



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

混凝土结构

张玉敏 主 编
朱辉 侯倩倩 吕俊利 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

混凝土结构

主 编	张玉敏		
副主编	朱 辉	侯倩倩	吕俊利
编 写	曲媛媛	魏 晴	侯 芳
	孙芳芳		
主 审	张锡增		



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材(高职高专教育)。全书共分 13 章,主要包括概述,钢筋和混凝土材料的力学性能,结构设计方法,受弯构件正截面承载力计算,受弯构件斜截面承载力计算,受扭构件承载力计算,受压构件承载力计算,受拉构件承载力计算,钢筋混凝土构件的裂缝、变形和耐久性,预应力混凝土构件,钢筋混凝土楼盖,钢筋混凝土单层工业厂房,多层框架结构等。

本书依据国家最新《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)和《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)编写。根据培养高素质技能型专门人才的特点,本书简明基本理论和基本概念,突出工程实际应用,注重职业技能和素质的培养,对解题方法的介绍翔实清楚,语言精练、概念清楚、重点突出、层次分明、结构严谨。

本书可作为高职高专院校建筑工程技术专业教材,也可作为土建类专业函授、自学考试和在职人员培训教材,还可供有关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构 / 张玉敏主编. —北京:中国电力出版社,2011.8
普通高等教育“十二五”规划教材. 高职高专教育
ISBN 978 - 7 - 5123 - 2021 - 5

I. ①混… II. ①张… III. ①混凝土结构—高等职业教育—教材 IV. ①TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 163385 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 9 月第一版 2011 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 25.25 印张 619 千字

定价 43.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

本书为普通高等教育“十二五”规划教材(高职高专教育),是以建筑工程专业混凝土结构课程教学大纲的要求为依据,按照最新 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》、GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》,以及其他相关规范、标准进行编写的,反映了我国混凝土结构在土木工程领域的新进展及可持续发展的要求。

全书共分 13 章,主要包括概述,钢筋和混凝土材料的力学性能,结构设计方法,受弯构件正截面承载力计算,受弯构件斜截面承载力计算,受扭构件承载力计算,受压构件承载力计算,受拉构件承载力计算,钢筋混凝土构件的裂缝、变形和耐久性,预应力混凝土构件,钢筋混凝土楼盖,钢筋混凝土单层工业厂房,多层框架结构等。

本书在编写过程中,密切结合混凝土结构课程教学内容的改革和实践,吸收了各院校近年来该课程的教学经验。从培养高素质技能型专门人才的定位出发,本着理论知识以必须、够用为度,以实际应用为重的原则,体现高等职业教育的特色,对教材内容进行了适当的取舍,突出学生对基本知识的掌握,理论推导从简,突出工程实际应用。精选了典型例题,加大了思考题和习题的分量,以便于读者得到较为全面的训练,提高专业综合应用能力。

全书内容精练、概念清楚、重点突出、层次分明、结构严谨;对解题方法的介绍清楚细致,步骤完整。本书可作为高职高专院校建筑工程技术专业教材,也可作为土建类专业函授、自学考试和在职人员培训教材,还可供有关工程技术人员学习参考。

本书由张玉敏任主编,朱辉、侯倩倩、吕俊利任副主编,曲媛媛、魏晴、侯芳、孙芳芳参加编写。全书由张玉敏主编并统稿。

承蒙济南大学张锡增教授认真审阅了全书,并提出了许多宝贵意见,在此谨致衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2011 年 6 月

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 混凝土结构的基本概念	1
1.2 混凝土结构的应用	3
1.3 本课程的主要内容、任务和学习方法	5
思考题	6
第2章 钢筋和混凝土材料的力学性能	7
2.1 钢筋	7
2.2 混凝土	12
2.3 钢筋与混凝土的黏结	24
思考题	29
第3章 结构设计方法	30
3.1 结构设计的极限状态	30
3.2 结构上的作用及其荷载代表值	32
3.3 作用效应和结构抗力	33
3.4 概率极限状态设计法	36
3.5 极限状态实用设计表达式	38
思考题	43
习题	44
第4章 受弯构件正截面承载力计算	45
4.1 受弯构件的截面形式及计算内容	45
4.2 受弯构件的基本构造要求	46
4.3 受弯构件正截面的受力性能试验	50
4.4 受弯构件正截面承载力计算基本规定	54
4.5 单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	58
4.6 双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	70
4.7 T形截面受弯构件正截面承载力计算	77
思考题	87
习题	89
第5章 受弯构件斜截面承载力计算	93
5.1 概述	93

5.2 剪跨比及斜截面受剪破坏形态	94
5.3 斜截面受剪承载力的计算	98
5.4 受弯构件纵向钢筋的构造要求	111
思考题	125
习题	126
第6章 受扭构件承载力计算	128
6.1 概述	128
6.2 纯扭构件的开裂扭矩	128
6.3 矩形截面纯扭构件的破坏形态和承载力计算	130
6.4 弯剪扭构件的承载力计算	134
6.5 受扭构件的配筋构造要求	138
6.6 压弯剪扭构件的承载力计算	141
思考题	142
习题	142
第7章 受压构件承载力计算	143
7.1 构造要求	143
7.2 轴心受压构件的计算	146
7.3 偏心受压构件正截面承载力计算	153
7.4 对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	168
7.5 偏心受压构件斜截面受剪承载力计算	172
思考题	172
习题	173
第8章 受拉构件承载力计算	174
8.1 轴心受拉构件正截面受拉承载力计算	175
8.2 偏心受拉构件正截面受拉承载力计算	175
8.3 偏心受拉构件斜截面受剪承载力计算	181
思考题	181
习题	182
第9章 钢筋混凝土构件的裂缝、变形和耐久性	183
9.1 裂缝宽度验算	183
9.2 受弯构件的变形验算	190
9.3 混凝土结构的耐久性	194
思考题	198
习题	198
第10章 预应力混凝土构件	200
10.1 概述	200

