

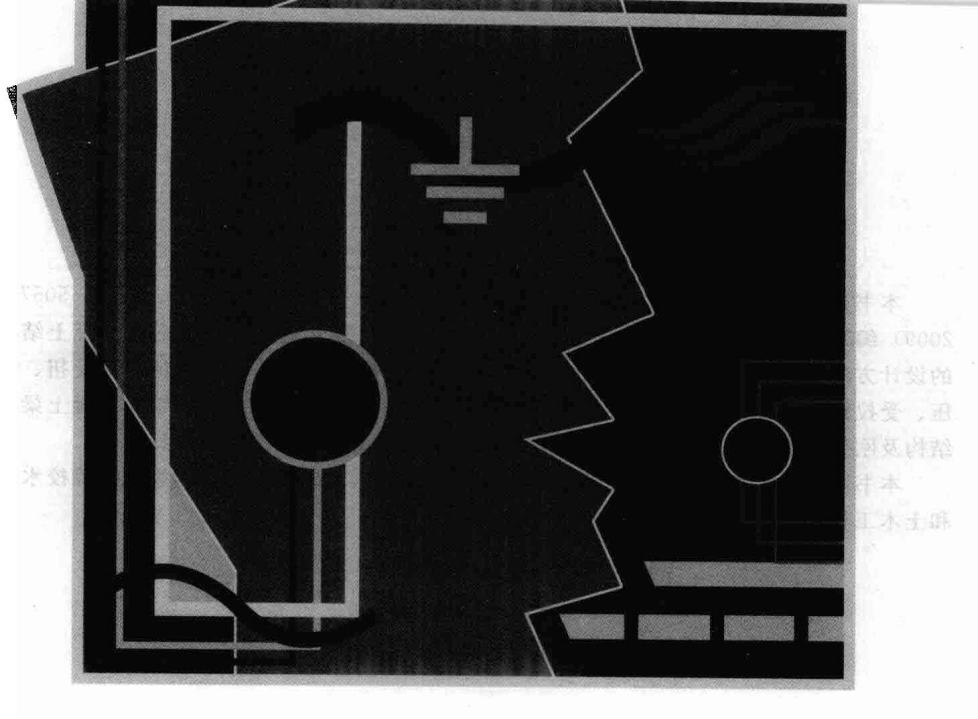


SHUIGONG GANGJIN
HUNNINGTU JIEGOU

水工钢筋混凝土结构



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



水工钢筋混凝土结构



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是按新修订的《水工钢筋混凝土结构设计规范》(SL 191—2008、DL/T 5057—2009)编写的。全书共12章,主要内容包括:钢筋混凝土结构材料;钢筋混凝土结构的设计方法;钢筋混凝土受弯构件正截面和斜截面承载力计算;钢筋混凝土受扭、受压、受拉构件承载力计算;钢筋混凝土构件的裂缝宽度与挠度的计算;钢筋混凝土梁板结构及刚架和柱下基础;预应力混凝土结构;钢筋混凝土结构的抗震设计。

本书可供广大水利和土建工程设计、施工、监理人员使用,也可作为大专院校水利和土木工程专业的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水工钢筋混凝土结构 / 宋玉普, 王清湘, 王立成编
著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010.3
ISBN 978-7-5084-7379-6

I. ①水… II. ①宋… ②王… ③王… III. ①水工结构: 钢筋混凝土结构 IV. ①TV332

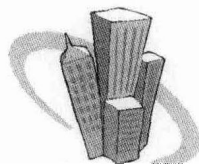
中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第053773号

书 名	水工钢筋混凝土结构
作 者	宋玉普 王清湘 王立成 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 26印张 617千字
版 次	2010年3月第1版 2010年3月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	68.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言



《钢筋混凝土结构》是工程设计、施工、监理人员的重要参考书，它有很强的实用性。但钢筋混凝土结构不像数学、力学那样理论性很强和内容相对稳定，它大部分是半理论半经验性的，具有很多经验系数和构造要求，其内容随规范的变化而改变，所以每次规范的修编后，都要重新编写，本书就是在这一背景下编写的。

我国新修订的《水工混凝土结构设计规范》有两本行业标准。一本为由长江水利委员会长江勘测规划设计研究院主编的水利行业标准，标准编号为SL 191—2008，适用于水利行业的钢筋混凝土结构；另一本为由中国水电顾问集团西北勘测设计研究院主编的电力行业标准，标准编号为DL/T 5057—2009适用于电力行业的钢筋混凝土结构。本书重点依据水利行业的混凝土结构设计规范编写，同时兼顾电力行业的混凝土结构设计规范。两者的主要区别在于SL 191—2008在《水工混凝土结构设计规范》(SL/T 191—1996、DL/T 5057—1996)的基础上，将多系数，如结构系数 γ_d 、结构重要性系数 γ_0 、设计状况系数 ψ ，合并为一个综合系数 K 来表达，并进行了某些简化，但仍为以概率理论为基础的极限状态设计法，而DL/T 5057—2009保留了原《水工混凝土结构设计规范》(SL/T 191—1996、DL/T 5057—1996)的体系，仅局部进行了修编，这是设计者应注意的。

为适应广大水利工程技术人员应用水工钢筋混凝土结构，掌握新修订的《水工混凝土结构设计规范》(SL 191—2008、DL/T 5057—2009)的需要，本书在编写中，以新规范为依据，以试验研究和力学原理为基础，建立基本理论和公式，并对规范的构造规定进行了重点介绍。各主要章节都附有典型例题，以便设计中参考。

本书由大连理工大学宋玉普、王清湘、王立成编著。其中第1章~第3章、第12章由宋玉普编写；第4章、第5章由王清湘编写；第7章、第8章由王清湘和王立成编写；第6章、第9~11章由王立成编写；全书由宋玉普统稿。

