



全国高等院校土建类专业实用型规划教材

# 建筑结构检测 鉴定与加固

陈宗平 主编

JIANZHU JIEGOU JIANCE  
JIANDING YU JIAGU



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

全国高等院校土建类专业实用型规划教材

# 建筑结构检测 鉴定与加固

主 编 陈宗平  
副主编 岳建伟 徐奋强  
参 编 门进杰 曾 磊 柯晓军

## 内 容 提 要

本书全面介绍了建筑结构的检测、鉴定与加固相关理论和技术方法，全书共分6章，包括：概论，建筑结构损伤机理与危害，建筑结构检测，建筑可靠性鉴定，建筑结构加固，建筑抗震鉴定与加固等。书中配有必要的例题、每章小结、复习思考题和习题，便于学生学习和复习巩固相关知识。部分章节给出了工程实例，以加强学生的实践能力。

本书可作为高等院校土木工程专业的本科教材，也可作为土木工程专业的专科教材，还可供相关工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

建筑结构检测 鉴定与加固/陈宗平主编. —北京：中国电力出版社，2011.6

全国高等院校土建类专业实用型规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 1793 - 2

I. ①建… II. ①陈… III. ①建筑结构—检测②建筑结构—鉴定③建筑结构—加固—结构设计 IV. ①TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 117490 号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑：未翠霞 关 童 电话：010-63412611

责任印制：郭华清 责任校对：王开云

航远印刷有限公司印刷·各地新华书店经售

2011 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·15.125 印张·371 千字

印数：0001~3000 册

定价：35.00 元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前 言

建筑物在长期的使用过程中，由于受自然环境的侵蚀、使用状况的影响以及建筑材料自身的特性而引起结构损伤和老化，结构功能将逐渐下渐，甚至无法满足正常的使用要求，这也是客观规律。近年来，混凝土结构、砌体结构以及钢结构在我国的工程建设中应用广泛。有些既有建筑，由于受建造年代设计标准和施工水平的限制、以及经济条件等因素影响，存在着可靠度不高，无法满足现有设计规范要求的可靠度标准要求。还有些既有建筑，由于结构使用用途的改变、荷载的增加、各种自然灾害的作用、环境侵蚀、建筑材料的性能老化等方面原因，也会导致结构的承载力不足或使用功能不能满足现有设计规范要求的可靠性标准要求。此外，即便是一些新建建筑，也存在着由于设计方案不科学、设计人员失误、施工方法不合理、使用不合格的材料、甚至偷工减料等多方面原因导致结构可靠性达不到标准要求。

为了使这些因可靠度达不到使用要求的既有建筑或新建建筑，能够满足现有设计规范要求的可靠度标准，这就需要采取科学的检测、鉴定方法对结构进行系统分析和评估。同时，采取科学合理的加固技术能有效地延长建筑结构的使用寿命。

建筑结构检测、鉴定与加固是土木工程专业的一门专业课，重点学习并掌握建筑结构损伤机理与危害，建筑结构检测，建筑可靠性鉴定，建筑结构加固，以及建筑的抗震鉴定与加固等内容。课程包含的知识面很广，涉及材料力学、结构力学、钢筋混凝土结构、钢结构、砌体结构、地基与基础、结构抗震、结构试验等相关知识。

本书以我国现行建筑结构检测、鉴定与加固领域相关的规范、规程以及最新的科研成果为依据，针对建筑结构中常见结构形式的检测、鉴定与加固技术进行编写。为适应建筑结构专业人才培养的要求，在编写过程中做到概念明确、内容简明、讲述清楚、理论联系实际。书中主要章节配有相当数量的例题，有利于学生理解和掌握相关知识；还给出了小结、复习思考题和习题，以便于自学和巩固所学内容。本书可作为高等院校土木工程专业本科教材，也可作为土木工程专业的专科教材，还可供相关工程技术人员参考。

本书由广西大学陈宗平、柯晓军，西安建筑科技大学门进杰，河南大学岳建伟，长江大学曾磊和南京工程学院徐奋强共同编写，陈宗平任主编，岳建伟、徐奋强任副主编。编写的具体分工为：陈宗平编写第1章、第5章的5.1~5.5节，柯晓军编写第2章，徐奋强编写第3章的3.1~3.4、3.8节，岳建伟编写第3章的3.5~3.7节和第5章的5.6节，曾磊编写第4章，门进杰编写第6章。全书由陈宗平统稿。

西安建筑科技大学薛建阳教授审阅了全书并提出了许多宝贵意见，苏州科技学院邵永健教授在编写过程中给予了许多建设性的建议，广西大学博士生王妮、硕士生张士前绘制了部分插图，在此一并表示感谢！

