



教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材

土木工程专业系列教材

# 混凝土结构 (上)

## ——混凝土结构原理

主编 王铁成

天津大学出版社  
中央广播电视大学出版社

教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材  
土木工程专业系列教材

# 混凝土结构(上)

——混凝土结构原理

主编 王铁成



天津大学出版社  
中央广播电视大学出版社

## 内容提要

本书根据中央广播电视大学开放教育试点“工科土建类土木工程专业”混凝土结构课程教学大纲和多媒体教材一体化设计方案,结合《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)编写,是土木工程专业的系列教材之一。

全书分上、下两册。上册由绪论,钢筋混凝土材料的力学性能,按近似概率理论的极限状态设计法,受弯构件正截面承载力计算,受弯构件斜截面承载力计算,钢筋混凝土受扭构件承载力计算,受压构件正截面受压承载力,受拉构件正截面受拉承载力,混凝土构件的变形、裂缝宽度验算和耐久性概念设计,预应力混凝土构件等内容组成。

本书可作为中央广播电视大学土木工程专业的专业基础课混凝土结构原理的教材,也可供土木工程专业本科教学以及从事混凝土结构设计、施工的技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构. 上/王铁成主编. —天津:天津大学出版社,2004. 8

ISBN 978-7-5618-1997-5

I. 混… II. 王… III. 混凝土结构-电视大学-教材 IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 074997 号

出版发行 天津大学出版社

中央广播电视大学出版社

出版人 杨风和

地址 天津市卫津路 92 号天津大学内(天津大学出版社)

北京市海淀区西四环中路 45 号(中央广播电视大学出版社)

网址 www.tjup.com

电话 营销部:022-27403647 邮购部:022-27402742(天津大学出版社)

发行部:010-58840200 读者服务部:010-58840246(中央广播电视大学出版社)

总编室:010-68182524(中央广播电视大学出版社)

印刷 北京云浩印刷有限责任公司

经销 全国各地新华书店

开本 210mm×297mm

印张 14.5

字数 450 千

版次 2004 年 8 月第 1 版

印次 2009 年 7 月第 6 次

印数 25001~29000

定价 20.00 元

# 土木工程专业课程建设

## 委员会名单

顾 问：刘锡良 江见鲸 顾晓鲁  
策 划：钱辉镜 杨风和 任 岩 陈家修  
主 任：姜忻良  
副主任：蒋克中 王铁成 刘兴业  
委 员：丁 阳 丁红岩 于俊英 王 圻 王金敏  
方根男 刘宗仁 刘津明 包世华 罗福午  
孙天正 孙天杰 匡文起 李 杰 李林曙  
李砚波 李运光 任兴华 毕继红 严士超  
杨春风 陈永灿 陈忠良 吴铭磊 旷天鑑  
郑 刚 郑家扬 邹积明 何勇军 邵立国  
张晋元 张质文 陆培毅 周建宾 赵奎生  
赵 彤 赵铁生 常春伟 洪 钧 高学平  
黄世昌 康谷贻 韩庆华 温庆博 鄢小平  
魏鸿汉 戴自强

秘 书：郭 鸿 陈英蕙

## 前 言

本书是按照中央广播电视大学开放教学模式编写的教材,旨在培养以业余学习为主的成人。教材编写考虑到学生学习环境、学习需要和学习方式,由浅入深,循序渐进,理论联系实际,加强“导学”、“助学”,培养学生提出问题、分析问题和解决问题的能力,使学生做到学以致用。

本教材根据2001年4月审定的《中央广播电视大学开放教育试点“工科土建类土木工程专业”混凝土结构课程教学大纲》和2002年3月审定的《混凝土结构多媒体教材一体化设计方案》编写,是土木工程专业的系列教材之一。

混凝土结构课程包括混凝土结构原理和混凝土结构设计两大部分内容,由文字教材、录像、IP课件和学习指导书组成。文字资料是学生学习的媒体,IP课件以知识点为线索,采用系统重点讲授,与文字资料相呼应,发挥各自优势,二者互补并相结合,形成一体化教学体系。作为强化媒体的录像教材,是IP课件的补充。

本书是文字教材,分上、下两册。上册为混凝土结构原理,下册为混凝土结构设计,共由13章组成,即绪论,钢筋混凝土材料的力学性能,按近似概率理论的极限状态设计法,受弯构件正截面承载力计算,受弯构件斜截面承载力计算,钢筋混凝土受扭构件承载力计算,受压构件正截面受压承载力,受拉构件正截面受拉承载力,混凝土构件的变形、裂缝宽度验算和耐久性概念设计,预应力混凝土构件,现浇楼盖设计,单层厂房,钢筋混凝土框架结构。

本书由王铁成担任主编,编写人员有王铁成(第3章、第5章、第12章)、李砚波(第1章、第6章、第7章、第8章、第13章)、赵艳静(第10章、第11章)、韩圣章(第2章、第9章)、王秀芬(第4章)、王圻(第8章)。中央广播电视大学的王圻老师做了本书的教学设计。

本书由天津大学康谷贻教授、戴自强教授和天津城市建设学院冷锦文教授审定。审定专家对教材进行了认真审阅,提出了宝贵意见,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2004年3月

