



混凝土结构耐久性 概论

张 誉 蒋利学 张伟平 屈文俊 编著
上海科学技术出版社

HUNNINGTU JIEGOU
NAIJUXING
GAILUN

混凝土结构耐久性概论

DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES

张 誉 蒋利学 编著
张伟平 屈文俊

上海科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土结构耐久性概论/张誉等编著. —上海:上海
科学技术出版社, 2003. 12
ISBN 7-5323-7306-1

I. 混... II. 张... III. 混凝土结构—耐用性—概
论 IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 095140 号

世纪出版集团 出版发行
上海科学技术出版社

(上海瑞金二路 450 号 邮政编码 200020)

苏州望电印刷有限公司印刷 新华书店上海发行所经销

2003 年 12 月第 1 版 2003 年 12 月第 1 次印刷

开本 787×1092 小 1/16 印张 23.5 插页 4 字数 345 千
印数: 1—4 100 定价: 49.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向承印厂联系调换

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪，科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略，上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”，资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

内 容 简 介

本书根据作者的混凝土结构耐久性研究成果,并参阅国内外文献写成,试图对混凝土结构耐久性研究现状及其有待深入探讨的问题作一个全面阐述。主要内容有混凝土结构耐久性基本概念、国内外混凝土结构耐久性的研究概况、材料耐久性损伤机理、在役结构的耐久性评估、拟建结构耐久性设计、提高混凝土结构耐久性的措施等。

本书可供从事土建专业科研、设计和施工的科技人员参考,亦可作为土建专业研究生教学参考书。

前 言

混凝土结构在长期自然环境和条件下会逐渐老化、损伤甚至破坏,影响到结构物使用功能和安全,因此,结构耐久性是工程结构可靠性的重要内涵之一。

过去工程界对混凝土结构耐久性缺乏足够的认识,传统设计方法只侧重考虑结构使用阶段的安全性和使用性能,而对耐久性设计意识不强,且使用过程中忽视维修保养,以致结构物老化现象严重,很多建筑物处于提前退役局面。对在役建筑物如何评估其耐久性和剩余使用寿命,也尚无统一方法。严峻事实表明,混凝土结构耐久性的研究滞后于工程实践的需要,因此积极开展混凝土结构耐久性研究对国民经济建设具有重要意义。

有鉴于此,我们深感亟需在我国普及与提高混凝土结构耐久性这方面科技知识。笔者有幸曾参与国家重大基础性研究项目,对混凝土结构耐久性做过一些研究,对其重要性有初步认识,不揣冒昧试图将混凝土结构耐久性作个扼要、系统的阐述。本书力求少而精,兼顾原理与实用,并适当介绍一些文献,藉此抛砖引玉,与同行携手共同促进混凝土结构耐久性深入研究。

由于混凝土结构耐久性涉及的学科范围广泛和问题复杂,很多问题涉及技术经济政策,如何评判耐久性使用年限与耐久性可靠度水平等,尚有待研究解决,因此本书内容只能反映这个课题的当前发展水平,还不可能完全满足工程实践的要求。如能提供工程界借鉴参考,则不胜荣幸、深感欣慰。

本书由张誉(第1章、第5章、结语)、蒋利学(第2章)、张伟平(第3章)、屈文俊(第4章)共同编写,最后由张誉统稿。在编写过程中引用了很多兄弟单位的科研成果和文献,得到很多同行专家的支持,在此表示深深谢意。

作者对上海科技专著出版资金管理委员会给予的支持和资助、对上海科学技术出版社给予的热情帮助,一并表示衷心感谢。

本书的内容和观点,管见所及未必妥当,甚至错误,敬请同行专家和读者不吝指正。

DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES

Zhang Yu Jiang Lixue Zhang Weiping Qu Wenjun

Abstract

Reinforced concrete structures will deteriorate and damage because of the natural environment and the long-term usage. The deterioration of the structural behavior and the damage inside the structure will affect the safety and suitability of the structure. Therefore, the durability of structures is one of the important objectives for the reliability of engineering structures.