10.2	预应力混凝土材料·····	205
10.3	锚具和夹具·····	207
10.4	张拉控制应力和预应力损失·····	210
10.5	预应力混凝土轴心受拉构件·····	216
10.6	预应力混凝土构造要求·····	230
	思考题·····	232
	习题·····	233
第 11 章	钢筋混凝土楼盖 ·····	234
11.1	概述·····	234
11.2	现浇单向板肋梁楼盖·····	236
11.3	双向板肋梁楼盖·····	268
11.4	装配式楼盖·····	282
11.5	楼梯·····	290
11.6	雨篷等悬挑构件·····	300
	思考题·····	303
	习题·····	304
第 12 章	钢筋混凝土单层工业厂房 ·····	307
12.1	单层工业厂房的结构形式、结构组成及受力特点·····	307
12.2	单层厂房排架的计算·····	312
12.3	排架柱的设计·····	329
12.4	柱下单独基础·····	333
12.5	单层厂房设计例题·····	335
	思考题·····	351
	习题·····	351
第 13 章	多层框架结构 ·····	353
13.1	多高层建筑结构体系简介·····	353
13.2	多层框架的结构布置·····	355
13.3	框架结构内力与水平位移的近似计算方法·····	357
13.4	多层框架内力组合·····	371
13.5	框架结构构件设计·····	373
13.6	框架结构的抗震设计与抗震构造·····	375
	思考题·····	381
	习题·····	382
	附录·····	383
	参考文献·····	396

第 1 章 概 述

1.1 混凝土结构的基本概念

1.1.1 混凝土结构的定义与分类

混凝土结构是以混凝土材料为主，并根据需要配置钢筋、预应力钢筋、钢管、纤维等材料，且共同受力的结构。它包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、钢管混凝土结构、纤维混凝土结构等，如图 1-1 所示，其中以钢筋混凝土和预应力混凝土结构在工程中应用最多。

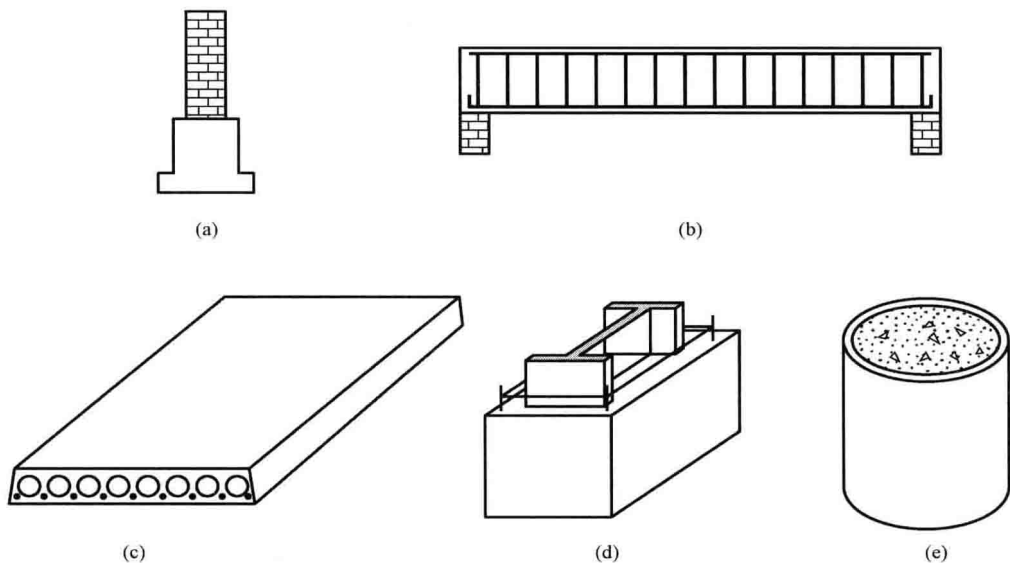


图 1-1 常见混凝土结构构件形式

(a) 素混凝土基础；(b) 钢筋混凝土梁；(c) 预应力混凝土空心楼板；
(d) 钢管混凝土柱；(e) 钢管混凝土柱

素混凝土结构是指不配置任何钢材的混凝土结构，主要用于承受压力的结构，如基础、挡土墙、堤坝等。

钢筋混凝土结构是指配有钢筋的普通混凝土结构，广泛用于各种受弯、受压、受拉的构件及结构，如梁、板、柱、基础、墙体等。

预应力混凝土结构是指在荷载作用之前对结构构件施加压力，使截面产生预压应力以全部或部分抵消由荷载引起的拉应力的混凝土结构。预应力混凝土构件具有抗裂能力强、抗渗性能好、刚度大、强度高、抗剪能力和抗疲劳性能好的特点，可用于大跨度的结构，对减小结构截面尺寸、降低结构自重、防止开裂和减少挠度都十分有效。