## 目 录

第 1 章 绪论 .....	( 1 )
1.1 混凝土结构的概念 .....	( 1 )
1.2 混凝土结构的发展及应用简述 .....	( 2 )
1.3 钢筋混凝土结构的内容和学习方法 .....	( 3 )
第 2 章 钢筋混凝土材料的力学性能 .....	( 4 )
2.1 钢筋 .....	( 4 )
2.2 混凝土 .....	( 10 )
2.3 钢筋与混凝土的粘结作用 .....	( 22 )
第 3 章 接近似概率理论的极限状态设计法 .....	( 28 )
3.1 结构上的作用和结构的承载能力 .....	( 28 )
3.2 结构的功能要求 .....	( 29 )
3.3 结构功能的极限状态 .....	( 29 )
3.4 接近似概率的极限状态设计法 .....	( 30 )
3.5 两类极限状态的设计表达式 .....	( 34 )
3.6 按极限状态设计时材料强度和荷载的取值 .....	( 39 )
第 4 章 受弯构件的正截面承载力计算 .....	( 41 )
4.1 单筋矩形梁正截面承载力计算 .....	( 41 )
4.2 双筋矩形梁正截面承载力计算 .....	( 55 )
4.3 单筋 T 形梁正截面承载力计算 .....	( 60 )
第 5 章 受弯构件斜截面承载力计算 .....	( 67 )
5.1 概述 .....	( 67 )
5.2 无腹筋梁的受剪性能 .....	( 67 )
5.3 有腹筋梁的受剪性能 .....	( 72 )
5.4 有腹筋连续梁的抗剪性能和斜截面受剪承载力计算 .....	( 75 )
5.5 斜截面受剪承载力设计 .....	( 76 )
5.6 构造措施 .....	( 82 )
第 6 章 受扭构件承载力计算 .....	( 88 )
6.1 概述 .....	( 88 )
6.2 纯扭构件的扭曲截面承载力 .....	( 88 )
6.3 弯剪扭构件的扭曲截面承载力计算 .....	( 97 )
第 7 章 受压构件正截面受压承载力 .....	( 104 )
7.1 受压构件的一般构造要求 .....	( 104 )
7.2 轴心受压构件的正截面受压承载力 .....	( 106 )
7.3 偏心受压构件正截面的受压破坏形态 .....	( 112 )
7.4 偏心受压长柱的二阶弯矩 .....	( 115 )
7.5 矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力的基本计算公式 .....	( 118 )
7.6 不对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力的计算 .....	( 121 )
7.7 对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力的计算 .....	( 129 )
7.8 对称配筋工字形截面偏心受压构件的正截面受压承载力计算 .....	( 133 )
7.9 正截面承载力 $N_u-M_u$ 的相关曲线及其应用 .....	( 138 )
7.10 双向偏心受压构件的正截面承载力计算 .....	( 140 )

7.11 偏心受压构件斜截面受剪承载力计算 .....	(143)
<b>第 8 章 受拉构件正截面受拉承载力 .....</b>	<b>(145)</b>
8.1 轴心受拉构件正截面受拉承载力计算 .....	(145)
8.2 偏心受拉构件正截面受拉承载力计算 .....	(145)
8.3 偏心受拉构件斜截面受剪承载力计算 .....	(147)
<b>第 9 章 混凝土构件的变形、裂缝宽度验算和耐久性概念设计 .....</b>	<b>(148)</b>
9.1 裂缝宽度、挠度要求 .....	(148)
9.2 抗裂度计算 .....	(150)
9.3 裂缝宽度计算 .....	(153)
9.4 受弯构件的刚度和挠度计算 .....	(161)
9.5 混凝土结构的耐久性 .....	(168)
<b>第 10 章 预应力混凝土构件 .....</b>	<b>(173)</b>
10.1 概述 .....	(173)
10.2 预应力混凝土结构构件的计算规定 .....	(180)
10.3 预应力混凝土轴心受拉构件的应力分析 .....	(186)
10.4 预应力混凝土轴心受拉构件的计算 .....	(192)
10.5 预应力混凝土受弯构件的计算 .....	(195)
10.6 预应力混凝土构件的构造要求 .....	(205)
<b>附表 .....</b>	<b>(215)</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>(222)</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 混凝土结构的概念

素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构等以混凝土为主制成的结构统称为混凝土结构。混凝土结构是工业和民用建筑、桥梁、隧道、矿井以及水利、海港等工程中广泛使用的结构形式。

混凝土和钢筋是两种力学性能不同的材料,混凝土抗压强度较高,而抗拉强度则很低;钢筋具有很高的抗拉和抗压强度,但在一般的环境中易于锈蚀,耐火性差,细长的钢筋容易被压屈。若在混凝土中配置钢筋,用抗拉强度高的钢筋承受拉力,用抗压强度较高的混凝土承受压力,使两者性能得到优化,可充分发挥两者的强度,同时放置在混凝土中的钢筋受到混凝土的保护,则不易锈蚀,提高了耐火性能。试验表明,钢筋和混凝土这两种性质不同的材料能有效地结合在一起共同工作。其原因主要是由于混凝土和钢筋之间有着良好的粘结力,使两者能可靠地结合成一个整体,在荷载作用下能共同变形;其次,钢筋和混凝土具有相近的温度线膨胀系数(钢筋的温度线膨胀系数为  $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,混凝土的温度线膨胀系数为  $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),当温度变化时,不致产生较大的温度应力而破坏两者之间的粘结。

钢筋混凝土结构是由配置受力的普通钢筋、钢筋网或钢筋骨架的混凝土制成的结构。钢筋混凝土结构的特点是充分利用混凝土和钢筋的材料性能,使两者共同发挥作用,在实际工程中应用最普遍。预应力混凝土结构是由配置受力的预应力钢筋通过张拉或其他方法建立预加应力的混凝土制成的结构。由于其有效提高混凝土构件的抗裂性能和构件的刚度,因此在实际工程中得到了广泛应用。素混凝土结构是由无筋或不配置受力钢筋的混凝土制成的结构。

本课程主要以钢筋混凝土结构为研究对象,着重讲述钢筋混凝土结构设计计算的原理和方法,其中部分内容中将涉及预应力混凝土结构。

钢筋混凝土结构的优点很多,除了能合理地利用钢筋和混凝土两种材料的特性外还有如下优点。

- ①可模性好。新拌和的混凝土是可塑的,可根据需要设计制成各种形状和尺寸的结构或构件。
- ②整体性好。现浇钢筋混凝土结构的整体性较好,设计合理时具有良好的抗震、抗爆和抗振动的性能。
- ③耐久性好。钢筋混凝土结构具有很好的耐久性。正常使用条件下不需要经常性的保养和维修。
- ④耐火性好。钢筋混凝土结构与钢结构相比具有较好的耐火性。
- ⑤易于就地取材。钢筋混凝土结构所用比重较大的砂、石材料易于就地取材,且可有效利用矿渣、粉煤灰等工业废渣,有利于保护环境。

但是,钢筋混凝土结构也存在一些缺点,主要有以下几方面。

- ①自重大。钢筋混凝土结构的截面尺寸较相应的钢结构大,所以自重大,不利于大跨度结构、高层建筑结构及抗震。
- ②吊装困难。由于自重大,使材料运输量增大,给施工吊装带来困难。
- ③抗裂性能较差。钢筋混凝土结构在正常使用时往往是带裂缝工作的;对一些不允许出现裂缝或者对裂缝宽度有严格限制的结构,要满足这些要求就需要提高工程造价。
- ④隔热、隔声性能较差。



⑤施工比较复杂。施工受环境、气候条件的限制,雨季、冬季施工以及高温干燥情况下施工,均需采取特别措施以保证工程质量,建造耗工较多,进行补强修复也比较困难。

上述钢筋混凝土结构的缺点限制了其应用范围。但是,随着钢筋混凝土结构的材料和施工技术的不断发展,这些缺点已经或正在逐步得到克服。例如,采用轻质高强混凝土以减轻结构自重;采用预应力混凝土以提高结构的抗裂性;采用预制装配结构或工业化的现浇施工方法等加快施工速度;采用高性能混凝土提高混凝土的力学性能和耐久性等。

