

636

TU317-43

L77

高等学校土木工程专业系列选修课教材

# 工程结构鉴定与加固

本系列教材编委会组织编写

柳炳康 吴胜兴 周 安 主 编



中国建筑工业出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

工程结构鉴定与加固/柳炳康, 吴胜兴编著. —北京:  
中国建筑工业出版社, 2000.12  
高等学校土木工程专业系列选修课教材  
ISBN 7-112-04211-9

I. 工… II. ①柳…②吴… III. ①工程结构-鉴定-高等学校-教材②工程结构-加固-高等学校-教材 IV. TU74

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 53171 号

本书分为绪论、工程结构损伤机理及危害、工程结构检测技术、建筑物可靠性鉴定、工程结构补强与加固五章。在内容安排上以建筑结构为主, 介绍了混凝土结构、砌体结构、钢结构和地基基础的检测、鉴定与加固。全书注意理论联系实际, 紧密结合加固技术规范, 并且反映了工程结构补强与加固方面的科研成果和工程实践经验。为方便教学每章后均附有思考题。

本书可作为高等院校土木工程专业本科教材 (专科亦可参照使用), 也可供设计单位和施工企业的土建工程技术人员参考。

高等学校土木工程专业系列选修课教材

**工程结构鉴定与加固**

柳炳康 吴胜兴 周安 主编

\*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市兴顺印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14 $\frac{3}{4}$  字数: 351 千字

2000 年 12 月第一版 2000 年 12 月第一次印刷

印数: 1—3500 册 定价: 18.10 元

ISBN 7-112-04211-9

TU·3320 (9692)

**版权所有 翻印必究**

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

## 前 言

我国经济正处于迅速发展时期，建筑业也得到蓬勃发展，为满足人民日益增长的居住、市政、交通等方面的需求，全国范围内开展了大规模的工程建设。为了保证各类工程结构的安全性、适用性和耐久性，必须贯彻“百年大计，质量第一”的方针。但是由于建造阶段可能发生的设计疏忽和施工失误，正常使用阶段可能出现的自然和人为灾害，以及老化阶段可能产生的各种损伤积累，导致结构在使用寿命期间承载能力下降，耐久性降低，产生各种风险。为揭示工程结构的潜在危险，避免事故发生，延长使用寿命，需对现存结构的作用效应、结构抗力及相互关系进行检测、鉴定与评价，并在科学鉴定的基础上，对结构进行补强加固或维修改造。

本书针对勘察、设计、施工、使用等方面存在的工程质量事故，结构随服役时间增长发生的老化现象，紧密结合我国现行鉴定标准和加固规范提出了结构检测、可靠性鉴定和加固补强的方法。全书分为5章，分别讨论了混凝土结构、砌体结构、钢结构和地基基础产生损伤的原因及危害；工程结构损伤检测和损伤分析；民用建筑和工业厂房可靠性鉴定的方法；工程结构加固与补强的各种技术。编写过程中作者结合了多年来检测、鉴定与加固方面的教学经验和工程实践，并注意吸收了国内外有关科研成果。

全书由柳炳康、吴胜兴、周安主编，书中第1章、第2章2.4节、第5章5.4节由合肥工业大学柳炳康编写，第2章2.1、2.2、2.3节由河海大学吴胜兴编写，第3章、第4章、第5章第5.1节由合肥工业大学周安编写，第5章5.2节由合肥工业大学黄慎江编写，第5章5.3节由南京建筑工程学院黄炳生编写，扬州大学刘平担任本书主审。

由于编者水平有限，书中不妥和疏漏之处，敬请各位读者批评指正。

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 工程结构损伤原因

### 1.1.1 概述

工程结构是以工程材料为主体构成的不同类型的承重构件相互连接而成的骨架，它的主要作用就是通过骨架来传递和抵抗自然界的各种作用，使得建（构）筑物在规定的时间内，在规定的条件下，完成预定的功能。规定时间是指设计所假定的结构使用期，即设计基准期，结构的设计基准期一般为 50 年。规定条件是指正常设计、正常施工、正常使用的条件。预定功能是指结构的安全性、适用性和耐久性。安全性是指结构在规定的条件下应能承受可能出现的各种荷载作用，以及外加变形和外加约束的作用。适用性是指结构在正常使用时，应能满足预定的使用要求，其变形、裂缝或振动等性能均不超过规定的限值。耐久性是指结构在正常使用、正常维护情况下，材料性能虽随时间推移发生变化，但仍然满足预定功能的要求，例如结构材料的腐蚀不能影响结构预定的使用期限。综上所述，工程结构在规定的使用期内应能安全有效地承受外部及内部形成的各种作用，以满足结构在功能上和使用上的要求。

但是由于建造阶段可能发生的设计疏忽和施工失误，正常使用阶段可能出现的自然和人为灾害，以及老化阶段可能产生的各种损伤积累，导致结构正常抗力降低，影响结构的耐久性，结构在整个使用寿命期间会产生各种风险。

我国建国以来，特别是改革开放以后，建筑业得到了很大发展，工程结构的质量基本上好的，但是重大工程质量事故每年发生几十起。在过去 50 年内，我国曾有过四次结构倒塌质量事故相对较多时期，第一次是 1958 年“大跃进”时期，只求大干快上，主观上要求高速度进行基本建设，不按客观规律办事，结果造成大量工程事故和结构倒塌；第二次是“十年动乱”时期，建设程序被否定，边勘察、边设计、边施工的做法盛行，留下大量工程隐患，造成很大浪费；第三次是 20 世纪 80 年代初期，由于国民经济发展迅速，设计、施工队伍不断扩大，技术素质跟不上要求，出现许多工程倒塌事故；第四次是 20 世纪 90 年代后期，在市场经济冲击下，建设领域不正之风和腐败现象蔓延，是导致工程质量事故的主要原因。

