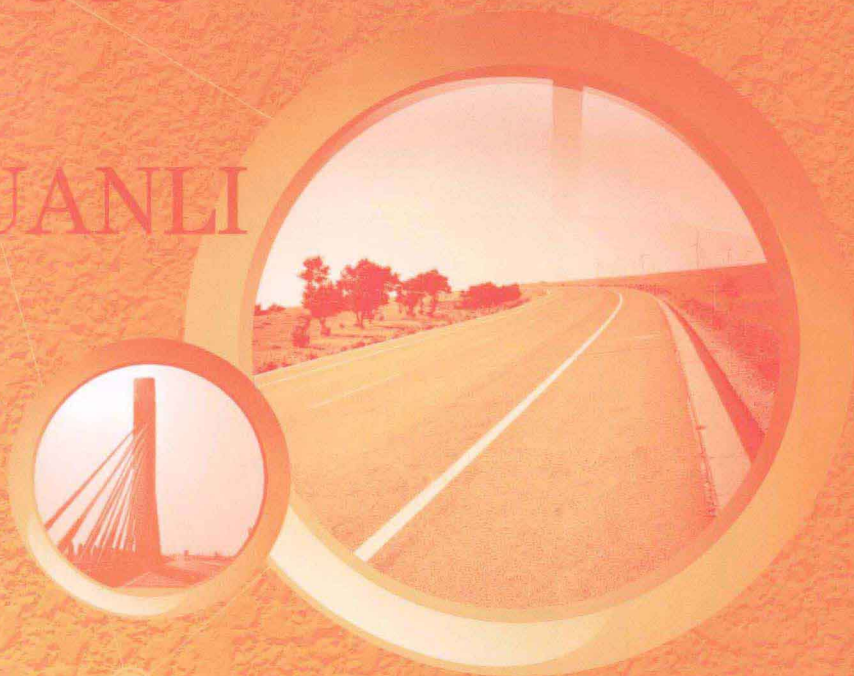


● 普通高等教育“十二五”规划教材

# 混凝土结构基本原理

李章政 余启明 郑文静 高峰 主编

HUNNINGTU  
JIEGOU  
JIBENYUANLI



化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

# 混凝土结构基本原理

李章政 余启明 郑文静 高峰 主编



化学工业出版社

·北京·

本书是普通高等教育“十二五”规划教材。

全书共分为8章，内容主要包括混凝土结构概述，混凝土结构设计基础，混凝土结构材料的性能，钢筋混凝土受弯构件、受压构件、受拉构件、受扭构件，预应力混凝土构件。

本书可作为土木工程专业建筑工程方向或工民建方向的教材，也可作为工程管理、工程造价等相关专业的教学用书，同时，还可供工程技术人员、设计人员准备注册考试和知识更新时参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构基本原理/李章政,余启明,郑文静,高峰主编.—北京:  
化学工业出版社,2013.7

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-17533-5

I. ①混… II. ①李… ②余… ③郑… ④高… III. ①混凝土结构-高等学校-教材 IV. ①TU37

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第117858号

---

责任编辑:满悦芝

责任校对:吴静

文字编辑:荣世芳

装帧设计:刘丽华

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张14 $\frac{3}{4}$  字数360千字 2013年9月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:34.00元

版权所有 违者必究

# 前 言

“混凝土结构基本原理”课程是土木工程专业知识体系的组成部分，从属于结构基本原理和方法知识领域。本书依据现行国家规范《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)编写而成，涵盖了《高等学校土木工程本科指导性专业规范》所提出的知识单元和知识点。内容涉及混凝土结构设计的理论基础，材料的性能及设计指标取值，钢筋混凝土构件(受弯构件、受压构件、受拉构件、受扭构件)的设计计算和构造要求，预应力混凝土构件设计，素混凝土构件设计等。深度上以讲清混凝土结构设计的基本原理为主，即各种构件的受力性能、特点、计算公式、适用条件及应用范例，广度上包含了全部混凝土构件，即钢筋混凝土构件、预应力混凝土构件和素混凝土构件，可满足土建领域本科教学的需要。本书可作为土木工程专业建筑工程方向或工民建方向的教材，也可作为工程管理、工程造价等相关专业的教学用书，同时，还可供工程技术人员、设计人员准备注册考试和知识更新时参考。

全书共分为8章和两个附录。其中附录B是设计计算用表格，需要时可直接查用。本书的基础部分是前3章，即第1章混凝土结构概述、第2章混凝土结构设计基础和第3章混凝土结构材料的性能；本书重点在于钢筋混凝土构件设计，包括第4章钢筋混凝土受弯构件、第5章钢筋混凝土受压构件、第6章钢筋混凝土受拉构件、第7章钢筋混凝土受扭构件；第8章预应力混凝土构件，对于不同的学校和不同的专业层次，可以作为重点，也可以不作为重点；附录A素混凝土结构构件设计，仅供学生参考，不必讲授。完成全书的教学计划，大约需要60学时。为了巩固基本概念、熟悉构造要求、掌握计算方法，每章都安排了丰富的实例，还配有思考题、单项选择题、设计计算题。

本书具体编写分工如下：武汉轻工大学余启明编写第1章、第2章、第7章，山西大同大学高峰编写第3章，广西科技大学郑文静编写第4章，四川大学李章政编写第5章、第8章和附录，山西大同大学李志鸢编写第6章。全书由李章政担任总负责人，负责统稿、定稿工作。

