

总主编 罗固源

混凝土结构设计原理

(24)

主 编 朱彦鹏

副主编 蒋丽娜 张玉新



重庆大学出版社

混凝土结构设计原理

主 编 朱彦鹏

副主编 蒋丽娜 张玉新



重庆大学出版社

内 容 提 要

本书内容主要包括钢筋混凝土材料的力学性能,弯、剪、拉、压、扭等基本构件的承载力计算,变形和裂缝宽度验算以及预应力混凝土构件的计算等。另外,还对公路混凝土与预应力混凝土基本构件等承载力计算和正常使用极限状态验算方法进行了简介,以适应土木工程专业学习需要。

本书根据新编国家标准《混凝土结构设计规范》(GB50010—2001)(报批稿)以及《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ023—85)编写,可作为本科土木工程专业的教材,也可供土木、水利工程设计、施工等专业技术工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计原理/朱彦鹏主编. —重庆:重庆大学出版社,2002.2

土木工程专业本科系列教材

ISBN 7-5624-2382-2

I. 混... II. 朱... III. 混凝土结构—结构设计—高等学校—教材 IV. TU370.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 067511 号

混凝土结构设计原理

主编 朱彦鹏

责任编辑 彭宁

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆华林印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:23 字数:574千

2002年2月第1版 2002年2月第1次印刷

印数:1—6 000

ISBN 7-5624-2382-2/TU·81 定价:29.00元

前言

《混凝土结构设计原理》是土木工程专业重要的专业基础课,本次编写按照《混凝土结构设计规范》(GB50010—2001)(报批稿)和《建筑设计统一标准》、《荷载规范》等规范编写,并考虑了路桥知识模块,对《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》的内容进行了简单的介绍,以适应土木工程专业拓宽专业面的需要。

《混凝土结构设计原理》共 10 章内容,按照新课程体系和课程内容的分工,将荷载与结构设计方法作为一门课程,另编教材与本书配套出版,因此本书未编入荷载与结构设计方法的内容。本书主编为朱彦鹏,副主编为蒋丽娜、张玉新。参加本书编写的有朱彦鹏(第 1 章绪论;第 5 章受压构件的承载力计算;第 10 章混凝土结构按我国《公路桥涵规范》的设计原理)、蒋丽娜(第 9 章预应力混凝土构件)、张玉新(第 6 章受拉构件承载力计算;第 8 章钢筋混凝土构件的变形、裂缝及混凝土结构的耐久性)、卿立成和王龙(第 2 章钢筋混凝土材料的物理力学性能)、李耕勤(第 7 章受扭构件扭曲截面的受扭承载力计算)、李世春和张贵文(第 4 章受弯构件斜截面的承载力计算)、刘剑峰、朱彦鹏、张贵文(第 3 章受弯构件正截面的承载力计算)。本书部分图由李春燕绘制,杨文侠、史艳莉录入部分文字。全书由朱彦鹏、王松泉统稿。

由于编写时间仓促,加之编者水平有限,错误之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编者

2001 年 7 月 25 日

目录

第1章 绪论	(1)
1.1 混凝土结构的一般概念	(1)
1.2 混凝土结构的发展及应用概况	(3)
1.3 学习本课程应注意的问题	(5)
第2章 钢筋混凝土材料的物理力学性能	(6)
2.1 钢筋	(6)
2.2 混凝土	(11)
2.3 钢筋混凝土的粘接	(22)
2.4 高强混凝土物理力学性能简介	(27)
思考题	(28)
第3章 受弯构件正截面承载力的计算	(29)
3.1 概述	(29)
3.2 梁板结构的一般构造	(29)
3.3 梁正截面受弯承载力的试验研究	(33)
3.4 正截面承载力计算的基本假定及应用	(39)
3.5 单筋矩形截面正截面受弯承载力计算	(43)
3.6 双筋矩形截面的正截面受弯承载力计算	(48)
3.7 T形截面受弯构件的正截面受弯承载力计算	(55)
思考题	(60)
习题	(62)
第4章 受弯构件斜截面承载力的计算	(67)
4.1 概述	(67)
4.2 剪跨比及梁沿斜截面受剪的破坏形态	(68)
4.3 斜截面受剪破坏的机理及主要因素	(70)
4.4 斜截面受剪承载力的计算公式与适用范围	(75)
4.5 斜截面受剪承载力计算的方法和步骤	(81)

4.6 保证斜截面受弯承载力的构造措施	(85)
4.7 梁内钢筋的构造要求	(87)
思考题	(93)
习题	(94)
第5章 受压构件的承载力计算	(96)
5.1 受压构件的一般构造	(97)
5.2 轴心受压构件正截面受压承载力计算	(98)
5.3 偏心受压构件正截面的受力过程和破坏形态	(106)
5.4 偏心受压构件的纵向弯曲影响	(109)
5.5 偏心受压构件正截面承载力的一般计算公式	(112)
5.6 不对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面承载力的 计算	(115)
5.7 对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面承载力的计算	(124)
5.8 对称配筋工字形截面偏心受压构件正截面承载力的 计算	(128)
5.9 正截面承载力 N_u-M_u 相关曲线及其应用	(132)
5.10 双向偏心受压构件正截面承载力的计算	(134)
5.11 偏心受压构件斜截面受剪承载力的计算	(138)
思考题	(140)
习题	(140)
第6章 受拉构件承载力的计算	(142)
6.1 轴向受拉构件正截面承载力的计算	(142)
6.2 偏向受拉构件正截面承载力的计算	(143)
思考题	(147)
习题	(147)
第7章 受扭构件扭曲截面的受扭承载力的计算	(149)
7.1 纯扭构件的试验研究	(150)
7.2 矩形截面纯扭构件扭曲截面的受扭承载力计算	(152)
7.3 弯剪扭构件的承载力计算	(161)
7.4 受扭构件的配筋构造要求	(169)
思考题	(170)
习题	(170)
第8章 钢筋混凝土构件的变形、裂缝及混凝土结构的耐久性	(171)

