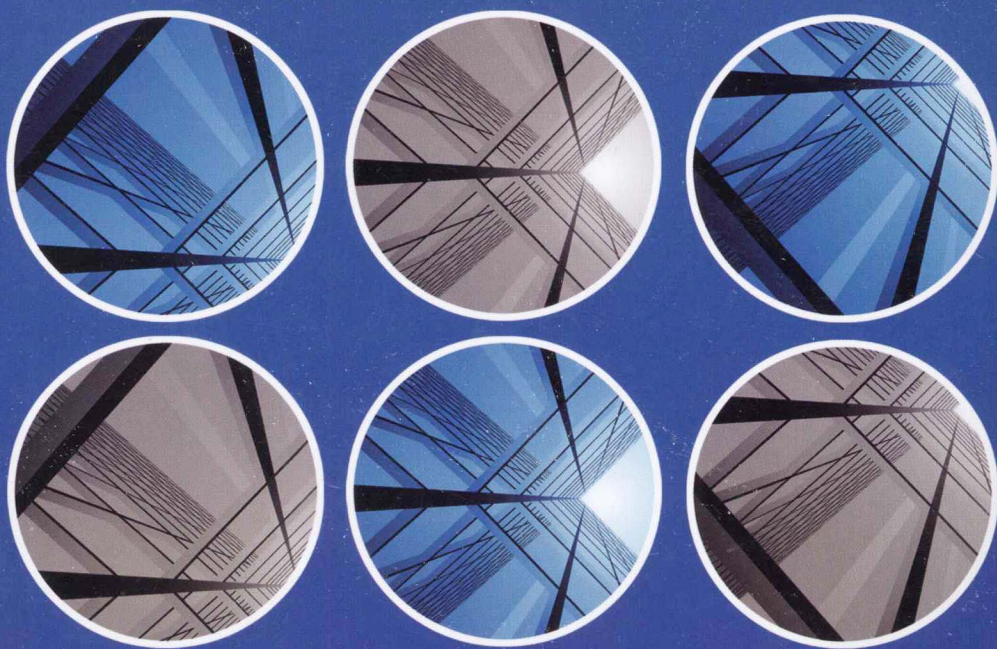


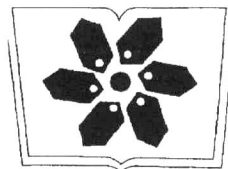
现代预应力 混凝土结构耐久性

刘荣桂 曹大富 陆春华 著

吕志涛 院士 主审



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

现代预应力混凝土 结构耐久性

刘荣桂 曹大富 陆春华 著

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书涉及在自然侵蚀环境作用下预应力混凝土结构的耐久性问题。全书共 10 章,介绍了预应力混凝土结构的碳化、氯离子侵蚀、冻融循环、钢筋腐蚀、裂缝演变、承载力变化等单指标性能以及预应力混凝土结构的冻融疲劳、冻融与氯离子侵蚀等双指标性能,并结合实际工程提出了预应力混凝土结构的耐久性评估和寿命预测方法。本书基本概括了目前对预应力混凝土结构耐久性研究的全部内容。

本书可供土木建筑、桥梁市政、港口水运、水利与铁道工程、建筑材料、工程管理等专业的工程技术人员和科研人员从事科研、设计、施工、检测、维护和管理时参考,也可供大专院校的相关教师、研究生和本科生作为教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

现代预应力混凝土结构耐久性/刘荣桂,曹大富,陆春华著. —北京:科学出版社, 2013

ISBN 978-7-03-037851-4

I. ①现… II. ①刘… ②曹… ③陆… III. ①预应力混凝土结构-耐用性-研究 IV. ①TU378

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 129331 号

责任编辑:陈岭啸 孙天任 顾 艳/责任校对:钟 洋
责任印制:赵德静/封面设计:许 瑞

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013 年 6 月第一次印刷 印张:15 1/2

字数:360 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

预应力混凝土结构与非预应力混凝土结构相比,不仅结构性能好,而且节材、节能、经济,具有广阔的应用前景。尤其对一些重要结构(如核电站、大型桥梁、标志性高层建筑等)和恶劣环境中的结构(如海洋平台、储液池、化工车间等)来说,预应力已成为一种不可缺少的技术。在侵蚀环境(如碳化、氯盐侵蚀、冻融、化学介质腐蚀等)长期作用下,预应力混凝土结构内部会出现损伤并逐渐积累,在高应力状态下,预应力筋的应力腐蚀、氢脆腐蚀现象尤其突出,其结构破坏形式表现为无任何先兆的脆性破坏。因此,对预应力混凝土结构的耐久性进行系统研究并全面介绍研究成果是很有必要的。江苏大学刘荣桂和他的合著者扬州大学曹大富都在东南大学取得相应学位后,继续研究预应力。在从事繁忙的教学工作的同时,从1999年起承担了多项关于预应力混凝土结构耐久性研究的国家自然科学基金项目,对这一领域进行了大量的深入研究,取得了一批丰硕的成果。《现代预应力混凝土结构耐久性》对这些研究成果进行了系统的介绍和论述。

该书详细分析了常见自然环境作用下预应力钢筋混凝土结构的耐久性问题,包括受力混凝土试件的碳化、氯离子侵蚀、冻融循环、开裂和受力钢筋的腐蚀机理等单指标变化性能和受冻预应力混凝土试件的疲劳损伤、冻融与氯离子侵蚀耦合作用下的混凝土损伤机理等双指标性能,相比单指标下的耐久性研究,后者的研究成果更符合实际。同时该书为相关工程的设计与维修提供了很好的技术支持,也为混凝土结构的耐久性理论体系充实、相关规范与规程的修订与完善作出了宝贵贡献。

该书内容丰富,观点独特,写作严谨认真。已有的相关省部级成果鉴定意见表明,刘荣桂课题组的研究处于国内同类研究的领先水平。我有幸阅读后获益良多。该书的出版将填补目前市场上预应力混凝土结构耐久性相关学术专著的不足,也可从事混凝土结构耐久性研究的科研人员和工程设计人员、管理人员提供参考,更可供高校结构工程、桥梁工程和水利工程等学科本科生、研究生学习参考。

