

钢筋混凝土结构的裂缝控制

赵国藩 李树瑶 廖婉卿

文明秀 王清湘 宋玉普

王 健 编著

海 洋 出 版 社

1991年·北京

钢筋混凝土结构的裂缝控制

赵国藩 李树瑶 廖婉卿

文明秀 王清湘 宋玉普

王 健 编著

海 洋 出 版 社

1991年·北京

内 容 提 要

本书共分十三章。内容包括混凝土结构裂缝原因及裂缝对结构使用的影响，混凝土的抗拉强度和变形，裂缝研究中的试验方法，钢筋混凝土、预应力混凝土及轻骨料混凝土构件抗裂度和裂缝宽度的计算方法，有限元及可靠度理论在裂缝计算理论中的应用等。

本书为土木、海洋、水利、建筑等专业研究生的参考书籍，也可供有关专业的科技工作者参考。

责任编辑：赵士青

责任校对：俞丽华

钢筋混凝土结构的裂缝控制

赵国藩 李树瑶 廖婉卿

王健 编著

文明秀 王清湘 宋玉普

海洋出版社出版（北京市复兴门外大街1号）

新华书店北京发行所发行 北京三环印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：19.25 字数：400千字

1991年2月第一版 1991年2月第一次印刷

印数：1—3000

ISBN 7-5027-0509-9/TU·2 ¥：14.90元

目 录

第一章 混凝土结构裂缝原因及对结构使用的影响	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 混凝土结构中产生裂缝的原因	(1)
第三节 钢筋腐蚀机理及裂缝与钢筋腐蚀的关系	(4)
第四节 国内关于钢筋锈蚀的调查和研究	(8)
第五节 钢筋防腐的措施	(13)
第六节 钢筋混凝土裂缝对结构使用功能的影响及结构设计中对裂缝控制的要求	(14)
附录	(17)
参考文献	(23)
第二章 混凝土的抗拉强度	(25)
第一节 概述	(25)
第二节 混凝土抗拉强度的试验方法	(25)
第三节 影响混凝土抗拉强度的因素	(40)
第四节 混凝土抗拉强度和抗压强度的关系	(47)
参考文献	(48)
第三章 混凝土的受拉变形	(50)
第一节 概述	(50)
第二节 测定混凝土受拉变形的试验方法	(50)
第三节 混凝土受拉的应力与应变关系	(52)
第四节 影响混凝土板极限拉伸值的因素	(55)
第五节 配筋对混凝土极限拉伸值的影响	(57)
参考文献	(59)
第四章 裂缝研究中的试验方法	(61)
第一节 概述	(61)
第二节 观测裂缝的方法	(61)
第三节 裂缝宽度的测量方法	(70)
第四节 测定钢筋与混凝土间粘结与滑移的方法	(72)
参考文献	(76)
第五章 钢筋混凝土及预应力混凝土构件正截面抗裂度验算	(78)
第一节 概述	(78)
第二节 钢筋混凝土受弯构件正截面抗裂度计算	(78)
第三节 钢筋混凝土偏心受压构件正截面抗裂度计算	(110)
第四节 钢筋混凝土偏心受拉构件及轴心受拉构件正截面抗裂度计算	(113)
第五节 预应力混凝土构件正截面抗裂度计算	(114)
第六节 钢筋混凝土构件正截面抗裂度研究简介	(116)
参考文献	(118)

第六章 钢筋混凝土构件裂缝宽度的计算方法	(120)
第一节 概述	(120)
第二节 简单受力钢筋混凝土构件的裂缝机理	(120)
第三节 国外裂缝宽度计算理论的研究概况	(123)
第四节 国内裂缝宽度计算理论的研究及其在规范中的应用	(146)
第五节 我国最近在裂缝宽度研究上的进展	(159)
参考文献	(173)
第七章 部分预应力混凝土构件裂缝宽度的计算	(175)
第一节 概述	(175)
第二节 国外关于部分预应力混凝土构件裂缝宽度计算研究概况	(175)
第三节 国内对部分预应力混凝土梁裂缝宽度计算方法的研究	(178)
第四节 部分预应力混凝土梁预应力钢筋应力增量 $\Delta\sigma_s$ 和非预应力钢筋应力 σ_s 的计算	(186)
参考文献	(200)
第八章 环形、圆形截面钢筋混凝土受弯、受拉、偏心受压构件抗裂度、裂缝宽度的计算	(201)
第一节 概述	(201)
第二节 环形、圆形截面受弯、受拉、偏心受压构件的抗裂度计算	(201)
第三节 环形、圆形截面受弯、受拉、偏心受压构件裂缝宽度验算	(212)
参考文献	(219)
第九章 钢筋混凝土双向受弯构件抗裂度及裂缝宽度的计算	(220)
第一节 概述	(220)
第二节 双向受弯构件的受力特性	(220)
第三节 双向受弯构件抗裂度的计算	(224)
第四节 双向受弯构件裂缝宽度的计算	(228)
参考文献	(231)
第十章 钢筋混凝土梁斜截面抗裂度及裂缝宽度的计算	(232)
第一节 斜截面抗裂度计算的基本假定和力学模式	(232)
第二节 斜截面抗裂度的计算公式	(234)
第三节 有腹筋梁斜裂缝形态及主要影响因素	(238)
第四节 有腹筋梁斜裂缝宽度的计算	(242)
参考文献	(248)
第十一章 钢筋轻骨料混凝土构件的裂缝控制	(250)
第一节 概述	(250)
第二节 轻骨料混凝土的材料特性	(251)
第三节 轻骨料混凝土中钢筋的锈蚀	(253)
第四节 钢筋轻骨料混凝土构件的抗裂度计算	(256)
第五节 钢筋轻骨料混凝土构件的裂缝宽度计算	(262)
参考文献	(267)

第十二章 有限单元法在裂缝研究中的应用 (268)

第一节 钢筋混凝土有限单元法的一般分式及在分析裂缝问题中的特点 (268)

第二节 材料的本构关系和混凝土的开裂条件 (269)

第三节 钢筋与混凝土间的联结模型 (275)

