

● 混凝土现代技术丛书

混凝土中钢筋的 腐蚀与保护

洪定海 编著

中国铁道出版社

T 77.
99. 0140

混凝土现代技术丛书

混凝土中钢筋的腐蚀与保护

洪定海 编著

中国铁道出版社

1998年·北京

图书在版编目(CIP)数据

混凝土中钢筋的腐蚀与保护/洪定海编著. —北京: 中国铁道出版社, 1998.9

(混凝土现代技术丛书/吴中伟主编)

ISBN 7-113-03041-6

I. 混… II. 洪… III. 建筑材料-钢筋-防腐-研究 IV. TU511.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 16515 号

混凝土现代技术丛书

混凝土中钢筋的腐蚀与保护

洪定海 编著

*

中国铁道出版社出版发行

(100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

责任编辑 傅希刚 封面设计 赵敬宇

北京市燕山联营印刷厂印刷 各地新华书店经售

1998 年 9 月第 1 版 第 1 次印刷

开本: 787 mm × 1 092 mm 1/32 印张: 12.375 字数: 273 千字

印数: 1~2 500 册 定价: 28.00 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 请与本社发行部调换。

“混凝土现代技术丛书”

编委会名单

顾问：黄蕴元

主任委员：吴中伟

副主任委员：姚明初

编委会委员：(以姓氏笔划为序)

冯乃谦 吴中伟 沈旦申 洪定海

姚明初 龚洛书 蒋家奋 甄永严

蔡正咏

序 一

自从波特兰水泥问世以来,混凝土与钢筋混凝土很快就成为主要的建筑材料,广泛地应用于各种建筑工程中。第二次世界大战以后,水泥混凝土的用量迅速增加。目前世界水泥年产量已达 13 亿吨左右,可制作混凝土 30 亿 m^3 以上,所以混凝土不仅是用量最多的建筑材料,而且也是当代最大量的人造材料。对这样的大宗材料进行有效的研究开发工作,致力于增加品种、改进工艺、提高性能、降低成本、节约能耗,不断扩大其应用范围,充分发挥其社会效益与经济效益,已成为混凝土科技工作者的光荣职责。

现在,我们正处于新的技术革命的伟大时代,各项技术都在互相渗透、互相促进,形成日新月异之势。混凝土技术也不例外,新技术新成就不断涌现。本丛书为了加速混凝土科学技术水平的提高,使混凝土这种主要材料在我国经济建设中发挥更大作用,对于实用意义较大的混凝土现代科学技术,分期分批出版专册(著)。

中国铁道出版社自组织出版《混凝土现代技术丛书》以来,已出版了《膨胀混凝土》,《流态混凝土》,《三向应力混凝土》,《粉煤灰混凝土》,《碾压混凝土》,《硫酸盐水泥混凝土的特性及应用》,《硅粉混凝土及其应用》,《自应力钢筋混凝土管》,《混凝土养护节能技术》,《真空混凝土工艺及设备》,《混凝土力学性能测定》,《数理统计在混凝土试验中的应用》,《混凝土的徐变》,《混凝土的收缩》,《混凝土力学》等 15 种。为完善此丛书,拟于近期组织出版的有《天然沸石混凝土应用技

II

术》,《轻集料混凝土》,《聚合物浸渍混凝土》,《高性能混凝土》,《防腐蚀混凝土》,《纤维增强水泥复合材料》,《大体积混凝土》,《混凝土中钢筋的腐蚀与防护》,《混凝土冬期施工》,《混凝土快速硬化》,《混凝土质量非破损检验技术》,《混凝土材料科学》,《混凝土的耐久性》,《混凝土碱集料反应》等。