中国工程院院士

2012年9月

前 言

现代预应力混凝土结构与普通钢筋混凝土结构、钢结构相比,不仅其结构性能好,而且经济、节材、节能,具有广阔的应用前景。尤其对一些重要结构(如核电站、大型桥梁、标志性高层建筑等)和恶劣环境中的结构(如海洋平台、储液池、化工车间等)来说,预应力已成为一种不可缺少的技术。以它为代表的 RC/PC 结构设计技术应用是 21 世纪土木工程界最具活力的研究方向之一。

在预加应力和实际环境温湿度变化、有害物质侵蚀等共同作用下,预应力混凝土结构会表现出与普通混凝土不一样的耐久性能。对其进行试验研究和理论探讨可以为实际工程提供指导,相关研究工作具有重要的理论价值和工程意义。

作者及其课题组自 2002 年开始,在国家自然科学基金(No: 59978008; 50478089; 50878-098; 50978224; 50908103)和江苏省自然科学基金(No: BK2003050)的资助下,对预应力混凝土结构的耐久性进行了大量试验研究与理论分析;并对一些实际工程进行了应用分析研究,取得了一系列的成果。本书是对作者近些年研究工作和研究成果的总结。全书共 10 章,内容分别如下所述。

第 1 章:介绍了目前预应力混凝土结构的使用状况及服役中出现的问题,论述了其耐久性劣化的特点及主要影响因素,总结了目前国内外对预应力混凝土结构耐久性研究的进展。

第 2 章:通过受力混凝土的室内碳化试验研究,介绍了混凝土碳化的机理,并采用人工神经网络方法对碳化结果进行了分析与预测。

第 3 章:介绍了氯离子在混凝土内的输运及其不同边界条件下的扩散模型,叙述了受力混凝土的氯离子侵蚀试验,研究了不同应力状态对氯离子在混凝土内侵蚀的影响。建立了相应的计算模型,并采取数值计算方法对氯离子扩散过程进行了模拟分析。

第 4 章:阐述了受力混凝土的冻融循环损伤机理以及疲劳试验,介绍了受力混凝土试件的冻融循环试验,分析了压应力对混凝土抗冻性及疲劳性能的影响。

第 5 章:分析了预应力钢筋的腐蚀机理和常见腐蚀形态,介绍了人工模拟坑蚀预应力筋的力学性能,并采用有限元进行了模拟,根据试验和分析结果提出了提高预应力筋抗腐蚀的措施。

第 6 章:叙述了混凝土的疲劳损伤机理,介绍了其疲劳损伤累积理论,进行了受冻预应力混凝土试件的疲劳性能试验和冻融循环与疲劳荷载交替作用下的预应力混凝土试件耐久性试验,根据试验结果建立了基于两级疲劳理论冻融后试件疲劳损伤模型和基于相对动弹性模量衰减的试件疲劳损伤寿命预测模型。

第 7 章:介绍了冻融与氯离子侵蚀耦合作用下的预应力混凝土试件侵蚀试验,研究了不同耦合机制对氯离子侵蚀的影响,建立了相应的数值计算模型,提出了有效的预测模型和可靠性分析方法。

第 8 章:进行了冻融环境下预应力混凝土构件、钢筋坑蚀后混凝土试件、硫酸盐环境下

预应力混凝土构件和冻融与氯盐侵蚀耦合作用下受力混凝土构件的承载性能试验,得出了影响预应力混凝土构件承载性能的关键因素,对其影响程度进行了分析。

第9章:提出了适合于预应力混凝土结构的耐久性评估方法和设计方法,并结合实际工程对其应用性进行了分析。

第10章:对预应力混凝土结构耐久性的发展前景进行了概述,并提出了相关研究的前沿科学问题。

在本书的编写过程中,作者课题组的老师和研究生对本书作出了贡献。曹大富撰写了第1章;陆春华、刘荣桂撰写了第2、3、9、10章;张益多、陈好撰写了第4章;曹大富、李琮琦、延永东撰写了第5、8章;张益多撰写了第6章;刘荣桂、陈好撰写了第7章。刘荣桂对全书进行了最后统稿,东南大学吕志涛院士对本书进行了主审。作者的研究生付凯、高嵩、汤灿、刘涛、蔺恩超、秦小川、朱兰芳等为本书的完成作出了很大的贡献,在此一并表示衷心感谢。

感谢国家自然科学基金委员会等单位对本书研究工作的资助;感谢中国科学院科学出版基金委员会对本书出版的资助;感谢东南大学、浙江大学、江苏省建筑科学研究院、扬州大学等兄弟单位的技术帮助;最后要特别感谢东南大学的吕志涛院士和浙江大学的金伟良教授对本书出版的指导与支持。

预应力混凝土结构的耐久性涉及问题多且较为复杂,尚有许多问题亟待完善。希望本书能起到抛砖引玉的作用,推动对预应力混凝土结构耐久性更深入的研究。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

