

全国高等院校土木与建筑专业创新规划教材



混凝土结构 设计原理

苏 骏 白应华 主 编
许惠敏 李 扬 余佳力 副主编

赠送
电子课件



清华大学出版社

全国高等院校土木与建筑专业创新规划教材

内容简介

本书可作为高等院校土木与建筑专业创新规划教材，也可供从事土木与建筑工作的工程技术人员参考。本书共分五章，第一章为绪论，第二章为混凝土结构设计的基本原理，第三章为混凝土结构设计的基本原理，第四章为混凝土结构设计的基本原理，第五章为混凝土结构设计的基本原理。

混凝土结构设计原理

苏 骏 白应华 主 编

许惠敏 李 扬 余佳力 副主编

ISBN 7-302-10500-0

清华大学出版社
社址：北京清华大学学研大厦A座
邮编：100084
电话：(010) 62770175
网址：http://www.tup.tsinghua.edu.cn

封面设计：清华大学出版社
印刷：清华大学出版社
发行：清华大学出版社
经销：清华大学出版社

清华大学出版社
社址：北京清华大学学研大厦A座
邮编：100084
电话：(010) 62770175
网址：http://www.tup.tsinghua.edu.cn

清华大学出版社

北京

10-000000-01

内 容 简 介

本书为土木工程专业的学科基础课教材,主要讲述混凝土结构基本构件的受力性能和设计计算方法,内容包括绪论,混凝土结构材料的物理力学性能,受弯构件正截面承载力的计算,受弯构件斜截面承载力的计算,受扭构件承载力的计算,轴心受力构件正截面承载力的计算,偏心受力构件承载力的计算,钢筋混凝土构件变形、裂缝和耐久性,预应力混凝土结构构件。

本书是根据最新修订的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)和相关的规范、规程的内容编写,对混凝土结构构件的性能及分析有充分的论述,有相当数量的计算例题并给出了明确的计算方法和详细的设计步骤,每章有学习目标、小结、思考题和习题等内容。本书可作为普通高等院校土木工程专业的教材,也可作为土木工程技术人员参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。
版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计原理/苏骏,白应华主编. —北京:清华大学出版社,2017
(全国高等院校土木与建筑专业创新规划教材)
ISBN 978-7-302-46979-7

I. ①混… II. ①苏… ②白… III. ①混凝土结构—结构设计—高等学校—教材 IV. ①TU370.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 101488 号

责任编辑:张丽娜 桑任松

装帧设计:刘孝琼

责任校对:周剑云

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62791865

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:15.25 字 数:368 千字

版 次:2017 年 10 月第 1 版 印 次:2017 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00 元

产品编号:059920-01

前 言

“混凝土结构设计原理”是土木工程专业重要的学科基础课之一，本书的编写是根据高等学校土木工程专业的培养目标和要求，贯彻土木工程专业指导委员会新制定的“土木工程专业指导规范”的精神，在培养学生综合运用知识的能力和创新意识的同时，注重理论联系实际，建立用工程概念解决实际工程问题，培养土木工程师应有的基本素质。

本书是依据新修订的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)和新修订的其他相关规范、标准编写的，反映了我国混凝土结构在土木工程领域的新进展，本书共分为 9 章，主要内容包括：混凝土结构材料的物理力学性能，钢筋混凝土受弯、受压、受拉构件正截面和斜截面承载力计算，混凝土构件裂缝、变形控制和耐久性，预应力混凝土结构构件等。为了便于高等学校土木工程专业学生和广大土木工程技术人员学习，本书编写时力求重点突出、语言通俗易懂、内容深入浅出、例题完整、注重实用。每章末有一定数量的思考题和习题，以便通过这些题目理解所学内容，检查学习效果。

参加本书编写的人员有：苏骏(编写第 1 章、第 2 章)、颜岩(编写第 3 章)、许惠敏(编写第 4 章)、李扬(编写第 5 章、第 8 章)、余佳力(编写第 6 章、第 7 章)、白应华(编写第 9 章)。本书由苏骏教授、白应华副教授担任主编，许惠敏、李扬、余佳力担任副主编。

由于编者的水平有限，对新修订的规范学习理解不够，书中难免出现不妥和疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 绪论	1
1.1 混凝土结构的基本概念和特点	1
1.1.1 混凝土结构的基本概念	1
1.1.2 混凝土结构的特点	2
1.2 混凝土结构的发展概况	3
1.2.1 混凝土结构的发展过程	3
1.2.2 材料	3
1.2.3 结构	4
1.2.4 计算理论	4
1.3 本课程的特点与学习方法	4
本章小结	5
思考题	5
第2章 混凝土结构材料的物理力学性能	6
2.1 钢筋	6
2.1.1 钢筋的品种和级别	6
2.1.2 钢筋的强度与变形	7
2.1.3 钢筋的疲劳	10
2.1.4 混凝土结构对钢筋性能的要求	10
2.2 混凝土	11
2.2.1 单轴向应力状态下的混凝土强度	11
2.2.2 复合应力状态下混凝土的强度	15
2.2.3 混凝土的变形	16
2.3 钢筋与混凝土的黏结	22
2.3.1 黏结的作用与性质	22
2.3.2 黏结力的测定	22
2.3.3 黏结力的组成	23
2.3.4 钢筋的锚固长度	24
本章小结	25
思考题	26