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中错误与不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 引起建筑结构功能退化的主要原因	1
1.2 建筑结构检测、鉴定与加固的必要性与意义	2
1.3 我国建筑结构鉴定与加固的发展概论	3
1.4 本课程的学习方法	5
本章小结	5
复习思考题	6
第 2 章 建筑结构损伤机理与危害	7
2.1 混凝土结构损伤机理与危害	7
2.2 砌体结构损伤机理及其危害	16
2.3 钢结构损伤机理及其危害	19
2.4 地基基础损伤机理及其危害	21
本章小结	22
复习思考题	23
第 3 章 建筑结构检测	24
3.1 建筑结构检测的概念与分类	24
3.2 建筑结构检测依据的标准、规范与规程	27
3.3 建筑结构检测的工作程序与基本规定	28
3.4 混凝土结构检测	32
3.5 砌体结构检测	41
3.6 钢结构检测	50
3.7 地基基础检测	51
3.8 检测报告编写要求	59
本章小结	60
复习思考题	60
第 4 章 建筑可靠性鉴定	61
4.1 建筑可靠性鉴定的概念与分类	61
4.2 建筑可靠性鉴定依据的标准、规范与规程	63
4.3 建筑可靠性鉴定的工作程序与基本规定	64
4.4 民用建筑可靠性鉴定	67
4.5 工业建筑可靠性鉴定	84
4.6 鉴定报告编写要求	105

4.7 危险房屋鉴定 .....	106
本章小结 .....	112
复习思考题 .....	113
<b>第5章 建筑结构加固</b> .....	<b>114</b>
5.1 概述 .....	114
5.2 结构加固方法及选择 .....	116
5.3 混凝土结构加固 .....	118
5.4 砌体结构的加固 .....	164
5.5 钢结构加固 .....	169
5.6 地基基础加固与建筑物纠偏 .....	172
本章小结 .....	176
复习思考题 .....	177
习题 .....	177
<b>第6章 建筑抗震鉴定与加固</b> .....	<b>179</b>
6.1 概述 .....	179
6.2 建筑抗震鉴定 .....	181
6.3 建筑抗震加固 .....	219
6.4 地震灾后建筑的鉴定与加固 .....	226
本章小结 .....	232
复习思考题 .....	233
习题 .....	233
<b>参考文献</b> .....	<b>235</b>

# 第 1 章

## 概 论

---

本章首先讲述了建筑结构功能退化的主要原因以及建筑结构检测、鉴定与加固的意义，然后简要地介绍了建筑结构检测、鉴定与加固的发展与应用概况，最后介绍了课程的主要内容、特点以及学习过程中需注意的问题。

通过本章学习，学生应掌握建筑结构检测、鉴定与加固的基本概念及特点，了解建筑结构检测、鉴定与加固在国内外土木工程中的发展与应用概况，了解本课程的主要内容、要求和学习方法。

### 1.1 引起建筑结构功能退化的主要原因

根据《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)的规定，结构在规定的设计使用年限内应满足下列功能要求：

- (1) 在正常施工和使用时，能承受可能出现的各种作用。
- (2) 在正常使用时，应具有良好的工作性能。
- (3) 在正常维护条件下，应具有足够的耐久性能。
- (4) 在设计规定的偶然事件（如地震、爆炸、撞击等）发生时及发生后，结构仍能保持必需的整体稳定性。

上述四点统称为结构的预定功能，当结构出现功能退化而不能满足预定功能要求时，就可能引起工程事故。功能退化程度较轻者可能影响建筑物的使用性能和耐久性；严重者会导致结构构件破坏，甚至引起结构倒塌，造成人员伤亡和财产损失。

引起建筑结构功能退化的原因很多，根据大量的工程经验分析，归纳起来主要有以下几方面：

#### 1. 设计有误

设计人员对结构概念理解不透彻和计算错误是结构设计中常见的两类错误。例如，设计者对拱结构的设计概念理解不透彻，对两端水平推力的认识不清，未设计抵抗水平推力的构件引起工程事故；有时在桁架结构设计中，对桁架的受力特点概念不清，荷载没有作用在节点上而是作用在节间，从而引起设计错误等均属第一类错误。再如，计算时漏掉了结构所必须承受的主要荷载；采用公式适用条件与实际情况不相符合的计算公式，或者计算参数的选用有误等均属于第二类错误。

#### 2. 施工质量差

施工质量对于确保结构满足预定功能十分重要，不合格的施工会加速结构的功能退化。

例如，悬挑梁、板的负筋位置不对或施工过程中被踩下，会显著降低其承载能力；使用不合格的建筑材料（如过期的水泥、劣质钢筋等），混凝土配合比有误，或混凝土养护不当，钢筋的保护层厚度过小等都会显著降低结构的安全、适用和耐久等性能。