钢管混凝土结构是指用型钢或用钢板焊接而成的钢管架作为配筋的混凝土结构。这种混凝土结构承载力大、延性好、抗震性能好，可用于高层结构中的梁、柱、墙等。

钢管混凝土结构是由混凝土填入钢管内而形成的一种组合结构。这种结构使两者共同发挥作用，从而大大地提高了承载能力；主要以轴心受压和作用力偏心较小的受压构件为主，被广泛使用于框架结构中（如厂房和高层）。

纤维混凝土结构是在普通混凝土中掺入钢纤维、合成纤维等各种短纤维材料的混凝土结构。它可增强混凝土的抗拉强度，提高混凝土的抗冲击韧性。

1.1.2 钢筋混凝土结构的特点

钢筋混凝土结构是由钢筋和混凝土这两种材料组成共同受力的结构。在钢筋和混凝土两种材料中，钢筋的抗拉和抗压强度都很高，但细长的钢筋受压时极易压屈失稳，故工程应用以承受拉力为主；混凝土的抗压强度高而抗拉强度却很低，一般只有抗压强度的 $1/20 \sim 1/8$ ，混凝土承受拉力时极易开裂，因此，纯混凝土构件在实际工程中的应用受到很大限制。在这种情况下，将钢筋和混凝土这两种材料合理配置使用，以取长补短，充分利用各自的材料性能。下面通过对比实验来说明。

图 1-2 (a) 所示为一素混凝土简支梁，截面为 $150\text{mm} \times 300\text{mm}$ ，跨长为 2.5m ，混凝土强度等级为 C20。在跨中集中荷载 P 作用下，当梁跨中截面底部受拉边缘产生的拉应力达到混凝土的抗拉强度 f_t 时，梁便很快因开裂而产生脆性断裂破坏，无明显预兆。因此梁的开裂荷载 P_{cr} 即为破坏荷载 P_u ，即 $P_u \approx P_{cr} = 10.1\text{kN}$ ，承载力很低。梁破坏时跨中截面顶部受压边缘的压应力与抗拉强度相近，远未达到混凝土的抗压强度 f_c ，梁的承载力取决于混凝土的抗拉强度，混凝土抗压强度高的特点没有得到充分发挥。因此，通常素混凝土梁不能在工程中应用。

图 1-2 (b) 所示为一截面尺寸、跨度、混凝土材料与图 1-2 (a) 完全相同的钢筋混凝土简支梁，在梁的受拉区配置 2 根直径 16mm 的 HRB335 钢筋。虽然当荷载约达到 $P_{cr} = 10.1\text{kN}$ 时，梁的受拉区开裂，但开裂后，拉力可转由钢筋承担，荷载还可以继续增加，直到钢筋达到受拉屈服强度以后，梁才破坏，破坏荷载可达 $P_u = 55.7\text{kN}$ 。破坏前混凝土裂缝充分发展，梁的变形迅速增大，有明显的破坏预兆。破坏时受压区混凝土达到受压强度。由此可见，配置钢筋后，钢筋混凝土梁的承载力比素混凝土梁大大提高，受力性能得到显著的改善，钢筋与混凝土两种材料的强度都能得到较充分的利用。

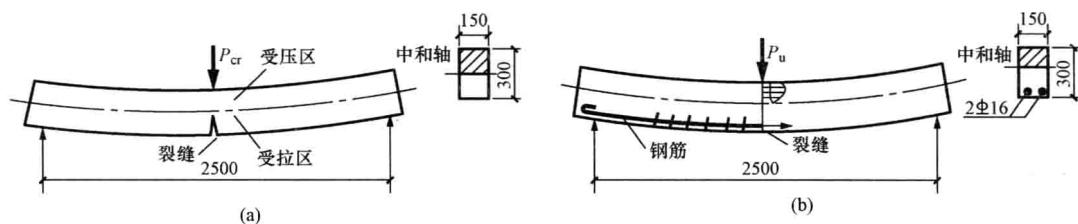


图 1-2 混凝土简支梁的破坏
(a) 素混凝土简支梁；(b) 钢筋混凝土简支梁

钢筋和混凝土两种材料的物理力学性能大不相同，两者能够结合在一起共同工作并能有效地承担外荷载的原因是：①钢筋与混凝土之间有良好的黏结力，在荷载作用下，可以保证两者能够协调变形，共同受力；②钢筋和混凝土两种材料的温度线膨胀系数很接近（钢筋为

$1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，混凝土为 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ），当温度变化时，两者间不会因产生过大的相对变形而致使黏结力遭到破坏；③钢筋的弹性模量约为混凝土的 6~10 倍，在共同变形时，钢筋应力约为混凝土应力的 6~10 倍，因此使钢筋的强度能够得到充分发挥。

钢筋混凝土结构在土木工程中的应用十分广泛，除了这种结构能够很好地利用钢筋和混凝土各自的材料性能外，还具有以下优点：

(1) 强度高。与砌体、木结构相比，混凝土材料强度很高；与钢结构相比，其用钢量则要少得多，在一定条件下可以替代钢结构，达到节约钢材、降低工程造价的目的。

(2) 耐久性好。钢筋与混凝土具有良好的化学相容性，混凝土属于碱性性质，会在钢筋表面形成一层氧化膜，有效地保护钢筋，在一般环境下钢筋不会产生锈蚀，且混凝土的强度随时间的推移还会有所增加，所以其耐久性好，几乎无需保养和维修。