由于编者水平有限，书中难免有缺点和不当之处，敬请读者批评指正。

编者

2009年10月于大连理工大学

目录



前言

主要符号

第1章 绪论	1
1.1 钢筋混凝土结构的特点及分类	1
1.2 钢筋混凝土结构的发展简史	3
第2章 钢筋混凝土结构材料	5
2.1 钢筋的品种和力学性能	5
2.2 混凝土的物理力学性能	12
2.3 钢筋与混凝土的黏结	35
第3章 钢筋混凝土结构的设计方法	46
3.1 结构设计方法的发展	46
3.2 极限状态设计法的基本概念	47
3.3 结构上的作用、作用效应和结构抗力	49
3.4 结构按概率极限状态设计的基本概念	59
3.5 极限状态设计的实用表达式	64
第4章 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算	77
4.1 受弯构件的截面形式和构造	77
4.2 受弯构件正截面的试验研究	79
4.3 受弯构件正截面承载力计算的基本假定	82
4.4 单筋矩形截面正截面受弯承载力计算	84
4.5 双筋矩形截面正截面受弯承载力计算	88
4.6 T形截面正截面受弯承载力计算	91
第5章 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算	99
5.1 概述	99
5.2 无腹筋梁的受剪性能	99
5.3 有腹筋梁的受剪性能	103
5.4 影响斜截面抗剪承载力的主要因素	104
5.5 受弯构件斜截面受剪承载力计算	108
5.6 斜截面抗弯的基本概念及保证斜截面受弯承载力的构造措施	119

第 6 章 钢筋混凝土受扭构件承载力计算	126
6.1 概述	126
6.2 钢筋混凝土纯扭构件的力学性能	127
6.3 钢筋混凝土纯扭构件的承载力计算	131
6.4 钢筋混凝土构件在弯剪扭共同作用下的承载力计算	136
第 7 章 钢筋混凝土受压构件承载力计算	150
7.1 概述	150
7.2 受压构件的构造要求	151
7.3 轴心受压构件正截面承载力计算	153
7.4 偏心受压构件正截面承载力计算	160
7.5 偏心受压构件斜截面受剪承载力计算	195
7.6 双向偏心受压构件正截面承载力计算	197
第 8 章 钢筋混凝土受拉构件承载力计算	200
8.1 概述	200
8.2 轴心受拉构件承载力计算	201
8.3 偏心受拉构件正截面承载力计算	201
8.4 偏心受拉构件斜截面受剪承载力计算	206
第 9 章 钢筋混凝土构件的抗裂裂缝宽度与挠度的计算	209
9.1 概述	209
9.2 抗裂验算	211
9.3 裂缝开展宽度的计算	218
9.4 受弯构件的挠度验算	228
第 10 章 钢筋混凝土梁板结构及刚架和柱下基础	234
10.1 概述	234
10.2 钢筋混凝土楼盖结构类型	235
10.3 钢筋混凝土肋梁楼盖的受力体系	237
10.4 整体式单向板肋梁楼盖的结构布置和计算简图	239
10.5 钢筋混凝土连续梁、板的内力计算方法	244
10.6 整体式单向板肋梁结构的截面设计和构造要求	253
10.7 整体式双向板肋梁楼盖	272
10.8 钢筋混凝土刚架结构	287
10.9 钢筋混凝土牛腿设计	290
10.10 钢筋混凝土柱下基础	294
第 11 章 预应力混凝土结构	301
11.1 预应力混凝土的基本概念	301
11.2 施加预应力的方法、预应力混凝土的材料与张拉机具	304

11.3	预应力钢筋张拉控制应力及预应力损失	311
11.4	预应力混凝土轴心受拉构件的应力分析	321
11.5	预应力混凝土受弯构件的应力分析	329
11.6	预应力混凝土受弯构件的承载力计算	334
11.7	预应力混凝土受弯构件的抗裂、裂缝宽度及挠度验算	340
11.8	预应力混凝土受弯构件的施工阶段验算	344
11.9	预应力混凝土构件的一般构造要求	349
第 12 章	钢筋混凝土结构的抗震设计	361
12.1	地震作用和结构抗震设计的一般概念	361
12.2	抗震的概念设计	367
12.3	地震作用效应的计算和结构抗震验算	369
12.4	钢筋混凝土框架结构的抗震设计与延性保证	377
12.5	铰接排架柱的抗震设防	386
12.6	桥跨结构的抗震设防	388
附录	392
参考文献	405

第 1 章 绪 论

1.1 钢筋混凝土结构的特点及分类

1.1.1 钢筋混凝土结构的特点

钢筋混凝土结构的最大特点是能充分利用钢筋抗拉强度高和混凝土抗压强度高的力学性能，从而提高了钢筋混凝土结构的承载力。钢筋和混凝土这两种材料的物理力学性能很不相同，但能结合在一起共同工作，其主要原因是：①由于钢筋和混凝土之间有良好的黏结力，能牢固地黏结成整体，当构件承受外荷载时，钢筋和相邻混凝土能协调变形而共同工作，两者不致产生相对滑动；②钢筋与混凝土的温度线膨胀系数接近相等，钢为 1.2×10^{-5} ，混凝土为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}$ ，除火灾等特殊情况外，当温度变化时，这两种材料不致产生相对的温度变形而破坏它们之间的结合。

钢筋混凝土结构除了上述特点外，还具有下列优点。

(1) 耐久性好。在钢筋混凝土结构中，钢筋因受到混凝土保护而不易锈蚀，且混凝土的强度随时间有所增长，因此钢筋混凝土结构在一般环境下是经久耐用的，不像钢、木结构那样需要经常的保养和维修。