### 3. 使用不当

改变结构的使用用途或建筑的使用维护不及时导致使用荷载增大，是结构使用不当的典型。例如，住宅建筑改变为办公用房，增大了结构的使用荷载；工业建筑的屋面积灰没有及时清理导致荷载增大等，均会引起结构的提前损伤破坏。

### 4. 长期在恶劣环境下使用，材料的性能恶化

在长期的外部环境及使用环境条件下，结构材料每时每刻都受到外部介质的侵蚀，导致材料状况的恶化。外部环境对工程结构材料的侵蚀主要有以下三类：

(1) 化学作用侵蚀，如化工车间的酸、碱气体或液体对钢结构、混凝土结构的侵蚀。

(2) 物理作用侵蚀，例如，高温、高湿、冻融循环、昼夜温差的变化等，使混凝土结构、砌体结构产生裂缝等。

(3) 生物作用侵蚀，如微生物、细菌使木材逐渐腐朽等。

### 5. 结构使用要求的变化

随着科学技术的不断发展，我国工业正在大规模地进行结构调整和技术改造，许多新的生产工艺不断涌现。为了满足这些新的变化要求，部分既有建筑需要适当增加高度或需要改造以提高建筑结构的整体功能。例如，吊车的更新变换，生产设备的更换，相应的吊车梁、设备的基础以及结构整体均应进行必要的增强加固。

结构的功能退化是客观存在的，只要能科学分析原因，减缓结构的退化速度，通过科学的检测、鉴定和加固，就可以延长建筑物使用年限。

## 1.2 建筑结构检测、鉴定与加固的必要性与意义

随着我国经济的飞速发展，一方面，为满足社会发展的需求，新建筑不断地建设，同时早期修建的建筑因标准低已不能满足社会发展的需求，需对其进行维修、加固和现代化改造；另一方面，随着人们生活水平的进一步提高，人们对建筑功能的要求越来越高，已有建筑的规模和功能不能满足新的使用要求，而且原有建筑的低标准、建筑的老龄化及长期使用后结构功能的逐渐减弱等引起的结构安全问题已开始引起人们的关注，在考虑昂贵的拆建费用以及对正常生活秩序和环境的严重影响等问题后，人们逐渐把目光投向对在用房屋的维修加固和现代化改造。

建筑结构的检测、鉴定与加固是当代建筑结构领域的热门技术之一，它包含结构检测、结构鉴定、结构加固三个方面的知识和技能。这三个方面虽可相互独立，但多数情况下这三方面常为一体进行综合运用，即结构的检测是结构鉴定的依据，而结构的检测和鉴定又往往是结构加固前的必要过程。

建筑结构的检测、鉴定与加固涉及知识广泛，技术复杂，它不但包含了对结构损伤的检测、对既有建筑结构的鉴定，也包括了加固理论和加固技术等相关内容，还涉及加固改造与拆除重建的经济对比分析。它是一门研究结构服役期的动态可靠度及其维护、改造的综合性

学科。近十多年来，结构鉴定与加固改造在我国得以迅速发展，作为一门新的科学技术正在逐渐形成，它已经成为土木工程技术知识更新的重要内容。为了适应经济建设快速发展的环境和满足社会大量的检查鉴定与加固专业人才的需要，很多高等院校已开设了相关的课程。

## 1.3 我国建筑结构鉴定与加固的发展概论

建筑物的可靠性鉴定与加固改造，虽是人类有建筑以来便已出现的一个传统专业。但在过去，人们习惯于把加固和维修等同，把加固视为修修补补，“头痛医头，脚痛医脚”，缺乏系统的分析和理论探讨，因而没有形成一门系统的学科。近年来，结构鉴定与加固改造技术在我国发展迅速，并且已初具规模，逐渐形成一门新的学科。

第二次世界大战以来，建筑业大致经历了三个重要发展阶段：战后废墟重建（第一阶段）→建筑物的新建与维修并重（第二阶段）→以维修与现代化改造为重点（第三阶段）。许多西方发达国家早在20世纪70年代末就进入了第三个发展阶段。由于受战争影响等多种原因，我国建筑业的发展相对滞后。近年来，随着经济的快速发展，我国建筑业也逐渐进入了新区开发与旧城改造相结合的发展阶段。

### 1.3.1 我国建筑结构检测技术的研究与发展

对建筑结构进行科学的检测是保证工程质量、人民生命安全和国家财产安全的重要手段，科学、合理的检测手段是确保结构检测结论可靠与否的重要措施。自20世纪70年代以来，我国建筑结构的检测技术得到快速发展，其使用工程对象已从新中国前的破旧民居检测发展到各种类型的现代化建筑工程检测，新的检测方法、检测手段不断涌现。