8.1 钢筋混凝土受弯构件的挠度验算	(171)
8.2 钢筋混凝土构件的裂缝宽度验算	(181)
8.3 钢筋混凝土构件的截面延性	(188)
8.4 混凝土结构的耐久性	(190)
思考题	(200)
习题	(201)
第9章 预应力混凝土构件	(202)
9.1 预应力混凝土的基本概念	(202)
9.2 张拉控制应力与预应力损失	(215)
9.3 后张法构件端部锚固区的局部承压验算	(225)
9.4 预应力混凝土轴心受拉构件的计算	(229)
9.5 预应力混凝土受弯构件的计算	(244)
9.6 部分预应力混凝土及无粘接预应力混凝土结构简述 ..	(275)
9.7 预应力混凝土构件的构造要求	(291)
思考题	(295)
习题	(297)
第10章 混凝土结构按我国《公路桥涵规范》的设计原理	(301)
10.1 半概率极限状态设计法及其在《公路桥涵规范》中 的应用	(301)
10.2 受弯构件正截面与斜截面强度的计算	(308)
10.3 受压构件正截面强度计算	(312)
10.4 受拉构件正截面强度的计算	(315)
10.5 钢筋混凝土受弯构件的应力、裂缝与变形验算	(316)
10.6 预应力钢筋混凝土构件计算	(318)
《公路桥涵规范》中的主要术语与符号	(344)
附表	(349)
参考文献	(358)

第 1 章

绪 论

1.1 混凝土结构的一般概念

1.1.1 结构的分类、本课程的研究对象

在土木工程中,由建筑材料筑成,能承受荷载而起骨架作用的构架称为工程结构,简称结构。按应用领域分,结构可分为建筑结构、桥梁结构、水电结构和其他特种结构。从材料种类分,可分为混凝土结构、钢结构、木结构、砌体结构以及组合结构等。

本书主要是依据我国《混凝土结构设计规范》(GB50010),研究混凝土结构和预应力混凝土结构中各种基本构件的强度、刚度和抗裂度设计问题。

1.1.2 钢筋混凝土结构的基本概念

混凝土是应用很广的一种土木工程材料,由建筑材料课程学习得知,混凝土结硬后如同石料,可以认为是一种人造石材,它具有和石料相同的特点,其抗压强度很高,而抗拉强度却很低。这就决定了素混凝土和天然石材一样,只适用于以受压为主的构件,对于受拉构件、受弯构件、受扭构件和偏心受压构件,由于拉应力的存在,则在荷载很小的情况下,由于受拉区断裂而破坏,如图 1.1(b)所示的素混凝土梁。但是如果在受拉区沿拉应力方向配置钢筋,形成钢筋混凝土构件,构件受力就会显示出另一种新的受力情况。

与混凝土材料不同的是钢筋的抗拉强度很高,而抗压受到截面尺寸的限制容易失稳。为了充分利用这两种材料的特点,将混凝土和钢筋两种材料结合在一起,让钢筋主要承受拉力,而让混凝土主要承受压力,如图 1.1(c)钢筋混凝土梁。另外由于钢筋的抗压强度也很高,在混凝土中由于克服了稳定性问题,故在受压区中也能发挥很好的作用,例如钢筋混凝土柱中的钢筋则能承受较大的压力。

当混凝土受拉区配置了适量的钢筋,一旦受拉区混凝土开裂,裂缝截面处的受拉混凝土虽然不能继续承受拉力,但是此力可由受拉钢筋来承受(图 1.1(c)),因此钢筋混凝土梁不会像素混凝土梁那样发生脆性破坏。而且在受拉区混凝土开裂后还可以继续增加荷载直至钢筋应力达到屈服强度,并使受压区混凝土的抗压强度也得到充分利用,这样会使梁的承载能力大大提高。由此可见,将这两种性能极不相同的材料结合在一起共同工作,使其发挥各自抗拉、抗压强度的特长将会使梁具有较高的承载能力和较好的经济效益。但是这两种不同性质材料能否共同工作又是人们关心的问题,实践证明这两种材料是能够有效结合在一起共同工作的,它