(3) 耐火性好。钢筋被包在混凝土内，在遭受火灾时，钢筋不会很快因升温而软化，故比钢、木结构的耐火性好。

(4) 可模性好。混凝土可根据设计需要浇筑成各种形状和尺寸的结构，特别适宜于建造外形复杂的大体积结构、曲线形的梁和拱以及空间薄壁结构。这一特点是砖石、钢、木等结构所不能代替的。

(5) 整体性好。现浇式或装配整体式的钢筋混凝土结构整体性好，有利于抗震及防爆。

(6) 就地取材。钢筋混凝土所用的材料除少量的钢筋和水泥外，绝大部分材料是石子和砂，它们的产地普遍，可就地取材，减少材料运输费用，显著降低工程造价。

钢筋混凝土结构也存在一些缺点，主要有：

(1) 自重较大。钢筋混凝土的容重为 $24 \sim 25 \text{ kN/m}^3$ ，属于自重较大的材料。

(2) 抗裂性差。普通钢筋混凝土结构，在正常使用阶段往往是带裂缝工作的，虽不影响承载力，但对防渗漏的结构，如某些水工混凝土结构很不利。由于裂缝会引起漏水，将影响结构物的正常使用功能；同时裂缝的存在会导致钢筋锈蚀，影响结构物的耐久性。

(3) 施工比较复杂，工序多，施工时间长。冬季施工和雨天施工困难，需采取必要的措施以保证工程质量。

(4) 耗费模板较多。浇筑钢筋混凝土需要使用模板，如采用木模板，则要消耗大量的木材。

(5) 损伤补强困难。混凝土结构一旦被损伤，其修复、加固比较困难，原有强度也难恢复。

随着科学技术的发展，这些缺点正在得到克服和改善。如采用轻质高强混凝土可减轻结构的自重；采用预应力混凝土结构可较好地解决开裂问题；采用预制装配式构件可节约模板，加快施工进度，施工不受季节气候的影响；采用粘贴碳纤维布、粘钢或植筋技术，可解决加固、补强的问题。

1.2 混凝土结构的应用

1824 年，英国人阿斯普丁发明硅酸盐水泥，这种水泥结硬以后很像英国波特兰岛上的石料，因而被称之为波特兰水泥。1850 年，法国人朗波制造了第一艘钢筋混凝土小船。1872 年，在纽约建造了第一座钢筋混凝土房屋，混凝土结构开始在工程中实际应用，和砖

石结构、钢木结构相比,它的历史并不长,但发展非常迅速,已成为现代工程建设中应用最广泛的结构之一。混凝土结构的应用范围如下:

(一) 房屋建筑工程

在房屋建筑工程中,多层住宅、办公楼、教学楼等大多采用砌体结构作为竖向承重构件,但其楼板和屋面板几乎全部采用预制钢筋混凝土楼板或现浇钢筋混凝土楼盖;多层厂房一般采用现浇钢筋混凝土梁、板、柱框架结构;高层或小高层住宅则大多采用钢筋混凝土剪力墙结构;单层工业厂房多采用预制钢筋混凝土基础、柱、屋架或屋面梁以及大型屋面板;高层和超高层建筑采用钢筋混凝土体系更是获得很大发展。目前,采用钢筋混凝土结构体系建造的高度位于前列的高层建筑主要有:马来西亚石油双塔楼,88层,高452m;香港中环广场大厦,78层,高374m;广州中天广场大厦,80层,高322m,美国芝加哥双咨询大楼,64层,高303m;上海金茂大厦,88层,高421m,正方形框筒结构,内筒混凝土墙厚850mm,外围为钢管混凝土柱和钢柱。

(二) 桥梁工程

在桥梁工程中,中小跨度桥梁绝大部分采用钢筋混凝土结构建造。拱桥方面,我国混凝土拱桥建设居世界领先地位。1996年建成的广西邕宁邕江拱桥,跨度为312m,采用钢管混凝土做骨架浇筑成混凝土箱形截面,钢管不外露,为劲性混凝土结构;1997年建成的四川万县长江大桥,也是采用钢管混凝土做骨架浇筑成的三室单箱截面上承式拱桥,跨长420m。刚架桥方面,1997年建成通车的我国虎门大桥由东引桥、主桥、中引桥、辅航道桥和西引桥组成,其中辅航道桥为两座单桥组成,都为单室单箱预应力混凝土连续刚架桥,行车道宽14.25m,跨度达到270m。斜拉桥方面,虽然采用钢悬索或钢制斜拉索,但其桥墩、塔桥和桥面仍都采用钢筋混凝土结构。1993年建成通车的上海杨浦组合斜拉桥,主跨602m,采用混凝土面板与钢加劲大梁共同工作;1997年建成的香港青马大桥,跨度1377m,桥体为悬索结构,支承悬索的两端塔高203m,为钢筋混凝土结构;1997年建成的江阴长江大桥,主跨1385m。

(三) 水利工程

在水利工程中,水利枢纽中的水电站、拦洪坝、引水渡槽、污水排灌管也大都采用混凝土结构。世界最高的重力坝为瑞士大狄克桑斯坝,高285m;我国大坝建设也已达到国际先进水平,长江三峡水利枢纽大坝为重力坝,高度190m,设计装机容量1860万kW,为世界上最大的水利发电站。四川二滩双曲拱坝于1998年建成投产,坝高242m,装机容量330kW;黄河小浪底水利枢纽中小浪底大坝高154m,主体工程混凝土用量达269万 m^3 。我国还将建造高度达290m的四川溪洛渡及其他高坝,已经开工的南水北调工程是一项跨世纪的宏伟工程,沿线建有很多预应力混凝土渡槽、混凝土水闸等。