第3章 受弯构件正截面承载力的计算	27
3.1 概述	27
3.2 受弯构件构造要点	27
3.2.1 钢筋混凝土板的构造规定	28
3.2.2 钢筋混凝土梁的构造规定	29
3.3 受弯构件正截面受力性能试验研究	31
3.3.1 试件设计和加载程序	31
3.3.2 梁的受力破坏三个阶段	32
3.3.3 梁的正截面破坏特征	33
3.4 受弯构件正截面承载力计算公式	34
3.4.1 基本假定	34
3.4.2 基本计算公式	36
3.4.3 公式适用条件	37
3.5 按正截面受弯承载力的设计计算	38
3.5.1 单筋矩形截面	38
3.5.2 双筋矩形截面	40
3.5.3 T形截面	44
本章小结	48
思考题	49
习题	49
第4章 受弯构件斜截面承载力的计算	51
4.1 概述	51
4.2 受弯构件的受剪性能	52
4.2.1 无腹筋梁的受剪性能	52
4.2.2 有腹筋梁的受剪性能	56
4.2.3 影响斜截面受剪承载力的主要因素	58
4.3 斜截面受剪承载力的计算	59
4.3.1 基本假定	59
4.3.2 斜截面受剪承载力的计算公式	60

4.3.3 计算公式的适用范围.....	62	受拉承载力计算.....	103
4.3.4 计算截面的位置.....	63	6.1.3 轴心受拉构件构造要求.....	103
4.3.5 计算步骤.....	64	6.2 轴心受压构件正截面承载力计算.....	104
4.3.6 计算例题.....	65	6.2.1 普通箍筋柱轴心受压构件的 受力性能.....	105
4.4 保证斜截面受弯承载力的构造措施.....	70	6.2.2 普通箍筋柱的正截面受压 承载力计算.....	107
4.4.1 斜截面受弯承载力计算.....	70	6.2.3 普通箍筋柱轴心受压构件 构造要求.....	107
4.4.2 抵抗弯矩图及绘制方法.....	71	6.2.4 螺旋箍筋柱的正截面受力 性能和承载力计算.....	109
4.4.3 纵筋的弯起.....	73	本章小结.....	112
4.4.4 纵筋的截断.....	75	思考题.....	112
4.5 受弯构件中钢筋的构造要求.....	76	习题.....	113
4.5.1 纵筋的锚固.....	76	第7章 偏心受力构件承载力的计算.....	114
4.5.2 箍筋的构造要求.....	77	7.1 偏心受压构件的构造要求.....	114
4.5.3 架立钢筋及纵向构造钢筋.....	78	7.1.1 截面形式.....	114
本章小结.....	78	7.1.2 材料.....	115
思考题.....	79	7.1.3 纵向钢筋.....	115
习题.....	79	7.1.4 箍筋.....	115
第5章 受扭构件承载力的计算.....	82	7.2 偏心受压构件正截面的受力性能.....	116
5.1 概述.....	82	7.2.1 偏心受压短柱破坏形态.....	116
5.2 纯扭构件的试验研究分析.....	83	7.2.2 附加偏心距 e_a 和 初始偏心距 e_i	118
5.2.1 无腹筋构件.....	83	7.2.3 偏心受压长柱的受力性能.....	118
5.2.2 有腹筋构件.....	84	7.3 矩形截面偏心受压构件正截面 受压承载力计算公式.....	120
5.3 纯扭构件承载力的计算.....	85	7.3.1 大偏心受压构件.....	120
5.3.1 开裂扭矩的计算.....	85	7.3.2 小偏心受压构件.....	121
5.3.2 纯扭构件的承载力计算.....	86	7.4 矩形截面非对称配筋偏心受压 构件设计.....	122
5.3.3 弯剪扭构件承载力的计算.....	90	7.4.1 大、小偏心受压的判别.....	123
5.3.4 受扭构件计算公式的适用 条件及构造要求.....	95	7.4.2 截面设计.....	123
5.3.5 设计例题.....	96	7.4.3 截面复核.....	134
本章小结.....	99	7.5 矩形截面对称配筋偏心 受压构件设计.....	139
思考题.....	100	7.5.1 基本公式及适用条件.....	139
习题.....	100	7.5.2 大、小偏心的判别.....	141
第6章 轴心受力构件正截面 承载力的计算.....	102		
6.1 轴心受拉构件正截面承载力计算.....	102		
6.1.1 轴心受拉构件正截面的 受力性能.....	103		
6.1.2 轴心受拉构件正截面			

7.5.3	截面设计	141
7.5.4	截面复核	142
7.6	I 形截面对称配筋偏心受压构件设计	145
7.6.1	基本公式及适用条件	145
7.6.2	大、小偏心受压的判别条件	147
7.6.3	截面设计	147
7.6.4	截面复核	148
7.7	偏心受压构件的 N_u-M_u 相关曲线	148
7.7.1	矩形截面对称配筋偏心受压构件的 N_u-M_u 相关曲线方程	148
7.7.2	N_u-M_u 相关曲线的意义	149
7.8	偏心受拉构件正截面受力性能和承载力计算	149
7.8.1	偏心受拉构件的破坏形态	149
7.8.2	偏心受拉构件的正截面承载力计算公式	150
7.8.3	偏心受拉构件截面设计	151
7.9	偏心受力构件斜截面承载力	154
7.9.1	验算截面尺寸	154
7.9.2	斜截面受剪承载力	154
	本章小结	155
	思考题	156
	习题	157