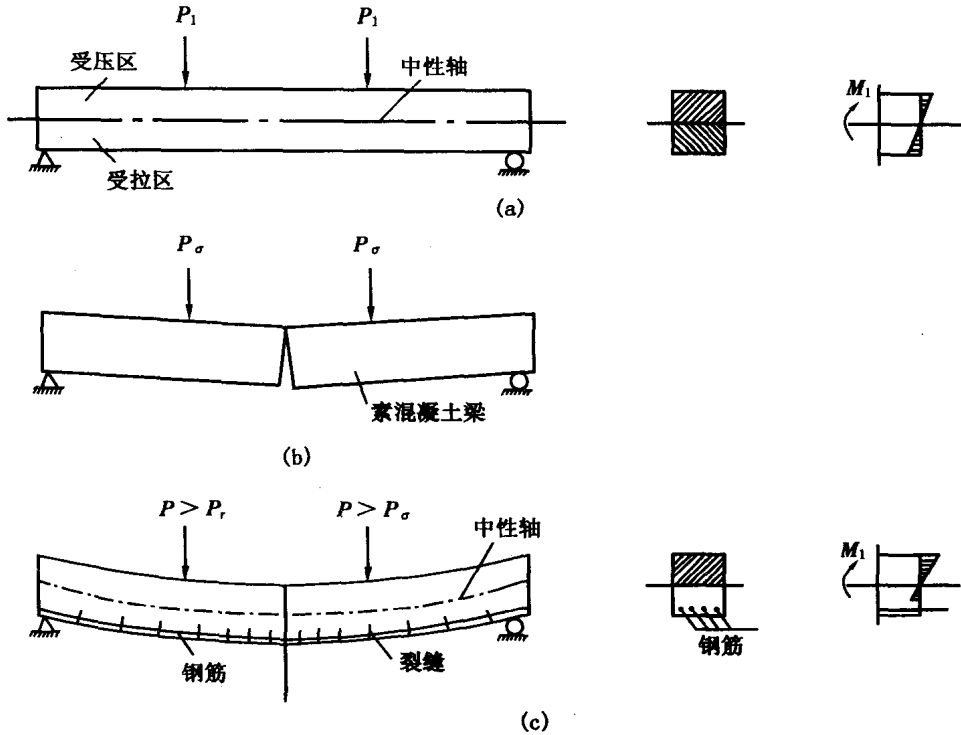


图 1.1 素混凝土梁和钢筋混凝土梁的受力破坏情况

们能够结合在一起共同工作的基础主要基于以下两点：

①钢筋和混凝土两种材料的线膨胀系数相近。钢材为 1.2×10^{-5} ，混凝土 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}$ 。当温度变化时，两种材料不会产生较大的相对变形而使两种材料之间的粘接应力受到破坏。

②钢筋混凝土结构中的钢筋和混凝土之间存在粘接力，由于粘接力的存在使二者结为整体，在荷载的作用下能共同工作，协调变形。

1.1.3 混凝土结构的主要优缺点

钢筋混凝土结构除具有良好的共同工作性能外，还具有如下优点：

合理用材：钢筋混凝土结构合理地利用了钢筋和混凝土两种不同材料的受力性能，使混凝土和钢筋的强度得到了充分的发挥，特别是现代预应力混凝土应用以后，在更大的范围内取代钢结构，降低了工程造价。

耐久性好：与钢结构相比钢筋混凝土结构有较好的耐久性，它不需要经常的保养与维护。在钢筋混凝土结构中，钢筋被混凝土包裹而不致锈蚀，另外混凝土的强度还会随时间增长而略有提高，故钢筋混凝土有较好的耐久性。对于在有侵蚀介质存在的环境中工作的钢筋混凝土结构，可根据侵蚀的性质合理地选用不同品种的水泥，可达到提高耐久性的目的。一般，火山灰水泥和矿渣水泥抗硫酸盐侵蚀的能力很强，可在有硫酸盐腐蚀的环境中使用，另外矿渣水泥抗碱腐蚀的能力也很强，则可用于碱腐蚀的环境中。

耐火性好：相对钢结构和木结构而言，钢筋混凝土结构具有较好的耐火性。在钢筋混凝土结构中，由于钢筋包裹在混凝土里面而受到保护，火灾时钢筋不至于很快达到流塑状态使结构

整体破坏。

整体性好:相对砌体结构而言,钢筋混凝土结构具有较好的整体性,适用于抗震、抗爆结构。另外钢筋混凝土结构刚性较好,则受力后变形小。

容易取材:混凝土所用的砂、石料可就地取材。另外还可以将工业废料如矿渣、粉煤灰用于混凝土当中。

具有可模性:可根据建筑、结构等方面的要求将钢筋混凝土结构浇注成各种形状和尺寸。

由于钢筋混凝土结构具有许多优点,现已成为世界各地建筑、道路桥梁、机场、码头和核电站等工程中应用最广的工程材料。

混凝土结构除了具有以上优点外,还存在以下主要缺点:

结构自重大:混凝土和钢筋混凝土结构的重力密度一般为 23kN/m^3 和 25kN/m^3 ,由于钢筋混凝土结构截面尺寸大,所以对大跨度结构、高层抗震结构都是不利的。应发展高强高性能混凝土、预应力混凝土以减小钢筋混凝土结构截面尺寸,采用轻骨料混凝土以减轻结构自重。

抗裂性能差:混凝土抗拉强度很低,一般构件都有拉应力存在,配置钢筋以后虽然可以提高构件的承载力,但抗裂能力提高很少,因此在使用阶段构件一般是带裂缝工作的,这对构件的刚度和耐久性都带来不利的影响。施加预应力可克服此缺点。

费工费模:现浇的钢筋混凝土结构费工时较多,且施工受季节气候条件的限制。模板耗费用量大,若采用木模,则耗费大量的木材。目前大多采用工具式钢模,效果较好。

1.2 混凝土结构的发展及应用概况

1.2.1 混凝土结构的发展概况

混凝土结在 19 世纪初期开始得到应用,它与石、砖、木、钢结构相比是相当年轻的,但是在这短短的 100 多年中,作为一种土木工程材料,在土木工程各个领域取得了飞速的发展和广泛的应用。到 1910 年,德国混凝土委员会,奥地利混凝土委员会,美国混凝土学会,英国混凝土学会等相继建立,从而促进了混凝土理论和应用的明显进步。到 1920 年就已先后建造了许多混凝土建筑物、桥梁和液体容器,开始进入了直线形和圆形预应力钢筋混凝土结构的新时代。

