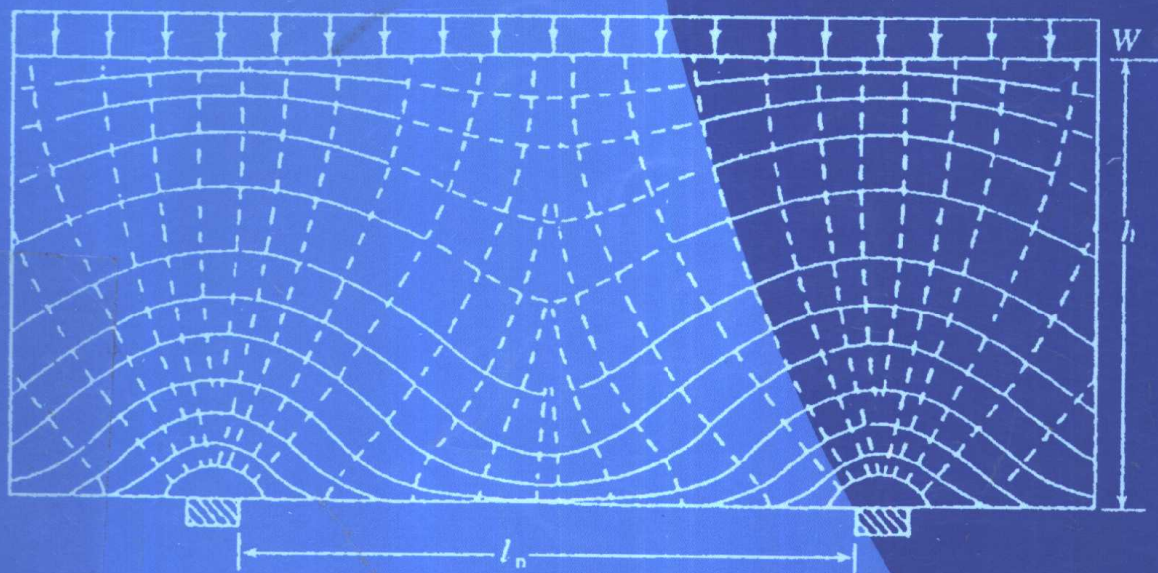


高等院校土木工程专业系列教材
GAODENG YUANXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE XILIE JIAOCAI

混凝土结构 基本构件设计原理

hunningtu jiegou jiben goujian sheji yuanli

主 编：王铁成 副主编：田稳苓 主 审：康谷贻



中国建材工业出版社

高等院校土木工程专业系列教材

混凝土结构基本构件设计原理

主 编：王铁成

副主编：田稳苓

主 审：康谷贻

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土结构基本构件设计原理/王铁成主编. —北京:
中国建材工业出版社, 2001.12
ISBN 7-80159-196-8

I. 混… II. 王… III. 混凝土结构—结构构件—
设计—高等学校—教材 IV. TU370.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 076770 号

内 容 简 介

本教材按教育部大学本科新专业目录规定的土木工程专业培养要求, 结合新《混凝土结构设计规范》(GB50010—2001) 编写, 主要讲述混凝土结构基本构件的原理和计算方法, 内容有: 绪论、钢筋与混凝土材料的物理力学性能、钢筋混凝土结构设计的基本原则、受弯构件正截面承载力、受弯构件斜截面承载力、轴心受力构件的正截面承载力、偏心受力构件的承载力、受扭构件的扭曲截面承载力、钢筋混凝土构件的变形和裂缝、预应力混凝土构件、深受弯构件, 共分十一章。

本教材可作为大学本科土木工程专业的专业基础课教材和参考书, 也可供从事混凝土结构设计, 施工的技术人员和研究者参考。

混凝土结构基本构件设计原理

主编 王铁成

*

中国建材工业出版社出版 (北京海淀区三里河路 11 号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京丽源印刷厂印刷

