



高职高专“十一五”精品规划教材

水工钢筋混凝土结构

主 编 李萃青 阎超君 赵建东



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



高职高专“十一五”精品规划教材

水工钢筋混凝土结构

主 编 李萃青 阎超君 赵建东

副主编 卓美燕 鄢玉英



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要介绍水工钢筋混凝土结构的有关知识, 内容包括钢筋混凝土结构材料性能、设计原理和方法、基本构件的设计计算、基本结构的设计和构造等。

本书适用于高职、高专和职工大学的水利水电类专业课程教学, 也可作为水利水电工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

水工钢筋混凝土结构 / 李萃青, 阎超君, 赵建东主编.

北京: 中国水利水电出版社, 2007

高职高专“十一五”精品规划教材

ISBN 978-7-5084-4426-0

I. 水… II. ①李…②阎…③赵… III. 水工结构: 钢筋混凝土结构—高等学校: 技术学校—教材 IV. TV332

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 024292 号

书 名	高职高专“十一五”精品规划教材 水工钢筋混凝土结构
作 者	主编 李萃青 阎超君 赵建东
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) 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	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 14.5 印张 344 千字
版 次	2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷
印 数	0001—4100 册
定 价	22.00 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

序

2005年《国务院关于大力发展职业教育的决定》中提出进一步深化职业教育教学改革,根据市场和社会需要,不断更新教学内容,改进教学方法,大力推进精品专业、精品课程和教材建设。教育部也在《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》([2006]16号)中明确指出,课程建设与改革是提高教学质量的核心,也是教学改革的重点和难点,而教材建设又是课程建设的一个重要内容。教材是体现教学内容和教学方法的载体,是进行教学的基本工具,是学科建设与课程建设成果的凝结与体现,也是深化教育教学改革、保障和提高教学质量的重要基础。

编写高职教材,要明确高职教材的特征,如同高职教育的定位一样,高职教材应既具有高教教材的基本特征,又具有职业技术教育教材的鲜明特色。因此,应具有符合高等教育要求的理论水平,重视教材内容的科学性,既要符合人的认识规律和教学规律,又要有利于学生的学习,使学生在阅读时容易理解,容易吸收。做到理论知识的准确定位,既要根据“必需、够用”的原则,又要根据生源的实际情况,以学生为主体确定理论深度;在教材的编写中加强实践性教学环节,融入足够的实训内容,保证对学生实践能力的培养,体现高等技术应用性人才的培养要求。编写教材要强调知识新颖原则,教材编写应跟随时代新技术的发展,将新工艺、新方法、新规范、新标准编入教材,使学生毕业后具备直接从事生产第一线技术工作和管理工作的能力。编写时不能孤立地对某一门课程进行思考,而要从高职教育的特点去考虑,从实现高职人才培养目标着眼,从人才所需知识、能力、素质出发。在充分研讨的基础上,把培养职业能力作为主线,并贯穿始终。

《高职高专“十一五”精品规划教材》是为适应高职高专教育改革与发展的需要,以培养技术应用性的高技能人才为系列的教材。为了确保教材的编写质量,参与编写人员都是经过院校推荐、编委会答辩并聘任的,有着丰富的教学和实践经验,其中主编都有编写教材的经历。教材较好地贯彻了新的法规、规程、规范精神,反映了当前新技术、新材料、新工艺、新方法和相应的岗位资格特点,体现了培养学生的技术应用能力和推进素质教育的要求,注重内容的科学性、先进性、实用性和针对性,力求深入

浅出、循序渐进、强化应用，具有创新特色。

这套《高职高专“十一五”精品规划教材》的出版，是对高职高专教材建设的一次有益探讨，因为时间仓促，教材可能存在一些不妥之处，敬请读者批评指正。

《高职高专“十一五”精品规划教材》编委会

2006年11月

前

言

本书是水利水电类高职、高专“水工钢筋混凝土结构”课程的教材。根据《水工钢筋混凝土结构设计规范》(SL/T191—96)编写。内容包括钢筋混凝土结构材料性能、设计原理和方法、基本构件的设计计算、基本结构的设计和构造等。每章均有教学要求、学习指导和一定数量的例题、思考题及习题。书中还附有钢筋混凝土结构设计所需的常用图表。