1824 年发明了波特兰水泥,此后大约在 19 世纪 50 年代,钢筋混凝土开始被用来建造各种简单的楼板、柱、基础等。随着生产的需要,促进了人们对钢筋混凝土性能的实验,开展计算理论的探讨和施工方法的改进,进入 20 世纪以后,钢筋混凝土结构有了较快的发展,许多国家陆续建造了一些建筑、桥梁、码头和堤坝。20 世纪 30 年代,钢筋混凝土开始应用于空间结构,如薄壳、折板,在这期间预应力混凝土结构也得到了广泛的研究与应用。第二次世界大战以后,重建城市的任务十分繁重,必须加快建设速度,于是加速了钢筋混凝土结构工业化施工方法的发展,工厂生产的预制构件也得到了较广泛的应用,由于混凝土和钢筋材料强度不断提高,钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构的应用范围也在不断向大跨和高层发展。目前,钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构已应用到土木工程的各个领域,成了一种主要的土木工程结构。

从计算理论上,最初混凝土结构的内力计算和截面承载力设计都是按照弹性方法进行的。到了 20 世纪 30 年代,截面设计方法由弹性算法改进为按破损阶段算法。20 世纪 50

年代,随着对钢筋混凝土的进一步研究和生产经验的积累,以及将数理统计方法用于结构设计中,于是出现了极限状态设计法。

我国在 50 年代初期,钢筋混凝土的计算理论由按弹性方法的允许应力计算法过渡到考虑材料塑性的按破损阶段设计法。随着科学研究的深入和经验的积累,于 1966 年颁布了按多系数极限状态计算的设计规范《钢筋混凝土结构设计规范》(BJG21—66)。1970 年起又提出了单一安全系数极限状态设计法,并于 1974 年正式颁布了《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ10-74),1991 年我国又颁布了近似全概率的可靠度极限状态设计法国家规范《混凝土结构设计规范》(GBJ11-89),2002 年又将颁布全面修改后的《混凝土结构设计规范》(GB50010)

1.2.2 混凝土结构在土木工程中的应用概况

目前钢筋混凝土结构应用已经到了一个较高的水平,从工程实践、理论研究和新材料的应用都有了较快的发展。

钢筋和混凝土均向高强度发展。工程上已大量使用了 C80 ~ C100 强度等级的混凝土,而试验室配置出的最高强度已达 266 N/mm^2 。国外预应力钢筋趋向于采用高强度、大直径、低松弛钢材。如热轧钢筋的屈服强度达到 $600 \sim 900 \text{ N/mm}^2$ 。为了减轻自重,各国都在发展各种轻质混凝土,如加气混凝土、陶粒混凝土等,其重力密度一般为 $14 \sim 18 \text{ kN/m}^3$,强度可达 50 N/mm^2 。为了改善混凝土的工作性能,国内外正在研究和应用在混凝土中加入掺合料以满足各种工程的特定要求,如纤维混凝土、聚合物混凝土等。

在工程实践方面,国外在建筑工业化方面发展较快,已从一般的构件标准设计向工业化建筑体系发展。推广梁板合一、墙柱合一的结构,如盒子结构体系、大型壁板体系等。工程应用上,目前,美国芝加哥水塔广场大厦是世界上混凝土最高建筑,76 层,总高 262m;我国广州国际大厦是目前普通混凝土最高建筑,62 层(地下 2 层),总高 197.2m;休斯顿贝壳广场大厦,52 层,总高 215m,是轻混凝土世界最高建筑;另外,德国修建的预应力轻骨料混凝土飞机库屋盖结构跨度达 90m;日本浜名大桥,采用预应力混凝土箱形截面桥梁跨度超过 240m;俄罗斯和加拿大分别建成了 533m 及 549m 高的预应力混凝土电视塔。所有这些都显示了近代钢筋混凝土结构设计和施工水平日新月异的迅速发展。

1.2.3 混凝土结构的发展展望

随着人们对混凝土的深入研究,钢筋混凝土结构在土木工程领域必将得到更广泛的应用。目前,钢管混凝土结构、钢骨混凝土结构和钢-混凝土组合结构的应用更加开拓了混凝土的使用范围。美国混凝土学会 2000 年委员会设想,在近期使混凝土的性质获得飞跃发展,把混凝土的拉、压强度比从目前的 $1/10$ 提高到 $1/2$,并且具有早强、收缩徐变小的特性。同时还预言,未来将会建造 $600 \sim 900 \text{ m}$ 的钢筋混凝土建筑,跨度达 $500 \sim 600 \text{ m}$ 的钢筋混凝土桥梁,以及钢筋混凝土海上浮动城市、海底城市、地下城市等。

1.3 学习本课程应注意的问题

钢筋混凝土结构是一门综合性较强的应用学科。它的发展需综合运用数学、力学、材料科学和施工技术等成就,并涉及许多领域,以建立自己完整的设计理论、结构体系和施工技术。近年来,由于电子计算机技术及现代化的测试技术等新的科学技术成就被逐渐用于钢筋混凝土学科的研究中来,促使这门学科的面貌发生了巨大的变化,并逐渐向新的更高的阶段发展。