第 8 章 钢筋混凝土构件的变形、裂缝和耐久性

8.1	概述	158
8.2	混凝土受弯构件的挠度验算	159
8.2.1	验算公式	159
8.2.2	f_{max} 的计算方法	159
8.2.3	例题	165
8.3	混凝土构件的裂缝宽度验算	167
8.3.1	验算公式	167
8.3.2	w_{max} 的计算方法	168
8.3.3	例题	175
8.4	混凝土结构的耐久性	176

8.4.1	混凝土结构耐久性的概念	176
8.4.2	影响混凝土结构耐久性的因素	176
8.4.3	耐久性设计的有关规定	178
	本章小结	181
	思考题	181
	习题	181

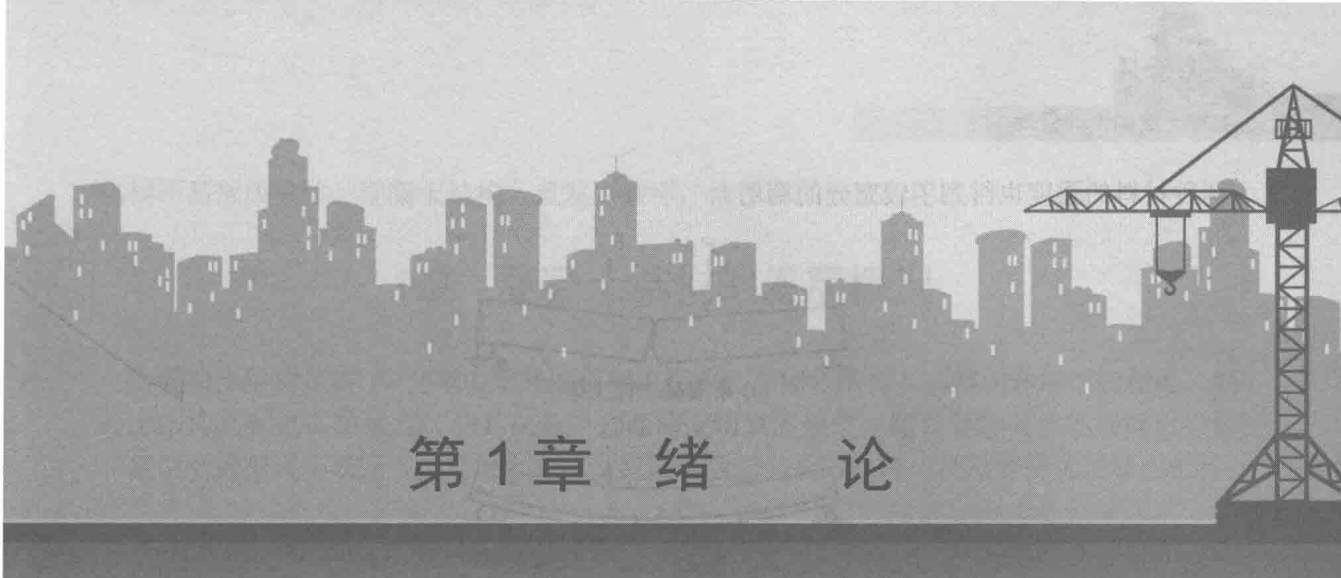
第 9 章 预应力混凝土结构构件

9.1	预应力混凝土的基本知识	183
9.1.1	预应力混凝土的概念	183
9.1.2	预应力混凝土的受力特征	183
9.1.3	预应力混凝土的分类	184
9.2	施加预应力的方法	185
9.2.1	先张法	185
9.2.2	后张法	185
9.3	预应力锚具与孔道成型材料	186
9.3.1	锚具与夹具	186
9.3.2	孔道成型与灌浆材料	187
9.4	预应力混凝土构件的材料	187
9.4.1	钢筋	187
9.4.2	混凝土	187
9.5	张拉控制预应力及预应力损失	188
9.5.1	张拉控制应力 σ_{con}	188
9.5.2	预应力损失值 σ_l 及其组合	188
9.6	预应力混凝土轴心受拉构件的设计	194
9.6.1	应力分析	194
9.6.2	计算内容	197
9.6.3	设计计算例题	201
9.7	预应力混凝土受弯构件	204
9.7.1	应力分析	204
9.7.2	预应力混凝土受弯构件承载力计算	208
9.7.3	正常使用极限状态验算	209
9.7.4	施工阶段验算	213
9.7.5	预应力混凝土受弯构件设计例题	214
9.8	预应力混凝土构件的构造规定	219



9.8.1 截面形式和尺寸	219
9.8.2 先张法构件	220
9.8.3 后张法构件	220
本章小结	223
思考题	223
习题	224
附录 A 钢筋及混凝土的相关资料	226
参考文献	234

习题	224
附录 A 钢筋及混凝土的相关资料	226
参考文献	234



第1章 绪 论

学习目标:

- (1) 理解混凝土结构形成机理, 钢筋和混凝土共同工作的原因;
- (2) 熟悉混凝土结构的特点、发展和应用;
- (3) 理解本课程的特点和学习方法。

1.1 混凝土结构的基本概念和特点

1.1.1 混凝土结构的基本概念

以混凝土为主要材料制作的结构称为混凝土结构, 包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构等。素混凝土结构是指无筋或不配置受力钢筋的混凝土结构, 常用于路面和非承重结构; 钢筋混凝土结构是指配置受力钢筋、钢筋网或者钢筋骨架的混凝土结构; 预应力混凝土结构是指配置受力的预应力钢筋, 通过张拉或其他方法建立预应力的混凝土结构。混凝土结构广泛应用于工业与民用建筑、桥梁、隧道、矿井水利的港口等工程中。

钢筋和混凝土是土木工程中重要的建筑材料, 钢筋的抗拉和抗压强度都很高, 破坏时表现出良好的变形能力, 但价格也相对较高; 混凝土的抗压强度较高, 但抗拉强度却很低。为了充分发挥材料的性能, 将钢筋和混凝土这两种材料按照合理的方式有机地结合在一起共同工作, 使钢筋主要承受拉力, 混凝土主要承受压力, 这就组成了钢筋混凝土。

图 1-1(a)所示为一素混凝土简支梁, 由试验可知, 在集中力和梁自身重力的作用下, 梁截面上部受压, 下部受拉。由于混凝土抗拉强度很低, 只要梁的跨中附近截面的受拉边缘混凝土一开裂, 梁就会突然断裂而破坏, 破坏前变形很小, 承载力很低, 属于脆性破坏类型。如果在梁的底部受拉区配置适量的受力钢筋, 如图 1-1(b)所示, 形成钢筋混凝土梁, 当荷载增加到一定值时, 梁的受拉区混凝土仍会开裂, 但钢筋可代替混凝土承受拉力, 裂缝不会迅速发展, 且梁的承载能力还会继续提高。梁在较大荷载作用下才会破坏, 破坏时钢筋的应力达到屈服强度, 受压区混凝土的抗压强度也能得到充分发挥。破坏前, 变形较大, 有明显的破坏预兆, 属于延性破坏类型。因此, 在混凝土中配置一定形式和数量的钢筋形成钢筋混凝土构件后, 可以使构件的承载能力和变形能力都有很大的提高, 钢筋和混凝土



两种材料的强度也得到了较充分的利用。

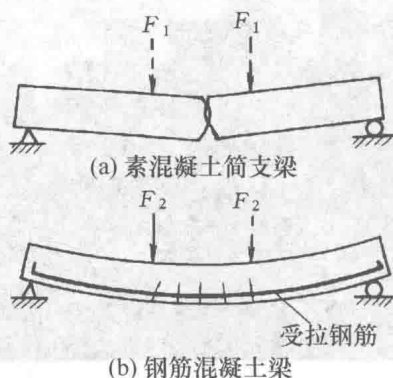


图 1-1 素混凝土简支梁与钢筋混凝土梁

钢筋和混凝土是两种物理、力学性能很不相同的材料，它们能够有效地结合在一起共同工作，主要原因如下：

(1) 混凝土硬化后，能与钢筋牢固地黏结在一起，相互传递内力。黏结力是这两种不同性质的材料能够共同工作的基础。

(2) 钢筋和混凝土两种材料的温度线膨胀系数接近。钢筋的线膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ，混凝土的线膨胀系数为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ，两者数值相近，因此，当温度变化时，钢筋和混凝土之间不会产生较大的相对变形而导致黏结力破坏。

1.1.2 混凝土结构的特点

1. 钢筋混凝土结构的优点

钢筋混凝土结构在土木工程中应用广泛，主要有下列优点。

(1) 就地取材。砂、石是混凝土的主要成分，均可就地取材。另外，还可有效利用矿渣、粉煤灰等工业废料。

(2) 耐久性和耐火性好。在一般环境下，钢筋受到混凝土保护而不易发生锈蚀，因而提高了结构的耐久性。当火灾发生时，钢筋混凝土结构不会像木结构那样被燃烧，也不会像钢结构那样很快达到软化温度而破坏。

(3) 可模性(也称可塑性)好。钢筋混凝土结构可根据需要浇筑成各种形状和尺寸。

(4) 整体性好。现浇或装配整体式的钢筋混凝土结构具有很好的整体性，并且通过合适的配筋可获得较好的延性，有利于抗震、防爆。

2. 钢筋混凝土结构的缺点

但是，钢筋混凝土结构也存在一些缺点，主要有以下几项。

(1) 自重。与钢结构相比，混凝土结构的自身重力较大，不利于建造大跨度结构及超高层建筑。

(2) 抗裂性差。普通混凝土结构在正常使用阶段一般是带裂缝工作的。裂缝过宽会影响结构的耐久性和应用范围，采用预应力混凝土可较好地解决开裂问题。

此外，混凝土结构施工工序复杂，周期较长，受季节和天气的影响较大。新旧混凝土

结构不易形成整体。混凝土结构一旦发生破坏, 修补和加固比较困难。

1.2 混凝土结构的发展概况

混凝土结构是在 19 世纪中期开始得到应用的, 与砌体结构、木结构和钢结构相比, 混凝土结构具有更多的优点, 使其在各个方面的应用发展很快, 随着各种高性能混凝土材料和新型结构形式不断涌现, 混凝土必将是我国今后相当长时期内一种重要的工程结构材料。