*

开本: 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张: 16.75 字数: 404 千字

2002 年 1 月第一版 2002 年 1 月第一次印刷

印数: 1—5000 册 定价: 25.00 元

ISBN 7-80159-196-8/TU·094

土木工程专业系列教材编辑委员会

主任：窦远明

副主任：姜忻良 许炳权

委员：(按姓氏笔划排列)

王立久 王铁成 许炳权 刘春原 史三元

戎 贤 朱赛鸿 吴建有 陆培毅 杨春风

苏幼坡 赵方舟 姜忻良 阎西康 窦远明

潘延龄 魏连雨

秘书：刘春原 阎西康

顾问：陈 环 顾晓鲁 黄世昌 陈章洪 崔冠英

前 言

随着国家经济建设的发展和 21 世纪国家建设对专业人才的需求,我国近期对高等教育专业设置进行了较大幅度的调整,其中新设置的土木工程专业取代了过去的建筑工程、交通土建工程等四个相近专业。根据国家教育部门的安排,全国各高校从 1999 年起按新专业目录进行新生录取工作。建设部专业指导委员会也于 1999 年初下达了新土木工程专业的课程设置指导意见。比较而言,土木工程专业较过去各专业覆盖面要广泛得多,涵盖了原来近 8 个专业的内容,因此新专业的教学计划、课程内容调整以及新教材的编写就成为当前一项较为紧迫的任务。为适应这一形势的要求,河北工业大学、天津大学、天津城市建设学院等院校经过充分协商和研究,本着“探索、科学、先进”的原则和符合“大土木”的专业要求,联合编写了一套系列教材,由中国建材工业出版社出版并向全国发行。

本书是根据全国土木工程学科专业指导委员会制定的教学大纲编写的宽口径的专业基础平台课教材。教材结合新《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2001),以混凝土结构的基本理论和基本构件设计为主要内容,是进一步学习混凝土结构设计专业课的基础。

本教材内容包括基本概念、设计原则、钢筋混凝土结构构件和预应力混凝土构件。教材编写吸收了同类教材的长处,各章节的编排顺序符合教学特点,突出重点,在讲清楚物理力学概念和计算原理的基础上,介绍实用计算方法,并结合相关的规范和工程实践,反映国内外先进的科学技术。

本教材作为宽口径的专业基础课,为拓宽知识面,在教材中对双向受剪钢筋混凝土框架结构的柱,深受弯构件以及混凝土结构的耐久性等内容作了适当介绍,这样,扩大了知识覆盖面,反映了结构工程技术新发展,使课程内容在整体上更相对完整。这些内容作为教材的新特点,根据教学需要可适当选用。

本教材由有丰富教学经验的人员参加编写,体现了长期积累的教学经验。参加本教材编写的有:韩圣章、李砚波(第一章、第二章、第八章、第九章),周明杰(第三章、第七章),田稳苓(第四章、第十章),王铁成(第五章、第六章、第七章的部分),赵艳静(第十一章)。

本书可作为土木工程专业的教材,也可供设计和施工技术人员掌握新《混凝土结构设计规范》,进行混凝土构件设计的参考。

鉴于编者的知识有限,教材中有不妥或疏漏之处,请读者批评指正。

编 者

2001 年 12 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 钢筋混凝土的一般概念	1
第二节 钢筋混凝土结构的发展简况及应用现状	2
第三节 钢筋混凝土设计原理的内容和学习方法	4
第二章 钢筋与混凝土材料的物理力学性能	6
第一节 钢筋	6
第二节 混凝土	13
第三节 钢筋与混凝土的粘结作用	30
第三章 钢筋混凝土结构设计的基本原则	37
第一节 结构的功能要求	37
第二节 极限状态和极限状态方程	37
第三节 近似概率极限状态设计法	40
第四节 概率极限状态设计法的实用表达式	42
第五节 材料强度的标准值和设计值	45
第六节 荷载的标准值和设计值	46
第七节 随机变量的基本统计特征	47
第四章 受弯构件正截面承载力计算	50
第一节 试验研究分析	51
第二节 单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算的基本理论	56
第三节 单筋矩形截面受弯构件正截面承载力的计算	60
第四节 双筋矩形截面受弯构件正截面承载力的计算	65
第五节 单筋 T 形截面受弯构件正截面承载力计算	71
第六节 梁、板的一般构造要求	78
第五章 受弯构件斜截面承载力	81
第一节 概述	81
第二节 无腹筋梁的受剪性能	81
第三节 有腹筋梁的受剪性能	87
第四节 有腹筋连续梁的抗剪性能和斜截面承载力计算	90
第五节 斜截面受剪承载力设计	92
第六节 构造要求	98
第六章 轴心受力构件的正截面承载力	104
第一节 轴心受压构件的正截面承载力	104
第二节 轴心受拉构件正截面受拉承载力	113

