

9

混凝土结构耐久性

Durability of Concrete Structures

金伟良 赵羽习 著



A1021562

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是对作者从事混凝土结构耐久性研究的总结,同时对国内外有关研究进行了综述。全书共十章,内容包括混凝土碳化、氯离子的侵入、混凝土的抗渗性与抗冻性、混凝土的碱-集料反应、钢筋的锈蚀、混凝土构件的耐久性、基于正常使用状态的混凝土构件可靠度计算、混凝土结构耐久性设计、评估和构件防护,以及混凝土结构耐久性研究的发展等。还介绍了亚洲混凝土模式规范(ACMC-2001)和英国标准 BS7543“建筑物与建筑构件、产品及组件耐久性指南”。

本书可供土木建筑、港口水运、水利工程、桥梁市政、建筑材料、工程管理等专业的科技人员、大专院校师生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构耐久性/金伟良,赵羽习著. —北京:科学出版社,2002
ISBN 7-03-010748-9

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 066824 号

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>

新蕾印刷厂 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:720×1000 B5

2002年9月第一次印刷 印张:15 1/4

印数:1—3 000 字数:291 000

定价:34.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

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;第二章到第六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分别介绍耐久性的基础理论与研究成果;第七章重点研究了钢筋锈胀力、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;第八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;第九章介绍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。

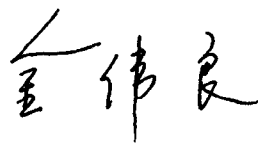
本书的主要研究是针对大气环境下的混凝土结构耐久性,而混凝土结构最为严重的外部环境则是氯离子的腐蚀。我国海岸线漫长,沿海地区的建筑物密集,暴露在氯离子环境下的混凝土结构数量巨大。因此,氯离子腐蚀混凝土而影响混凝土结构耐久性已成为急需深入研究的问题,也是我们要做的后续研究工作。

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。

全书共十章,金伟良编写第一、二、六、七、九、十章及附录 1,赵羽习编写第三、四、五、八章及附录 2。金伟良负责统稿。

由于本书作者水平有限,书中的错误和疏漏在所难免,敬请读者不吝赐教。

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

2002 年 6 月于求是园

目 录

序

前言

主要符号

第一章 概述	1
1.1 混凝土结构耐久性的重要性	1
1.2 混凝土结构耐久性的研究现状	7
1.3 混凝土结构耐久性研究的主要内容	9
参考文献	12
第二章 混凝土的碳化	16
2.1 混凝土的中性化	16
2.2 混凝土碳化的研究	17
2.3 混凝土室内快速碳化试验	19
2.4 混凝土碳化的 X 衍射试验	21
2.5 部分碳化区对碳化规律的影响	24
2.6 混凝土碳化指数的不确定性	26
2.7 基于函数型神经网络的混凝土碳化分析	31
2.8 碳化深度和混凝土强度之间的关系分析	41
参考文献	46
第三章 氯离子对混凝土结构的侵蚀	48
3.1 氯离子存在的广泛性	48
3.2 氯离子对混凝土结构的危害	49
3.3 氯离子对钢筋锈蚀的机理	54
3.4 氯离子侵入模型	55
3.5 氯离子腐蚀的防护措施	66
参考文献	68
第四章 混凝土的抗渗性与抗冻性	70
4.1 混凝土的抗渗性和孔结构	70
4.2 混凝土抗渗性的影响因素	71
4.3 混凝土抗渗指标和抗渗措施	73
4.4 混凝土的冻害及其机理	74