1.2.1 混凝土结构的发展过程

混凝土结构的发展, 大体上可分为三个阶段:

第一阶段: 从混凝土发明到 20 世纪初, 是混凝土结构发展的初级阶段。这一阶段采用的钢筋和混凝土的强度都很低, 主要用于建造梁、板、柱和基础等简单构件。其计算理论套用弹性理论, 采用容许应力设计方法。

第二阶段: 从 20 世纪初到第二次世界大战。钢筋和混凝土的强度有所提高, 发明了预应力混凝土, 钢筋混凝土被用于建造大跨度结构。同时, 开始进行混凝土结构的试验研究, 计算理论开始考虑材料的塑性性能, 提出了极限状态设计法。

第三阶段: 从第二次世界大战至今。随着高强度混凝土和高强度钢筋的广泛应用, 以及计算机技术和施工机械的发展, 大型的钢筋混凝土结构, 如超高层建筑、大跨度桥梁、高耸结构、地铁工程、高速铁路、跨海隧道等不断涌现。计算理论已充分考虑材料的塑性性能, 提出了以概率理论为基础的极限状态设计法。

用钢筋混凝土建造具有代表性的工程有: 马来西亚吉隆坡的 88 层的石油双塔楼, 高度为 450m; 上海金茂大厦共 88 层, 高度为 420m, 主体为钢筋混凝土结构, 其中部分柱是型钢混凝土柱; 上海环球金融中心 101 层, 高度为 492m; 加拿大多伦多的预应力混凝土电视塔高达 549m, 是代表性的预应力混凝土构筑物; 上海东方明珠电视塔高度为 415m, 主体为混凝土结构; 美国西雅图金群体育馆, 薄壳结构, 屋顶为圆球壳, 跨度达 202m; 世界上最高的混凝土重力坝是瑞士狄克桑斯大坝, 坝高为 285m, 坝顶宽为 15m, 坝底宽为 225m, 坝长 695m; 长江三峡水利枢纽工程是世界上最大的水利工程, 混凝土大坝高达 186m, 坝体混凝土用量达 $1527 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

1.2.2 材料

1. 高性能混凝土

高性能混凝土具有高强度、高耐久性、高流动性及高抗渗透性等优点, 是今后混凝土材料的重要发展方向。提高混凝土的强度是发展高层建筑、高耸结构和大跨度结构的重要措施。目前, 美国已制成 C200 的混凝土, 我国已制成 C100 的混凝土, 高强混凝土的缺点是延性差, 但采用高强混凝土可以减少构件截面尺寸, 减轻自重, 同时具有良好的耐久性。

2. 纤维混凝土

在普通混凝土中掺入适量的各种纤维材料而形成纤维增强混凝土, 其抗拉、抗剪、抗



折强度和抗裂、抗冲击、抗疲劳、抗震等性能均有较大提高。目前应用较多的纤维材料有钢纤维、玻璃纤维、碳纤维、合成纤维等。

1.2.3 结构

混凝土结构广泛应用于工业与民用建筑、道路桥梁、水利水电、地下工程以及核电工程等,随着轻质高强材料的使用,以及高层建筑、超高层建筑和大跨度结构的不断涌现,钢-钢筋混凝土组合结构和预应力混凝土结构的应用越来越广泛。

近年来,钢板与混凝土、钢板与钢筋混凝土或型钢与混凝土组成的钢-混凝土组合结构得到迅速发展应用。如钢板混凝土用于地下结构和混凝土结构加固,压型钢板-混凝土板用于楼板,型钢与混凝土组合而成的组合梁用于楼盖和桥梁,外包钢混凝土柱用于电站主厂房等。这些高性能新型组合结构具有充分利用材料强度、较好的适应变形能力(延性)、施工简单等特点,从而大大拓宽了钢筋混凝土结构的应用范围,使得大跨度结构、高层建筑、高耸结构和具备某种特殊功能的钢筋混凝土结构的建造成为可能。

19世纪80年代提出了预应力混凝土概念,预应力混凝土结构克服了普通混凝土结构抗裂性差、自重大的缺点。结构构件在施加预应力后可延缓裂缝的出现,减少裂缝的宽度,提高构件截面刚度,可以建造大跨度结构。水平构件采用预应力混凝土,可减少截面尺寸,减轻构件自重、降低综合造价等。

1.2.4 计算理论

从把材料看作弹性体的容许应力设计方法,发展为考虑材料塑性的极限强度理论,并迅速发展成按极限状态设计的理论体系。目前在工程结构设计中已采用基于概率论和数理统计分析的极限状态设计方法。

计算机在混凝土结构分析中的应用以及现代试验和测试技术的研究,人们可以利用非线性的分析方法对各种复杂混凝土结构进行全过程受力模拟,使得混凝土结构的计算理论和设计方法向更高的阶段发展,并日趋完善。结构分析可以根据结构类型、构件布置、材料性能和受力特点,选用线弹性分析方法、考虑塑性内力重分布的分析方法、塑性极限分析方法、非线性分析方法和实验分析方法等。

在混凝土结构耐久性设计方面,已建立了相关的材料性能劣化计算模型进行结构使用年限的定量计算,并基于混凝土在环境作用(碳化、氯盐、冻融、酸腐蚀)下的损伤机理,提出了结构设计应采取的防护措施。