(四) 隧道工程

在隧道工程中,新中国成立以来修建了2500km长的铁道隧道,其中成昆铁路线中就有隧道427座,总长341km,占线路长度的31.5%;到2007年修建公路隧道4673座,总长2555.5km。2009年建成的上海长江隧道长8.9km;北京、上海、天津、广州、南京等城市已建或在建的地铁以及穿越长江的江底隧道大多采用盾构法和预制钢筋混凝土构件衬砌施工技术。

（五）特种结构

如电线杆、烟囱、水塔、筒仓、储水池、储罐、电视塔、核电站反应堆安全壳、近海采油平台等也多用混凝土结构建造。山西云岗建成两座预应力混凝土煤仓，容量6万t；日本建成的地下液化天然气储罐容量已达20万 m^3 ；由于滑模施工技术的发展，许多高耸建筑可以采用混凝土结构，宁波北仑火力发电厂建有高度达270m的筒中筒烟囱；加拿大多伦多电视塔，高553.3m，上海东方明珠电视塔由三个钢筋混凝土筒体组成独特造型，高468m。

随着对混凝土和钢材性能的深入研究和电子计算机的应用，各种高强混凝土、轻质混凝土和高强钢筋正得到迅速发展。由于将电子计算机、有限元法和现代化的测试技术引入到钢筋混凝土的理论和试验研究中来，使得钢筋混凝土的计算理论和设计方法正日趋完善，并向更高阶段发展，钢筋混凝土结构的应用跨度和高度都将不断增加。

1.3 本课程的主要内容、任务和学习方法

本课程包括设计原理和结构设计两部分内容，主要介绍混凝土结构中常用材料的力学性能和结构设计方法，并较全面地介绍钢筋混凝土结构构件设计原理和结构设计。内容包括：钢筋混凝土的材料、结构计算原则、钢筋混凝土基本构件（受弯、受剪、受拉、受扭和受压构件）承载力的计算、钢筋混凝土构件的变形和裂缝宽度验算及耐久性、预应力混凝土构件、钢筋混凝土现浇楼盖设计、钢筋混凝土单层厂房和多层框架结构等。本课程的基本框架如图1-3所示。

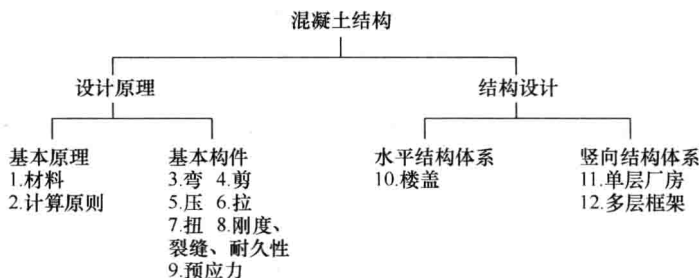


图1-3 内容的基本框架

本课程的教学目的是使学生通过课程的学习，能熟知相关的基础概念，掌握混凝土结构的基本理论和知识，学会结构设计计算的方法，并在学习过程中逐步熟悉并正确运用我国颁布的一些设计规范和设计规程。熟悉结构计算的基本方法步骤、掌握混凝土结构的基本构件及楼盖的设计计算。能对结构构件进行截面设计、承载力复核，包括材料选择、结构方案、构件选型、配筋计算和构造等，通过本课程的学习和课程设计等实践性教学环节，使学生初步运用这些理论知识正确进行课程设计（钢筋混凝土现浇楼盖设计）和解决工程中实际问题。

在学习混凝土结构课程时，应该注意以下一些问题。

（1）混凝土结构构件的基本理论和计算方法是建立在科学实验的基础上的。但由于材料物理力学性能的复杂性，目前还没有建立起完善的强度理论，因此对实验的依赖性就更强。所以，学习过程中要重视构件的实验研究，了解实验中的规律现象，理解建立公式时所采用

的基本假定的实验依据,应用公式时要注意适用范围和限制条件。因此除课堂学习以外,还要加强实验的教学环节,以进一步理解学习内容和训练实验的基本技能。当有条件时,可进行简支梁正截面受弯承载力、斜截面受剪承载力、偏心受压短柱正截面受压承载力的实验。

(2) 本课程不仅要解决构件强度和变形的计算问题,而且要进一步解决构件的设计问题,包括结构方案、构件选型、材料选择、配筋构造和施工方案等综合性问题。对同一问题,往往有多种可能的方案或解决办法,需综合考虑使用要求、材料供应、施工条件和经济效益等各种因素,从中选择较优的方案。要注意培养对多种因素进行综合分析的能力。

(3) 本课程的特点是内容多、符号多、系数多、计算公式多、构造规定多,学习时要深刻理解重要的概念,熟练掌握设计计算的基本功,切忌死记硬背、生搬硬套,要突出重点并注意难点的学习。本课程的知识还需要课后动手练习来帮助巩固加以理解,教材的每一章最后提供一定数量的思考题和习题,可供学生选用。习题应在复习了教学内容、搞懂例题后再动手做,切忌边做题边看例题。习题的正确答案往往不是唯一的,这也是本课程与一般的数学、力学课程的不同之处。本课程的实践性很强,应经常到附近的建筑工地去看一看,用尺子量一量,对结构和构件增加感性认识。有条件的话,可以结合具体工程,运用学过的知识,复核一下构件结构设计是否安全、经济。

