



普通高等教育土建类规划教材

混凝土结构 基本原理

● 许成祥 张皓 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育土建类规划教材

混凝土结构基本原理

主 编 许成祥 张 皓
副主编 蔡 洁 金宝宏 张继承
参 编 袁 鑫 于 旭



机械工业出版社

本书根据住房和城乡建设部高等学校土建学科教学指导委员会最新颁布的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》的要求,并结合 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》等有关规范、规程编写而成。

全书分为 10 章,包括:绪论,混凝土结构材料的物理力学性能,混凝土结构设计的基本原则,钢筋混凝土受弯构件正截面承载力,钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算,钢筋混凝土受压构件,钢筋混凝土受拉构件,钢筋混凝土受扭构件,钢筋混凝土构件的变形、裂缝和耐久性,预应力混凝土结构构件。为便于教学,各章均有提要、小结和思考题,相应章附有习题。

本书可作为高等院校土木工程等相关专业的教学用书,也可作为继续教育的教材和土建设计、工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构基本原理/许成祥,张皓主编. —北京:机械工业出版社, 2012.7

普通高等教育土建类规划教材
ISBN 978-7-111-38931-6

I. ①混… II. ①许…②张… III. ①混凝土结构—高等学校—教材
IV. ① TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 136903 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:马军平 责任编辑:马军平 臧程程

版式设计:霍永明 责任校对:张 征

封面设计:张 静 责任印制:杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2012 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·17.5 印张·431 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-38931-6

定价:36.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服 务 中 心:(010)88361066 教 材 网:<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

本书依据高等学校土建学科教学指导委员会土木工程专业指导委员会对土木工程专业学生的基本要求和审定的教学大纲，并结合 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》等有关规范、规程编写而成，可以作为高等院校土建类本科专业的教材或参考书，也可作为土木工程技术与管理人士的参考书。

全书分为 10 章，包括：绪论，混凝土结构材料的物理力学性能，混凝土结构设计的基本原则，钢筋混凝土受弯构件正截面承载力，钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算，钢筋混凝土受压构件，钢筋混凝土受拉构件，钢筋混凝土受扭构件，钢筋混凝土构件的变形、裂缝和耐久性，预应力混凝土结构构件。为便于教学，各章均有提要、小结和思考题，相应章附有习题。

本书由长江大学许成祥、佳木斯大学张皓担任主编，湖北工业大学蔡洁、宁夏大学金宝宏、长江大学张继承任副主编。各章编写分工如下：第 1、7、10 章由许成祥编写；第 2、3 章由张皓编写；第 4 章由蔡洁编写；第 5 章由金宝宏编写；第 6 章由张继承编写；第 8 章由袁鑫编写；第 9 章由于旭编写。

本书编写过程中参考了国内同行的论文、著作和教材，在书末的参考文献中均有列出，特此向这些参考文献的作者表示感谢。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 混凝土结构一般概念	1
1.2 混凝土结构应用与发展概况	3
1.3 本课程主要内容和特点	4
本章小结	5
思考题	6

第 2 章 混凝土结构材料的物理

力学性能

2.1 钢筋	7
2.2 混凝土	12
2.3 钢筋与混凝土的粘结	27
本章小结	31
思考题	32

第 3 章 混凝土结构设计的基本原则 ...

3.1 结构设计的要求	33
3.2 概率极限状态设计法	36
3.3 概率极限状态设计法的实用设计 表达式	40
本章小结	47
思考题	47
习题	48

第 4 章 钢筋混凝土受弯构件正截面

承载力

4.1 梁板构造要求	49
4.2 适筋梁正截面承载力试验研究与 分析	52
4.3 正截面承载力计算的基本原则	56
4.4 单筋矩形截面受弯构件正截面承 载力计算	60
4.5 双筋矩形截面受弯构件正截面承 载力计算	64
4.6 T 形截面受弯构件正截面承载力 计算	69
本章小结	74
思考题	74
习题	75

第 5 章 钢筋混凝土受弯构件斜截面

承载力计算

5.1 无腹筋梁受剪性能	77
5.2 有腹筋梁受剪性能	82
5.3 连续梁斜截面受剪性能与承 载力计算	91
5.4 受弯构件钢筋布置	92
本章小结	102
思考题	102
习题	103

第 6 章 钢筋混凝土受压构件

6.1 受压构件构造要求	104
6.2 轴心受压柱正截面承载力计算	107
6.3 矩形截面偏心受压柱正截面承 载力计算	117
6.4 I 形截面偏心受压构件正截面 承载力计算	143
6.5 偏心受压构件 $N-M$ 相关曲线	151
6.6 双向偏心受压构件正截面承 载力计算	152
6.7 偏心受压构件斜截面承载力计算	159
本章小结	161
思考题	162
习题	163

第 7 章 钢筋混凝土受拉构件

7.1 轴心受拉构件正截面承载力计算	166
7.2 偏心受拉构件正截面承载力计算	167
7.3 偏心受拉构件斜截面承载力计算	170
7.4 构造要求	171
本章小结	171
思考题	172
习题	172