由于编者水平和时间有限，不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者  
2013 年春

# 目 录

<b>第 1 章 混凝土结构概述</b> .....	1
1.1 混凝土结构的概念 .....	1
1.2 混凝土结构的应用 .....	2
1.2.1 材料方面 .....	2
1.2.2 结构方面 .....	5
1.3 钢筋和混凝土共同工作的可能性 .....	8
1.4 混凝土结构设计规范介绍 .....	9
1.5 课程的特点和学习要求 .....	9
1.5.1 学习本课程的主要目的 .....	9
1.5.2 课程内容 .....	9
1.5.3 课程特点和学习中应注意的问题 .....	10
1.5.4 学习方法 .....	10
思考题 .....	11
<b>第 2 章 混凝土结构设计基础</b> .....	12
2.1 结构的重要性及重要性系数 .....	12
2.2 结构设计基准期和使用年限 .....	12
2.3 结构功能要求和极限状态 .....	13
2.3.1 结构上的作用与作用效应 .....	13
2.3.2 结构的功能要求 .....	14
2.3.3 结构的极限状态 .....	14
2.4 结构极限状态设计方法 .....	15
2.4.1 承载能力极限状态设计 .....	15
2.4.2 正常使用极限状态设计 .....	17
2.5 混凝土结构的耐久性 .....	17
2.5.1 混凝土结构耐久性概念 .....	17
2.5.2 影响混凝土结构耐久性的因素 .....	18
2.5.3 耐久性设计目的和基本原则 .....	20
2.5.4 混凝土结构耐久性设计基本要求 .....	21
思考题 .....	22
选择题 .....	23
计算题 .....	23
<b>第 3 章 混凝土结构材料的性能</b> .....	24
3.1 混凝土的力学性能 .....	24
3.1.1 单轴应力状态下的混凝土强度 .....	24
3.1.2 复合应力状态下的混凝土强度 .....	27

3.1.3	混凝土的变形 .....	28
3.2	混凝土的性能指标取值 .....	32
3.2.1	混凝土的轴心抗压（拉）强度 .....	32
3.2.2	混凝土的弹性常数 .....	33
3.2.3	混凝土的疲劳性能指标 .....	33
3.2.4	混凝土的热工参数 .....	34
3.3	钢筋的种类及其性能 .....	34
3.3.1	钢筋的种类 .....	34
3.3.2	钢筋的强度与变形 .....	36
3.3.3	钢筋的本构关系 .....	37
3.3.4	钢筋的疲劳 .....	38
3.3.5	混凝土结构对钢筋性能的要求 .....	38
3.4	钢筋的性能指标取值 .....	38
3.5	钢筋与混凝土的黏结 .....	40
3.5.1	黏结的作用 .....	40
3.5.2	黏结力的组成 .....	41
3.5.3	黏结强度影响因素 .....	41
3.5.4	钢筋的锚固 .....	41
	思考题 .....	43
	选择题 .....	43
	计算题 .....	44

## 第4章 钢筋混凝土受弯构件 .....

4.1	钢筋混凝土受弯构件的一般构造规定 .....	45
4.1.1	常用梁、板的截面形状和尺寸 .....	45
4.1.2	材料选择 .....	47
4.1.3	混凝土保护层厚度 .....	48
4.2	钢筋混凝土受弯构件正截面受力特点 .....	49
4.2.1	受弯构件正截面的受力全过程 .....	49
4.2.2	钢筋混凝土梁正截面的破坏形式 .....	51
4.3	钢筋混凝土受弯构件正截面承载力 .....	52
4.3.1	正截面承载力计算的基本假定 .....	52
4.3.2	等效矩形应力图 .....	53
4.3.3	单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算 .....	56
4.3.4	双筋矩形截面受弯构件正截面受弯承载力 .....	62
4.3.5	T形截面受弯构件正截面承载力计算 .....	68
4.4	钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力 .....	73
4.4.1	裂缝的形成及分类 .....	73
4.4.2	腹筋种类及构造 .....	74
4.4.3	配箍率与剪跨比 .....	75
4.4.4	影响受剪承载力的因素 .....	77

4.4.5	无腹筋梁的受剪性能	77
4.4.6	有腹筋梁的受剪性能	78
4.5	钢筋混凝土受弯构件裂缝宽度验算	86
4.5.1	裂缝的分类及控制	86
4.5.2	裂缝的出现、分布和开展	87
4.5.3	平均裂缝间距 $l_m$	89
4.5.4	平均裂缝宽度 $w_m$	90
4.5.5	最大裂缝宽度 $w_{max}$	92
4.5.6	影响裂缝宽度的主要因素	93
4.6	钢筋混凝土受弯构件挠度验算	94
4.6.1	截面弯曲刚度的概念	94
4.6.2	短期刚度 $B_s$	95
4.6.3	考虑荷载长期作用影响时的受弯构件刚度 $B$	98
4.6.4	最小刚度原则与挠度验算	98
4.6.5	受弯构件挠度验算的讨论	100
	思考题	101
	选择题	101
	计算题	104

