

高等院校土木工程系列教材

# 混凝土结构设计原理

(第二版)

梁兴文 王社良 李晓文等 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书为高等院校土木工程专业的专业基础课教材,内容包括绪论、材料的物理力学性能、以概率理论为基础的结构构件极限状态设计方法的基本原理,以及受弯构件、轴心受力构件、偏心受力构件、受扭构件、预应力混凝土构件的受力性能分析、设计计算和构造措施。本书是根据我国最新颁布的《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2002)和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62-2004)而编写的。

本书对混凝土结构构件的性能与分析有充分的论述,概念清楚,有明确的计算方法和详细的设计步骤以及相当数量的计算例题,有利于理解结构构件的受力性能和具体的设计计算方法。章后附有小结、思考题和习题等。本书文字通俗易懂,论述由浅入深,循序渐进,便于自学理解。书中还给出了部分专业术语的英文表述。

本书可作为高等院校土木工程专业的教材,也可供相关专业的设计、施工和科研人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

混凝土结构设计原理/梁兴文等编著.—2版.—北京:科学出版社,2007  
(高等院校土木工程系列教材)

ISBN 978-03-018396-5

I.混… II.①梁… 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(2006)第 162391 号

---

责任编辑:杨家福 / 责任校对:刘彦妮  
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2003 年 8 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007 年 1 月第 二 版 印张:32 3/4

2007 年 1 月第四次印刷 字数:642 000

印数:8 001~11 000

定价:40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销信部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(HA 08)

## 第二版前言

本书问世以来,经过三年时间的试用和四次印刷,已陆续改正了一些排版错误,但限于版面,一些不妥之处无法从根本上修订。另外,编写本书第一版时,《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》还未最后定稿和实施,2004年的正式颁布本和当初的送审稿之间存在一定差别。因此,本书再版就提到日程上来了。

这次再版修订工作,除了对第一版中的不妥之处进行修订外,主要做了以下工作:

(1) 补充了构件斜截面受剪承载力计算值与试验值的图示比较。

(2) 按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JT G D62-2004)对原书第10章进行了全面修订。

(3) 按《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2001)局部修订条文对相关内容进行了修改。

(4) 删去了一些超出本课程教学大纲的内容。如第1章中的“混凝土的抗剪强度”、第2章中的“计算可靠指标的一般方法”、第4章中的“深受弯构件”的部分内容及“受弯构件的延性”、第6章中的“构件的受冲切性能”的部分内容、第7章中的“弯扭承载力相关关系”、第9章中的“预应力钢筋应力损失终极值”以及第10章中的部分内容。

(5) 增加了一些专业术语的英文表述。

参加本书修订工作的有梁兴文(绪论、第1章、第2章、第6,7章)、王社良(第4章)、李晓文(第5章)、李方圆(第9章)、张平生(第10章)和陈平(第3,8章)。全书由梁兴文修改定稿。

本书由童岳生教授审阅,他提出了许多宝贵意见。李方圆、杨克家绘制了部分补充和修改的插图。在此对他们表示诚挚的谢意。

本版还会存在新的不足和差错,欢迎读者批评指正。

# 第一版前言

根据教育部 1998 年颁布的大学本科专业目录,现在的土木工程专业涵盖了原来的建筑工程、交通土建工程、矿井建设、水利工程、港口工程等专业,是一个宽口径的专业。专业拓宽的重点在于专业基础课程的拓宽。专业基础课程构成了土木工程专业共同的专业平台,其教学内容是本科学士生应当具备的知识基础,为学生在校学习专业课和毕业后在本专业的其他领域继续学习提供坚实的基础。

混凝土结构是由一些基本构件,例如受弯构件、受压构件、受扭构件等所组成。《混凝土结构设计原理》主要讲述混凝土结构构件的受力性能和设计计算方法,是土木工程专业重要的专业基础课。本书内容包括材料的物理力学性能、以概率理论为基础的混凝土结构构件极限状态设计方法的基本原理,以及基本构件的性能分析、设计计算和构造措施等。

鉴于目前我国土木工程各领域的混凝土结构设计规范尚未统一,为了节省篇幅,本书突出混凝土结构构件的受力性能分析,主要介绍建筑工程和公路桥涵工程的有关规范内容。读者在掌握了基本构件的受力性能和这两类工程混凝土结构的设计原理之后,通过自学不难掌握其他工程的混凝土结构设计原理。

本书按混凝土结构构件的受力性能和特点划分章节,各章相对独立,便于根据不同的教学要求对内容进行取舍。在叙述方法上,注意到学生从数学、力学等基础课到学习专业基础课的认识规律,由浅入深,循序渐进,力求对基本概念论述清楚,使读者能较容易地掌握结构构件的力学性能及理论分析方法;有明确的计算方法和实用设计步骤,力求做到能具体应用。书中有相当数量的计算例题,这有利于理解和掌握设计原理。为了便于自学,每章附有小结、思考题和习题等内容。另外,为适应双语教学的需要,书中同时给出了部分专业术语的英文表述。

书中还编入一部分比较深入的内容,在目录中以“\*”号表示,供读者自由选读。

本书由西安建筑科技大学土木工程学院的部分教师编写。绪论、第 1 章、第 2 章、第 6 章和第 7 章由梁兴文执笔;第 3 章和第 8 章由陈平执笔;第 4 章由王社良执笔;第 5 章由李晓文执笔;第 9 章由李方圆执笔;第 10 章由张平生执笔。全书最后由梁兴文、王社良修改定稿。

本书由资深教授童岳生先生审阅,他提出了许多宝贵的意见。硕士生瞿岳前、张伟、朱海峰、申兆武、黄庆华等为本书绘制了插图。西安建筑科技大学教务处将本

书列为校级重点教材,并予以资助。特在此对他们表示诚挚的谢意。

本书在编写过程中参考了大量国内外文献,引用了一些学者的资料,这些在本书末的参考文献中已予列出。

希望本书能为读者的学习和工作提供帮助。鉴于作者水平有限,书中难免有错误及不妥之处,敬请读者批评指正。

# 目 录

第二版前言

第一版前言

绪论	1
0.1 混凝土结构的基本概念	1
0.2 混凝土结构的特点	2
0.3 混凝土结构的应用及发展	3
0.3.1 发展阶段	3
0.3.2 应用	4
0.3.3 拓展	5
0.4 本课程的主要内容及特点	6
0.4.1 主要内容	6
0.4.2 课程特点与学习方法	7
小结	8
思考题	9
第1章 材料的物理力学性能	10
1.1 钢筋的物理力学性能	10
1.1.1 钢筋的成分、级别和品种	10
1.1.2 钢筋的强度和变形性能	11
1.1.3 钢筋的冷加工	15
1.1.4 混凝土结构对钢筋性能的要求	17
1.2 混凝土的物理力学性能	18
1.2.1 混凝土的强度	18
1.2.2 混凝土的变形性能	28
1.3 钢筋与混凝土的粘结	40
1.3.1 概述	40
1.3.2 粘结应力的特点	41
1.3.3 粘结破坏机理	42
1.3.4 影响粘结强度的因素	44
1.3.5 钢筋的锚固和连接	46
小结	50

思考题 .....	51
<b>第 2 章 结构设计基本原理 .....</b>	<b>53</b>
2.1 结构可靠度及结构设计方法 .....	53
2.1.1 结构上的作用、作用效应及结构抗力 .....	53
2.1.2 结构的预定功能及结构可靠度 .....	54
2.1.3 结构的安全等级 .....	55
2.1.4 混凝土结构构件设计计算方法 .....	55
2.2 荷载和材料强度的取值 .....	57
2.2.1 荷载标准值的确定 .....	57
2.2.2 材料强度标准值的确定 .....	59
2.3 概率极限状态设计法 .....	62
2.3.1 结构的极限状态 .....	62
2.3.2 结构的设计状况 .....	63
2.3.3 结构的功能函数和极限状态方程 .....	63
2.3.4 结构可靠度的计算 .....	64
2.4 极限状态设计表达式 .....	67
2.4.1 承载能力极限状态设计表达式 .....	67
2.4.2 正常使用极限状态设计表达式 .....	70
小结 .....	72
思考题 .....	73
<b>第 3 章 轴心受力构件 .....</b>	<b>75</b>
3.1 轴心受压构件承载力计算 .....	75
3.1.1 轴心受压普通箍筋柱正截面受压承载力计算 .....	76
3.1.2 轴心受压螺旋式箍筋柱正截面受压承载力计算 .....	83
3.2 轴心受拉构件承载力计算 .....	86
小结 .....	88
思考题 .....	88
习题 .....	89
<b>第 4 章 受弯构件正截面承载力 .....</b>	<b>90</b>
4.1 概述 .....	90
4.2 正截面受弯性能的试验研究 .....	93
4.2.1 适筋梁的受弯性能 .....	93
4.2.2 正截面受弯的三种破坏形态 .....	99
4.2.3 适筋梁的配筋率范围 .....	101
4.3 正截面受弯承载力分析 .....	102
4.3.1 基本假定 .....	102

