

混凝土结构耐久性

DURABILITY OF CONCRETE
STRUCTURES

(第二版)

金伟良 赵羽习 著



科学出版社

混凝土结构耐久性

Durability of Concrete Structures

(第二版)

金伟良 赵羽习 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在 2002 年《混凝土结构耐久性》第一版的基础上,汇总了作者及其团队 2003~2013 年在混凝土结构耐久性研究领域开展的研究工作与成果;也反映了国内外在此领域的相关研究进展。本书主要介绍混凝土结构耐久性问题的重要性与研究现状;混凝土结构服役的各种环境,以及为进行混凝土结构耐久性设计的环境区划研究;各种耐久性试验方法与装置;材料层面和结构构件层面的耐久性研究成果;以及从结构的层面来阐述混凝土结构设计、评估和性能提升方面的内容。

本书适合于从事混凝土结构耐久性方面的科研工作者,在校研究生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构耐久性=Durability of Concrete Structures/金伟良,赵羽习著.—2 版.—北京:科学出版社,2014.7

ISBN 978-7-03-041324-6

I. ①混… II. ①金…②赵… III. ①混凝土结构-耐用性-研究 IV. ①TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 144970 号

责任编辑:吴凡洁 乔丽维 / 责任校对:胡小洁

责任印制:阎磊 / 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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014 年 7 月第 二 版 印张:23 1/4

2014 年 7 月第一次印刷 字数:530 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版前言

浙江大学混凝土结构耐久性研究团队从 1995 年开始致力于混凝土结构耐久性方向的研究,2002 年曾整理总结研究成果出版了《混凝土结构耐久性》(第一版)。之后 10 年,本书作者从结构全寿命理念出发,重新思考与定位混凝土结构耐久性研究问题,对混凝土结构耐久性提出了新的认识,认为:不能仅仅将混凝土结构的耐久性失效归属于材料问题,而忽视了混凝土结构所具有的“结构”属性;耐久性问题不仅是环境对结构影响的问题,还是结构在荷载、环境、材料内部状况等可能引起其性能变化的各种因素共同作用下,结构抵御性能劣化的能力;同时,混凝土结构耐久性失效过程应该包含结构建造、使用和老化的生命全过程,其耐久性性能研究也应涉及结构生命全过程的每个环节。因此,混凝土结构耐久性是研究混凝土结构全寿命的重要基础。

为此,10 年的科研工作,45 本研究生学位论文,集结成为《混凝土结构耐久性》第二版。第二版的《混凝土结构耐久性》不仅体现了浙江大学研究团队近 10 年来在混凝土结构耐久性研究领域所做的研究工作与成果,还反映了国内外近年来的相关研究进展,全书共 18 章。第 1 章介绍混凝土结构耐久性问题的重要性与研究现状;第 2 章介绍混凝土结构服役的各种环境,以及为进行混凝土结构耐久性设计的环境区划研究;第 3 章介绍各种耐久性试验方法与装置;第 4~9 章主要阐述了材料层面的耐久性研究成果;第 10~14 章介绍混凝土结构构件层面的耐久性研究成果;第 15~18 章则从结构的层面来阐述混凝土结构设计、评估和性能提升方面的内容。真诚感谢在本书撰写过程中作出贡献的其他老师和研究生:武海荣博士(第 2 章)、李志远博士(第 3 章)、延永东博士(第 5、13 章)、段安博士(第 6 章)、徐菲博士(第 8 章)、许晨博士(第 9 章)、夏晋博士(第 11、12 章)、钟小平博士(第 15 章)、毛江鸿博士(第 16 章),以及薛文博士和章思颖硕士(第 18 章)。

我相信本书对混凝土结构耐久性研究方向的发展,以及相关技术规范和标准的制定与修订,均具有参考价值,也适合于从事混凝土结构耐久性方面教学、科研和工程应用的科研工作者、在校研究生和工程技术人员参考。书中不当之处,敬请读者不吝赐教。