第 8 章 钢筋混凝土受扭构件

8.1 纯扭构件试验研究与分析	173
8.2 纯扭构件承载力	176
8.3 弯剪扭构件承载力	183
8.4 受扭构件配筋构造要求	190

本章小结	190	第 10 章 预应力混凝土结构构件	212
思考题	191	10.1 预应力混凝土基本原理	212
习题	191	10.2 预应力混凝土轴心受拉构件	227
第 9 章 钢筋混凝土构件的变形、裂缝		10.3 预应力混凝土受弯构件	241
和耐久性	193	10.4 预应力混凝土构件构造要求	262
9.1 变形和裂缝的计算要求	193	本章小结	265
9.2 变形验算	194	思考题	265
9.3 裂缝宽度验算	201	习题	266
9.4 混凝土结构的耐久性	207	附录	268
本章小结	210	参考文献	273
思考题	210		
习题	211		

第1章 绪 论

【本章提要】本章讲述了混凝土结构的一般概念，重点阐述了配筋的作用以及性质不同的两种材料（钢筋和混凝土）能够结合在一起共同工作的可能性和有效性，分析了混凝土结构的优点和缺点；简要介绍了混凝土结构的诞生、应用与发展历史；基于混凝土结构的特点，提出了本课程学习方法和建议。

1.1 混凝土结构一般概念

1. 混凝土结构的分类与定义

混凝土结构是指以混凝土为主制作的结构，包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构等。

素混凝土结构是指由无筋或不配置受力钢筋的混凝土制成的结构。由于混凝土的抗拉强度远低于其抗压强度，故素混凝土主要用于受压构件，如柱墩、基础墙等。素混凝土也常用来建造大体积的重力式结构，如水利工程中的重力坝坝体、港口工程中的重力式码头等。

钢筋混凝土结构是指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。混凝土结构根据施工方法不同，可分为：

(1) 现浇混凝土结构 它是指在现场支模并整体浇筑而成的混凝土结构。

(2) 装配式混凝土结构 它是用在工厂或施工现场预先制成的钢筋混凝土构件，在现场拼装而成。

(3) 装配整体式混凝土结构 它由预制混凝土构件或部件通过钢筋、连接件或施加预应力加以连接并现场浇筑混凝土而形成整体的结构。

预应力混凝土结构是指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。为了避免钢筋混凝土结构的裂缝过早出现和开展，充分利用高强度钢筋及高强度混凝土，设法在混凝土结构或构件承受使用荷载前，预先对受拉区的混凝土施加压力来减小或抵消荷载所引起的混凝土拉应力，将结构构件的拉应力控制在较小范围，甚至处于受压状态，从而提高构件的抗裂性能和刚度。

2. 配筋的作用

钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种物理力学性能完全不同的材料组成的。混凝土抗压能力较强而抗拉能力却很弱，钢材的抗拉和抗压能力都很强。为了充分利用材料的性能，把混凝土与钢筋这两种材料结合在一起共同工作，使混凝土主要承受压力，钢筋主要承受拉力以满足工程结构的使用要求。

图 1-1a 所示为素混凝土简支梁，由于混凝土的抗拉能力很小，在荷载 F_1 作用下，梁跨中附近受拉区边缘的混凝土一旦开裂，梁瞬间即脆断而破坏。破坏前梁变形很小，没有预兆，属于脆性破坏类型。

图 1-1b 所示为钢筋混凝土简支梁，在受拉区配置适量的钢筋，在荷载作用 F_2 下，钢筋

承受拉力，混凝土承受压力。破坏前，变形较大，有明显预兆，属于延性破坏类型。钢筋混凝土梁的承载能力和变形能力都有很大提高，并且钢筋与混凝土两种材料的强度都能得到较充分的利用。

图 1-1c 所示为轴心受压钢筋混凝土柱，配置钢筋协助混凝土承受压力 N ，从而可以缩小承重柱截面尺寸，或在同样截面尺寸情况下提高承重柱的承载能力和变形能力。

一般而言，构件内配置一定数量的钢筋，可提高构件的承载力，改变结构破坏模式和改善结构构件的受力性能等。

钢筋和混凝土这两种性质不同的材料，之所以能有效地结合在一起共同工作，主要是由于：

1) 混凝土硬化后钢筋和混凝土之间产生了良好的粘结力，使两者可靠地结合在一起，保证在外荷载作用下钢筋与相邻混凝土能够协调变形，共同受力。

2) 钢筋与混凝土的温度线膨胀系数值接近（混凝土的温度膨胀系数为 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}$ ，钢筋的线膨胀系数为 1.2×10^{-5} ），当温度变化时，两种材料不会因产生较大的相对变形而破坏它们之间的结合。

3) 钢筋至构件边缘之间的混凝土保护层，起着防止钢筋发生锈蚀的作用，保证结构的耐久性。

3. 钢筋混凝土构件种类

钢筋混凝土结构是由一系列不同类型的构件组成。常用的钢筋混凝土构件，按其主要受力特点，可分为：

- 1) 受弯构件，如板、梁、楼盖等。
- 2) 受压构件，如柱、剪力墙、筒、屋架的压杆等。
- 3) 受拉构件，如水池的池壁、屋架的拉杆等。
- 4) 受扭构件，如框架结构的边梁、雨篷梁、曲梁、吊车梁、空间螺旋盘梯等。