## 第5章 钢筋混凝土受压构件

5.1	钢筋混凝土受压构件及其构造要求	106
5.1.1	钢筋混凝土受压构件的类型	106
5.1.2	钢筋混凝土受压构件的材料和截面	107
5.1.3	钢筋混凝土受压构件的配筋构造	107
5.2	钢筋混凝土轴心受压构件正截面承载力计算	109
5.2.1	钢筋混凝土轴心受压构件的破坏特征	109
5.2.2	普通箍筋柱正截面承载力计算	112
5.2.3	螺旋箍筋柱正截面承载力计算	114
5.3	钢筋混凝土偏心受压构件正截面承载力计算	116
5.3.1	钢筋混凝土偏心受压构件的破坏特征	116
5.3.2	偏心受压构件挠曲二阶效应	118
5.3.3	对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	120
5.3.4	非对称配筋矩形截面偏心受压构件承载力计算	129
5.3.5	I形截面偏心受压构件正截面承载力计算	132
5.4	钢筋混凝土偏心受压构件斜截面承载力计算	133
5.4.1	轴向压力对斜截面受剪承载力的影响	133
5.4.2	钢筋混凝土偏心受压构件斜截面受剪承载力计算	134
5.5	钢筋混凝土偏心受压构件裂缝宽度验算	135
	思考题	136
	选择题	137
	计算题	138

<b>第 6 章</b>	<b>钢筋混凝土受拉构件</b> .....	139
6.1	钢筋混凝土受拉构件的受力特点及构造要求 .....	139
6.1.1	钢筋混凝土受拉构件的受力特点 .....	139
6.1.2	钢筋混凝土受拉构件的构造要求 .....	139
6.2	钢筋混凝土轴心受拉构件承载力计算 .....	140
6.2.1	钢筋混凝土轴心受拉构件的受力分析 .....	140
6.2.2	钢筋混凝土轴心受拉构件正截面承载力计算 .....	140
6.3	钢筋混凝土偏心受拉构件承载力计算 .....	141
6.3.1	钢筋混凝土偏心受拉构件的分类 .....	141
6.3.2	小偏心受拉构件正截面承载力计算 .....	142
6.3.3	大偏心受拉构件正截面承载力计算 .....	143
6.3.4	钢筋混凝土偏心受拉构件斜截面承载力计算 .....	145
6.4	钢筋混凝土受拉构件裂缝宽度验算 .....	145
6.4.1	裂缝的形成原因、影响因素 .....	145
6.4.2	最大裂缝宽度 .....	146
6.4.3	裂缝宽度验算 .....	147
	思考题 .....	147
	选择题 .....	147
	计算题 .....	148
<b>第 7 章</b>	<b>钢筋混凝土受扭构件</b> .....	149
7.1	受扭构件的受力特点及构造要求 .....	149
7.2	钢筋混凝土矩形截面纯扭构件承载力计算 .....	150
7.2.1	开裂扭矩的计算 .....	150
7.2.2	纯扭构件的承载力 .....	151
7.2.3	计算公式的适用条件 .....	153
7.3	钢筋混凝土矩形截面弯剪扭构件承载力计算 .....	154
7.3.1	弯剪扭构件的破坏形式 .....	154
7.3.2	弯剪扭构件的承载力 .....	155
7.4	钢筋混凝土 T 形和 I 形截面受扭构件承载力计算 .....	159
	思考题 .....	160
	计算题 .....	160
<b>第 8 章</b>	<b>预应力混凝土构件</b> .....	161
8.1	预应力混凝土概述 .....	161
8.1.1	预应力混凝土基本原理 .....	161
8.1.2	预应力混凝土的分类、特点及应用 .....	162
8.2	预应力施工工艺 .....	165
8.2.1	预应力施加方法 .....	165
8.2.2	锚具和夹具 .....	167
8.2.3	预加应力的其他设备 .....	171
8.3	张拉控制应力与预应力损失 .....	173



8.3.1	张拉控制应力	173
8.3.2	各项预应力损失	174
8.3.3	预应力损失值组合	180
8.4	预应力混凝土轴心受拉构件计算	181
8.4.1	轴心受拉构件各阶段应力分析	181
8.4.2	轴心受拉构件设计计算	183
8.5	预应力混凝土受弯构件计算	191
8.5.1	预应力混凝土受弯构件应力计算	192
8.5.2	预应力混凝土受弯构件正截面承载力计算	198
8.5.3	预应力混凝土受弯构件斜截面受剪承载力计算	199
8.5.4	预应力混凝土受弯构件裂缝控制验算	200
8.5.5	预应力混凝土受弯构件挠度验算	202
8.5.6	预应力混凝土受弯构件施工验算	203
8.6	预应力混凝土构件的构造要求	210
8.6.1	先张法构件的构造要求	210
8.6.2	后张法构件的构造要求	210
	思考题	213
	选择题	213
	计算题	214

## 附录 ..... 215

附录 A	素混凝土结构构件设计	215
A.1	素混凝土结构的一般规定	215
A.2	素混凝土受压构件承载力计算	215
A.2.1	受压承载力计算	215
A.2.2	抗裂承载力验算	217
A.3	素混凝土受弯构件承载力计算	218
A.4	素混凝土局部受压承载力计算	218
附录 B	计算用表格	219
附表 1	混凝土强度标准值	219
附表 2	混凝土强度设计值	219
附表 3	混凝土的弹性模量	220
附表 4	普通钢筋强度标准值	220
附表 5	预应力筋强度标准值	220
附表 6	普通钢筋强度设计值	220
附表 7	预应力筋强度设计值	221
附表 8	钢筋的弹性模量	221
附表 9	混凝土保护层的最小厚度 $c$	221
附表 10	纵向受力钢筋的最小配筋百分率 $\rho_{\min}$	222
附表 11	混凝土受弯构件挠度限值	222
附表 12	结构构件的裂缝控制等级及最大裂缝宽度的限值	222