• v •

4.5 混凝土抗冻性的主要影响因素	76
4.6 混凝土的抗冻指标和抗冻措施	81
参考文献	83
第五章 混凝土的碱-集料反应	84
5.1 碱-集料反应的机理	84
5.2 碱-集料反应的发生条件	85
5.3 碱-集料反应的破坏特征	87
5.4 碱-集料反应的主要影响因素	90
5.5 防止碱-集料反应的措施	91
参考文献	92
第六章 钢筋的锈蚀	93
6.1 混凝土中钢筋锈蚀的机理	93
6.2 影响钢筋锈蚀的因素	96
6.3 锈蚀钢筋力学性能的变化	98
6.4 钢筋锈蚀的检测	99
6.5 钢筋锈蚀率预测模型	100
6.6 钢筋锈蚀率预测模型的分析	104
参考文献	108
第七章 混凝土构件的耐久性	110
7.1 钢筋胀力模型	110
7.2 钢筋与混凝土黏结的时变性能	121
7.3 锈蚀钢筋混凝土梁的受弯承载力	136
参考文献	141
第八章 基于正常使用极限状态的混凝土结构构件可靠度	144
8.1 基于可靠度理论的工程结构设计方法	144
8.2 基于正常使用极限状态的混凝土结构构件可靠度	146
参考文献	155
第九章 混凝土结构耐久性设计、评估和维护	156
9.1 混凝土结构耐久性设计	156
9.2 混凝土结构耐久性的检测评估方法	156
9.3 混凝土结构耐久性检测	158
9.4 混凝土结构耐久性鉴定评估	166
9.5 提高混凝土结构耐久性的措施	178
参考文献	186
第十章 混凝土结构耐久性研究的发展	187

10.1 规范对混凝土结构耐久性的规定	187
10.2 混凝土结构耐久性研究的发展	190
参考文献	193
附录 1 亚洲混凝土模式规范(ACMC2001)简介	194
附录 2 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 ...	220

CONTENTS

Foreword

Preface

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Importance of Durability of Concrete Structures	1
1.2 Research Situation of Durability of Concrete Structures	7
1.3 Research Subjects of Durability of Concrete Structures	9
References	12
Chapter 2 Carbonation of Concrete	16
2.1 Neutralization of Concrete	16
2.2 Studies on Carbonation of Concrete	17
2.3 High-speed Carbonation Test of Concrete	19
2.4 X-Diffraction Test of Carbonized Concrete	21
2.5 Effect of Semi-carbonation Zone on Carbonation of Concrete	24
2.6 Uncertainty of Carbonation Index of Concrete	26
2.7 Analysis of Concrete Carbonization Based on Functional-link Neural Netowrk	31
2.8 Relationship between Depth of Concrete Carbonization and Concrete Strength	41
References	46
Chapter 3 Erosion of Chloride Ion	48
3.1 Existence of Chloride Ion	48
3.2 Harmfulness of Chloride Ion	49
3.3 Mechanism of Chloride Ion Action on Steel Bar	54
3.4 Erosion Model of Chloride Ion	55
3.5 Protection from Erosion of Chloride Ion	66
References	68
Chapter 4 Permeability and Frost Damage of Concrete	70
4.1 Permeability of Concrete	70
4.2 Influencing Factors on Permeable Resistance	71
4.3 Criterion of Permeable Resistance and Measures of Permeable	

Resistance	73
4.4 Mechanism of Frost Damage	74
4.5 Influencing Factors on Freezing Resistance	76
4.6 Criterion of Freezing Resistance and Measures of Freezing Resistance	81
References	83
Chapter 5 Alkali-aggregate Reaction of Concrete	84
5.1 Mechanism of Alkali-aggregate Reaction	84
5.2 Condition of Alkali-aggregate Reaction	85
5.3 Characteristics of Alkali-aggregate Reaction	87
5.4 Influencing Factors on Alkali-aggregate Reaction	90
5.5 Measures of Protection from Alkali-aggregate Reaction	91
References	92
Chapter 6 Reinforcement Corrosion	93
6.1 Mechanism of Reinforcement Corrosion	93
6.2 Influencing Factors on Alkali-aggregate Reaction	96
6.3 Mechanical Properties of Corroded Steel Bar	98
6.4 Detection of Reinforcement Corrosion	99
6.5 Forecast-Model of Reinforcement Corrosion	100
6.6 Analysis on Model of Reinforcement Corrosion	104
References	108
Chapter 7 Durability of Concrete Members	110
7.1 Model of Corroded Expansion Force	110
7.2 Time-depending Bond Stress between Concrete and Steel Bar ...	121
7.3 Bending Strength of Corroded Reinforced Concrete Beams	136
References	141
Chapter 8 Reliability based on Serviceability limited State for Concrete Structural Members	144
8.1 Reliability Design of Concrete Structures	144
8.2 Reliability Based on Serviceability Limited State for Concrete Structural Members	146
References	155
Chapter 9 Durability Design, Evaluation and Protection of Concrete Structures	156
9.1 Durable Design of Concrete Structures	156