本课程主要是研究钢筋和混凝土的材性,钢筋混凝土基本构件的弯曲、剪切、扭曲、受压、受拉的强度设计问题,以及构件的变形和裂缝问题,另外还研究预应力构件的强度和刚度问题。为了学好这门课程,学习时应注意下列问题:

①与先修课程之间的联系。学习本课程前应修完材料力学、建筑材料、荷载与结构设计方法等课程。这些课程与钢筋混凝土结构有必然的联系但有很大的不同。我们所学过的材料力学是研究线弹性基本构件内力和变形问题(图 1.1(a)),而钢筋混凝土结构原理是一门非线性复合材料力学,既有材料非匀质、非线性问题,又有两种材料的复合问题。原来在材料力学中学过的各种解决问题的思路可以借鉴,而计算理论和计算公式不能照搬,但可以互相对比以加深理解。

由于混凝土受力的复杂性,目前还没有建立起比较完整的混凝土强度理论。钢筋混凝土构件和结构是由两种材料组合而成,其受力性能受材料内部组成和外部因素(荷载、环境等)影响,因此钢筋混凝土构件的计算理论和计算公式有很多是根据实验研究得出的半理论半经验公式,对初学者往往不易接受。它不像学习高等数学、材料力学、结构力学等课程时,它们的计算原理和计算公式是根据较系统而严密的数学、力学逻辑运算推导而得。而本课程学习时会感到“理论性不强”、影响因素太多、杂乱而抓不住重点。因此学习时要特别注意,由于钢筋混凝土构件的计算公式是建立在实验的基础上,故应注意它的适用范围和条件。

②由于钢筋混凝土构件是由混凝土和钢筋两种力学性能相差很大的材料所组成,因此存在着选定两种材料的不同强度等级和两种材料所用数量多少的配比问题,而这种配比可由设计者自行确定。因此对相同荷载、同一构件,就可以设计出多个均能满足使用要求的解答,也即是问题的解答不是惟一的。这和数学、力学习题的解答不相同。正是由于材料的配比具有选择性,因此当比值超过了一定的范围就会引起构件受力性能的改变。为了防止构件出现非预期的破坏状态,往往对钢筋混凝土构件的计算公式规定出它们的适用条件,有时还规定出某些构造措施来保证。故在学习时不能忽视这些规定。

③钢筋混凝土结构是一门综合性的应用学科,需要满足安全、适用、经济以及施工方便等方面的要求。这些要求一方面可通过分析计算来满足,另一方面还应通过各种构造等来保证。这些构造措施或是计算模型误差的修正,或是实验研究的成果,或是长期工程实践经验的总结,它们同分析计算同为本学科中重要的组成部分。学习时对构造要求,应加强理解,通过反复应用来掌握。

④本课程是实践性很强的一门课,学习时除阅读教材外,还应了解有关规范,完成有关习题和课程设计。认真进行设计计算并绘制必要的配筋图。通过实践熟悉设计方法和构造措施。

第 2 章

钢筋混凝土材料的物理力学性能

钢筋混凝土结构由钢筋和混凝土组成,而组成材料的力学性能截然不同。由于混凝土的抗拉强度很低,容易开裂,在结构的受拉部位配置钢筋,就能有效地利用钢筋较高的抗拉强度以及混凝土较高的抗压强度。为了合理进行混凝土结构设计,需要深入了解混凝土结构及其组成材料的受力性能。对混凝土和钢筋的力学性能、相互作用和共同工作的了解,是掌握混凝土构件性能、分析设计的基础。

下面将讨论钢筋和混凝土的强度与变形性能,以及相互作用和共同工作的性能。介绍现行《混凝土结构设计规范》(GB50010)的设计原理。

2.1 钢 筋

2.1.1 钢筋的品种与级别

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。目前我国生产的热轧钢筋分为 HPB235 级、HRB400 级、HRB335 级和 RRB400 级,其主要力学性能见附表 6~12。HPB235 级钢筋属低碳钢筋,强度低,外形为光面钢筋,它与混凝土粘接强度较低,主要用作板的受力钢筋,梁、柱的箍筋及构造钢筋。HRB400 级和 HRB335 级和 RRB400 级钢筋均为合金钢,外形为月牙纹钢筋(见图 2.1),变形钢筋由于表面凹凸不平,与混凝土有较好的机械咬合作用,具有较高的粘接强度。HRB400 级和 HRB335 级钢筋一般用作普通混凝土结构中的受力钢筋和预应力混凝土结构中的非预应力钢筋。

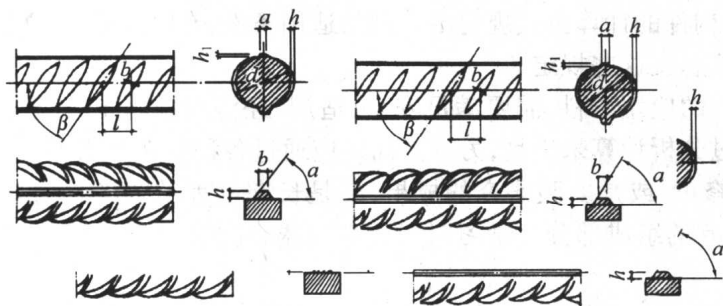


图 2.1 月牙纹钢筋

按照钢筋的直径大小,可分为钢筋和钢丝。常用钢筋直径(mm): 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 35 和 40, 光面钢筋的截面面积按直径计算,变形钢筋根据标称直径按圆面积计算确定。钢丝常用的直径有 2.5mm, 3mm, 4mm 和 5mm 等几种,预应力混凝土构件可采用较细的钢丝组成的钢绞线。