## 1.2 混凝土结构的发展及应用简述

混凝土结构与砌体结构、钢结构、木结构相比,历史不长,但自19世纪中叶开始使用后,由于混凝土和钢筋材料性能的不断改进,结构理论与施工技术的进步使钢筋混凝土结构得到迅速发展,目前已经广泛应用于工业和民用建筑、桥梁、隧道、矿井以及水利、海港等土木工程领域。

钢筋混凝土结构发展的初期阶段是以在工程中采用钢筋混凝土建造各种板、梁、柱和拱等简单的构件为标志,但所采用的混凝土和钢筋的强度都较低,钢筋混凝土的计算理论尚未建立,内力计算和构件截面设计都是按弹性理论进行的,采用容许应力的方法。20世纪20年代以后,开始出现装配式钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和壳体空间结构,但其主要成就在于预应力混凝土的发明和应用,混凝土和钢筋的强度也得到了提高,钢筋混凝土被用来建造大跨度空间结构。同时,构件承载力开始按破坏阶段计算,计算理论开始考虑材料的塑性,如板的塑性铰线理论。第二次世界大战以后,高强混凝土和高强钢筋的出现和广泛应用,以及装配式混凝土、泵送商品混凝土等工业化的混凝土生产结构的发展,使钢筋混凝土结构的应用范围不断扩大。大型的结构工程由此得到兴建,如超高层建筑、高耸建筑、大跨度桥梁等。设计理论已是充分考虑混凝土和钢材塑性特征的极限状态设计理论,设计公式已为以概率论为基础的多分项系数表达式。

随着科学技术飞速发展,钢筋混凝土结构也得到了迅速的发展。在材料方面,我国在工程中使用的混凝土强度已达到 $20 \sim 80 \text{ N/mm}^2$ ,国外常用的强度等级在 $60 \text{ N/mm}^2$ 以上。常用的热轧钢筋的屈服强度已达到 $420 \text{ N/mm}^2$ ,有的可达 $600 \sim 900 \text{ N/mm}^2$ ,热处理钢筋的抗拉强度一般为 $1250 \sim 1450 \text{ N/mm}^2$ ,用于预应力混凝土结构中的钢丝的强度已达 $1800 \text{ N/mm}^2$ 。在结构方面,近20年来,钢筋混凝土和预应力混凝土在大跨度结构和高层结构中的应用有了令人瞩目的发展。预应力混凝土是20世纪工程结构的重大发明之一,现在已有先张法、后张法、无粘结预应力等技术,而且已广泛应用于高层建筑、桥隧建筑、海洋结构、压力容器、飞机跑道及公路路面等方面。如已建成的88层的上海金茂大厦,高421 m,是我国目前最高的高层建筑;正在建造的上海环球金融中心为101层、高约500 m,为世界最高的建筑。电视塔、水塔、水池、冷却塔、烟囱、贮罐、筒仓等特殊构筑物也普遍采用了钢筋混凝土和预应力混凝土,如上海电视塔高460 m,其高度为亚洲第一。在国外,朝鲜平壤105层的柳京饭店高达319.8 m,德国采用预应力轻质混凝土建造了跨度为90 m的飞机库屋面梁,日本滨名大桥的预应力混凝土箱形截面桥梁的跨度达239 m。

在设计理论方面,随着数学、力学及现代试验技术的进一步发展,在对混凝土变形性能的深入研究和电子计算机应用的基础上建立了以概率论为基础的极限状态设计方法。近30年来,我国在钢筋混凝土基本理论与计算方法、可靠度与荷载分析、单层与多层厂房结构、高层建筑结构、大板与升板结构、大跨度结构、结构抗震、工业化建筑体系、电子技术在钢筋混凝土结构中的应用和测试技术等方面取得了很多成果,为修订和制定有关规范和规程提供了大量的数据和科学依据。编制出了国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50068),以下简称《设计统一标准》;《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002),以下简称《混凝土规范》;《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001),以下简称《荷载规范》;《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001),以下简称《抗震设计规范》;《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002),以下简称《高层结构技术规程》等。这些规范和规程积累了我国半个世纪以来丰富的工程实践经验和最新的科研成果,把我国混凝土结构设计方法提高到了当前的国际水平,它将在工程设计中发挥指导作用,必将促进我国混凝土结构设计的进一步发展。

### 1.3 钢筋混凝土结构的内容和学习方法

本课程讲述混凝土结构及基本构件的设计理论,从而为与混凝土结构学科相关的工作和学习研究提供坚实的基础。基本构件设计理论包括受弯构件(正截面破坏和斜截面破坏)、轴心受力构件(受拉和受压)、偏心受力构件(受拉和受压)、受扭构件、预应力混凝土构件以及深受弯构件等,其主要内容涵盖了材料性能、设计规定、各类构件受力时的力学性能、计算方法和配筋构造,以及构件使用阶段的变形、裂缝验算及结构耐久性等;混凝土结构的设计理论主要讲述钢筋混凝土现浇楼盖、单层工业厂房结构和钢筋混凝土框架结构的设计方法和计算理论。

本课程是一门综合性很强的应用科学,需要结合数学、力学、材料及施工实践等知识,系统地学习领会其基本知识、设计理论构成,同时需要有配套实验,并注意以下一些问题。

①学习本课程,要注意与理论力学、材料力学和结构力学的联系与区别。首先,它所应用的力学理论与弹性力学、材料力学有很多不同的地方,要通过认识二者的不同之处来掌握混凝土的特点。后者研究的是单一、匀质、连续、弹性(或理想弹塑性)材料的构件,而钢筋混凝土原理则是以由钢筋和混凝土两种材料组成的非匀质、非连续、非弹性的构件为研究对象。其次,与弹性力学、材料力学一样,钢筋混凝土计算原理也可以通过几何、物理和平衡关系来建立基本方程,但在每一种关系的具体内容上要考虑钢筋混凝土的性能特点。由于钢筋混凝土构件是两种材料组成的复合材料构件,两种材料在数量和强度上的配比是决定其力学性能的主要因素。如果钢筋和混凝土在面积上的比例和材料强度搭配超过了一定的界限,则会引起构件受力性能的改变,这是钢筋混凝土构件区别于单一材料构件的基本而又具有实际意义的问题。另外,由于混凝土材料物理力学性能的复杂性,没有非常完善的强度理论,其中的强度和变形规律,在很大程度上依赖于实验分析。因此在学习时,要重视对构件的实验研究,了解反映试验中规律性现象的结构和构件受力性能,掌握受力分析中所采用的基本假定和实验依据。在学习和运用计算公式时,特别注意其适用范围和限制条件,同时在实用中注意结合具体情况,灵活运用。