第七章 偏心受力构件的承载力计算	115
第一节 偏心受力构件的一般构造要求	115
第二节 偏心受压构件正截面的受力特点和破坏特征	116
第三节 长细比对偏心受压构件承载力的影响	118
第四节 矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算的基本原则	121
第五节 矩形截面不对称配筋偏心受压构件的计算方法	124
第六节 矩形截面对称配筋偏心受压构件的计算方法	134
第七节 工字型截面偏心受压构件正截面承载力计算	138
第八节 矩形截面双向偏心受压构件正截面承载力计算	144
第九节 偏心受拉构件正截面承载力计算	145
第十节 偏心受力构件斜截面承载力计算	146
第十一节 双向受剪承载力计算	148
第八章 受扭构件的扭曲截面承载力	152
第一节 纯扭构件的扭曲截面承载力计算	152
第二节 压弯剪扭构件的扭曲截面承载力计算	165
第九章 钢筋混凝土构件的变形和裂缝	174
第一节 钢筋混凝土结构的耐久性	174
第二节 裂缝宽度、挠度要求	176
第三节 裂缝宽度计算	179
第四节 受弯构件的刚度和挠度计算	190
第五节 钢筋混凝土构件的截面延性	199
第十章 预应力混凝土构件的计算	203
第一节 概述	203
第二节 预加应力的方法	205
第三节 预应力混凝土的材料和锚具	206
第四节 张拉控制应力	208
第五节 预应力损失及其组合	209
第六节 预应力混凝土轴心受拉构件的计算	216
第七节 预应力混凝土受弯构件的计算	229
第八节 预应力混凝土构件的构造规定	234
第十一章 深受弯构件	237
第一节 深受弯构件的受力性能	237
第二节 深梁的内力计算	242
第三节 深受弯构件的承载力计算	242
第四节 深梁的正常使用极限状态验算	246
第五节 深受弯构件的构造要求	247
附录	253

第一章 绪 论

第一节 钢筋混凝土的一般概念

混凝土结构包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和各种其他形式的加筋混凝土结构。素混凝土结构常用于一些非承重结构和道路表层；钢筋混凝土是由两种物理-力学性能不同的材料——钢筋和混凝土组合成整体，取长补短，充分利用两者的材料性能，共同发挥作用的一种建筑材料；预应力混凝土是配置了预应力钢筋的对普通混凝土结构应用的扩展。从通常意义上来说，混凝土结构是指钢筋和混凝土组成的钢筋混凝土结构。

混凝土抗压强度较高，而抗拉强度则很低；而钢筋的抗拉、抗压强度均很高，但长细钢筋容易被压屈，且钢筋在一般的环境中易于锈蚀，耐火性差，维护困难，若放置在混凝土中，则不易锈蚀，耐火性能也会提高。因此将两者结合，优化了其性能，可充分发挥两者的强度，用混凝土较高的抗压强度承担压力，用抗拉强度高的钢筋承受拉力，做到了物尽其用。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，实现其结构功能。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 1.2×10^{-5} ，混凝土的温度线膨胀系数为 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}$ ），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。