9.2	Evaluation Procedure of Concrete Structures	156
9.3	Detection of Concrete Structures	158
9.4	Evaluation of Concrete Structures	166
9.5	Measures to Improve Durability of Concrete Structures	178
	References	186
Chapter 10	Expectation of Durability of Concrete Structures	187
10.1	Contents of Durability of Concrete Structures in Chinese Code	187
10.2	Future of Durability of Concrete Structures	190
	References	193
Appendix 1	Introduction of Asian Concrete Model Code 2001(ACMC2001)	194
Appendix 2	Introduction of Guide to Durability of Buildings and Building Elements, Produces and Components(Introduction of BS7543: 1992)	220

第一章 概 述

1.1 混凝土结构耐久性的重要性

1.1.1 混凝土结构耐久性问题不容忽视

众所周知,钢筋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。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,钢筋混凝土结构仍然是新世纪最常用的结构形式之一^[1.1]。

当然,这并不是说钢筋混凝土结构是十全十美的。事实上,从混凝土应用于土木工程至今的 150 年间,大量的钢筋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引起的,但更多的是由于结构的耐久性不足导致的;特别是沿海及近海地区的混凝土结构,由于海洋环境对混凝土的腐蚀,导致钢筋锈蚀而使结构发生早期损坏,丧失了结构的耐久性能,已成为实际工程中的重要问题。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。例如,我国南方城市湛江港于 1956 年建成的一座码头,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%,鉴于码头耐久性的严重不足以及码头继续向前位移可能会导致的安全问题,经多方论证后,不得不将上部结构拆除^[1.2]。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之一。

所谓混凝土结构耐久性,是指混凝土结构在自然环境、使用环境及材料内部因素的作用下,在设计要求的目标使用期内,不需要花费大量资金加固处理而保持其安全、使用功能和外观要求的能力。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,这一宗旨并没有充分地体现在具体的设计条文中,使得在以往的乃至现在的工程结构设计中普遍存在着重强度设计而轻耐久性设计的现象。以我国 1989 年颁布的混凝土设计规范^[1.3]为例,该规范除了一些保证混凝土结构耐久性构造措施之外,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并不起决定性的作用,并且这些参数也会随时间而变化^[1.4]。同时,不合格的施工也会影响混凝土结构的耐久性,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有可能引起钢筋提前锈蚀。另外,在混凝土结构的使用过程中,由于没有合理的维护而造成结构耐久性的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,都会使混凝土结构无法达到预定的使用年限。

国内外统计资料表明,由于混凝土结构的耐久性病害而导致的经济损失是巨大的,并且耐久性问题会越来越严重。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^[1.5],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^[1.6]。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 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^[1.7],这反映了混凝土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,混凝土结构耐久性的问题也十分严重。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^[1.8],目前我国已有城镇房屋建筑面积 $46.76 \times 10^8 \text{m}^2$,占全部房屋建筑面积的 60%,已有工业厂房约 $5 \times 10^8 \text{m}^2$,覆盖的国有固定资产超过 5000 亿元,这些建筑物中约有 $23 \times 10^8 \text{m}^2$ 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 年铁路秋季检查统计^[1.9],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%。

因此,钢筋混凝土结构耐久性问题是一个十分重要而迫切需要加以解决的问题,通过开展对钢筋混凝土结构耐久性的研究,一方面能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;另一方面也可对新建工程项目进行耐久性设计与研究,揭示影响结构寿命的内部与外部因素,从而提高工程的设计水平和施工质量,确保混凝土结构生命全过程的正常工作。因此,它既有服务于服役结构的现实意义,又有指导待建结构进行耐久性设计的重要作用,同时,对于丰富和发展钢筋混凝土结构可靠度理论也具有一定的理论价值^[1.10]。

1.1.2 耐久性破坏的典型工程实例

以下笔者近期对浙江省内一些耐久性破坏的典型工程实例作的调查情况表明,我国目前混凝土结构耐久性问题十分严重,必须给予正确对待和处理。

(1) 某电厂升压站混凝土结构的耐久性破坏。

浙江某一发电站,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,已有近 26 年。由于该电厂在氯离子的持续侵蚀作用下,各个建设时期的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%混凝土柱和 25%混凝土梁有较严重的纵向裂缝和露筋等耐久性损伤(图 1.1、1.2);牛腿表面普遍有混凝土剥蚀现象,部分牛腿表面露筋严重(图 1.3);桁架耐久性损伤最为严重,几乎 100%桁架都有严重的表面混凝土剥蚀,钢筋外露现象(图 1.4)。