第四节 裂缝的模拟和裂缝面间力的传递 (281)

第五节 裂缝宽度的计算 (285)

参考文献 (288)

第十三章 钢筋混凝土构件裂缝控制可靠度的近似概率分析 (291)

第一节 结构可靠度分析的基本概念 (291)

第二节 抗裂度的可靠度 (295)

第三节 裂缝宽度的可靠度 (297)

参考文献 (299)

第一章 混凝土结构裂缝原因及 对结构使用的影响

第一节 概 述

混凝土是由水泥石、砂(细骨料)、石(粗骨料)组合而成的材料。在水泥石结硬过程中,存在气穴、微孔和微裂缝。因此从微观上看,混凝土是水泥石、砂、石及充有空气、水的微孔和微裂缝的多相组合体。这种多相组合体中的水泥石、砂、石等组成材料的物理化学性质并不相同。作为亚宏观构造,混凝土是水泥砂浆、粗骨料和夹有微孔、微裂缝的多相组合体。从宏观上看,混凝土有其自身的物理化学性质。例如,它的物理力学性质就表现为混凝土的抗压、抗拉强度、弹性模量等。实际上,混凝土的物理化学性质是与它的微观构造或亚宏观构造密切相关的,不同的微观或亚宏观构造的混凝土所表现的宏观物理化学性质是不同的。

混凝土在硬结过程中,就已存在微观裂缝和微孔,这些微观裂缝和微孔对作为混凝土宏观表现的物理化学性质有相当大的影响。微观裂缝可分为砂浆裂缝,粘结裂缝和骨料裂缝。砂浆裂缝存在于水泥砂浆中,粘结裂缝存在于砂浆和粗骨料的界面上,骨料裂缝存在于粗骨料自身内部。在一般情况下,混凝土未受力前,微观裂缝主要是前两种,即砂浆裂缝和粘结裂缝。混凝土受力后,微观裂缝与微孔逐渐连通,逐渐扩展,形成“宏观裂缝”;再继续扩展,导致混凝土丧失承载能力。混凝土中存在的微观裂缝和孔洞等缺陷是混凝土受力呈现非线性变形以及抗拉强度远低于抗压强度的主要原因之一。从微观上研究混凝土组成材料的构造及混凝土制备工艺,从构造上改善混凝土的性能,是近年来混凝土材料科学发展的新方向,也是研究混凝土强度及变形理论的新方向。但由于问题比较复杂,这方面的研究尚处于初始发展阶段。从工程实用角度来研究裂缝问题主要是指对混凝土宏观强度及对结构物的耐久性和适用性有害的宏观裂缝,即通常所称为裂缝的问题,本书讨论的裂缝问题即是指工程结构中普遍关心的对结构功能有不利影响的宏观裂缝问题。

第二节 混凝土结构中产生裂缝的原因

由于混凝土的组成材料和微观构造的不同以及所受外界影响的不同,混凝土产生裂缝的原因较为复杂,它对结构功能的影响也是不同的。产生裂缝的原因,有以下诸方面^{〔1〕}:

(一) 大块体混凝土水化热引起的裂缝

在大块体混凝土凝结和硬化过程中,水泥和水产生化学反应,释放出大量的热量,称为“水化热”,导致混凝土块体温度升高。当混凝土块体内部的温度与外部环境温度相差很大,以致所形成的温度应力或温度变形超过混凝土当时的抗拉强度或极限拉伸值时,就会形成裂缝。

防止产生这种裂缝的主要措施是,合理的分层、分块、分缝,采用低热水泥,在受压区埋置块石,加掺合料(如粉煤灰),埋入冷却水管,预冷骨料,预冷水,加强养护等。这个

问题在水坝、水闸等大体积混凝土建筑物的设计和施工的专著中有详细的论述。

（二）塑性收缩裂缝

这种裂缝发生在混凝土浇筑后数小时仍处于塑性状态的时刻。发生这种裂缝的因素是多方面的。大面积的路面或楼板、炎热或大风天气以及混凝土水化热高等，都容易产生这种裂缝。这类裂缝的宽度可大可小，小的细如发丝，大的可到数毫米，其长度可由数厘米到数米，深度很少超过5cm，但薄板则有可能被其穿透，分布的形状一般是不规则的，有时可能与板的长边正交。

防止这种裂缝的措施是，尽量降低混凝土的水化热、控制水灰比、采用合适的搅拌时间和浇筑措施，以及防止混凝土表面水分过快的蒸发（覆盖席棚或塑料布）等。

（三）混凝土塑性塌落引起的裂缝

在大厚度的构件中，混凝土浇筑后半小时到数小时即可发生这种裂缝。其原因是混凝土的塑性塌落受到模板或顶部钢筋的抑制，或是在过分凹凸不平的基础上进行浇筑，或是模板沉陷、移动或是斜面浇筑的混凝土向下流淌。

防止这种裂缝的方法是，采用合适的混凝土配合比（特别要控制水灰比），防止模板沉陷，合适的振捣和养护等。在裂缝发生、塌落终止后，将混凝土表面重新抹面压光，可使裂缝闭合。

（四）混凝土干缩引起的裂缝

普通混凝土在硬化过程中，要产生由于干缩而引起的体积变化。当这种体积变化受到约束时，如两端固定梁，或是高配筋率的梁，或是浇筑在老混凝土上或坚硬岩基上的新混凝土，都可能产生这种裂缝。这种裂缝的宽度有时很大，甚至会贯穿整个构件。

防止这种裂缝的措施是，改善水泥性能，合理减少水泥用量，降低水灰比，对结构合理分缝，配筋不要过高等，而加强潮湿养护尤为重要。

（五）碱-骨料反应引起的裂缝

碱-骨料反应有两种：一种是碱-硅酸盐骨料反应，另一种是碱-碳酸盐骨料反应。后一种不常见。前一种引起混凝土裂缝的原因可能是混凝土加水拌和后，水泥中的碱不断溶解，这种碱液与活性骨料中的活性氧化硅起化学反应，析出胶状的碱-硅胶，从周围介质中吸水膨胀，其体积可增大到三倍，而使混凝土胀裂，其特点是裂缝中充满白色胶体，表面裂缝常有白色沉淀的胶体，呈杂乱的“地图”状。