附表 13 每米板宽内的钢筋截面面积 .....	223
附表 14 钢筋的公称直径、公称截面面积及理论质量 .....	224
附表 15 钢绞线的公称直径、公称截面面积及理论质量 .....	224
附表 16 钢丝的公称直径、公称截面面积及理论质量 .....	224
选择题参考答案 .....	225
参考文献 .....	226

# 第 1 章 混凝土结构概述

## 1.1 混凝土结构的概念

混凝土，一般是指由胶凝材料（水泥），粗、细骨料（石子、砂粒），水及其他材料，按适当比例配制，拌和并硬化而成的具有所需形体、强度和耐久性的人造石材。也被形象地称为“砼”。

混凝土结构是以混凝土为主要材料制成的结构，包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构等。

素混凝土结构是由无筋或不配置受力钢筋的混凝土制成的结构，常用于路面（图 1.1）、基础、挡土墙、重力坝和一些非承重结构。

钢筋混凝土结构是由配置受力的普通钢筋、钢筋网或钢筋骨架的混凝土制成的结构（图 1.2）。

预应力混凝土结构是充分利用高强度材料来改善钢筋混凝土结构的抗裂性能的结构，是由配置受力的预应力筋通过张拉或其他方法建立预应力的混凝土结构（图 1.3）。

钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构常用作土木工程中的主要承重结构。在多数情况下混凝土结构是指钢筋混凝土结构。

钢筋和混凝土都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，但混凝土的抗压强度较高，而抗拉强度却很低。为了充分发挥这两种材料性能的优



图 1.1 素混凝土路面

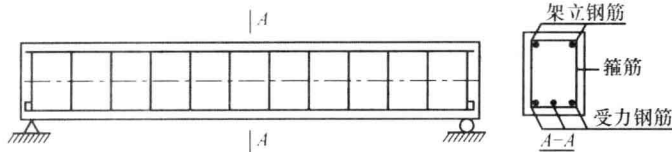


图 1.2 钢筋混凝土梁

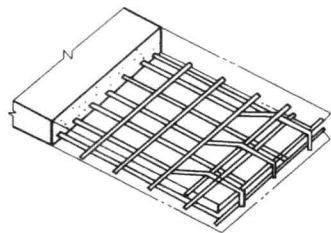


图 1.3 预应力混凝土板

势，把钢筋和混凝土按照合理的组合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，以满足工程结构的使用要求。

两端搁置在砖墙上的一根梁，在竖向外力作用下会产生弯曲变形，上部为受压区，下部为受拉区（图 1.4）。当此梁由素混凝土制成时，由于混凝土抗拉强度很低，于是在很小的荷载作用下，梁下部受拉区边缘的混凝土就会出现裂缝，而受拉区混凝土一旦开裂，在荷载

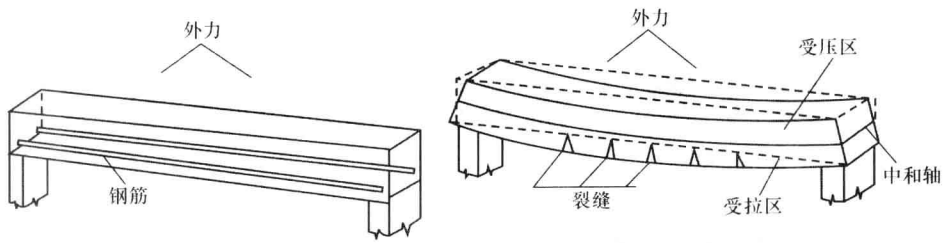


图 1.4 简支梁受力分析

持续作用下，裂缝会迅速向上发展，梁在瞬间就会骤然脆裂断开，而梁上部混凝土的抗压能力却还未能充分利用。素混凝土梁的承载力很低。当梁在受拉区配置适量的钢筋，即构成钢筋混凝土梁，在荷载作用下，梁的受拉区混凝土仍会开裂，但钢筋的存在可以代替受拉区混凝土承受拉力，裂缝不会迅速发展，受压区的压应力仍由混凝土承受，因此，梁可以承受继续增大的荷载，直到钢筋的应力达到其屈服强度。随后荷载仍可略有增加致使受压区混凝土被压碎，混凝土抗压强度得到了充分利用，梁终告破坏。可见，配置在受拉区的钢筋明显地加强了受拉区的抗拉能力，从而使钢筋混凝土梁的承载力比素混凝土梁有很大的提高。这样，混凝土的抗压能力和钢筋的抗拉能力都得到了充分利用，而且在梁破坏前，其裂缝充分发展，变形迅速增大，有明显的破坏预兆。结构的受力特性得到显著改善。

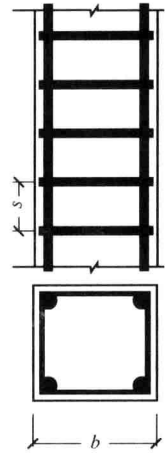


图 1.5 钢筋混凝土柱

承受轴心压力的受压构件，例如图 1.5 所示的柱，通常也配置纵向钢筋，协助混凝土承受压力，以达到减小柱的截面尺寸、改善柱的受力性能、提高柱的承载能力、增加柱的延性的目的。而承受偏心压力的柱，截面上有弯矩存在，可能全截面受压，也可能一部分截面受压、另一部分截面受拉，纵向钢筋帮助混凝土承担压应力或独立承担拉应力。

## 1.2 混凝土结构的应用

### 1.2.1 材料方面

目前常用的普通混凝土，针对它尚存在强度和耐久性不高、工作性能与水灰比密切相关、抗裂性较差和脆性较大、抗渗和抗蚀能力较弱、水化热偏高易产生裂缝等弱点，几十年来经历了许多重大变革。