The fact now in China is that researches on the durability of reinforced concrete structures have lagged behind the needs of engineering practice. It will have a significant meaning to the nation's economical construction to conduct extensive research work on the durability for reinforced concrete structures. Based on this understanding, we think it highly urgent to popularize the scientific and technical knowledge about the durability of reinforced concrete structures. This is the main purpose for the authors to write this book.

In this book, the basic concepts and state-of-the-art of the durability for reinforced concrete structures are introduced first. Then, the damage mechanism of the materials, the durability assessment for existing structures, and the durability design for new built structures are discussed. Finally, some suggestions to improve the durability of reinforced concrete structures are proposed. The book can serve as the ref-

erence for professionals like researchers, designers and builders in civil engineering. It can also be used as a textbook for post-graduate students in civil engineering.

Contents

1. Introduction	1
1.1 The Significance of durability of concrete structures	1
1.2 General Survey	4
1.3 The influence factors on the durability of concrete structures	8
1.4 The research subjects on the durability of concrete structures	14
1.5 The damage examples on the durability of concrete structures	20
2. Deterioration of materials and durability of concrete structures	32
2.1 Carbonation of concrete	32
2.2 Corrosion of reinforcements in concrete	64
2.3 Alkali-aggregate reaction of concrete	91
2.4 Freeze-thaw destruction of concrete	104
2.5 Chemical corrosion	128
2.6 Surface abrasion of concrete	135
3. Durability assessment of concrete structures	143
3.1 Purposes and contents of durability assessment for existing concrete structures	143
3.2 Durability inspection of concrete structures	146
3.3 Deterioration of mechanical properties of reinforcement and concrete due to durability damages	160
3.4 Bond-slip behavior of corroded reinforced concrete	169

3.5	Cover cracking in concrete structures due to bar corrosion	190
3.6	Assessment of structural behavior of reinforced concrete members under durability deterioration	206
3.7	Durability estimation of concrete structures	222
3.8	Service life prediction of reinforced concrete structures	237
4.	Durability design of concrete structures	255
4.1	Service life and the environment condition of structure	255
4.2	Principles and contents of durability design	259
4.3	Durability design based on durability limit state of concrete structure	262
4.4	Life-cycle design of concrete structures	265
4.5	Equal durability design of concrete structures	271
4.6	Optimum durability design of concrete bridge structures	279
5.	Technical measures to improve the durability of concrete structures	293
5.1	The ways to improve the durability of concrete structures	293
5.2	Improvement of structures design	295
5.3	Strengthening of construction management	317
5.4	Some measures to prevent the deterioration of concrete materials	322
Conclusions		337
References		340

第 1 章 混凝土结构 耐久性概述

1.1 混凝土结构耐久性的重要意义

1.1.1 混凝土结构耐久性的定义

最近我国新修订的《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068—2001)^[1]的总则中,明确指出结构在规定的设计使用年限内应满足下列功能要求:

- (1) 正常施工和正常使用时,能承受可能出现的各种作用;
- (2) 在正常使用时具有良好的工作性能;
- (3) 在正常维护下具有足够的耐久性能;
- (4) 在设计规定的偶然事件发生时及发生后,仍能保持必要的整体稳定性。

这四项功能中,第(1)、第(4)两项是结构安全性的要求,第(2)项是结构适用性的要求,第(3)项是结构耐久性的要求,统起来可概括为结构可靠性的要求。

根据上述规定,不难理解,结构的耐久性与其安全性、适用性属同一范畴,同样是保证结构可靠性不可缺乏的一个要求。

新修订的《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)^[2]的基本规定中,明确规定混凝土结构设计采用极限状态设计方法,并指出“整个结构或结构的一部分超过某一特定状态就不能满足设计规范的某一功能要求,此特定状态称为该功能的极限状态”。结构耐久性作为一项功能,按理应存在着耐久性极限状态。现行设计规范只划分成两个极限状态:承

载能力极限状态和正常使用极限状态,而将耐久性能的要求,列入在正常使用极限状态中考虑。这样一来,就容易产生误解,认为耐久性只是保证正常使用的要求。正如有的学者曾这样定义耐久性:“混凝土耐久性是在实际使用条件下抵抗各种环境因素作用,能长期保持外观的完整性和长久的使用性的能力”。而“CEB-FIP 模式规范(混凝土结构 1991)”中的耐久性设计原则是“混凝土结构应以这样方式设计、施工和使用,即在预定的环境影响下,混凝土结构在讲明或不讲明的时期内,保持其安全性、正常使用性和可接受的外观,不需要为维护 and 修理花费意想不到的高额费用”^[3]。