市面上供应的常用热轧钢筋有盘圆钢筋(直径 6mm、8mm)和单根钢筋(直径 10mm 或更粗的钢

筋)。

非热轧钢筋由强度的大小来反映它的用途,较高强度的钢筋常用于预应力混凝土构件中的预应力钢筋,一般强度的钢筋用作普通混凝土的受力钢筋或构造钢筋。

2.1.2 钢筋的强度与变形

钢筋的强度与变形可通过拉伸试验曲线 σ - ϵ 关系说明,有的钢筋有明显流幅(如图 2.2);有的钢筋没有明显的流幅(如图 2.3)。一般的混凝土构件常用有明显流幅的钢筋,没有明显流幅的钢筋主要用在预应力混凝土构件上。

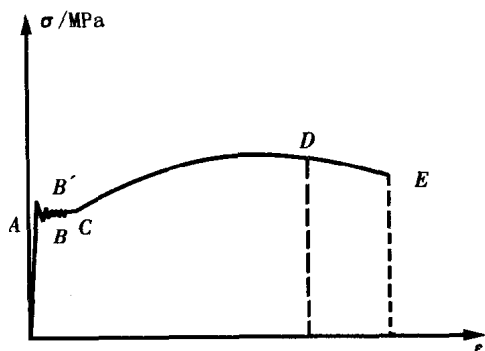


图 2.2 有明显流幅钢筋的 σ - ϵ 曲线

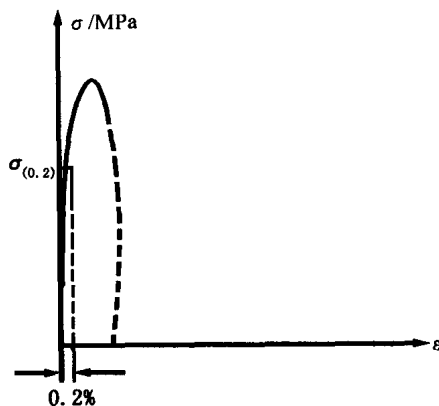


图 2.3 无明显流幅钢筋的 σ - ϵ 曲线

图 2.2 所示为有明显流幅的典型拉伸应力-应变关系曲线(σ - ϵ 曲线)。A 点以前 σ 与 ϵ 成线性关系, AB' 段是弹塑性阶段,一般认为 B' 点以前应力和应变接近为线性关系, B' 点是不稳定的(称为屈服上限)。 B' 点以后曲线降到 B 点(称为屈服下限),这时相应的应力称为屈服强度 f_y 。在 B 点以后应力不增加而应变急剧增长,钢筋经过较大的应变到达 C 点,一般 HPB235 级钢的 C 点应变是 B 点应变的十几倍。过 C 点后钢筋应力又继续上升,但钢筋变形明显增大,钢筋进入强化阶段。钢筋应力达到最高应力 D 点, D 点相应的峰值应力 f_u 称为钢筋的极限抗拉强度。 D 点以后钢筋发生颈缩现象,应力开始下降,应变增加,到达 E 点时钢筋被拉断。 E 点相对应的钢筋平均应变 δ 称为钢筋的延伸率。

有明显流幅钢筋的受压性能通常是用短粗钢筋试件在试验机上测定的。应力未超过屈服强度以前应力-应变关系与受拉时基本相重合,屈服强度与受拉时基本相同。在达到屈服强度后,受压钢筋也将在压应力不增长情况下产生明显的塑性压缩,然后进入强化阶段。这时试件将越压越短并产生明显的横向膨胀,试件被压得很扁也不会发生材料破坏,因此很难测得极限抗压强度。所以,一般只做拉伸试验而不做压缩试验。

从图 2.2 的 σ - ϵ 关系曲线中可以得出 3 个重要参数:屈服强度 f_y 、抗拉强度 f_u 和延伸率 δ 。在钢筋混凝土构件设计计算时,对有明显流幅的钢筋,一般取屈服强度 f_y 作为钢筋强度的设计依据,这是因为钢筋应力达到屈服后将产生很大的塑性变形,卸载后塑性变形不可恢复,使钢筋混凝土构件产生很大变形和不可闭合的裂缝。设计上一般不用抗拉强度 f_u 这一指标,抗拉强度 f_u 可度量钢筋的强度储备。延伸率 δ 反映了钢筋拉断前的变形能力,它是衡量钢筋塑性的一个重要指标,延伸率 δ 大的钢筋在拉断前变形明显,构件破坏前有足够的预兆,属于延

性破坏;延伸率 δ 小的钢筋拉断前没有预兆,具有脆性破坏的特征。

没有明显流幅的钢筋拉伸 σ - ϵ 曲线如图 2.3 所示。当应力很小时,具有理想弹性性质;应力超过 $\sigma_{0.2}$ 之后钢筋表现出明显的塑性性质,直到材料破坏时曲线上没有明显的流幅,破坏时它的塑性变形比有明显流幅钢筋的塑性变形要小得多。对无明显流幅钢筋,在设计时一般取残余应变的 0.2% 相对应的应力 $\sigma_{0.2}$ 作为假定的屈服点,称为“条件屈服强度”。由于 $\sigma_{0.2}$ 不易测定,故极限抗拉强度就作为钢筋检验的惟一强度指标, $\sigma_{0.2}$ 大约为极限抗拉强度的 0.8 倍。