钢筋混凝土除了能合理地利用钢筋和混凝土两种材料的特性外，还有下述一些优点：

- (1) 新拌和的混凝土是可塑的，因此，可根据需要，浇制成各种形状和尺寸的结构。
- (2) 现浇钢筋混凝土结构的整体性较好，具有较好的抵抗地震和振动的性能。
- (3) 钢筋混凝土结构的刚度较大，变形较小，可用于对变形要求较严格的建筑物中。
- (4) 钢筋混凝土结构具有很好的耐久性。不需要经常性的保养和维修，维修费用少。
- (5) 由于混凝土的耐热性能较好，与钢结构相比，钢筋混凝土结构具有较好的耐火性。
- (6) 在钢筋混凝土结构所用的原材料中，砂、石所占的比重较大，易于就地取材。
- (7) 工业废料比较多的地区，可将工业废料制成人造骨料，用于钢筋混凝土结构中，既解决了工业废料处理问题，有利于环境保护，又可减轻结构的自重。

钢筋混凝土结构也存在一些缺点，诸如：

- (1) 构件的截面尺寸一般较相应的钢结构大，因而自重较大，这对于大跨度结构、高层建筑结构以及抗震都是不利的；
- (2) 施工比较复杂，工序多，建造耗工较多，施工受环境、气候条件的限制，影响较大，雨季、冬季施工以及高温干燥情况下施工，均需要采取特别措施以保证工程质量，进行补强修复也比较困难；

- (3) 抗裂性能较差，在正常使用时往往是带裂缝工作的；
- (4) 现浇钢筋混凝土采用木模板时，需耗用大量木材；
- (5) 隔热、隔声性能较差；
- (6) 修补或拆除较困难等等。

这些缺点在一定条件下限制了钢筋混凝土结构的应用范围。但是，随着钢筋混凝土结构的不断发展，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，同时减轻自重；采用预制装配结构或工业化的现浇施工方法以节约模板和加快施工速度。

第二节 钢筋混凝土结构的发展简况及应用现状

伴随着人造硅酸盐水泥的发明，钢筋混凝土在 19 世纪中叶开始制成并得到应用，混凝土结构虽然与砌体结构、钢结构、木结构相比，历史不长，但发展迅猛，现在已经广泛应用于土建工程领域。其发展大致分为以下几个阶段：

(1) 从 19 世纪 50 年代到 20 世纪 20 年代，是钢筋混凝土结构发展的初期阶段。在这个阶段，开始用钢筋混凝土建造各种板、梁、柱和拱等简单的构件，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。

(2) 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。

(3) 第二次世界大战以后，钢筋混凝土结构有了更大的发展。高强混凝土和高强钢筋的出现和广泛应用；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；都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。

由于生产水平的提高，试验工作的开展，计算理论研究的进展，材料及施工技术的改进，新型结构的开发研究，钢筋混凝土得到了快捷的发展，成为现代化各类工程中应用最广泛的建筑材料之一。目前，我国常用的混凝土强度已达到 $20 \sim 50 \text{N/mm}^2$ ，国外常用的强度等级在 60N/mm^2 以上，我国最新规范也将混凝土强度等级提高到了 80N/mm^2 的水平。钢材应用主要向高强、防腐、防锈发展。目前，常用的热轧钢筋的屈服强度已达到 420N/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 1800N/mm^2 。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。如德国采用预应力轻质混凝土建造了跨度为 90m 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 239m。另外，加拿大已建成的高度为 549m 的多伦多电视塔。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。预应力混凝土除了用以改善一般的建筑结构外，还应用于高层建筑、桥隧建筑、

海洋结构、压力容器、飞机跑道及公路路面等方面。现在预应力混凝土的应用已不仅在某些范围内用来代替钢结构和改善普通混凝土结构，而且在一些方面，预应力混凝土结构具有不可替代的作用。近年来，混凝土结构的耐久性，在国际上也引起了广泛重视，欧洲、日本等国家和地区已开始将耐久性问题列入有关规范中。

钢筋混凝土计算分析方法是随着数学、力学的发展，试验技术的进步逐步发展的。随着对混凝土变形性能的深入研究和电子计算机的应用，已将有限元法用于钢筋混凝土结构应力状态的分析；在可靠度方面，经历了从单一安全系数法到以概率论为基础的分项系数法，可靠度的工程应用研究已包括在设计、施工、使用维修方面，应用于规范则多限于设计阶段。