防止这种裂缝的措施是，尽可能选择非活性骨料，控制水泥含碱量，掺用加气剂及某些混合料（如天然浮石）等。

（六）外界温度变化引起的裂缝

大体积的混凝土坝、闸墩，闸墙，在拆模以后，突然遇到短期内大幅度的降温，如寒潮的袭击，产生较大的内外温差，引起较大的温度应力，而使混凝土开裂。

混凝土烟囱、核反应堆容器、海下石油储罐等承受高温的结构，也会产生温差引起的裂缝。

防止这类裂缝的措施是，对于突然降温，要注意天气预报，采取防寒措施。对于高温，要采取隔热措施，或是合适的配筋及施加预应力等。

对于长度大的墙式结构，则要与防止混凝土干缩裂缝一起考虑，设置温度-干缩构造缝。

(七) 结构基础不均匀沉陷引起的裂缝

超静定结构的基础沉陷不均匀时，结构构件受到强迫变形，而使结构构件开裂，随着不均匀沉陷的进一步发展，裂缝会进一步扩大。

防止这类裂缝的措施是，根据地基条件及结构型式，合理采用构造措施，设置沉陷缝等。

(八) 钢筋腐蚀引起的裂缝

钢筋混凝土构件处于不利环境，如容易渗入氯离子和氧（溶于海水中）的海洋环境，当混凝土保护层过薄，特别是混凝土的密实性不良时，埋在混凝土中的钢筋将生锈，即氧化铁。氧化铁的体积比原来的金属大得多。铁锈体积膨胀，对周围混凝土挤压，使混凝土胀裂。这种裂缝通常称为“先锈后裂”，其走向沿钢筋方向，比较容易识别。顺钢筋方向的裂缝发生后，更加速了钢筋锈蚀过程，最后导致保护层成片剥落，这种顺筋裂缝对耐久性的影响较大。

(九) 荷载作用引起的裂缝

构件承受不同性质的荷载作用，其裂缝形状也不同。通常裂缝方向大致是与主拉应力方向正交。常见的各种受力钢筋混凝土构件的裂缝形状如图1.1所示。在结构设计中，计算荷载作用下的裂缝是本书讨论的主要内容。

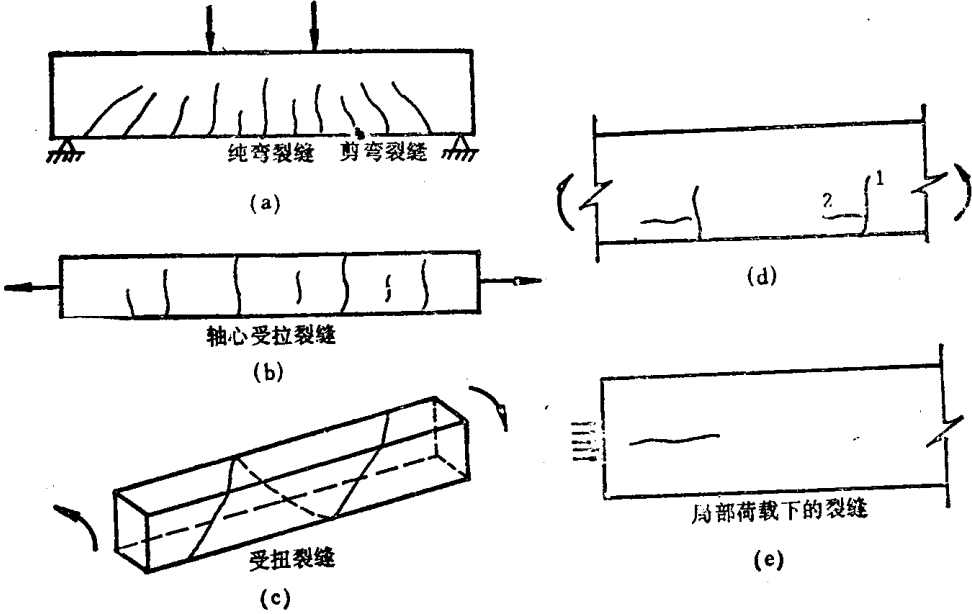


图1.1

1——横向裂缝；2——纵向裂缝

钢筋锈蚀是钢筋混凝土结构耐久性失效的主要原因之一。在我国南方气温较高的滨海建筑 and 海洋建筑物中，这个问题尤为突出。不少钢筋混凝土结构，由于钢筋锈蚀，要花费大量的财力和入力进行修复加固，国内外对此问题已进行了大量的研究，本章的第三、四节将对此问题进行简单的评述，

第三节 钢筋腐蚀机理及裂缝与钢筋腐蚀的关系

关于钢筋混凝土结构的耐久性问题，国内外均进行了大量的研究。例如在海洋工程方面，南京水利科学研究所和第一航务工程局从1957年起，曾先后对我国沿海数十座混凝土及钢筋混凝土结构进行了实地调查，又分别在大连、天津、上海和湛江等地港口建立了天然条件下的暴露试验站，并开展了大量的室内试验工作。调查及研究结果表明，引起海洋工程中混凝土和钢筋混凝土结构耐久性失效的原因是多方面的。天然因素有冰、浪撞击作用、冻融作用、钢筋腐蚀作用等，设计因素有结构选型、构件尺寸、配筋等，施工因素有材料选择、施工质量等，使用因素有超载、意外碰撞等，此外还有地基的位移、不均匀沉降等。影响我国北方海洋工程混凝土及钢筋混凝土结构耐久性的主要因素是冻融破坏作用。影响我国南方海洋工程钢筋混凝土结构耐久性的主要因素是钢筋腐蚀作用。对于北方工程的混凝土结构的耐久性问题，主要通过规定混凝土抗冻性指标、控制水灰比的最大允许值和含气量等来防止冻融作用引起的破坏。这方面的论述，请参考文献[2]。