2.1.3 钢筋应力-应变关系的数学模型

为了便于结构设计和进行理论分析,需对 σ - ϵ 曲线加以适当简化,对不同性能的钢筋建立与拉伸试验应力-应变关系尽量吻合的模型曲线。常用的有以下 3 种:

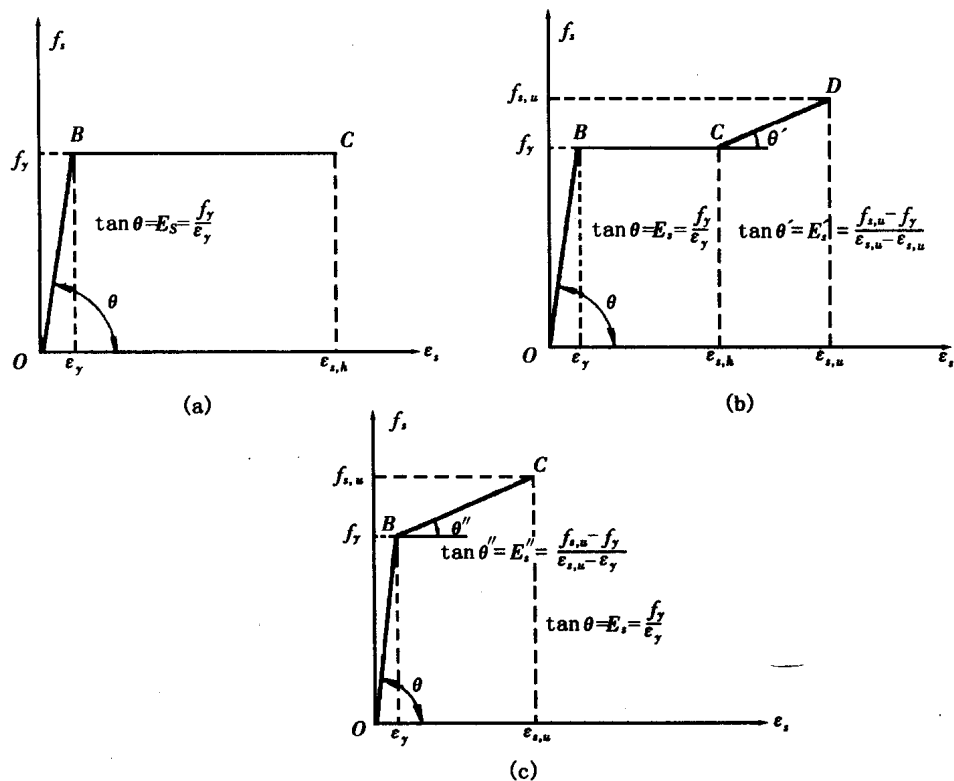


图 2.4 钢筋应力-应变关系曲线(σ - ϵ 曲线)的数学模型

(a)双直线 (b)三折线 (c)双斜线

(1) 双直线(理想弹塑性模型)

将钢筋 σ - ϵ 曲线简化为两根直线,如图 2.4(a)所示。这个模型适用于流幅较长的低强度钢筋, OB 段为完全弹性阶段, B 点为屈服下限, B 点相应的应力和应变分别为 f_y 和 ϵ_y , 弹性模量 E_s 为 OB 段的斜率。 BC 段为完全塑形阶段, C 点为应力强化阶段的起点, C 点相对应的应变为 $\epsilon_{s,h}$ 。过 C 点以后,认为钢筋变形过大不能正常使用。数学表达式为:

$$\text{当 } \epsilon_s \leq \epsilon_y \text{ 时,} \quad \sigma_s = E_s \epsilon_s \quad (E_s = \frac{f_y}{\epsilon_y}) \quad (2.1)$$

$$\text{当 } \epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{s,h} \text{ 时,} \quad \sigma_s = f_y \quad (2.2)$$

(2) 三折线

将钢筋 σ - ϵ 曲线简化为 3 根直线,如图 2.4(b)所示。这个模型适用于流幅较短的钢筋。它是在双直线模型的基础上加上一段强化阶段组成。过了 C 点以后,认为钢筋仍能工作,且表现出硬化性能。到达 D 点时拉应力达到极限值 $f_{s,u}$,相应的应变为 $\epsilon_{s,u}$,即认为钢筋破坏。其数学表达式为:

当 $\epsilon_s \leq \epsilon_{s,h}$ 时,表达式同式(2.1)和式(2.2);

当 $\epsilon_{s,h} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{s,u}$ 时, $\sigma_s = f_y + (\epsilon_s - \epsilon_{s,h}) \tan \theta'$, 可以取 $\tan \theta' = 0.01 E_s$ 。 (2.3)

(3) 双斜线

对于没有明显流幅的高强度钢筋或钢丝的 σ - ϵ 曲线模型可采用双斜线,如图 2.4(c)所示。 B 点应力为条件屈服强度, C 点应力为极限抗拉强度 $f_{s,u}$,相应的应变为 $\epsilon_{s,u}$,其数学表达式为:

当 $\epsilon_s \leq \epsilon_y$ 时, $\sigma_s = E_s \epsilon_s$ ($E_s = \frac{f_y}{\epsilon_y}$) (2.1)

当 $\epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{s,u}$ 时, $\sigma_s = f_y + (\epsilon_s - \epsilon_y) \tan \theta''$ (2.4)