4. 混凝土结构优缺点

钢筋混凝土结构的主要优点：

(1) 经济性 合理利用了钢筋和混凝土这两种材料的受力特点，可以形成具有较高承载力的结构构件，在一定条件下可用来替代钢构件，因而能节约钢材，降低造价。

(2) 可模性好 混凝土可根据设计需要浇筑成各种形状的结构，如双曲薄壳、箱形截面等。

(3) 耐火性好 混凝土包裹在钢筋外面，发生火灾时钢筋不会很快达到软化温度而导致结构整体破坏。与裸露的木结构、钢结构相比，其耐火性要好。

(4) 整体性好 整浇或装配式钢筋混凝土结构有很好的整体性，又具备较好的延性，适用于抗震结构；同时其抗震性能和防辐射性能较好，适用于防护结构。

(5) 取材容易 混凝土所用的砂、石一般易于就地取材。另外，还可有效利用矿渣、粉

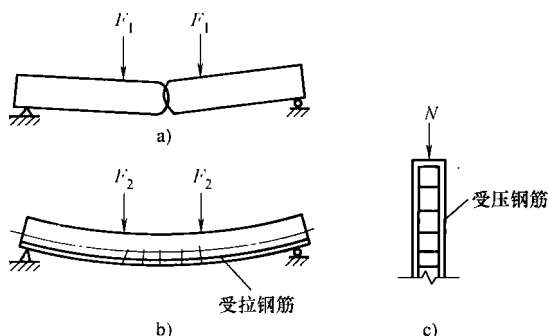


图 1-1 配筋的作用

煤灰等工业废料。

钢筋混凝土结构也存在着一些缺点，如自重较大；抗裂性较差；施工复杂，工序多，浇筑混凝土时需要模板支撑，户外施工受到季节条件限制；补强修复比较困难等，这在一定程度上限制了钢筋混凝土结构的应用范围。但随着科学技术的发展，这些缺点正在得到克服和改善，如采用高强材料的预应力混凝土结构可以提高构件的抗裂性，扩大应用范围；采用预制装配式构件可以节约模板和支撑，加快施工速度，保证质量，使工程不受季节条件的影响；发展轻质高强混凝土可以有效地减轻结构自重等。

1.2 混凝土结构应用与发展概况

1. 混凝土结构诞生与应用

1824 年英国烧瓦工人约瑟夫·阿斯普丁（Joseph Aspdin）发明了硅酸盐水泥，为钢筋混凝土的发明奠定了物质基础。1849 年法国技师朗波（L. Lambot）制造了第一只钢筋混凝土小船，标志着混凝土结构的诞生。1872 年在纽约建造第一座钢筋混凝土房屋，1890 年美国人 Ransome 在 San Francisco 建造了一幢长 312ft（1ft=0.3048m）的二层建筑物，从此开始了钢筋混凝土结构在土木工程中的应用。1884 年以后，德国人 Wayss、Bauschinger 和 Koenen 等提出了钢筋应配置在结构中受拉力部位的概念和钢筋混凝土板的计算方法。此后，钢筋混凝土结构逐渐得到了推广。

2. 混凝土结构发展

材料科学的发展、施工工艺的进步和设计计算理论的深入研究，不断推动混凝土结构取得新的发展，创新混凝土结构的体系。混凝土的发展方向是高强、轻质、耐久（抗磨损、抗冻融、抗渗）、抗灾（地震、风、火）、抗爆等。钢筋的发展方向是高强、较好的延性和较好的粘结锚固性能。

（1）预应力混凝土结构 1928 年法国工程师弗来西奈（E. Freyssinet）发明了预应力混凝土，使得混凝土结构可以用来建造大跨度结构。随着高强混凝土和高强钢筋的出现，预制装配式混凝土结构、高效预应力混凝土结构等广泛地应用于各类土木工程。

（2）高强混凝土结构 一般把强度等级为 C50 及以上的混凝土称为高强混凝土。它是用水泥、砂、石原材料外加减水剂或同时外加粉煤灰、矿渣、硅粉等混合料，经常规工艺生产而获得的混凝土。高强混凝土的抗压强度一般为普通强度混凝土的 4~6 倍，故可大大减小构件的截面尺寸，最适宜用于高层建筑。高强混凝土还有抗变形能力强、密度大、孔隙率低的优点，在大跨度桥梁结构以及某些特种结构中得到应用。

（3）高性能混凝土结构 20 世纪 80 年代末 90 年代初，一些发达国家基于混凝土结构耐久性设计提出一种全新概念的混凝土。它以耐久性作为设计的主要指标，针对不同用途要求，对下列性能重点予以保证：耐久性、工作性、适用性、强度、体积稳定性和经济性。为此，高性能混凝土在配置上的特点是采用低水胶比，选用优质原材料，且必须掺加足够数量的矿物细掺料和高效外加剂。区别于传统混凝土，高性能混凝土由于具有高耐久性、高工作性、高强度和高体积稳定性等许多优良特性，至今已在不少重要工程中被采用，特别是在桥梁、高层建筑、海港建筑等工程中显示出其独特的优越性，在工程安全使用期、经济合理性、环境条件的适应性等方面产生了明显的效益，因此被各国学者所接受，被认为是今后混