2012年9月

目 录

序

前言

第 1 章 概论	1
1.1 预应力混凝土结构	1
1.2 预应力混凝土结构耐久性问题的提出	1
1.3 预应力混凝土结构耐久性的特点及主要影响因素	4
1.4 预应力混凝土结构耐久性的研究现状	9
参考文献	10
第 2 章 受力混凝土的碳化	12
2.1 混凝土碳化的基本机理及主要影响因素	12
2.2 混凝土碳化规律及其预测模型	14
2.3 受力混凝土碳化规律研究	18
2.4 基于人工神经网络的受力混凝土碳化分析	23
参考文献	28
第 3 章 受力混凝土的氯离子侵蚀	30
3.1 氯离子在混凝土内的传输及其临界浓度	30
3.2 受力混凝土快速氯离子侵蚀试验	39
3.3 受力混凝土的氯离子侵入模型	42
3.4 氯离子侵入混凝土的数值计算	45
参考文献	48
第 4 章 受力混凝土的冻融与疲劳	51
4.1 受力混凝土冻融	51
4.2 受力混凝土疲劳	57
参考文献	61
第 5 章 预应力筋的腐蚀性能	63
5.1 预应力筋的腐蚀机理与形态	63
5.2 人工模拟坑蚀预应力筋的力学性能试验	68
5.3 坑蚀预应力筋的力学性能有限元分析	78
5.4 提高预应力筋抗腐蚀的措施	89
参考文献	90
第 6 章 冻融与疲劳荷载耦合作用下预应力混凝土梁的性能研究	92
6.1 冻融后预应力混凝土梁的疲劳性能试验	92
6.2 疲劳荷载作用后预应力混凝土梁冻融试验	101

6.3 冻融与疲劳荷载交替作用下预应力混凝土梁耐久性试验	114
参考文献	123
第 7 章 冻融与氯离子侵蚀耦合作用下预应力混凝土梁的侵蚀性能研究	124
7.1 受冻预应力混凝土梁氯盐侵蚀试验	124
7.2 冻融与氯离子侵蚀耦合作用下耐久性数值模拟	131
7.3 冻融与氯离子侵蚀耦合作用下的可靠度理论分析	137
参考文献	140
第 8 章 腐蚀预应力混凝土梁正截面承载性能	142
8.1 冻融环境下预应力混凝土试件正截面承载性能	142
8.2 坑蚀预应力混凝土梁正截面承载性能	163
8.3 硫酸盐环境下预应力混凝土梁正截面承载性能	169
8.4 冻融与氯盐侵蚀耦合作用下预应力混凝土梁正截面承载性能	178
参考文献	183
第 9 章 预应力混凝土结构耐久性评估与设计	185
9.1 预应力混凝土结构耐久性评估方法	185
9.2 工程应用分析	199
9.3 预应力混凝土结构耐久性设计方法	221
参考文献	232
第 10 章 研究展望	235
10.1 发展规律与趋势	235
10.2 研究前沿与科学问题	236
参考文献	237

第1章 概 论

1.1 预应力混凝土结构

预应力混凝土是这样一种配筋混凝土：它为了克服混凝土抗拉强度过低的弱点，通过张拉预应力筋使混凝土截面受到预压应力，且其大小和分布可全部或部分抵消结构构件中由外荷载所产生的拉应力^[1]。预应力的概念在混凝土结构使用之初就被提出来了，但由于早期采用的预应力钢筋强度较低，且对预应力损失认识不足，预应力混凝土的发展非常缓慢。直到国际著名学者法国工程师 E. 弗列西奈 (E. Freyssinet) 提出预应力混凝土中必须采用高强预应力钢筋，再加上新型锚具的发明使用，预应力混凝土才迈上了快速发展的轨道。美籍华人专家林同炎教授通过对预应力本质的研究，运用等效荷载的方法，把预应力应用到混凝土结构体系中，并认识到预应力引起的次内力对结构性能的影响以及采用部分预应力混凝土结构等，促进了预应力混凝土结构体系的发展。在我国，杜拱辰、吕志涛等著名专家学者把预应力技术推广应用到桥梁和房屋结构体系，对我国预应力技术的发展作出了杰出的贡献。现代预应力混凝土 (PC) 结构通常采用高强预应力筋与高性能混凝土，与钢筋混凝土 (RC) 结构、钢结构相比，不仅结构性能好，而且节材、节能，具有十分广阔的应用前景。它适用于抗裂要求高、大跨、重载荷作用以及特种结构中，尤其对一些重要结构 (如标志性高层建筑、体育场馆、大型桥梁、核电站等) 和恶劣环境中的结构 (如海洋平台、储液池、化工车间等) 来说，预应力已成为一种不可缺少的技术。以它为代表的混凝土 (RC/PC) 结构设计技术应用将是 21 世纪土木工程界最具活力的研究方向之一。30 多年前，美籍华人林同炎教授曾说过：“目前是预应力混凝土世界。”^[1]

现代预应力技术还可应用于钢结构、木结构、砌体结构、结构加固改造与拆除以及结构体系转换中。它可从单一的改善混凝土抗裂性能，发展到改善结构体系的受力性能，从而达到节约材料、优化结构体系等目的。

1.2 预应力混凝土结构耐久性问题的提出

混凝土 (RC/PC) 结构耐久性是指混凝土结构及其构件在可预见的工作环境及材料内部因素的作用下，在预期的使用年限内抵抗大气影响、化学侵蚀和其他劣化过程中，不需要花费大量资金维修，也能保持其安全性、适用性和外观要求的功能^[2]。当前，混凝土结构的耐久性问题是土木工程界普遍关注的问题之一，也是学术界重点研究的问题之一。由于耐久性不足，提前劣化的混凝土结构所需维修与重建工程给我国日趋紧张的资源与能源供应增加了巨大的额外负担；另一方面，退出服役的混凝土结构给环境带来了大量的难以回收和处理的建筑垃圾。因此，混凝土结构耐久性问题是协调经济发展与资源、能源和环境保护之间矛盾，实现社会可持续发展的重大问题，提高混凝土结构的耐久性已无法回避，并且刻不容缓^[3]。