在混凝土结构检测方面，针对建国初期缺乏有效的检测技术手段，20世纪70年代中期，国家对混凝土无损检测技术进行了科技攻关，经过近10年的不断努力，我国首部混凝土检测规程《回弹法评定混凝土抗压强度技术规程》(JGJ 23—1985)问世。此后，混凝土检测方法不断出现，并逐渐成熟，回弹法、超声法、超声一回弹综合法、钻芯法等非破损法和局部破损法等混凝土检测方法在现代化的工程得到了大量使用。

在砌体结构检测方面，20世纪70年代期末，我国主要以测定砌体砂浆强度作为砌体结构抗震鉴定和加固的评定指标；到20世纪80年代中后期，开始以砌体强度、砌体砂浆强度或砌体块材强度等级作为检测对象；1994年，又将回弹法、电液法、筒压法、射钉法和剪切法五种砂浆强度检测方法和推剪法、单剪法、轴压法、扁千斤顶和拔出法五种砌体强度的检测方法纳入规程。目前，对砌体结构的检测主要使用轴压法、砂浆片剪切法、回弹法和射钉法等。

钢结构所用钢材具有材质均匀、强度、塑性与韧性均能较好，但钢材也具有易腐蚀、耐火性差等缺点，并且钢结构的缺陷敏感性较强，钢结构的检测主要是针对材料、连接缺陷、锈蚀程度与涂层厚度的检测。通常所采用的方法有：超声波无损检测、渗透检测、射线检测、涡流检测、磁粉检测、钢材锈蚀检测及涂层厚度检测等。

### 1.3.2 我国建筑结构可靠性鉴定的研究与发展

建筑物在建造和使用过程中,经常会遇到由于材料、设计、施工、使用不当等造成质量事故,或是由于材料老化、环境因素影响、偶然作用(如地震、火灾、爆炸等)使结构受到损害。为了正确分析结构现状,给出科学的鉴定结论,可靠性鉴定是建筑物维修改造工作中需要首先解决的问题。

在我国,自从1984年颁布实施以可靠指标 $\beta$ 度量结构可靠性为特点的《建筑结构设计统一标准》(GBJ 68—1984)以来,在已有建筑物可靠性鉴定的理论研究与应用上也取得了明显的进展,其中较为突出的表现为《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)的编制,该标准以可靠指标 $\beta$ 作为结构构件承载能力鉴定评级的分级标志,起到与统一标准相协调的作用。

随后,四川省建筑科学研究院等单位提出了一种以现代结构可靠性概念为基础,辅以工程经验判断并表达为实用模式的综合鉴定法,制订了《民用建筑可靠性鉴定标准》(GB 50292—1999)。该标准将结构可靠性鉴定划分为安全性鉴定与正常使用性鉴定两部分,分别从承载能力极限状态与正常使用极限状态的定义出发,并根据各种结构的特点和使用要求给出具体的标志及限值,作为结构可靠性鉴定的依据。

近年来,随着人们对建筑结构可靠性鉴定的相关理论和方法不断进行深入研究,许多新的检测仪器设备不断涌现,以及一些新的检测技术、检测手段得到大量的推广应用,我国建筑结构的可靠性鉴定体系得到了不断的提高和完善,陆续颁布了《工业构筑物抗震鉴定标准》(GBJ 117—1988)、《工业厂房可靠性鉴定标准》(GBJ 144—1990)、《建筑抗震鉴定标准》(GB 50023—1995)、《民用建筑可靠性鉴定标准》(GB 50292—1999)、《危险房屋鉴定标准》(JGJ 125—1999)等重要标准。

### 1.3.3 我国建筑结构加固技术的研究与发展

如何对已有建筑进行加固,以提高结构的性能,国内外科研工作者对此均进行了大量的研究,并提出了很多实用方法。例如,针对上部结构加固,就有增大截面法、体外预应力法和改变结构传力途径法等;针对地基基础加固,有桩托换、地基处理和加大基础面积法等。这些方法在国内外已经得到了大量使用,也取得了很多成熟的经验。

在传统的结构加固方法中,增大截面法和体外预应力法是最常用的方法,在工程中已经得到大量成功的应用。但也暴露出一些问题:后张预应力法的锚固构造困难,技术要求高,施工难度大,容易引起施工时结构的侧向稳定以及耐久性降低等问题。而增大截面法的施工周期长,对环境影响较大,并且由于增大了截面尺寸,使建筑的使用空间减少等。