凝土技术的发展方向。

(4) 纤维增强混凝土结构 为了改善混凝土的抗拉性能差、延性差等缺点,在混凝土中掺入纤维以改善混凝土的性能。目前研究较多的有钢纤维、耐碱玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维、聚丙烯纤维或尼龙合成纤维混凝土等。在承重结构中,发展较快、应用较广的是钢纤维混凝土。普通钢纤维混凝土的纤维体积率为 $1\% \sim 2\%$,较普通混凝土,抗拉强度提高 $40\% \sim 80\%$,抗弯强度提高 $60\% \sim 120\%$,抗剪强度提高 $50\% \sim 100\%$,抗压强度提高幅度较小,一般为 $0 \sim 25\%$,但抗压韧性却大幅度提高。钢纤维混凝土已在建筑、路桥、水工等工程领域得到应用。

(5) 钢-混凝土组合结构 为充分发挥钢材和混凝土各自的特点和优势,将钢部件和混凝土或钢筋混凝土部件组合成为整体,形成钢-混凝土组合结构共同工作,兼具钢结构和钢筋混凝土结构的一些特性。这种结构可用于多层和高层建筑中的楼面梁、桁架、板、柱,屋盖结构中的屋面板、梁、桁架,厂房中的柱及工作平台梁、板、桥梁等。国内外常用的组合结构有:压型钢板与混凝土组合楼板、钢与混凝土组合梁、型钢混凝土结构(也叫劲性混凝土结构)、钢管混凝土结构、外包钢混凝土结构等五大类。

随着建筑材料、设计理论和设计方法的发展,组合结构由构件层次向结构体系方向发展。组合结构体系是由组合承重构件或组合抗侧力构件形成的结构体系,可充分发挥不同材料和体系的优势,形成一系列新颖、高效的结构体系。根据结构体系间的不同组合方式,钢-混凝土组合结构体系发展为以下类型:组合框架结构体系、横向组合结构体系、竖向组合结构体系、巨型结构体系。建筑结构材料和建筑结构的高性能化是组合结构的重要发展方向之一。

其他各种特殊性能混凝土,如聚合物混凝土、耐腐蚀混凝土、微膨胀混凝土和水下不分散混凝土等的应用,可提高混凝土的抗裂性、耐磨性、抗渗和抗冻能力等,对混凝土结构的耐久性十分有利。依靠自重使混凝土密实,不需机械振捣,形成自密实混凝土结构。为减少环境垃圾,变废为用,利用废弃混凝土的骨料,形成再生骨料混凝土结构。

1.3 本课程主要内容和特点

本课程主要介绍混凝土结构和预应力混凝土结构组成材料的力学性能、基本设计原则以及各种典型受力构件(弯、剪、压、拉、扭)的受力性能、计算和配筋构造,是学习混凝土结构设计的基础知识。

学习本课程,需要注意以下几点:

1. 混凝土材料离散性和复杂性

混凝土是由水泥、砂子、石子和添加剂用水拌和后,经养护硬化形成的一种非匀质建筑材料。尽管施工时,混凝土拌合物被搅拌得非常均匀,但与钢材相比,其匀质性还是比较差。

钢筋混凝土是由钢筋和混凝土这两种力学性能完全不同的材料组成的复合材料。混凝土不是单一、均质、连续、理想的弹性材料,所以混凝土结构存在两种材料强度配比的复杂性,不同的强度配比会引起结构受力性能的改变。钢筋和混凝土的面积比例超过某一值,会使结构的破坏特征发生变化。

正是由于混凝土材料存在的离散性和复杂性，所以材料力学公式在混凝土结构分析中，可以直接应用的不多，但通过静力平衡条件、变形协调关系和材料的应力-应变关系，建立基本方程的途径是相同的。

2. 课程实践性和综合性

由于混凝土材料力学性能的复杂性，目前尚未建立起完善的强度和变形理论，有关混凝土材料的受力性能，在很大程度上依赖于试验分析和概率数理统计理论。因此，在学习本课程时，要重视基本构件的试验研究，注意试验中观察到的破坏形态和现象，掌握受力分析时所用的基本试验依据。相当一部分混凝土结构的计算公式都带有经验性，它们不像数学和力学公式那样严谨。在课程中，表现为经验公式多、基本假定多、法定条件多、方案不唯一。在学习和使用各种计算公式时，要特别注意它们的适用范围和限制条件。只有在一定适用范围内满足其限制条件时，它们才能较好地反映钢筋混凝土构件的真实受力情况。

混凝土结构构件设计，包括方案、材料选择，截面形式确定，配筋计算，构造措施保证等。结构设计是一个综合性的问题，在进行结构布置、处理构造问题时，不仅要考虑结构受力的合理性，还要考虑使用要求、材料、造价、施工、制造等方面的问题，既要做到安全、适用、耐久，又要做到技术先进、经济合理。需对各项指标进行全面的综合分析比较，对同一问题往往有多种解决的办法，答案往往不是唯一的，应结合具体情况确定最佳方案，以获得良好的技术经济效果。所以在学习过程中，要注意培养对多种因素进行综合分析的能力。

