵塞、卡死、锚固混凝土开裂、破损、橡胶条老化
人行道及栏杆	1. 人行道扭曲、变形; 2. 栏杆扶手涂装层缺损、断裂、钢筋锈蚀、混凝土麻面、破损掉角、剥落、裂缝、露筋、错位、变形、构件松动
排水设施	1. 桥面排水坡度不当,造成桥面局部积水; 2. 桥面排水不畅,漫流污染桥面; 3. 泄水管管道破损、管体脱落、堵塞等; 4. 泄水槽堆泥堵塞,水流不畅,槽口破裂损坏、漏水、积水
上部承重构件	1. 混凝土表面蜂窝、麻面、空洞、剥落、表面裂缝、掉角; 2. 混凝土开裂、露筋、钢筋锈蚀; 3. 板间铰缝脱落、板间铰缝渗水、板间错台、板间距过大,单板受力、跨中下挠、梁体开裂; 4. 梁板板底铰缝开裂、渗水、梁肋开裂,横隔板连接处焊接拉裂,形成错位,混凝土局部受挤压破坏,梁肋与翼板连接处出现裂缝、跨中下挠、梁体开裂
支座	1. 支座错位、脱空、压缩变形超限、剪切变形超限、橡胶老化破损 2. 支座垫块翘起、扭曲,支座垫块锈蚀、垫石材料老化,支座垫石开裂、压碎、缺损,支座焊缝开裂
盖梁	混凝土保护层厚度不足,表面蜂窝、麻面、剥落,表面裂缝,混凝土开裂、掉角、露筋,钢筋锈蚀等
墩台及基础	1. 混凝土风化、蜂窝、麻面、剥落、露筋、钢筋锈蚀、开裂; 2. 墩台下沉、倾斜; 3. 基础冲刷、露筋、缩颈、冻裂、沉降、滑移
翼(耳)墙、锥(护)坡	1. 翼(耳)墙断裂、下沉、外倾失稳、砌体变形、灰缝脱落、倒塌; 2. 锥(护)坡铺砌缺损、塌陷、冲蚀、滑移、下沉

2.3 影响混凝土桥梁结构耐久性的因素与耐久性损伤机制分析

影响公路混凝土桥梁耐久性的因素很多,涉及桥梁结构的设计、施工、使用和养护管理等各个环节,根据调研结果,可将其分为两类:一类是内部因素的影响,如所选用的材料的质量的影响、设计因素的影响、施工质量的影响等;一类是外部因素的影响,如自然环境

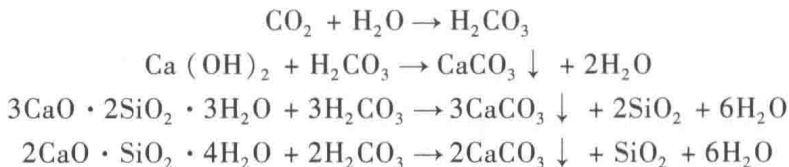
的影响(如温度、湿度、风、二氧化碳的浓度等)、人为因素的影响、自然灾害的影响(如海啸、地震等)等。下面仅就几个主要方面进行分析研究。

2.3.1 环境导致材料劣化引起的耐久性破坏

2.3.1.1 混凝土碳化

1. 混凝土碳化机制

由于混凝土自身的性质及在制作过程中的振捣和养护等方面的原因,在混凝土集料和水泥砂浆之间存在一些微孔隙、微裂缝,即使在强度等级较高的混凝土中,孔隙率也能达到10%,这样混凝土就形成一种多孔结构,使混凝土具有一定的渗透性^[35]。硅酸盐水泥在混凝土拌和中,其主要成分CaO水化作用后生成Ca(OH)₂,Ca(OH)₂在水中的溶解度低,除少量溶于孔隙液中,使孔隙液成为饱和碱性溶液外,大部分以结晶状态存在,成为孔隙液保持高碱性的储备,它的pH为12.5~13.5。空气中的CO₂气体不断地透过混凝土中未完全充水的粗毛细孔道,扩散到混凝土中部分充水的毛细孔中,与孔隙液所溶解的Ca(OH)₂进行中和反应,反应产物为CaCO₃和H₂O。CaCO₃溶解度低,沉积于毛细孔中。反应后,毛细孔周围水泥石中的Ca(OH)₂补充溶解为Ca²⁺和OH⁻,反向扩散到孔隙液中,与继续扩散进来的CO₂反应,一直到孔隙液的pH降为8.5~9.0时,这层混凝土的毛细孔中才不再进行这种中和反应,此时即所谓“已碳化”。此外,水化硅酸钙及未水化硅酸三钙3CaO·2SiO₂·3H₂O、硅酸二钙2CaO·SiO₂·4H₂O等也要消耗CO₂气体。混凝土碳化的主要化学反应式为:



2. 混凝土碳化对混凝土结构耐久性的影响

由于碳化反应的主要产物碳酸钙属非溶解性钙盐,比原反应物的体积膨胀约为17%。因此,混凝土的凝胶孔隙和部分毛细孔隙将被碳化产物堵塞,使混凝土的密实度和强度有所提高,一定程度上阻碍了CO₂和O₂向混凝土内部的扩散,然而碳化使混凝土脆性增大,延性降低。由于一般情况下混凝土的碳化深度较浅,大致与钢筋保护层厚度相当,因此从整体上,碳化对混凝土力学性能及构件受力性能的负面影响不大^[36]。但是,最为关键的是混凝土碳化使混凝土的pH减低,导致混凝土中的钢筋脱钝,从而引起钢筋锈蚀,最终影响到混凝土结构的耐久性。混凝土碳化是一般大气环境下混凝土中钢筋脱钝锈蚀的前提条件。

3. 影响混凝土碳化的因素

影响混凝土碳化速度的因素主要分为外部环境因素和混凝土自身内部因素:外部环境因素主要有CO₂浓度、湿度、温度以及后期的养护条件,而混凝土自身内部因素主要有水泥品种、水灰比、集料、掺和料。

1) CO₂浓度的影响

混凝土碳化过程是CO₂对混凝土长期的侵蚀过程,因此CO₂浓度对混凝土碳化速度