近 50 年来,世界范围内预应力混凝土结构的腐蚀破坏与预应力技术的大量工程应用相比很少,但事故一旦发生,其产生的危害与影响却相当大,是一种“灾难性的破坏”。预应力混凝土结构(桥梁)突然破坏所引起的不幸事故,常伴随人员伤亡、爆炸、火灾、环境污染等。譬如,1967 年 12 月,美国西弗吉尼亚州和俄亥俄州之间的一座桥梁(银桥)突然塌陷,过桥的车辆连同行入坠入河中,死亡 46 人。事后经检查,桥梁因预应力筋应力腐蚀和疲劳的联合作用,产生了裂缝而断裂。图 1-1 是美国一个储油罐发生氢致应力腐蚀破裂后爆炸而形成的废墟^[4],这起事故造成了巨大的人员和财产损失,保险公司最终的赔偿金额达到了 5000 万美元。1980 年,柏林议会大厦的混凝土壳体屋顶,因其支承构件中的预应力钢索锈蚀而发生部分坍塌(图 1-2)。图 1-3 是德国一座使用了 35 年的试验室由于预应力混凝土梁的突然断裂而发生坍塌的场面。1985 年,英国南威尔士 Ynysy-Gwas 的一座节段拼装式混凝土桥梁因预应力钢索锈蚀而突然倒塌;1992 年,比利时横跨 Scheldt 河上的一座后张预应力混凝土桥也因后张预应力钢索锈蚀而坠毁。大量事实表明,预应力筋的应力腐蚀是预应力混凝土的主要耐久性问题之一。

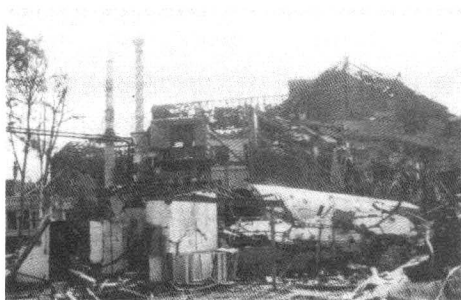


图 1-1 应力腐蚀破坏后的储油罐废墟

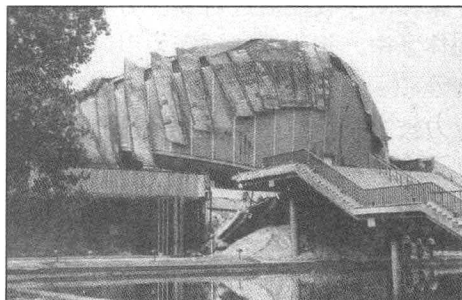


图 1-2 柏林议会大厦部分倒塌



图 1-3 德国某试验室预应力梁断裂

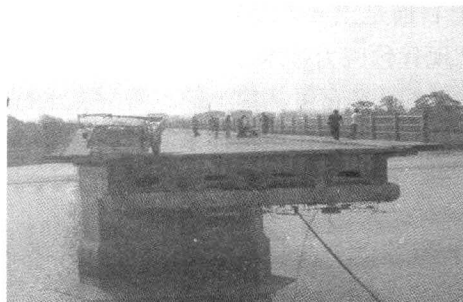


图 1-4 断裂的辽宁盘锦田庄台大桥

在我国,房屋结构、桥梁结构大规模应用预应力技术的历史相对较短,有关预应力筋或拉索锈蚀而造成整个结构破坏的例子较少,但应力腐蚀导致耐久性失效的事故时有发生。例如 1977 年,天津某纺织厂锅炉因为发生应力腐蚀(由局部碱性溶液引起的应力腐蚀)而爆炸,锅炉顶盖冲破屋顶飞出数十米远,当场死亡 10 多人;呼和浩特铁路局某仓库的一楹 21 米跨度的预应力混凝土梯形屋架的突然倒塌,造成了巨大损失;广东海印大桥(斜拉桥)发生拉索锈断事故;山西省阳泉市的猫脑山自来水厂预应力混凝土蓄水池,因预应力钢丝锈蚀

崩断而发生水池侧板倒塌事故；2004 年 6 月，辽宁盘锦田庄台大桥（预应力箱形梁桥）发生垮塌，多辆行驶中的车辆掉入水中（图 1-4）等。对桥梁工程而言，随着服役期的增长，铁路、公路运输量及运输荷载的不断提高，加之设计中对耐久性考虑的不周以及施工质量的缺陷，其耐久性问题显得更为突出^[5]。据铁路部门 1994 年统计，我国正在运营的有病害桥梁共有 6137 座，占总数的 18.8%，其中预应力混凝土桥梁 2675 座，占有病害桥梁的 43.6%。

Schupack 在 1978 年一份调查报告中指出^[6]：在 1950~1977 年期间，世界范围内共发生 28 起预应力钢筋腐蚀破坏的工程实例，平均每年一起。而他在 1982 年的调查报告^[7]中又说：在 1978~1982 年五年间，仅美国就有 50 幢建筑物出现预应力筋腐蚀的事故，平均每年 10 起，而由于预应力筋的应力腐蚀或氢脆腐蚀引起的脆性破坏就有 10 起。据估计，在 1988 年，仅美国和加拿大两国预应力筋腐蚀事故就有上百例。文献 [8]、[9] 对世界范围内 1951~1979 年期间发生的 242 起预应力筋腐蚀损坏事故按不同方法进行了分类。若按结构或构件类型进行划分，预应力筋腐蚀导致结构或构件的失效在管道、房屋预制构件以及盛储构件中分别占 75%、15%、4%，如图 1-5(a) 所示；若按预应力张拉的工艺进行分类，先张、后张、无黏结和环向张拉中的腐蚀损坏分别占 22%、32%、3%和 43%，如图 1-5(b) 所示；若按预应力筋所在的结构类型进行划分，房屋、管道工程、盛储结构和桥梁结构中腐蚀损坏分别占 27%、24%、19%和 13%，如图 1-5(c) 所示；若按预应力筋腐蚀损坏的原因进行划分，防腐保护不当、采用对腐蚀敏感的预应力筋、张拉或锚固不当、受环境或侵蚀性材料侵蚀、处于潮湿环境及结构构造不当分别占 23%、15%、4%、23%、24%和 9%，如图 1-5(d) 所示。