②学习本课程,要注意培养对多种因素进行综合分析的能力。本课程要解决的不仅是材料的强度和变形的计算问题,主要还是结构和构件的设计,如结构方案、结构选型、材料选择和配筋构造等。结构设计是一个综合性的问题,需要考虑多方面的因素。设计时,同一构件在给定荷载作用下,可以有不同的截面形式、尺寸、配筋方式和数量等。因此,实际中往往需要通过试算、调整,同时进行适用、材料、造价、施工的可行性等各项指标的综合分析比较,才能作出合理的选择。

③在学习本课程时,对规范的运用是一个非常重要的问题。规范是对多年来混凝土结构方面的科学技术水平、理论计算方法和工程实践经验的总结,以及对国际上有关标准的先进成果吸收。在学习上要力求熟悉它,在设计中灵活运用它,在实践中进一步验证它。只有对规范条文的概念和实质有正确的理解,才能确切地应用其内容,充分发挥设计者的主动性与创造性。

本课程有着较强的实践性,一方面要通过课堂学习、习题、作业来掌握结构设计所必需的理论知识,通过课程设计和毕业设计等实践性教学环节学会运用这些知识来正确地进行结构设计,并解决工程中的技术问题;另一方面要通过现场参观来了解实际工程的结构布置、配筋构造、预应力的施工工艺等,以积累感性知识,增加工程经验。

## 第2章 钢筋混凝土材料的力学性能

### 2.1 钢筋

钢筋是钢筋混凝土结构的重要构成成分。建筑结构中用的钢筋,要求具有较高的强度,良好的塑性,以便于加工和焊接。熟悉钢筋种类和强度等级,弄清钢筋的化学成分、生产工艺和加工条件,才能选到具有上述性能的钢筋。

#### 2.1.1 钢筋的化学成分、种类、等级和形式

##### 1. 钢筋的化学成分

钢筋是钢材的主要使用形式之一。钢材的化学成分主要是铁,在炼制过程中,有时加入少量的元素(如硅、锰、钛、钒、铬等)来改善钢筋的性能。按照化学成分的不同,钢可以分为碳素钢和普通低合金钢。而碳素钢根据含碳量的多少,又可划分为低碳钢(含碳量 0.25%)、中碳钢(含碳量 0.25% ~ 0.6%)和高碳钢(含碳量 0.6% ~ 1.4%)。含碳量越高,强度越高,但塑性和焊接性越低;反之则强度越低,塑性和焊接性好。在建筑工程中,主要使用低碳钢和中碳钢。在普通碳素钢的基础上,加入少量的合金元素,有效地提高钢材的强度和改善钢材的其他性能,形成所谓的普通低合金钢。目前,我国普通低合金钢按其加入元素的种类划分为以下体系:锰系(20 锰硅、25 锰硅)、硅钒系(40 硅 2 锰钒、45 硅 2 锰钒)、硅钛系(45 硅 2 锰钛)、硅锰系(40 硅 2 锰、48 硅 2 锰)、硅铬系(45 硅 2 铬)。在钢的冶炼过程中,还会出现无法彻底清除的有害元素,即磷和硫。它们的含量过多会使钢的塑性变差,易于脆断,并影响焊接质量。所以,合格的钢筋产品必须按相关标准限制这两种元素的含量。

##### 2. 钢筋种类和等级

《混凝土规范》规定钢筋混凝土结构(包括预应力钢筋混凝土结构)中的钢筋有以下几种。

① 热轧钢筋,是低碳钢、普通低合金钢在高温状态下轧制而成,包括光圆钢筋和带肋钢筋。等级分为 HPB235 级、HRB335 级、HRB400 级和 HRB500 级。

② 余热处理钢筋,即热轧后立即穿水,进行表面控制冷却,然后利用芯部自身余热完成回火处理所得成品钢筋。钢筋混凝土中常用 RRB400 级。

③ 热处理钢筋,是将热轧钢筋通过调质处理的钢筋。热处理后钢筋强度能得到较大幅度的提高,而塑性降低并不多。常用的热处理钢筋有三种,分别是 40Si2Mn、48Si2Mn、45Si2Cr。

④ 冷轧带肋钢筋,是采用强度较低、塑性较好的普通低碳钢或低合金钢热轧圆盘条作为母材,经冷轧减径后其表面形成二面或三面有月牙肋的钢筋,根据其力学指标的高低,分为 LL550、LL650、LL800 三种。

《混凝土规范》规定预应力混凝土结构中用的钢丝按外形有下列几类。

① 光面钢丝(消除应力钢丝),用高碳镇静钢轧制成圆盘后经过多道冷拔,并进行应力消除矫直回火处理而成。

② 刻痕钢丝,在光面钢丝的表面上进行机械刻痕处理,以增加与混凝土的粘结能力。

③ 螺旋肋钢丝,是用普通低碳钢或低合金钢热轧的圆盘条作为母材,经冷轧减径在其表面形成二面或三面有月牙肋的钢丝。

④ 钢绞线,是由多根高强钢丝捻制在一起,并经低温回火处理清除内应力后制成。钢绞线可分为

2 股、3 股、7 股 3 种。

另外,为节约钢材,可以采用冷加工的办法提高热轧钢筋的强度。常用的冷加工方法有冷拉或冷拔。冷拉钢筋的冷拉应力值必须超过钢筋的屈服强度。例如将钢筋拉到超过屈服强度的一定应力水平(如图 2-1 所示 K 点),然后卸荷为零,应力—应变关系曲线沿直线下降,但最终无法回归零点,这时钢筋存在残余变形。如果立即重新张拉时,应力—应变曲线中的曲折点应力比初始的曲折点应力有所提高。如果卸载后停留一段时间再张拉时,则应力—应变关系将沿新的曲线变化,其屈服点有一定程度的提高(如图 2-1 所示 K' 点),这就是所谓的时效硬化。时效硬化和温度有很大关系。为了避免冷拉钢筋在焊接时由于高温软化,应将需要冷拉的钢筋先行焊接再进行冷拉。钢筋经过时效硬化后,能提高其抗拉屈服强度,但其塑性却有所降低,为了使钢筋冷拉后既提高强度又保证其一定的塑性,冷拉时对适宜的冷拉卸荷点的选择是很重要的。冷却卸荷点的应力水平称为冷拉控制应力,对应的应变为冷拉率。冷拉时要控制好应力和应变。