(2) 强度较高。和砖、木结构相比，其强度较高，特别是高强混凝土的应用，在某些情况下可以代替钢结构，因而能节约钢材。

(3) 整体性好。目前广泛采用的现浇整体式钢筋混凝土结构，整体性好，有利于抗震及抗爆。

(4) 可模性好。钢筋混凝土可根据设计需要浇制成各种形状和尺寸的结构，尤其适合建造外形复杂的大体积结构及空间薄壁结构和空心楼板等。这一特点是砖石、木等结构所不能代替的。

(5) 耐火性好。混凝土是不良导热体，遭火灾时，由传热性较差的混凝土作为钢筋的保护层，在普通的火灾下不致使钢筋达到变态点温度而导致结构的整体破坏，因此，其耐火性比钢、木结构好。

(6) 就地取材。钢筋混凝土结构中所用的砂、石材料一般可就地或就近取材，因而材料运输费用少，可以显著降低工程造价。

(7) 节约钢材。钢筋混凝土结构合理地发挥了材料的各自优良性能，在一定范围内可以代替钢结构，从而可节约大量钢材并降低造价。

但是，事物总是一分为二的，钢筋混凝土结构也存在一些缺点。

(1) 自重大，这对于建造大跨度结构及高层抗震结构是不利的。随着轻质、高强混凝土、预应力混凝土和钢-混凝土组合结构的应用，这一矛盾得到缓解。



(2) 施工比较复杂, 工序多, 施工时间较长; 冬季和雨天施工比较困难, 必须采用相应的施工措施才能保证质量。随着泵送混凝土和大模板的应用, 施工时间已大大缩短; 当采用预制装配式构件时, 可加快施工进度, 施工不受季节气候的影响, 从而缓解这一矛盾。

(3) 耗费木料较多。浇筑混凝土要用模板, 木材耗费量较大。随着钢模板的应用, 木材的耗费量已减少。另外采用预制装配式构件也可节约模板。

(4) 抗裂性差。普通钢筋混凝土结构在正常使用时往往带裂缝工作, 这对要求不出现裂缝的结构很不利, 如水池、储油罐等。因为, 裂缝的存在会降低抗渗和抗冻能力, 并会导致钢筋锈蚀, 影响结构的耐久性。采用预应力混凝土结构、高强混凝土结构和纤维混凝土结构可控制裂缝, 从而克服或改善裂缝状况。

(5) 修补和加固工作比较困难。随着碳纤维加固、钢板加固等技术的发展和环氧树脂堵缝剂的应用, 这一困难已减少。

设计者一定要掌握上述特点, 根据工程需要, 选择适宜的钢筋混凝土结构型式。

1.1.2 钢筋混凝土结构的分类

钢筋混凝土结构按不同的分类形式可分为多种。

(1) 按结构的构造外形可分为杆件系统和非杆件系统。杆件系统如梁、板、柱、墙等; 非杆件系统如空间薄壁结构、厚基础和大体积混凝土结构(如闸墩、混凝土坝中的输水洞、泄洪洞)等。

(2) 按结构的受力状态可分为受弯构件、受压构件、受拉构件、受扭构件等。

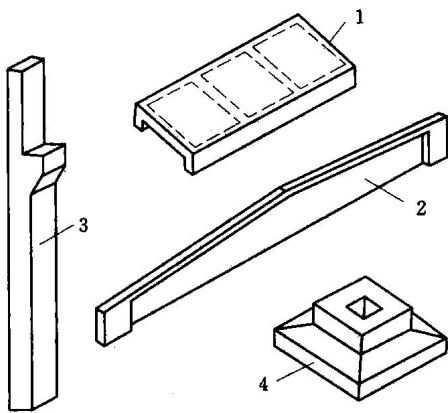


图 1.1 装配式构件

1—屋面板; 2—梁; 3—柱; 4—基础

(3) 按结构的制造方法可分为整体式、装配式以及装配整体式三种。整体式结构是在现场先架立模板、绑扎钢筋, 然后浇筑混凝土而成的结构, 它的整体性好, 刚度也较大, 目前应用较多, 但它受天气的影响, 如冬季施工造价将提高。装配式结构则是在工厂(或预制场)预先制成各种构件(图 1.1), 然后运往工地装配而成。采用装配式结构有利于实现建筑工业化(设计标准化、制造工业化、安装机械化); 制造不受季节限制, 能加速施工进度; 可利用工厂较好的条件, 提高构件质量; 有利于模板重复使用, 还可免去脚手架, 节约木料或钢材。但装配式结构的接头构造较为复杂, 整体性较差, 对抗渗及抗震不利, 装配时还必须有一定的起重

安装设备, 所以目前应用有所减少。装配整体式结构是在结构内有一部分为预制的装配式构件, 另一部分为现浇的混凝土, 预制装配式部分常可作为现浇部分的模板和支架。它比整体式结构有更高的工业化程度, 又比装配式结构有更好的整体性。

(4) 按结构的初始应力状态可分为普通钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构。预应力混凝土结构是在结构承受荷载以前, 预先对混凝土施加压力, 造成人为的压应力状态, 使



产生的压应力可全部或部分地抵消荷载引起的拉应力。预应力混凝土结构按张拉预应力钢筋是在浇筑混凝土以前还是以后而分为先张法和后张法。预应力混凝土结构的主要优点是控制裂缝性能好，能充分利用高强度材料，可以用来建造大跨度的承重结构。但施工较复杂，对于后张法有黏结预应力，当灌浆不密实，易引起钢筋锈蚀，这是应十分注意的。但无黏结预应力和体外预应力不存在这一问题。另外目前正在研究和开发的横向张拉预应力混凝土结构和缓黏结预应力混凝土结构可克服这一缺点^[1]。