4.3.2	受压区等效矩形应力图形	105
4.3.3	相对界限受压区高度与最小配筋率	106
4.4	单筋矩形截面受弯承载力计算	109
4.4.1	基本计算公式及适用条件	109
4.4.2	基本公式的应用	111
4.4.3	计算系数及其应用	116
4.4.4	截面尺寸及纵向钢筋的构造要求	120
4.5	双筋矩形截面受弯承载力计算	123
4.5.1	概述	123
4.5.2	受压钢筋的应力	124
4.5.3	基本公式及适用条件	126
4.5.4	双筋矩形截面的计算方法	128
4.6	T形截面受弯承载力计算(包括I形和箱形)	133
4.6.1	T形截面梁的应用	133
4.6.2	T形截面翼缘的计算宽度	135
4.6.3	基本公式及适用条件	137
4.6.4	T形截面的计算方法	142
4.7*	深受弯构件的受弯承载力计算	147
4.7.1	深受弯构件的范围及工程应用	147
4.7.2	深受弯构件的受弯承载力计算	148
	小结	149
	思考题	150
	习题	151
<b>第5章</b>	<b>偏心受力构件正截面承载力</b>	<b>154</b>
5.1	偏心受压构件正截面的破坏形态	154
5.1.1	破坏形态	154
5.1.2	两类偏心受压破坏的界限	156
5.2	偏心受压构件的二阶效应	156
5.2.1	附加偏心距 $e_a$ 、初始偏心距 $e_i$	156
5.2.2	偏心受压长柱的二阶弯矩	157
5.2.3	构件截面承载力计算中二阶效应的考虑	158
5.3	矩形截面非对称配筋偏心受压构件正截面受压承载力计算	161
5.3.1	基本计算公式及适用条件	161
5.3.2	大、小偏心受压破坏的设计判别(界限偏心距)	164
5.3.3	截面设计	166



5.3.4	截面承载力复核 .....	175
5.4	矩形截面对称配筋偏心受压构件正截面受压承载力计算 .....	177
5.4.1	基本计算公式及适用条件 .....	177
5.4.2	大、小偏心受压构件的设计判别 .....	179
5.4.3	截面设计 .....	180
5.4.4	截面承载力复核 .....	184
5.4.5	矩形截面对称配筋偏心受压构件的计算曲线 .....	185
5.5	I形截面对称配筋偏心受压构件正截面受压承载力计算 .....	188
5.5.1	基本计算公式及适用条件 .....	188
5.5.2	截面设计 .....	191
5.5.3	截面承载力复核 .....	196
5.6*	均匀配筋的偏心受压构件正截面受压承载力计算 .....	197
5.7*	双向偏心受压构件的正截面承载力计算 .....	200
5.8	偏心受压构件的一般构造 .....	206
5.8.1	截面形式及尺寸 .....	206
5.8.2	材料 .....	207
5.8.3	纵向钢筋 .....	207
5.9	矩形截面偏心受拉构件正截面承载力计算 .....	208
5.9.1	偏心受拉构件正截面的破坏形态 .....	208
5.9.2	矩形截面小偏心受拉构件正截面承载力计算 .....	209
5.9.3	矩形截面大偏心受拉构件正截面承载力计算 .....	209
5.9.4	截面设计 .....	210
5.9.5	截面承载力复核 .....	212
	小结 .....	214
	思考题 .....	216
	习题 .....	217
<b>第6章</b>	<b>构件斜截面承载力</b> .....	<b>219</b>
6.1	概述 .....	219
6.2	受弯构件受剪性能的试验研究 .....	220
6.2.1	无腹筋简支梁的受剪性能 .....	220
6.2.2	有腹筋简支梁的受剪性能 .....	223
6.2.3	影响斜截面受剪承载力的主要因素 .....	226
6.3	受弯构件斜截面受剪承载力计算 .....	229
6.3.1	计算原则 .....	229
6.3.2	仅配有箍筋梁的斜截面受剪承载力 .....	230

6.3.3	配有箍筋和弯起钢筋梁的斜截面受剪承载力	233
6.3.4	公式的适用范围	234
6.3.5	连续梁、框架梁和外伸梁的斜截面受剪承载力	236
6.3.6	板类构件的受剪承载力	237
6.4	受弯构件斜截面受剪承载力的设计计算	237
6.4.1	计算截面的确定	237
6.4.2	设计计算	238
6.4.3	计算例题	239
6.5	受弯构件的斜截面受弯承载力和钢筋的构造要求	244
6.5.1	抵抗弯矩图	245
6.5.2	纵筋的弯起	246
6.5.3	纵筋的截断	248
6.5.4	应用实例	249
6.5.5	钢筋的构造要求	253
6.6*	深受弯构件的受剪承载力计算	256
6.6.1	截面尺寸限制条件及斜截面抗裂控制条件	256
6.6.2	受剪承载力计算	257
6.6.3	基本构造规定	258
6.7	偏心受力构件的斜截面受剪承载力	261
6.7.1	偏心受压构件斜截面受剪承载力计算	261
6.7.2	偏心受拉构件斜截面受剪承载力计算	262
6.7.3*	框架柱双向受剪承载力计算	263
6.7.4	剪力墙的斜截面受剪承载力计算	265
6.8*	构件的受冲切性能	266
6.8.1	板的冲切破坏	266
6.8.2	板的受冲切承载力计算	266
6.8.3	板的受冲切截面限制条件及配筋构造要求	268
	小结	270
	思考题	271
	习题	272
<b>第7章</b>	<b>受扭构件的扭曲截面承载力</b>	<b>275</b>
7.1	概述	275
7.2	纯扭构件扭曲截面承载力计算	276
7.2.1	试验研究分析	276

7.2.2	纯扭构件的开裂扭矩	278
7.2.3	纯扭构件的受扭承载力	281
7.3	复合受扭构件承载力计算	285
7.3.1	剪扭构件承载力计算	285
7.3.2	弯扭构件承载力计算	288
7.3.3	弯剪扭构件承载力计算	288
7.3.4	压弯剪扭矩形截面框架柱承载力计算	291
7.3.5	超静定结构中的扭转问题	296
小结		296
思考题		297
习题		297
<b>第8章</b>	<b>混凝土构件的使用性能及结构的耐久性</b>	<b>299</b>
8.1	钢筋混凝土构件裂缝宽度验算	299
8.1.1	裂缝的出现、分布和开展	300
8.1.2	平均裂缝间距	302
8.1.3	平均裂缝宽度	304
8.1.4	最大裂缝宽度及其验算	310
8.2	钢筋混凝土受弯构件的挠度验算	313
8.2.1	混凝土受弯构件变形计算的特点	314
8.2.2	短期刚度 $B_s$	315
8.2.3	受弯构件刚度 $B$	317
8.2.4	最小刚度原则与挠度验算	318
8.2.5	提高受弯构件刚度的措施	320
8.3	混凝土结构的耐久性	322
8.3.1	一般说明	322
8.3.2	影响混凝土结构耐久性能的主要因素	322
8.3.3	混凝土结构耐久性极限状态设计	323
小结		324
思考题		325
习题		325
<b>第9章</b>	<b>预应力混凝土构件</b>	<b>327</b>
9.1	预应力混凝土的基本知识	327
9.1.1	一般概念	327
9.1.2	预应力混凝土的分类	328

9.1.3	施加预应力的方法	329
9.1.4	锚具	330
9.1.5	预应力混凝土的材料	332
9.1.6	预应力混凝土的特点	333
9.2	预应力混凝土构件设计的一般规定	334
9.2.1	张拉控制应力 $\sigma_{con}$	334
9.2.2	预应力损失	335
9.2.3	有效预应力沿构件长度的分布	344
9.2.4	无粘结预应力混凝土结构	346
9.3	预应力混凝土轴心受拉构件的应力分析	347
9.3.1	先张法轴心受拉构件	347
9.3.2	后张法轴心受拉构件	351
9.3.3	先、后张法计算公式的比较	353
9.4	预应力混凝土轴心受拉构件的计算和验算	355
9.4.1	使用阶段正截面承载力计算	355
9.4.2	使用阶段正截面裂缝控制验算	355
9.4.3	施工阶段混凝土压应力验算	358
9.4.4	施工阶段后张法构件端部局部受压承载力计算	358
9.5	预应力混凝土受弯构件的设计与计算	366
9.5.1	各阶段应力分析	366
9.5.2	使用阶段计算	373
9.5.3	施工阶段验算	386
9.6	预应力混凝土构件的构造要求	392
9.6.1	先张法构件	392
9.6.2	后张法构件	393
	小结	394
	思考题	395
	习题	396
第 10 章	混凝土结构按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》的 设计计算	398
10.1	桥涵工程混凝土结构材料	398
10.1.1	混凝土	398
10.1.2	钢筋	398
10.2	概率极限状态设计方法	398
10.2.1	设计原则	399