在编写过程中,充分体现高等职业教育的特色,力求概念清晰,深入浅出,密切联系水利工程实际,以基本知识的应用为主,理论上以适当、够用为度,不苛求知识的系统性和完整性,用大量的实例帮助学生理解和运用基本知识。

参加本书编写的有:山东水利职业学院李萃青、赵建东(绪论、第3章、第8章);安徽水利水电职业技术学院阎超君(第1章、第2章、第9章);南昌工程学院鄢玉英(第5章、第6章、第7章);福建水利电力职业技术学院卓美燕(第4章、第10章)。全书由李萃青、阎超君、赵建东主编,鄢玉英、卓美燕任副主编。

本书在编写过程中,参考并引用了有关文献、资料的部分内容。在此,谨向所有文献的作者表示感谢。

对书中存在的缺点和疏漏,恳请广大读者批评指正。

编 者

2006年11月

目 录

序

前 言

绪 论	1
0.1 钢筋混凝土的特点	1
0.2 钢筋混凝土结构的发展简况	2
0.3 本课程的性质及学习方法	3
第 1 章 钢筋混凝土结构的材料	5
1.1 钢筋	5
1.2 混凝土	9
1.3 钢筋与混凝土的粘结	14
学习指导	17
思考题	18
第 2 章 钢筋混凝土结构设计计算基本原则	19
2.1 结构的功能和极限状态	19
2.2 结构上的作用和结构的抗力	21
2.3 水工混凝土结构设计极限状态实用设计表达式	22
学习指导	27
思考题	28
习题	28
第 3 章 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算	29
3.1 受弯构件正截面的一般构造规定	29
3.2 受弯构件的正截面破坏形态	31
3.3 单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	33
3.4 双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	40
3.5 T形截面受弯构件正截面承载力计算	43
学习指导	50
思考题	50
习题	51

第 4 章 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算	54
4.1 斜截面的破坏形态	55
4.2 有腹筋梁斜截面受剪承载力计算	57
4.3 钢筋混凝土梁的斜截面受弯承载力	66
4.4 钢筋骨架的构造规定	69
4.5 钢筋混凝土构件施工图	72
4.6 钢筋混凝土外伸梁设计实例	74
学习指导	79
思考题	80
习题	81
第 5 章 钢筋混凝土受压构件承载力计算	83
5.1 受压构件的构造要求	83
5.2 轴心受压构件正截面承载力计算	86
5.3 偏心受压构件正截面承载力计算	90
5.4 配置对称钢筋的偏心受压构件承载力计算	102
5.5 偏心受压构件斜截面受剪承载力计算	105
学习指导	106
思考题	107
习题	107
第 6 章 钢筋混凝土受拉构件承载力计算	109
6.1 大小偏心受拉的界限	109
6.2 小偏心受拉构件的计算	110
6.3 大偏心受拉构件的计算	113
6.4 偏心受拉构件斜截面受剪承载力计算	117
学习指导	117
思考题	118
习题	118
第 7 章 钢筋混凝土受扭构件承载力计算	119
7.1 受扭构件的破坏形态和配筋形式	119
7.2 钢筋混凝土纯扭构件承载力的计算	123
7.3 矩形截面弯、剪、扭构件的承载力计算	127
学习指导	135
思考题	136
习题	136
第 8 章 钢筋混凝土构件正常使用极限状态验算	137
8.1 概述	137
8.2 抗裂验算	138