2013 年 10 月于求是园

第 一 版 序

自从波特兰水泥问世以来,混凝土结构已成为基本建设工程中最为常用的建筑形式之一。但是,由于混凝土结构材料自身和使用环境的特点,混凝土结构存在着严重的耐久性问题。国内外有关统计资料表明,由于混凝土结构耐久性病害而导致的经济损失是非常巨大的,并且随着环境的变迁和功能要求的提高,耐久性问题越来越突出。我国的混凝土结构量大面广,混凝土结构耐久性问题也十分突出,是一个迫切需要加以解决的问题。通过开展对混凝土结构耐久性的研究,一方面可以对已有的建筑结构物进行科学的耐久性评定和剩余寿命预测,以选择对其正确的处理方法,另一方面则有益于新建工程项目的耐久性设计。因此,混凝土结构耐久性的研究既有服务于服役结构正常使用的现实意义,又有指导待建结构进行耐久性设计的理论意义。

基于对混凝土结构耐久性研究的重要认识,结合我国(特别是沿海地区)混凝土结构耐久性的特点,浙江大学结构工程研究所混凝土结构耐久性课题组在金伟良教授的带领和指导下,于1995年开始对混凝土结构耐久性方面做了大量的科研与调查工作,取得了一系列的研究成果。该书既描述了混凝土结构耐久性的研究框架,又总结了以往在混凝土结构耐久性方面的研究成果,并详细地介绍了浙江大学结构工程研究所在这方面所取得的成果,是国内第一部全面介绍混凝土结构耐久性研究的专著,具有较高的学术水平和应用价值。

该书思路清晰,条理清楚,特色鲜明,强调理论与实际工程的结合,这对混凝土结构耐久性理论的发展和将研究成果应用于实际工程都具有积极的借鉴作用,是我国从事混凝土结构耐久性研究的科研、教学、设计和管理等有关人员不可多得的参考书。

赵国藩

中国工程院院士、大连理工大学教授

2002年5月28日

第一版前言

混凝土结构是国家基本建设中最广泛应用的结构形式。由于混凝土碳化、氯离子污染、冻融等,导致混凝土结构中钢筋锈蚀、混凝土顺筋胀裂和剥落等破坏,这已成为影响混凝土结构耐久性的主要问题。混凝土结构因耐久性不足而造成的直接和间接损失之大,已远远超出人们的预料,这在欧美经济发达国家中已构成严重的财政负担;而处于基本建设高峰期的中国,如果不充分认识到耐久性的重要性,忽视混凝土结构耐久性的要求,那么若干年之后也会发生类似的情况,从而制约我国经济整体健康快速的发展。

认识到混凝土结构耐久性的重要性,浙江大学结构工程研究所在混凝土结构耐久性的基础理论、实验、检测和工程应用等方面开展了研究。本书既总结了以往混凝土结构耐久性方面的研究成果,又详细地介绍了浙江大学结构工程研究所在这方面所做的研究工作。

本书首先强调了混凝土结构耐久性的重要性,并叙述了混凝土结构耐久性研究现状及其主要内容;第2~6章分别从混凝土碳化、氯离子对混凝土的侵蚀、混凝土的抗冻性与抗渗性、混凝土碱-集料反应和混凝土中钢筋的锈蚀等方面介绍了耐久性的基础理论与研究成果;第7章重点研究了钢筋锈蚀力、锈蚀钢筋与混凝土的黏结性能,以及锈蚀混凝土构件性能的衰退等混凝土构件耐久性的内容;第8章则根据上述耐久性的研究成果给出了基于正常使用极限状态混凝土结构构件可靠度的计算方法;第9章介绍了混凝土结构耐久性的设计、检测评估和维修;最后展望了混凝土耐久性研究的发展方向。书末附有亚洲混凝土模式规范(ACMC2001)简介,英国标准BS7543(建筑物与建筑构件、产品及组件耐久性指南)简介,为读者提供一个更为广泛的参考资料。

本书的主要研究是针对大气环境下的混凝土结构耐久性,而混凝土结构最为严重的外部环境则是氯离子的腐蚀。我国海岸线漫长,沿海地区的建筑物密集,暴露在氯离子环境下的混凝土结构数量巨大。因此,氯离子腐蚀混凝土而影响混凝土结构耐久性已成为急需深入研究的问题,也是我们要做的后续研究工作。