本丛书除了传播新知识以外,还将发挥宣传教育的作用。解放以来,我国混凝土科学技术进步很快,混凝土工程数量庞大,混凝土结构构件与各种水泥制品品种繁多,满足了基本建设与国民经济发展的需要,成绩是巨大的。但也不能否认,混凝土新技术的开发和普及工作还不能令人满意。至今我国高性能混凝土、高效外加剂、商品混凝土等与先进国家相比还有较大差距,混凝土工程质量问题,尤其是耐久性问题,更应立即加以重视。总的来说,当前我国混凝土技术水平还不高,必须加速信息的传播,加强宣传教育工作,尽快赶上国际先进水平,以保证我国高速度的建设事业对混凝土的需要。

随着科学技术的进步与我国混凝土科研与生产经验的积累,本丛书拟在新品种与特种混凝土,新工艺、新设备,性能与测试技术,应用理论等方面继续扩大选题范围。希望同行专家与广大读者,给予支持,共同为加速混凝土新技术的发展贡献力量。

吴中伟 姚明初

一九九六年五月

序 二

洪定海教授长期从事港工与水工钢筋混凝土与钢结构的研究开发工作,尤其在混凝土及钢筋混凝土耐久性的研究试验与防止海水对混凝土中钢筋腐蚀方面有较深的造诣。在钢筋腐蚀与保护的理论与工程实践方面均取得很多成果。本书集中了他五十年的科研与实践成果,同时还汇集了国内外这方面的大量信息。

本书与国内外同类著作相比,有下列特点:

一、提出双掺高性能混凝土作为防止钢筋腐蚀的基本措施。高性能混凝土最近十年提出的新型高技术混凝土,在国内外受到愈来愈大的重视,而双掺高性能混凝土对耐久性尤其重要。提出充分养护作为重要措施十分正确。

二、较详细地评述了保护钢筋的技术措施,尤其是电化学保护、阻锈剂和混凝土表面处理,为混凝土中钢筋防腐蚀提出了有效的途径。

三、较完整地评述了钢筋腐蚀与混凝土保护参数的各种检测技术,有些是较新的无损检测技术。另外还对钢筋腐蚀引起破坏的结构修复提出了正确的指导原则。

本书说理清楚,文字流畅,并列举了很多有应用价值的工程实例,不仅对我国应及早防止和亟待解决的钢筋腐蚀与修复问题具有很大的实际意义,而且将推进钢筋混凝土耐久性的科技进步。

吴中伟

1998年6月

前 言

作为主要建筑材料的钢筋混凝土和预应力混凝土,已广泛地应用于各种建筑工程中。由于混凝土的碳化,特别是氯化物污染(海洋、海岸工程与撒除冰盐的路桥工程)结构混凝土,引起钢筋腐蚀、混凝土顺筋胀裂、层裂和剥落破坏,今天已成为威胁全世界和我国混凝土结构耐久性的主要灾害,它造成的直接、间接损失之大,远远超出人们预料。在欧美经济发达国家已构成严重的财政负担。处于蓬勃建设高潮和维修高峰期的我国,如果不吸取教训,重视提高混凝土的护筋性,那末,若干年后,钢筋腐蚀破坏的恶果将日益加剧地“爆发”!势必会像在经济发达国家一样,制约整个经济的健康、飞跃发展,这正是现在我们面临的严重挑战!

但是,另一方面,也应当看到钢筋腐蚀破坏是混凝土保护层覆盖下钢的电化学腐蚀,它既区别于一般结构的电化腐蚀,又区别于一般混凝土的化学腐蚀与冻害,具有自成一统的特性。由于当今混凝土科学和混凝土中钢腐蚀电化学理论的日益完备、系统和深化,保护实践经验日益丰富和精深。可以从根本预防钢筋腐蚀的高性能混凝土新技术的突飞猛进的发展、混凝土抗渗性和钢筋腐蚀的无损、定量、快速检测新技术的日趋成熟和商品化,为我们抓住机遇、迎接挑战,早在钢筋腐蚀孕育期就事半功倍地从根本上解决钢筋腐蚀与保护这个老大难问题,提供了有效手段,展示了良好前景。