应该指出的是,混凝土结构耐久性是基于材料耐久性的进一步深化。混凝土结构在自然环境和条件下,随着时间的推移,材料逐渐老化和结构性能劣化,出现损伤甚至损坏,是一个不可逆的过程。它不是直接由力学因素引起的。首先是混凝土材料的物理化学作用的结果,继而影响到建筑物的使用功能和结构的承载力下降,最终会影响整个结构的安全。最明显的病害损伤事例,如混凝土结构受到含有氯离子介质的侵蚀,而导致钢筋锈蚀,严重的锈蚀会使混凝土开裂,不仅影响使用功能和外观,甚至使钢筋截面削弱,结构构件承载力下降,对结构安全性造成威胁。因此,对混凝土结构耐久性可定义为,结构在规定的使用年限内,在各种环境条件作用下,不需要额外的费用加固处理而保持其安全性、正常使用性和可接受的外观的能力。

1.1.2 研究混凝土结构耐久性的重要意义

混凝土是工程中用量最多的建筑材料,也是最主要的结构材料,钢筋混凝土结构已成为世界上应用最为广泛的结构形式。我国每年耗费在混凝土结构上的费用为 2 000 亿元以上^[4]。在人们的传统观念中总是认为钢筋混凝土结构是由最为耐久的混凝土材料浇筑而成,虽然钢筋易腐蚀,但有混凝土保护层,钢筋也不会发生锈蚀,因此,对钢筋混凝土结构的使用寿命期望值也是很高的,从而忽视了钢筋混凝土结构的耐久性问题,对钢筋混凝土结构耐久性的研究相对滞后,为此付出了巨大代价。

20 世纪 70 年代美国等一些国家就发现,20 世纪 50 年代以后修建的混凝土工程设施,尤其是使用在恶劣环境条件下的混凝土桥面板结构,出

现病害甚至损坏的现象比 20 年以前建造的结构还要严重。据美国报道,仅就桥梁而言,57.5 万座钢筋混凝土桥中有一半以上出现腐蚀破坏,40%承载力不足需要修复加固处理。美国标准局 1998 年调查表明,美国全年各种腐蚀损失约为 2 500 亿美元,其中混凝土桥梁修复费用为 1 550 亿美元。美国公路研究战略计划披露,到 20 世纪末,为更换或修复冬天撒除冰盐引起的破损公路混凝土桥面板,估计要耗资 4 000 亿美元,其中大部分是由钢筋锈蚀引起的。北欧、加拿大、澳大利亚都存在氯盐为主的盐害。据瑞士联邦公路局统计,瑞士公路系统约有 3 000 座桥梁,每年用于桥面检测及维护的费用达 8 000 万瑞士法郎,至于修理或更换的费用就更高^[5]。我国也存在盐害问题。漫长的海岸线上的海港码头,广阔的盐碱地带以及北方仍大量使用除冰盐的地区,都潜存盐害条件,我国尚缺乏完整的统计数据。据估计我国 1999 年底一年内由腐蚀造成的损失约在 1 800~3 600 亿元,其中钢筋腐蚀占 40%,约为 720~1 440 亿元。我国环境污染相当严重,工业生产过程排放的 SO_2 , 1988 年统计数据为 2 090 万 t,酸雨覆盖面达国土面积的 30%。

我国混凝土结构耐久性问题不容忽视。我国人口众多,过去为及时解决居住需要和促进工业生产,建造过不少质量不高的民用房屋和工业厂房。结构设计虽然采用可靠度理论计算,实质上仅能满足安全可靠指标的要求,而对耐久性要求考虑不足,且由于忽视维修保养,现有建筑物老化现象相当严重。截至 20 世纪末,有近 23.4 亿 m^2 建筑物进入老龄期,处于提前退役的局面。20 世纪 50 年代不少在混凝土中采用掺入氯化钙快速施工的建筑,损坏更为严重。近几年房屋开发中反映出的质量问题也很突出,不少新建好的商品房,未使用几年就需要修复,给国家造成极大浪费。