在本书完稿之际,作者要感谢浙江大学曹光彪高科技发展基金会,在作者回国到浙江大学开展混凝土结构耐久性研究之初,是该基金会将此研究列为重点资助项目,从而保证了研究工作的顺利进行。感谢中国工程院院士、大连理工大学教授赵国藩先生对作者研究工作的大力支持,他为本书作序予以鼓励;感谢中国工程院院士、东南大学教授吕志涛先生对本书进行的认真审阅,他提出了许多好的建议;感谢浙江大学结构工程研究所的研究生鄢飞、赵羽习、张苑竹、张亮、陈驹、陈海海等,他们对本书专题进行了深入的研究,本书的内容也体现了他们的一部分研究成果。本书引用了大量的参考文献,其中一部分为

内部资料,未能一一列出,在此对本书所引用参考文献的作者表示谢意。

全书共 10 章,金伟良编写第 1、2、6、7、9、10 章及附录 1,赵羽习编写第 3~5、8 章及附录 2。金伟良负责统稿。

由于本书作者水平有限,书中的疏漏在所难免,敬请读者不吝赐教。

A handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '金', '伟', and '良' (Jin Weiliang).

2002 年 6 月于求是园

目 录

第二版前言

第一版序

第一版前言

第 1 章 概论	1
1.1 混凝土结构耐久性的重要性	1
1.2 实际工程中的耐久性破坏现象	3
1.3 混凝土结构耐久性的研究与发展	7
1.4 混凝土结构耐久性的内涵	10
参考文献	11
第 2 章 服役环境	13
2.1 自然环境	13
2.2 人为环境	21
2.3 环境区划	24
参考文献	33
第 3 章 耐久性试验方法	36
3.1 实际构件试验法	36
3.2 模拟试验法	38
3.3 常用耐久性参数的检测	42
参考文献	50
第 4 章 混凝土的碳化作用	52
4.1 混凝土碳化机理	52
4.2 碳化对混凝土力学性能的影响	53
4.3 碳化规律	56
4.4 部分碳化区	59
4.5 防止混凝土碳化的措施	63
参考文献	63
第 5 章 混凝土的氯盐侵蚀	65
5.1 氯离子在混凝土中的输运机理	65
5.2 氯离子在混凝土内的输运模型	69
5.3 氯离子在混凝土结构中的空间分布	71

5.4 防止氯盐侵蚀的措施·····	77
参考文献·····	78
第6章 混凝土的冻融作用 ·····	80
6.1 混凝土的孔结构及结冰规律·····	80
6.2 冻融破坏机理·····	82
6.3 冻融循环对混凝土力学性能的影响·····	85
6.4 影响混凝土抗冻性的主要因素及抗冻措施·····	91
参考文献·····	96
第7章 混凝土的碱-集料反应 ·····	98
7.1 碱-集料反应发现与研究发展·····	98
7.2 碱-集料反应的机理·····	100
7.3 碱-集料反应对结构的影响·····	103
7.4 碱-集料反应发生条件·····	104
7.5 碱-集料反应破坏特征·····	106
7.6 防止碱-集料反应的措施·····	108
参考文献·····	110
第8章 混凝土其他环境侵蚀 ·····	111
8.1 硫酸盐侵蚀环境·····	111
8.2 硝酸盐侵蚀环境·····	119
8.3 风蚀·····	122
8.4 水蚀·····	122
参考文献·····	123
第9章 混凝土中钢筋的锈蚀 ·····	126
9.1 混凝土中钢筋锈蚀机理·····	126
9.2 钢筋锈蚀的临界阈值·····	129
9.3 钢筋锈蚀率预测模型·····	135
9.4 钢筋锈蚀的检测与原位监测·····	140
9.5 钢筋锈蚀表征和力学性能·····	144
参考文献·····	156
第10章 混凝土结构锈胀破坏 ·····	160
10.1 锈胀开裂试验研究·····	161
10.2 锈胀开裂模型研究·····	163
10.3 混凝土锈胀开裂全过程损伤分析·····	165
10.4 钢筋表面的非均匀锈层模型·····	172