8.3	裂缝宽度验算	143
8.4	变形验算	148
	学习指导	152
	思考题	153
	习题	153
第9章	钢筋混凝土梁板结构及刚架结构	155
9.1	概述	155
9.2	整体式单向板梁板结构	156
9.3	整体式双向板梁板结构	179
9.4	刚架结构	187
9.5	钢筋混凝土牛腿设计	191
	学习指导	193
	思考题	194
	习题	194
第10章	预应力混凝土结构简介	196
10.1	预应力混凝土的基本概念	196
10.2	施加预应力的方法	197
10.3	预应力混凝土的材料与张拉机具	198
10.4	预应力钢筋张拉控制应力及预应力损失	199
	学习指导	202
	思考题	202
附录		203
附录一	材料强度的标准值、设计值及材料的弹性模量	203
附录二	钢筋、钢绞线的计算面积及公称质量	206
附录三	一般构造规定	208
附录四	构件抗裂、裂缝宽度、挠度验算中的有关限值及系数表	209
附录五	均布荷载和集中荷载作用下等跨连续梁的内力系数表	211
附录六	按弹性理论计算均布荷载作用下矩形双向板的弯矩系数表	218
附录七	各种荷载化成具有相同支座弯矩的等效均布荷载表	221
参考文献		222

绪 论

教学要求：了解本课程的性质和学习方法，了解钢筋混凝土结构在工程中的应用，掌握钢筋混凝土结构的特点。

0.1 钢筋混凝土的特点

钢筋混凝土结构是由钢筋和混凝土两种材料组成的共同受力的结构。

混凝土具有较高的抗压性能，但抗拉性能很弱；而钢筋具有较高的抗拉性能。为了充分利用两种材料的性能，把混凝土和钢筋结合在一起，使混凝土主要承受压力，钢筋主要承受拉力，以满足工程结构的需要。

例如，一根截面尺寸为 $200\text{mm} \times 300\text{mm}$ 、跨度为 2.5m 、混凝土立方体强度为 22.5N/mm^2 的素混凝土简支梁，跨中承受 13.5kN 的集中力，就会因混凝土受拉而断裂，如图 0-1 (a) 所示。但如果在这根梁的受拉区配置两根直径 20mm 的 II 级钢筋，用钢筋来代替混凝土承受拉力，则梁能够承受的集中力可以增加至 72.3kN 。由此说明钢筋混凝土梁比素混凝土梁的承载能力提高很多。

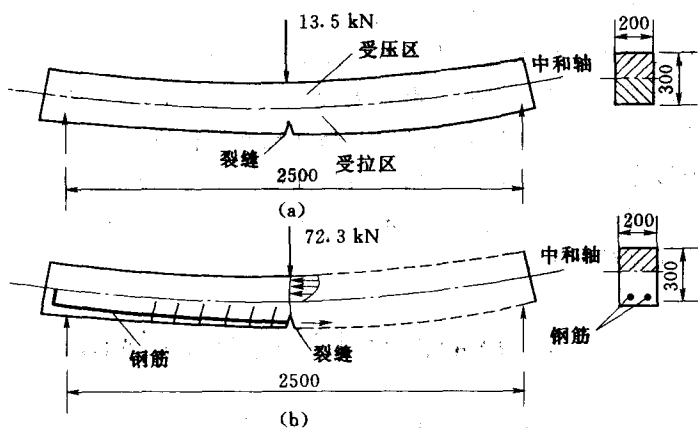


图 0-1 混凝土及钢筋混凝土简支梁的承载力 (尺寸单位: mm)

钢筋和混凝土这两种不同性能的材料能有效地结合在一起共同工作，主要有三种原因：

(1) 钢筋和混凝土之间存在有粘结力，使两种材料结合成整体，在荷载作用下，两者协调变形，共同受力。

(2) 钢筋和混凝土两种材料的温度线膨胀系数非常接近，当温度变化时，两者不会因变形而破坏他们的整体性。



(3) 钢筋处于混凝土内部, 混凝土妥善保护了钢筋, 使钢筋不易发生锈蚀。

钢筋混凝土结构除了能充分利用钢筋和混凝土两种材料的受力性能外, 尚具有许多优点:

(1) 强度高。钢筋混凝土的强度高, 适用于各种承重构件。

(2) 抗震性好。现浇的整体式钢筋混凝土结构具有较好的整体刚度, 有利于抗震和防爆。

(3) 可模性好。可根据使用需要浇筑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及空间薄壁结构。

(4) 耐久性好。混凝土耐自然侵蚀能力较强, 钢筋因混凝土的保护而不易锈蚀, 坚固耐用。

(5) 耐火性好。由传热差的混凝土作为钢筋的保护层, 在普通火灾情况下不致使钢筋达到软化温度而导致整体结构的破坏。

(6) 就地取材、节约钢材。钢筋混凝土结构中所用的砂、石材料, 一般可就地采取, 减少运输费用。

钢筋混凝土结构也有一些缺点:

(1) 构件的截面尺寸较一般的钢结构大, 因而自重较大, 不利于建造大跨度结构及高层建筑。

(2) 混凝土抗拉性能低, 抗裂性能较差, 容易出现裂缝, 影响结构的适应性和耐久性。

(3) 浇筑混凝土要用模板和支撑, 耗费一定数量的木材和钢材。

(4) 施工较复杂, 易受季节和气候的影响, 建造期一般较长。

钢筋混凝土结构在水利水电工程中的应用非常广泛, 钢筋混凝土用来建造水坝、水电站厂房、水闸、船闸、渡槽、涵洞、倒虹吸管、调压塔、压力水管、码头、隧洞衬砌等。随着科学技术的发展、施工水平的提高以及高强轻质材料研究的不断突破, 钢筋混凝土的缺点正在逐步地被克服和改善, 如采用轻质高强混凝土可以减轻结构的自重; 采用预应力混凝土结构可以提高构件的抗裂性能; 采用预制装配构件可以节约模板和支撑, 加快施工进度, 减少季节气温对施工的影响等。

0.2 钢筋混凝土结构的发展简况

钢筋混凝土结构与其他建筑结构相比, 是一种较年轻的结构形式。1824年英国人发明了波特兰水泥后才开始有混凝土, 由于混凝土抗拉强度低, 应用受到限制。1861年法国人制成了使混凝土受压、钢筋受拉, 充分发挥两种材料各自性能的钢筋混凝土结构, 扩大了其使用范围。20世纪30年代出现了预应力混凝土结构, 其抗裂性能好, 充分利用了高强材料, 从此钢筋混凝土结构迅速发展成为现代工程建设中应用非常广泛的建筑结构。目前钢筋混凝土结构的跨度和高度都在不断增大, 如杨浦大桥主跨达602m, 上海金茂大厦高达420.5m, 上海电视塔高达454m。

钢筋混凝土结构在水利水电工程中的应用更加令人瞩目, 如葛洲坝水利枢纽、三峡水

利枢纽、乌江渡水电站、龙羊峡水电站都是规模宏伟的钢筋混凝土工程。

钢筋混凝土结构的计算理论不断发展，由最初的把材料作为弹性体的容许应力古典理论，发展为考虑材料塑性的极限强度理论，并且迅速发展成完整的按极限状态计算体系。目前，在工程结构中已采用基于概率论和数理统计分析的可靠度理论，使极限状态计算体系向更完善、更科学的方向发展。

在材料研究方面，主要是向高强、轻质、耐久及具备某种特异性能方向发展。目前强度为 $100\sim 200\text{N/mm}^2$ 的高强混凝土已在工程中应用。各种轻质混凝土、纤维混凝土、聚合物混凝土、耐腐蚀混凝土、水下不分散混凝土以及品种繁多的外加剂在工程上的应用，已使大跨度结构、高层建筑、高耸结构和具备某种特殊性的钢筋混凝土结构的建造成为现实。

在结构和施工方面，水工钢筋混凝土结构常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，这给机械化现浇施工带来很大方便。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，并且能节约大量材料，从而获得经济效益。值得注意的是，近几年来由钢与混凝土或钢与钢筋混凝土组成的结构、型钢与混凝土组成的组合梁结构、外包钢混凝土结构及钢管混凝土结构，已在工程上逐步推广应用。这些组合结构具有充分利用材料强度、较好地适应变形能力（延性）、施工较简单等特点。

总之，随着对钢筋混凝土结构研究的不断深入，钢筋混凝土结构的应用会更加广泛，前景会更加广阔。

0.3 本课程的性质及学习方法

钢筋混凝土结构是水利水电类专业最为重要的技术基础课程。学习本课程的主要目的是：掌握水工钢筋混凝土结构构件设计计算的基本理论和构造知识，为学习有关专业课程和顺利地从事钢筋混凝土建筑物的结构设计打下牢固的基础。