我国是一个发展中的大国,正在从事着为世界所瞩目的大规模基本建设,而我国财力有限,能源短缺,资源并不丰富,因此战略上要高瞻远瞩,有效地利用资金,节约能源。既要科学地设计出安全、适用、又耐久的新建工程项目,还要充分地、合理地、安全地延续利用现有房屋资源和工程设施。因此,加强混凝土结构耐久性研究,提高设计质量,延长结构使用寿命,是摆在我们面前的一个很重要的现实课题和任务。

1.2 国内外研究概况

1.2.1 国外研究概况

对钢筋混凝土结构耐久性的研究,可分成材料的耐久性和结构的耐久性两个层次。相对而言,前者的研究比较深入,而后者对构件的研究又多于对结构物整体的研究。

早在 1957 年美国混凝土学会(ACI)成立了“ACI-201 委员会”,负责指导和协调混凝土耐久性方面的研究。国际材料与结构试验研究联合会(RILEM)于 1960 年专门成立了“混凝土中钢筋锈蚀”技术委员会(CRC),该委员会历时 5 年总结了当时各国在钢筋锈蚀方面的研究成果,并对以后的研究方向提出了提议;RILEM TC-116 技术委员会通过长时间大量的试验对比工作,确定以混凝土的透气性试验和毛细孔吸水率试验两种方法作为混凝土耐久性评定标准。1979 年国际建筑研究与文献协会(CIB)成立一个 W-70 委员会(已有建筑物维修和现代化委员会)提出一个协调计划,计有 4 大类 12 个项目,其中 B 类即为有关建筑物维修和鉴定方面的项目。

1980 年国际标准化委员会预应力混凝土委员会 ISO/TC-71 提出了影响混凝土环境条件的级别标准。1982 年 RILEM 和 CIB 联合成立共同工作委员会 RILEM-71 PSL/CIB W80 共同研究结构的寿命预测问题,每三年举行一次有关建筑材料与构件耐久性国际会议;1987 年又成立一个新委员会 CIB W80/RILEM-100-TSL 进一步推进委员会工作;1983 年在哥本哈根召开过混凝土耐久性会议,1984 年在日本筑波召开过混凝土耐久性会议。1987 年国际桥梁与结构工程协会(IABSE)在巴黎召开过“混凝土的未来”国际会议,会上对结构耐久性极为重视,提出考虑维修费的宏观造价观念;1987 年在亚特兰大召开了“第一届混凝土耐久性会议”,出版论文集 SP-100;1989 年 IABSE 在里斯本召开“结构耐久性”国际会议。欧洲混凝土学会(CEB)颁布了“耐久混凝土结构设计指南”,1990 年欧洲 CEB 的模式规范(Model Code)增列耐久性一章。

1991 年在法国召开“第二届混凝土耐久性会议”,出版论文集

SP-126, Mehta 教授在“混凝土耐久性——50 年的进展”主题报告中指出,“当今世界混凝土破坏的主要原因为钢筋锈蚀、寒冷气候下的冻害、侵蚀环境下的物理化学作用”。1992 年英国标准(BS)“建筑物及其构件,产品与组件的耐久性”发表。1994 年在法国召开了“第三届国际混凝土耐久性会议”,出版论文集 SP-145。1996 年 RILEM TC 130-CSL 委员会的“混凝土结构服务寿命设计计算方法”报告,提出基于破坏概率设计理论的混凝土结构耐久性设计概念。引入时间参数,荷载项包括环境对结构的作用,如机械荷载与气候的作用(阳光、温度变化、结冻水分、污染物、氧气等);功能项包括承载力、密实性、弯沉裂缝、表面平整度等。这种将结构可靠度设计和混凝土结构耐久性设计相结合的方法,其特点是在通常条件下通过考虑静态、动态疲劳、冲击荷载下安全和功能而确定结构尺寸、配筋量和混凝土强度;同时进行耐久性设计,考虑所有耐久性参数,如目标服务年限等,从材料劣化机理确定的混凝土保护层厚度,从考虑钢筋锈蚀深度确定配筋的类型和数量,考虑渗透性确定水泥品种,然后从力学角度重新确定结构尺寸。1998 年 5 月在荷兰阿姆斯特丹召开“第十三届国际预应力混凝土学术会议”,会上将欧洲混凝土学会(CEB)和国际预应力混凝土学会(FIP)合并成立国际结构混凝土学会(fib),有 36 个成员会员,设 10 个专业委员会,其中 C5 为结构使用寿命委员会。1999 年召开过“混凝土结构寿命预测和耐久性设计国际会议”,会议主要倡议者是 RILEM 的 160-MLN 技术委员会(原子能混凝土结构寿命预测方法委员会)。