参考文献	179
第 11 章 锈蚀钢筋与混凝土之间的黏结性能	182
11.1 锈蚀钢筋的极限黏结力承载力试验研究	182
11.2 锈蚀钢筋的极限黏结力承载力预测模型	192
11.3 锚固对锈蚀钢筋与混凝土之间黏结性能的影响	195
参考文献	196
第 12 章 锈蚀钢筋混凝土构件力学性能研究	198
12.1 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯性能	198
12.2 锈蚀钢筋混凝土梁抗剪性能	204
12.3 锈蚀钢筋混凝土柱抗压性能	213
参考文献	225
第 13 章 横向开裂混凝土结构耐久性能	227
13.1 横向开裂后混凝土的碳化	227
13.2 氯离子在横向开裂混凝土内的运输	228
13.3 横向开裂混凝土内的钢筋腐蚀性能	233
13.4 横向开裂混凝土的冻融循环性能	237
13.5 提高混凝土抗裂和限裂的措施	237
参考文献	244
第 14 章 预应力混凝土结构的耐久性	246
14.1 概述	246
14.2 影响预应力混凝土结构耐久性的主要因素	249
14.3 腐蚀预应力混凝土结构力学性能	253
14.4 提高预应力混凝土结构耐久性的措施	262
参考文献	262
第 15 章 混凝土结构耐久性设计	264
15.1 耐久性设计概念与理论	264
15.2 耐久性极限状态	265
15.3 耐久性设计方法	267
15.4 耐久性环境设计区划	271
15.5 基于全寿命理念的耐久性设计	275
参考文献	280
第 16 章 耐久性检测与监测	282
16.1 耐久性检测方法	282
16.2 耐久性监测方法与工程应用	288

参考文献	298
第 17 章 耐久性寿命预测与评估	299
17.1 耐久性寿命预测方法	299
17.2 耐久性评估与鉴定方法	307
17.3 耐久性检测与评估工程实例	320
参考文献	326
第 18 章 耐久性提升技术	327
18.1 提高耐久性的基本措施	327
18.2 提高耐久性的附加措施	335
18.3 既有混凝土结构的耐久性提升技术	340
参考文献	347
附录 1 常用混凝土结构耐久性英文词汇	349
附录 2 2003~2013 年混凝土结构耐久性方向的浙江大学学位论文	354
索引	356

第 1 章 概 论

1.1 混凝土结构耐久性的重要性

众所周知,混凝土结构结合了钢筋与混凝土的优点,造价较低,是土木工程结构设计中的首选形式,其应用范围非常广泛^[1]。虽然随着新的结构计算理论的提出和新型建筑材料的出现,将来还会出现许多新的结构形式,但可以肯定的是,混凝土结构仍然是最常用的结构形式之一。

当然,这并不说明混凝土结构是十全十美的。事实上,从混凝土应用于建筑工程至今的近 200 年间,大量的混凝土结构由于各种各样的原因而提前失效,达不到预定的服役年限。这其中有的是由于结构设计的抗力不足造成的,有的是由于使用荷载的不利变化造成的,但更多的是由于结构的耐久性不足导致的。特别是海洋及近海地区的混凝土结构,由于海洋环境对混凝土结构的腐蚀,尤其是钢筋的锈蚀而造成结构的早期损坏,丧失了结构的耐久性能,这已成为实际工程失效的重要问题。早期损坏的结构需要花费大量的财力进行维修补强,甚至造成停工停产的巨大经济损失。我国南方城市某港于 1956 年建成的一座码头,建成后于 1963 年对其调查时发现梁底部分有顺筋锈裂,虽然于次年进行了一次修补,但是使用 20 年后发现钢筋锈蚀更为严重,底板混凝土因钢筋锈蚀而大面积脱落,露筋面积占底板的 21%,经多方论证后,不得不将上部结构拆除^[2]。因此,耐久性失效是导致混凝土结构在正常使用状态下失效的最主要原因。