最近几年来，关于钢筋混凝土结构包括预应力混凝土结构中的钢筋腐蚀问题越来越受到国内外的重视。在国外，由于英国、挪威、日本以及美国等国家开发海洋资源的需要，在海上建造采油平台、海底贮油罐、海洋发电站、海上机场等，对海洋钢筋混凝土结构，特别是浪花飞溅带部位的钢筋腐蚀对结构使用寿命的影响问题，受到了工程界的普遍注意，并拿出大量经费进行研究，如英国从1976年开始，投资40万英镑进行“海洋混凝土计划”的研究，共有七个项目，从混凝土中钢筋锈蚀的机理到混凝土钻井平台破坏过程的各个方面，进行了一系列的研究。在第二期计划中，又投资60万英镑，进行为期三年的研究。

在日本和英国，由于骨料资源缺乏，比较广泛地使用海砂，因而引起钢筋腐蚀的问题比较严重。在美国，由于在公路桥梁面板上撒布含氯化物的融冰剂，致使钢筋腐蚀，桥面破坏。1973年桥面的修理费用约为7000万美元，到1975年增加到2亿美元，在美国已专门进行这方面的研究。

如前所述，我国近年来的工程调查也表明，钢筋锈蚀是影响耐久性的很重要的因素。在我国南方滨海地区及海洋工程的钢筋混凝土结构物中，钢筋锈蚀问题尤为突出。钢筋锈蚀使受力截面减小，锈蚀层膨胀使混凝土保护层沿钢筋方向开裂，而后脱落，以致不得不花费大量的经费对结构进行维修和加固。因此，钢筋的腐蚀问题已引起国内的重视，积极开展了这方面的工程调查和科学研究工作。

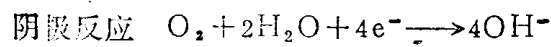
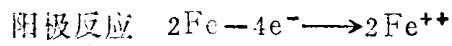
一、钢筋腐蚀机理

钢筋的腐蚀过程是一个电化学反应过程。

混凝土空隙中的水分通常以饱和的氢氧化钙的溶液形式存在，其中还含有一些氢氧化钠和氢氧化钾，pH值约为12.5。在这样强碱性的环境中，钢筋表面形成钝化膜，它是厚度为20—60Å的水化氧化物($n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$)，阻止钢筋进一步腐蚀。因此，施工质量良好、没有裂缝的钢筋混凝土结构，即使处在海洋环境中，钢筋基本上也能不发生腐蚀。但是，当由于后面所述的各种原因，钢筋表面的钝化膜受到破坏，成为活化态时，钢筋就容易腐蚀。

呈活化态的钢筋表面所进行的腐蚀反应的电化学机理是，当钢筋表面有水分存在时，就

发生铁电离的阳极反应和溶解态氧还原的阴极反应，相互以等速度进行，其反应式如下。



腐蚀过程的全反应是阳极反应和阴极反应的组合，在钢筋表面析出氢氧化亚铁(图1.2)，其反应式为：

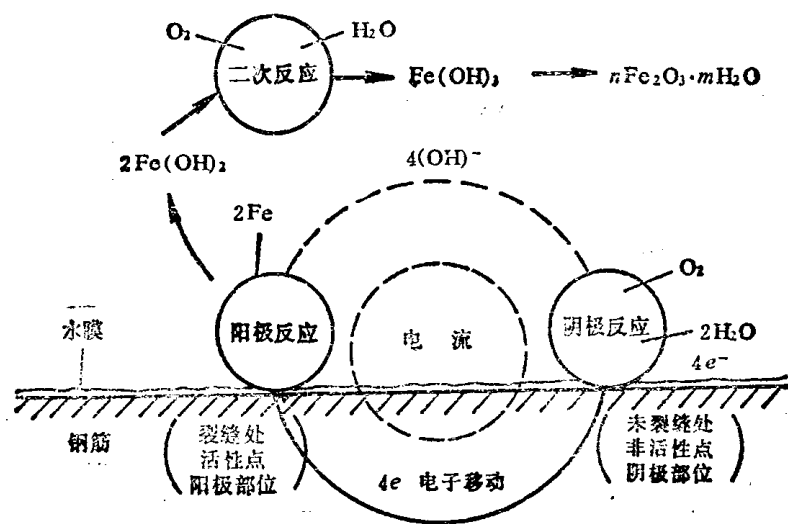
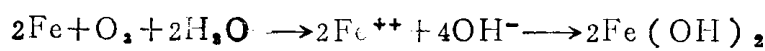


图1.2 腐蚀反应

该化合物被溶解氧化后生成氢氧化铁 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ，并进一步生成 $n\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot m\text{H}_2\text{O}$ （红锈），一部分氧化不完全的变成 Fe_3O_4 （黑锈），在钢筋表面形成锈层。红锈体积可大到原来体积的四倍，黑锈体积可大到原来的二倍。铁锈体积膨胀，对周围混凝土产生压力，将使混凝土沿钢筋方向开裂，进而使保护层成片脱落，而裂缝及保护层的剥落又进一步导致更剧烈的腐蚀。

二、钢筋混凝土中钢筋腐蚀的主要因素

钢筋腐蚀的因素是多方面的，它们之间的相互关系也很复杂，其中主要因素有以下几方面：

（一）碱度和氯化物浓度

混凝土中的碱性成分在钢筋表面形成钝化膜，其可靠性和保护能力取决于混凝土的碱度。碱度越高，即pH值越大，钝化膜的保护作用越强。但当碱性成分被融出和碳化作用产生影响，使混凝土的碱度降低或存在有害成分时，则钝化膜被破坏而引起钢筋锈蚀。破坏钢筋钝化膜的有害成分有卤素离子（ Cl^{-1} 、 Br^{-1} 、 I^{-1} ）、硫酸根（ SO_4^{2-} ）及硫离子（ S^{2-} ）等，其中氯离子的破坏作用最强，且对钝化膜产生局部性的破坏，使钢筋表面产生点状腐蚀。由于使用含氯化物的早强剂或海砂，使混凝土中掺入氯离子，或在海洋环境中因海水和每风作用使氯离子渗入混凝土也是常有的情况。因此，对混凝土中氯化物的含量应加以限制。