1.2 钢筋混凝土结构的发展简史

钢筋混凝土从 19 世纪中叶开始采用以来，至今仅有一百多年的历史，其发展极为迅速。1850 年法国人朗波 (Lambot) 制造了第一只钢筋混凝土小船。1854 年英国人威尔金森 (W. B. Wilkinson) 获得真正的一种钢筋混凝土楼板的专利权。但是通常认为钢筋混凝土是 1861 年法国巴黎花匠蒙列 (Joseph Monier) 发明的。从 1861 年蒙列用水泥制作花盆，内中配置钢筋网以提高其强度，1867 年蒙列获得制作这种花盆的专利权，而后又获得制作其他钢筋混凝土构件——梁、板及管等的专利权。至 19 世纪末、20 世纪初，仅 50 多年时间，由于工业的发展，促使水泥和钢材的质量不断改进，为钢筋混凝土结构应用范围的逐渐扩大创造了条件，如：1872 年，美国的沃德 (W. E. Ward) 在纽约建造了第一所钢筋混凝土房屋；1877 年哈特 (T. Haytt) 发表了各种钢筋混凝土梁的试验结果；1906 年特奈 (C. A. P. Turner) 发明了无梁楼板；在俄罗斯，1886 年就采用了钢筋混凝土结构；1925 年，德国用钢筋混凝土建造了薄壳结构；1928 年法国工程师弗列西涅利用高强钢丝和混凝土制成了预应力混凝土构件，开创了预应力混凝土的应用时代。随着材料强度的不断提高和混凝土性能的改善，钢筋混凝土和预应力混凝土的应用范围也在不断拓宽，并向大跨和高层建筑等领域发展。阿拉伯联合酋长国迪拜于 2010 年建成了世界最高的钢筋混凝土和钢结构混合的哈利法塔（迪拜塔）高度 828m，投资 15 亿美元。德国法兰克福市用预应力轻骨料混凝土建造的飞机库屋盖结构跨度达 90m。加拿大采用了预应力混凝土建造的电视塔，高达 549m。此外，在桥梁、高压容器（如核电站安全壳等）、海上采油平台及地下储油罐等方面，预应力混凝土也得到了广泛应用。

我国早在 5000 年前就采用了类似混凝土硅酸盐水泥和轻骨料的建筑材料建筑地面。1876 年我国开始生产水泥，逐渐有了钢筋混凝土建筑物。目前我国混凝土的年产量据 2002 年统计约为 15 亿 m^3 ，建筑用钢材达 3000 万 t，用于水利、工业与民用建筑、交通等行业。我国大陆地区最高的钢筋混凝土高层建筑是上海金茂大厦，88 层，高 382m。采用预应力混凝土结构的上海电视塔，高度为 415m，被称为亚洲第一塔。外形美观的上海杨浦大桥，是我国已建成的最大的预应力混凝土组合斜拉桥，全长 3430m，主跨度为 602m。

提高材料强度，是发展钢筋混凝土结构的重要途径。我国建筑工程上用的钢筋平均强度等级和混凝土平均强度等级，就全国而言，均低于欧、美发达国家。我国建筑结构安全度总体上比国际低，但材料用量并没有相应降低，其原因在于国际上较高的安全度是建立在较高强度材料的基础上，而我国较低的安全度是建立在较低的强度材料的基础上。为



此,我国在工业和民用建筑等工程中已逐渐将混凝土强度等级提高到 C80;对普通钢筋混凝土结构优先推广 HRB400 级钢筋和 HRB500 级钢筋,对预应力混凝土结构优先推广高强钢丝和钢绞线。

在材料研究方面,今后应主要向高强、高流动性、自密实、轻质、耐久及具备特异性性能方向的混凝土发展。目前强度为 $100\sim 200\text{N/mm}^2$ 的高强混凝土已在工程上应用。各种轻质混凝土、绿色混凝土、纤维混凝土、聚合物混凝土、耐腐蚀混凝土、微膨胀混凝土、水下不分散混凝土以及品种繁多的外加剂在工程中的应用和发展,已使大跨度结构、高层建筑、高耸结构和具备某种特殊性能的钢筋混凝土结构的建造成为现实。近年来,轻骨料混凝土其自重仅为 $14\sim 18\text{kN/m}^3$,强度可达 50kN/m^2 。用轻骨料混凝土建造的房屋比普通混凝土建造的自重减轻约 $20\%\sim 30\%$,同时也降低了基础工程的费用,具有显著的经济效益。另外,美国专家预计,到 21 世纪末,应用纤维混凝土可将混凝土的抗拉与抗压强度比由目前的约 $1/10$ 提高到 $1/2$,并具有早强、体积稳定(收缩、徐变小)等特点,使混凝土的性能得到极大地改善。

在计算理论方面,钢筋混凝土结构经历了把材料作为弹性体的容许应力设计方法,到考虑材料塑性的破损阶段设计方法,后来又提出了极限状态设计方法,并迅速发展成以概率理论为基础的极限状态设计方法,它以可靠指标度量结构构件的可靠度,采用分项系数的设计表达式进行设计。使极限状态计算体系向更完善、更科学的方向发展。新的水利行业标准《水工混凝土结构设计规范》(SL 191—2008)^[2]在结构构件的安全度表达上,在考虑荷载与材料强度的不同变异性的基础上,将多系数合并为一个系数 K 的表达方式,使公式更为简单。工程结构可靠度、混凝土的损伤和断裂、混凝土的强度理论、混凝土非线性有限元和极限分析的计算理论等方面也有很大进展。计算机、有限元方法和现代的测试技术的应用,使得钢筋混凝土结构的计算理论和设计方法正在向更高的阶段发展。