通过进一步的分析可以发现,引起结构耐久性失效的原因存在于结构的设计、施工及维护的各个环节。首先,虽然在许多国家的规范中都明确规定钢筋混凝土结构必须具备安全性、适用性与耐久性,但是结构耐久性问题并没有充分地体现在具体的设计条文之中,而是在构造措施上对环境和耐久性问题予以考虑,使得结构设计中普遍存在着重强度设计而轻耐久性设计。以中国 1989 年颁布的设计规范^[3]为例,其中除了一些保证混凝土结构耐久性的构造措施,只是在正常使用极限状态验算中控制了一些与耐久性设计有关的参数,如混凝土结构的裂缝宽度等,但这些参数的控制对结构耐久性设计不起决定性的作用,并且这些参数也会随时间而变化^[4]。其次,不合格的施工也会影响结构的耐久性,常见的施工问题如混凝土质量不合格、钢筋保护层厚度不足都可能导致钢筋提前锈蚀。另外,在结构的使用过程中,没有合理的维护造成的结构耐久性降低也是不容忽视的,如对结构的碰撞、磨损以及使用环境的劣化,这一切都会使结构无法达到预定的使用年限。

国内外统计资料表明,由于混凝土结构耐久性病害而导致的损失是巨大的,并且耐久性问题越来越严重。据调查,美国 1975 年由于腐蚀引起的损失达 700 亿美元,1985 年则达 1680 亿美元^[5],目前整个混凝土工程的价值约为 6 万亿美元,而今后每年用于维修或重建的费用预计将高达 3000 亿美元^[6],英国英格兰岛中部环形快车道上 11 座混凝土高

架桥,当初建造费为 2800 万英镑,到 1989 年因为维修而耗资 4500 万英镑,是当初造价的 1.6 倍,估计以后 15 年还要耗资 1.2 亿英镑,累计接近当初造价的 6 倍^[7],这反映了结构耐久性造成的损失大大超过了人们的估计。国外学者曾用“五倍定律”形象地描述了混凝土结构耐久性设计的重要性,即设计阶段对钢筋防护方面节省 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。在我国,混凝土结构耐久性问题也十分严重,据 1986 年国家统计局和建设部对全国城乡 28 个省、市、自治区的 323 个城市和 5000 个镇进行普查的结果^[8],目前我国已有城镇房屋建筑面积 46.76 亿 m^2 ,占全部房屋建筑面积的 60%,已有工业厂房约 5 亿 m^2 ,覆盖的国有固定资产超过 5000 亿元,这些建筑物中约有 23 亿 m^2 需要分期分批进行评估与加固。而其中半数以上急需维修加固之后才能正常使用。另外据 1994 年铁路秋检统计^[9],在全国共有 6137 座铁路桥存在着不同程度的损伤,占铁路桥总数的 18.8%。

由此可见,混凝土结构耐久性问题是一个十分重要也是迫切需要解决的问题。鉴于该问题的重要性,国内外学者已经在混凝土结构耐久性领域开展了大量的科研工作,国内外研究进展将在本章 1.3 节中详述。这里,想要强调混凝土结构耐久性的研究是具有时间和空间尺度的。对混凝土结构来说,其耐久性失效过程应该包含结构建造、使用和老化的生命全过程,其耐久性研究也应涉及结构生命全过程的每个环节(图 1-1),应该基于结构的全寿命开展混凝土结构耐久性研究。同时,传统的研究往往将混凝土结构的耐久性失效归属于材料问题,而忽视了混凝土结构耐久性所应具有“结构”属性,混凝土结构耐久性的研究必须在材料层次的研究成果基础上,全面考虑研究对象的“结构”特点(图 1-2),从材料工程、结构工程和非均质材料力学等学科的交叉领域,对混凝土结构耐久性开展研究,建立与时间效应相一致的混凝土结构耐久性全寿命周期研究体系,这对于完善混凝土结构耐久性理论体系具有重要的作用,对指导实际混凝土工程设计、施工和维护也具有重要的应用价值。