随着社会主义建设事业的蓬勃发展和国民经济的提高，钢筋混凝土在我国工程建设中得到了迅速的发展和广泛的应用。随着建筑工业化的发展，工业厂房中已广泛采用定型构配件和标准设计，很多形式的构件都已编制了全国通用标准图集及地区性标准图集。国内有些城市在全国通用构配件的基础上，选定、简化和统一构配件，采用配套的生产和施工机械，使厂房的设计、生产和施工成为大工业的生产过程，初步建立了适合本地区特点的单层及多层工业厂房建筑体系。另外，为适应当前工业生产机械化、自动化程度的不断提高，工艺设备的逐步更新及生产规模的日益扩大。工业厂房的结构体系除通常采用的板、架（梁）、柱结构体系以及梁柱合一的门式刚架结构体系外，还出现了板架（梁）合一或板墙合一的板型结构和薄壁空间结构体系。如 V 形折板结构体系；双 T 形板结构体系；马鞍形壳板屋盖结构体系等。在工业厂房中和一般民用建筑中，已普遍采用定型化、标准化的装配式构件。不少地区还大力推广大模板剪力墙承重结构外加挂板或外砌墙体结构体系，以及对框架轻板体系进行了研究，由于其自重大大减轻，既节约了材料，又提高了其抗震性能。此外，近年来研究的由钢管混凝土制成的柱，具有尺寸省、强度高、延性大、抗震性能好、自重轻等优点，已有一些地区的厂房、地下结构及高层建筑中采用，并在总结施工经验及科研成果的基础上，于 1990 年制定了《钢管混凝土结构与施工规程》（CECS28—29）。在厂房的维护结构中已逐步使用大型工业墙板。

为了节约用地，在工业建筑中多层工业厂房所占比例有逐渐增多的趋势。在多层工业厂房中除现浇框架体系以外，装配整体式多层框架结构体系也已被普遍采用，并发展了整体预应力装配式板柱体系，由于其构件类型少，装配化程度高、整体性好、平面布置灵活，所以是一种有发展前途的结构体系。大跨度的公用建筑和工业建筑也有一定的发展，一般常采用钢筋混凝土桁架，拱门式刚架和壳体结构等。预应力混凝土结构的应用也日益广泛。我国钢筋混凝土高层建筑也有较快的发展。

我国的科学研究和设计规范的制定工作也取得了较大的发展。70 年代以后，我国开始规模、有组织、有计划地开展科学研究工作。并编制了《预应力混凝土结构设计与施工》和《钢筋混凝土结构设计规范》（TJ10—74）以及有关的专门规范、规程和设计手册。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许多成果，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。并针对 TJ10—74 规范修订中的遗留问题，按照国际先进标准，开展了大量专题研究，比较深入地掌握了各类简单和复合受力状

态下的强度和变形规律。为了提高我国建筑结构设计规范的先进性和统一性，我国编制了《建筑结构设计统一标准》(GBJ 68—84)，该标准采用了国际上正在发展和推行的、以概率理论为基础的极限状态设计方法，统一了我国建筑结构设计的基本原则，规定了适用于各种材料结构的可靠度分析方法和设计表达式，并对材料与构件质量控制和验收提出了相应的要求。其特点是以结构功能的失效概率作为结构可靠度的度量，由定值的极限状态概念转变为非定值的极限状态概念，对提高结构设计的合理性具有深刻的意义。按照《建筑结构设计统一标准》规定的基本原则，我国编制了《混凝土结构设计规范》(GBJ 10—89)，把我国的混凝土结构设计提高到一个新的水平。该规范于1990年颁布施行，并于1993年、1996年公布了两个该规范的局部修订条文。根据建设部97建标字108号文件，由中国建筑科学研究院会同有关单位对《混凝土结构设计规范》GBJ10—89规范进行了修订，并经过多次调整、改进，结合国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB/T 50068，制定颁布了新的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2001)。新规范的颁布实施，必将促进我国混凝土结构设计的进一步发展。