3. 规范权威性和强制性

GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》是国家制定的有关结构设计计算和构造要求的技术规定和标准，是具有约束性和立法性的文件，是设计、校核、审批结构工程设计的依据。强制性条文是设计中必须遵守的带有法律性质的技术文件，这将使设计方法达到统一化和标准化，从而有效地贯彻国家的技术经济政策，保证工程质量。《混凝土结构设计规范》是总结了近年来全国高校与设计、科研单位的科研成果和工程实践经验，并广泛征求国内有关单位的意见，学习和借鉴国外先进规范的经验，并逐渐与国际标准一致，经过反复修改而制定的，它代表了该学科在一个时期的技术水平。因此，设计规范是结构设计工作的法律文件，是工程技术人员进行设计时必须遵守的规定。

由于科学技术水平和生产实践经验是在不断发展的，设计规范也必然要不断进行修订和补充。因此，要用发展的眼光来看待设计规范，在学习和掌握钢筋混凝土结构理论和设计方法的同时，要善于观察和分析，不断进行探索和创新。由于设计工作是一项创造性工作，在遇到超出规范规定范围的工程技术问题时，不应被规范束缚，而需要充分发挥主动性和创造性，经过试验研究和理论分析等可靠性论证后，积极采用先进的理论和技术。

本章小结

1) 混凝土结构是指以混凝土为主制作的结构，包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构等。这种结构充分发挥了钢筋和混凝土两种材料各自的优势。在混凝土中，配置适量钢筋，可提高构件的承载力，改变结构破坏模式和改善结构构件的受力性能等。

2) 钢筋和混凝土能够有效地结合，共同承受结构上的作用，主要基于：钢筋与混凝土

之间存在粘结力；两种材料的温度线膨胀系数很接近；混凝土对钢筋起保护作用。这是钢筋混凝土结构得以实现，并获得广泛应用的根本原因。

3) 常用的钢筋混凝土构件，有受弯构件、受压构件、受拉构件和受扭构件。

4) 混凝土结构有很多优点，也存在一些致命缺点。为克服其缺点，适应工程建设的需要，发展了预应力混凝土结构、高强混凝土结构、高性能混凝土结构、纤维增强混凝土结构、钢-混凝土组合结构等。

5) 本课程主要讲述混凝土结构构件的设计原理。学习时，应注意：材料的离散性和复杂性；课程的实践性和综合性；规范的权威性和强制性。

思考题

1-1 什么是混凝土结构？简述混凝土结构的优缺点。

1-2 钢筋混凝土结构中配置一定形式和数量的钢筋，有哪些作用？

1-3 钢筋和混凝土有效地共同工作的条件是什么？

1-4 简述混凝土结构的诞生、应用及发展历史。

第2章 混凝土结构材料的物理力学性能

【本章提要】 钢筋与混凝土材料的物理力学性能是混凝土结构的计算理论、计算公式建立以及结构设计的基础。本章主要介绍我国建筑工程中常用钢筋的品种、级别、强度和变形性能，混凝土在各种受力状态下的强度与变形性能，钢筋与混凝土的粘结机理、钢筋的锚固与连接构造。

2.1 钢筋

2.1.1 钢筋品种和级别

钢筋混凝土结构中所采用的钢筋有柔性钢筋和劲性钢筋两类。柔性钢筋即一般的普通钢筋，是我国混凝土结构中使用的主要钢筋形式。劲性钢筋是由各种型钢、钢轨与钢筋焊成的骨架，承载力比较大。本书主要介绍配置柔性钢筋的混凝土结构。混凝土结构中常用的钢筋品种很多，通常可按化学成分、表面形状和加工方法等进行分类。

钢筋按其化学成分可分为碳素钢和普通低合金钢两类。碳素钢除含有铁元素之外，还含有少量的碳、硅、锰、硫、磷等元素。在钢筋的化学成分中，磷和硫是有害的元素，磷、硫含量多的钢筋的塑性低，容易脆断，而且影响焊接质量，所以对其含量要予以限制。根据碳含量的多少，碳素钢又可分为低碳钢（碳的质量分数小于0.25%）、中碳钢（碳的质量分数为0.25%~0.6%）、高碳钢（碳的质量分数为0.6%~1.4%），碳含量越高，强度越高，但塑性与焊接性会降低。

普通低合金钢是在碳素钢中加入少量的硅、锰、钛、钒、铬等合金元素，加入这些合金元素后，不仅能显著地提高钢材的强度，还能有效地改善钢材的其他性能。目前我国生产的低合金钢有锰系（20MnSi、25MnSi）、硅钒系（40Si2MnV、45SiMnV）、硅钛系（45Si2MnTi）等系列。

钢筋按其表面形状可分为光面钢筋和变形钢筋两种。光面钢筋表面没有肋纹，与混凝土之间的粘结性较差。变形钢筋表面带肋纹，与混凝土之间有较好的粘结性能，常见的有热轧螺纹钢、冷轧带肋钢筋等，如图2-1所示。

钢筋按其加工方法，又可将其分为热轧钢筋、冷拉钢筋、热处理钢筋和钢丝四类。

热轧钢筋是由低碳钢、普通低合金钢在高温下轧制而成，属于软钢。其应力-应变曲线有明显的屈服点和流幅，断裂时有“缩颈”现象，伸长率较大。热轧钢筋又可分为普通热轧钢筋和细晶粒热轧钢筋，根据力学性能指标的高低，分为HPB300（符号 Φ ）、HRB335（符号 Φ ）、HRBF335（符号 Φ^F ）、HRB400（符号 Φ ）、HRBF400（符号 Φ^F ）、RRB400（符号 Φ^* ）、HRB500（符号 Φ ）、HRBF500（符号 Φ^F ）级八个种类。热轧钢筋的牌号由英文字母和数字组成，其中HPB代表热轧光圆钢筋，HRB代表热轧带肋钢筋，HRBF是代表细晶粒热轧带肋钢筋，RRB代表余热处理带肋钢筋。钢筋牌号中的数字代表钢筋的屈服强度值，