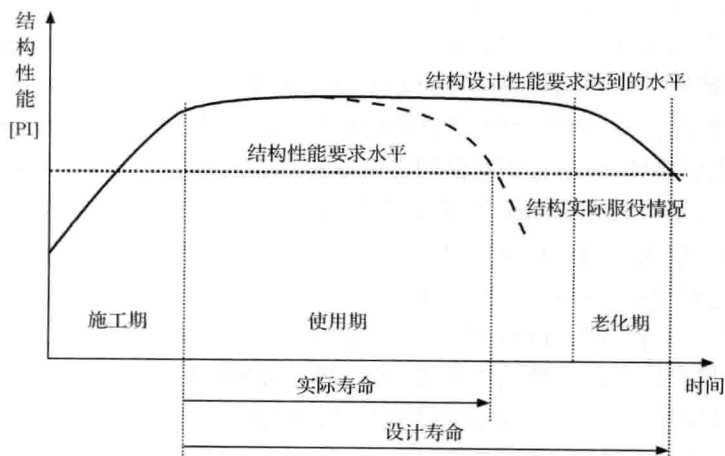


图 1-1 基于全寿命的混凝土结构耐久性研究

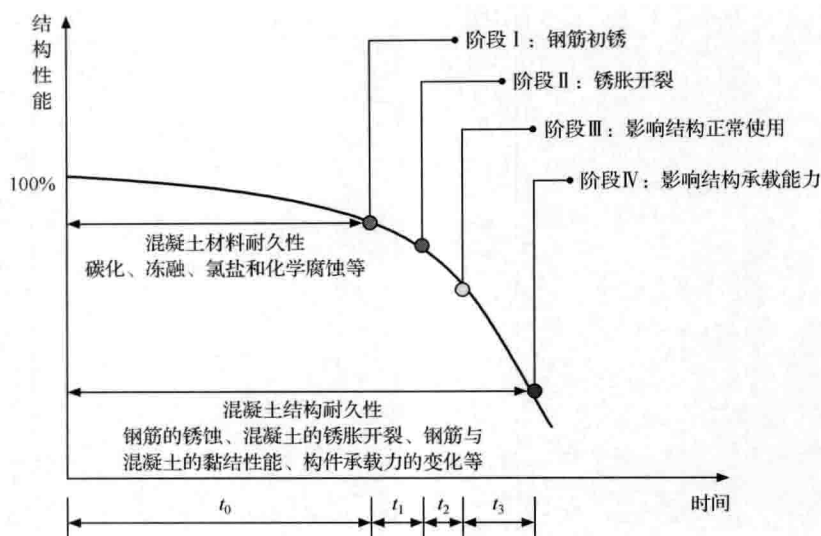


图 1-2 混凝土材料耐久性与结构耐久性的联系与区别

1.2 实际工程中的耐久性破坏现象

混凝土结构在各种各样的环境下服役,不同的服役环境会对混凝土结构造成不同类型的耐久性破坏现象;随着结构服役时间的增加,耐久性问题会越来越显现出来,从而影响结构的使用功能,甚至安全性。下面将阐述不同服役环境下实际混凝土工程的一些耐久性失效现象,旨在说明混凝土结构耐久性问题的普遍性、严重性。

1. 盐雾侵蚀对结构的破坏

浙江某发电厂,位于东海之滨的宁波市镇海区。厂区处于甬江下游河口段,属于海洋性气候,从建设电厂至今已 36 年。由于该电厂常年受盐雾侵蚀,在氯离子的持续侵蚀作用下,各期混凝土结构均有混凝土开裂、剥落及钢筋锈蚀等现象,在混凝土保护层出现了较宽的纵向锈胀裂缝,钢筋有严重锈蚀。经过调查发现:升压站的主要受力构件中,70% 的混凝土柱和 25% 的混凝土梁有较严重的纵向裂缝和露筋等耐久性损伤(图 1-3(a));桁架耐久性损伤最为严重,100% 的桁架都有严重的表面混凝土剥蚀、钢筋外露现象(图 1-3(b))。

2. 潮湿环境对结构的破坏

浙江金华某大桥位于浙江省金华地区兰溪市内,建于 1975 年,为混凝土双曲拱桥结构,横跨兰江。该桥的耐久性损伤主要是由于桥梁的排水系统工作情况不好,桥面积水渗水,而引起的桥梁混凝土构件耐久性损伤:多处立柱与盖梁交界处出现竖向裂缝,部分立柱甚至出现露筋情况,边角处有混凝土保护层大块剥落现象(图 1-4(a));由于排水系统的问题,框构盖梁端部处于潮湿状态,出现混凝土大块剥落,钢筋严重锈蚀情况(图 1-4(b))。