学习本课程需要注意以下几个问题：

(1) 目前钢筋混凝土结构的计算公式常常是在大量实验基础上与理论分析相结合建立起来的。学习时应注意每一理论的适用范围和条件，不要盲目地生搬硬套，应在实际工程设计中正确运用这些理论和公式。

(2) 钢筋混凝土课程所要解决的是结构构件的设计，包括方案、截面形式及材料的选择，配筋构造等。结构设计是一个综合性的问题，需要考虑安全、适用、经济和施工的可行性等各方面的因素。同一构件在给定荷载作用下，可以有不同的截面形式、尺寸、配筋数量等多种选择，往往需要进行适用、材料用量、造价、施工等指标的综合分析比较，才能作出合理的选择。在学习钢筋混凝土课程时，要注意掌握各种因素进行综合分析的设计方法。

(3) 本课程要学习有关构造知识，构造方面的规定是长期科学实验和工程经验的总



结。在设计结构和构件时，计算与构造是同样重要的。因此，要充分重视对构造知识的学习。在学习过程中不必死记硬背构造的具体规定，但应注意弄清其中的道理。通过平时的作业和课程设计逐步掌握一些基本构造知识。

(4) 本课程同时又是一门结构设计课程，有很强的实践性。要搞好工程结构设计，既要有坚实的基础理论知识，还要有综合考虑材料、施工、经济、构造细节等各方面的因素的能力。此外，为了培养学生从事设计工作的能力，必须对结构分析计算、整理编写设计说明书、绘制施工图纸等基本技能提出严格的要求。



第 1 章 钢筋混凝土结构的材料

教学要求：掌握钢筋的品种及其物理力学性能，了解钢筋混凝土结构对钢筋性能的要求，掌握钢筋的选用原则；理解混凝土各种强度的概念，掌握混凝土各种强度及其关系；了解混凝土收缩和徐变等变形对结构的影响；理解钢筋与混凝土之间的粘结力，了解粘结力的组成。

1.1 钢 筋

1.1.1 钢筋的品种

1. 按化学成分划分

我国生产的钢筋按化学成分可分为碳素钢和普通低碳合金钢。

(1) 碳素钢。碳素钢按碳的含量多少分为低碳钢（含碳量小于 0.25%）、中碳钢（含碳量在 0.25%~0.6% 之间）和高碳钢（含碳量大于 0.6%）。含碳量增加，能使钢材强度提高，性质变硬，但也使钢材的塑性和韧性降低，焊接性能也会变差。

(2) 普通低合金钢。普通低合金钢是在炼钢时往碳素钢中加入少量合金元素而形成的。常用的合金元素有锰、硅、钒、钛等，这些合金元素可提高钢材的屈服强度和变形性能，因而使低合金钢钢筋具有强度高、塑性及可焊性好的特点，应用较为广泛。

2. 按表面形状划分

我国生产的钢筋表面形状分为光面钢筋和变形钢筋。

(1) 光面钢筋。表面是光滑的，与混凝土的粘结性较差，如图 1-1 (a) 所示。

(2) 变形钢筋。表面有纵向凸缘（纵肋）和许多等距离的斜向凸缘（横肋）。其中，由两条纵肋和纵肋两侧多道等距离、等高度及斜向相同的横肋形成的螺旋纹表面，如图 1-1 (b) 所示。若横肋斜向不同则形成了人字纹表面，如图 1-1 (c) 所示。这两种表面形状的钢筋习惯称为螺纹钢筋，国标称为等高肋钢筋，国内已基本不再生产。

斜向凸缘和纵向凸缘不相交，甚至无纵肋，剖面几何形状呈月牙形的钢筋，称为月牙肋钢筋，如图 1-1 (d) 所示。与相同直径的等高肋钢筋相比，凸缘处应力集中得到改善，但与混凝土之间的粘结