在结构和施工方面,随着预拌混凝土(或称商品混凝土)、泵送混凝土及滑模施工新技术的应用,现浇整体式结构已显示出在保证混凝土质量、节约原材料和能源、实现文明施工等方面的优越性,所以我国目前工业与民用建筑中广泛采用现浇整体式结构。在水工钢筋混凝土结构中也因整体性要求而采用现浇混凝土施工,尤其是大型水利工程的工地建有拌和楼(站)集中搅拌混凝土,并可将混凝土运至浇筑地点,这给机械化现浇混凝土带来很大方便。采用预先在模板内填实粗骨料,再将水泥浆用压力灌入粗骨料空隙中形成的压浆混凝土,以及用于大体积混凝土结构(如水工大坝、大型基础)、公路路面与厂房地面的碾压混凝土,它们的浇筑过程都采用机械化施工,浇筑工期可大为缩短,并能节约大量材料,从而获得经济效益。值得注意的是,近年来由钢与混凝土组成的组合结构、外包钢混凝土结构及钢管混凝土结构等这些杂交结构已在工程中逐步推广应用。这些杂交结构具有充分利用材料强度、较好的适应变形能力(延性)、施工较简单等特点。在预应力混凝土结构中,近年来,采用横向张拉技术,既不需要锚具,也不需要灌浆,是一种值得推广的施工方法。另外,缓黏结预应力的应用也是今后的发展方向,因为后张法预应力混凝土结构灌浆不密实问题很难克服,而缓黏结预应力混凝土不需要后续灌浆,可保证质量。日本 2001 年生产缓黏结大直径钢绞线 5000t,主要用于桥梁横向预应力束,并已开始用于桥梁的纵向预应力束。

第 2 章 钢筋混凝土结构材料

钢筋混凝土结构是由钢筋和混凝土两种性能不同的材料组成，所以是非均质的弹塑性材料，这一点与材料力学中所学的均质弹性材料不同。钢筋混凝土结构构件的强度和变形性能，主要取决于材料的强度和变形性能，因此，正确了解钢筋和混凝土材料的物理力学性能及其相互作用是掌握钢筋混凝土构件受力性能、计算理论及设计方法的前提和基础。

2.1 钢筋的品种和力学性能

2.1.1 钢筋的品种和级别

我国建筑工程中所用的钢筋有热轧钢筋、热处理钢筋、冷拉钢筋、冷轧带肋钢筋四种。由于冷加工钢筋的流幅较未冷加工钢筋的流幅缩短，伸长率降低，材性变脆，延性较差，对结构的抗震不利；另外我国近年来高性能钢筋（包括钢绞线、钢丝）已经可以充分供应，并可生产细直径的变形钢筋，所以不推荐使用冷加工钢筋，本章也不介绍这类钢筋。热轧钢筋是将钢材在高温状态下轧制而成，根据其标准屈服强度的高低和品种的不同，分为 HPB235、HRB335、HRB400、RRB400 四个级别，其中 H、P、B 分别代表热轧（Hot rolled）、光圆（Plain）、钢筋（Bar）；后三个级别钢筋中的第二个字母 R 代表带肋（Ribbed），而第四个级别钢筋中的第一个字母 R 代表余热处理（Remained heat treatment）。目前 HRB500 钢筋也即将列入工民建规范，还有 HRBF335、HRBF400、HRBF500 钢筋（其中 F 表示细晶粒），HPB300 钢筋。

热处理钢筋是将热轧的钢筋或钢棒再通过淬火和回火的调质热处理，能显著提高其强度。

钢丝一般有碳素钢丝、刻痕钢丝、螺旋肋钢丝及钢绞线等几种。

上述钢筋和钢丝按化学成分的不同，分为碳素钢和普通低合金钢两大类。其中，HPB235 级热轧钢筋和钢丝属于碳素钢；HRB335、HRB400、RRB400 级热轧钢筋及热处理钢筋属于普通低合金钢。

碳素钢的机械性能与含碳量多少有关。含碳量增加，能使钢材强度提高，性质变硬，但也将使钢材的塑性和韧性降低，焊接性能也会变差。碳素钢按其碳的含量分为低碳钢（含碳量小于 0.25%），中碳钢（含碳量为 0.25%~0.60%）和高碳钢（含碳量为 0.60%~1.4%）。用做钢筋的碳素钢主要是低碳钢和中碳钢。

如果炼钢时在碳素钢的基础上加入少量（一般不超过 3.5%）合金元素锰、硅、钒、钛等就成为普通低合金钢，这些合金元素可使钢材的强度、塑性等综合性能提高。磷、硫则是有害杂质，其含量超过约 0.045% 后会使钢材变脆，塑性显著降低，不利于焊接。普

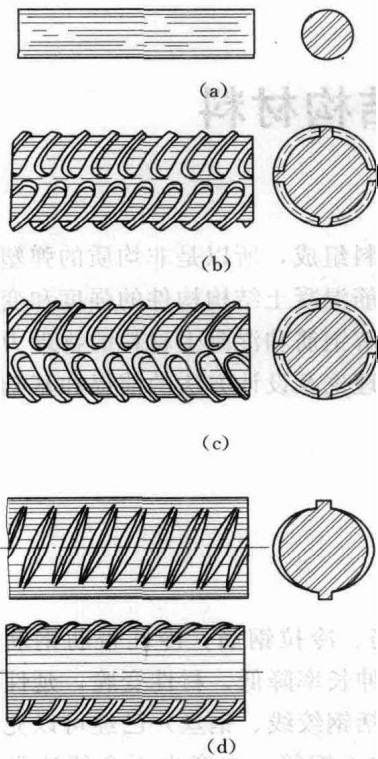


图 2.1 钢筋表面及截面形状

通低合金钢钢筋具有强度高、塑性及可焊性好的特点，因而应用较为广泛。

钢筋按其外形分为光面钢筋和变形钢筋两类。光面钢筋的表面是光圆的，如图 2.1 (a) 所示。常用的热轧变形钢筋是热轧带肋钢筋，其外表有两条纵向凸缘（纵肋），热处理钢筋也有无纵肋的。在纵向凸缘两侧有许多等距离和等高度的斜向凸缘（斜肋），凸缘斜向相同的表面形成螺旋纹，如图 2.1 (b) 所示，凸缘斜向不同的表面形成人字纹，如图 2.1 (c) 所示，螺旋纹和人字纹钢筋以往习惯统称为螺纹钢，《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》(GB 1499—1998) 中称为等高肋钢筋^[1]。斜向凸缘和纵向凸缘不相交，剖面几何形状呈月牙形的钢筋，过去称为月牙纹钢筋，如图 2.1 (d) 所示，GB 1499 中称为月牙肋钢筋，该类钢筋印有厂名和钢筋级别的标记。月牙肋钢筋与同样公称直径的等高肋钢筋相比，强度稍有提高，凸缘处应力集中也得到改善，它与混凝土之间的黏结强度虽略低于等高肋钢筋，但仍具有良好的黏结性能。