(4) 本课程还要学习有关规范。为了贯彻国家的技术经济政策,保证设计质量,国家颁布的各种设计规范和设计规程,反映了我国几十年来混凝土结构方面的科技进步和丰富的工程经验。在学习过程中要很好地熟悉、掌握和运用这些规范,并应注意各行业规范的异同点,做到精一通多。

(5) 构造要求是长期科学实验和工程实践经验的总结,是对计算必不可少的补充,在设计结构和构件时,计算和构造同样重要,因此,要充分重视对构造要求的学习,并注意理解构造原理。

混凝土结构是一门发展很快的应用科学,学习时要注意它的新动向和新成就,不断扩大知识面。

思 考 题

- 1-1 何谓混凝土结构?
- 1-2 何谓素混凝土结构?
- 1-3 何谓钢筋混凝土结构?
- 1-4 何谓钢骨混凝土结构?
- 1-5 何谓钢管混凝土结构?
- 1-6 何谓预应力混凝土结构?
- 1-7 何谓纤维混凝土结构?
- 1-8 在混凝土构件中配置一定形式和数量的钢筋有哪些作用?
- 1-9 钢筋混凝土结构是由两种物理力学性质不同的材料组成的,为什么能共同工作?
- 1-10 简述钢筋混凝土结构的优缺点及混凝土结构的应用范围。
- 1-11 混凝土结构是何时开始出现的?

第2章 钢筋和混凝土材料的力学性能

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，熟悉和掌握钢筋和混凝土两种材料的力学性能及其相互间的作用是合理选择结构形式、正确进行结构设计、确定构造措施的基础，也是获得良好经济效果的前提。本章主要讲述钢筋和混凝土在不同受荷方式下的强度和变形性能，以及二者间的相互作用。

2.1 钢 筋

2.1.1 钢筋的品种分类和级别

混凝土结构中所采用的钢筋有柔性钢筋和劲性钢筋。通常所称的钢筋为柔性钢筋，包括钢筋和钢丝；劲性钢筋由型钢组成。

钢筋的品种很多，按钢筋的外形分为光面钢筋和变形钢筋两大类，如图 2-1 所示。光面钢筋的表面呈光圆形，表面光滑无花纹，如图 2-1 (a) 所示。变形钢筋的外形一般轧制成螺旋纹、人字纹和月牙纹。螺旋纹和人字纹钢筋统称等高肋钢筋，如图 2-1 (b)、(c) 所示。月牙纹钢筋称为月牙肋钢筋，如图 2-1 (d) 所示。前两者因在其表面纵向和斜向的凸缘处有较大的应力集中，故目前已不生产。

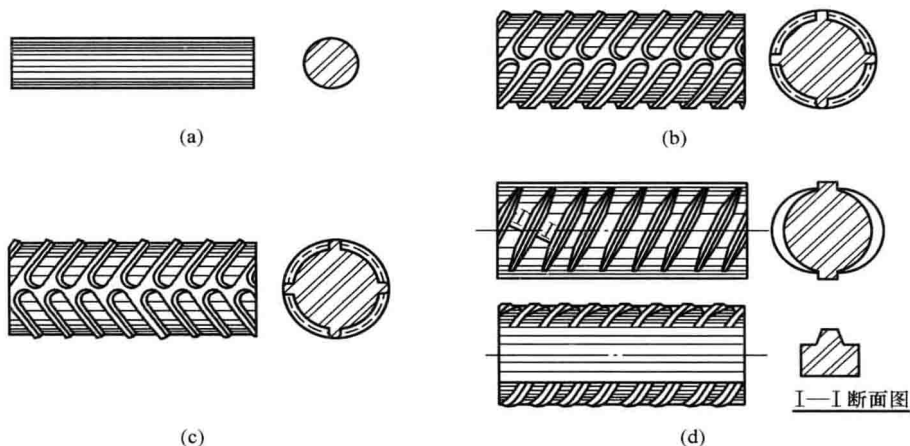


图 2-1 钢筋的形式

(a) 光面钢筋；(b) 螺旋纹钢筋；(c) 人字纹钢筋；(d) 月牙纹钢筋

混凝土结构中所采用的钢材按其化学成分的不同，又可分为碳素钢和普通低合金钢。碳素钢的化学成分以铁为主，还含少量的碳、硅、锰、硫、磷等元素。碳素钢按其含碳量的多少可分为低碳钢（含碳量 $<0.25\%$ ）、中碳钢（含碳量 $0.25\%\sim0.6\%$ ）和高碳钢（含碳量 $0.6\%\sim1.4\%$ ）。碳素钢的强度随含碳量增加而提高，但塑性和韧性随之降低，可焊接性变差。普通低合金钢是在碳素钢已有成分中再加入少量的合金元素，如锰、硅、钒、钛、铬

等,加入这些元素后可有效地提高钢材的强度,改善塑性和可焊接性能。

钢筋和钢丝按生产和加工工艺的不同,分为热轧钢筋、中强度预应力钢丝、消除应力钢丝、钢绞线、预应力螺纹钢筋、热处理钢筋和冷加工钢筋。

(一) 热轧钢筋

热轧钢筋是经热轧成型并自然冷却的成品钢筋,由低碳钢、普通低合金钢在高温状况下轧制而成的,用于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主要是热轧钢筋,分为热轧光圆钢筋和热轧带肋钢筋两种。根据对强度、延性、连接方式、施工适应性的不同要求,可选用下列牌号的钢筋:

(1) 普通纵向受力钢筋宜采用 HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500 钢筋;也可采用 HRB335、HRBF335、HPB300 和 RRB400 钢筋;

(2) 普通箍筋宜采用 HRB400、HRBF400、HRB500、HRBF500 钢筋;也可采用 HRB335、HRBF335 和 HPB300 钢筋。

(二) 中强度预应力钢丝和消除应力钢丝

中强度预应力钢丝是由优质高碳钢经冷拔和热处理而成的抗拉强度很高的钢丝。按外形分为光圆钢丝、刻痕钢丝和螺旋肋钢丝三种。光圆钢丝的表面经过机械刻痕处理后称为刻痕钢丝,如图 2-2 (a) 所示;经轧制成螺旋肋的,则称为螺旋肋钢丝,如图 2-2 (b) 所示。锚固性能很差的刻痕钢丝不再列入《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)。消除应力钢丝按外形分为光圆钢丝和螺旋肋钢丝两种。

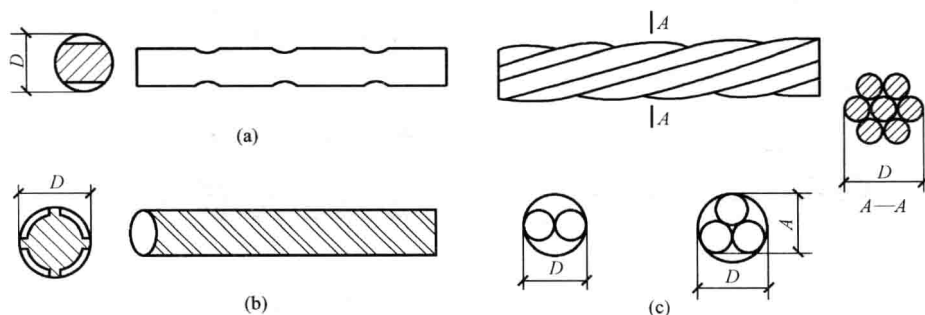


图 2-2 钢丝和钢绞线

(a) 刻痕钢丝; (b) 螺旋肋钢丝; (c) 钢绞线

(三) 钢绞线

钢绞线是由多根高强钢丝捻制在一起经过低温回火处理内应力后而制成,分为 2 股、3 股和 7 股三种,如图 2-2 (c) 所示。

(四) 预应力螺纹钢筋

预应力混凝土用螺纹钢筋,也称精轧螺纹钢筋。它是一种特殊形状带有不连续的外螺纹的直条钢筋,该钢筋在任意截面处,均可以用带有内螺纹的连接器或锚具进行连接或锚固,如图 2-3 所示。

(五) 热处理钢筋

热处理钢筋是利用热轧钢筋的余热进行淬火,再中温回火等调质工艺处理的钢筋。热处理钢筋的延性、可焊性、机械连接性能及施工适应性均较差,须在钢筋产品标准修订后明确延性

指标并控制使用范围。可在基础、大体积混凝土以及跨度和荷载不大的楼板、墙体中应用。应用很少的预应力热处理钢筋不再列入《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)。

(六) 冷加工钢筋

冷加工钢筋是由热轧钢筋或盘条经冷拉、冷拔、冷轧、冷扭加工而成,对钢筋进行冷加工的目的是为了提高强度、节约钢材。冷加工后,其塑性和伸长率却随之降低和减小,钢材产生硬化,易造成脆性断裂。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)未列入冷加工钢筋,使用时应遵照专门规程。

中强度预应力钢丝、消除应力钢丝、钢绞线和预应力螺纹钢筋是用于预应力混凝土结构的预应力筋。

劲性钢筋是由各种型钢或型钢与钢筋焊成的骨架。用劲性钢筋浇筑的混凝土称为劲性混凝土,由于劲性钢筋本身刚度很大,施工时可由劲性钢筋承担模板和混凝土自重及施工荷载,可节省支架,加快施工进度。

2.1.2 钢筋的强度和变形

用于混凝土结构的钢筋可分为两类:一类是有明显流幅的钢筋,如热轧钢筋;另一类是没有明显流幅的钢筋,如钢丝、钢绞线和精轧螺纹钢筋。

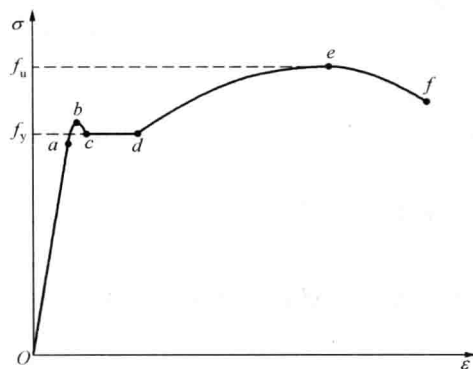


图 2-4 有明显流幅钢筋的应力—应变曲线

(一) 有明显流幅钢筋

有明显流幅钢筋拉伸时的典型应力—应变曲线如图 2-4 所示。钢筋自开始加载至应力达到 a 点之前,应力 σ 与应变 ϵ 成线性关系,即 $\sigma = E_s \epsilon$, E_s 为钢筋的弹性模量, a 点对应的应力称为比例极限。过 a 点以后,应变比应力增加得要快,应力到达 b 点后,应变出现塑性流动现象, b 点称为屈服上限,它与加载速度、断面形式、试件表面光洁度等因素有关,故 b 点是不稳定的;待应力下降至屈服下限 c 点时,应力不增加而应变急剧增加,应力—应变关系接近水平直线,延伸至 d 点, c 点到 d 点的水平距离的大小称为流幅或屈服台阶。有明显流幅的热轧钢筋屈服强度是以屈服下限 c 点为依据的。过 d 点以后,随应变的增加,应力又继续增加,二者关系为一上升的曲线,至 e 点应力达到最大值, e 点的应力称为钢筋的抗拉强度或极限强度, de 段称为强化阶段。过 e 点以后,试件薄弱处的截面将会突然显著缩小,称为局部颈缩现象,此时,应力随之降低,变形迅速增加,直至达 f 点试件被拉断。