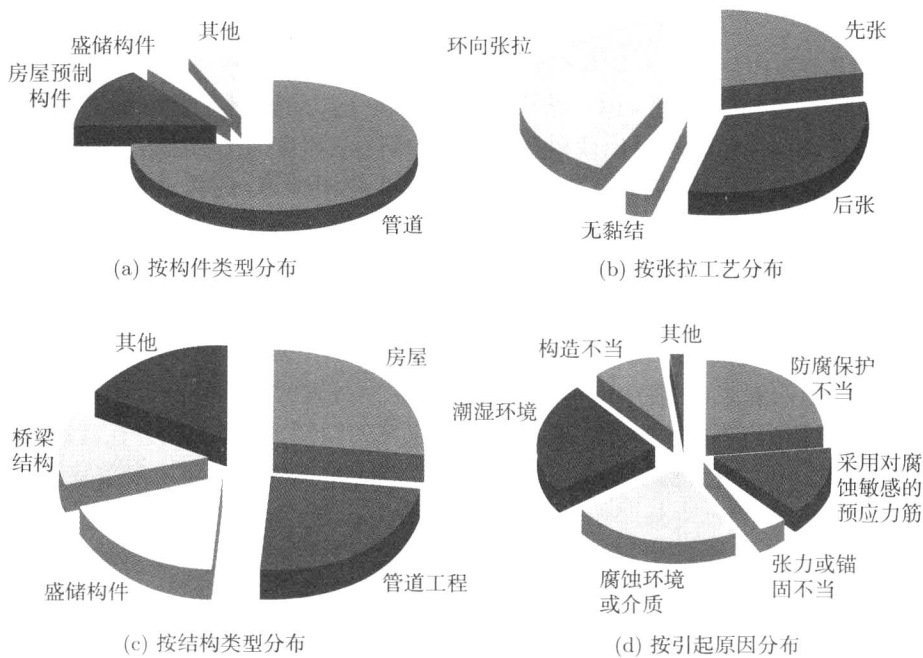


图 1-5 预应力混凝土结构腐蚀破坏分类

随着时间的推移，预应力混凝土结构的耐久性问题将更加突出，其原因主要有以下几个^[10~15]：①现有预应力混凝土结构在设计建造以及使用过程中对耐久性问题考虑不足。

②大量现代建筑主要建造在氯盐浓度较大的沿海地区,且随着环境污染的加剧,城市空气中 CO_2 等有害气体浓度上升,加速了引起预应力筋腐蚀破坏的混凝土碳化、氯离子侵入以及酸雨侵蚀等作用的进程;另一方面,一些重大土木工程往往建在容易引起结构耐久性失效的环境恶劣地区。③随着预应力钢筋强度的不断提高,力筋的工作应力也在不断提高,因而应力对腐蚀的影响也在不断加大。④现代预应力技术被大量用来建造高(电视塔、高层建筑)、大(大跨度、大空间结构)、重(重载、重型传力梁、转换层传构)、特(核电站安全壳、水池、屯仓等)结构,这些重要工程一旦出现耐久性破坏,将会造成严重后果。

因此,借鉴欧美发达国家的经验教训,大力开展预应力混凝土结构耐久性的基础研究,探索预应力混凝土结构耐久性失效的机理,乃当务之急。一方面,可以对新建预应力混凝土工程项目提出耐久性设计方法,揭示影响结构寿命的内外部因素,从而提高工程的设计水平和施工质量,确保预应力混凝土结构生命全过程的正常工作;另一方面,对服役预应力混凝土结构提出耐久性评估方法,正确评价出结构物的使用情况以及剩余寿命,并对耐久性不足的结构选择恰当的方法进行维修处理和加固。可见,混凝土(RC/PC)结构耐久性的研究是与国计民生相关的重大研究课题,是土木工程乃至国民经济可持续发展的必然要求,已成为结构工程学科发展与研究的前沿^[2,3],具有重大的现实意义与深远的历史意义。

1.3 预应力混凝土结构耐久性的特点及主要影响因素

1.3.1 预应力混凝土结构耐久性特点

预应力混凝土(PC)结构一般具有较好的抗裂性能、较高的密实度以及较大的混凝土保护层厚度。因而,与钢筋混凝土(RC)结构相比,现代预应力混凝土结构一般有着更高的耐久性能,但并不是说该类结构不会出现耐久性失效的问题。相反,PC结构长期在侵蚀环境(如二氧化碳扩散、氯离子侵蚀、冻融、化学介质侵蚀、生物侵蚀等)的作用下,高应力状态下其结构内部会出现损伤并逐渐积累,直至最终达到破坏。这是一个不可逆的过程,其实质是一个工程耐久性问题。RC结构的耐久性失效一般经历钢筋锈蚀、混凝土局部开裂、混凝土大面积纵向开裂、结构失效等几个阶段,破坏前有明显的预兆。与RC结构不同,PC结构的耐久性失效有如下特点^[16]: ①预应力技术在工程中的成功应用,需要经过多道工艺,如波形管的制作、埋置、管道的灌浆、力筋的锚固以及锚具的防腐处理等,任何一个环节的疏忽或质量的缺陷都有可能影响结构的耐久性; ②由于技术工艺的限制,预应力构件在建造过程中内部会存在不同程度的微缺陷(初始损伤),而预应力混凝土结构的使用环境多数较为恶劣,因此

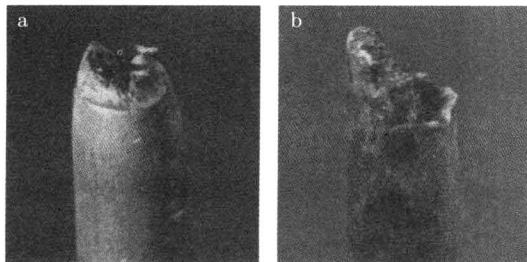


图 1-6 预应力筋的延性断裂(a)与脆断(b)

结构的腐蚀损伤有时会特别严重；③由于预应力筋断面小且长期处于高应力状态，应力腐蚀及氢脆腐蚀现象特别突出，导致预应力筋在低于极限强度的应力下发生脆断(图 1-6)；同时，预应力筋自开始腐蚀至失效历时很短，破坏形式常常表现为无任何先兆的脆性断裂破坏。因此，预应力混凝土结构的耐久性比普通钢筋混凝土结构有着更特别的要求。