随着环氧树脂胶粘剂的问世(1960年左右),出现了一种新的加固方法——外部粘贴钢板加固法,这种加固法是用环氧树脂胶粘剂把钢板等高强度材料牢固地粘贴于被加固构件的表面,使其与被加固构件共同工作,达到补强和加固的目的。

建筑结构胶从20世纪60年代起在结构加固领域就逐渐发挥了重要作用。1965年,福州大学配制了一种环氧结构胶对某水库溢洪道混凝土闸墩断裂及20m跨屋架和9m跨渡槽工字梁的裂缝进行了修复。鞍山修建公司也研制一种CJ-1建筑结构胶,用于梁柱的加固补

强。1971年美国在圣弗南多大地震的灾后重建修复过程中,就广泛采用了建筑结构胶,例如,一座10层的医院大楼和一幢高于137m的市府大厦,就用了7t多的结构胶来修补3万余米的结构裂缝。

20世纪末,随着纤维材料价格的大幅度降低,一种类似于粘钢加固的外贴纤维复合材料加固法逐渐引起工程技术人员的关注,并得以大量研究和推广应用。1984年,瑞士国家实验室首先进行了外贴纤维复合材料加固的相关研究。随后,各国学者相继进行了广泛深入的研究,并做了大量的推广应用工作,美国、日本等国家以及我国已经制定了外贴纤维复合材料加固的有关技术标准。

外贴纤维复合材料加固具有施工周期短、对原结构影响小等优点,很受欢迎。但是,在外贴纤维复合材料加固中,外贴材料与构件的结合性能是保证加固效果的关键,胶粘剂性能的好坏决定了外贴加固的成功与否,由于受到胶粘剂性能等的限制,目前外部粘贴加固还大多局限于环境温度、湿度较低的承受静力作用的构件。对于外贴材料与被加固构件之间的粘结锚固性能和锚固破坏机理、加固构件的耐久性及耐高温性能、加固构件的可靠性以及材料强度取值等问题,仍需要再进一步研究。

## 1.4 本课程的学习方法

本课程涉及检测、鉴定、加固三个方面的内容,其学习方法随内容的不同而有所差异。结构检测应强调实践性环节,需掌握常用仪器、设备的使用方法,要学会对检测数据的整理和成果的计算。结构鉴定应重点了解鉴定标准的主要条文,包括评定等级的方法、评定等级的依据和标准等。结构加固涉及的理论及计算较复杂,在加固技术的学习时应注意以下问题:

(1) 明确加固结构所需抵抗的各种荷载和作用,需要结合相关规范,掌握荷载及其他作用的取值和组合方法,为进行正确的结构分析打下良好的基础。

(2) 要正确选用结构计算模型。计算模型的选取要考虑主要因素,忽略次要因素,既要使计算结果能正确反映结构的主要受力特点,又要使计算方法简单易掌握。

(3) 要采用简单可行的结构分析方法。既要分析简单、省时、省力,又能保证分析结果准确可靠。

(4) 要结合各相关规范,掌握各种加固设计的基本方法。

(5) 重视加固结构的构造学习,合理的构造措施对确保结构安全十分必要。

### 本章小结

建筑结构由于受设计、施工、使用不当,或者由于材料老化、环境因素影响、偶然作用等,会导致其功能退化,影响其安全使用。通过对建筑结构科学的检测、鉴定与加固,能有效延长建筑物的使用年限。

建筑结构的检测、鉴定与加固作为一门新兴学科,近年来在工程界引起高度关注。学习该门课程时,应注意理论和实际相结合。

### 复习思考题

- 1-1 建筑结构需要检测、鉴定与加固的主要原因有哪些?
- 1-2 简述在建筑工程中, 建筑结构检测、鉴定与加固的必要性与意义。
- 1-3 本课程的学习方法有何特点?

## 第 2 章

# 建筑结构损伤机理与危害

本章主要讲述混凝土结构、砌体结构、钢结构，以及地基基础的损伤机理、影响因素以及防治措施等内容；重点讲解了混凝土结构中由于混凝土的碳化、腐蚀、碱骨料反应、冻融、开裂以及钢筋腐蚀引起的混凝土结构承载性能和耐久性显著降低；阐明了裂缝、变形是砌体结构损伤破坏主要表现；并强调提高钢构件的稳定性、抗疲劳、防锈和防火能力，对保证钢结构的安全使用十分必要。

通过本章学习，学生应掌握混凝土结构、砌体结构、钢结构、地基基础强度检测的损伤机理及其危害，了解各种影响结构安全及耐久性的主要因素，学会提高结构服役性能的手段和方法。