另外，工程结构经过长期使用亦存在耐久性问题，受到环境因素的影响，随着时间的推移，结构的性能将会发生退化，结构的使用寿命也会受到影响。为了保证结构的正常使用，延续结构的使用寿命，在一些经济发达国家，工程结构的维修和加固费用有的已达到或超过新建工程的投资。例如美国 20 世纪 90 年代初期用于旧建筑物维修和加固上的投资已占到建设总投资约 50%，英国这一数字为 70%，而德国则达到 80%。世界上经济发达国家的工程建设大都经历了三个阶段，即大规模新建阶段，新建与维修并重阶段，工程结构维修加固阶段。我国解放以来，从“一五”开始直至现在一直在进行大规模的工程建设，当这些建设活动到达顶峰之后，结构的耐久性问题将更加突出。据统计，我国 20 世

纪 60 年代以前建成的房屋约有 25 亿平方米，这些房屋已进入中老年阶段，需要对其进行结构鉴定和可靠性评估，以便实施维护和加固，以延长它们的使用寿命。

### 1.1.2 工程质量事故

在土木工程中，由于勘察、设计、施工、使用等方面存在某些缺陷和错误，往往导致工程质量低下而不能满足结构功能要求，造成工程质量隐患，严重的还会引起结构倒塌，给人民生命财产带来巨大损失。事故发生的原因是多种多样的，从已有事故分析，其主要原因有以下几方面。

(1) 工程勘察失误 诸如不认真进行地质勘察，随意确定地基承载力；盲目套用邻近场地勘察资料，而实际场地与邻近场地地质情况存在较大差异；勘测钻孔间距过大，深度不足，未能查清软弱层、墓穴、空洞等隐患。例如，某市化工厂综合楼，工程勘察中不按有关规范行事，未进行原状取土和取样试验，探孔深度未触及地基下存在的泥炭土层，房屋建成后，高压缩性的软土层产生较大压缩变形，致使建筑物产生过大沉降和沉降差，建成后不到两年，最大沉降达 362mm，墙体普遍开裂。

(2) 设计方案不当或计算错误 工程设计时，结构方案欠妥，构造措施不当，结构计算简图与实际不符；漏算或少算作用于结构上的荷载，或未考虑荷载的最不利组合；设计人员受力分析概念不清，结构内力计算错误。例如，某市煤炭局办公楼会议室，平面  $9.6\text{m} \times 7.2\text{m}$ ，采用井字楼盖，设计人员错误认为长向梁的弯矩大于短向梁的弯矩，导致短向梁配筋不足，承载力不够，跨中严重开裂。

(3) 施工质量低劣 技术人员素质较差，不了解设计意图，盲目施工，甚至为了施工方便，擅自修改图纸；施工方案考虑不周，技术组织设计不当；砌体组砌方法不当，造成通缝或重缝，混凝土浇注方法错误，形成孔洞或裂缝；进场材料控制不严，钢材物理力学性能不良，水泥过期或安定性不合格，混凝土制品质量低劣。例如，上海某大厦为现浇钢筋混凝土剪力墙体系，结构层数地下 1 层，地面以上 20 层，在施工到 11 层至 14 层主体结构时，使用了安全性不合格的水泥，设计混凝土强度等级 C30，实际测定只有 C10~C15，混凝土表面掉皮，内部疏松，造成重大质量事故。后对使用不合格水泥的第 11~14 层逐层实施爆破拆除。

(4) 结构使用或改建不当 未经核算就在原有建筑物上加层或对构筑物进行改造，造成原有结构承载力不够或地基承载力不足；使用过程中任意改变用途加大荷载，将办公楼改建为商场，一般民房改建为娱乐场所；在装修时，随意拆除承重隔墙，盲目在承重墙上开洞。例如，某市一栋单层空旷砌体房屋，一侧纵墙面对马路，使用者拟将其改造成超市，为了扩大入口增加橱窗取得立面效果，将沿街一侧砖柱之间墙体全部拆除，只剩下残缺不全的独立砖柱支承屋盖系统，结果造成屋盖坍塌。

### 1.1.3 结构的耐久性

结构经长期使用会发生老化，随着结构服役时间的增长，受到气候条件、环境侵蚀、物理作用或其他外界因素影响，结构的性能发生退化，结构受到损伤，甚至遭到破坏。一般来说，工程材料自身特性和施工质量是决定结构耐久性的内因，而工程结构所处的环境条件和防护措施则是影响其耐久性的外因。

(1) 混凝土结构 由于外部温度的变化，将会引起混凝土表面开裂和剥落；随着时间的推移，混凝土碳化将使钢筋失去保护产生腐蚀，钢筋的锈蚀膨胀又引起混凝土开裂和疏

松；化学介质侵蚀也会造成混凝土结构开裂，钢筋锈蚀和强度降低。

(2) 砌体结构 由于风力和雨水冲刷及砌体表面冻融循环，会造成砌体风化、酥裂，承载力下降。

(3) 钢结构 由于自然环境因素影响和外界有害介质侵蚀，钢材会产生腐蚀，锈蚀引起构件有效断面减小而导致承载力下降，在外部环境恶劣，有害介质浓度高的情况下，钢材腐蚀速度加快。另外，在反复荷载作用下，因裂缝扩展、损伤积累会引起疲劳破坏。

结构的耐久性损伤，有时也会酿成重大工程事故。前联邦德国柏林会议厅建成于1957年，屋盖为马鞍形壳顶，跨度约30m，从一对支座上伸出两条斜拱，形成受压环，斜拱之间是用悬索支承的薄壳屋面，混凝土板壳厚65mm。由于屋面拱与壳交接处出现裂缝，不断渗水，致使钢筋锈蚀，在建成23年后，1980年5月的一天上午，悬索突然断裂，导致屋盖倒塌。

综上所述，不论是勘察、设计、施工、使用等方面存在缺陷和错误，还是受到气候作用、化学侵蚀引起结构老化，均会造成工程隐患，降低结构的安全性和耐久性。为了确定结构的安全性和耐久性是否满足要求，需要对工程结构进行检测和鉴定，对其可靠性作出科学评价，然后进行维修和加固，以提高工程结构的安全性，延长其使用寿命。

## 1.2 工程结构检测与鉴定

工程结构的检测与鉴定就是对现存结构的损伤情况进行诊断。为了正确分析结构损伤原因，需要对事故现场和损伤结构进行实地调查，运用仪器对受损结构或构件进行检测。现存结构的鉴定与新建结构的设计是不同的，新建结构设计可以自由确定结构形式，调整杆件断面，选择结构材料，而现存结构鉴定只有通过现场调查和检测才能获得结构有关参数。因此，现存结构的可靠性鉴定和耐久性评估，必须建立在现场调查和结构检测的基础上。