1.3.2 主要影响因素

影响预应力混凝土结构耐久性的因素很多，而且各种因素之间相互影响、错综复杂，归结起来可分为内在因素、环境因素和受荷状态三个方面，其中内在因素包括非荷载裂缝、保护层厚度、水胶比、施工与养护质量等；环境因素包括各种侵蚀、环境湿度和温度等；受荷状态包括应力荷载裂缝、疲劳、摩擦等。预应力混凝土结构的耐久性能退化归根到底是内因与外因共同作用的结果。

1. 内在因素

1) 非荷载裂缝的影响

混凝土在浇筑及硬化过程中受温湿度变化及模板变位的影响可能出现裂缝，这些裂缝将加速后期有害物质在混凝土内的传输，从而造成钢筋提前锈蚀。裂缝宽度、深度、密度等参数均会对混凝土的后期耐久性产生影响。

2) 保护层厚度的影响

保护层厚度对预应力混凝土结构的耐久性影响很大。主要表现在：一方面可以减缓或阻止外界腐蚀介质、氧气和水分等渗入到混凝土内部；另一方面，对力筋的锈蚀速率产生影响。保护层厚度越大，混凝土电阻率越大，力筋锈蚀速率越小；当力筋腐蚀发生时，腐蚀速度取决于阴、阳极间的电阻及阴极处的供氧程度，而氧气的供给是通过开裂处混凝土保护层渗入的，因此腐蚀速度取决于力筋保护层的质量和渗透性。

3) 水胶比的影响

除碱骨料反应外，其他物质对混凝土的侵蚀大多是通过各种微裂缝进入预应力混凝土内部的，所以要控制和提高预应力混凝土的耐久性，就需要增加混凝土的密实性，提高其抗渗性。水胶比越大，混凝土的孔隙率越大，密实性越差。同时，各种矿物掺合料的使用也能影响混凝土的密实性。国内外许多研究成果表明，掺用优质粉煤灰等掺合料后，混凝土碱性可降低，同时其密实度也能提高，混凝土内部孔结构也能得到改变，从而使混凝土阻止外界腐蚀介质和氧气与水分渗入的能力提高，这无疑对防止力筋腐蚀是有利的^[16]。

4) 施工与养护质量的影响

施工与养护质量对混凝土的渗透性影响很大，对同一水胶比的混凝土来讲，振捣密实的混凝土与振捣差的混凝土相比，其渗透性可以相差 10 倍；而养护好的混凝土与养护差的混凝土渗透性相差可达 5 倍。因此，施工及养护质量对预应力筋的腐蚀速度影响很大。

预应力技术在混凝土工程中需要采用多道工艺，如波纹管的制作、埋置，管道的灌浆，力筋的锚固及锚固的防腐处理等，任何一个环节的疏忽或质量的缺陷都有可能影响其结构

的耐久性。

(1) 先张法中可能的影响因素

在先张法结构中,预应力钢筋直接被浇注在高强度、高密实度的混凝土中,这对预应力钢筋的防腐蚀很有利。但是其也有不足之处,例如在先张法构件中,通常采用的预应力钢绞线,其芯线与边线之间存在着孔隙,在浇注混凝土时,混凝土中的水分会沿孔隙流入内部;此外构件端部的预应力钢绞线的切断面一般均处在芯线和边线间的孔隙内,外界侵蚀物质容易进入产生锈蚀。为此,在构件中端部预应力钢绞线的切断面上进行充分的防腐蚀处理是十分必要的。

(2) 后张法构件中预应力钢筋的防腐蚀

在构造上,后张法预应力钢筋是裸露的,不是浇注在作为最佳防腐材料的混凝土中,而是采用套管和后灌浆的办法进行施工,常因孔道灌浆不密实引起预应力结构耐久性失效。灌浆不密实的原因之一是施工和混合料配制不好。配合比是否合理,直接影响到灰浆强度和灌浆密实度是否达到预定的设计要求。传统的灌浆手段是压力灌浆,压入的浆体中常含有气泡,当混合料硬化后,气泡处会变为孔隙,成为渗透雨水的聚积地,这些水可能含有有害成分,易造成构件腐蚀;在严寒地区,也是冻融循环的原因之一;另外水泥浆容易离析,干硬后收缩,析水会产生孔隙,致使强度不够,黏结不好,给工程留下隐患。采用压力灌浆的英国 Ynys-Gwaa 大桥就是因为灌浆不密实引起预应力筋腐蚀而倒塌。因此,为防止预应力钢筋锈蚀,除使用密实性好的混凝土外,在结构设计上避免使用状态下预应力混凝土构件发生裂缝或是有害裂缝的开展,并且需确保预应力钢筋的保护层具有充分的厚度,而至关重要的是必须注意灌浆充分、锚固部分完全防锈。

2. 环境因素

在混凝土(PC/RC)结构耐久性研究过程中,通常将结构所处的侵蚀环境按其 对钢筋和混凝土材料的腐蚀机理分为五类^[5,17]:一般环境、冻融环境、海洋氯化物环境、除冰盐等其他氯化物环境以及化学物质腐蚀环境。若按照腐蚀的强弱,可以分为强度腐蚀环境、中度腐蚀环境、弱度腐蚀环境、无腐蚀环境四大类。环境对结构的物理和化学作用,是影响结构耐久性的主要因素。

1) 侵蚀条件的影响

大气环境(二氧化碳、盐雾、二氧化硫、汽车尾气等空气污染物)以及水体、土体环境中的氯盐、硫酸盐、碳酸等化学物质侵蚀都对混凝土结构的耐久性产生影响,其部分侵蚀机理见上述内容。我国预应力混凝土结构在海岸、海洋工程中的应用很广,海水对混凝土的侵蚀作用除化学作用外,尚有反复干湿的物理作用;盐分在混凝土内的结晶与聚集、海浪的冲击磨损、海水中的氯离子对混凝土内钢筋的锈蚀作用更不容忽视。为保持冬季雨雪天气的正常交通,在公路与桥梁上喷洒除冰盐,其中氯盐对公路、桥梁中的钢筋有腐蚀作用。土壤中还含有种类繁多的有机物,如氨基酸、碳水化合物、有机酸、油、羧基、酸氢氧基、酯等其他聚合体,这些物质的存在或是给土中的微生物提供养料,使微生物活动更为频繁,恶化基础的使用环境;或是直接腐蚀混凝土,进而腐蚀钢筋。