1. 热轧钢筋

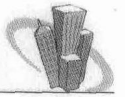
建筑用钢筋要求具有一定的强度（屈服强度和抗拉强度）、足够的塑性（伸长率和冷弯性能）以及良好的焊接性能。下面分别介绍各种钢筋的特性：

(1) HPB235 级钢筋。目前生产的 HPB235 级钢筋钢牌号主要是 Q235。HPB235 级钢筋是由普通碳素 3 号钢经热轧而成的光圆钢筋，直径为 8~20mm。盘条的直径为 5.5~14mm。它是一种低碳钢，质量稳定，塑性及焊接性能很好，但强度稍低，而且与混凝土黏结稍差。因此，HPB235 级钢筋主要用于厚度不大的板中及中小型钢筋混凝土结构构件中的受力钢筋以及各种构件的箍筋和构造钢筋。

(2) HRB335 级钢筋。目前生产的 HRB335 级钢筋钢牌号主要为 20MnSi。HRB335 级钢筋是热轧带肋的低合金钢筋，直径为 6~50mm，其强度、塑性及可焊性都很好，由于强度比较高，为增加钢筋与混凝土之间的黏结力，保证两者能共同工作，钢筋表面轧制成月牙肋或等高肋。HRB335 级钢筋在工程中应用十分广泛。

(3) HRB400 级钢筋。HRB400 级钢筋钢牌号为 20MnSiV、20MnSiNb、20MnTi 三种，这是我国优先推广使用的新品种钢筋，它们是加入微量合金元素（钒 V、铌 Nb、钛 Ti）热轧而成的。HRB400 级钢筋是热轧月牙肋钢筋，直径为 6~50mm，它的塑性及可焊性较好，强度高，在达到屈服强度时的裂缝宽度可控制在允许的限值。

(4) RRB400 级钢筋。目前生产的 RRB400 级钢筋钢牌号为 K20MnSi 和 25MnSi 两种。K20MnSi 是在 25MnSi 基础上经穿水热处理而成的，即热轧后立即穿水，进行表面控制冷却，然后利用芯部余热自身完成回火处理所得的成品钢筋，称为余热处理钢筋；



RRB400 级钢筋是热轧月牙肋钢筋，直径为 8~40mm，它的塑性及可焊性也比较好，但强度高，如果用于普通钢筋混凝土构件中，又要它发挥其强度，则会使混凝土裂缝开展得较宽。因此，RRB400 级钢筋常经过冷拉后用作预应力钢筋。

2. 热处理钢筋

热处理钢筋是强度最高的等高肋钢筋，主要钢牌号有 40Si2Mn ($d=6\text{mm}$)，48Si2Mn ($d=8.2\text{mm}$) 和 45Si2Cr ($d=10\text{mm}$)，热处理钢筋还有预应力混凝土用钢棒。热处理钢筋是经过淬火和回火等调质热处理后制成的。钢筋的淬火是指钢筋经高温后突然冷却的过程；钢筋的回火是指钢筋经高温后逐渐冷却的过程。钢筋经淬火后强度大幅度提高，但塑性和韧性相应降低，通过高温回火可以在不降低强度的前提下改善淬火所形成的不稳定组织，消除淬火产生的内应力，使塑性和抗冲击韧性得到改善。热处理钢筋因其强度已很高，不必再进行冷拉，可直接用作预应力钢筋，因此是最常用的预应力钢筋之一。腐蚀可导致热处理钢筋在高应力状态下产生裂隙以致脆断，因此，要注意对这种钢筋的保管和使用。

3. 钢丝

包括碳素钢丝、刻痕钢丝、钢绞线。钢丝的直径为 4~12mm，钢丝的直径越细，其强度越高。钢丝一般都用作预应力钢筋。

2.1.2 钢筋的力学性能

上节所述各种钢筋，由于化学成分及制造工艺的不同，机械性能有显著差别，按力学性能来分，则有两种类型：①热轧 HPB235、HRB335、HRB400 和 RRB400 级钢筋，钢的力学性质相对较软，常称之为软钢；②热处理钢筋及高强钢丝，其力学性质高强而硬，常称为硬钢。

1. 软钢的力学性能

软钢从开始加载到拉断，有四个阶段，即弹性阶段、屈服阶段、强化阶段与破坏阶段。下面以 HPB235 级钢筋的受拉应力—应变曲线为例来说明软钢的力学性能，如图 2.2 所示。

自开始加载至应力达到 a 点以前，应力与应变呈线性关系， a 点称为比例极限，这时卸载后应变能按线性完全恢复， oa 段属于线弹性工作阶段。当应力超过 a 点后，应力与应变呈曲线关系，但在 b 点前卸荷后应变能够完全恢复，所以 b 点被称为弹性极限， ab 段属于非线性弹性工作阶段。由于比例极限和弹性极限在数值上相差不大，且不稳定，所以有时也将两者混同起来统称为弹性极限。通常在工程实用中并不需要测定这两个极限应力。当应力超过 b 点后，进入屈服阶段，应力 σ 有幅度不大的波动，其最高点 c 的应力称为屈服上限，而最低点 d 的应力则称为屈服下限。试验结果指出，很多因素对屈服上限的数值有影响，而屈服下限