### 1.2.1 工程结构现状调查

首先，应查看工程现场进行结构现状调查，了解工程所在场地特征和周围环境情况，检查施工过程中各项原始记录和验收记录，掌握施工实际状况。其次，应审查图纸资料，复核地质勘察报告与实际地基情况是否相符，检查结构方案是否合理，设计计算是否正确，构造措施是否得当。第三，应调查工程结构使用情况，使用过程中有无超载现象，结构构件是否受到人为伤害，使用环境是否恶化等。

调查时可根据结构实际情况或工程特点确定重点调查内容，例如混凝土结构应着重检查混凝土强度等级、裂缝分布、钢筋位置；砌体结构应着重检查砌筑质量、裂缝走向、构造措施；钢结构应着重检查材料缺陷、节点连接、焊接质量。将结构基本情况调查清楚之后，再根据需要利用仪器作进一步的检测。

### 1.2.2 结构检测方法

利用仪器对结构进行现场检测可测定工程结构所用材料的实际性能，由于被测结构在试验后一般均要求能够继续使用，所以现场检测必须以不破坏结构本身使用性能为前提，目前多采用非破损检测方法，常用的检测内容和检测手段有如下几种：

(1) 混凝土强度检测 非破损检测混凝土强度的方法是在不破坏结构混凝土的前提

下，通过仪器测得混凝土的某些物理特性，如测得硬化混凝土表面的回弹值或声速在混凝土内部的传播速度等，按照相关关系推出混凝土强度指标。目前实际工程中应用较多的有回弹法、超声法、超声一回弹综合法，并已制定出相应的技术规程。半破损检测混凝土强度的方法是在不影响结构构件承载力的前提下，在结构构件上直接进行局部微破坏试验，或者直接取样试验获取数据，推算出混凝土强度指标。目前使用较多的有钻芯取样法和拔出法，并已制定出相应的技术规程。

利用超声仪还可以进行混凝土缺陷和损伤检测。混凝土结构在施工过程中因浇捣不密实会造成蜂窝、麻面甚至孔洞，在使用过程中因温度变化和荷载作用会产生裂缝。当混凝土内部存在缺陷和损伤时，超声脉冲通过缺陷时产生绕射，传播的声速发生改变，并在缺陷界面产生反射，引起波幅和频率的降低。根据声速、波幅和频率等参数的相对变化，可评判混凝土内部的缺陷状况和受损程度。

(2) 混凝土碳化及钢筋锈蚀检测 混凝土结构暴露在空气中会产生碳化，当碳化深度到达钢筋时，破坏了钢筋表面起保护作用的钝化膜，钢筋就有锈蚀的危险。因此，评价现存混凝土结构的耐久性时，混凝土的碳化深度是重要依据。混凝土碳化深度可利用酚酞试剂检测，在混凝土构件上钻孔或凿开断面，涂抹酚酞试液，根据颜色变化情况即可确定碳化深度。

钢筋锈蚀会导致保护层胀裂剥落，削弱钢筋截面，直接影响结构承载能力和使用寿命。混凝土中钢筋锈蚀是一个电化学过程。钢筋锈蚀会在表面产生腐蚀电流，利用仪器可测得电位变化情况，再根据钢筋锈蚀程度与测量电位之间的关系，可以判断钢筋是否锈蚀及锈蚀程度。

(3) 砌体强度检测 砌体强度检测可采用实物取样试验，在墙体适当部位切割试件，运至试验室进行试压，确定砌体实际抗压强度。近些年，原位测定砌体强度技术有了较大发展，原位测定实际上是一种少破损或半破损的方法，试验后砌体稍加修补便可继续使用。例如：顶剪法利用千斤顶对砖砌体作现场顶剪，量测顶剪过程中的压力和位移，即可求得砌体抗剪及抗压强度；扁顶法采用一种专门用于检测砌体强度的扁式千斤顶，插入砖砌体灰缝中，对砌体施加压力直至破坏，根据加压的大小，确定砌体抗压强度。

(4) 钢材强度测定及缺陷检测 为了解已建钢结构钢材的力学性能，最理想的方法是在结构上截取试样进行拉压试验，但这样会损伤结构，需要补强。钢材的强度也可采用表面硬度法进行无损检测，由硬度计端部的钢球受压时在钢材表面留下的凹痕推断钢材的强度。钢材和焊缝缺陷可采用超声波法检测，其工作原理与检测混凝土内部缺陷相同。由于钢材密度比混凝土大得多，为了能够检测钢材或焊缝中较小的缺陷，要求选用较高的超声频率。

### 1.2.3 工程结构鉴定

工程结构鉴定的目的是通过现场测试和理论分析，找出薄弱环节，揭示存在隐患，评价其安全性和耐久性，为工程改建和加固维修提供技术依据。工程结构的鉴定方法有三种：传统经验法、实用鉴定法和概率法。

(1) 传统经验法 这种方法主要是根据工程技术人员目测调查和经验判断来评定结构的可靠性。其特点是荷载作用大小由现场调查确定，材料强度取值以经验判断为准，按照现行规范并参考原设计采用规范进行结构验算，评价实际结构的安全性和耐久性。该鉴定

方法一般不去采用现代检测手段和测试技术，而是凭借工程技术人员专业知识和工程经验对结构作定性评价，结论有时会因人而异。

(2) 实用鉴定法 这种方法是在传统经验法基础上发展起来的。实用鉴定法利用现代检测手段和测试技术，测定材料强度，找出结构缺陷，判断损伤程度。该方法特点是作用荷载大小由实际调查确定，材料强度取值以实测结果为准，并对测试数据运用数理统计方法加以处理，以规范为依据进行理论分析，判断其与实际结构存在的差异程度。此法需对工程结构多次调查，分项检验，逐项评价和综合评定，能对结构物作出较准确的鉴定，是目前最常用的结构鉴定方法。