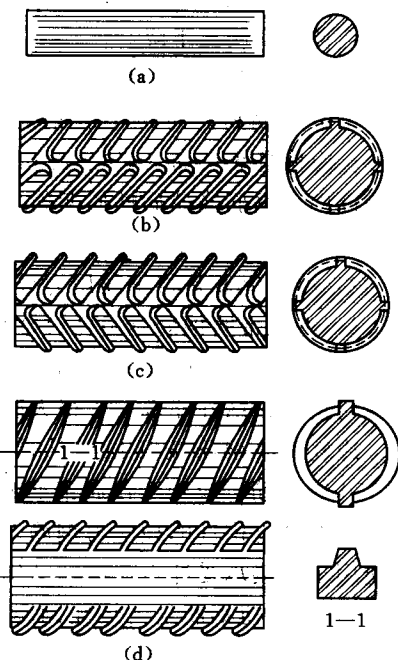


图 1-1 钢筋表面及截面形状



强度略低于等高肋钢筋。

3. 按加工工艺划分

我国生产的钢筋按加工工艺有热轧钢筋、冷加工钢筋、热处理钢筋及高强钢丝和钢绞线等。

(1) 热轧钢筋。是将钢材在高温 ($1200\sim 1400^{\circ}\text{C}$) 状态下轧制而成的, 按其强度从低到高分为 I、II、III、IV 四个级别。

1) I 级钢筋是由 Q235 钢热轧而成的光圆钢筋, 用 Φ 表示, 它是一种低碳钢, 质量稳定, 塑性好, 易于焊接, 易于加工成型, 但强度低, 且与混凝土的粘结稍差。用于中小型钢筋混凝土结构构件的受力钢筋及各种构件的箍筋和构造钢筋。

2) II 级钢筋是由 20MnSi 和 20MnNb 低碳合金钢热轧而成的变形钢筋, 用 Φ 表示, 其强度较高, 且与混凝土有良好的粘结性能, 塑性好, 焊接性能也好, 易于加工成型。主要用于大、中型钢筋混凝土结构构件的受力钢筋。

3) III 级钢筋是由 20MnTi、20MnSiV 低碳合金钢经热轧而成的变形钢筋, 多为月牙肋钢筋, 用 Φ 表示, 其强度高且与混凝土有良好的粘结性能, 但由于含碳量高, 塑性、焊接性能稍差。由于强度高, 如果用于普通钢筋混凝土构件中, 要充分发挥其强度, 就会使混凝土裂缝开展很大, 故一般经冷拉后作为预应力钢筋。

4) IV 级钢筋是由 40Si₂MnV、45SiMnV、45Si₂MnRi 等低碳合金钢热轧而成的变形钢筋, 用 Φ 表示, 强度高, 但由于含碳量高, 塑性、焊接性能都很差, 一般经冷拉后作为预应力钢筋, 用于预应力混凝土结构中。

(2) 冷加工钢筋。就是将热轧钢筋在常温下经冷加工而成的, 冷加工的加工工艺有冷拉、冷拔、冷轧带肋和冷轧扭等。冷加工后, 钢筋内部组织发生了变化, 其屈服强度提高了, 但伸长率明显下降。

1) 冷拉钢筋是由热轧钢筋在常温下用机械拉伸而成的, 用 $\Phi' \sim \Phi'$ 表示, 其强度提高, 可节约钢材。冷拉 I 级钢筋 (Φ') 常用于普通钢筋混凝土构件中, 冷拉 II 级钢筋 (Φ')、冷拉 III 级钢筋 (Φ')、冷拉 IV 级钢筋 (Φ') 一般作为预应力钢筋, 用于预应力混凝土构件中。钢筋冷拉后性质变脆, 承受冲击荷载或重复荷载的构件及处于负温下的结构, 一般不宜采用冷拉钢筋。

2) 冷拔钢筋是将钢筋用力拔过比其本身直径小的合金拔丝模, 使其直径变小而成的。

3) 冷轧带肋钢筋是由低合金热轧圆盘条为母材, 经多道冷轧和冷拔减径后, 在其表面压肋, 形成月牙肋的变形钢筋, 用 Φ^R 表示。这种钢筋与母材相比, 屈服强度明显提高, 与混凝土的粘结性能也有了很大改进。