2) 环境湿度的影响

有关研究指出,在其他条件不变时,当相对湿度 $RH = 90\% \sim 95\%$ 时,预应力筋的腐蚀速度最快;若 $RH < 90\%$,预应力筋腐蚀速度降低;当 $RH < 55\%$ 时,预应力筋腐蚀速度将非常慢;若 $RH > 95\%$,因水饱和的混凝土中缺乏氧气,也使预应力筋腐蚀速度降至非常低的值。

3) 环境温度的影响

温度对混凝土养护期间的微裂缝有影响,昼夜温差大的地区较易产生温度裂缝。许多试验证明,环境温度升高,腐蚀速度加快;寒冷地区还会因为温度过低而产生冻融循环等破坏。

3. 受荷状态

对于预应力混凝土结构来说,施加预应力可以使结构混凝土内部产生一定的压应力,提高混凝土的密实度;在正常使用荷载作用下,预应力可以防止或延缓原来受拉的混凝土开裂,或可以把裂缝宽度限制到无害的程度,从而提高结构的耐久性。对于裂缝控制等级为三级的部分预应力混凝土结构,需要考虑荷载作用引起的横向裂缝对其耐久性的影响。对于预应力混凝土桥梁等承受重复动力荷载作用的结构,还需要重点考虑结构的腐蚀疲劳和摩擦疲劳。

1) 混凝土应力状态的影响

预应力结构的混凝土长期处于高应力状态下,它们的应力状态对结构耐久性的影响是不容忽略的。试验研究表明^[18,19],压应力能使微裂缝自动闭合,提高混凝土的抗渗性,从而能减少或减缓侵蚀物质(如 CO_2 、氯离子等)的侵入;而拉应力会助长这些微裂缝和缺陷的产生,降低混凝土的抗渗性,从而加快侵蚀物质的侵入。文献[20]提出用混凝土的应力水平(混凝土名义应力值与极限强度的比值)来描述应力状态对有害物质侵入的影响。

2) 荷载作用引起的裂缝影响

荷载作用引起的裂缝产生于混凝土受拉区,垂直于主拉应力的方向,裂口整齐,裂缝宽度与钢筋应力有关(钢筋应力越大,裂缝宽度越宽)。对于轴向受拉构件,主裂缝贯穿截面。裂缝及其宽度对钢筋腐蚀有影响,且宽度不同其影响程度也不同。首先,裂缝加快了钢筋腐蚀的发生,即腐蚀开始时间提前,图 1-7、图 1-8 分别给出了裂缝状态下碳化和氯离子作用诱发的钢筋电化学腐蚀过程^[21]。而且在早期,裂缝宽度对钢筋腐蚀影响较大,因为钢筋去钝化的时间取决于裂缝的宽度,然而腐蚀一旦开始,其影响程度大大降低。这时,腐蚀速度取决于未开裂处混凝土保护层的质量和渗透性,混凝土保护层的质量越好,渗透性越小,氧气及水分的供给量也越少,腐蚀速度越慢,并随着碳化进程的深入,毛细孔将逐渐被堵塞,混凝土渗透性逐步降低,腐蚀速度也随之下降^[21]。

有关试验表明^[23]:试件上宽度在 0.3mm 范围内的横向裂缝,对钢筋锈蚀速率的影响不明显。这是因为有横向裂缝的地方,钢筋有局部锈蚀,但锈蚀面积很小,当初始裂缝很细时,随着时间的推移,尚未水化的水泥可起愈合作用,裂缝的闭合将使锈蚀不再发展;即使对

0.2~0.3mm 的横向裂缝, 钢筋锈蚀深度也只有几分之一毫米以下, 且锈蚀随时间减慢。即表明横向裂缝并不控制力筋腐蚀的速度, 它的作用仅是启动腐蚀进程并使该处的力筋活化。尽管如此, 由于预应力筋应力高、断面小、较脆, 其结构破坏无预兆性等特点, 因此预应力结构的裂缝控制应比普通混凝土更为慎重。

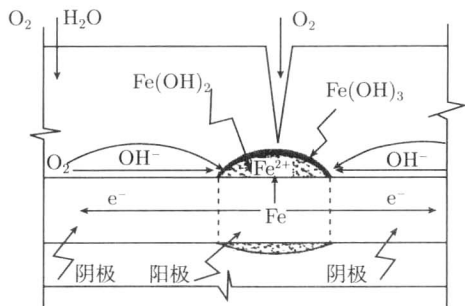


图 1-7 碳化诱发的力筋腐蚀电化学过程

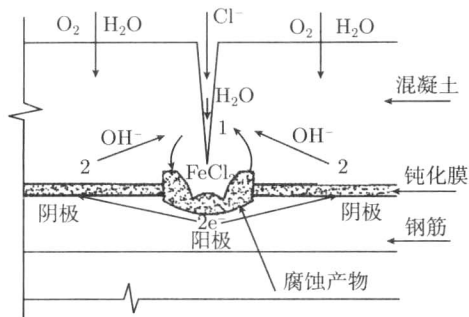


图 1-8 氯离子诱发的力筋腐蚀电化学过程

3) 腐蚀疲劳的影响

在高动力荷载作用 (如交通繁忙的桥梁) 下, 预应力筋所受的应力幅度在裂缝区可能达到 200N/mm^2 以上, 而在非裂缝区, 预应力筋的应力幅度一般不会高于 100N/mm^2 。如混凝土处在带裂缝工作状态, 预应力筋仅能承受有限的动力荷载。