式中

$$\tan \theta'' = \frac{f_{s,u} - f_y}{\epsilon_{s,u} - \epsilon_y}$$

2.1.4 钢筋的冷加工性能

为了提高钢筋的强度,节约钢材,可对钢筋进行冷加工。冷拉和冷拔是钢筋冷加工的常用方法。

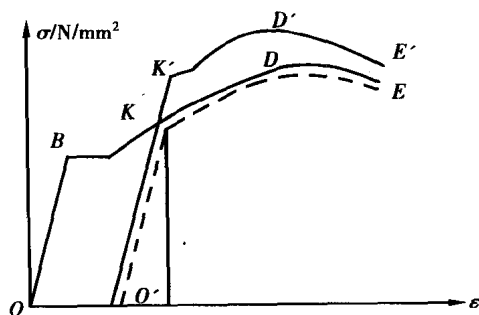


图 2.5 钢筋冷拉后的拉伸 σ - ϵ 曲线

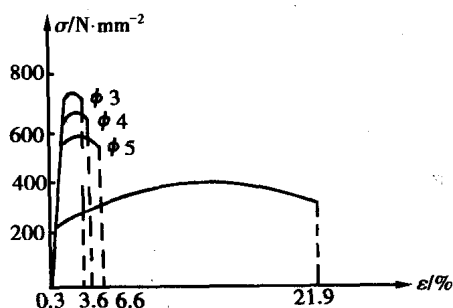


图 2.6 冷拔低碳钢丝受拉的 σ - ϵ 曲线

(1) 冷拉

冷拉是将热轧钢筋的冷拉应力值先超过屈服强度,如图 2.5 所示的 K 点。然后卸载,在卸载过程中, σ - ϵ 曲线沿着直线 KO' ($KO' \parallel BO$) 回到 O' 点,这时钢筋产生残余变形 OO' 。如果立即重新张拉, σ - ϵ 曲线将沿着 $O'KDE$ 变化,这时拉伸曲线将沿 $O'KDE$ 。如果停留一段时间后再进行张拉,则 σ - ϵ 曲线沿着 $O'KK'D'E'$ 变化,屈服点从 K 提高到 K' 点,这种现象称为时效硬化。温度对时效硬化影响很大,例如 HPB235 级钢在常温情况下 20 天完成时效硬化,若温度为 100°C 时仅需两小时完成时效硬化,但如继续加温可能得到相反的效果。为了使钢筋冷拉时效后,既能显著提高强度,又使钢材具有一定的塑性,应合理选择张拉控制点 K , K 点对应的应力称为冷拉控制应力, K 点对应的应变称为冷拉率。冷拉工艺分为控制应力和控制应

变(冷拉率)两种方法。

需要注意的是:对钢筋进行冷拉只能提高它的抗拉屈服强度,不能提高它的抗压屈服强度。

(2)冷拔

冷拔是把热轧光面钢筋用强力拉过比钢筋直径还小的拔丝模孔,迫使钢筋截面减小、长度增大,使内部组织结构发生变化,强度大为提高,但脆性增加。钢筋一般需要经过多次冷拔,逐渐减小直径、提高强度,才能成为强度明显高于母材的钢丝。图 2.6 所示冷拔低碳钢丝受拉的 σ - ϵ 曲线,经冷拔后的钢丝没有明显的屈服点,它的屈服强度一般取条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 。

冷拔既可以提高钢筋的抗拉强度,也可以提高其抗压强度。

2.1.5 混凝土结构对钢筋性能的要求

(1)强度

强度是指钢筋的屈服强度和抗拉强度。屈服强度 f_y 是设计计算的主要依据,对无明显屈服点钢筋的屈服强度取条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 。采用高强度钢筋可以节约钢材,取得较好的经济效果。抗拉强度 f_u 不是设计强度依据,但它也是一项强度指标,抗拉强度愈高,钢筋的强度储备愈大,反之则强度储备愈小。提高使用钢筋强度的方法,除采用市场上有供给的较高强度钢筋外,还可以对钢筋进行冷加工获得较高强度钢筋,但应保证一定的强屈比(抗拉强度与屈服强度之比),使结构有一定的可靠性潜力。

(2)塑性

塑性是指钢筋在受力过程中的变形能力,混凝土结构要求钢筋在断裂前有足够的变形,使结构在将要被破坏前有明显的预兆。塑性指标是要求伸长率 δ_5 (或 δ_{10}) 满足要求和冷弯性能合格来衡量的。伸长率 δ_5 和 δ_{10} 分别表示标距 $L=5d$ 和 $L=10d$ 的伸长率;冷弯性能是以冷弯试验来判断的,冷弯试验是将直径为 d 的钢筋绕直径为 D 的钢辊,弯成一定角度而不发生断裂就表示合格。钢筋的 f_y 、 f_u 、 δ_5 (或 δ_{10}) 和冷弯性能是施工单位验收钢筋是否合格的 4 个主要指标。

(3)可焊性

在一定的工艺条件下要求钢筋焊接后不产生裂纹及过大的变形,保证钢筋焊接后的接头性能良好。对于冷拉钢筋的焊接,应先焊接好以后再进行冷拉,这样可以避免高温使冷拉钢筋软化,丧失冷拉作用。

(4)与混凝土的粘接力

钢筋与混凝土的粘接力是保证钢筋混凝土构件在使用过程中,钢筋和混凝土能共同作用的主要原因。钢筋的表面形状及粗糙程度对粘接力有重要的影响。

另外,在寒冷地区,为了避免钢筋发生低温冷脆破坏,对钢筋的低温性能也有一定要求。