1.3 本课程的特点与学习方法

本课程是土木工程专业重要的专业基础课程,主要是对建筑工程中混凝土结构构件的受力性能、计算方法和构造要求等问题进行讨论。首先介绍混凝土结构的材料性能,这是学习后续章节的基础;接着对各种钢筋混凝土构件的受力性能、设计计算方法及配筋构造进行讨论,如受弯构件正截面的承载力计算、斜截面的承载力计算,受扭构件的承载力计算,受压和受拉构件的承载力计算,受弯构件变形和裂缝宽度的验算,以及预应力混凝土



构件的计算等。

在学习混凝土结构设计原理课程时,应该注意以下几点。

(1) 钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种力学性能不同的材料组成。为了对混凝土结构的受力性能与破坏特征有较好的了解,首先要求对钢筋和混凝土的力学性能有很好的认识。

(2) 钢筋混凝土材料的力学特性及构件的计算方法比较复杂,难以用力学模型和数学模型来严谨地推导建立。因此,目前钢筋混凝土结构的计算公式通常是在大量试验研究的基础上用统计分析方法得出的半理论半经验公式。学习时应注意每一理论的适用范围和条件,而且能在实际工程设计中正确运用这些理论和公式。

(3) 学习本课程是为了在工程建设中进行混凝土结构设计,主要包括整体方案、材料选择、截面形式、配置钢筋、构造措施等。结构设计是一个综合问题,要求做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量。同一构件在相同的荷载作用下,可以有不同的截面形式、尺寸、配筋方法和配筋数量,设计时需要进行综合分析,结合具体情况确定最佳方案,以获得良好的技术经济效益。

(4) 在本课程的学习中,有关基本理论的应用最终都要落实到规范的具体规定中。规范反映了国内外混凝土结构的研究成果和工程经验,是理论与实践的高度总结,体现了该学科在一个时期的技术水平。对于规范特别是其规定的强制性条文,设计人员一定要遵循,并能熟练应用。本课程涉及的规范主要有《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)。

本章小结

(1) 钢筋混凝土结构是把钢筋和混凝土这两种材料按照合理的方式结合在一起共同工作,使钢筋主要承受拉力,混凝土主要承受压力,充分发挥了两种材料的各自优点。构件的承载力大大提高,构件的受力性能得到显著改善。

(2) 钢筋和混凝土共同工作的主要原因有两点:一是钢筋和混凝土之间存在黏结力,使两者之间能传递力和变形;二是两种材料之间的温度线膨胀系数接近。

(3) 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)条文是设计中必须遵守的带有法律性的技术文件,遵守设计规范的目的是使设计方法达到统一化和标准化。

思考题

1. 什么是混凝土结构?配筋的主要作用和要求是什么?
2. 钢筋和混凝土这两种不同材料能够有效结合在一起工作的主要原因是什么?
3. 钢筋混凝土结构的优缺点是什么?
4. 试简述混凝土结构计算理论的发展过程。
5. 本课程主要包括哪些内容?学习本课程需要注意哪些问题?



第2章 混凝土结构材料的物理力学性能

学习目标:

- (1) 熟悉钢筋的品种、级别及其性能,掌握钢筋的选用原则;
- (2) 理解混凝土在各种受力状态下的强度和变形性能,掌握混凝土的选用原则;
- (3) 理解钢筋与混凝土黏结的重要性和机理,熟悉钢筋和混凝土协同工作的构造措施。

2.1 钢 筋

2.1.1 钢筋的品种和级别

混凝土结构中使用的钢筋按化学成分可分为碳素钢和普通低合金钢两大类。碳素钢中铁元素是主要成分,此外还含有少量的碳、硅、锰、硫、磷等元素。其力学性能与含碳量有关,碳素钢可分为低碳钢(含碳量少于 0.25%)、中碳钢(含碳量为 0.25%~0.6%)、高碳钢(含碳量为 0.6%~1.4%),含碳量越高,强度越高,但塑性和可焊性越低。

普通低合金钢除含有碳素钢已有的成分外,再加入一定量的硅、锰、钛、钒、铬等合金元素,这样既可以有效提高钢筋的强度,又可以改善钢筋的塑性性能。

由于我国的钢材产量和用量巨大,为节约低合金资源,我国冶金行业近年来研制开发出新型细晶粒带肋钢筋,这种钢筋不需要添加或只需添加很少的合金元素,通过控制轧钢的温度形成细晶粒的金相组织,其外形与普通热轧带肋钢筋外形相同,其强度和延性完全能满足混凝土结构对钢筋性能的要求。

按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)的规定,我国常用的钢筋品种有热轧钢筋、钢绞线、预应力钢丝(中强度钢丝、消除应力钢丝)、预应力螺纹钢筋等,见附录 A 中的附表 A.1 和附表 A.3。

热轧钢筋是低碳钢、普通低合金钢或细晶粒钢在高温状态下轧制而成的软钢,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。热轧钢筋按照强度的高低可分为 HPB300 级(符号 Φ)、HRB335 级(符号 Φ)、HRBF335 级(符号 Φ^F)、HRB400 级(符号 Φ)、HRBF400 级(符号 Φ^F)、RRB400 级(符号 Φ^R)、HRB500 级(符号 Φ)和 HRBF500 级(符号 Φ^F)。其中 HPB300 钢筋为光圆钢筋,属低碳钢,强度较低,与混凝土的黏结强度也较低。HRB335 级、HRB400 级、HRB500 级为普通低合金热轧月牙纹变形钢筋,HRBF335 级、