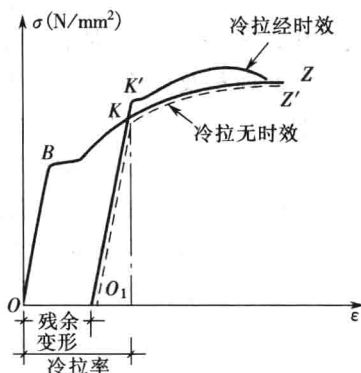


图 2-1 钢筋冷拉应力—应变曲线

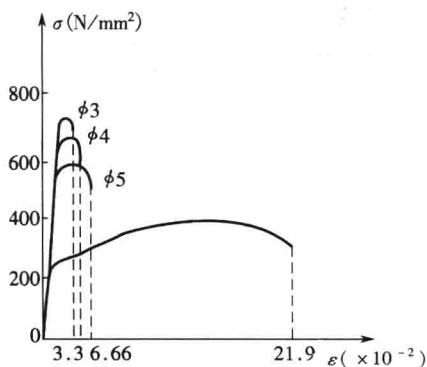


图 2-2 钢丝冷拔应力—应变曲线

冷拔是将钢筋用强力拔过比它本身直径还小的硬质合金拔丝模,钢筋同时受到纵向拉力和横向压力的作用,截面变小而长度拔长。经过几次冷拔,钢丝的抗拉和抗压强度都比原来有很大提高,但塑性降低很多。冷拔后的钢丝没有明显的屈服点和流幅,如图 2-2 所示。

近年来,我国已能充分供应强度高、性能好的钢筋(钢丝、钢绞线),因此冷拔低碳钢丝和冷拉钢筋由于其性能缺陷未列入《混凝土规范》。另外,冷轧带肋钢筋和冷轧扭钢筋亦因有了专门规程未列入《混凝土规范》,但还是允许使用这些钢筋,使用时应符合专门规程的规定。

在上述钢筋种类中,热轧钢筋为软钢,其应力—应变曲线有明显的屈服点和流幅,断裂时有“颈缩”现象,伸长率比较大;

冷轧带肋钢筋、热处理钢筋、光面钢丝、刻痕钢丝、螺旋形钢丝及钢绞线均为硬钢,它们的应力—应变曲线没有明显的屈服点,伸长率小,质地硬脆。图 2-3 为各级热轧钢筋和光面钢丝的应力—应变曲线。可以看出,随着钢材强度的提高其塑性性能降低,HPB235 级钢筋有较好的塑性,但强度较低,碳素钢丝虽强度很高,但塑性较差。

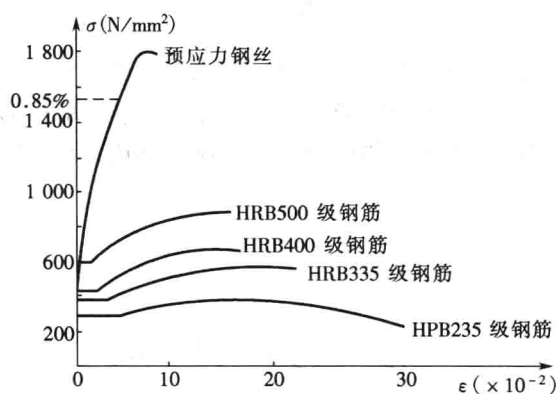


图 2-3 各级钢筋的应力—应变曲线

《混凝土规范》规定,钢筋混凝土结构及预应力混凝土结构的钢筋,应按下列规定选用:普通钢筋,即钢筋混凝土结构中的钢筋和预应力混凝土结构中的非预应力钢筋,宜采用 HRB 400 级和 HRB 335 级钢筋,也可采 HPB 235 级钢筋和 RRB 400 级钢筋,以 HRB 400 级钢筋作为主导钢筋。预应力钢筋宜采用预应力钢绞线、高强钢丝,也可采用热处理钢筋。HRB 400 和 HRB 335 级钢筋是指国家标准《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》(GB 1499—1998)中的 HRB 400 和 HRB 335 级钢筋;HPB 235 级钢筋是指《钢筋混凝土用热轧光面钢筋》(GB 13013)中的 Q235 级钢筋;RRB 400 级钢筋是指国家标准《钢筋混凝土用余热处理钢筋》(GB13014)中的 KL400 级钢筋;预应力钢丝系指国家标准《预应力混凝土用钢丝》(GB/T5223)中的三面刻痕钢丝、螺旋肋钢丝以及光面并经消除应力的高强度圆形钢丝。

大;冷轧带肋钢筋、热处理钢筋、光面钢丝、刻痕钢丝、螺旋形钢丝及钢绞线均为硬钢,它们的应力—应变曲线没有明显的屈服点,伸长率小,质地硬脆。图 2-3 为各级热轧钢筋和光面钢丝的应力—应变曲线。可以看出,随着钢材强度的提高其塑性性能降低,HPB235 级钢筋有较好的塑性,但强度较低,碳素钢丝虽强度很高,但塑性较差。

## 3. 钢筋的形式

钢筋混凝土结构所采用的钢筋可分为柔性钢筋和劲性钢筋。柔性钢筋(即普通钢筋)常用的外形有光圆和带肋(表面通常带有两条纵肋和沿长度方向均匀分布的横肋)两种。各种直径的圆钢和变形钢筋横截面面积及理论质量,详见附表 20。带肋钢筋分为等高肋和月牙肋(横肋的纵截面呈月牙形且与纵肋不相交)两种,呈人字纹、月牙形或螺旋纹,称为变形钢筋。钢丝外形通常为光圆,也有在表面刻痕的。柔性钢筋经过铁丝绑扎或焊接成钢筋网(用于板壳结构),或做成平面及空间骨架(用于梁柱结构),以便于固定在模板中浇注混凝土。劲性钢筋是由各种型钢、钢轨或用型钢与钢筋焊接成骨架。由于劲性钢筋本身刚度大,施工时模板及混凝土的重量可由劲性钢筋来承担,因此能加速并简化支模工作。钢筋形式如图 2-4 所示。