建筑物是现代文明社会赖以生存和发展的条件，建筑物的安全则是人民生命财产安全的重要保证。但实际工程中的一些服役建筑，甚至某些新建筑都难免存在质量缺陷和内外损伤，这会严重影响建筑结构的耐久性，危及结构的安全。

引起建筑结构损伤的原因很多，可以归纳为人为因素和自然因素两方面。导致结构损伤的人为因素主要有：工程设计的欠缺与错误，施工质量差、偷工减料、使用低劣材料，建筑用地规划错误，勘察工作失误、未能发现重要隐患，相邻场地施工引起建筑破坏，维修、保护不当，地下水抽取过度引起建筑物倾斜或下沉，火灾等。

导致结构损伤的主要自然因素有地震、水灾、龙卷风、泥石流及山体滑坡等地质灾害、腐蚀性气体等。

## 2.1 混凝土结构损伤机理与危害

混凝土结构是钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和素混凝土结构的总称。混凝土结构具有承载能力高、耐久性能较好等显著优点，在工程中得到广泛应用。但设计、施工、环境、使用维护等过程中的诸多因素，导致混凝土结构各种损伤破坏，从而降低了混凝土结构的使用寿命。为了确保混凝土结构的安全工作，相关人员必须了解混凝土结构损伤机理及各相关影响因素。

### 2.1.1 混凝土的碳化

混凝土周围环境和介质中的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{Cl}_2$ 、 $\text{HCl}$  等深入混凝土表面，与水泥石中弱碱性物质发生反应从而使 pH 值降低，引起水泥石化学组成及组织结构发生变化，从而对混

凝土的化学性能和物理性能产生明显的影响,这一过程称为混凝土的碳化。

碳化会导致混凝土碱度降低,减弱混凝土对钢筋的保护作用,并可能导致钢筋锈蚀,同时还会加剧混凝土的收缩,从而导致收缩裂缝的产生和加大。因此,混凝土碳化对混凝土结构尤其钢筋混凝土结构的耐久性有很大的影响。

### 1. 混凝土碳化的机理

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( $\text{CO}_2$ )首先渗透到混凝土内部充满空气的孔隙和毛细管中,与水泥水化过程中产生的氢氧化钙 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ 、硅酸三钙 $(3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$ 和硅酸二钙 $(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$ 等水化产物相互作用,形成碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )。混凝土的碳化速度主要取决于如下三个过程的速度:

(1) 化学反应过程速度。混凝土碳化反应速度取决于 $\text{CO}_2$ 的浓度和混凝土中可碳化物质的含量,可碳化物质含量受水泥品种、用量和水化程度等因素影响。

(2)  $\text{CO}_2$ 等的渗入速度。在 $\text{CO}_2$ 或其他酸性物质通过混凝土孔隙向混凝土内部渗入的过程中,其渗入速度取决于扩散物质的浓度和混凝土的孔隙结构。混凝土孔隙结构主要受混凝土水灰比、水泥水化程度的影响。

(3)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等的扩散速度。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的浓度梯度。

通常,上述三个过程中, $\text{CO}_2$ 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。此外,混凝土的碳化速度还与混凝土的含水量、温度等因素有关。

一般空气中的 $\text{CO}_2$ 的浓度很低(其体积分数约为0.03%,工业车间稍高),因而混凝土的碳化过程非常缓慢。

### 2. 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。周围环境因素主要是指环境介质的相对湿度、环境温度及 $\text{CO}_2$ 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能力。当介质相对湿度接近100%时,混凝土中微孔隙被水蒸气的冷凝水所充满,使其气体渗透性大大降低,混凝土碳化速度也大大降低甚至停止。当环境介质相对湿度为50%~75%时,混凝土的碳化速度最快;当环境介质相对湿度在25%以下时,混凝土处于干燥或含水率非常低的状态, $\text{CO}_2$ 向孔隙内扩散的速度快,但由于混凝土孔隙中水分不足导致 $\text{CO}_2$ 溶解有限,使之不能与碱性溶液反应,因而混凝土碳化也无法进行。

环境温度对混凝土的碳化速度影响也较大,一般随着温度的提高,混凝土碳化速度加快,这可解释为 $\text{CO}_2$ 在空气中扩散系数随温度的提高而增大。

$\text{CO}_2$ 的浓度对混凝土碳化深度有影响。一般认为,混凝土的碳化深度 $D$ 与 $\text{CO}_2$ 浓度 $c$ 的平方根成正比,即

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{\sqrt{c_1 t_1}}{\sqrt{c_2 t_2}} \quad (2-1)$$

式中  $t_1$ 、 $t_2$ ——碳化时间。

### (2) 材料组成因素。

1) 水灰比。试验研究表明：随着水灰比的增大，混凝土碳化速度加剧，水灰比对混凝土碳化的影响呈明显的线性关系。这是因为：在水泥用量不变的条件下，混凝土水灰比越大，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。