(3) 概率法 实用鉴定法的评定结果，虽较传统经验法更符合实际，但是由于结构的作用效应  $S$ ，结构抗力  $R$  等都是 在一定范围内波动的随机变量，采用定值法去分析结构物的随机变量显然是不合理的，应当采用非定值理论对影响结构功能的各种随机变量进行调查统计，计算出结构物的失效概率。由于影响实际结构作用效应和结构抗力的因素多变，数据庞大，各类结构构件可靠性指标存在差异，工程结构施工中质量离散性较大，目前概率法尚未进入实用阶段，仅用于少数重要工程。

工程结构的检测和鉴定应以国家及有关部门颁布的标准、规范或规程为依据，按照其规定的方法、步骤进行检测和计算，在此基础上对结构的可靠性作出科学的评判。我国已颁布了《民用建筑可靠性鉴定标准》(GB50292-99)、《工业厂房可靠性鉴定标准》(GBJ144-90)、《危险房屋鉴定标准》(CJ13-86)、《建筑抗震鉴定标准》(GB55023-95)、《超声回弹综合法混凝土强度技术规程》(CECS2:88)、《钻芯法检测混凝土缺陷技术规程》(CECS21:90)等一系列鉴定标准和技术规程，这是对大量结构物科学研究和工程实践所做的总结，以此为依据进行工程结构检测与鉴定，有利于排除人为因素，统一检测标准，提高鉴定水平，在满足结构安全性和耐久性的前提下，取得最大经济效益。

## 1.3 工程结构补强与加固

### 1.3.1 补强与加固特点

工程结构应当满足安全性、适用性、耐久性三项基本功能要求，当结构物存在的缺陷和损伤使得其丧失某项或几项功能要求时，就应进行补强或加固。补强与加固的目的就是提高结构及构件的强度、刚度、延性、稳定性和耐久性，满足安全要求，改善使用功能，延长结构寿命。

补强和加固工作包括设计与施工两部分，其内容与新建工程不尽相同，主要有下述特点。

在加固设计时，应充分研究现存结构的受力特点、损伤情况和使用要求，尽量保留和利用现存结构，避免不必要的拆除；应根据结构实际受力状况和构件实际尺寸确定承载能力，结构承受荷载通过实地调查取值，构件截面采用扣除损伤后的有效面积，材料强度通过现场测试确定；加固部分属二次受力构件，结构承载力验算应考虑新增部分应力滞后现象，新旧结构不能同时达到应力峰值。

在加固施工时，受客观条件制约，往往要求在不停产或不中止使用的情况下加固，应在施工前尽可能卸除部分荷载或增加临时支撑，保证施工安全，同时又可以减少原结构内



力,有利于新加部分的应力发挥;应注意新旧部分结合处连接质量,保证结合处应力传递,有助于新旧结构之间协同工作;由于腐蚀、冻融、振动、不良地基等原因造成结构损坏,加固时,必须同时采取消除、减少或抵御这些不利因素的有效措施,以免加固后结构继续受害。

### 1.3.2 补强与加固方法选择

(1) 加大截面法 加大截面法是用加大结构构件截面面积进行加固的一种方法,它不仅可以提高加固构件的承载力,而且还可增大截面刚度。这种加固方法广泛用于加固混凝土结构梁、板、柱,钢结构中的梁柱及屋架,砌体结构的墙和柱等。但加大截面尺寸会减小使用空间,有时受到使用上的限制。

(2) 外包钢加固法 外包钢加固法是在结构构件四周包以型钢的加固方法,这种方法可以在基本不增大构件截面尺寸的情况下增加构件承载力,提高构件刚度和延性。适用于混凝土结构、砌体结构的加固,但用钢量较大,加固费用较高。

(3) 预应力加固法 预应力加固法采用外加预应力钢拉杆或撑杆对结构进行加固,这种方法不仅可以提高构件承载能力,减小构件挠度,增大构件抗裂度,而且还能消除和减缓后加杆件的应力滞后现象,使后加部分有效地参与工作。预应力加固法广泛用于混凝土梁、板等受弯构件以及混凝土柱的加固,还用于钢梁和钢屋架的加固,是一种很有前途的加固方法。

(4) 改变传力途径加固法 改变传力途径加固法是通过增设支点或采用托梁拔柱的方法去改变结构受力体系的一种加固方法。增设支点可以减小构件的计算跨度,降低结构内力和变形,大幅度提高结构及构件的承载力;托梁拔柱是在不拆或少拆上部结构的情况下,拆除或更换柱子的一种处理方法,适用于要求改变房屋使用功能或增大空间的建筑物改造。

(5) 粘钢加固法 粘钢加固法是一种用胶结剂把钢板粘贴在构件外部进行加固的方法。这种加固方法施工周期短,粘钢所占空间小,几乎不改变构件外形,却能较大幅度提高构件承载能力和正常使用阶段性能。

(6) 化学灌浆法 化学灌浆法是用压送设备将化学浆液灌入结构裂缝的一种修补方法。灌入的化学浆液能修复裂缝,防锈补强,提高构件的整体性和耐久性。

(7) 地基加固与纠偏 对已有结构物的地基和基础进行加固称为基础托换,基础托换方法可分为四类:加大基底面积的基础扩大技术;新做混凝土墩或砖墩加深基础的坑式托换技术;增设基桩支承原基础的桩式托换技术;采用化学灌浆固化地基土的灌浆托换技术。基础纠偏主要有两条途径:一是在基础沉降小的部位采取措施促沉,将结构物纠正;二是在基础沉降大的部位采取措施顶升,达到纠偏目的。

工程结构的加固与补强应以国家及有关部门颁布的规范或规程为依据,按照规范或规程要求选择加固方案,进行加固设计和施工。我国已颁布了《混凝土结构加固技术规范》(CECS25:90)、《砖混结构房屋加层技术规范》(CECS78:96)、《钢结构检测评定及加固技术规程》(YB9257-96)、《建筑抗震加固技术规程》(JGJ116-98)等一系列加固技术规范 and 规程。这些规范和规程是在总结大量工程经验的基础上,借鉴国内外有关科研成果编写而成,对于统一加固标准、保证工程质量起到重要作用。