（二）氧

铁被腐蚀的先决条件是所接触的水中含有溶解态氧，这是因为氧在腐蚀过程中起到促进阴极反应的作用，支配着腐蚀的速度。钢筋腐蚀的最基本因素是，存在氧化物、pH值低以及钢筋表面有氧和水存在等。例如，当海水浸入到钢筋表面时，即使氯化物中的氯离子破坏了钝化膜，但只要氧达不到钢筋表面，钢筋腐蚀也不会发生。氧是以溶解态存在于海水中的，但其扩散速度很慢。因此，浸没在海水中的钢筋混凝土结构，钢筋不易腐蚀。而处于海面上的浪花飞溅带的钢筋混凝土结构，因有充足的氧，该部位的钢筋就特别容易腐蚀。但若混凝土密实性好，渗透性低，则可抑制氧的进入，防止钢筋锈蚀。混凝土中氧的扩散性能随其质量及保护层厚度而异。一般认为，钢筋表面的钝化膜要比混凝土本身阻止扩散的能力大。

（三）透水性

存在水分是钢筋腐蚀的基本条件。因此，混凝土的透水性能越强，水分越易进入混凝土，钢筋就越容易腐蚀。水灰比对混凝土的透水性影响很大。有的试验给出水灰比由0.6降至0.5，透水系数可由 $10 \times 10^{-9} \text{cm/s}$ 降至 $4 \times 10^{-9} \text{cm/s}$ 。因此，降低水灰比，可提高钢筋的抗蚀性。此外，保护层厚度对透水性有影响，从而对钢筋抗蚀性也有影响。

（四）碳化

混凝土中的氢氧化钙和二氧化碳反应生成碳酸钙，所以，处于空气或含有二氧化碳环境中的混凝土，其表面将逐渐失去碱性。当混凝土与水接触时，其中的氢氧化钙会析出。混凝土在这些化学反应作用下，会使由于高碱性而在钢筋表面形成的钝化膜遭到破坏，从而加速了钢筋的锈蚀。通常混凝土的碳化速度较慢，碳化层厚度往往在2—3cm以下。

（五）电池效应

混凝土中钢筋的腐蚀不仅是由于钝化膜破坏所致，有时也因为混凝土内部或外部环境的不均匀的电池效应而产生。这种电池效应有以下两种：

1. 异种金属接触作用。若在混凝土中存在两种相互接触的异种金属，则在两种金属之间形成“电池”，低电位一方的金属成为阳极而引起腐蚀。在潮湿环境或有氯化物存在时，必须避免使用异种金属。由于异种金属接触引起的电池效应的强弱和影响范围，由两种金属间的电位差、形状、面积比、混凝土含水量、孔隙率等因素所决定。即使是同一种金属，有时也会形成类似的电池作用。例如，混凝土中钢筋的一部分未用混凝土覆盖而裸露在外面，则由混凝土覆盖部分的钢筋和裸露部分的钢筋之间便形成了活化-碳化电池。这种电池可产生数百mV的电位差，使裸露部分的钢筋剧烈腐蚀。

2. 浓差电池作用。当混凝土中各部分的氧浓度、氯化物浓度或碱浓度不同时，则在低浓度处的钢筋成为阳极，高浓度处的钢筋成为阴极，形成浓差电池，从而促使阳极部分钢筋腐蚀。其中氧浓差电池对钢筋腐蚀的影响尤其显著。

（六）漏泄电流引起的电腐蚀

一般交流电在混凝土结构中危害不大，但有直流电通过时，若有漏泄的电流产生，就会使钢筋剧烈腐蚀。在优质混凝土中，即使有少量的漏泄电流，不会破坏钢筋的钝化，不致引起电腐蚀。此外，已碳化部分的钢筋容易引起电腐蚀。

以上所阐述的是普通钢筋混凝土中钢筋腐蚀的原理。对于预应力混凝土中的预应力高强钢筋（钢丝、钢绞线等），其工作应力比普通钢筋混凝土中钢筋的工作应力高，而截面却小得多，所以预应力钢筋遭受腐蚀后的影响比普通混凝土严重得多。国外文献中报道过预应力钢筋

腐蚀造成预应力钢筋混凝土结构损坏的事例。预应力钢筋的腐蚀主要有下述三种情况：

1. 锈坑腐蚀。与普通混凝土中的钢筋相同，是由于电化学作用造成的钢筋锈蚀。就预应力钢筋而言，锈坑腐蚀比均匀腐蚀更为危险，因为锈坑产生的槽口效应会引起应力集中，严重降低钢筋的延性和疲劳强度。钢筋强度和延性的降低将严重影响结构的安全。

预应力混凝土构件在短期活荷载作用下出现的裂缝在活荷载移去后，即会闭合或者宽度减至很小，所以水分和氯化物侵入混凝土的机会就小得多。因此对于预应力混凝土而言，采用密实的渗透性低的混凝土材料以及具有一定厚度的保护层是防止钢筋腐蚀的关键措施。此外，对后张法预应力混凝土构件的管道灌浆要密实均匀，锚具有防腐措施。

2. 应力腐蚀。这是一种腐蚀介质和拉应力共同作用下钢筋产生晶间或穿晶断裂的现象。这种断裂所造成的损失从钢筋表面不容易清楚地看出。加速应力腐蚀的条件有：①使用易腐蚀的钢材；②钢筋承受高拉应力；③存在有轻微氧化效应的腐蚀剂。

对于条件①，热处理过的钢丝和油里淬火回火钢丝比冷拔钢丝易于锈蚀，螺纹钢比光圆钢筋易于锈蚀，冷拉钢筋比未经冷拉钢筋易于锈蚀。

对于条件②，在预应力钢筋截面曲率突变处，预应力钢筋可能同时承受高拉应力和弯曲应力的共同作用。

条件③是存在硝酸盐、氯化盐、氢氧离子、水分和电位差等导致腐蚀的因素。

3. 氢脆腐蚀。这是由硫化氢与钢筋的化学反应引起的。例如使用含有硫化氢的高铝水泥时，由于氢原子的原子半径小，所以具有渗透金属的能力。氢原子进入钢筋中，就会发生氢脆腐蚀。它改变了预应力钢筋的力学性能，特别是改变了钢筋的延性和疲劳强度。