屈服强度是作为钢筋强度的设计依据。这是因为钢筋的应力达到屈服强度后,将产生很大的塑性变形,且卸载后塑性变形不可恢复,这会使钢筋混凝土构件出现很大的变形和不可闭合的裂缝,以致无法使用。由于屈服上限不稳定,一般取屈服下限作为钢材的屈服强度。

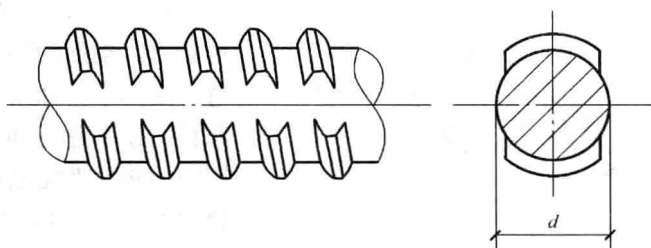


图 2-3 精轧螺纹钢筋

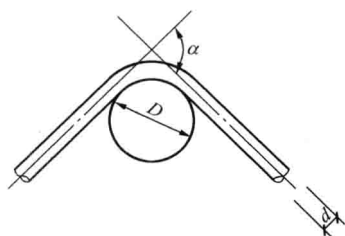


图 2-5 钢筋的冷弯
 α —冷弯角度； D —辊轴直径

钢筋除需有足够的强度外，还应具有一定的塑性变形能力。钢筋的塑性变形通常以钢筋试件的伸长率和冷弯性能两个指标来衡量。钢筋拉断后的伸长量与拉伸前原长的比率称为伸长率，用 δ_5 、 δ_{10} 表示；伸长率越大，钢筋的塑性性能越好。冷弯是将直径为 d 的钢筋围绕直径为 D ($D=1d$ 或 $D=3d$) 的钢辊进行弯折，如图 2-5 所示，在达到规定的冷弯角度 α (90° 或 180°) 时，不能出现裂纹或断裂。钢筋所绕钢辊直径 D 越小，弯

转角度 α 越大，则该钢筋的塑性性能就越好。

热轧钢筋的应力—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，塑性好，能给出构件即将破坏的预兆，并且使钢筋加工成型时不发生断裂。而钢材中含碳量越高，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。

(二) 无明显流幅的钢筋

无明显流幅钢筋拉伸时的典型应力—应变曲线如图 2-6 所示。最大应力 σ_b 称为极限抗拉强度； a 点为比例极限，约为 $0.65\sigma_b$ ；过 a 点之后，应力—应变呈非线性关系，产生一定的塑性变形，但整个应力—应变关系没有明显的流幅（屈服台阶），达到极限抗拉强度 σ_b 后很快被拉断。

对于无明显流幅的钢筋，在设计中，一般取残余应变为 0.2% 时所对应的应力作为钢筋的强度取值，通常称为条件屈服强度或名义屈服强度，用 $\sigma_{0.2}$ 表示。对于消除应力钢丝、中强度预应力钢丝及钢绞线筋，《混凝土结构设计规范》取条件屈服强度为 $0.85\sigma_b$ 。预应力螺纹钢筋的条件屈服强度根据产品国家标准《预应力混凝土用螺纹钢筋》(GB/T 20065—2006) 确定。

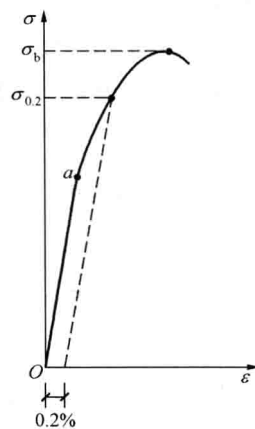


图 2-6 无明显流幅钢筋的
应力—应变曲线

无明显流幅的钢筋，其强度很高，但伸长率小，塑性较差，破坏前没有明显的预兆，呈脆性破坏。

屈服强度、抗拉强度、伸长率和冷弯性能是有明显屈服点钢筋进行质量检验的四项主要指标，对无明显屈服点的钢筋则只测定后三项。

(三) 钢筋的强度标准值

由于材料性能的离散性，即使是同一炉钢生产的同一批次钢筋，每根钢筋的强度也不可能完全相同。为保证设计时材料强度取值的可靠性，一般对同一等级的材料，取具有一定保证率的强度值作为该等级强度的标准值。《混凝土结构设计规范》规定材料强度的标准值应具有不小于 95% 的保证率，即

$$f_{sk} = f_{sm} - 1.645\sigma = f_{sm}(1 - 1.645\delta) \quad (2-1)$$

式中 f_{sk} ——材料强度标准值；

f_{sm} ——该批材料强度的平准值；

σ ——该批材料强度的标准差；

δ ——该批材料强度的变异系数。