(2) 某大桥混凝土结构的耐久性破坏。

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 1.5);框构盖梁端部普遍出现混凝土大块剥落,钢筋严重锈蚀情况(图 1.6)。

(3) 某码头混凝土结构的耐久性破坏。

浙江省舟山市是由座落在我国东南沿海与长江交汇处的一群岛屿组成的。舟山港湾众多,航道纵横,水深浪平,是中国屈指可数的天然深水良港。目前舟山已拥



图 1.1 箍筋暴露的混凝土柱

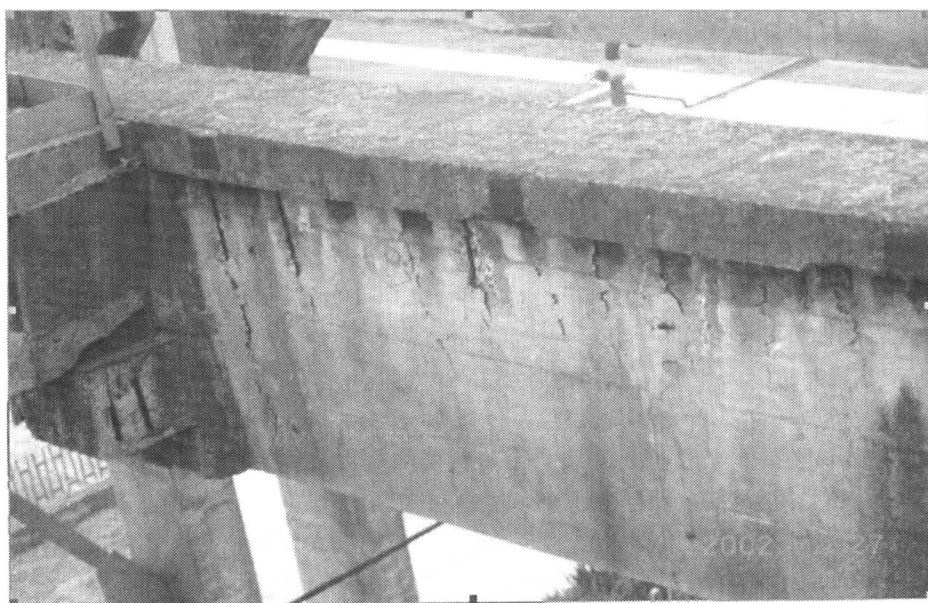


图 1.2 箍筋暴露的混凝土梁

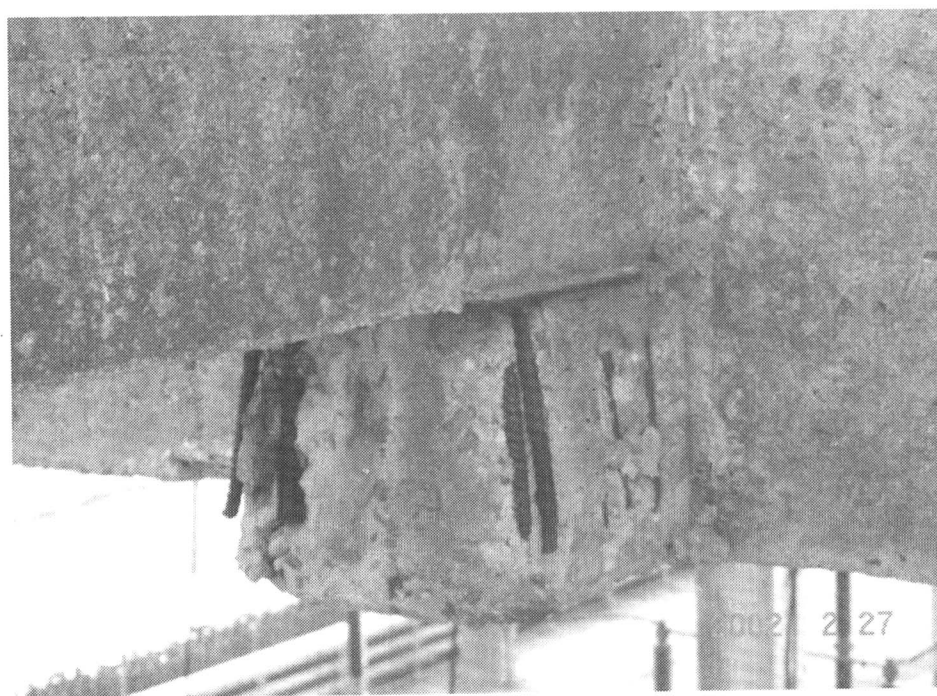


图 1.3 露筋严重的混凝土牛腿



图 1.4 露筋严重的混凝土桁架



图 1.5 边角剥落且露筋严重的混凝土柱



图 1.6 边角剥落且露筋严重的混凝土盖梁

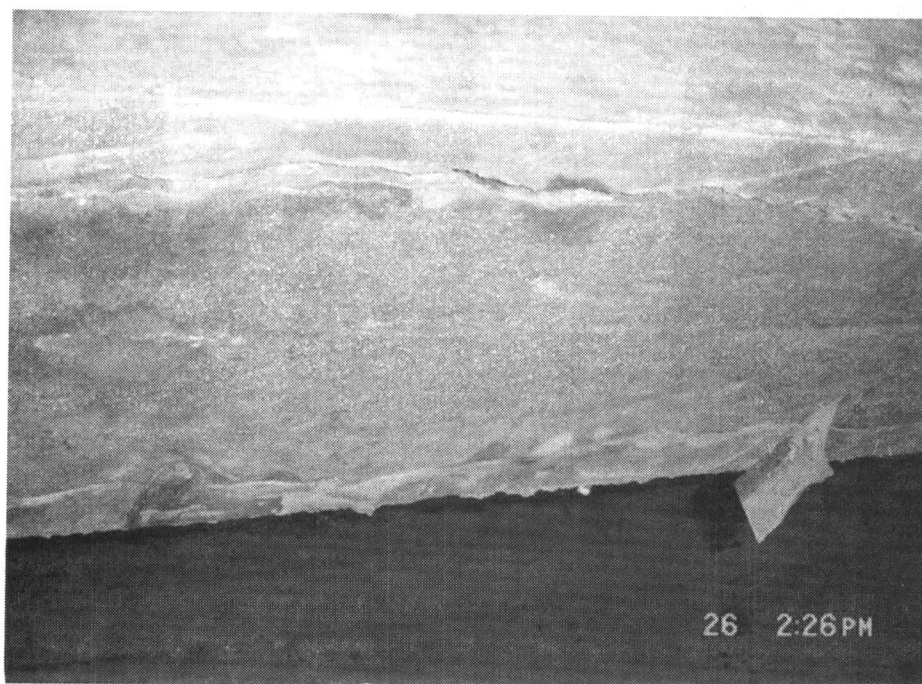


图 1.7 纵裂宽度达 3~5cm 的混凝土梁