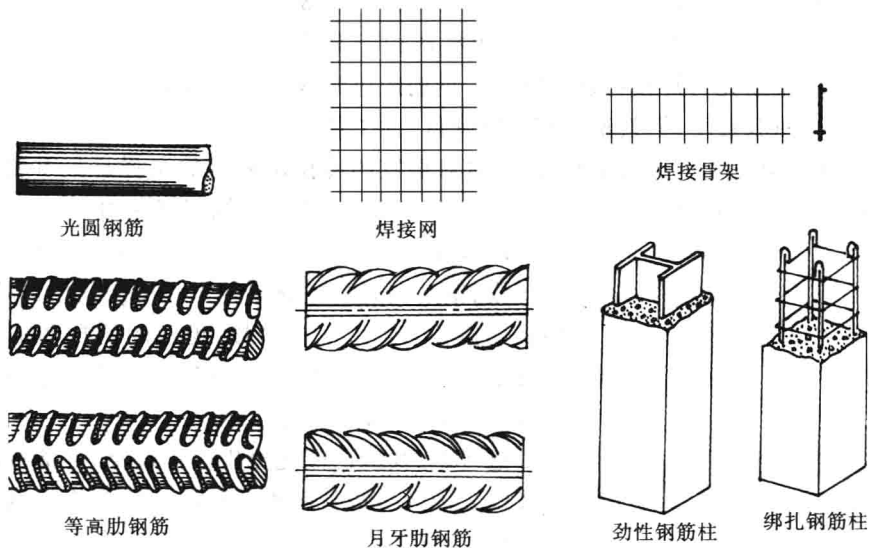


图 2-4 各种形式的钢筋

考虑到各种类型钢筋的使用条件和便于从外观上加以区别,我国规定,HPB 235 级钢筋外形轧成光面,俗称光圆钢筋。HRB 335 级、HRB 400 级钢筋轧成人字纹或月牙形以及螺旋纹。

## 2.1.2 钢筋的力学性能

钢筋的主要力学性能包括强度和变形性能,可通过拉伸试验得到的应力—应变曲线来说明。由此分为有屈服点钢筋和无屈服点钢筋,即钢筋的应力—应变曲线有的有明显的流幅(图 2-5),如热轧低碳钢和普通的热轧合金钢制成的钢筋;有的则没有明显的流幅(图 2-6),如光面钢丝等。

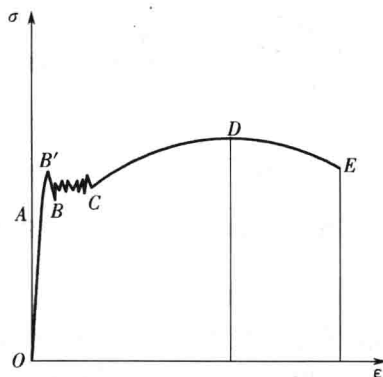


图 2-5 有明显流幅的钢筋应力—应变图

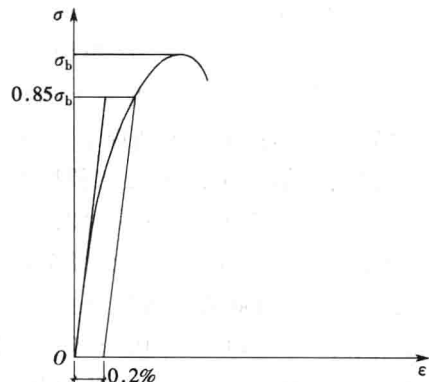


图 2-6 没有明显流幅的钢筋应力—应变图

从图 2-5 的典型应力—应变曲线来看,应力值在 A 点以前,应力和应变按线性比例关系增长,A

点对应的应力称为比例极限。过了A点以后,应变比应力增长得快,到达B'点以后,钢筋开始出现塑性, B'点称为屈服上限,它与加载速度、断面形式、试件表面光洁度等不确定因素有关,故B'点是不稳定的。待从B'降至B点(屈服下限)后,应力水平基本不变而应变急剧增加,图形接近水平线,直到C点。B点到C点的水平部分称为屈服台阶,BC段大小称为流幅。有明显流幅的热轧钢筋屈服强度是以屈服下限为依据的。过C点以后,应力又继续增长,钢筋的抗拉能力又开始发挥,随着曲线上升,到达最高点D,D对应的应力称为钢筋的极限强度,CD段称为钢筋的强化阶段。过了D点以后,应变迅速增加,应力随之下落,在测试试件上体现为试件薄弱处的截面突然显著减小,发生局部颈缩现象,变形迅速增加达到E点试件被拉断。

而图2-6中没有明显流幅的钢筋应力—应变关系曲线则没有前者的屈服台阶,而是直接到达强度极限,乃至破坏,具有脆性破坏的特点。

钢筋的一个强度代表值是标准值,标准值应具有不小于95%的保证率。在构件计算配筋时,对于热轧钢筋的强度标准值是根据屈服强度确定的,用 $f_{yk}$ 表示。因为构件中的钢筋应力达到屈服点后,将产生很大的塑性变形,使钢筋混凝土构件出现很大变形和不可闭合的裂缝,以致不能使用。对预应力钢绞线、钢丝和热处理钢筋等没有明显屈服点的钢筋强度标准值是根据国家标准极限抗拉强度 $\sigma_b$ 确定的,采用钢筋应力为 $0.85\sigma_b$ 的点作为条件屈服点。普通钢筋的强度标准值见附表6。

钢筋除要有足够的强度外,还应有一定的塑性变形能力,钢筋的塑性通常用伸长率和冷弯性能两个指标来衡量。钢筋拉断后的伸长值与原长的比值称为伸长率,伸长率越大塑性越好。冷弯是将直径为 $d$ 的钢筋绕直径为 $D$ 的钢辊弯曲到规定的角度而无裂纹及起层现象,则表示合格。钢辊的直径 $D$ 越小,弯转角越大,说明钢筋的塑性越好。

为了使钢筋在拉断前保持足够的伸长,能给出构件即将破坏的预兆,并且使钢筋在加工成型时不发生断裂,亦即保证钢筋具有一定的塑性,国家标准规定了各种钢筋所必须达到的伸长率最小值(用 $\delta_s$ 表示标距 $l=5d$ 时的伸长率)以及相应的冷弯试验要求(钢辊直径及弯转角),见表2-1。

表2-1 各种钢筋伸长率及冷弯试验要求

钢筋种类		HPB235级	HRB335级		HRB400级		HRB500级	
钢筋直径(mm)			6~25	28~50	6~25	28~50	6~25	28~50
伸长率	$\delta_5$ (%)	25	16		14		12	
冷弯要求	冷弯角度	180°	180°		180°		180°	
	钢辊直径	1d	3d	4d	4d	5d	6d	7d