10.2.2	承载力极限状态设计表达式	399
10.3	受弯构件正截面承载力计算	400
10.3.1	梁、板一般构造	400
10.3.2	正截面承载力计算	402
10.4	受弯构件斜截面抗剪承载力计算	409
10.4.1	抗剪承载力基本计算公式及适用条件	409
10.4.2	基本计算公式的应用	412
10.4.3	斜截面抗弯与一般构造要求	417
10.5	轴心受力构件承载力计算	428
10.5.1	普通箍筋轴心受压构件	429
10.5.2	配螺旋箍筋和纵筋的轴心受压构件	430
10.5.3	轴心受拉构件承载力计算	431
10.6	偏心受力构件	432
10.6.1	偏心受压构件的偏心距增大系数	432
10.6.2	偏心受压构件的类别	432
10.6.3	矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算公式	433
10.6.4	矩形截面不对称配筋偏压构件正截面承载力计算	436
10.6.5	矩形截面对称配筋偏压构件正截面承载力计算	436
10.6.6	圆形截面偏心受压构件	436
10.6.7	偏心受压构件的构造要求	439
10.6.8	矩形截面偏心受拉构件承载力计算	441
10.7	受扭构件承载力计算	442
10.7.1	构件截面的受扭塑性抵抗矩	442
10.7.2	纯扭构件受扭承载力计算	444
10.7.3	剪、扭构件剪扭承载力计算	445
10.7.4	矩形、T形、I形和带翼缘箱形截面弯剪扭构件承载力计算	446
10.7.5	弯剪扭构件截面及最小配筋要求	446
10.7.6	弯剪扭构件构造要求	447
10.8	持久状况裂缝宽度、挠度验算与短暂状况应力控制	447
10.8.1	持久状况下构件裂缝宽度验算	448
10.8.2	受弯构件挠度验算	454
10.8.3	受弯构件短暂状况下的应力控制	461
10.9	桥梁工程预应力混凝土构件	465
10.9.1	张拉控制应力	465
10.9.2	预应力损失	465
10.9.3	预应力损失组合	470

10.9.4	预应力混凝土受弯构件使用阶段正截面承载力计算 .....	471
10.9.5	使用阶段斜截面承载力计算 .....	473
10.9.6	使用阶段抗裂验算 .....	475
10.9.7	使用阶段应力控制 .....	477
10.9.8	短暂状况(施工阶段)计算 .....	479
10.9.9	端部锚固区的计算 .....	480
10.9.10	受弯构件挠度验算 .....	482
10.9.11	预应力混凝土简支梁的设计 .....	484
10.9.12	部分预应力混凝土 B 类构件 .....	489
	小结.....	489
	思考题.....	490
	习题.....	492
附录 1	《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2002)附表 .....	494
附录 2	《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》附表 .....	503
	参考文献.....	509

# 绪 论

## 0.1 混凝土结构的基本概念

混凝土结构(concrete structure)是以混凝土为主要材料制成的结构,包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构及配置各种纤维筋的混凝土结构。这种结构广泛应用于建筑、桥梁、隧道、矿井以及水利、港口等工程。我国每年混凝土用量约  $15 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中房屋建筑用量约  $9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,钢筋用量约  $2000 \times 10^4 \text{ t}$ ,用于混凝土结构的资金达 2000 亿元以上。

混凝土材料的抗压强度较高,而抗拉强度却很低。因此,素混凝土结构(plain concrete structure)的应用受到很大限制。例如,图 0.1.1(a)所示素混凝土梁,随着荷载的逐渐增大,梁中拉应力及压应力也不断增大。当荷载达到一定值时,弯矩最大截面受拉边缘的混凝土首先被拉裂,而后由于该截面高度减小致使开裂截面受拉区的拉应力进一步增大,于是裂缝迅速向上伸展并立即引起梁的破坏。这种梁的破坏很突然,其受压区混凝土的抗压强度未充分利用,且由于混凝土抗拉强度很低,故其极限承载力也很低。所以,对于在外荷载作用下或其他原因会在截面中产生拉应力的结构,不应采用素混凝土结构。

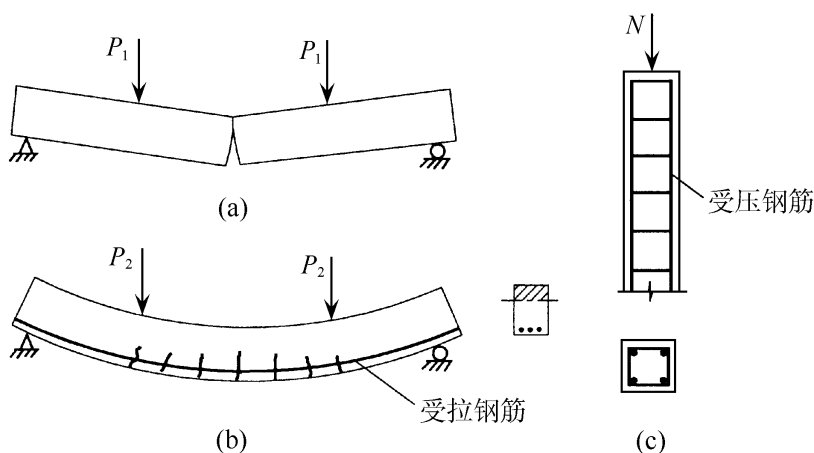


图 0.1.1 素混凝土梁及钢筋混凝土梁、柱

与混凝土材料相比,钢筋的抗拉强度很高。如将混凝土和钢筋这两种材料结合在一起,混凝土主要承受压力,而钢筋则主要承受拉力,这就成为钢筋混凝土结构(reinforced concrete structure)。例如,图 0.1.1(b)所示作用集中荷载的钢筋混凝土梁,在截面受拉区配有适量的钢筋。当荷载达到一定值时,梁受拉区仍然开裂,但开裂截面的变形性能与素混凝土梁大不相同。因为钢筋与混凝土牢固地粘结在一

起,故在裂缝截面原由混凝土承受的拉力现转由钢筋承受;由于钢筋强度和弹性模量均很高,所以此时裂缝截面的钢筋拉应力和受拉变形均很小,有效地约束了裂缝的开展,使其不致无限制地向上延伸而使梁发生断裂破坏。如此,钢筋混凝土梁上荷载可继续加大,直至其受拉钢筋应力达到屈服强度,随后截面受压区混凝土被压坏,这时梁才达到破坏状态。由此可见,在钢筋混凝土梁中,钢筋与混凝土两种材料的强度都得到了较为充分的利用,破坏过程较为缓和,且这种梁的极限承载力大大超过同样条件的素混凝土梁。

钢筋的抗压强度也很高,所以在轴心受压柱[图 0.1.1(c)]中也配置纵向受压钢筋与混凝土共同承受压力,以提高柱子的承载能力和变形能力,减小柱截面的尺寸,还可负担由于某种原因而引起的弯矩和拉应力。

为了提高混凝土结构的抗裂性和耐久性,可在加载前用张拉钢筋的方法使混凝土截面内产生预压应力,以全部或部分抵消荷载作用下的拉应力,这即为预应力混凝土结构(prestressed concrete structure);也可在混凝土中加入各种纤维筋(如钢纤维、碳纤维筋等),形成纤维加强混凝土(fibre reinforced concrete)。

钢筋与混凝土两种材料能够有效地结合在一起而共同工作,主要基于下述三个条件:

1) 钢筋与混凝土之间存在着粘结力,使两者能结合在一起。在外荷载作用下,结构中的钢筋与混凝土协调变形,共同工作。因此,粘结力是这两种不同性质的材料能够共同工作的基础。

2) 钢筋与混凝土两种材料的温度线膨胀系数很接近,钢材为  $1.2 \times 10^{-5}$ ,混凝土为  $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}$ ,所以钢筋与混凝土之间不致因温度变化产生较大的相对变形而使粘结力遭到破坏。

3) 钢筋埋置于混凝土中,混凝土对钢筋起到了保护和固定作用,使钢筋不容易发生锈蚀,且使其受压时不易失稳,在遭受火灾时不致因钢筋很快软化而导致结构整体破坏。因此,在混凝土结构中,钢筋表面必须留有一定厚度的混凝土作保护层,这是保持二者共同工作的必要措施。

## 0.2 混凝土结构的特点

混凝土结构的主要优点如下:

1) 就地取材。砂、石是混凝土的主要成分,均可就地取材。在工业废料(例如矿渣、粉煤灰等)比较多的地方,可利用工业废料制成人造骨料用于混凝土结构。

2) 耐久性。处于正常环境下的混凝土耐久性好,高强混凝土的耐久性更好。在混凝土结构中,钢筋受到保护不易锈蚀,所以混凝土结构具有良好的耐久性。对处于侵蚀性环境下的混凝土结构,经过合理设计及采取有效措施后,一般可满足工程需要。



3)耐火性。混凝土为不良导热体,埋置在混凝土中的钢筋受高温影响远较暴露的钢结构小。只要钢筋表面的混凝土保护层具有一定厚度,在发生火灾时钢筋不会很快软化,可避免结构倒塌。

4)整体性。现浇或装配整体式混凝土结构具有良好的整体性,从而结构的刚度及稳定性都比较好,这有利于抗震、抵抗振动和爆炸冲击波。

5)可模性。新拌和的混凝土为可塑的,因此可根据需要制成任意形状和尺寸的结构,这有利于建筑造型。

6)节约钢材。钢筋混凝土结构合理地利用了材料的性能,发挥了钢筋与混凝土各自的优势,与钢结构相比能节约钢材并降低造价。

混凝土结构也具有下列缺点:

1)自重大。混凝土结构自身重力较大,这样它所能负担的有效荷载相对较小。这对大跨度结构、高层建筑结构都是不利的。另外,自重大会使结构地震力加大,故对结构抗震也不利。

2)抗裂性差。钢筋混凝土结构在正常使用情况下构件截面受拉区通常存在裂缝,如果裂缝过宽,则会影响结构的耐久性和应用范围。

3)需用模板。混凝土结构的制作需要模板予以成型。如采用木模板,则可重复使用的次数少,会增加工程造价。

此外,混凝土结构施工工序复杂,周期较长,且受季节气候影响;对于现役混凝土结构,如遇损伤则修复困难;隔热、隔声性能也比较差。

随着科学技术的不断发展,混凝土结构的缺点正在被逐渐克服或有所改进。如采用轻质、高强混凝土及预应力混凝土,可减小结构自身重力并提高其抗裂性;采用可重复使用的钢模板会降低工程造价;采用预制装配式结构,可以改善混凝土结构的制作条件,少受或不受气候条件的影响,并能提高工程质量及加快施工进度等。

## 0.3 混凝土结构的应用及发展

### 0.3.1 发展阶段

混凝土结构的应用约有 150 年的历史,可大致划分为四个阶段<sup>[10]</sup>。从 1850 年到 1920 年为第一阶段,这时由于钢筋和混凝土的强度都很低,仅能建造一些小型的梁、板、柱、基础等构件,钢筋混凝土本身的计算理论尚未建立,按弹性理论进行结构设计。从 1920 年到 1950 年为第二阶段,这时已建成各种空间结构,发明了预应力混凝土并应用于实际工程,开始按破损阶段进行构件截面设计。1950 年到 1980 年为第三阶段,由于材料强度的提高,混凝土单层房屋和桥梁结构的跨度不断增大,混凝土高层建筑的高度已达 262m,混凝土的应用范围进一步扩大;各种现

代化施工方法普遍采用,同时广泛采用预制构件,结构构件设计已过渡到按极限状态的设计方法。

大致从 1980 年起,混凝土结构的发展进入第四阶段。尤其是近 10 余年来,大模板现浇和大板等工业化体系进一步发展,高层建筑新结构体系(如框桁架体系和外伸结构等)有较多的应用。振动台试验、拟动力试验和风洞试验较普遍地开展。计算机辅助设计和绘图的程序化,改进了设计方法并提高了设计质量,也减轻了设计工作量。非线性有限元分析方法的广泛应用,推动了混凝土强度理论和本构关系的深入研究,并形成了“近代混凝土力学”这一分支学科。结构构件的设计已采用以概率理论为基础的极限状态设计方法。

### 0.3.2 应用

混凝土结构广泛应用于土木工程的各个领域,下面简要介绍其主要应用情况。

混凝土强度随生产的发展而不断提高,目前 C50~C80 级混凝土甚至更高强度混凝土的应用已较普遍。各种特殊用途的混凝土不断研制成功并获得应用,例如超耐久性混凝土的耐久年限可达 500 年;耐热混凝土可耐达 1800℃ 的高温;钢纤维混凝土和聚合物混凝土、防射线、耐磨、耐腐蚀、防渗透、保温等有特殊要求的混凝土也应用于实际工程之中。

房屋建筑中的住宅和公共建筑,广泛采用钢筋混凝土楼盖和屋盖。单层厂房很多采用钢筋混凝土柱、基础,钢筋混凝土或预应力混凝土屋架及薄腹梁等。高层建筑混凝土结构体系的应用甚为广泛。需特别指出的有:1996 年建成的广州中信广场,80 层,高 391m,是世界上最高的钢筋混凝土建筑结构;1998 年建成的马来西亚石油双塔楼,88 层,高 452m,以及 2003 年建成的中国台北国际金融中心,101 层,高 455m,这两幢房屋均采用钢-混凝土混合结构,其高度已超过世界上最高的钢结构房屋(美国芝加哥 Sears 大厦)。我国上海金茂大厦,88 层,建筑高度 420.5m,为钢筋混凝土和钢构架混合结构,其中横穿混凝土核心筒的三道 8m 高的多方位外伸钢桁架,为世界高层建筑所罕见;上海正在建造 95 层、492m 高的浦东环球金融中心大厦,内筒为钢筋混凝土结构,建成后将成为世界上最高建筑物。已知世界上计划建造 800m 以上的塔楼,有日本东京的千禧年塔楼(Millennium Tower),高 840m,以及香港超群塔楼(Bionic Tower),高 1128m。

桥梁工程中的中小跨度桥梁绝大部分采用混凝土结构建造,大跨度桥梁也有相当多的是采用混凝土结构建造。如 1991 年建成的挪威 Skarnsundet 预应力斜拉桥,跨度达 530m,居世界第一位;重庆长江二桥为预应力混凝土斜拉桥,跨度达 444m,居世界第二位;虎门大桥中的辅航道桥为预应力混凝土刚架公路桥,跨度达 270m;攀枝花预应力混凝土铁路刚架桥,跨度为 168m。公路混凝土拱桥应用也较多,其中突出的如 1997 年建成的四川万县长江大桥,为上承式拱桥,采用钢管混凝土和型钢骨架组成三室箱形截面,跨长 420m,为目前世界上第一位拱桥;贵州江界

河 330m 的桁架式组合拱桥,312m 的广西邕宁江中承式拱桥等均为混凝土桥。

隧道及地下工程多采用混凝土结构建造。中华人民共和国成立后修建了约 2 500km 长的铁路隧道,其中成昆铁路线中有隧道 427 座,总长 341km,占全线路长 31%;修建的公路隧道约 400 条,总长约 80km。日本 1994 年建成的青函海底隧道全长 53.8km,我国仅上海就修建了 4 条过江隧道。我国除北京、上海、天津、广州已有地铁外,许多城市正在筹划建造地铁。我国许多城市建有地下商业街、地下停车场、地下仓库、地下工厂、地下旅店等。

水利工程中的水电站、拦洪坝、引水渡槽、污水排灌管等均采用钢筋混凝土结构。目前世界上最高的重力坝为瑞士的大狄桑坝,高 285m,其次为俄罗斯的萨杨苏申克坝,高 245m;我国于 1989 年建成的青海龙羊峡大坝,高 178m;四川二滩水电站拱坝高 242m;贵州乌江渡拱形重力坝高 165m;黄河小浪底水利枢纽,主坝高 154m。我国在建的三峡水利枢纽,水电站主坝高 190m,设计装机容量  $1820 \times 10^4 \text{ kW}$ ,建成后该枢纽发电量将居世界单一水利枢纽发电量的第一位。另外,举世瞩目的南水北调大型水利工程,沿线将建造很多预应力混凝土渡槽。

特种结构中的烟囱、水塔、筒仓、储水池、电视塔、核电站反应堆安全壳、近海采油平台等也有很多采用混凝土结构建造。如 1989 年建成的挪威北海混凝土近海采油平台,水深 216m;目前世界上最高的电视塔是加拿大多伦多电视塔,塔高 553.3m,为预应力混凝土结构;上海东方明珠电视塔由三个钢筋混凝土筒体组成,高 456m,居世界第三位。瑞典建成容积为  $10\,000 \text{ m}^3$  的预应力混凝土水塔,我国山西云冈建成两座容量为  $6 \times 10^4 \text{ t}$  的预应力混凝土煤仓等。

### 0.3.3 拓展

随着技术的发展,混凝土结构在其所用材料和配筋方式上有了许多新进展,形成了一些新的混凝土结构形式,如高性能混凝土、纤维增强混凝土及钢与混凝土组合结构等。

#### 1. 高性能混凝土结构

高性能混凝土 (high performance concrete) 具有高强度、高耐久性、高流动性及高抗渗透性等优点,是今后混凝土材料发展的重要方向。我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2002) 将混凝土强度等级大于 C50 的混凝土划为高强混凝土。高强混凝土的强度高、变形小、耐久性好,适应现代工程结构向大跨、重载、高耸发展和承受恶劣环境条件的需要。配制高强混凝土必须采用很低的水灰比并应掺入粉煤灰、矿渣、沸石灰、硅粉等混合料。在混凝土中加入高效减水剂可有效地降低水灰比;掺入粉煤灰、矿渣、沸石灰则能有效地改善混凝土拌和料的工作度,提高硬化后混凝土的力学性能和耐久性;硅粉对提高混凝土的强度最为有效,并使混凝土具有耐磨和耐冲刷的特性。

高强混凝土在受压时表现出较少的塑性和更大的脆性,因而在结构构件计算

方法和构造措施上与普通强度混凝土有一定差别,在某些结构上的应用受到限制,如有抗震设防要求的混凝土结构,混凝土强度等级不宜超过 C60(设防烈度为 9 度时)和 C70(设防烈度为 8 度时)。

## 2. 纤维增强混凝土结构

在普通混凝土中掺入适当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、抗震和抗爆等性能均有较大提高,因而获得较大发展和应用。

目前应用较多的纤维材料有钢纤维、合成纤维、玻璃纤维和碳纤维等。钢纤维混凝土是将短的、不连续的钢纤维均匀乱向地掺入普通混凝土而制成,有无筋钢纤维混凝土结构和钢纤维钢筋混凝土结构。钢纤维混凝土结构的应用很广,如机场的飞机跑道、地下人防工程、地下泵房、水工结构、桥梁与隧道工程等。