20 世纪 30 年代末，美国首先发明外加剂来提高混凝土的流动性。20 世纪 40 年代德国首创聚合物混凝土以改善其脆性、提高其抗渗抗蚀能力。20 世纪 60 年代美国发明浸渍混凝土可提高混凝土的耐久性、抗蚀性。前苏联开发了钢丝网水泥；我国用玻璃纤维增强水泥等改善混凝土的抗裂性、耐磨性及延性。1980 年美国首先提出水泥基复合材料（Cement-based Composite Materials）的名词，突出了复合化的地位，现已成为以水泥为基材的各种材料的总称，如轻质混凝土、加气混凝土、聚合物混凝土、树脂混凝土、浸渍混凝土、纤维混凝土以及根据性能要求发展的高强度混凝土、高流动性混凝土、耐热混凝土、耐火混凝土

土、膨胀混凝土等。20世纪80年代末90年代初出现了高性能混凝土（High Performance Concrete, HPC），它是在大幅度提高普通混凝土性能的基础上采用现代混凝土技术制作的混凝土，它对混凝土的耐久性、工作性、强度、适用性、体积稳定性、经济性进行有重点地保证。未来发展的应是绿色高性能混凝土（Green HPC）和超高性能混凝土（Ultra HPC）。前者用工业废渣（如水淬矿渣、优质粉煤灰、复合细掺料）为主的细掺料代替大量水泥熟料，以更有效地减少环境污染；后者如活性细粒混凝土、注浆纤维混凝土、压密配筋混凝土，其特点是高强度、高密实性、以大量纤维增强来克服混凝土材料的脆性。

按施工方法不同配制的碾压混凝土是国内外发展较快的一种新型材料，用于大体积混凝土结构、工业厂房地面、公路路面及机场道面等。其浇筑机具与普通混凝土不同，平整使用推土机，振实用碾压机，层间处理用刷毛机，施工的机械化程度和施工效率高，与普通混凝土相比，可缩短浇筑工期，并可大大减少用水量和水泥用量。碾压混凝土的层间抗剪性能是修筑混凝土高坝的关键，国内正开展这方面的研究工作。其他混凝土，如泵送混凝土、流态混凝土，应用比较广泛，还有水下混凝土，将水泥砂浆用压力灌入粗骨料空隙中形成的压浆混凝土、喷射混凝土等也得到应用。现在，我国常用混凝土可达到C50~C60，特殊工程可用C80~C100；而美国常用混凝土则可达C80~C135，特殊工程可用C400。

钢材的发展以提高其屈服点和综合（包括防锈和防火）性能为主。德国用于建筑结构的钢材的屈服强度可达690MPa。印度近年使用了一种肋形扭曲钢筋，它是由屈服强度为240MPa的普通肋形钢筋扭曲后形成的，屈服强度可提高到415MPa，而且其塑性、冷弯性、黏结力、高温反应、可焊性、冲击和爆炸反应都有较大提高。将它用于高层框架混凝土结构，总用钢量可降低40%。此外，在预应力混凝土构件中采用的高强钢筋也有较大的发展，如16mm直径的调质钢筋强度可达1350/1500~1450/1600MPa（屈服强度/抗拉强度），用高频感应炉热处理生产的直径为9~32mm的含碳量不很高的预应力钢筋，强度可达800/950~1350/1450MPa。我国已经开始生产600MPa级的热轧钢筋，预应力钢丝、钢绞线的抗拉强度可达到1960MPa，钢筋正向更高强度、低松弛、耐腐蚀、具有较高延性的方向发展。

用两种或两种以上材料组合，利用各自的优越性开发出高性能的便于使用的建筑制品，应该成为21世纪土木工程的一个重要特征。目前，钢-混凝土组合结构（混合结构）是采用钢构件和混凝土构件，或钢-混凝土组合构件共同组成的承重结构体系或抗侧力结构体系。这种组合可使钢和混凝土两种材料都取长补短，取得良好的技术经济效果。钢-混凝土组合构件有组合板、组合梁、组合柱等。其中钢管混凝土柱的应用已有80多年的历史，早在20世纪初美国就在一些单层和多层房屋建筑中采用钢管混凝土柱。在组合结构中，钢管混凝土结构是一种有前途的结构体系。钢管混凝土是在型钢混凝土和螺旋配筋混凝土的基础上演变和发展起来的，在钢管内充填混凝土形成的构件，具有承载力高、塑性韧性好、施工方便、耐火性能强、经济效果好等优点。20世纪60年代我国也将钢管混凝土柱用于北京地下铁道车站（地铁车站），以后又相继在工业厂房框架、高炉和锅炉构架中应用。至于钢-混凝土组合结构体系，如组合剪力墙体系、组合框架体系、组合筒体系、组合巨型框架体系等，则是在1969年后美国芝加哥的SOM（Skidmore Owings & Merrill）公司法兹勒·坎恩（Fazlur Khan）博士提出建议后发展起来的。

上海环球金融中心（图1.6）是位于中国上海陆家嘴的一栋摩天大楼，2008年8月29日竣工。是中国目前第二高楼、世界第三高楼、世界最高的平顶式大楼，楼高492m，地上101层。