### 2.1.3 钢筋的应力—应变曲线的数学模型

在钢筋混凝土结构的设计和理论分析中,需要将钢筋的应力—应变曲线理想化,对不同性能的钢筋建立不同的应力—应变曲线数学模型。常用的有以下几种。

#### 1. 双直线(完全弹塑性模型)

将钢筋的应力—应变曲线简化为两根直线,该模型不计屈服强度的上限和由于应变硬化阶段增加的应力,如图2-7(a)所示。图中OB段为完全弹性阶段,B点为用于设计的屈服下限,相应的应力及应变为 $f_y$ 和 $\epsilon_y$ ,弹性模量为 $E_s$ ,即为OB段的斜率;BC为完全塑性阶段,C点为应力强化的起点,对应的应变为 $\epsilon_{sh}$ 。过C点后,认为钢筋变形过大不能正常使用。此模型适用于流幅较长的低强度钢筋。其数学表达式如下。

当 $\epsilon_s \leq \epsilon_y$ 时,

$$\sigma_s = E_s \epsilon_s \quad (E_s = f_y / \epsilon_y) \quad (2-1)$$

当 $\epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh}$ 时,

$$\sigma_s = f_y \quad (2-2)$$

式中:  $E_s$  为钢筋弹性模量, 见附表 10。

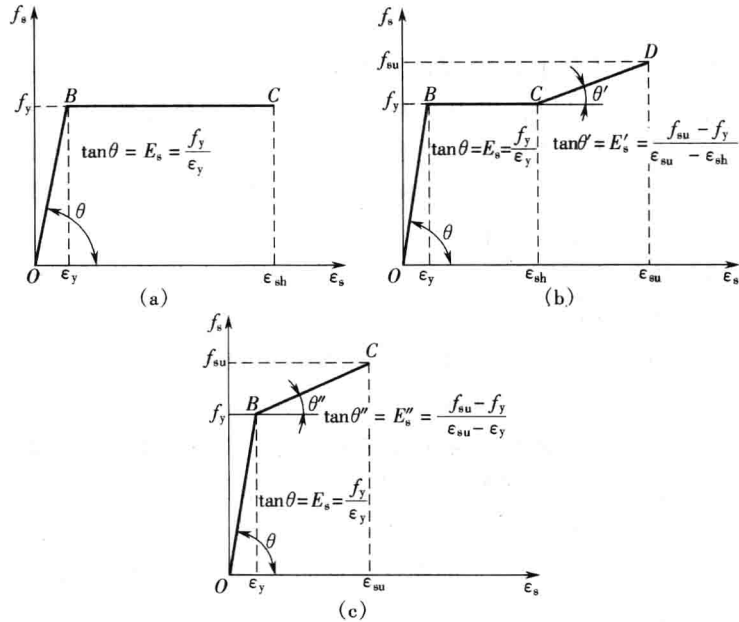


图 2-7 钢筋应力—应变曲线的数学模型

### 2. 三折线(完全弹性加硬化模型)

对于屈服后立即发生应变硬化(应力强化)的钢材,上述双直线的应力—应变模型对钢材弹性阶段以后的钢筋应力估计太低,要正确地估计高出屈服台阶应变以后的应力,可以采用三折线模型,将钢筋的应力应变关系分为弹性阶段、塑性阶段和硬化阶段,如图 2-7(b)所示。在最后阶段钢筋受拉应力达到极限值  $f_{su}$ , 相应的应变为  $\epsilon_{su}$ , 这时认为钢筋破坏,该模型应用于流幅较短的软钢,其数学表达式如下。

当  $\epsilon_s \leq \epsilon_y$  时,

$$\sigma_s = E_s \epsilon_s \quad (E_s = f_y / \epsilon_y) \quad (2-3)$$

当  $\epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh}$  时,

$$\sigma_s = f_y \quad (2-4)$$

当  $\epsilon_{sh} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{su}$  时,

$$f_s = f_y + (\epsilon_s - \epsilon_{sh}) \tan \theta' \quad (2-5)$$

可取  $\tan \theta' = E'_s = 0.01 E_s$ 。

### 3. 双斜线(弹塑性模型)

对于没有明显流幅的高强钢筋或钢丝的应力—应变曲线的模型可采用双斜线,表示钢筋的弹性阶段和硬化阶段,如图 2-7(c)。图中 B 点为条件屈服点, C 点应力达到极限值  $f_{su}$ , 相应的应变为  $\epsilon_{su}$ , 其数学模型如下。

当  $\epsilon_s \leq \epsilon_y$  时,

$$\sigma_s = E_s \epsilon_s \quad (E_s = f_y / \epsilon_y) \quad (2-6)$$

当  $\epsilon_{sh} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{su}$  时,

$$f_s = f_y + (\epsilon_s - \epsilon_{sh}) \tan \theta'' \quad (2-7)$$

取

$$\tan \theta'' = E''_s = (f_{su} - f_y) / (\epsilon_{su} - \epsilon_y) \quad (2-8)$$

#### 2.1.4 钢筋的疲劳强度

钢筋的疲劳破坏是钢筋在承受重复、周期性荷载作用下,经过一定次数后,从塑性破坏变成突

脆性断裂的破坏现象。疲劳强度是指在某一规定应力幅度内,经受一定次数荷载循环后,发生疲劳破坏的最大应力值。一般认为,钢筋产生疲劳断裂是由于在外力作用下钢筋内部或外表面的缺陷引起了应力集中,钢筋中超负荷的弱晶粒发生滑移,产生疲劳裂纹,最后断裂。

对于承受重复荷载的钢筋混凝土构件,如吊车梁等,如何确保其在正常使用期间不发生疲劳破坏,就需要研究和分析材料的疲劳强度或疲劳应力幅度限值。

影响钢筋疲劳强度的因素很多,如应力的幅度、最小应力值的大小、钢筋外表面的几何形状、钢筋直径、钢筋等级和试验方法等。试验表明,钢筋疲劳强度试验结果很分散。目前国内外进行钢筋疲劳试验有两种:对单根钢筋进行轴拉疲劳试验和将钢筋埋入混凝土构件中使其重复受拉或受弯试验。我国对不同的疲劳应力比值,得出了满足荷载循环次数为  $2 \times 10^6$  条件下的钢筋最大应力值。国内外的疲劳资料表明,应力幅度值是影响疲劳强度的主要因素,因此,《混凝土规范》给出了考虑应力比值的钢筋疲劳应力幅度值。钢筋的疲劳应力幅度值按附表采用。