合成纤维(尼龙基纤维、聚丙烯纤维等)可以作为主要加筋材料,能提高混凝土的抗拉、韧性等结构性能,用于各种水泥基板材;也可以作为一种次要加筋材料,主要用于提高水泥混凝土材料的抗裂性。碳纤维具有轻质、高强、耐腐蚀、施工便捷等优点,已广泛用于建筑、桥梁结构的加固补强以及机场飞机跑道工程等。

## 3. 钢与混凝土组合结构

用型钢或钢板焊(或冷压)成钢截面,再将其埋置于混凝土中,使混凝土与型钢形成整体共同受力,这种结构称为钢与混凝土组合结构。国内外常用的组合结构有压型钢板与混凝土组合楼板、钢与混凝土组合梁、型钢混凝土结构、钢管混凝土结构和外包钢混凝土结构等五大类。

钢与混凝土组合结构除具有钢筋混凝土结构的优点外,还有抗震性能好、施工方便、能充分发挥材料的性能等优点,因而得到了广泛应用。各种结构体系,如框架、框架-剪力墙、剪力墙、框架-核心筒等结构体系中的梁、柱、墙均可采用组合结构。例如,美国近年建成的太平洋第一中心大厦(44层)和双联广场大厦(58层)的核心筒大直径柱子,以及北京环线地铁车站柱,都采用了钢管混凝土结构;上海金茂大厦外围柱以及正在建造的 95 层上海浦东世界环球金融中心大厦的外框筒柱,采用了型钢混凝土柱。我国在电厂建筑中推广使用了外包钢混凝土结构。

# 0.4 本课程的主要内容及特点

## 0.4.1 主要内容

混凝土结构按其构成的形式可分为实体结构和组合结构两大类。大坝、桥墩、基础等通常为实体,称为实体结构;而建筑、桥梁、地下等工程中的混凝土结构通常由杆和板组成,称为组合结构,其中杆包括直杆(梁、柱等)和曲杆(拱、曲梁等),板包括平板(楼板等)和竖板(墙)。如按结构构件的主要受力特点来区分,上述结构构

件可分为以下几类。

1) 受弯构件,如梁、板等。这类构件的截面上有弯矩作用,故称为受弯构件。与此同时,构件截面上也有剪力存在。对于板,剪力对设计计算一般不起控制作用。而在梁中,除应考虑弯矩外尚需考虑剪力的作用。

2) 受压构件,如柱、墙等。这类构件都有压力作用。当压力沿构件纵轴作用在构件截面上时,则为轴心受压构件;如果压力在截面上不是沿纵轴作用或截面上同时有压力和弯矩作用时,则为偏心受压构件。柱、墙、拱等构件一般为偏心受压且还有剪力作用。所以,受压构件中通常有弯矩、轴力和剪力同时作用;当剪力较大时在计算中应考虑其影响。

3) 受拉构件,如屋架下弦杆、拉杆拱中的拉杆等,通常按轴心受拉构件(忽略构件自重重力)考虑。又如层数较多的框架结构,在竖向荷载和水平力共同作用下,有的柱截面上除产生剪力和弯矩外,还可能出现拉力,这种构件则为偏心受拉构件。

4) 受扭构件,如曲梁、框架结构的边梁等。这类构件的截面上除产生弯矩和剪力外,还会产生扭矩。因此,对这类结构构件应考虑扭矩的作用。

在混凝土结构设计中,首先根据结构使用功能要求及考虑经济、施工等条件,选择合理的结构方案,进行结构布置以及确定构件类型等;然后根据结构上所作用的荷载及其他作用,对结构进行内力分析,求出构件截面内力(包括弯矩、剪力、轴力、扭矩等)。在此基础上,对组成结构的各类构件分别进行构件截面设计,即确定构件截面所需的钢筋数量、配筋方式,并采取必要的构造措施。关于确定结构方案、进行结构内力分析等内容,将在《混凝土结构设计》、《桥梁工程》、《地下工程》等专业课中讲述。本课程讲述的主要内容是混凝土结构基本构件的受力性能、承载力和变形计算以及配筋构造等。这些内容是土木工程混凝土结构中的共性问题,即混凝土结构的基本理论,故本课程为土木工程专业的专业基础课。

#### 0.4.2 课程特点与学习方法

如上所述,本课程主要讲述混凝土结构构件的基本理论,其内容相当于匀质线弹性材料的材料力学。但是,钢筋混凝土是由非线性的且拉压强度相差悬殊的混凝土和钢筋组合而成,受力性能复杂,因而本课程的内容更为丰富,有不同于一般材料力学的一些特点,学习时应予以注意。

1) 钢筋混凝土构件是由钢筋和混凝土两种材料组成的构件,且混凝土是非均匀、非连续和非弹性材料,因此,材料力学的公式一般不能直接用来计算钢筋混凝土构件的承载力和变形;而材料力学解决问题的基本方法,即通过平衡条件、物理条件和几何条件建立基本方程的手段,对于钢筋混凝土构件也是适用的,但在具体应用时应注意钢筋混凝土性能上的特点。

2) 钢筋混凝土构件中的两种材料,在强度和数量上存在一个合理的配比范

围。如果钢筋和混凝土在面积上的比例及材料强度的搭配超过了这个范围,就会引起构件受力性能的改变,从而引起构件截面设计方法的改变,这是学习时必须注意的一个方面。

3) 钢筋混凝土构件的计算方法是建立在试验研究基础上的。钢筋和混凝土材料的力学性能指标通过试验确定;根据一定数量的构件受力性能试验,研究其破坏机理和受力性能,建立物理和数学模型,并根据试验数据拟合出半理论半经验公式。因此,学习时一定要深刻理解构件的破坏机理和受力性能,特别要注意构件计算方法的适用条件和应用范围。

4) 本课程所要解决的不仅是构件的承载力和变形计算等问题,还包括构件的截面形式、材料选用及配筋构造等。结构构件设计是一个综合性的问题,需要考虑各方面的因素。因此,学习本课程时要注意学会对多种因素进行综合分析,培养综合分析判断能力。

5) 本课程的实践性很强,其基本原理和设计方法必须通过构件设计来掌握,并在设计过程中逐步熟悉和正确运用我国有关的设计规范和标准。本课程的内容主要与《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2002)、《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068-2001)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2001)和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JT G D62-2004)等有关。设计规范是国家颁布的有关结构设计的技术规定和标准,规范条文尤其是强制性条文是设计中必须遵守的带法律性的技术文件。而只有正确理解规范条文的概念和实质,才能正确地应用规范条文及其相应公式,充分发挥设计者的主动性以及分析和解决问题的能力。

## 小 结

(1) 混凝土结构是以混凝土为主要材料制成的结构。这种结构充分发挥了钢筋和混凝土两种材料各自的优点。在混凝土中配置适量的钢筋后,可使构件的承载力大大提高,构件的受力性能也得到显著改善。

(2) 钢筋和混凝土两种材料能够有效地结合在一起而共同工作,主要基于三个条件:钢筋与混凝土之间存在粘结力;两种材料的温度线膨胀系数很接近;混凝土对钢筋起保护作用。这是钢筋混凝土结构得以实现并获得广泛应用的根本原因。

(3) 混凝土结构有很多优点,也存在一些缺点。应通过合理设计,发挥其优点,克服其缺点。

(4) 本课程主要讲述混凝土结构构件的设计原理,与材料力学既有联系又有区别,学习时应注意比较。

## 思 考 题

- (1) 试分析素混凝土梁与钢筋混凝土梁在承载力和受力性能方面的差异。
- (2) 钢筋与混凝土共同工作的基础是什么？
- (3) 混凝土结构有哪些优点和缺点？如何克服存在的缺点？
- (4) 本课程主要包括哪些内容？学习时应注意哪些问题？

# 第 1 章 材料的物理力学性能

## 1.1 钢筋的物理力学性能

### 1.1.1 钢筋的成分、级别和品种

钢筋的物理力学性能主要取决于它的化学成分,其中铁元素是主要成分,此外还含有少量的碳、锰、硅、磷、硫等元素。钢筋中碳的含量增加,强度就随之提高,但塑性和可焊性降低。钢材根据其含碳量的多少,通常可分为低碳钢(含碳量少于 0.25%)、中碳钢(含碳量 0.25%~0.6%)和高碳钢(含碳量 0.6%~1.4%)。锰、硅元素可提高钢材的强度,并保持一定的塑性。磷、硫是有害元素,其含量超过一定限度时,钢材易于脆断,塑性明显降低,而且焊接质量也不易保证。

在钢材中加入少量合金元素(如锰、硅、钒、钛等)即制成低合金钢,它可以明显地改善钢筋的力学性能。根据所加元素的不同,钢材可分为锰系(如 20MnSi、25MnSi)、硅钛系(如 45Si<sub>2</sub>MnTi)、硅钒系(如 40Si<sub>2</sub>MnV、45SiMnV)等。钢系名称中前面的数字代表平均含碳量(以“1/10 000”计),部分合金元素的下标数字表示该元素含量的百分数。