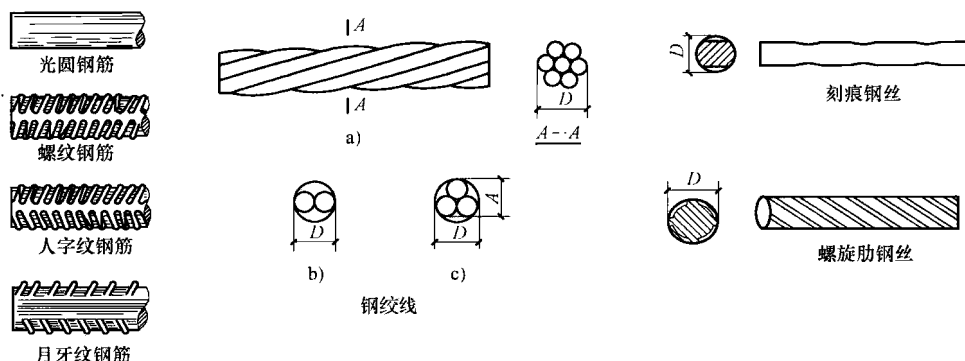


图 2-1 常用钢筋的形式
D—公称直径 A—3 股钢绞线量测尺寸

单位为“N/mm²”。HPB300 为低碳素钢筋；HRB335、HRB400、RRB400 为普通低合金钢筋；HRBF335、HRBF400、HRBF500 是我国冶金行业研究开发的新型热轧钢筋，这种钢筋生产过程中不需要加入或加入很少的钛、钒等合金元素，而是在热轧过程中通过控轧和控冷工艺轧制成的带肋钢筋，其金相组织主要是铁素体加珠光体，晶粒度不粗于 9 级。细晶粒热轧带肋钢筋的外形与普通低合金热轧带肋钢筋相同，其强度和延性完全满足混凝土结构对钢筋的性能要求。目前，我国用细晶粒热轧带肋钢筋代替应用十分广泛的普通低合金热轧钢筋，可以节约钛、钒等合金元素，降低碳当量和钢筋价格，社会效益和经济效益均十分显著。

冷拉钢筋是在常温下将热轧钢筋用机械张拉而成的。

热处理钢筋是将特定强度的热轧钢筋再通过加热、淬火和回火等调质工艺处理的钢筋。热处理后的钢筋强度能得到较大幅度的提高，而塑性降低并不多。热轧钢筋为硬钢，其应力-应变曲线没有明显的屈服点，伸长率较小，质地硬脆。热处理钢筋有 40Si2Mn、48Si2Mn 和 45Si2Cr 三种。

钢丝又可分为碳素钢丝、刻痕钢丝、钢绞线和冷拔低碳钢丝四种。碳素钢丝是由高碳镇静钢通过多次冷拔、应力消除、矫正、回火处理而成；刻痕钢丝是在光面钢丝的表面上进行机械刻痕处理而成，经刻痕处理后的钢筋与混凝土之间的粘结力增强；钢绞线是由多根直径相同的高强度钢丝在绞丝机上绞合成螺旋状，再经低温回火制成；冷拔低碳钢丝是由低碳钢经过多次冷拔而成。

目前我国用于混凝土结构的钢筋主要有热轧钢筋、冷拉钢筋、冷轧带肋钢筋、碳素钢丝、刻痕钢丝、钢绞线和冷拔低碳钢丝。非热轧钢筋主要用于预应力混凝土结构。钢筋混凝土结构中的纵向受力普通钢筋宜采用 HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500 级，也可采用 HPB300、HPB335、HRBF335、RRB400 级；梁、柱纵向受力普通钢筋应采用 HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500 级；箍筋宜采用 HRB400、HRBF400、HPB300、HRB500、HRBF500 级，也可采用 HRB335、HRBF335 级；预应力钢筋宜采用预应力钢丝、钢绞线和预应力螺纹钢筋。

2.1.2 钢筋强度与变形

钢筋的强度和变形性能可以用单向拉伸试验得到的应力-应变曲线来说明。根据钢筋的应力-应变关系曲线可将钢筋分为有明显屈服点（或流幅）和没有明显屈服点（或流幅）的两类。在建筑工程中常用的有明显屈服点钢筋有热轧低碳钢筋 HPB300 级和热轧低合金钢筋 HRB335、HRB400、RRB400 级等；没有明显屈服点的钢筋有预应力钢丝、钢绞线和热处理钢筋。