当  $\rho^f \geq 0.9$  时,可不必验算钢筋的疲劳强度。 $\rho^f$  为疲劳应力比值,即截面同一纤维上钢筋最小应力和最大应力的比值。普通钢筋疲劳应力比值按下式计算:

$$\rho_s^f = \sigma_{s,\min}^f / \sigma_{s,\max}^f \quad (2-9)$$

式中:  $\sigma_{s,\min}^f$ 、 $\sigma_{s,\max}^f$  分别为构件疲劳验算时,同一层钢筋的最小应力及最大应力。

预应力钢筋疲劳应力比值按下式计算:

$$\rho_p^f = \sigma_{p,\min}^f / \sigma_{p,\max}^f \quad (2-10)$$

式中:  $\sigma_{p,\min}^f$ 、 $\sigma_{p,\max}^f$  分别为构件疲劳验算时,同一层预应力钢筋的最小应力及最大应力。

## 2.1.5 钢筋混凝土构件对钢筋性能的要求

### 1. 强度

所谓强度是指钢筋的屈服强度及极限强度。钢筋的屈服强度是设计计算时的主要依据(无明显流幅的钢筋由它的条件屈服点强度确定)。改变钢材的化学成分,采用高强度钢筋可以节约钢材,取得较好的经济效果。应考虑钢筋有适宜的强屈比(极限强度与屈服强度的比值),保证结构在达到设计强度后有一定的强度储备,同时应满足专门规程的规定。

### 2. 塑性

塑性是要求钢材在断裂前应有足够的变形(伸长率)以保证构件和结构的延性,在钢筋混凝土结构中,给人们以将要破坏的报警信号,从而采取措施进行补救。另外,还要保证钢筋冷弯的要求,通过检验钢材承受弯曲变形能力的试验以间接反映钢筋的塑性性能。

### 3. 焊接性

在一定的工艺条件下,要求钢筋焊接后不产生裂纹及过大的变形,保证焊接后的接头性能良好。要尽量减小焊接处的残余应力和应力集中。

### 4. 温度要求

钢材在高温下,性能会大大降低,对常用的钢筋类型,热轧钢筋的耐火性最好,冷轧钢筋次之,预应力钢筋最差。在进行结构设计时要注意施工工艺中高温对各类钢筋的影响,同时注意混凝土保护层厚度对构件耐火极限的要求。在寒冷地区,为了防止钢筋发生脆性破坏,对钢筋的低温性能也应有一定的要求。

### 5. 与混凝土的粘结力(或称握裹力)

为了保证钢筋与混凝土共同工作的有效性,两者之间必须有足够的粘结力,钢筋表面的形状对粘结力有重要的影响。同时要保证钢筋的锚固措施和锚固长度及混凝土保护层厚度。

另外针对不同的存在条件对钢筋还应有具体的要求。



## 2.2 混凝土

### 2.2.1 混凝土的组成结构

普通混凝土是由水泥、砂子和骨料三种基本材料用水拌和经过养护凝固硬化后形成的人工石材,是一种由具有不同性质的多组分组成的多相复合材料。其组成包括从混凝土组分的原子、分子微观结构到混凝土宏观的不同层次的材料结构,是一个广泛综合的结构概念。目前,最通用的混凝土组成观点是将混凝土分为三个递进的结构层次:微观结构,即水泥石结构;亚微观结构,即混凝土中的水泥砂浆结构;宏观结构,即砂浆和粗骨料两组分体系。

由于浇注时混凝土的泌水作用引起沉缩,以及养护硬化过程中水泥浆水化造成的化学收缩和干缩(物理收缩)受到骨料的限制,在不同结构层次结合面处会引起结合破坏,形成许多随机分布的微裂缝,即在未受荷条件下的界面裂缝。另外,在结硬的混凝土内部还有很多孔隙,这是由于硬化混凝土中游离水的作用形成的毛细孔,混凝土拌和物中夹带的空气没有完全排除形成的气孔,以及水泥石形成凝胶固相时随机产生的凝胶孔的存在。随着混凝土硬化条件和周围环境的改变,毛细孔和凝胶孔可以被水或空气充填。这些都是混凝土的原始缺陷所在。

综上所述,混凝土各组分结合形成的复杂结构层次构成了混凝土的骨架,主要用来承受外力,并使混凝土具有弹性变形的特征;水泥石中的凝胶、混凝土中的空隙和结合面初始微裂缝等,在外力作用下,由于其可压缩空间的存在,使混凝土具有较大的塑性变形。混凝土结构中的孔隙、界面微裂缝等先天的缺陷往往是混凝土完整性改变和受力破坏的根源,微裂缝在受荷时的发展对混凝土的力学性能改变有非常重要的影响。由于水泥凝胶块的硬化过程将经历若干年才能完成,所以混凝土的强度、变形也要经历较长时间的稳定期。

### 2.2.2 混凝土强度指标

在实际工程中,单向受力的构件和结构极少,一般多处于复合受力状态。复合受力作用下混凝土的强度是设计者非常关心和重视的问题。但研究复合受力作用下混凝土的强度试验需要复杂的设备,理论分析也比较困难。单向受力状态下混凝土的强度指标,仍然是进行钢筋混凝土结构构件强度分析、建立强度理论公式的重要依据。

混凝土强度值(抗压强度和抗拉强度)大小与采用的水泥品种、标号和水灰比大小有很大关系,其他如骨料(砂、石)的性质、混凝土的级配、添加剂或掺和料的使用、制作方法(人工或机械的)、硬化时的环境条件及混凝土龄期等也都有或多或少的影响。在试验时还因为所选择试件的大小和形状、试验方法或加载时间长短的不同,测得的强度值也不同。因此各种单向受力时的混凝土强度指标必须以统一规定的标准试验方法为依据。

#### 1. 混凝土的抗压强度

混凝土的抗压强度是混凝土力学性能中最主要的指标。人们通过抗压强度标准值作为混凝土强度分级的标准,也是施工过程中控制混凝土质量的主要依据。混凝土抗压强度之所以如此重要,是因为钢筋混凝土结构中最主要的就是利用其抗压强度。此外,混凝土的其他力学性能,如抗拉强度、弹性模量等也都与混凝土抗压强度有内在联系,因而建立了它们之间的关系,也就可以通过抗压强度推断出混凝土的其他力学性能。目前,国际上为确定混凝土抗压强度所采用的混凝土试件有圆柱体和立方体两种,我国采用立方体试件。

#### (1) 立方体抗压强度

混凝土立方体试件的强度比较稳定,我国以该值作为混凝土强度的基本指标。《混凝土规范》规定,按照标准方法制作养护(在  $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  的温度和 90% 以上条件相对湿度的空气中养护)的边长为 150 mm 的立方体试件在 28 d 龄期后,用标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度,叫做立方体抗压强度标准值,用符号  $f_{\text{cu,k}}$  表示。根据混凝土立方体抗压强度标准值的数值,《混凝土规范》规