## 004 混凝土结构基本原理

香港中国银行大厦（图 1.7）于 1989 年建成，地上 71 层，高 315m，天线顶端高 368m。按建筑师贝聿铭的造型，平面为  $52\text{m} \times 52\text{m}$  的正方形，沿正方形对角线划分成 4 个等腰三角形，向上每隔若干层切去一个角区，仅一个角区至楼的顶部，上部结构由 4 根组合在一起、高度递增不同的三棱柱组成。整座大楼由 8 片钢结构平面支撑和 5 根型钢混凝土柱组成混合结构“大型立体支撑体系”。型钢混凝土柱平面尺寸为  $4.3\text{m} \times 7.93\text{m}$ 。该建筑在受力上极为合理。

深圳地王大厦（图 1.8）由 3 部分组成：主楼为 68 层的写字楼，加上设备层等实为 81 层，高 309.95m，至桅杆顶高 383.95m；辅楼是 33 层的商务住宅，120m 高，立面体型呈两块板叠合相错，中间有一巨型门洞贯通大厦南北；5 层购物裙房将两个高层相连，1996 年建成，当时为我国最高的组合结构建筑，后被上海金茂大厦超过。

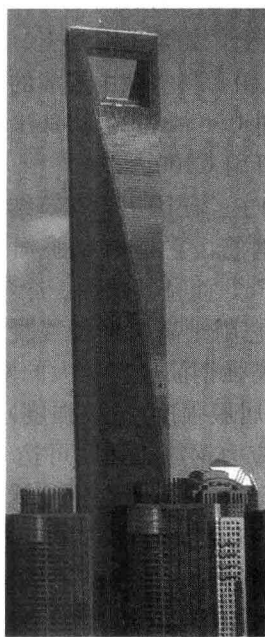


图 1.6 上海环球金融中心

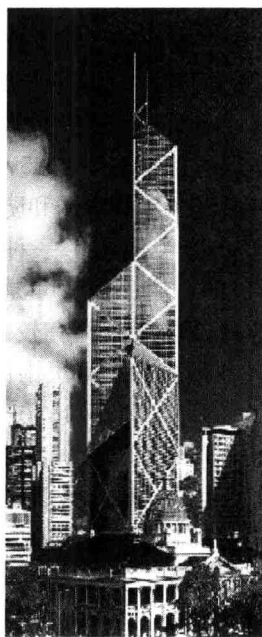


图 1.7 香港中国银行大厦

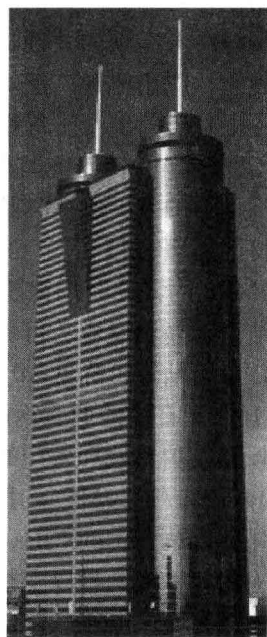


图 1.8 深圳地王大厦

用钢材和混凝土做成的压型钢板楼盖、组合梁、组合柱已在高层建筑和大跨桥梁中广泛应用。今后，利用层压技术把传统材料组合起来形成各种具有建筑装饰、受力、热工、隔声、绝缘、防火等方面新性能的复合材料，用于屋面、墙体乃至结构构件，是建筑业发展的新天地。

化学合成材料用于抗力结构是材料发展的崭新领域。新研制的自修复混凝土，是在混凝土中掺入空心纤维，并灌以树脂，当结构构件出现超过允许宽度的裂缝时，混凝土内的微细管孔破裂，树脂会自动流出封闭裂缝。再如，将结构的梁和柱之间用聚合物作为缓冲材料连接，它在一般荷载作用下是刚性连接，而在振动作用较大时则变成柔性连接，能起到吸收和缓冲地震或风力带来的加速度的作用。另外，还有金属板涂膜材料、光纤混凝土、自动变状塑料制品、形状记忆合金等新材料都正在研制和开发之中。目前将化学合成材料用于管材、门窗、装饰配件、黏结剂、外加剂等已非常普遍，今后的方向一是扩展用于建筑的外围部件，如用之代替钢、铜、木和陶瓷等传统材料；二是改善建筑制品的性能，包括保温、隔热、隔声、耐高

温、耐高压、耐磨、耐火等新的需求；三是在研究、开发其受力和变形的性能后用于抗力结构，国外已有聚合物处理的碳纤维钢筋和碳纤维钢绞线，可用于混凝土结构。

### 1.2.2 结构方面

钢筋混凝土和预应力混凝土结构，除在一般工业与民用建筑中得到了极为广泛的应用外，当前令人瞩目的是它在高层建筑、大跨桥梁和高耸结构物应用中突飞猛进和日新月异地向前发展。

钢-混凝土组合结构是近年来值得注意的发展方向之一，如钢板混凝土用于地下结构、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或桥梁，外包钢混凝土柱用于电厂主厂房等。在钢管内浇筑混凝土，在纵向压力作用下，使管内混凝土处于三向受压状态，而管内的混凝土又抑制管壁的局部失稳，因而使构件的承载力和变形能力大大地提高，而且钢管又是混凝土的模板，施工速度加快。这种结构近年来已在国内逐步得到应用。

在钢-混凝土组合梁中，将工字型钢腹板按折线形切开，改焊成高度更大的蜂窝形梁，既提高了抗弯能力，又便于管道通过有洞的腹板，这已经在电厂结构中得到应用。

近年来，比利时、日本以及我国研究应用一种预弯型钢的预应力梁，即将预制的带有拱度的工字型钢梁，在加载状态下，在下翼缘浇筑混凝土，待达到一定强度后卸载使下翼缘的混凝土预压，然后运至现场铺设预制梁板，再浇筑上部混凝土成为装配整体式构件，在使用荷载下，下翼缘产生的外加拉应力可与预加的压应力抵消，类似于预应力混凝土迭合结构，虽然钢材用量稍多，但截面尺寸和自重均可减小，施工时无需锚具和张拉设备。国外已建成跨度达 60m 的公路桥，国内在辽宁、武汉、哈尔滨等地的桥梁工程中已有应用。