1. 有明显屈服点（或流幅）的钢筋

有明显屈服点的钢筋也称为软钢，其应力-应变曲线如图 2-2 所示。从图中可以看到，在 A 点以前，应力-应变曲线为直线，A 点对应的应力称为比例极限。OA 为理想弹性阶段，卸载后可完全恢复，无残余变形。过 A 点后，应变较应力增长得快，曲线开始弯曲，到达 B' 点后钢筋开始出现塑性流动变形，B' 点称为屈服上限，当应力降至下屈服点 B 时，应力基本不增加，而应变急剧增长，曲线出现一个波动的小平台，这种现象称为屈服。B 点到 C 点的水平距离称为流幅或屈服台阶，上屈服点通常不稳定，下屈服点 B 数值比较稳定，称为屈服点或屈服强度，有明显流幅的热轧钢筋的屈服强度是按下屈服点来确定的。曲线过 C 点后，应力又继续上升，说明钢筋的抗拉能力又有所提高。曲线达最高点 D，相应的应力称为钢筋的极限强度，CD 段称为强化阶段。D 点后，试件在最薄弱处会发生较大的塑性变形，截面迅速缩小，出现缩颈现象，变形迅速增加，应力随之下降，直至 E 点断裂破坏。

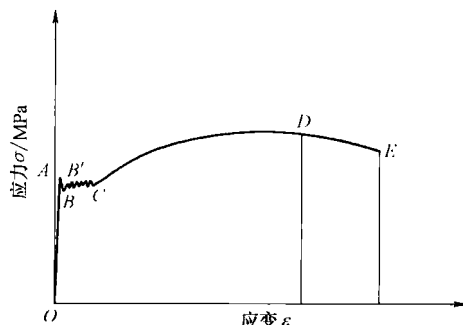


图 2-2 有明显屈服点的钢筋应力-应变曲线

对有明显屈服点的钢筋，屈服点所对应的应力为屈服强度，是重要的力学指标。在钢筋混凝土结构中，当钢筋超过屈服强度时就会发生很大的塑性变形，此时混凝土结构构件也会出现较大变形或裂缝，导致构件不能正常使用。所以在计算承载力时，一般取屈服强度作为钢筋的强度限值，钢筋的强化段只作为一种安全储备考虑。

2. 无明显屈服点（或流幅）的钢筋

无明显屈服点的钢筋也称为硬钢，其应力-应变曲线如图 2-3 所示。从图中可以看到：钢筋从加载到被拉断，曲线各阶段的变化不明显，没有明显的屈服点和流幅。因此，一般取相应于残余应变为 0.2% 时所对应的应力值 $\sigma_{0.2}$ 作为无明显屈服点钢筋的强度取值，通常称为条件屈服强度。对于不同钢筋，条件屈服强度的取值不同。为了简化计算，统一取 $\sigma_{0.2} = 0.85\sigma_b$ ，其中， σ_b 为无明显屈服点钢筋的极限强度。

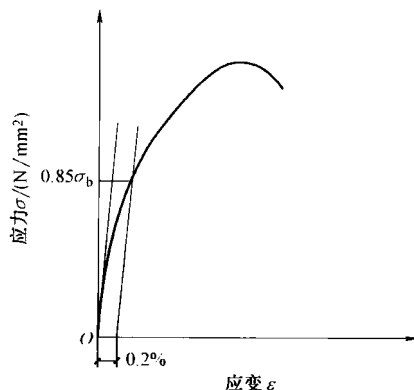


图 2-3 无明显屈服点的钢筋应力-应变曲线

钢筋除了要有足够的强度外，还应具有一

定的塑性变形能力。通常用伸长率和冷弯性能两个指标衡量钢筋的塑性。

(1) 伸长率 钢筋拉断后的伸长值与原长的比率称为伸长率。伸长率越大塑性越好。国家标准规定了各种钢筋所必须达到的伸长率的最小值（如 δ_{100} 、 δ_{10} 和 δ_5 分别表示标距 $L=100d$ 、 $L=10d$ 和 $L=5d$ 时伸长率的最小值），有关参数可参照相应的国家标准。

(2) 冷弯性能 为了使钢筋在弯折加工或在使用时不致开裂或脆断，可对钢筋试件进行冷弯试验，如图 2-4 所示。冷弯试验是将直径为 d 的钢筋绕直径为 D 的弯芯弯曲到规定的角度后无裂纹断裂及起层现象，则表示合格。弯芯的直径 D 越小，弯转角越大，说明钢筋的塑性越好。各种钢筋冷弯时相应的弯芯直径及弯转角见相应的国家标准。

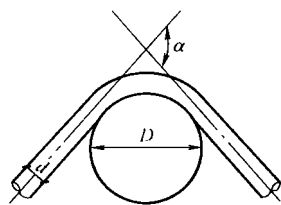


图 2-4 钢筋的冷弯试验示意图

冷弯试验比受力均匀的拉伸试验能更有效地反映材质的缺陷和钢筋的脆性性能，它是衡量钢筋力学性能的一项综合指标。

2.1.3 冷加工钢筋的性能

钢筋的冷加工是指在常温下采用某种工艺对热轧钢筋进行加工而得到的钢筋。常用的工艺有冷拉、冷拔、冷轧与冷轧扭四种。冷加工的目的主要是提高钢筋的强度和节约钢材，但经冷加工后的钢筋虽然强度提高了，但塑性明显降低，只有经冷拉的钢筋仍具有屈服点，其余的都无明显的屈服点。下面主要介绍钢筋的冷拉和冷拔。