冷轧带肋钢筋按其强度从低到高可分为三个级别: LL550、LL650、LL800。其中 LL550 级钢筋可应用于普通钢筋混凝土结构; LL650 级和 LL800 级钢筋可用作中、小型预应力混凝土构件的预应力钢筋。冷轧带肋钢筋也可用于焊接钢筋网, 但因其具有脆性, 不能用于直接承受冲击荷载的结构构件中。

4) 冷轧扭钢筋是由热轧圆盘条为母材, 经冷轧成扁平状并扭转而成的, 应用也较广泛。

(3) 热处理钢筋。是将强度为 IV 级的某些牌号 (如 40Si₂Mn、48Si₂Mn) 热轧钢筋通

过淬火和回火处理后而制成的，表面一般为螺纹形。用 Φ^{HT} 表示，热处理后钢筋的强度提高了很多，塑性却降低不多，可直接用作预应力钢筋。

(4) 高强钢丝和钢绞线。直径小于 6mm 的钢筋称为钢丝，国产的钢丝有碳素钢丝(Φ^{S})、刻痕钢丝(Φ^{I})等。碳素钢丝是用优质碳素钢经冷拔和应力消除矫直回火等工艺而形成的光面钢丝；刻痕钢丝是由碳素钢经压痕轧制低温回火而成的。钢丝的直径越细，强度越高，故用作预应力钢筋。钢绞线是由七根光面钢丝绞制而成，它与混凝土的粘结优于光面钢丝，常用于预应力混凝土结构中。

1.1.2 钢筋的力学性能

不同的钢筋由于化学成分不同、制作工艺不同，其力学性能也不同。按力学的基本性能来分，可分为三类：软钢、硬钢、冷拉钢筋。热轧 I、II、III、IV 级钢筋为软钢；热处理钢筋和高碳钢丝为硬钢；冷加工的钢筋属冷拉钢筋。

1. 软钢的力学性能

(1) 应力—应变曲线。将软钢试件置于试验机上张拉，从开始加载到试件断裂，记录每个时刻的应力、应变，得到应力—应变曲线，如图 1-2 所示。从曲线的变化特点可以将软钢的受力过程分为四个阶段：弹性阶段、屈服阶段、强化阶段、破坏阶段。从图 1-2 可知，自开始加载到应力达到 a 点以前，应力—应变成线性关系， a 点的应力称为比例极限， oa 段属于线弹性阶段，超过 a 点后，应力—应变曲线不再为直线，应力达到 b 点后，钢筋进入屈服阶段，产生很大的塑性， b 点的应力称为屈服强度（流限），在应力—应变曲线中呈一水平段 bc ，称为流幅。超过 c 点后，应力—应变曲线重新表现为上升的曲线，为强化阶段。随着荷载的增加，曲线上升到最高点 d 点， d 点的应力称为极限抗拉强度，随着荷载的增加试件产生颈缩现象，应力—应变曲线开始下降，到 e 点后钢筋被拉断而破坏，这一阶段称为破坏阶段。

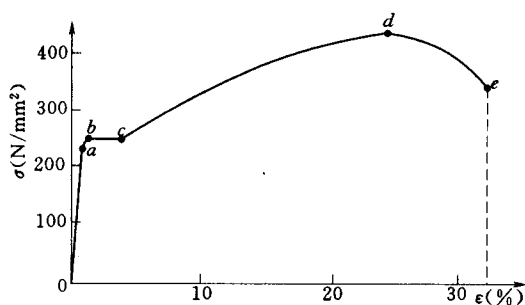


图 1-2 I 级钢筋的应力—应变曲线

(2) 钢筋的性能指标。钢筋的性能指标有强度指标和塑性指标。

1) 强度指标。对于软钢来讲，其明显的强度指标有两个：屈服极限和极限抗拉强度。屈服极限是软钢的主要强度指标，当混凝土中的钢筋达到屈服后，荷载不增加，钢筋的应变会突然变大，使混凝土的裂缝开展过宽，构件变形过大，结构不能正常使用，所以软钢的受拉强度极限值以屈服强度为准。钢筋强化阶段的极限抗拉强度只作为一种安全储备。

