

全国普通高等院校 土木工程类  
实用创新型 系列规划教材

# 混凝土结构设计基本原理

何浙浙 主编



科学出版社

www.sciencep.com

ZHUYUANDASHA

中国科学院教材建设专家委员会教材建设立项项目  
全国普通高等院校土木工程类**实用创新型**系列规划教材

---



# 混凝土结构设计基本原理

何浙浙 主 编

科学出版社

北/京

## 内 容 简 介

本教材根据我国新修订的《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)编写。本书主要讲述了混凝土结构设计基本理论和建筑及公路桥梁结构基本构件设计方法等。全书共10章,主要包括:绪论,混凝土结构材料的物理和力学性能,混凝土结构设计基本规定,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,受压构件截面承载力计算,受拉构件截面承载力计算,正常使用极限状态验算,预应力混凝土结构构件的计算等。

本教材可作为高等院校土木工程专业及相关专业的本专科教材,也可供从事混凝土结构和公路桥梁结构设计施工技术人员、科学研究工作者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计基本原理/何浙浙主编。—北京:科学出版社,2005

(全国普通高等院校土木工程类实用创新型系列规划教材)

ISBN 7-03-015480-0

I. 混… II. 何… III. 混凝土结构-结构设计-高等学校-教材  
N. TU370.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 044591 号

责任编辑:童安齐 何舒民 / 责任校对:柏连海  
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>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2005年8月第一版 开本:787×1092 1/16

2005年8月第一次印刷 印张:19

印数:1—3 000 字数:440 000

定价:26.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话:010-62136131 编辑部电话:010-62137026(HA03)

# 全国普通高等院校土木工程类实用创新型 系列规划教材

## 编 委 会

**主 任** 霍 达

**副主任** (按姓氏笔画排序)

周 云 阎兴华 童安齐

**秘书长** 张志清

**委 员** (按姓氏笔画排序)

白晓红 石振武 刘继明 何浙浙 何舒民

张文福 张延庆 张志清 沈 建 周 云

周亦唐 宗 兰 徐向荣 阎兴华 翁维素

傅传国 程赫明 韩建平 童安齐 雷宏刚

霍 达

# 前 言

本教材是全国普通高等院校土木工程专业实用创新型系列规划教材之一,并已被列为中国科学院教材建设专家委员会教材建设立项项目。

本教材主要依据全国高等院校土木工程学科专业指导委员会审定通过的教学大纲,按照新修订的《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2002)及《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁设计规范》(JTG D62-2004)编写。全书共分十章,主要讲述了混凝土结构基本理论、建筑结构及公路桥梁基本构件的设计方法。其中公路桥梁结构构件的基本理论与设计方法融于相应各章节之中,未单独划分章节,这样处理的目的在于方便读者在学习时与建筑结构构件设计的相关内容进行比较。本书主要内容包括:钢筋与混凝土的物理、力学性能,混凝土结构设计基本规定,受弯、受扭、受压及受拉构件的承载力计算,正常使用极限状态验算,预应力混凝土构件的计算方法等。

本教材编写的指导思想为以介绍混凝土结构计算理论为主,同时兼顾了对规范条文的解释和应用。本书重点突出,难点兼顾,不仅引导学生理解和掌握材料的基本特性和构件的受力性能,而且使学生了解现行规范的有关内容,并培养学生应用条文进行结构构件设计的能力。对于重点专业术语,本书给出了对应的英文表达,以便学生掌握和运用。为加深读者对本教材内容的学习,除绪论部分外,每章都有思考题,第四~九章尚有一定量的练习题。

参加编写本教材的人员都从事过多年教学工作且有丰富的教学经验,编写者来自全国多个高等院校。本书主编:何浙浙;参编人员为:何浙浙(第一章)、刘铮(第二章)、邓思华(第三章)、翁维素(第四、八章)、李耕勤(第五章)、张艳霞(第六章)、刘栋栋(第七章)、曾杰(第九章)、程东辉(第十章)。