2000 年 6 月由 CANMET/ACL 主办在西班牙巴塞罗那召开过“第五届混凝土耐久性会议”,2000 年 9 月在新加坡召开过“结构的缺陷的耐久性和修补”的第六次国际会议,2000 年 11 月在法国由 RILEM 主办召开过“混凝土结构的寿命预测和耐久性设计国际会议”。

美国实验材料协会(ASTM)每隔 3 年召开一次建筑材料耐久性研讨会,ASTM(美国材料试验学会)与 NBS(美国标准局)制定过研究奖励条例。美国国家科学基金会(NSF)从 1986 年开始重点资助开展结构耐久性的研究。1991 年美国与加拿大联合召开过“混凝土结构耐久性国际会议”。1992 年 ACI-201 委员会编制了“耐久性混凝土指南”。美国白宫科技办公室于 1997 年 6 月下达的备忘录中提到 1999 年“研究与开发重点”

有 10 个领域,其中“提高房屋安全性与耐久性”就是建筑领域中一个“重中之重”课题^[6]。

日本从 20 世纪 70 年代开始重视耐久性研究。建设省制定过 1980~1984 年“提高建筑物耐久性开发技术计划”,组织 659 人参加,内容涉及钢、木、钢筋混凝土及非承重构件等。1985 年建设省提出“提高建筑物耐久性技术的开发”综合技术开发项目。1986 年制定“考虑耐久性的建筑物设计、施工、维修大纲”。日本建筑学会建筑工程标准设计书(JASS5)在钢筋混凝土工程中增设“高耐久性混凝土”章节。1988 年日本建筑学会(AIJ)提出“建筑物使用指南”。日本土木学会混凝土委员会成立“耐久性设计委员会”,提出了“耐久性设计基本方法指南”。1988 年 4 月召开过“有关混凝土结构寿命预测和耐久性设计”研讨会。1990 年建设省提出 1990~1992 年“提高混凝土耐久性技术的开发”的综合技术开发项目。1991 年日本建筑学会制定“高耐久性钢筋混凝土结构设计、施工指针”(草案)。1996 年在住宅金融贷款机关设计书中引进耐久性要求。1997 年在日本建筑学会建筑工程标准设计第五章钢筋混凝土工程中规定了设计使用期限的等级。1997 年建设省提出 1997~2001 年“长期耐用都市公寓的建设、改造技术的开发”的综合开发项目。2000 年建设省以法律形式提出日本住宅性能必须具备的 9 个项目,其中对耐久性要求,以“关于减轻劣化的规定”方式作出规定,同时提出了对其性能评估方法的标准^[7]。

1.2.2 国内研究概况

我国过去基于计划经济体制和国民经济基础相对薄弱的条件,对混凝土结构设计长期沿袭“按强度设计混凝土”的传统思维,对混凝土结构的耐久性和结构长期安全性问题认识不足,但是对混凝土材料耐久性的研究,还是不断地探索和实践。早在 20 世纪 50 年代开始建设大型水利工程时,吴中伟院士就曾提出预防混凝土碱骨料反应破坏问题^[8],从而在水工结构中采取了相应措施,对保证当时建设的水工混凝土结构耐久性起了重要作用。1956 年,长江水利水电科学院相继开展研究工作,对预防碱骨料反应(AAR)制定了有关规定,对使用的骨料要求事先做碱性检验,建设部门也试制成功低碱低热大坝水泥,当时在国外造成最大