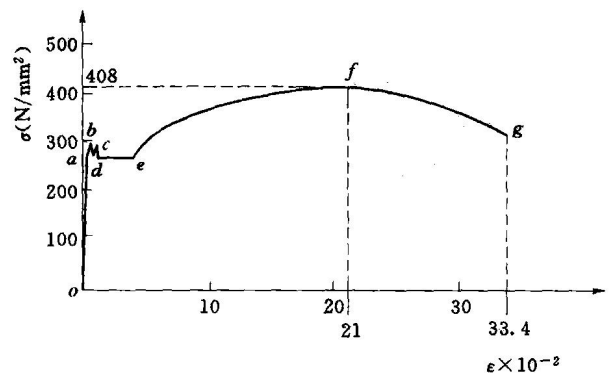


图 2.2 有明显屈服点的钢筋的应力—应变曲线

试验结果指出，很多因素对屈服上限的数值有影响，而屈服下限



则较为稳定，并且 a 点与 d 点比较接近。因此通常即将 d 点所对应的应力称为屈服强度， d 点称为屈服点。应力达到屈服点以后，钢筋将产生很大的塑性变形，水平段 de 称为屈服台阶或流幅。超过 e 点以后，钢筋应力—应变曲线重新表现为上升的曲线。曲线上升到最高点 f ，钢筋的应力达到了极限强度， ef 段称为强化阶段， f 点的应力称为抗拉强度。钢筋的应力达到极限抗拉强度以后，钢筋产生颈缩现象，应力—应变曲线开始下降，即应力降低，应变仍继续增长，直到 g 点，钢筋在某个较薄弱的部位被拉断。 fg 段通常称为下降段。

在结构构件的计算过程中，通常取钢筋的屈服强度作为钢筋强度计算的基本指标。这是因为结构构件某一截面钢筋的应力达到屈服强度以后，将在荷载基本不增加的情况下产生持续的塑性变形，构件可能在钢筋尚未进入强化段之前就已产生过大的变形与裂缝，结构不能正常使用或破坏，故取钢筋的屈服点作为构件破坏时的强度计算指标，而钢筋的强化阶段只作为一种安全储备考虑。此外，钢筋的屈服强度与极限强度的比值称为屈服比。这个指标反映出结构可靠性能潜力的大小和延性的大小，屈服比越小，表明结构的可靠性储备越大，延性越好，对抗震越有利。

伸长率是以在标距范围内钢筋试件拉断后的残余变形与原标距之比，以 $\delta(\%)$ 来表示

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (2.1)$$

式中 l_0 ——试件拉伸前的标距，常采用：短试件 $l_0 = 5d$ ，长试件 $l_0 = 10d$ ；

d ——钢筋的直径；

l ——试件拉断以后重新合并起来量测的标距。

钢筋的伸长率标志钢筋的塑性，伸长率越大，塑性性能越好。钢筋塑性除用伸长率标志外，还用冷弯试验来校验。冷弯就是在常温下将钢筋绕规定的直径为 D 的钢辊弯曲 α 角度而不出现裂纹、鳞落或断裂现象（图 2.3），即认为钢筋的冷弯性能符合要求。常用比值 α/D 来反映冷弯性能。 D 值越小， α 越大则钢筋的冷弯性能越好，说明钢筋的塑性越好。

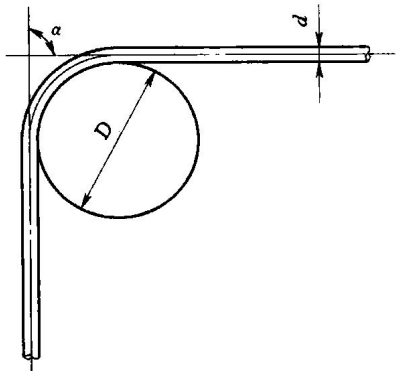


图 2.3 钢筋的冷弯

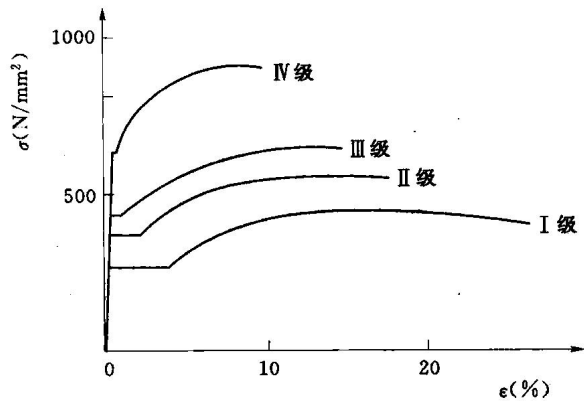


图 2.4 不同级别钢筋的应力—应变曲线



钢材中含碳量越高，屈服强度和抗拉强度就越高，伸长率就越小，流幅也相应缩短。图 2.4 表示了不同级别的软钢的应力—应变曲线的差异。

2. 硬钢的力学性能

硬钢强度高，但伸长率小，塑性差，脆性大。从加载到拉断，不像软钢那样有明显的屈服（流幅）阶段。图 2.5 为硬钢的应力—应变曲线。

硬钢没有明确的屈服台阶（流幅），所以计算中以“协定流限”（条件屈服点）作为强度标准，所谓协定流限（条件屈服点）是指经过加载及卸载后，相对应于残余应变为 0.2% 的应力，用 $\sigma_{0.2}$ 表示。 $\sigma_{0.2}$ 一般相当于抗拉极限强度的 70% ~ 85%。由于协定流限（条件屈服点）不容易测定，因此这类钢筋通常以极限强度 σ_b 作为主要强度指标，再由 $\sigma_{0.2} = 0.8\sigma_b$ 换算成协定流限（条件屈服强度）。《混凝土结构设计规范》（GB 50010—2002）将 $\sigma_{0.2} = 0.8\sigma_b$ 改为 $\sigma_{0.2} = 0.85\sigma_b$ ，以与钢筋的国家标准相一致。