第三节 钢筋混凝土设计原理的内容和学习方法

本课程讲述混凝土结构构件的基本原理和基本设计理论。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性、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。

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) 钢筋混凝土基本原理，是学习钢筋混凝土结构理论的基础知识。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非匀质、非连续、非弹性的材料组成的构件为研究对象。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就成了一个值得重视的问题。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，要重视构件的实验研究，了解反映试验中规律性现象的构件受力性能，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、构件选型、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。规范反映的是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，以及对国际上有关标准的先进成果吸收。在学习中要力求熟悉它，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、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。

第二章 钢筋与混凝土材料的物理力学性能

混凝土结构是由钢筋、混凝土两种力学性能不同的材料组成的。为了掌握混凝土结构的受力特征、计算原理和设计方法，必须了解钢筋和混凝土各自的力学性能和二者共同工作的机理。

第一节 钢 筋

一、钢筋的化学成分、种类和等级

建筑用的钢筋，要求具有较高的强度，良好的塑性，以便于加工和焊接。掌握钢筋的化学成分、生产工艺和加工条件，弄清钢筋的种类和强度等级，才能选到具有上述性能的钢筋。

钢筋的化学成分主要是铁，在炼制过程中，不可避免地包含了一些其它的化学元素，如少量的碳、硅、锰、硫、磷等。有时为了改善钢筋的性能，需要加入其它一些化学元素，如少量的合金元素硅、锰、钛、钒、铬等。因此在钢筋混凝土中采用的钢材，按照钢筋的化学成分不同，可以分为碳素钢和普通低合金钢。碳素钢根据钢中含碳量的多少，又可以划分为低碳钢（含碳量 $<0.25\%$ ）、中碳钢（含碳量 $0.25\% \sim 0.6\%$ ）和高碳钢（含碳量 $0.6\% \sim 1.4\%$ ）。含碳量越高，强度越高，但塑性和可焊性越低，反之则强度越低，塑性和可焊性好。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，可以有效地提高钢材的强度和改善钢材的其它性能，这就是所谓的普通低合金钢，如在钢中加入少量锰、硅元素可提高钢的强度，并能保持一定的塑性。在钢中加入少量的钛、钒可显著提高钢的强度，并可提高其塑性和韧性，改善焊接性能。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，会出现清除不掉的有害元素：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，通常热轧带肋钢筋的磷和硫含量均不大于 0.045% 。

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

（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（I 级），HRB335 级（II 级），HRB400 级（III 级）。

（2）余热处理钢筋：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。钢筋混凝土中常用 RRB400 级。

（3）热处理钢筋：是将热轧钢筋在通过加热、淬火和回火等调质工艺处理的钢筋。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。常用的有三种，分别是

40Si2Mn, 48Si2Mn, 45Si2Cr。

(4) 冷轧带肋钢筋：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。

《规范》规定预应力钢筋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）：是用高碳镇定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而制成。可分为 2 股、3 股、7 股 3 种。

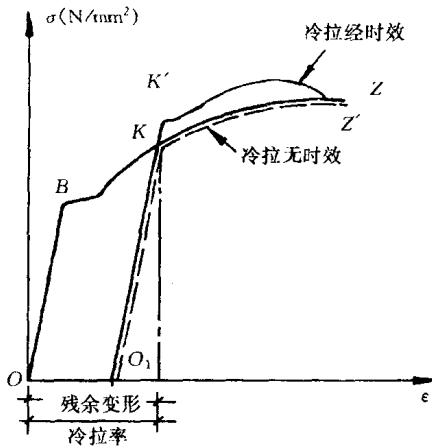


图 2-1 钢筋冷拉应力-应变曲线

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-应变曲线将沿新的曲线变化，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，如 HPB235 钢时效硬化在常温时需要 20 天，若温度为 100℃ 时，仅需要 2