图 1-3 盐雾侵蚀环境下混凝土结构物的耐久性问题

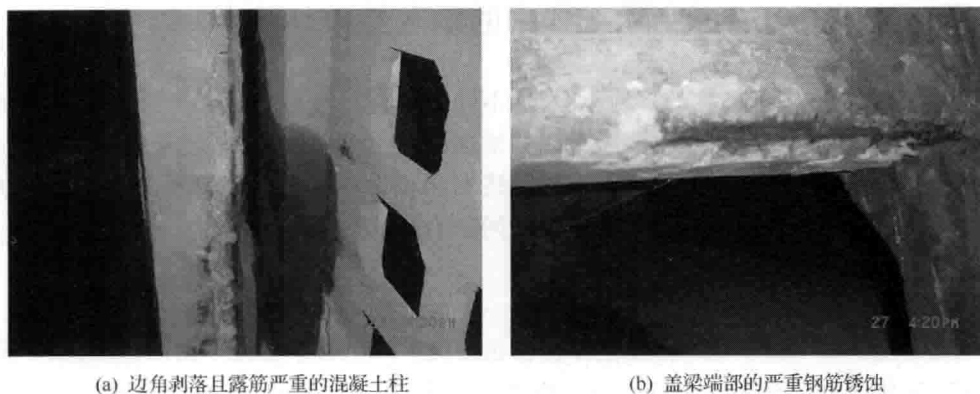


图 1-4 潮湿侵蚀环境下混凝土结构物的耐久性问题

3. 海水直接作用对结构的破坏

混凝土码头工程直接与海水接触,潮汐区的混凝土构件处于最恶劣的氯离子侵蚀环境,调查发现已经工作二三十年的码头普遍存在较为严重的耐久性问题。例如,舟山某码头建成至今使用二十几年(图 1-5),其各个部位均已出现了不同程度的腐蚀损坏,尤其是上部结构已经到了严重损坏的程度:码头横梁出现大面积锈斑,大部分横梁梁底沿主筋方向出现明显的裂缝,裂宽在 1~3mm,码头横梁上搁置的 π 形板出现严重锈蚀,构件沿主筋方向出现大量顺筋裂缝,70%的 π 形板锈胀裂缝宽度大于 3mm,其余 π 形板的顺筋锈胀裂缝宽度在 1~3mm。该码头为了继续使用,必须要进行加固维修。

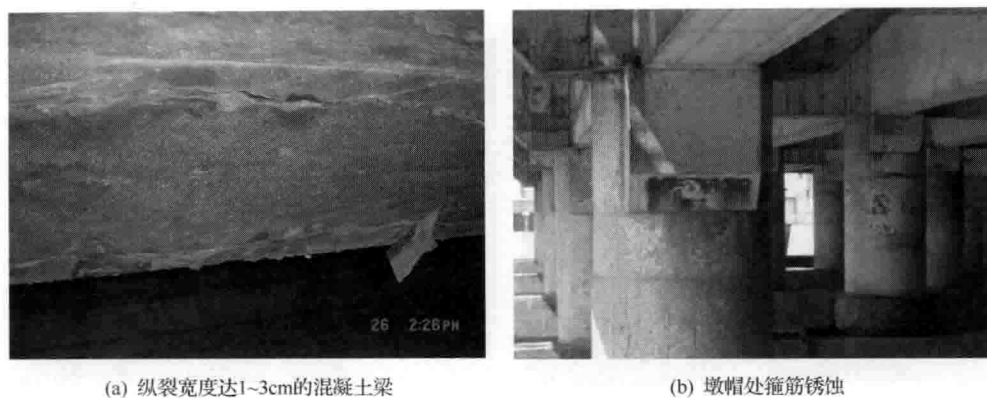


图 1-5 海水直接作用下混凝土结构物的耐久性问题

4. 其他环境中的结构耐久性破坏

图 1-6 为 20 世纪 70 年代建造的某商场大楼中钢筋锈蚀情况,从图中可以看出,大气环境中服役的结构楼面板和梁中钢筋锈蚀严重,此大楼在进行一定的改造加固后也在继续使用中。图 1-7 和图 1-8 分别反映了冻融破坏和碱-集料反应对结构产生的影响。图 1-9 则体现了在化学腐蚀环境条件下,混凝土结构遭受的耐久性损伤。