我是一名建筑科研工作者,40多年主要从事混凝土及其应用技术的研究。从60年代初开始,我有幸亲自主持和参加

了钢筋腐蚀与保护,特别是海洋环境中钢筋腐蚀与保护方面许多课题的试验研究和开发工作,以及有关标准的编制。《混凝土现代技术丛书》编委会委托我编写这本书的目的,就是要把 30 多年来我们取得的成果,加上长期搜集到的大量信息(一直到 1996 年),综合成系统知识,介绍给大家,以促进钢筋防腐技术于近期内从根本上有质的突破。

但是,由于我个人能力和水平有限,不可能将辛勤劳动所取得的全部成果和国际上浩繁的知识精粹,正确、全面而又系统地介绍给读者。在这里,除了向为我们专题工作倾注了大量心血和精力的陈伯起等同事和专家们,为参与书稿整理、分析、编写和审核工作的王昌义、朱雅仙、高文英等同志们表示衷心感谢和敬意外,对本书某些内容和观点可能表达不当,甚至错误之处,敬请专家和读者批评指正。

由于本书篇幅有限,不能将所引用的大量资料作为参考文献一一列出。特别感谢陈梅赞同志热心联系,将本书引用的全部参考资料在中国水泥制品协会、全国水泥制品情报网和苏州混凝土水泥制品研究院联合出版的《混凝土水泥制品信息》于 1998 年陆续刊出,专家和读者如欲进一步检索可向本书作者预约。

洪定海

1997 年 12 月

目 录

第一章 钢筋腐蚀的严重性与保护的重要性	1
1.1 问题的严重性	1
1.2 保护的重要性.....	13
第二章 钢筋腐蚀与保护机理及其影响因素	14
2.1 钝 化.....	14
2.2 去 钝 化.....	17
2.3 混凝土碳化与钢筋去钝化.....	20
2.4 氯化物与钢筋去钝化.....	26
2.5 钢筋腐蚀的发展.....	59
第三章 保护钢筋的基本措施	81
3.1 前 言.....	81
3.2 结构设计中应考虑的保护措施.....	82
3.3 双掺高性能混凝土.....	83
3.4 充分养护下掺粉煤灰或矿渣改善混凝土抗 渗性与护筋性的效果.....	92
3.5 养护不够对掺粉煤灰或矿渣混凝土抗渗性 与护筋性的影响	109
3.6 掺粉煤灰或矿渣的结构混凝土国内外 应用范例	122
第四章 保护钢筋的补充措施	144
4.1 耐腐蚀钢筋	144
4.2 阻 锈 剂	165
4.3 阴极保护	184

4.4	混凝土表面处理	236
第五章	钢筋腐蚀与混凝土护筋参数检测技术	260
5.1	检测目的与要求	260
5.2	钢筋腐蚀表示方法	261
5.3	混凝土中钢筋腐蚀检测技术	263
5.4	混凝土护筋参数检测技术	308
5.5	结构中钢筋腐蚀与混凝土护筋状况的 长期检测	314
5.6	混凝土结构表层渗透性现场检测技术	315
第六章	钢筋腐蚀引起结构破坏后的修复	352
6.1	前 言	352
6.2	钢筋除锈的重要性	352
6.3	氯化物污染下局部修补效果	355
6.4	钢筋腐蚀引起结构破坏的修补对策	363
附录	一座海港码头钢筋混凝土上部结构盐污染 严重破坏后几种修补方案的成本对比	373
	参考文献	375

第一章 钢筋腐蚀的严重性与保护的重要性

1.1 问题的严重性

众所周知,混凝土具有高碱性。如果选用适合于具体环境的正常材料,仔细设计和施工,使混凝土保护层具有密实组织、足够厚度,并在使用中防止微裂缝扩展,本可以保证钢筋长期完好,不会腐蚀。也就是说,在一般环境甚至恶劣的海洋环境和冷天撒除冰盐的盐污染环境中,钢筋混凝土和预应力混凝土结构也是可以很耐久的。