HRBF400 和 HRBF500 级为细晶粒热轧月牙纹变形钢筋, RRB400 级为余热处理月牙纹变形钢筋。热轧钢筋的外形如图 2-1 所示。余热处理钢筋是由轧制的钢筋经高温淬火、余热回温处理后得到的, 其强度提高, 但塑性、韧性、可焊性、机械连接性能和施工适用性有所降低, 一般可用于对变形及加工性能要求不高的构件中, 如基础、大体积混凝土、楼板、墙体以及次要的中小结构构件等。

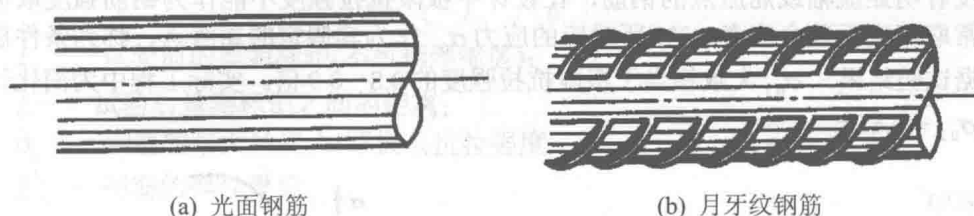


图 2-1 热轧钢筋的外形

钢绞线、预应力钢丝(中强度钢丝、消除应力钢丝)、预应力螺纹钢筋是用于预应力混凝土结构中的预应力筋。钢绞线是由若干根直径相同的高强钢丝捻绕在一起, 常用的有 1×7 (7 股) 和 1×3 (3 股) 等, 抗拉强度可达 1960MPa , 直径可达 21.6mm 。预应力螺纹钢筋又称精轧螺纹粗钢筋, 是在整根钢筋上轧有外螺纹的大直径、高强度、高尺寸精度的直条钢筋。抗拉强度为 $980 \sim 1260\text{MPa}$, 可用螺丝套筒连接或螺帽锚固。

2.1.2 钢筋的强度与变形

1. 钢筋的应力-应变关系

钢筋按单向受拉时的应力-应变曲线的特点可分为有明显流幅的钢筋和无明显流幅的钢筋两大类。

1) 有明显流幅的钢筋

有明显流幅的钢筋的应力-应变曲线如图 2-2 所示。从图中可以看到, 应力值在 A 点以前, 应力应变呈线弹性变化关系, A 点所对应的应力为比例极限。过 A 点后, 应变增速略大于应力增速, 到达 B' 点后钢筋开始出现塑性流动现象, B' 称为屈服上限, 它与加载速度、截面形式、试件表面光洁度等因素有关, 通常 B' 是不稳定的。待应力值降至屈服下限 B 点, 这时应力基本不增加而应变急剧增长, 曲线接近水平线。曲线延伸至 C 点, B 点到 C 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按屈服下限确定的。过 C 点以后, 随着应变的增加, 应力有所增加, 说明钢筋的抗拉能力又有所提高。随着曲线上升到最高点 D , 相应的应力称为钢筋的极限强度, CD 段曲线称为钢筋的强化阶段。 D 点之后, 在试件薄弱位置产生颈缩现象, 断面缩小, 应力降低, 到达 E 点时试件被拉断。 DE 段曲线称为破坏段。

有明显屈服点的钢筋有两个强度指标: 一个是 B 点对应的屈服强度, 它是确定钢筋强度设计值的依据; 另一个强度指标是 D 点对应的极限强度, 一般情况下作为材料的实际破坏强度。由于构件中钢筋的应力到达屈服点后, 会产生很大的塑性变形, 使钢筋混凝土构件出现较大的变形和过宽的裂缝, 以致不能使用, 所以在钢筋混凝土构件计算中, 一般取钢筋的屈服强度作为构件破坏时的强度计算指标。





2) 无明显流幅的钢筋

无明显流幅的钢筋有预应力处理所用的钢丝、钢绞线和预应力螺纹钢筋等。

无明显屈服点钢筋拉伸的典型应力-应变曲线如图 2-3 所示。由图 2-3 可以看出, 钢筋没有明显的流幅, 塑性变形大为减少。当到达极限强度后, 同样由于钢筋的颈缩现象出现下降段。

对没有明显流幅或屈服点的钢筋, 在设计中极限抗拉强度不能作为钢筋强度取值的依据, 通常取相应于残余应变 0.2% 所对应的应力 $\sigma_{0.2}$ 作为其假定的屈服点, 称为条件屈服强度。根据试验结果, $\sigma_{0.2}$ 大致相当于极限抗拉强度的 0.8~0.9 倍。实际工程中为简化计算, 可以取 $\sigma_{0.2} = 0.85\sigma_b$ 。