当腐蚀性介质通过混凝土裂缝进入受动力荷载效应的预应力筋表面时, 预应力筋可能发生腐蚀疲劳断裂。由于腐蚀作用的影响, 在水溶液、盐溶液中的预应力钢材表现出比在空气中更为不利的疲劳特性^[23]。在交变应力的循环作用下, 材料位错往复地穿过晶界运动, 形成一些细小的裂缝源, 在介质的作用下成为腐蚀源。在应力的循环作用下, 沿着裂缝滑移面出现局部高温, 结果引起腐蚀加快进行, 裂缝源便发展为微裂缝, 进一步扩展成宏观腐蚀疲劳裂缝。图 1-9 为一冷拉预应力钢丝分别在空气、自来水以及海水中进行的腐蚀疲劳试验^[24]。

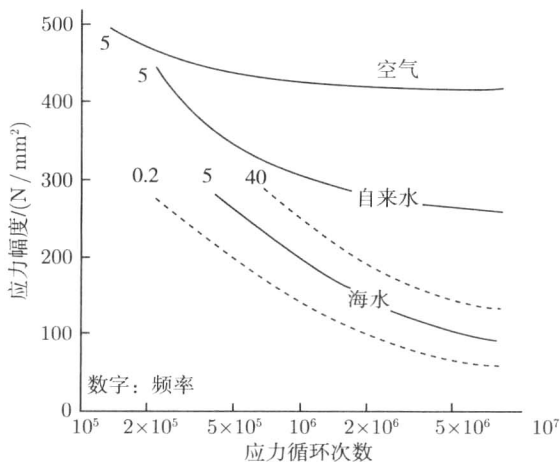


图 1-9 冷拉预应力钢丝 ($f_{ptk}=1750\text{N/mm}^2$) 在脉冲拉应力作用下的疲劳性能

对于在海水中进行的频率为 5s^{-1} 、疲劳循环为 10^7 次的试验,其疲劳应力幅度低于 100N/mm^2 。

4) 接触腐蚀和摩擦疲劳

在承受动力荷载的带裂缝工作的预应力构件中,预应力筋在裂缝处会与混凝土或砂浆的裂缝面发生位移错动。在预应力结构的锚固端,锚具与预应力筋之间也会发生类似的位移错动。此外,预应力桥梁的预应力筋连接件与预应力筋之间也会由于交变荷载及太阳辐射等影响发生位移错动。这样的位移错动会使预应力筋的疲劳极限下降 $80\sim 150\text{N/mm}^2$ 。如位移错动区还存在有腐蚀性介质作用,则预应力筋的疲劳极限强度会有更大的下降^[25]。

1.4 预应力混凝土结构耐久性的研究现状

混凝土 (RC/PC) 结构的耐久性研究主要涉及环境、材料、构件以及结构等几个层次^[26]。在环境层次上,预应力混凝土 (PC) 结构的耐久性研究与钢筋混凝土 (RC) 结构的耐久性研究相似,主要是将结构所处的环境进行分类,并给出相应的作用等级。具体来说,预应力混凝土结构所处的环境同样可以划分为大气环境、氯化物环境 (海洋和除冰盐)、土壤环境以及工业环境等。而在材料、构件以及结构层次上,预应力混凝土结构的耐久性研究有别于钢筋混凝土结构的耐久性研究,其中的关键问题是要考虑预应力作用效应的影响,同时还要涉及锚具系统的耐久性。因此,对于 PC 结构,材料层次的耐久性研究主要有混凝土、预应力筋和锚具三个方面。在混凝土方面,主要包括应力状态下混凝土碳化、氯化物侵蚀、冻融破坏、碱-集料反应等;在预应力筋方面,主要是力筋的应力腐蚀特性;在锚具方面,主要是锚具的腐蚀特性。构件层次的耐久性研究主要针对的是预应力混凝土构件在环境和预应力的共同作用下,构件性能退化的演变规律。结构层次的耐久性研究主要包括新建结构的耐久性设计与已建结构的耐久性评估和寿命预测等。

在材料层次的耐久性研究方面,比较有代表性的是学者左景伊在 20 世纪 80 年代提出的三阶段理论,并著有《应力腐蚀破裂》一书^[27]。书中概括了结构发生应力腐蚀破裂所必需的三个条件:材料、应力和环境作用。东南大学吕志涛院士等^[21,22]通过对应力 (拉应力和压应力) 状态下的混凝土构件进行快速碳化、盐雾侵蚀等试验,提出了应力状态下混凝土碳化速度以及氯离子侵蚀扩散速度的计算公式,并认为压应力能减缓混凝土的碳化速度以及氯离子侵蚀速度,而拉应力则加快了混凝土的碳化速度以及氯离子侵蚀速度。江苏大学也提出了考虑应力水平 (混凝土实际应力大小与混凝土强度标准值的比值) 的混凝土碳化和氯离子扩散系数修正公式^[20]。

在构件层次的耐久性研究主要有:德国柏林联邦材料研究试验学会 (BAM) 与斯图加特材料试验研究学院 (FMPE)^[28]对 1960 年以前广泛应用于预应力工程的旧型号调质钢制成的预应力钢丝进行了大量调查与试验,发现在使用此类钢丝的先张预应力混凝土结构及灌浆不饱满的后张预应力混凝土结构中,容易发生预应力筋腐蚀开裂甚至由此导致结构破坏。德国学者 Nurnberger^[29]比较全面地分析了预应力混凝土结构发生耐久性腐蚀的原因,并提出了预应力腐蚀疲劳和摩擦疲劳的分析方法。东南大学^[16]提出了单一环境 (碳化、氯盐) 作用下预应力混凝土构件耐久性分项系数设计方法。李富民等^[30,31]对氯盐腐蚀环境下预应力钢绞线受拉性能、梁的受弯性能进行了试验分析与理论探讨;同济大学也做了大量的工作,分