## 思 考 题

1. 工程结构产生损伤的主要原因有哪些？
2. 影响结构耐久性的主要因素是什么？
3. 混凝土结构常用的检测手段有哪些？
4. 与新建工程相比，结构加固有哪些特点？
5. 简述工程结构加固与补强的方法？

## 第 2 章 工程结构损伤机理及危害

### 2.1 混凝土结构损伤机理及其危害

#### 2.1.1 混凝土中的钢筋腐蚀

##### 1. 概述

钢筋腐蚀引起混凝土建筑物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，在第二届混凝土耐久性国际会议（1991 年）上，梅塔教授在题为《混凝土的耐久性——50 年的进展》的主题报告中指出：“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、混凝土的冻融破坏、侵蚀环境的物理化学作用。”

美国标准局 1975 年的调查表明：美国全年各种腐蚀损失为 700 亿美元，其中混凝土中钢筋锈蚀损失占 40%（280 亿美元）。在英国，英格兰岛中部环形线的 21km 快车道，11 座混凝土高架桥的建设费是 2800 万英镑（1972 年），因冷天撒盐化冰雪，两年后就发现钢筋锈蚀将混凝土顺筋胀裂，到 1989 年的 15 年间，修补费高达 4500 万英镑（即为造价的 1.6 倍）！估计以后的 15 年间（到 2004 年），还要耗费 1.2 亿英镑（累计接近造价的 6 倍）！

20 世纪 50 年代，我国北方和国外一样，为使冷天施工的混凝土早强，曾普遍掺加氯盐，致使大量工业厂房因钢筋严重锈蚀而过早破坏，不得不为报废重修付出昂贵代价，即使还没有像美国北方冷天要常洒盐水化冰雪，北京、天津的许多钢筋混凝土立交桥使用时间不长，却已广泛显示钢筋锈蚀和混凝土顺筋胀裂的破坏迹象，并日益加剧发展。在我国的南方滨海地区及海洋工程的钢筋混凝土结构物中，钢筋腐蚀尤为突出。20 世纪 60 年代曾调查华南和华东 27 座海港钢筋混凝土建筑物，因钢筋锈蚀破坏的占 74%；1981 年调查华南 18 座使用 7~25 年的海港钢筋混凝土码头，因混凝土水灰比较大（0.65）或施工质量差，钢筋锈蚀破坏的占 89%，基本完好的仅仅是水灰比约 0.5 的两座钢筋混凝土码头；1985 年安徽省对 14 座水工混凝土建筑物进行锈蚀破坏调查，几乎全部不同程度地发生混凝土碳化和钢筋锈蚀破坏；1985 年，对全国 40 余处中小型钢筋混凝土水闸结构耐久性调查也表明，由于混凝土碳化引起钢筋锈蚀使闸墩、胸墙、大梁破坏的工程占 47.5%。

锈蚀使钢筋受力截面减小，锈蚀层膨胀使混凝土保护层沿钢筋方向“顺筋”开裂，而后脱落，以致不得不花费大量的经费对结构进行修补和加固。

##### 2. 钢筋腐蚀机理

混凝土在水化作用时，水泥中的氧化钙生成氢氧化钙，使混凝土孔隙中含有大量的离子  $\text{OH}^-$ ，其 pH 值一般可达到 12.5~13.5。钢筋在这样的高碱性环境中表面就形成厚度约  $(20\sim60)\times 10^{-10}\text{m}$  的钝化膜，其成分是  $(\text{nFe}_2\text{O}_3\cdot\text{mH}_2\text{O})$ ，能阻止钢筋进一步锈蚀，只有当钝化膜一旦遭到破坏，钢筋才开始发生腐蚀。

混凝土中的钢筋在同时满足以下三个条件时就会产生锈蚀：

(1) 在钢筋表面存在电位差，不同电位的区段之间形成阳极—阴极；

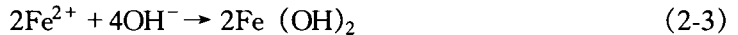
(2) 阳极区段的钢筋表面处于活化状态，在阳极发生以下阳极反应：



(3) 存在水分和溶解氧，在阴极发生以下阴极反应：



由于混凝土碱度差异、钢筋中的碳及其他合金元素的偏析、加工引起的钢材内部应力等都会使钢筋各部位的电极电位不同而形成局部电池（即钢筋表面存在电位差，有阳极—阴极存在）。因此，上述条件（1）总是存在和满足的。但是，由于混凝土高碱度条件使钢筋表面形成钝化膜而防止了钢筋的锈蚀。一旦钢筋的钝化膜破坏，在有水和氧气的条件下就会产生腐蚀电池反应，在阳极发生阳极反应，铁被溶解进入溶液，在阴极发生阴极反应，于是溶液中的  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{OH}^-$  结合成氢氧化亚铁：



氢氧化亚铁与水中的氧作用生成氢氧化铁。一旦钢筋表面上有氢氧化铁生成，它下面的铁就成为阴极，更进一步促进锈蚀。随着时间的推移，一部分氢氧化铁进一步氧化，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  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ （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，使混凝土沿钢筋方向（顺筋）开裂，进而使得保护层成片脱落，而裂缝及保护层的脱落又进一步导致钢筋更剧烈的腐蚀，腐蚀反应过程见图 2-1。

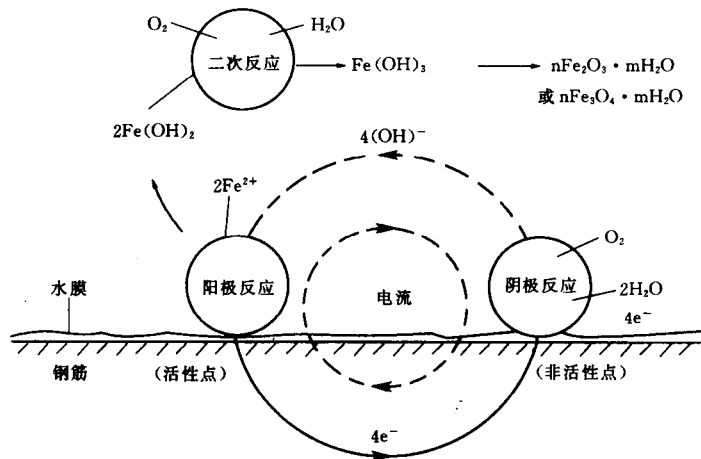


图 2-1 腐蚀反应

### 3. 影响钢筋腐蚀的主要因素

#### (1) pH 值

钢筋锈蚀速度与混凝土液相的 pH 值有密切关系。pH 值越大，碱性成分在钢筋表面形成钝化膜的保护作用越强，但当碱性成分被溶出和碳化作用产生影响，混凝土碱度降低，则钝化膜被破坏而引起钢筋锈蚀。一般来说， $\text{pH} > 10$  时，钢筋的锈蚀速度很小，而当  $\text{pH} < 4$  时，则锈蚀速度急骤增加。