2) 粉煤灰取代量。在混凝土中掺用粉煤灰，对节约水泥、改善混凝土的某些性能起到很大的作用。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。这是因为：粉煤灰具有一定的活性，与水泥水化后的氢氧化钙相结合，使混凝土碱度降低，从而削弱了混凝土抗碳化能力。因此，在一般工艺情况下，粉煤灰最大取代量不宜超过 20%。

3) 水泥品种。试验研究表明：普通硅酸盐水泥配制的混凝土比采用同标号（同强度等级）的矿渣水泥和火山灰水泥配制的混凝土有更好的抗碳化性能。对同一品种水泥来说，水泥强度等级越高，其抗碳化性能越好。

(3) 施工因素。施工因素主要是指混凝土搅拌、振捣和养护条件等，如施工质量良好，能提高混凝土的密实性，进而提高混凝土的抗碳化能力；反之，则会降低混凝土的抗碳化能力。

### 3. 混凝土碳化深度预测

混凝土碳化是一个由表向内扩展的过程，在非侵蚀介质正常的大气条件下，混凝土碳化深度随时间变化规律可用下式计算：

$$D = K_c \sqrt{t} \quad (2-2)$$

式中  $D$ ——混凝土碳化深度，mm；

$t$ ——混凝土碳化龄期，d；

$K_c$ ——碳化速度系数，对于轻骨料混凝土  $K_c=4.18$ ，对于普通混凝土  $K_c=2.32$ 。

碳化深度  $D$  和碳化速度系数  $K_c$  是用来表征混凝土碳化特征的主要指标，称为碳化特征值。 $D$  和  $K_c$  越大，说明混凝土抗碳化性能越差，越易碳化。

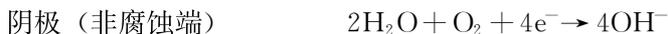
## 2.1.2 混凝土中的钢筋腐蚀

钢筋锈蚀对钢筋混凝土结构及预应力混凝土结构的耐久性及破坏影响极大，研究并解决钢筋防锈问题是实际工程急需的。

### 1. 钢筋腐蚀的机理

以普通硅酸盐水泥配制的密实混凝土未经碳化的 pH 值一般可达 13，这是因为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  $\text{OH}^-$  离子而呈现出高碱性环境。若无  $\text{Cl}^-$  存在，则钢筋表面会形成一层由  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  或  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  组成的钝化膜，其厚度为 200~1000nm。钝化膜能使阳极反应受到抑制，从而阻止了钢筋的锈蚀。

在钢筋中的碳及其他合金元素的偏析、混凝土碱度差异、 $\text{Cl}^-$  浓度差异、裂缝处钢筋表面氧化剧增而形成的氧浓度差异、加工引起的钢筋内部应力等情况下，都会使钢筋各部位的电极电位不同而形成局部电池（阳极—阴极），如图 2-1 所示。一旦钢筋的钝化膜被破坏，在有水和氧气存在的条件下，就会产生如下腐蚀电池反应：



溶液中的  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{OH}^-$  结合生成氢氧化亚铁, 生成物进一步与水中的氧发生反应, 生成氢氧化铁 (红铁锈), 即

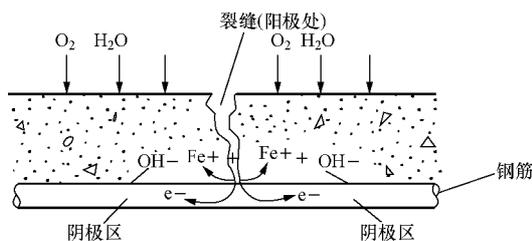
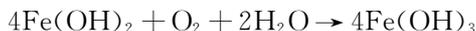
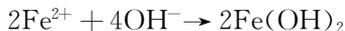


图 2-1 裂缝处钢筋锈蚀的 electrochemical 过程示意图

随着时间的推移, 氢氧化铁进一步氧化生成疏松的、易剥落的沉积物铁锈 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), 铁锈的体积可大到原来体积的 2~4 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。因此, 防止混凝土开裂是防止钢筋

锈蚀的关键措施。

## 2. 影响钢筋腐蚀的因素

钢筋锈蚀的影响因素可分内在因素和外在因素两大类。内在影响因素是指混凝土的密实度、混凝土保护层厚度及其完好性、混凝土的内部结构状态、混凝土的液相组成 (pH 值、 $\text{Cl}^-$  含量) 等; 外在影响因素是指环境介质的腐蚀性、周期的冷热交替作用、冻融循环作用等。