但是,事实上,钢筋腐蚀引起混凝土结构的过早破坏,已成为全世界普遍关注并日益突出的一大灾害。在 1991 年召开的第二届混凝土耐久性国际学术会议上,Mehta 教授在题为《混凝土耐久性——五十年进展》主旨报告中指出:“当今世界,混凝土破坏原因,按重要性递降顺序排列是:钢筋腐蚀、寒冷气候下的冻害、侵蚀环境的物理化学作用。”“现在总的一致意见是:40 年代以来,混凝土建筑工业的迅猛发展,通过硅酸盐水泥组成变化,导致坍落度大的混凝土拌合物生产和应用。这种混凝土的强度能符合要求,但从钢筋保护和混凝土耐冻、耐腐蚀角度看,则不满意。也就是说,当今更多的混凝土结构,比 50 年前更不耐久。”“当今混凝土结构耐久性问题的日益严重,除冰盐应用的日增,水、土壤、大气的污染加剧,也有促进作用。”

美国标准局(NBS)1975 年的调查表明,美国全年各种腐蚀损失为 700 亿美元,其中混凝土中钢筋腐蚀损失占 40%

(280 亿美元)。1989 年美国运输部门给国会的一份关于美国公路与桥梁状况的报告中指出：“现在积压着有待修补的混凝土桥梁的维修费是 1550 亿美元”，数目惊人！

1992 年一文披露，仅在美国，因撒除冰盐引起钢筋腐蚀破坏而限载通车的公路桥就占 1/4（即 52 万余座中的 13 万余座），其中已不能通车的占 1%（约 5000 座）。仅这些桥的维修费，即高达 900 亿美元。如果再加上车库、公路、房屋等因钢筋腐蚀而需要的修补费，则估计高达 2580 亿美元，几乎占美国债务的 6%！

在英国，“许多现代公路、公用与商业用钢筋混凝土结构是 60 年代到 80 年代建造的。因为除冰盐透过沥青防水层和 2~3cm 厚的混凝土保护层到达钢筋一般要 10~20 年，所以钢筋腐蚀引起混凝土结构的严重破坏发现得比美国晚。但是近几年，这个问题正日益突出。”“英格兰岛的中环线快车道上有 11 座高架桥（全长 21km），总建造费（1972 年）是 2800 万英镑。由于冷天撒盐除冰，两年后就发现钢筋腐蚀使混凝土胀裂。到 1989 年的 15 年间，修补费已高达 4500 万英镑（即已为造价的 1.6 倍）。估计以后 15 年间（到 2004 年）的维修还要耗费 1.2 亿英镑（即接近造价的 6 倍）！”英国环保部门最近的一份报告估计，“英国建筑工业的年成交额为 500 亿英镑，而现在，因腐蚀破坏，钢筋混凝土结构年维修费已达 5.5 亿英镑（占其 1.1%），已成为英国一个沉重的财政负担！”

这些事例反映了钢筋腐蚀为害之大和日益加剧的严重态势，是大大超出人们意料的。下面举一些工程实例加以具体说明。

30 年代建造的美国俄勒冈州 Alsea 海湾上的多拱大桥，施工质量极好，但因混凝土的水灰比太大，钢筋广泛严重腐蚀，引起结构破坏，用传统的局部修补方式修补破坏处，不久

就发现修补处的附近,钢筋又加剧腐蚀造成破坏,不得不拆除、更换。美国旧金山海湾上第一座跨海湾的 San Mateo-Hayward 大桥、Hood 航道桥东半部以及瑞典的 Oland 桥也出现了类似情况。

60 年代建造的旧金山海湾第二座 San Mateo-Hayward 跨海湾大桥上,处于浪溅区的预制横梁,虽采用优质(水灰比 0.45,水泥用量 $370\text{kg}/\text{m}^3$)混凝土拌合物,但由于梁体尺寸大(高 3.75m,宽 1.8m)、底部配筋密,加上蒸汽养护引起微裂缝,给钢筋腐蚀创造了必要条件,因此又发生了严重腐蚀,1980 年不得不进行耗资巨大的修补。