《混凝土结构设计规范》规定,用于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,可采用热轧钢筋;用于预应力混凝土结构中的预应力钢筋,可采用钢绞线、消除应力钢丝(包括光面钢丝、螺旋肋钢丝和刻痕钢丝),也可采用热处理钢筋。

热轧钢筋(hot-rolled bar)是由低碳钢、普通低合金钢在高温状态下轧制而成,其强度由低到高分为 HPB235(工程符号为  $\phi$ )、HRB335( $\phi$ )、HRB400( $\Phi$ )和 RRB400( $\Phi^R$ )等级。其中 HPB235 级为低碳钢,外形为光面圆形[图 1.1.1(a)],称为光面钢筋(plain bar);其余三种为普通低合金钢,均在表面轧有月牙肋[图 1.1.1(b)]或等高肋[图 1.1.1(c)],称为变形钢筋(deformed bar)。变形钢筋与混凝土的粘结性能比光面钢筋的好。另外,RRB400 级钢筋为余热处理钢筋,是在生产过程中钢筋热轧后经淬火提高其强度,再利用芯部余热回火处理而保留一定延性的钢筋。钢筋混凝土结构中的纵向受力钢筋宜优先采用 HRB400 级钢筋。

钢绞线是由多根高强钢丝捻制在一起经过低温回火处理清除内应力后而制成,分 3 股和 7 股两种[图 1.1.2(a)]。钢绞线的直径系指外接圆直径(见附表 1.22)。



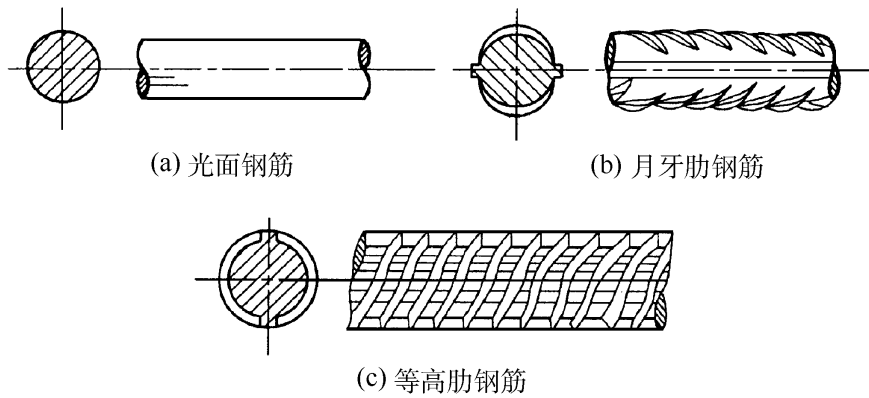


图 1.1.1 热轧钢筋的外形

消除应力钢丝是将钢筋拉拔后,校直,经中温回火消除应力并稳定化处理的钢丝,其直径为 4~ 9mm。其中消除应力螺旋肋钢丝是以低碳钢或普通低合金钢热轧的圆盘条为母材,经冷轧减径后在表面冷轧成有肋的钢筋;消除应力刻痕钢丝是在光面钢丝表面上进行机械刻痕处理,其直径有 5mm 和 7mm 两种。后两种钢丝的形状见图 1.1.2(b,c)。

热处理钢筋是将特定强度的热轧钢筋,经过淬火和回火处理而制成。钢筋经淬火后,强度大幅度提高,但塑性和韧性降低;再经过回火,又可以在不降低强度的前提下,消除由淬火产生的内应力,改善塑性和韧性。热处理钢筋的外形见图 1.1.2(d)。

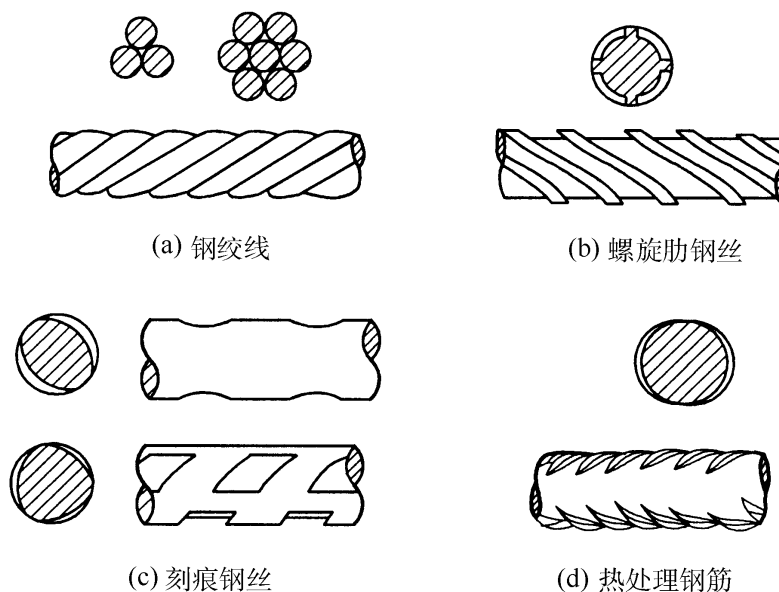


图 1.1.2 预应力钢筋的外形

## 1.1.2 钢筋的强度和变形性能

### 1. 钢筋的应力-应变曲线

根据钢筋在受拉时应力-应变曲线特点,可将钢筋分为有明显流幅和无明显流

幅两类。

### (1)有明显流幅的钢筋

热轧钢筋属于有明显流幅的钢筋,也称为软钢,其拉伸试验的典型应力-应变曲线如图 1.1.3(a)所示。图中所示各点应力-应变性能的特点是: $a$  点以前应力-应变呈直线变化,故  $a$  点对应的应力称为比例极限。过  $a$  点以后,应变的增长速度略快于应力的增长速度,但在应力达到弹性极限  $b$  点之前卸载,应变中的绝大部分仍能恢复。在应力超过  $b$  点以后,钢筋开始塑流,应力-应变图形接近于水平线,这种塑流变形一直延续到  $c$  点。 $bc$  段称为流幅或屈服平台,相应于  $b$  点的应力称为钢筋的屈服强度(yield strength)。过  $c$  点以后,钢筋应力开始重新增长,直到  $d$  点达到了它的极限抗拉强度(ultimate tensile strength),曲线  $cd$  段通常称为强化段。超过  $d$  点后,在试件内部某个薄弱部位的截面将突然急剧缩小,发生局部颈缩现象,如图 1.1.3(b)所示。此后若应力仍按初始横截面计算,则应力是逐渐降低的,至  $e$  点试件被拉断, $e$  点对应的应变称为钢筋的极限应变。实用上,图 1.1.3(a)所示曲线可分为 4 个阶段:弹性阶段  $ob$ 、屈服阶段  $bc$ 、强化阶段  $cd$  和破坏阶段  $de$ 。

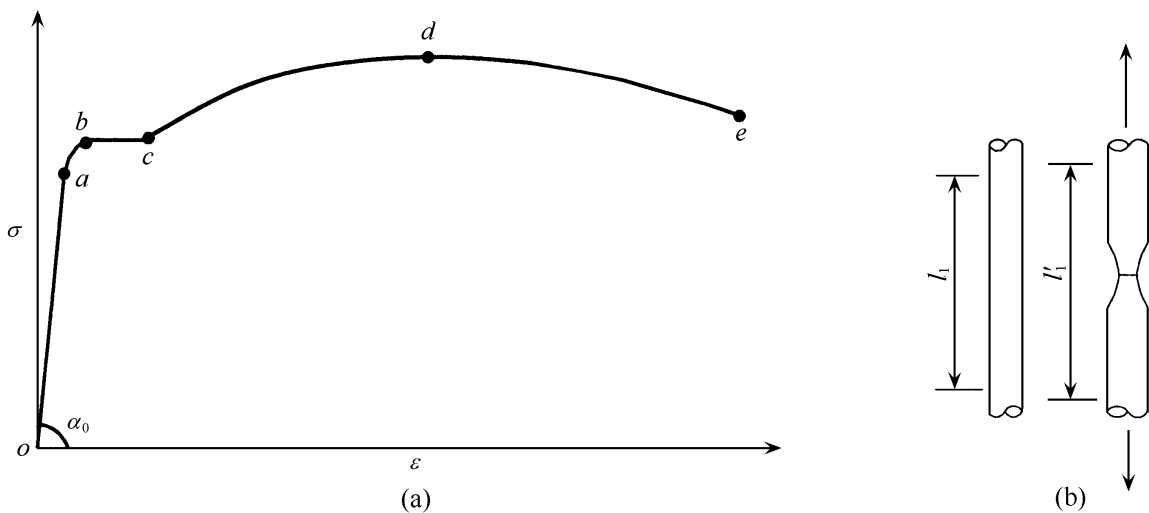


图 1.1.3 有明显流幅钢筋的应力-应变曲线

软钢有两个强度指标:一是  $b$  点的屈服强度,它是钢筋混凝土构件设计时钢筋强度取值的依据。因为钢筋屈服以后产生了较大的塑性变形,这将使构件变形和裂缝宽度大大增加以致影响正常使用,故设计中采用屈服强度作为钢筋的强度限值。另一个强度指标是  $d$  点的极限强度,一般用作钢筋的实际破坏强度。