(1) pH 值。钢筋锈蚀速度与混凝土液相中的 pH 值有密切关系。一般来说, 当  $\text{pH} > 10$  时, 钢筋的锈蚀速度很小; 当  $\text{pH} < 4$  时, 钢筋锈蚀速度急骤增加。

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并发生碳化作用, 混凝土碱度减低, 则钝化膜将被破坏而引起钢筋锈蚀。

(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时, 即使混凝土的碱度还较高, 钢筋周围的混凝土还尚未碳化, 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, 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, 露出的金属变成为活化的阳极。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。

$\text{Cl}^-$  通过两种途径进入混凝土。一是施工过程中添加的外加剂 (含有氯盐成分); 二是使用环境中  $\text{Cl}^-$  的渗透, 如沿海地区。

工程中, 按照氯盐占水泥质量的百分比将钢筋的锈蚀分为轻度锈蚀 ( $< 0.4\%$ )、中度锈蚀 ( $0.4\% \sim 1.0\%$ ) 和高度锈蚀 ( $> 1.0\%$ ) 三种。

(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, 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, 钢筋就特别容易锈蚀。

(4) 混凝土的密实性及保护层厚度。混凝土对钢筋的保护作用主要体现在两个方面: 一是混凝土的高碱性使钢筋表面形成钝化膜; 二是保护层对外界腐蚀介质、氧气及水分等渗入的阻止作用。后者作用主要取决于混凝土的密实性及保护层厚度。

混凝土的密实性越好, 内部孔隙和毛细管道越小, 有效地阻止外界腐蚀介质、氧气及水分等的渗入, 从而加强了钢筋的耐腐蚀能力。混凝土的密实度主要与混凝土的水灰比有关, 降低水灰比可提高钢筋的耐腐蚀能力, 因此, 国内外一般把混凝土的水灰比控制在 0.4~0.45 以下。

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。混凝土结构设计规范中给出了保护层的最小厚度取值, 其与钢筋混凝土的结构种类、重要程度、所处环境、混凝土强度等级等有关。

(5) 混凝土保护层的完好性(是否开裂、有无蜂窝、孔洞等)。混凝土保护层的完好性对处于潮湿环境、露天环境或腐蚀介质中的钢筋混凝土结构的影响很大。如在潮湿环境中使用的钢筋混凝土结构, 裂缝宽度达到 0.2mm 时即可引起钢筋腐蚀, 钢筋锈蚀产生体积的膨胀又会加大保护层裂缝的宽度, 如此恶性循环必然导致保护层的彻底剥落和钢筋混凝土结构的最终破坏。

(6) 水泥的品种及粉煤灰掺合料。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。但国内外也有相关研究表明: 如果掺入优质粉煤灰等掺合料, 可提高混凝土的密实度, 改善混凝土内部的孔结构, 从而阻止外界腐蚀介质及氧气与水分渗入, 阻止钢筋的腐蚀, 因此, 选用优质粉煤灰也很有必要。

(7) 环境条件。环境条件是引起钢筋锈蚀的外在因素, 例如, 温度、湿度及干湿交替作用, 海水、海盐渗透, 冻融循环作用等, 都对钢筋的锈蚀有明显作用。

### 2.1.3 混凝土腐蚀

在正常使用条件下, 混凝土具有较好的耐久性。但在某些腐蚀性的介质作用下, 水泥石的各种水化产物会与介质发生各种物理化学作用, 导致混凝土的结构逐渐遭到破坏, 强度下降以致全部溃裂, 这种现象称为混凝土腐蚀。

#### 1. 混凝土腐蚀的机理

混凝土腐蚀是一个很复杂的物理化学过程, 其腐蚀的原因可能是单一的, 也可能是多种原因综合交替进行的。按其侵蚀性介质的性质或腐蚀的原因可分为硫酸盐腐蚀、海水腐蚀、酸腐蚀、碱腐蚀和淡水腐蚀五种类型。

(1) 硫酸盐腐蚀。硫酸盐腐蚀, 常指硫酸钠、硫酸镁等盐腐蚀, 其实质上是膨胀性化学腐蚀。在一般的河水和湖水中, 硫酸盐含量不多。但在海水、盐沼水、地下水及某些工业污水中常含有钠、钾、铵等的硫酸盐, 它们与水泥石中的氢氧化钙及水化铝酸钙反应生成石膏和硫铝酸钙(常称为“水泥杆菌”), 其体积膨胀 2.34~4.8 倍, 并同时产生内应力, 最终导致混凝土开裂破坏。

混凝土遭受硫酸盐腐蚀的特征是表面发白, 损害通常在棱角处开始, 接着裂缝展开并剥