预应力混凝土结构近年来发展也较迅速，其中引人重视的是无黏结部分预应力混凝土结构。无黏结筋是由单根或多根高强钢丝、钢绞线或钢筋，沿全长涂抹防腐油脂并用聚乙烯热塑管包裹而成。张拉时无黏结筋与周围混凝土产生纵向相对滑动。无黏结筋像普通钢筋一样敷设，然后浇筑混凝土，待混凝土达到规定的强度后进行张拉和锚固，省去了传统后张预应力混凝土预埋管道、穿索、压浆工艺，节省施工设备，缩短工期，节约造价，可得到综合的经济效益，我国目前已在房屋建筑和公路桥梁中应用。

一种体外张拉的预应力索已在桥梁工程的修建、补强加固中应用，其特点是：与体内无黏结预应力筋一样大幅度减小预应力值的摩擦损失，简化截面形状和减小截面或壁厚尺寸，便于再次张拉、锚固、更换或增添新索，提高构件的承载力，我国汕头海湾大桥的悬索桥预应力混凝土加劲梁即采用了体外索。

国内最近在上海成都路高架桥工程采用一种“缓黏结”预应力混凝土张拉工艺，与无黏结预应力筋类似，但预应力筋周围是用缓凝砂浆包裹，在钢筋张拉时砂浆不起黏结作用可以自由张拉，待钢筋锚固后砂浆缓慢凝结硬化，与预应力筋相黏结。这种施工工艺，在张拉时是“无黏结”，在砂浆凝结后又是“有黏结”的，具有进一步开展研究的意义。

马来西亚吉隆坡的石油双塔大厦（图 1.9），由两个并排的圆形建筑所组成，每个塔的内筒为边长 23m 的方形，外围为 16 根圆柱（直径 1.2~2.4m）。地上 88 层，高 390m，连同桅杆总高 450m，底层至 84 层均为钢筋混凝土及钢骨混凝土结构。

我国已建成的上海金茂大厦（图 1.10），为钢-混凝土组合结构，其中部分柱配置了钢骨，88 层，高度为 420.5m。结构体系是一个用外伸桁架与外侧 8 个巨型组合柱连接的混凝土核心筒，截面为 1.5m×4.9m~1.0m×3.5m。

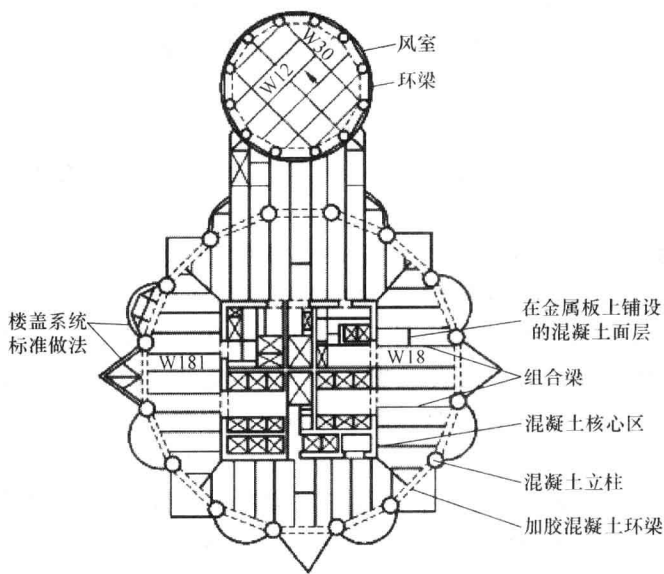
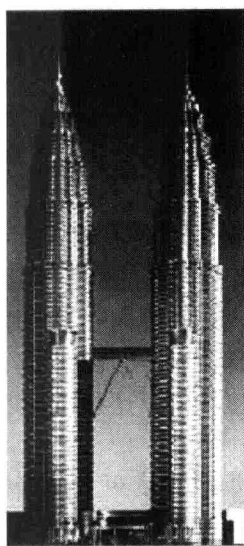


图 1.9 石油双塔大厦及其结构平面图

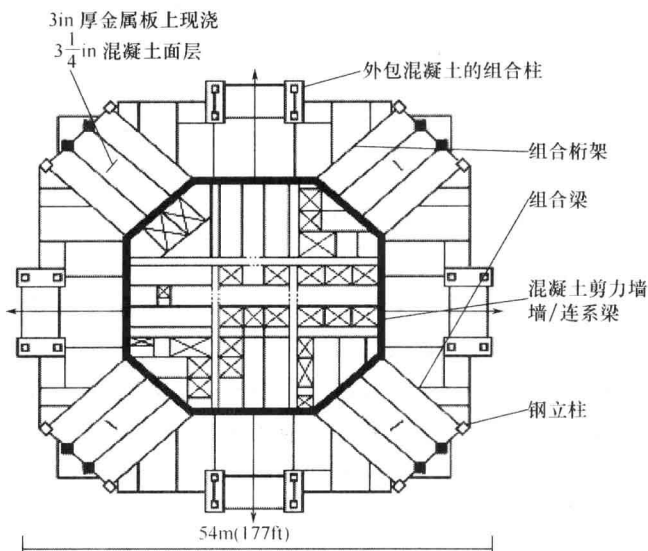
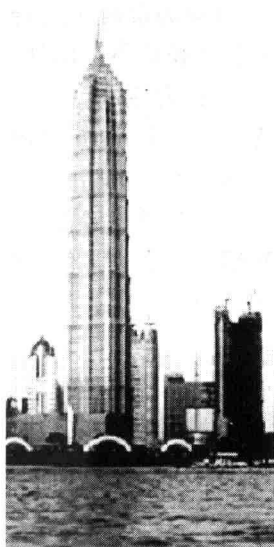