1. 冷拉

冷拉是在常温下用机械方法将有明显屈服点钢筋拉到超过其屈服强度，然后完全放松钢筋，若再次张拉钢筋，则能获得高于原屈服强度的强度的一种加工方法。如图 2-5 所示，首先将钢筋拉到超过原屈服点 b 的某一点 k ，然后放松，则钢筋曲线将沿着平行于 Ob 的直线 kO' 回到应力为零的 O' 点，钢筋发生了残余变形。如果立即进行张拉，则钢筋的应力-应变曲线将沿着 $O'kde$ 变化，曲线的转折点 k 高于原屈服点 b ，说明钢筋经冷拉后屈服强度有所提高。但经过一段时间后再进行张拉，则曲线沿 $O'k'd'e'$ 变化，曲线获得更高的屈服点 k' 。通常把经过一段时间钢筋屈服点比原屈服点有所提高的这种现象称为时效硬化。钢筋经过冷

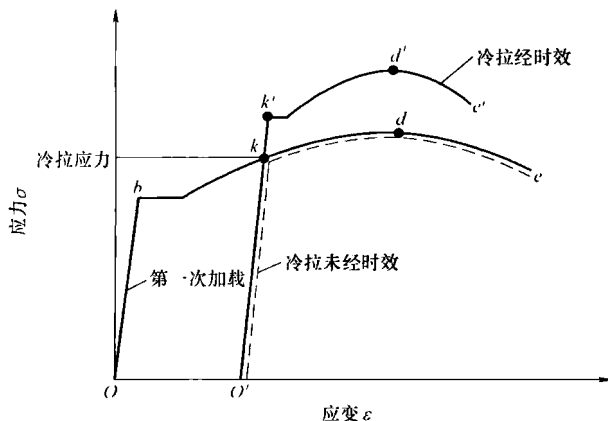


图 2-5 冷拉钢筋的应力-应变曲线

拉和时效硬化以后，能提高屈服强度、节约钢材，但冷拉后钢筋的塑性（伸长率）有所降低。为了保证钢筋在强度提高的同时又具有一定的塑性，冷拉时应同时控制应力和应变。

2. 冷拔

钢筋冷拔是用强力将钢筋拔过比它本身直径还小的硬质合金拔丝模，如图 2-6 所示，这时钢筋同时受到纵向拉力和横向压力的作用，截面变小而长度增加。图 2-7 所示为直径 6mm 的热轧钢筋经过三次冷拔所得到的应力-应变曲线。从图中可以看出，经过几次冷拔后钢筋的强度比原来有很大提高，但塑性降低很多。冷拉只能提高钢筋的抗拉强度，冷拔则可同时提高抗拉及抗压强度。

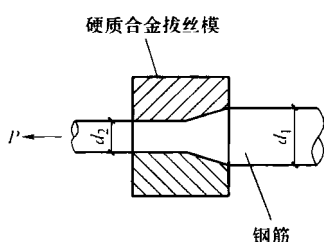


图 2-6 钢筋冷拔示意图

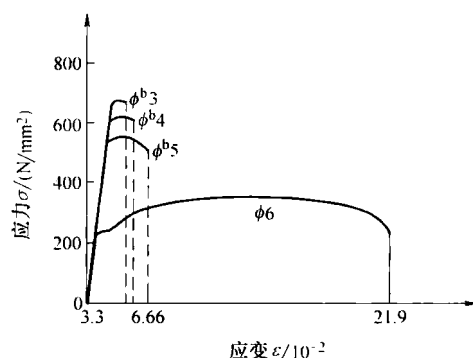


图 2-7 钢筋冷拔的应力-应变曲线

2.1.4 混凝土结构对钢筋质量的要求

用于混凝土结构中的钢筋，一般应能满足下列要求：

(1) 适当的屈强比 在钢筋的应力-应变曲线中，强度有两个：一个是钢筋的屈服强度（或条件屈服强度），这是设计计算时的主要依据，屈服强度高则材料用量省，所以要选用高强度钢筋；另一个是钢筋的抗拉强度，屈服强度与抗拉强度的比值称为屈强比，它可以代表结构的强度储备，比值小则结构的强度储备大，但比值太小则钢筋强度的有效利用率太低，所以要选择适当的屈强比。

(2) 良好的塑性 在混凝土结构中，如果钢筋的塑性不好就容易发生脆性破坏。结构破坏前变形很小，而且非常突然。因此，要求钢筋断裂前要有足够的塑性变形，这样，才能使结构在破坏之前有明显预兆，保证结构安全。另外，施工时钢筋要经受各种加工，所以钢筋要保证冷弯试验的要求。屈服强度、抗拉强度、伸长率和冷弯性能是钢筋的强度和变形的四项主要指标。

(3) 焊接性能好 在混凝土结构实际工程中钢筋经常需要接长，要求钢筋具备良好的焊接性能，保证焊接后钢筋不产生裂纹及过大的变形，使焊接接头的性能良好。

(4) 耐火性和耐久性好 在建筑工程常用钢材中，热轧钢筋的耐火性能最好，冷加工钢筋次之，预应力钢筋最差。结构设计时设置的混凝土保护层厚度应满足对构件耐火极限的要求。钢筋锈蚀是影响混凝土结构耐久性的主要因素，因此，通过采取使用防腐蚀钢筋、环氧树脂涂层钢筋和镀锌钢筋等措施，就可以防止钢筋锈蚀，提高混凝土结构设计使用年限。