#### (2) $\text{Cl}^-$ 含量

混凝土中  $\text{Cl}^-$  含量对钢筋锈蚀的影响极大，当混凝土中含有氯离子 ( $\text{Cl}^-$ ) 时，即使

混凝土的碱度还较高，钢筋周围的混凝土尚未碳化，钢筋也会出现锈蚀的现象。这是因为 $\text{Cl}^-$ 离子的半径小，活性大，具有很强的穿透钝化膜的能力， $\text{Cl}^-$ 离子吸附在膜结构有缺陷的地方，如位错区或晶界区等，使难溶的氢氧化铁转变成易溶的氯化铁，致使钢筋表面的钝化膜局部破坏。钝化膜破坏后，露出的金属便成为活化的阳极。由于活化区小，钝化区大，构成一个大阴极，小阳极的活化——钝化电池，使钢筋产生所谓的坑蚀现象。

进入混凝土中的氯离子主要有两个来源。一是施工过程中掺加的防冻剂等。例如，北京工人体育场于1958年10月底开始施工，1959年4月初结构完成，全部时间处于冬季施工阶段。施工时，24个看台全部混凝土中掺用了早强抗冻外加剂，有的看台掺用了两种甚至三种抗冻剂，且均未加阻锈剂。1983年底调查发现，看台下的小梁、主梁、看台板、柱子等构件出现大量裂缝，有的混凝土剥落，钢筋严重锈蚀，主筋直径明显减小，箍筋锈断，24个看台均有裂缝，损坏严重的10个，不太严重的4个，较轻的10个。二是使用环境中 $\text{Cl}^-$ 离子的渗透。例如北京体育学院游泳馆，由于池水用氯气消毒，氯气经过水的作用产生氯离子，氯离子随潮湿空气进入混凝土内。在游泳馆干湿交替频繁、混凝土密实性差的情况下，屋面板、屋面梁和落地拱等构件多处钢筋严重锈蚀。

钢筋的腐蚀速度与混凝土中 $\text{Cl}^-$ 离子的含量有关。有资料表明，混凝土中氯化物含量达 $0.6\sim 1.2\text{kg}/\text{m}^3$ ，钢筋的腐蚀过程就可以发生。氯离子对钢筋混凝土的危害是非常之大的，对混凝土中氯化物的含量应严格加以限制。

### (3) 氧

钢筋锈蚀的先决条件是所接触的水中含有溶解态氧，这是因为氧在锈蚀过程中起到促进阴极反应的作用，支配着锈蚀的速度。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，钢筋锈蚀也不会发生。氧是以溶解态存在于海水中的，但其扩散速度很慢。因此，浸没在海水水下区的钢筋混凝土结构，钢筋不易锈蚀，而处于海面上的浪溅区的钢筋混凝土结构，因有充足的氧，该部位的钢筋就特别容易锈蚀。

### (4) 混凝土的密实性

混凝土的密实性越好，内部微细孔隙和毛细管通道越小，有效地阻止外界腐蚀介质、氧气及水分等的渗入，从而加强了钢筋的防腐蚀能力。水灰比对混凝土的密实性影响很大，降低水灰比可提高钢筋的抗腐蚀性，国内外一般控制在 $0.4\sim 0.45$ 以下。为了提高混凝土的密实性，施工时要均匀振捣，严格控制振捣时间；要注意合理的混凝土级配，粗骨料的直径也不宜过大，在同样水灰比下，骨料粒径增大会大大降低混凝土的抗渗性；另外还要认真加以养护。

### (5) 混凝土保护层厚度

增加混凝土保护层厚度可以显著地推迟腐蚀介质渗透到钢筋表面的时间，也可提高对钢筋锈蚀膨胀的抵抗力。混凝土碳化达到钢筋表面的时间与保护层厚度的平方成正比，增大保护层厚度能有效地推迟碳化时间。保护层厚度与钢筋直径的比值是抵抗锈蚀胀力的重要参数，当保护层厚度大于3倍直径时，保护层一般不会胀裂。值得注意的是，加大保护层厚度对耐久性有好处，但表面横向裂缝宽度增大，如建筑物有外观要求时就不能任意加大保护层厚度。

### (6) 其他因素

混凝土中钢筋的腐蚀有时也会因为混凝土内部或外部环境不均匀而产生。例如，若在混凝土中存在两种相互接触的异种金属，则会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；当混凝土中各部分的氧浓度、氯化物浓度或碱浓度不同时，则会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为显著。

预应力混凝土中，预应力钢筋（钢丝、钢绞线等）截面较小，工作应力比普通钢筋混凝土结构中钢筋的工作应力高，因而预应力钢筋遭受腐蚀后的影响比普通钢筋混凝土严重得多。预应力钢筋的腐蚀主要有三种情况：锈坑腐蚀、应力腐蚀和氢脆腐蚀。锈坑腐蚀是由于电化学作用造成的钢筋腐蚀，由于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，它比均匀腐蚀更为危险。应力腐蚀是腐蚀介质和拉应力共同作用下钢筋产生晶间或穿晶断裂现象。氢脆腐蚀是由硫化氢与钢筋的化学反应引起的，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。