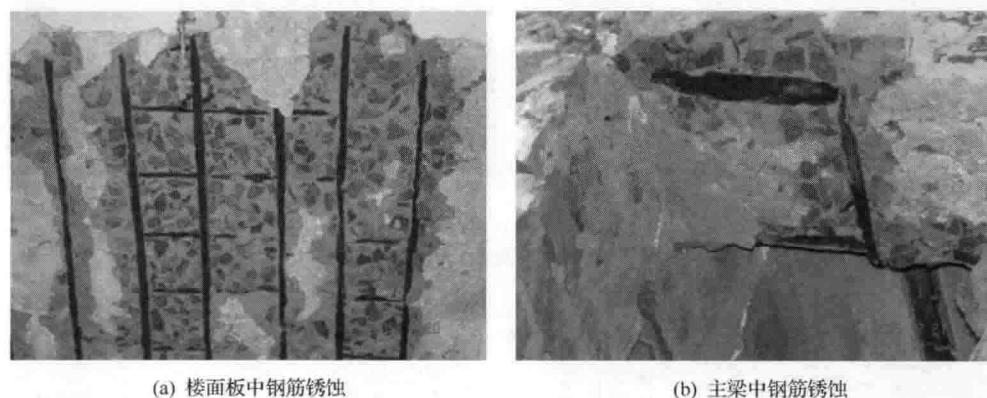


图 1-6 大气环境中服役的某商场大楼中钢筋锈蚀情况

图 1-10 为 2008 年汶川大地震震后从损坏结构中发现的钢筋锈蚀现象,虽然汶川地震实属罕见,不能将地震中结构的破坏完全归因于钢筋锈蚀,但由于钢筋锈蚀会导致结构的刚度、滞回特性、耗能能力、延性、屈服强度、承载力降低,因此,可以说锈蚀也是导致钢筋混凝土结构破坏的一个重要原因。

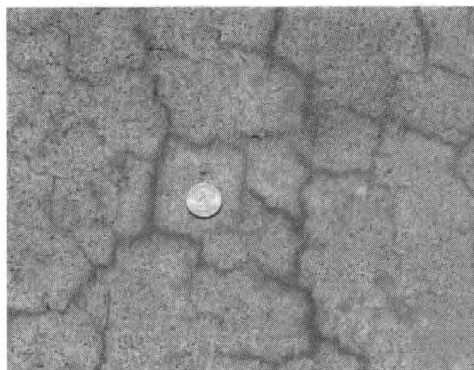


(a) 雨篷角部的冻融破坏

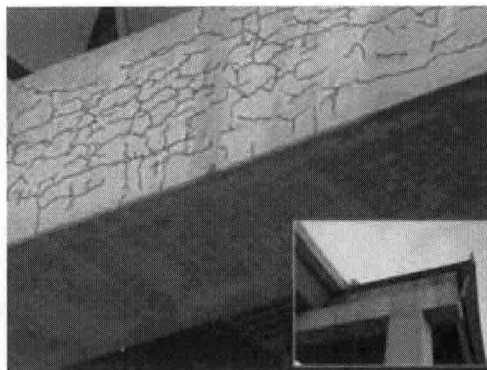


(b) 遭受冻融破坏的桥梁

图 1-7 寒冷地区可以观察到的冻融破坏现象



(a) 碱-集料反应产生的“龟裂”裂缝

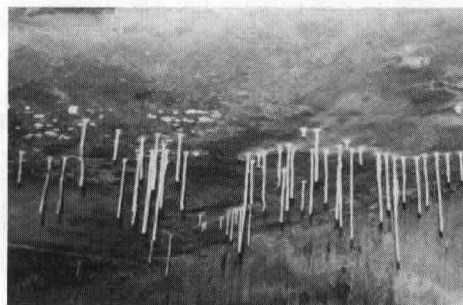


(b) 发生碱-集料反应的梁

图 1-8 碱-集料反应对结构的影响



(a) 污水对混凝土结构的影响



(b) 温泉对混凝土结构的腐蚀

图 1-9 化学腐蚀环境对混凝土结构的影响