最后需要讨论的是钢筋混凝土结构在荷载作用下所产生的与纵向受力钢筋相交的横向裂缝对钢筋腐蚀的影响问题。对这个问题的看法，在国外还存在着不同的观点。

第一种观点认为，结构在使用荷载或其他荷载作用下，使混凝土产生了裂缝，水分、氧、二氧化碳、氯化物就容易通过裂缝到达钢筋表面。二氧化碳的侵入，使混凝土保护层在裂缝处碳化（图1.3），钢筋局部表面的钝化膜将受到破坏，钢筋局部表面开始活化，在阳极区，铁产生离子化过程。有裂缝与无裂缝处的混凝土透气性不相同，因而沿钢筋全长与钢筋相接触的电解液的浓度和pH值就不相同。裂缝处的钢筋电位低，成为阳极，无裂缝处的电位高，成为阴极，于是在钢筋上产生了浓差电池。当钢筋处于钝态时，钢筋上的电位相对于饱和甘汞电极为 $-100\text{mV} \sim -150\text{mV}$ ，浓差电池产生后，裂缝处钢筋上建立的电极电位约为 $-500\text{mV} \sim -600\text{mV}$ ，二者的电位差可达 $300\text{mV} \sim 400\text{mV}$ 。

在混凝土受拉区产生与纵向主筋正交或斜交的裂缝时，裂缝截面内钢筋应力比无裂缝截面的钢筋应力要大，在钢筋上产生了应力梯度。裂缝处的钢筋应力较高，电极电位较低而成为阳极，应力较低的钢筋部位，电极电位较高而成为阴极。两者的电极电位差虽然不大，但仍会形成应力梯度宏观电池。

裂缝处透气性大，氧易于到达钢筋表

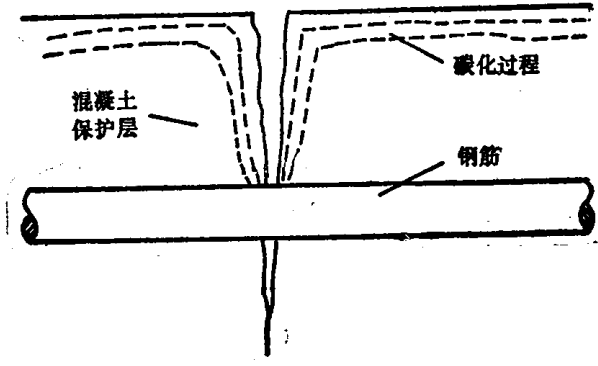


图 1.3

面,使该处钢筋的电极电位较高,成为阴极;无裂缝处氧的扩散速度慢,该处钢筋的电极电位较低而成为阳极。于是钢筋产生了透气不均的宏观电池。

由于混凝土裂缝产生上述各种宏观电池以及其他微观电池,就引起和加剧了钢筋的局部腐蚀。所以裂缝的发生和扩展是钢筋腐蚀的重要因素,因而需要根据裂缝对钢筋腐蚀的影响制订控制裂缝的规定。

第二种观点认为,钢筋的腐蚀过程分为两个阶段。第一阶段时间为 t_0 ,是从结构建成起到钢筋钝化膜被破坏为止。在这个阶段内,除保护层厚度和混凝土密实性外,裂缝宽度对 t_0 的长短有影响。第二阶段的时间 t_1 是从钢筋开始锈蚀到形成腐蚀破坏(即钢筋腐蚀造成保护层成片脱落)。 t_1 的长短主要与环境的性质、钢筋腐蚀长度、保护层厚度、钢筋直径和排列等因素有关,而与裂缝宽度关系不大。从耐久性要求,应满足的条件是 t_0+t_1 大于或等于结构的设计基准使用期(预期寿命)。

第三种观点认为,与受力钢筋正交或斜交的横向裂缝对钢筋腐蚀的影响很小,无须限制。危害结构安全的裂缝是顺钢筋方向的纵向裂缝。纵向裂缝处的钢筋锈蚀和体积膨胀使混凝土保护层剥落,钢筋的暴露又加快了锈蚀的速度,使钢筋截面进一步减小,导致结构破坏。

第一种观点与第二种观点的主要分歧是横向裂缝对钢筋锈蚀的影响程度以及在 t_0 和 t_1 中所起作用的大小。由于没有足够的观测资料,还不能作出一致的结论。因此这个问题需要进一步研究,尤其对处于条件恶劣的海洋环境中、对裂缝比较敏感的预应力混凝土结构,更要引起注意。

第三种观点要主是从钢筋混凝土结构的工程调查中得出的结果。除了局部挤压(如预应力混凝土构件锚具处)引起的纵向裂缝外,一般纵向裂缝多是由钢筋锈蚀引起的(即先锈后裂),所以要从钢筋防腐的综合措施着手来防止纵向裂缝的发生。但是不区分结构处于什么环境,是普通混凝土还是预应力混凝土,一概不考虑横向裂缝对锈蚀的影响,也是不合理和不全面的。

第四节 国内关于钢筋锈蚀的调查和研究

一、华南沿海部分码头的调查^[3]

1981年4月—1981年6月,交通部第四航务工程局等单位组成的调查组对海南、湛江、北海、汕尾等四个地区7个港口的18座高桩梁板码头进行了调查。调查结果表明,这18座码头中有不同程度的钢筋腐蚀的占16座之多,钢筋基本未腐蚀的只有两座。这些码头最早建于1956年,最晚建于1974年,对其中几座码头的调查情况如下:

1.白马井南海渔业公司卸渔码头,建于1966年,结构形式为桩基梁板式,建成后到1981年调查时,只有15年时间,钢筋腐蚀相当严重。主要腐蚀部位是面板底部。94块面板中因腐蚀而开裂或保护层剥落露筋的有85块,占面板总数的94%。