个小时即可完成；但是如果继续加温有可能产生相反的效果，如加温至 450℃ 时强度反而有所降低，塑性性能有所增加。加温至 700℃ 时，钢材会恢复到冷拉前的力学性能，即失去了冷拉的意义。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，为了保证钢筋冷拉后既提高强度又保证其一定的塑性水平，冷拉时对适宜的冷拉卸荷点的选择是很重要的，该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。

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。

由于近年来，我国强度高、性能好的钢筋（钢丝、钢绞线）已可充分供应，因此冷拔低碳钢丝和冷拉钢筋由于其性能缺陷未列入《规范》，另外冷轧带肋钢筋和冷轧扭钢筋因亦有了专

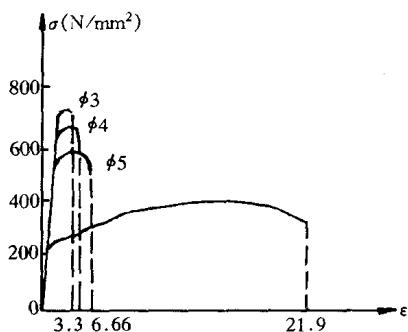


图 2-2 钢筋冷拔应力-应变曲线

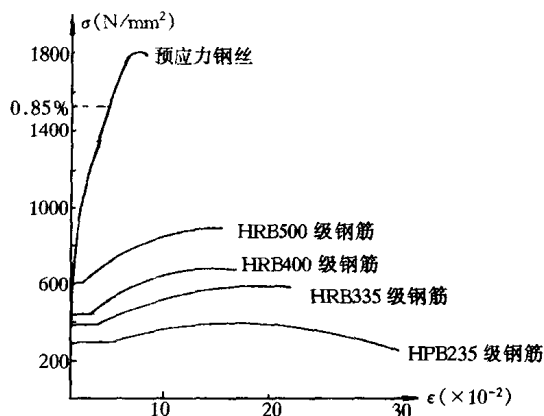


图 2-3 各级钢筋的应力-应变曲线

门规程未列入《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。

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。

《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 HRB400 级和 HRB335 级钢筋，也可采 HPB235 级钢筋和 RRB400 级钢筋，以 HRB400 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。HRB400 和 HRB335 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 HRB400 和 HRB335 级钢筋；HPB235 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；RRB400 级钢筋是指国家标准《钢筋混凝土用余热处理钢筋》GB 13014 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/T 5223 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。预应力钢绞线和钢丝分为 I 级松弛和 II 级松弛两类。当采用《规范》未列出但符合强度和伸长率要求的冷加工钢筋时，应按专门规程设计。

二、钢筋的力学性能

钢筋混凝土用钢筋分为有屈服点的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（见图 2-4），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（见图 2-5），如光面钢丝等。

从图 2-4 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，应变比应力增长地快，到达 B' 点以后，钢筋开始出现塑流，B' 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' 是不稳定的。待从 B' 降至 B 点（屈服下限）时，这时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，其大小称为流幅。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，说明钢筋的抗拉能力又开始发挥，随着曲线上升到达最高点 D，相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，应力随之下降，在测试试件上体现为试件薄弱处的截面突然显著减小，发生局部径缩现象，变形迅速增加达到 E 点试件被拉断。图 2-5 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。