混凝土保护层的完好性（是否开裂、有无蜂窝、孔洞等）对钢筋的腐蚀有明显影响，特别是处于潮湿环境或腐蚀介质中的钢筋混凝土结构影响更大。许多实际调查结果都表明，在潮湿环境中使用的钢筋混凝土结构，裂缝宽度达 0.2mm 时即可引起钢筋腐蚀。钢筋腐蚀产生体积的膨胀又会加大保护层的裂缝宽度，如此恶性循环的结果必然导致混凝土保护层的彻底剥落和钢筋混凝土结构的最终破坏。

粉煤灰等矿物掺合料会降低混凝土的碱性，从而对钢筋腐蚀有不利影响。但国内外的研究证明，如能掺用优质粉煤灰等掺合料，则能在降低混凝土碱性的同时，提高混凝土的密实度，改善混凝土的内部孔结构，从而阻止外界腐蚀介质及氧气与水分的掺入，阻止钢筋腐蚀，掺用粉煤灰还可以增强混凝土抵抗杂散电流对钢筋的腐蚀作用。只有当掺用劣质粉煤灰时才会增大混凝土的需水量和孔隙度，引起钢筋腐蚀。

#### 4. 钢筋防腐蚀的措施

钢筋防腐蚀措施可分为两类：一类是常规防腐蚀法，一类是特殊防腐蚀法。

##### (1) 常规防腐蚀法

从材料选择、工程设计、施工质量、维护管理等四个方面采取综合措施，其中主要措施有：

- 1) 优选混凝土配合比，严格控制水灰比，选用合适的水泥用量和外加剂。
- 2) 工程设计中采用一定厚度的保护层，有利于阻止有害物质的渗入和抵抗钢筋锈蚀胀力。
- 3) 保证混凝土施工质量，提高密实性、抗冻性和抗渗性，加强养护，防止有害裂缝的产生。
- 4) 采用合适的材料，防止碱集料反应。
- 5) 严格限制氯离子含量。
- 6) 必要时采取表面涂层防护。
- 7) 定期检查，发现有裂缝或混凝土疏松掉皮时及时鉴定处理。

##### (2) 特殊防腐蚀法

特殊防腐蚀方法有：①阴极保护；②环氧树脂涂层钢筋；③用纤维增强塑料 Fiber -

reinforced plastics (FRP) 代替钢筋；④镀锌钢筋；⑤在混凝土内或钢筋表面加防锈剂。在上述这些特殊措施中，发展较快的是环氧树脂涂层钢筋、代替钢筋的 FRP 和钢筋防锈剂。

1) 环氧树脂涂层钢筋，有静电粉体涂敷法和流体浸渍法等。为了提高涂层的均匀性及涂敷后与混凝土的粘结强度以及耐腐蚀的能力，工程中主要采用静电粉体涂敷法。该法是先加热钢筋，而后向加热的钢筋上均匀喷射薄层树脂粉体，熔融、冷却，而后形成树脂涂层钢筋，经过“针孔试验”、“涂层厚度试验”、“耐腐蚀试验”、“耐碱性试验”以及有关力学性能试验，合格后投入使用，并要求在运送、吊装、绑扎等过程中，不被损伤。如遭到损伤，需进行有效修补。钢筋连接部位也需特殊处理。

2) 用来代替钢筋的 FRP 主要有三种：①玻璃纤维筋 Glass fiber - reinforced plastics (GFRP)；②碳纤维筋 Carbon fiber - reinforced plastics (CFRP)；③阿拉米德纤维筋 Aramid fiber - reinforced plastics (AFRP)。它们都具有很高的抗拉强度，工程中可用作预应力筋，但 GFRP 的抗碱化能力较 CFRP 和 AFRP 差，不能用于含碱量高的水泥制品中。

3) 钢筋防锈剂是一种价格比较低廉，防止钢筋锈蚀的一种外加剂，其特点是防止钢筋锈蚀。它的主要功能是使钢筋在渗入高量氯离子的情况下，仍能保持钝化膜的存在，但不能降低氯离子的渗入。

选择防腐方法时应首先采用第一类常规防腐方法，如果因为条件所限不能完全采用第一类常规防腐方法时，或者需要进一步提高防腐性能时，则采用第二类特殊防腐方法，但仍然要尽量满足第一类防腐方法的要求，因为利用常规的混凝土防腐方法是比较经济的。

应特别强调的是，无粘结预应力钢筋多用中性介质的涂料（如柏油、黄油、石蜡等），这种涂料只起到防水作用，它不会使钢筋表面形成具有防腐能力的钝化膜。无粘结预应力钢筋与混凝土没有粘结，钢筋在任一点的局部腐蚀对钢筋全长的承载能力都有影响，因此局部腐蚀对无粘结预应力混凝土所造成的后果要比有粘结预应力混凝土严重得多，它的耐久性问题就更为重要。

## 2.1.2 混凝土的中性化

### 1. 概述

混凝土周围环境和介质中的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{Cl}_2$  等深入混凝土表面，与水泥石中的碱性物质发生反应从而使 pH 值降低的过程称为混凝土的中性化。混凝土在空气中的碳化是中性化最常见的一种物理化学过程。在某些条件下，混凝土碳化会增加其密实性，提高混凝土抗化学腐蚀的能力，但由于碳化降低混凝土的碱度，破坏钢筋表面的钝化膜，使混凝土失去对钢筋的保护作用，给混凝土中钢筋腐蚀带来不利的影响，同时，混凝土碳化还会加剧混凝土的收缩，有可能导致混凝土的裂缝和结构的破坏。混凝土碳化对钢筋混凝土结构的耐久性有很大的影响，已引起国内外学者的广泛注意。

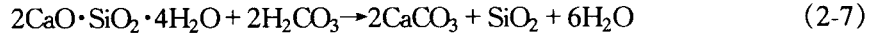
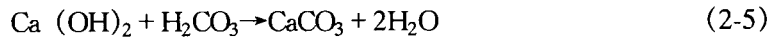
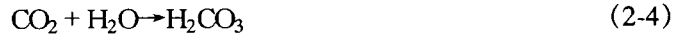
### 2. 混凝土碳化的机理

由于混凝土是一个多孔体，在其内部存在大小不同的毛细管、孔隙、气泡，甚至缺陷，空气中的二氧化碳首先渗透到混凝土内部充满空气的孔隙和毛细管中，而后溶解于毛细管中的液相，与水泥水化过程中产生的氢氧化钙和硅酸三钙、硅酸二钙等水化产物相互作用，形成碳酸钙。