2.白马井南海渔业公司加水码头,建于1971年,下部为管柱桩基础,上部为梁板。面板为普通板及 π 型板。腐蚀主要集中在普通板的板底和 π 型板的肋条。

π 型板的腐蚀情况见图1.4、图1.5,44块 π 型板的肋条均已腐蚀开裂,大部分是混凝土剥落,钢筋外露,锈蚀损伤率达100%。44块板的88根肋条中严重腐蚀的有78根。

24块普通板也都锈蚀开裂(见图1.6),腐蚀损伤率达100%,其中混凝土剥落的有13块,

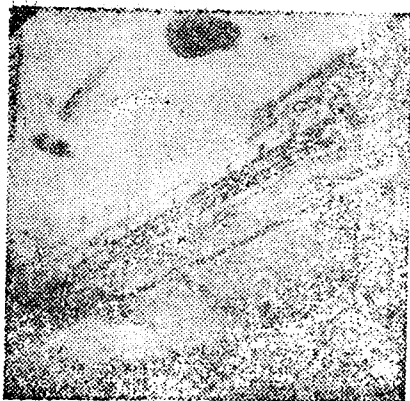


图 1.4



图 1.5

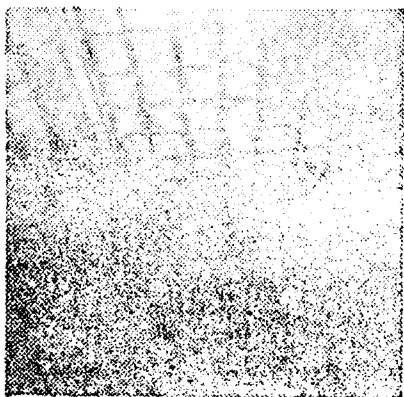


图 1.6

开裂的有11块。

3. 三亚港务局码头，建于1967年，结构形式是桩基无梁大板。主要腐蚀部位是大板底部和柱帽。大板共76块，锈蚀开裂的有53块，调查的76个桩帽中，有裂缝的占43个。

4. 湛江港5万吨级油轮码头，建于1974年，结构形式为桩基梁板式，面板为 π 型板。主要腐蚀部位是横梁、 π 型板的肋条

和封头板。调查时，60根横梁中锈蚀开裂的有58根。434根肋条中锈蚀开裂的有264条。封头板几乎每块都有严重锈斑。调查时，该码头才建成七年，但有些构件的混凝土已开始剥落。

5. 北海75分队码头，建于1969年，结构形式下部为沉箱基础，上部为梁板，面板为 π 型板。该码头除了个别部位有小裂缝、小锈斑外，基本是完好的，这是该次调查中最好的一座。

以上五座码头的调查中，前三座属于严重损伤，后一座损伤较重，最后一座基本完好。

华南沿海属亚热带气候，常年气温较高，比北方寒冷地区更容易使钢筋腐蚀。腐蚀最严重的部位集中在水位变动区以上，也就是平均高潮位以上。

按照前面所述的钢筋电化学腐蚀机理，混凝土中发生电化学腐蚀的条件是：①钢筋上要有电位差，才能使电流流动；②要有溶于水中的氧（溶解氧）吸收反应中放出的电子，与铁化合生成锈；③要有电解质水溶液为反应提供必需的水分。此外，钢筋腐蚀的发生，首先要使钢筋表面的钝化膜失去作用，而混凝土保护层碳化，或含有过量的氯化物，都能破坏钢筋的钝化膜。具备了以上条件，钢筋就会发生电化学腐蚀。按照这些条件，可以对位于海水浸没区、潮差区、浪花飞溅区以及处在海洋大气环境中的构件各个局部的腐蚀条件进行比较。

在海水完全浸没区的部位，虽有氯离子侵入混凝土并达到钢筋表面，但海水中的氧较少，而且混凝土孔隙中又充满了水，能通过混凝土孔隙的氧就更少，因此腐蚀就很难发生。有些使用几十年的码头，上部构件因腐蚀而损坏严重，甚至不能使用，但完全处在水下的构件，里面的钢筋仍完好无损。

处在平均高潮位以下的潮差段构件,由于潮差的影响,时干时湿,也容易聚集氯盐,但由于干湿交替,干的时间短,混凝土中的水分还来不及蒸发,该部位的混凝土的通氧条件比较差,能进入钢筋周围的氧气比较少,所以钢筋的腐蚀比较缓慢。

处在平均高潮位以上的水上部位和浪花飞溅区的构件,由于大潮涨落和浪花的影响,聚集的氯盐的浓度足以破坏钢筋钝化膜,而在干湿交替的部位,干的时间长,混凝土中的水分容易蒸发,氧气容易通到钢筋表面,于是这个部位的钢筋就容易腐蚀。

处在浪花飞溅不到的海洋大气环境中的构件,通氧虽然容易一些,但氯盐的聚集则比较缓慢,且水分也少,所以钢筋腐蚀较为缓慢。

上述调查表明,钢筋腐蚀与构件所处环境有很大关系。除此而外,构件的施工质量也是很主要的影响因素。施工质量好的码头,如海军麻斜1、2号码头,调查时已建成23年,只有轻微腐蚀损伤。而施工质量差的湛江5万吨级油轮码头,调查时才建成7年,钢筋腐蚀损伤已很严重。其中主要原因是钢筋偏位,造成混凝土保护层薄厚不一,混凝土的浇筑质量差,有蜂窝、狗洞、麻面、漏砂、漏浆等。构件的结构形式对钢筋的腐蚀也有影响。 π 型板的肋条,三个面暴露在受海水侵蚀的环境中,而三个面的保护层又不容易达到一样的厚度,特别是侧面的保护层厚度比较难于保证,在结构设计的构件选型中要适当考虑这一因素。配筋太密,使混凝土不易浇注密实,会影响混凝土的密实性和渗透性。此外,掺用海砂时含盐量、水泥用量、水灰比等都对钢筋腐蚀有一定的影响。