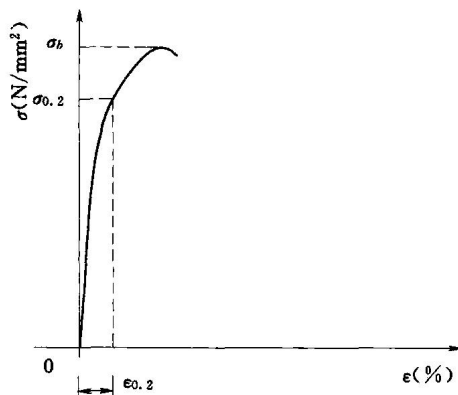


图 2.5 硬钢的应力—应变曲线

硬钢塑性差，伸长率小。因此，用硬钢配筋的钢筋混凝土构件，受拉破坏时往往突然断裂，不像软钢配筋的构件那样，在破坏前有明显的预兆。

钢筋的强度标准值应具有不小于 95% 的保证率。

普通钢筋的强度标准值系根据屈服强度确定，用 f_{yk} 表示；预应力钢绞线、钢丝、钢棒及螺纹钢筋的强度标准值系根据极限抗拉强度确定，用 f_{pk} 表示。

普通钢筋的强度标准值 f_{yk} 应按表 2.1 采用；预应力钢筋的强度标准值 f_{pk} 应按表 2.2 采用。由于原《预应力混凝土用热处理钢筋》（GB 4463—84）已由《预应力混凝土用钢棒》（GB/T 5233.3—2005）所取代，所以表 2.2 中未再列入热处理钢筋。

表 2.1 普通钢筋强度标准值

种 类		符 号	d (mm)	f_{yk} (N/mm ²)
热轧钢筋	HPB235 (Q235)	Φ	8~20	235
	HRB335 (20MnSi)	Φ	6~50	335
	HRB400 (20MnSiV, 20MnSiNb, 20MnTi)	Φ	6~50	400
	RRB400 (K20MnSi)	Φ ^R	8~40	400
	* HRB500	Φ	6~50	500

- 注 1. 热轧钢筋直径 d 指公称直径，即由计算求得的直径。
 2. 当采用直径大于 40mm 的钢筋时，应有可靠的工程经验。
 3. * 表示仅 DL/T 5057—2009 有此项。

普通钢筋的抗拉强度设计值 f_y 及抗压强度设计值 f'_y 应按表 2.3 采用；预应力钢筋的抗拉强度设计值 f_{py} 及抗压强度设计值 f'_{py} 应按表 2.4 采用。

当构件中配有不同种类的钢筋时，每种钢筋应采用各自的强度设计值。



表 2.2 预应力钢筋强度标准值

种 类		符 号	公称直径 d (mm)	f_{pk} (N/mm ²)
钢绞线	1×2	Φ ^S	5、5.8	1570、1720、1860、1960
			8、10	1470、1570、1720、1860、1960
			12	1470、1570、1720、1860
	1×3		6.2、6.5	1570、1720、1860、1960
			8.6	1470、1570、1720、1860、1960
			8.74	1570、1670、1860
	1×3 I		10.8、12.9	1470、1570、1720、1860、1960
			8.74	1570、1670、1860
			9.5、11.1、12.7	1720、1860、1960
	1×7		15.2	1470、1570、1670、1720、1860、1960
			15.7	1770、1860
			17.8	1720、1860
	(1×7) C		12.7	1860
15.2		1820		
18.0		1720		
消除 应力钢丝	光圆 螺旋肋	Φ ^P Φ ^H	4、4.8、5	1470、1570、1670、1770、1860
			6、6.25、7	1470、1570、1670、1770
			8、9	1470、1570
			10、12	1470
	刻痕	Φ ^I	≤5	1470、1570、1670、1770、1860
			>5	1470、1570、1670、1770
钢棒	螺旋槽	Φ ^{HG}	7.1、9、10.7、12.6	1080、1230、1420、1570
	螺旋肋	Φ ^{HR}	6、7、8、10、12、14	
螺纹 钢筋	PSB785	Φ ^{PS}	18、25、32、40、50	980
	PSB830			1030
	PSB930			1080
	PSB1080			1230

注 1. 钢绞线直径 d 指钢绞线外接圆直径, 即《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224—2003) 中的公称直径 D_n ; 钢丝、钢棒及螺纹钢筋的直径 d 均指公称直径。
 2. 1×3 I 为 3 根刻痕钢丝捻制的钢绞线; (1×7) C 为 7 根钢丝捻制又经模拔的钢绞线。
 3. 根据国家标准, 同一规格的钢丝 (钢绞线、钢棒) 有不同的强度级别, 因此表中对同一规格的钢丝 (钢绞线、钢棒) 列出了相应的 f_{pk} 值, 在设计中可自行选用。

表 2.3 普通钢筋强度设计值 单位: N/mm²

种 类		符 号	f_y	f'_y
热轧钢筋	HPB235 (Q235)	Φ	210	210
	HRB335 (20MnSi)	Φ	300	300
	HRB400 (20MnSiV、20MnSiNb、20MnTi)	Φ	360	360
	RRB400 (K20MnSi)	Φ ^R	360	360
	* HRB500	Φ	纵筋 420 箍筋 360	400

注 1. 在钢筋混凝土结构中, 轴心受拉和小偏心受拉构件的钢筋抗拉强度设计值大于 300N/mm² 时, 仍应按 300N/mm² 取用。
 2. * 表示仅 DL/T 5057—2009 有此项。