1962~1964 年, Gjorv 对挪威海边 700 座混凝土结构作过耐久性调查,这些结构有 60% 是用导管浇筑的立柱梁板式钢筋混凝土码头,当时已使用 20~50 年的占 2/3。在浪溅区,立柱显示破坏的断面损失率大于 30% 的占 14%,断面损失率为 10%~30% 的占 24%;板和梁显示钢筋腐蚀引起严重破坏的占 20%。Gjorv 分析,破坏首先是非引气混凝土因冻融作用引起开裂,致使氯化物渗入混凝土,加剧了钢筋腐蚀破坏。1968 年,他又对其中一座有 60 年历史的码头作拆除前更详细的耐久性调查,在海水浪溅作用更多的外侧,梁、板的钢筋严重腐蚀破坏进一步证实了上述论断。

阿拉伯海湾和红海的大量海工混凝土结构,由于气温高,在含盐、干热、多风的白昼,混凝土表面温度高达 50°C ,而晚上凉得结露,构成了特别严重的侵蚀环境。加上当地石灰石集料多孔、易受氯化物污染;沿用温带地区海工混凝土工程经验规定的是强度等级较低(30MPa)、密实性较差的混凝土和 50~60mm 厚的保护层;针对主观设想的海水硫酸盐腐蚀,强调采用 C_3A 含量为零的抗硫酸盐硅酸盐水泥(实际上,这种水泥的抗氯化物渗透性更差);再加上关键部位的钢筋过于密

集、施工质量差(保护层厚度实际上只有 20~40mm,湿养护不够),所以往往在使用的头一年,钢筋就遭到严重腐蚀。如沙特阿拉伯东部 Jubail 输送冷却用海水的长 40km 渠道,采用高 6.5m 的钢筋混凝土墙和直径 2m 的预应力混凝土虹吸管,在完全投入使用前,就不得不因钢筋腐蚀破坏而进行修补;使用 2~3 年后,钢筋断面损失率高达 1/4。1973~1975 年建造的阿联酋迪拜 Al-Shindagha 海底隧道,1986 年就不得不修补,修补费是建造费的两倍;阿布扎比新建的干船坞也因钢筋腐蚀严重破坏。苏伊士运河和香港隧道也出现了类似情况(Gerwick, 1990)。Al-Tayyib 等(1985)对沙特阿拉伯海滨地区 42 座混凝土框架结构耐久性调查结果表明,只显示轻微或没有钢筋腐蚀的测试区,只占测试区总数的 26%;其余 74% 都显示严重的钢筋腐蚀破坏。

日本运输省检查 103 座混凝土海港码头状况,发现凡是有 20 年历史的,都有相当大的顺筋锈裂,需要修补(Kiyomiya, 1986)。

澳大利亚 Sharp 调查 62 座海岸混凝土结构,查明耐久性的许多问题是与浪溅区的钢筋异常严重的腐蚀有关,特别是昆士兰使用 20 年以上的混凝土结构的桩帽。

德国柏林议会大厦预应力混凝土屋顶倒塌, Isecke 的调查分析表明,是预应力钢丝周围水泥浆体灌注不好,导致析氢的应力腐蚀破裂。

印度孟买 Thane 小河上的第一座桥是后张预应力混凝土桥,由于预应力筋过早地发生严重腐蚀,现在不得不更换,重修第二座桥。由于该桥预应力筋在安装前就为大气中的盐分所污染,灌注的水泥浆体又用了河口的咸水,因而不到 10 年,所有钢筋、预应力筋及其套管都遭到了严重腐蚀破坏。

1953 年英国南威尔斯跨 Afan 河建造的一座名为 Ynys-

y-Gwas 的单跨后张预应力混凝土桥, 1958 年倒塌了。Woodward 等(1988)调查表明, 撒在桥面上的除冰盐沿各纵梁接缝处渗入, 使接缝处灌浆不饱满的纵向与横向后张预应力筋遭受严重腐蚀破坏。