二、钢筋混凝土结构设计规范专题组的调查

为了修订钢筋混凝土结构设计规范TJ10-74中有关裂缝宽度限值的规定,有关单位组织了专题组,从1979年11月到1980年10月在我国11个有代表性的城市进行了调查,对正在使用和少数存在时间较长的64个钢筋混凝土构件,凿开裂缝处的混凝土保护层,检查钢筋腐蚀情况。调查情况如下^[4]。

1. 通常室内环境,即普通住宅、办公室、仓库、一般工业建筑内部,室内无蒸气或无水源的环境。

专题组调查了南方沿海、炎热潮湿的长江中下游、多雨的贵州、干燥的西北等地区,其中有常年平均相对湿度高达85%的海口市,相对湿度在70%以上的广州、台山、常州、武汉、重庆、遵义、青岛等城市,相对湿度低于60%的有兰州、济南等城市。

在所调查的建筑物中,使用年限最久的为70年,使用年限在60年以上的6个构件有6条裂缝,使用年限在50年以上的10个构件有13条裂缝,在20年以上的11个构件有11条裂缝,最短使用年限12年的6个构件有6条裂缝。

在所调查的构件中,最大裂缝宽度为9mm,也有4mm、2mm的,一般都大于0.3mm,最小为0.27mm。

调查实例:

(1)武汉市商业厅永宁街102号仓库,为二层的现浇混凝土框架结构,1920年建成,1931年曾在底层发生火灾,大火持续烧了3天。解放后,继续加荷使用。在1954年的一次洪水时期,该仓库浸入水中约1米,此后发现楼盖及屋盖的裂缝不断扩大。1974年,将边跨主梁用砖柱支撑加固,现仍在使用。在所有十字交叉点,次梁中均有与主筋垂直的横向裂缝,最大裂缝宽度达10mm,边跨主梁斜裂缝宽度达4mm,肉眼明显可见梁的弯曲变形。

有一根梁的裂缝宽度为9mm,梁保护层底部厚度为40mm,侧面为61mm。另一根主梁的斜裂缝为4mm,凿开保护层检查时,发现混凝土已碳化到钢筋,但钢筋基本无锈蚀。

(2)海南岛海口大厦,为五层的现浇混凝土结构,1923年建成,现仍在使用。该楼的戏院大厅看台大梁的横向裂缝宽度为1.60mm,梁保护层底面厚度20mm,侧面厚度48mm,另加40mm石灰水泥砂浆粉刷层。凿开保护层检查时,发现混凝土已碳化到钢筋,钢筋基本无锈蚀。

(3)常州拖拉机厂工具车间为单层工业厂房结构,1960年建成,现继续使用。薄腹梁的横向裂缝宽0.20mm,梁底部保护层厚20mm,侧面厚40mm。检查结果,钢筋未锈蚀。

对属于在这类环境下暴露的钢筋混凝土构件,共检查了34个构件的37条裂缝。尽管这些建筑物处于我国不同地区,环境的常年平均相对湿度、气温等差异显著,但构件实际所处位置都属于通常室内环境,下雨或下雪时相对湿度都会接近100%,构件都有较大裂缝存在,半数以上的构件使用年限超过50年。然而,在绝大多数横向裂缝处,钢筋基本无锈蚀。即使在少数构件裂缝处的钢筋上存在一些轻微锈斑,对承载能力也无影响。且难以查明,这些锈斑是在构件成型前还是在使用过程中产生的。由此看来,裂缝并不一定会造成钢筋的严重锈蚀。

2.潮湿环境。即高温度的、存在有蒸气或水源的建筑物内部,以及室外环境。

在这类环境下暴露的构件,基本上处于干湿交变状态,湿度变化极其复杂。相对湿度大小,气温高低、通风情况、气流走向、空间大小、下雨天数、风力级数、外界补给水源或蒸气的数量或时间、构件自身的质量、保护层厚度、混凝土裂缝,以及构件上有无粉刷层或其他保护措施等等,都是混凝土中的钢筋能否生成水膜和腐蚀的因素。

所调查的此类环境的构件,其使用年限大都为20—30年,最大横向裂缝的宽度是5mm,一般是0.2—1.3mm,最小的是0.12mm。

调查实例:

(1)贵阳市原国家建工总局四局科研所,在1968年用先张法预应力三角形试验构件,存放室内3年做破坏试验后,再放入露天,构件下弦的横向裂缝分别是0.60mm,0.44mm,0.23mm,0.13mm,保护层厚度均为25mm,1980年7月凿开保护层检查时,发现混凝土已碳化到钢筋,所有裂缝处的钢筋均发生锈蚀。

(2)常州锻造厂蒸气锤锻打车间,在1957年制作构件时,曾掺有氯盐。该车间薄腹梁横向裂缝宽0.64mm。调查时发现构件上存在与钢筋方向平行、且与横向裂缝相交的纵向裂缝,凿开检查时,发现混凝土保护层已碳化到钢筋,沿钢筋方向的腐蚀长度达600mm,构件已停止使用。

从调查中发现,凡是在潮湿环境中暴露的钢筋混凝土构件,只要有横向裂缝存在,且裂缝处的混凝土含有一定量的氯化物,或者是混凝土已碳化到钢筋,并且在裂缝处的钢筋上有水分存在,一般都会发生钢筋锈蚀。在所调查的45条裂缝中,就有36条裂缝处的钢筋已锈蚀,锈蚀率约80%;随着裂缝宽度增大,钢筋锈蚀率亦增大。在9条没有钢筋锈蚀的裂缝中,裂缝宽度 $w_{cr} \leq 0.3\text{mm}$ 的有7条,另2条裂缝宽度为0.4mm左右。凡是裂缝宽度大于0.45mm的,钢筋均已锈蚀。在室外的构件上除有一条裂缝 $w_{cr} = 5\text{mm}$ 的钢丝锈蚀严重外,多数裂缝处的钢筋虽有锈蚀,但程度并不严重。若在构件上同时存在有与横向裂缝相交的纵向裂缝,钢筋锈蚀就较严重。因此,对于暴露在潮湿环境中的钢筋混凝土构件所存在的横向裂缝宽度,加以限制是必要的。