2) 塑性指标。反映钢筋的另一种指标是塑性指标，软钢的塑性指标有两个：伸长率



δ 和冷弯性能。伸长率 δ ，是钢筋拉断后的伸长值与原长的比率，即

$$\delta = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 δ ——伸长率，%；

l_1 ——试件拉伸前的标距长度，一般短试件 $l_1 = 5d$ ，长试件 $l_1 = 10d$ ， d 为试件直径；

l_2 ——试件拉断后的标距长度。

钢筋的伸长率越大，塑性性能越好，拉断前有明显预兆。钢筋的塑性除用伸长率标志外，还用冷弯试验来检验。冷弯就是把钢筋围绕直径为 D 的钢辊弯转 α 角而不发生裂纹、起层和断裂。常用冷弯角度 α 和弯心直径 D 与钢筋直径 d 的比值来反映冷弯性能， D 越小， α 值越大，则钢筋的冷弯性能越好，如图 1-3 所示。

(3) 弹性模量 E_s 。钢筋屈服前，应力应变的比值称为钢筋的弹性模量，用 E_s 表示。用于工程设计中的钢筋的弹性模量见附表 1-8。

(4) 各级钢筋的力学性能比较。从图 1-4 可以看出，钢筋的级别越高，屈服极限和抗拉强度就越高，但流幅短，塑性降低。

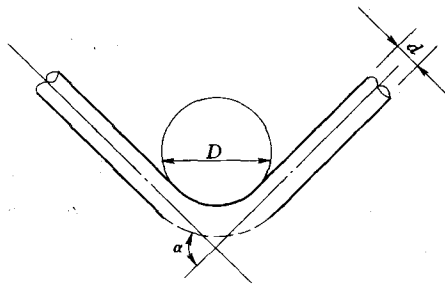


图 1-3 钢筋冷弯试验

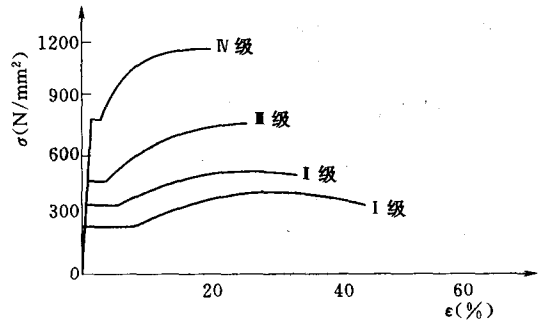


图 1-4 不同级别软钢的应力—应变曲线

软钢有明显的屈服点，破坏前有明显的预兆（较大的变形，即伸长率），属塑性破坏。

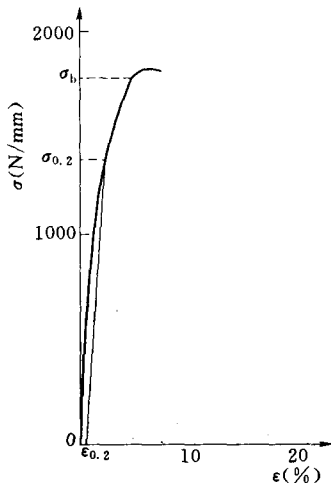


图 1-5 硬钢的应力—应变曲线

2. 硬钢的力学性能

硬钢强度高，但塑性差，脆性大。从加载到突然拉断，基本上不存在屈服阶段（流幅）。应力—应变曲线如图 1-5 所示。

硬钢没有明显的屈服台阶（流幅），所以计算中以“协定流限”（也称条件屈服强度）作为强度标准，条件屈服强度指的是：经过加载和卸载后尚有 0.2% 永久残余应变时所对应的应力值，用 $\sigma_{0.2}$ 表示。但 $\sigma_{0.2}$ 不易测定，一般相当于抗拉强度的 70%~90%，规范取 $\sigma_{0.2} = 0.8\sigma_b$ 。

极限抗拉强度、伸长率、冷弯性能是反映无流幅钢筋的力学性能三项指标。在对硬钢进行质量检验时，主要测定这三项指标。

硬钢塑性差，伸长率小，因此用硬钢配筋的钢筋混凝