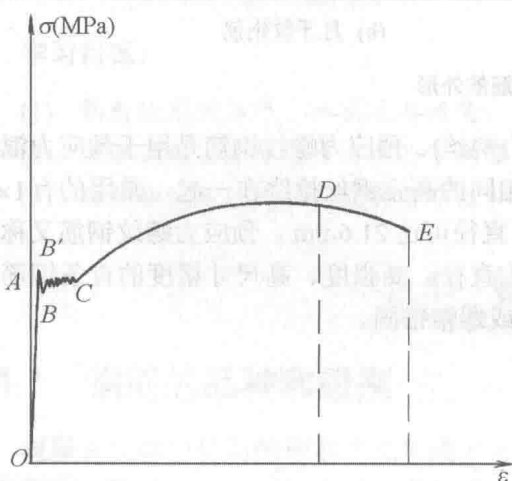


图 2-2 有明显流幅钢筋的应力-应变曲线

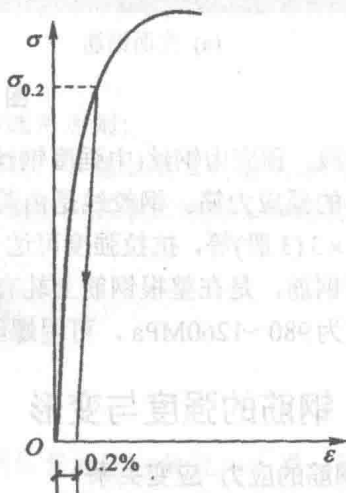


图 2-3 无明显流幅钢筋的应力-应变曲线

2. 钢筋的塑性性能

钢筋除了要有足够的强度外, 还应具有一定的塑性变形能力。通常用均匀伸长率和冷弯性能两个指标衡量钢筋的塑性。

1) 伸长率

(1) 断后伸长率。

钢筋拉断后的伸长值与原长的比率称为钢筋的断后伸长率。伸长率越大塑性越好。

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (2-1)$$

式中: l_0 ——钢筋拉伸前的标距长度, 一般可取 $l_0 = 5d$ (d 为钢筋直径) 或 $l_0 = 10d$, 相应的断后伸长率可表示为 δ_5 或 δ_{10} ;

l ——试件经拉断并重新拼合后测量断口两侧的标距, 即产生残留伸长后的标距。

断后伸长率只能反映钢筋残余变形的大小, 其中还包含了断口颈缩区域的局部变形。一方面, 对同一钢筋, 当测量标距长度 l_0 取值较小时, 所得的伸长率 δ 数值较大; 另一方面, 断后伸长率忽略了钢筋的弹性变形, 不能反映钢筋受力时的总体变形能力。此外, 测量钢筋拉断后的标距长度时需将拉断的两段钢筋对合后再测量, 也容易产生人为误差。因此,



近年来国际上已采用钢筋最大力下的总伸长率(均匀伸长率) δ_{gt} 来表示钢筋的变形能力。

(2) 钢筋最大力下的总伸长率

如图 2-4 所示,钢筋在达到最大应力 σ_b 时的变形包括塑性残余变形和弹性变形两部分,故最大力下的总伸长率 δ_{gt} 可用下式表示:

$$\delta_{gt} = \left(\frac{L - L_0}{L_0} + \frac{\sigma_b}{E_s} \right) \times 100\% \quad (2-2)$$

式中: L_0 ——试验前的原始标距(不包括颈缩区);

L ——试验后量测标记之间的距离;

σ_b ——钢筋的最大拉应力(即极限抗拉强度);

E_s ——钢筋的弹性模量。

上式括号中的第一项反映了钢筋的塑性变形,第二项反映了钢筋在最大拉应力下的弹性变形。

δ_{gt} 既能反映钢筋的残余变形,又能反映钢筋的弹性变形,量测结果受原始标距的影响较小,也不易产生人为误差。因此《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)采用 δ_{gt} 来统一评定钢筋的塑性能。

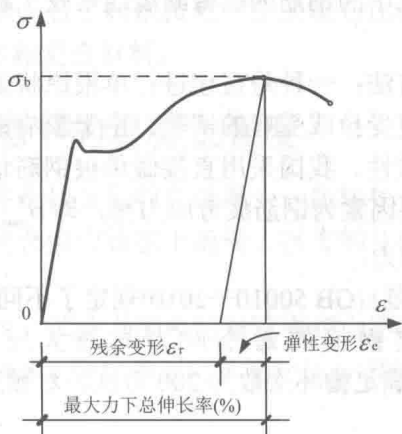


图 2-4 钢筋最大力下的总伸长率

2) 冷弯性能

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后,不出现裂纹、断裂及起层现象,即认为钢筋的冷弯性能符合要求。通常弯芯的直径 D 越小, α 值越大,说明钢筋的冷弯性能越好。

国家标准规定了普通钢筋及预应力筋在最大力下的总伸长率不应小于限值 δ_{gt} ,见本书附录 A 中的表 A.5;也规定了冷弯时相应的弯芯直径及弯转角的要求,有关参数可参照相应的国家标准。

总之,伸长率越大,钢筋的塑性性能越好,破坏时有明显的拉断预兆。钢筋的冷弯性能较好,构件破坏时不易发生脆断,因此,对钢筋品种的选择,应考虑强度和塑性两方面要求。对有明显屈服点的钢筋,其检验指标为屈服强度、极限抗拉强度、伸长率和冷弯性能四项。对无明显屈服点的钢筋,其检验指标为极限抗拉强度、伸长率和冷弯性能三项。