五六十年代, 为使冷天施工的混凝土获得早期强度, 各地曾普遍掺加氯化钙早强剂, 有的掺量高达水泥质量的 17.5%, 致使大量工业厂房、住房和桥梁等公用设施遭到钢筋腐蚀引起的结构破坏, 不得不过早地报废或重修, 代价惨重。70 年代后期总结上述教训后才普遍禁止掺加氯化钙早强剂。

此外, 混凝土碳化也使大量住房、工业厂房、冷却塔、烟囱等遭到钢筋腐蚀破坏。如英国的非商业住房, 到 1955 年共 50 万座, 其中 30% 在 35 年后, 都是因为所有的预制构件的混凝土碳化引起钢筋腐蚀遭到破坏。

香港房管局 1989 年调查过 1000 栋公寓, 其中 156 栋需要修补, 主要原因是混凝土碳化和厕所用海水冲洗系统的渗漏。日本 Kishitani 等(1984)对 4000 座房屋的一次调查中, 也发现钢筋腐蚀破坏是混凝土碳化引起的。

至于我国钢筋腐蚀引起混凝土结构过早破坏, 损失究竟有多大? 这个耐久性问题究竟多严重? 由于长期经济效益问题还没有引起足够重视, 还没有组织过全面系统的调查研究, 所以现在还提不出来。但是, 像北京、天津的许多立交桥, 虽然使用时间还不长, 冷天撒盐化冰雪也没有美国北方那末频繁, 但近年来也日益暴露出严重的钢筋腐蚀破坏, 有的已不得不安排耗资巨大而长期效果却并不大的大修。哈尔滨一大庆公路, 在建成 5 年后, 混凝土就出现异常严重的顺筋胀裂、剥落和层裂。

在处于浪溅区的海港码头的混凝土梁和板中, 钢筋腐蚀引起的结构破坏是相当普遍、相当严重的。这一结论作者在

1963年主持的第一次系统调查湛江港一区老码头时即已揭示,并为以后多次调查研究所一再证实。其严重程度并不亚于上述美、英等国家冷天撒除冰盐的公路桥梁和中东海湾地区盐污染的钢筋混凝土结构。海港码头的混凝土梁、板,往往不到10年就普遍出现顺筋锈胀开裂、剥落,并日益加剧,不得不耗资巨大地局部修补,但隔数年,又要修补。因此,近来有些海港码头的管理部门甚至在软基上也宁可采用基建费倍增、工期延长的重力式混凝土码头代替桩基钢筋混凝土梁板码头。

下面简单介绍其典型情况。

60年代,吴绍章等调查华南、华东地区27座海港钢筋混凝土结构,其中因钢筋腐蚀导致结构破坏的占74%。1981年,作者和第四航务工程局科研所一起调查华南18座使用7~25年的海港钢筋混凝土码头,因构件单薄和混凝土的水灰比大(0.65)或施工质量差,钢筋腐蚀导致结构破坏的占89%,只有混凝土水灰比较低(约0.5)且使用期较短的两座码头基本完好。

童保全等1984年调查浙江沿海使用仅7年到十余年的22座钢筋混凝土水闸(构件共967件),钢筋腐蚀使混凝土顺筋胀裂、剥落甚至钢筋锈断的构件占56%。浙江省水利科研所在宁波、舟山、温州三市,对35座挡潮闸也进行了钢筋混凝土耐久性调查。从122个混凝土样品分析结果看,混凝土中氯离子含量平均达0.38%(对砂浆质量),尤其是施工质量较差的,运行才1~2年,就顺筋胀裂。江苏省水利科研所许冠绍等(1964~1987)对61座挡潮闸进行的耐久性调查表明,钢筋腐蚀导致上部结构破坏的占87%,其中破坏严重的占54%,主筋周围砂浆的 Cl^- 浓度达0.53%,断面损失率达40%。

单国良等1985年对连云港第一和第二码头混凝土上部