在科学研究和工程设计中,常将钢筋实际的应力-应变曲线予以简化。图 1.1.4 为软钢应力-应变曲线的简化模型<sup>[18]</sup>。其中图 1.1.4(a)为理想弹塑性模型,图 1.1.4(b)为三段线性模型,图 1.1.4(c)为在硬化应变  $\epsilon_{sh}$  以后取为曲线。

### (2)无明显流幅的钢筋

热处理钢筋和各类钢丝属于无明显流幅的钢筋,也称为硬钢。这类钢筋拉伸时典型应力-应变曲线如图 1.1.5(a)所示,图中各点所示应力-应变性能的特点如下:

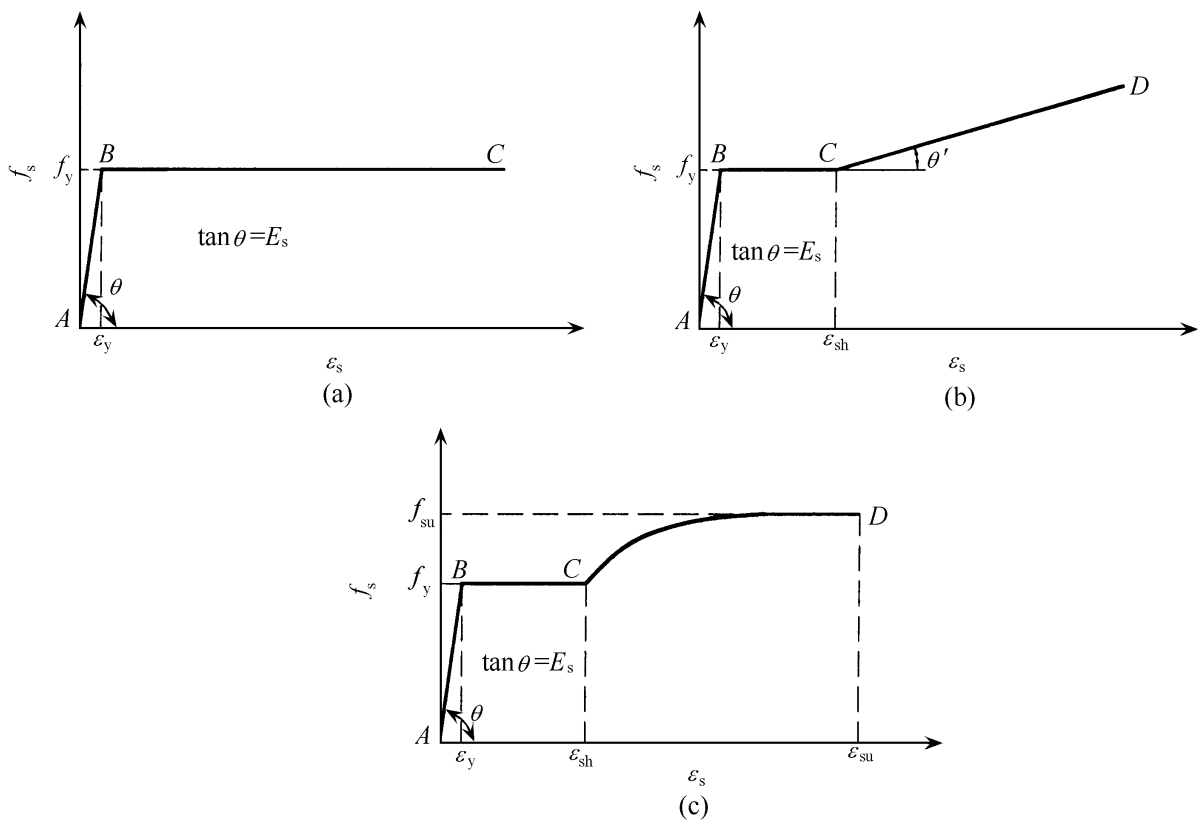
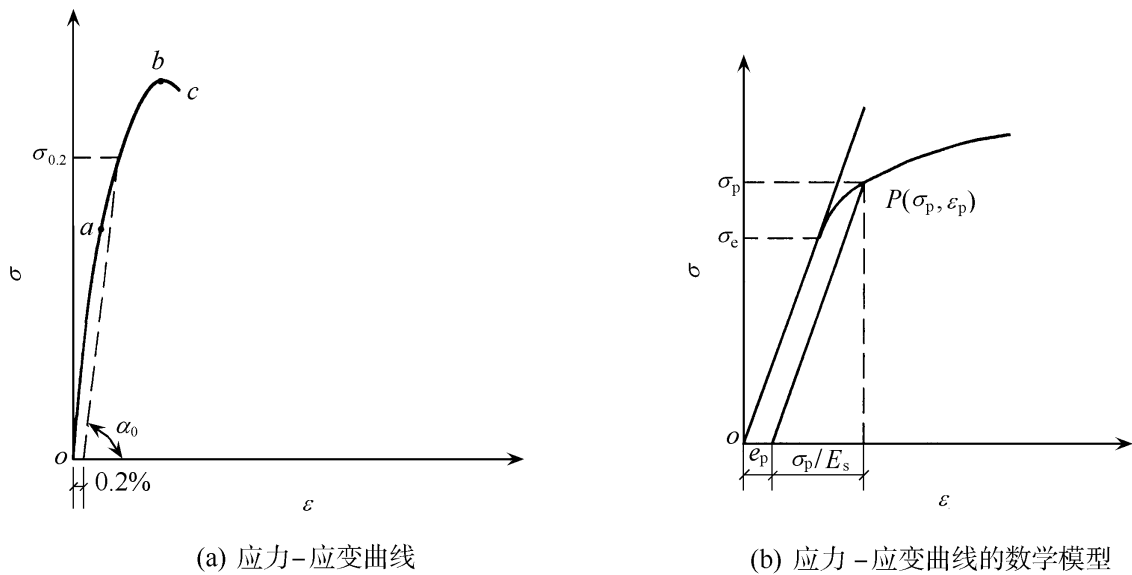


图 1.1.4 软钢应力-应变曲线的简化模型



(a) 应力-应变曲线

(b) 应力-应变曲线的数学模型

图 1.1.5 无明显流幅钢筋的应力-应变曲线及数学模型

钢筋应力达到比例极限(图中  $a$  点, 约为  $0.75\sigma_b$ ,  $\sigma_b$  为极限强度)之前, 应力-应变按直线变化, 钢筋具有明显的弹性性质。超过  $a$  点之后, 钢筋表现出一定的塑性性质, 但应力与应变均持续增长, 应力-应变曲线上没有明显的屈服点。到达极限强度  $b$  点后, 同样由于钢筋的颈缩现象出现下降段, 至  $c$  点钢筋被拉断。

由图 1.1.5(a) 可知, 这类钢筋只有一个强度指标, 即  $b$  点所对应的极限抗拉强度。如前所述, 在设计中极限抗拉强度不能作为钢筋强度取值的依据。因此, 工

程上一般取残余应变为 0.2% 所对应的应力 ( $\sigma_{0.2}$ ) 作为无明显流幅钢筋的强度限值, 通常称为条件屈服强度 (specified yield strength)。根据试验结果,  $\sigma_{0.2} = (0.8 \sim 0.9)\sigma_s$ , 为简化计算, 《混凝土结构设计规范》取  $\sigma_{0.2} = 0.85\sigma_s$ 。

对于无明显流幅的钢筋, 一般采用 Ramberg-Osgood 模型<sup>[9]</sup>, 即

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } 0 \leq \sigma \leq \sigma_e \text{ 时} \quad \varepsilon &= \sigma/E_s \\ \text{当 } \sigma_e \leq \sigma \leq \sigma_p \text{ 时} \quad \varepsilon &= \sigma/E_s + e_p [(\sigma - \sigma_e)/(\sigma_p - \sigma_e)]^n \end{aligned} \right\} (1.1.1)$$

式中:  $\sigma_s$ 、 $\varepsilon_s$ ——钢筋的应力及相应的应变;

$\sigma_e$ ——钢筋的弹性比例极限;

$n$ ——与钢筋种类有关的参数;

$\sigma_p$ ——条件屈服点  $P$  处的应力;

$e_p$ ——确定条件屈服强度所对应的应变, 见图 1.1.5(b)。

当  $\sigma > \sigma_p$  时, 根据我国的试验结果, 硬钢应力-应变曲线的数学模型<sup>[22]</sup>为

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} + 0.002 \left[ \frac{\sigma_s}{\sigma_{0.2}} \right]^{13.5} \quad (1.1.2)$$

### (3) 钢筋的弹性模量

钢筋的弹性模量是根据拉伸试验中测得的弹性阶段的应力-应变曲线确定的。由图 1.1.3 和图 1.1.5 可见, 弹性模量  $E = \sigma/\varepsilon = \tan\alpha$ 。由于钢筋在弹性阶段的受压性能与受拉性能类同, 所以同一种钢筋的受压弹性模量与受拉时相同。各类钢筋的弹性模量见附表 1.5。