混凝土的碳化主要包括三个过程：

(1) 化学反应过程

混凝土碳化的化学反应过程如下：



化学反应过程进行较快，反应的速度主要取决于  $\text{CO}_2$  的浓度和混凝土可碳化物质的含量。

(2) 二氧化碳等的扩散

二氧化碳或其他酸性物质通过混凝土孔隙向混凝土内部扩散，这一过程的速度取决于扩散物质的浓度和混凝土的孔隙结构。

(3) 氢氧化钙等的扩散

氢氧化钙等可在孔隙表面的湿度薄膜内扩散，其速度取决于混凝土的含水率和氢氧化钙浓度的梯度。

通常，上述三个过程中，二氧化碳在混凝土中的扩散速度最慢，它决定了混凝土碳化过程的速度。

### 3. 影响混凝土碳化的因素

影响混凝土碳化的因素可分为周围环境因素、材料组成因素和施工因素三大类。

(1) 周围环境因素

周围环境因素主要指周围介质的相对湿度、温度及二氧化碳的浓度等。

环境介质的相对湿度直接影响混凝土的润湿状态和抗碳化性能。在大气非常潮湿，相对湿度大于 80% 或 100% 的情况，混凝土毛细管处于相对的平衡含水率或饱和状态，使其气体渗透性大大降低，使混凝土碳化速度大大降低甚至停止；在相对湿度为 0~45% 的条件下，混凝土处于干燥或含水率非常低的状态，空气中的  $\text{CO}_2$  无法溶解于毛细管水或溶解量非常有限，使之不能与碱性溶液发生反应，因而混凝土碳化也无法进行；当周围介质的相对湿度为 50%~75% 时，混凝土碳化速度最快。

环境温度对混凝土的碳化速度影响也是很大的，和一般的化学反应一样，其碳化速度与温度几次方成正比。但对混凝土碳化来说，情况却比一般化学反应复杂得多。这主要是因为  $\text{CO}_2$  和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  在水中的溶解度是与介质温度成反比的。所以说，随着温度的提高，碳化速度加快，主要是用  $\text{CO}_2$  在空气中的扩散系数随温度的提高而增加来解释。

二氧化碳浓度对混凝土碳化深度的影响早就被国内外有关资料所肯定。一般认为，混凝土的碳化深度 ( $D$ ) 与二氧化碳浓度 ( $c$ ) 的平方根成正比，即：

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{\sqrt{c_1 t_1}}{\sqrt{c_2 t_2}} \quad (2-8)$$

式中  $t_1$ 、 $t_2$ ——碳化时间。

(2) 材料组成因素



1) 水泥用量：水泥用量是影响混凝土碳化最主要因素之一。试验说明，水泥用量越大，混凝土的强度越高，其抗碳化性能也越高，规律性十分明显。若以水泥用量为  $300\text{kg}/\text{m}^3$  时的混凝土碳化深度作为标准，与其他水泥用量时的碳化深度作比较，可得出不同水泥用量对混凝土碳化的影响系数。水泥用量影响系数 ( $\eta_1$ ) 因混凝土品种不同而有较大差别。

对轻集料混凝土来说：

$$\eta_1 = 582 \cdot C^{-1.107} \quad (2-9)$$

对普通混凝土来说：

$$\eta_1 = 253 \cdot C^{-0.954} \quad (2-10)$$

式中  $C$ ——每立方米混凝土的水泥用量 (kg)。

2) 水灰比：水灰比对混凝土的孔隙结构影响极大。在水泥用量不变的条件下，水灰比越大，混凝土内部的孔隙率越大，密实性越差，渗透性越大，其碳化速度也越快。试验说明，随着水灰比的增长，混凝土碳化速度加剧。水灰比对混凝土碳化影响系数 ( $\eta_2$ ) 明显增大，且呈明显的线性关系，可用直线方程表示：

对轻集料混凝土来说：

$$\eta_2 = 0.017 + 2.06 \left( \frac{W}{C} \right) \quad (2-11)$$

对普通混凝土来说：

$$\eta_2 = 4.15 \left( \frac{W}{C} \right) - 1.03 \quad (2-12)$$

3) 粉煤灰取代量：混凝土掺用粉煤灰，对节约水泥、改善混凝土的某些性能有很大作用。但由于粉煤灰是一种火山灰质材料，具有一定活性，它会与水泥水化后的氢氧化钙相结合，使混凝土的碱度降低，从而减弱了混凝土的抗碳化性能。试验表明，在水灰比不变和采用等量取代法的条件下，粉煤灰取代水泥量越大，混凝土的抗碳化性能越差，因此，粉煤灰取代水泥量对混凝土碳化的影响系数 ( $\eta_3$ ) 也越大，也呈明显的线性关系。

对轻集料混凝土来说：

$$\eta_3 = 1.006 + 0.0171F \quad (2-13)$$

对普通混凝土来说：

$$\eta_3 = 0.968 + 0.032F \quad (2-14)$$

式中  $F$ ——粉煤灰取代水泥量 (%)。

若采用超量取代法配制混凝土时，特别是当采用 I 级灰，使混凝土的水灰比有所降低时，其混凝土的抗碳化性能将比上述的试验结果有所改善。即  $\eta_3$  的数值可能有所降低，但试验数据较少，尚得不出降低的具体数值，但一般情况下，可取  $\eta_3 = 1$ 。

用粉煤灰等量取代部分水泥配制混凝土时，在一般工艺条件下，其最大取代量不宜超过 20%。当粉煤灰取代水泥量为 30% 时，将使  $\eta_3$  大幅度增长，显然，这对混凝土的抗碳化性能是十分不利的。

4) 水泥品种：水泥品种对混凝土的抗碳化性能也有明显影响。试验表明，普通硅酸盐水泥配制的混凝土比混合材含量较高的同强度等级的矿渣水泥和火山灰水泥混凝土有较好的抗碳化性能。但矿渣水泥配制成的混凝土则与同强度等级的火山灰水泥混凝土的抗碳