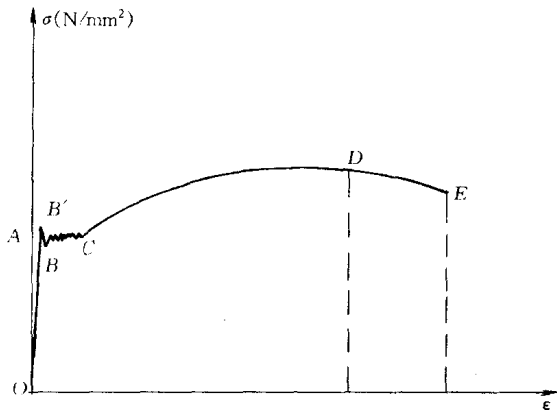


图 2-4 有明显流幅的钢筋应力-应变曲线

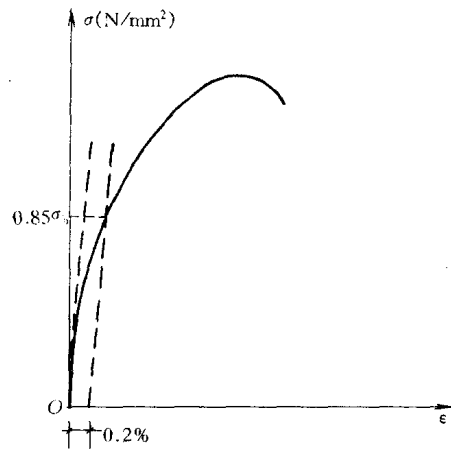


图 2-5 没有明显流幅的钢筋应力-应变曲线

钢筋的强度标准值应具有不小于 95% 的保证率。对构件计算配筋时，对于热轧钢筋的强度标准值是根据屈服强度确定，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，以至不能使用。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 σ_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和设计值按附表 6 和附表 7 采用；预应力钢筋的强度标准值和设计值按附表 8 和附表 9 采用。

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率称为伸长率，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 的弯芯弯曲到规定的角度而无裂纹及起层现象，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。

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的最小值（用 δ_5 表示标距 $l=5d$ 时的伸长率）以及相应的冷弯试验要求（弯芯直径及弯转角），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	
			6~25	28~50	6~25	28~50	6~25	28~50
伸长率	δ_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

三、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性且与纵肋不相交）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），或作成平面及空间骨架（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、钢轨或者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。钢筋的形式见图 2-6。

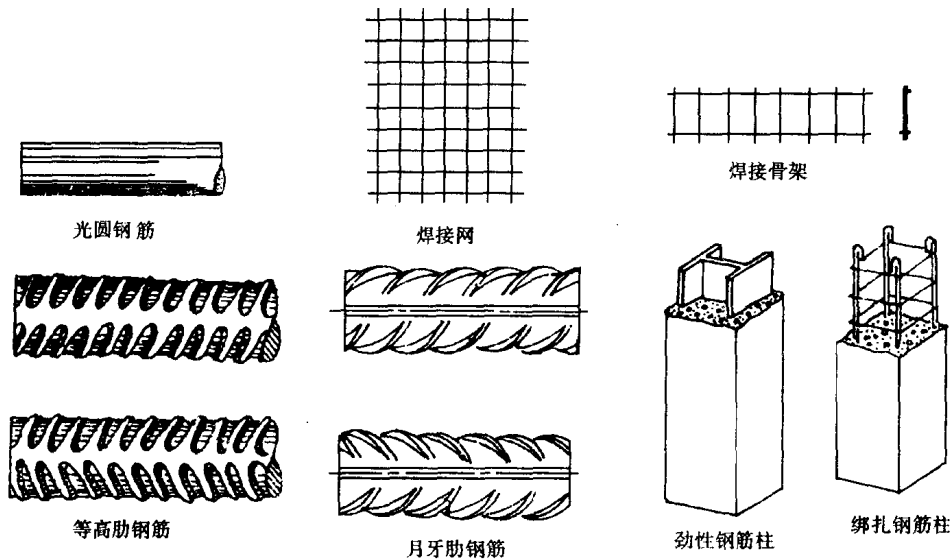


图 2-6 各种形式的钢筋

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，我国冶金部规定，HPB235 级钢筋、外形轧成光面，俗称光圆钢筋。HRB335 级、HRB400 级钢筋轧成人字纹或月牙形以及螺旋纹。人字纹、螺旋纹和月牙形钢筋，统称为变形钢筋。

四、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，为简化起见，常需要将钢筋的应力-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 ϵ_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 $\epsilon_{y,h}$ 。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。其数学表达式为：

$$\text{当 } \epsilon_s \leq \epsilon_y \text{ 时, } \sigma_s = E_s \epsilon_s, (E_s = f_y / \epsilon_y) \quad (2-1)$$

$$\text{当 } \epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{s,h} \text{ 时, } \sigma_s = f_y \quad (2-2)$$