图 1.10 金茂大厦及其结构平面图

注: 1in=2.54cm。

法国巴黎国家工业与技术展览中心大厅(图 1.11)的钢筋混凝土薄壳结构是当前世界上跨度最大的公共建筑。它的平面呈三角形,边长 219m (720ft, 此即跨度),壳顶离地面 46m (152ft),是双层波形拱壳,支承在 3 个角部墩座上,墩座与预应力拉杆相连。而且建筑造型新颖,充分说明混凝土壳体结构的优越性。该建筑是把结构、材料、自然力融为一体的杰作,在结构计算和施工方面都有大胆的创新,是世界建筑领域的一大进步。

悉尼歌剧院位于澳大利亚悉尼港,建造在伸入海中的一块狭小地段上,远看似群帆泊



岸，由3组、10对壳片组成（图1.12），以环境优美和建筑造型独特而闻名于世。该建筑为钢筋混凝土结构，其外部造型已完全无墙、柱的概念，它的外部造型与内部功能无直接联系，内部的形状由吊在钢筋混凝土壳上的钢桁架决定。该建筑的结构受力相当复杂，为计算方便，将所有壳体设计成同样的曲率，如同从一个直径为75m的大圆上切取下来的一样。但就是这样仍使计算和施工困难重重，最终是以Y形、T形的钢筋混凝土肋骨拼接成三角形壳瓣，才使设计和施工得以进行。由于结构的复杂和施工的困难，使该建筑的工期长达17年，造价超过预算的十几倍。

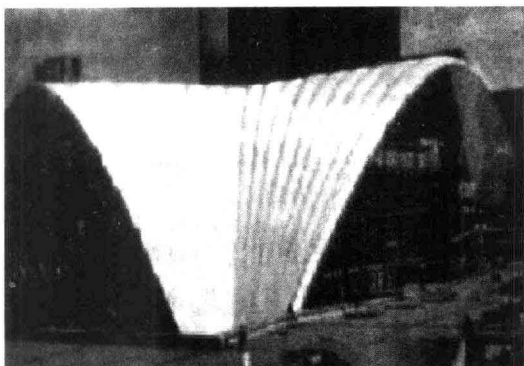


图 1.11 法国巴黎国家工业与技术展览中心大厅

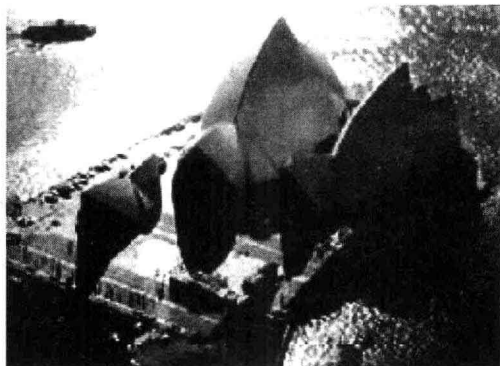


图 1.12 悉尼歌剧院

预应力混凝土箱形截面斜拉桥或钢与混凝土组合梁斜拉桥是当前大跨桥梁的主要结构形式之一。我国在1993年10月建成通车的上海杨浦大桥（图1.13），主跨602m，是当今世界最大跨径的钢与混凝土结合梁斜拉桥，桥全长1172m，“A”字型桥塔高220m，采用了256根斜拉索。1995年建成的重庆长江二桥（图1.14），主跨444m，是我国目前最大跨径的预应力混凝土梁斜拉桥。我国1997年建成的箱形截面的万县长江大桥（图1.15），主跨420m，是当今世界最大跨度的钢筋混凝土拱桥。此前，最大跨度钢筋混凝土拱桥为克罗地亚的克尔克II号桥（图1.16），主跨390m。



图 1.13 上海杨浦大桥

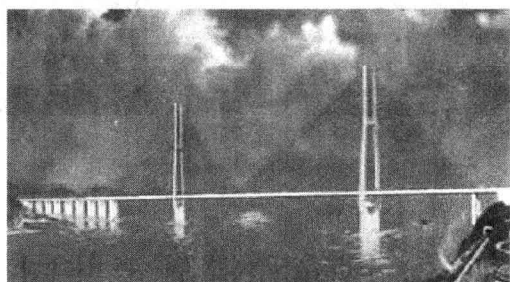


图 1.14 重庆长江二桥

混凝土结构电视塔由于其造型上及施工（采用滑模施工）上的特点，已逐渐取代过去常用的钢结构电视塔。目前世界最高的预应力混凝土电视塔为加拿大的多伦多电视塔（图1.17），高553m，其次是莫斯科电视塔。我国上海浦东的“东方明珠”电视塔（图1.18）高度居世界第三位，塔高454m。上海电视塔造型独特，采用三根预应力混凝土管柱贯穿着上下3个球形，小球直径7m，标高337m；两个大球直径各50m，标高分别为265m及