## 2. 钢筋的塑性性能

钢筋除了上述的两个强度指标(屈服强度和极限强度)外, 还有两个塑性指标: 延伸率和冷弯性能。这两个指标反映了钢筋的塑性性能和变形能力。

钢筋的延伸率是指钢筋试件上标距为  $10d$  或  $5d$  ( $d$  为钢筋试件直径) 范围内的极限伸长率, 记为  $\delta_{10}$  或  $\delta_5$ 。钢筋的延伸率越大,

表明钢筋的塑性和变形能力越好。钢筋的变形能力一般用延性 (ductility) 来表示, 钢筋应力-应变曲线上屈服点至极限应变点之间的应变值反映了钢筋延性的大小。

为了使钢筋在使用时不会脆断, 加工时不致断裂, 还要求钢筋具有一定的冷弯性能。冷弯是将钢筋围绕某个规定直径  $D$  ( $D$  规定为  $1d, 2d, 3d$  等)

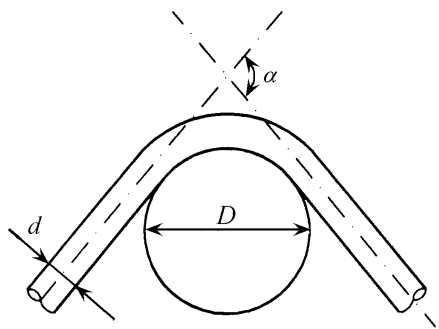


图 1.1.6 钢筋的冷弯

的辊轴弯曲一定的角度 ( $90^\circ$  或  $180^\circ$ ), 如图 1.1.6 所示。弯曲后的钢筋应无裂纹、鳞落或断裂现象。

## 3. 钢筋的徐变和松弛

钢筋在高应力作用下, 随时间增长其应变继续增加的现象称为徐变。钢筋受力

后,长度保持不变,其应力随时间增长而降低的现象称为松弛。在预应力混凝土结构中,预应力钢筋张拉后长度基本保持不变,钢筋会出现松弛,故而引起预应力损失。

钢筋应力松弛随时间而增长,且与初始应力、温度和钢筋种类等因素有关。试验表明,钢筋应力松弛初期发展较快,国际预应力混凝土协会(FIP)给出 100 小时的松弛约占 1 000 小时值的 55%。钢筋应力松弛与初始应力关系很大,初始应力大,应力松弛损失一般也大。冷拉热轧钢筋松弛损失较各类钢丝和钢绞线低,钢绞线的应力松弛大于同种材料钢丝的松弛。温度增加则松弛损失增大。

#### 4. 钢筋的疲劳性能

许多工程结构如吊车梁、铁路或公路桥梁、铁路轨枕、海洋采油平台等都承受重复荷载作用。在频繁的重复荷载作用下,构件材料抵抗破坏的情况与一次受力时有着本质区别,因而需要研究和分析材料的疲劳性能。

钢筋的疲劳破坏是指钢筋在承受重复、周期动荷载作用下,经过一定次数后钢材发生脆性的突然断裂破坏,而不是单调加载时的塑性破坏。此时钢筋的最大应力低于静荷载作用下钢筋的极限强度。钢筋的疲劳强度是指在某一规定应力变化幅度内,经受一定次数循环荷载后,才发生疲劳破坏的最大应力值。一般认为,在外力作用下,钢筋疲劳断裂是由钢筋内部的缺陷造成的,这些缺陷一方面引起局部的应力集中,另一方面由于重复荷载的作用,使已产生的微裂纹时而压合,时而张开,使裂痕逐渐扩展,导致最终断裂。

影响钢筋疲劳强度的因素很多,如应力变化幅度、最小应力值、钢筋外表面的几何形状、钢筋直径、钢筋种类、轧制工艺和试验方法等,其中最主要的为钢筋的疲劳应力幅,即  $\sigma_{m\max}^f - \sigma_{m\min}^f$  ( $\sigma_{m\max}^f, \sigma_{m\min}^f$  为重复荷载作用下同一层钢筋的最大应力和最小应力)。根据我国有关单位对各类钢筋进行的疲劳试验研究结果,《混凝土结构设计规范》给出了各类钢筋在不同的疲劳应力比值  $\rho^f = \sigma_{m\min}^f / \sigma_{m\max}^f$  时疲劳应力幅限值  $\Delta f_y^f$  (普通钢筋)和  $\Delta f_{py}^f$  (预应力钢筋),见附表 1.6~ 1.7。这些值是以荷载循环  $2 \times 10^6$  次条件下的钢筋疲劳应力幅值为依据而确定的。同时,《混凝土结构设计规范》还规定,当  $\rho^f \geq 0.9$  时,可不作钢筋疲劳验算。

### 1. 1. 3 钢筋的冷加工

为了节约钢材和扩大钢筋的应用范围,常常对热轧钢筋进行冷拉、冷拔等机械加工。因经冷加工后,钢筋的力学性能发生了较大变化,故必须对这类钢筋进行研究分析。

#### 1. 钢筋的冷拉

冷拉是在常温下用机械方法将有明显流幅的钢筋拉到超过屈服强度即强化阶段中的某一应力值,如图 1. 1. 7 中的  $k$  点,然后卸载至零。由于  $k$  点的应力已超过弹性极限,故卸载至应力为零时应变并不等于零,其残余应变为  $oo'$ 。若卸载后立即

重新加载,则应力-应变曲线将沿着  $o'kde$  变化, $k$  点为新的屈服点(大致等于冷拉应力值),表明钢筋经冷拉后,屈服强度提高,但塑性降低。这种现象称为冷拉强化。

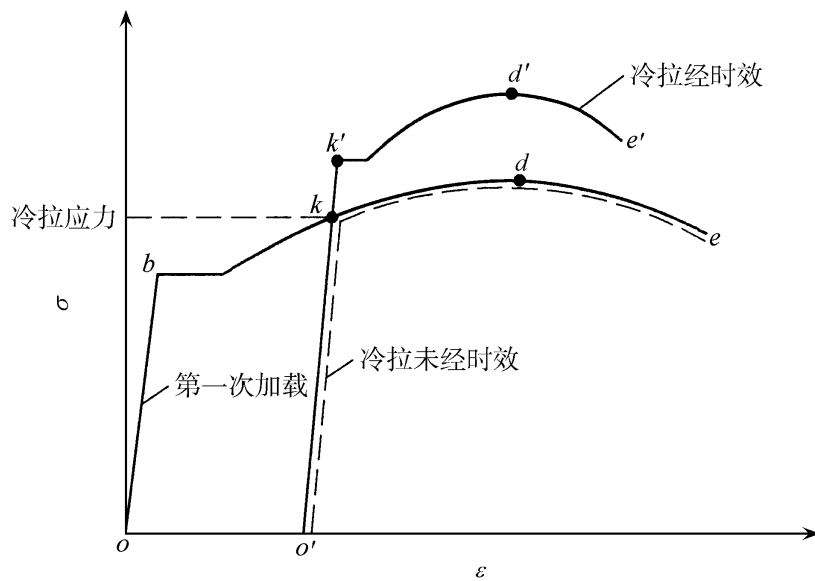


图 1.1.7 冷拉钢筋的应力-应变曲线

如果卸去拉力后,在自然条件下放置一段时间或进行人工加热后再进行拉伸,则应力-应变曲线将沿着  $o'k'd'e'$  变化,屈服强度提高到  $k'$  点(高于冷拉应力值)。由此可见,钢筋在冷拉后,未经时效前,一般没有明显的屈服台阶,而经过停放或加热后进一步提高了屈服强度并恢复了屈服台阶,这种现象称为时效硬化。试验结果表明,普通低碳钢在常温下即发生时效,且在一定限度内屈服点随自然时效的时间而增长。低合金钢常需加热才有时效发生。

应当指出,冷拉只能提高钢筋的抗拉屈服强度,其抗压屈服强度将降低。我国的试验资料表明<sup>[14]</sup>,对冷拉 5.5% 的 5 号螺纹钢来说,其抗压的流限(时效后)比冷拉前降低达 15% ~ 17.5%。因此,在设计中冷拉钢筋不宜作受压钢筋使用。另外,在焊接时的高温作用下,冷拉钢筋的冷拉强化效应将完全消失,因此,钢筋应先焊接,然后进行冷拉。

## 2. 钢筋的冷拔

冷拔一般是将  $\phi 6$  的 HPB235 级热轧钢筋强行拔过小于其直径的硬质合金拔丝模具,如图 1.1.8(a)所示。钢筋纵向经拉伸长度拔长,横向经挤压直径减小,使钢筋纵、横向都产生塑性变形。经过几次冷拔的钢丝,强度大为提高,但塑性降低。图 1.1.8(b)为  $\phi 6$  的 HPB235 级钢筋经三次冷拔到  $\phi 3$  钢丝的应力-应变曲线,可见冷拔后的钢丝没有明显的屈服点和流幅(即由软钢变为硬钢),抗拉强度由  $260\text{N}/\text{mm}^2$  提高到  $750\text{N}/\text{mm}^2$ ,而极限拉应变则由 21.9% 降至 3.3%。其中第一次冷拔后极限拉应变降至 6.66%。冷拔可同时提高抗拉和抗压强度。