有码头 159 个。这些码头直接与海水接触,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码头的普遍存在较为严重的耐久性问题(图 1.7、1.8)。例如舟山某码头建成至今使用二十几年,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,裂缝宽度在 1~3mm,码头横梁上搁置的 π 型板出现严重锈蚀,构件沿主筋方向出现大量顺筋裂缝,70% 的 π 型板锈胀裂缝宽度大于 3mm,其余 π 型板的顺筋锈胀裂缝宽度 1~3mm 之间。



图 1.8 露筋严重的混凝土构件

1.2 混凝土结构耐久性的研究现状

1824 年,随着波特兰水泥的问世,人类便开始了应用混凝土建造建筑物的历史,同时,混凝土结构的耐久性问题也随之出现。早期,波特兰水泥主要应用于兴建大量的海岸防波堤、码头、灯塔等,这些构筑物长期经受外部介质的强烈影响,其中包括物理作用(如波浪冲击,泥砂磨蚀以及冰冻作用)的影响和化学作用(溶解在海水中的盐的作用)的影响。这些作用均导致上述构筑物的迅速破坏,因此,早期混凝土耐久性的研究主要是集中在了解海上构筑物中混凝土的腐蚀情况^[1,10]。在 19 世纪 40 年代,为了探索在那些年代建成的码头被海水毁坏的原因,卓越的法国工程