限于水平和时间,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

# 目 录

## 前言

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 混凝土结构基本概念 .....	1
1.1.1 钢筋和混凝土共同工作的条件 .....	1
1.1.2 钢筋混凝土结构的主要优、缺点 .....	2
1.2 钢筋混凝土结构及其理论的发展与应用 .....	2
1.2.1 第一阶段 .....	3
1.2.2 第二阶段 .....	3
1.2.3 第三阶段 .....	4
1.2.4 第四阶段 .....	4
1.2.5 钢筋混凝土结构发展与展望 .....	6
1.3 本课程的内容和学习基本要求 .....	6
1.3.1 课程的主要内容 .....	6
1.3.2 课程特点 .....	7
1.3.3 课程学习基本要求与学习方法 .....	10
<b>第二章 混凝土结构材料的物理、力学性能</b> .....	13
2.1 钢筋的物理力学性能.....	13
2.1.1 钢筋的品种和级别 .....	13
2.1.2 钢筋的强度与变形 .....	14
2.1.3 钢筋的强度取值 .....	17
2.1.4 钢筋的冷加工性能 .....	18
2.1.5 钢筋的疲劳性能 .....	18
2.1.6 混凝土结构对钢筋的要求.....	18
2.1.7 钢筋的选用 .....	18
2.2 混凝土的物理力学性能.....	19
2.2.1 混凝土单轴受力的强度与变形 .....	20
2.2.2 混凝土复合受力的强度与变形 .....	29
2.2.3 混凝土的疲劳性能 .....	31
2.2.4 混凝土的徐变、收缩与膨胀 .....	32
2.2.5 混凝土的选用 .....	36
2.2.6 高强混凝土的主要物理、力学性能简介 .....	37
2.3 混凝土与钢筋的粘结.....	38
2.3.1 粘结的定义与重要性 .....	38
2.3.2 粘结力的组成 .....	40
2.3.3 保证可靠粘结的构造措施.....	43

思考题 .....	44
<b>第三章 混凝土结构设计基本规定 .....</b>	<b>45</b>
3.1 混凝土结构按概率理论的极限状态设计法 .....	45
3.1.1 混凝土结构可靠度设计总则 .....	45
3.1.2 结构的极限状态 .....	47
3.1.3 结构的作用与荷载 .....	48
3.1.4 结构抗力与材料强度取值 .....	50
3.1.5 极限状态方程 .....	50
3.1.6 近似概率极限状态设计法 .....	50
3.2 建筑结构承载力极限状态的计算规定 .....	52
3.2.1 荷载效应组合的设计值 $S$ .....	52
3.2.2 结构构件承载力设计值 $R$ .....	53
3.3 建筑结构正常使用极限状态的计算规定 .....	53
3.3.1 标准组合 .....	54
3.3.2 频遇组合 .....	54
3.3.3 准永久组合 .....	54
3.4 公路桥涵结构极限状态的计算规定 .....	54
3.4.1 公路桥涵结构按承载力极限状态计算时的作用效应组合 .....	54
3.4.2 公路桥涵结构按正常使用极限状态设计时的作用效应组合 .....	55
3.5 混凝土结构耐久性规定 .....	55
3.5.1 耐久性的概念与主要影响因素 .....	56
3.5.2 混凝土的碳化 .....	56
3.5.3 钢筋的锈蚀 .....	57
3.5.4 耐久性设计 .....	58
思考题 .....	61
<b>第四章 受弯构件正截面承载力的计算 .....</b>	<b>62</b>
4.1 受弯构件的一般构造要求 .....	62
4.1.1 梁、板的截面型式与尺寸 .....	62
4.1.2 混凝土强度等级的选择 .....	63
4.1.3 混凝土最小保护层厚度 .....	63
4.1.4 梁板钢筋的布置 .....	63
4.1.5 纵向受拉钢筋的配筋率 .....	64
4.2 梁的正截面受弯承载力试验结果 .....	65
4.2.1 适筋梁正截面受弯的三个受力阶段 .....	65
4.2.2 纵向受拉钢筋配筋率对正截面受弯破坏形态和受弯性能的影响 .....	67
4.3 正截面承载力计算的基本假定及其应用 .....	68
4.3.1 正截面承载力计算的基本假定 .....	68
4.3.2 受压区混凝土应力的计算图形 .....	69

4.3.3	界限相对受压区高度 .....	69
4.4	单筋矩形截面受弯构件正截面受弯承载力的计算 .....	70
4.4.1	基本计算公式 .....	70
4.4.2	基本计算公式的两个适用条件及其意义 .....	71
4.4.3	计算系数及其应用 .....	71
4.4.4	正截面受弯承载力的截面设计及承载力校核 .....	72
4.5	双筋矩形截面梁正截面受弯承载力的计算 .....	76
4.5.1	双筋矩形截面的形成及纵向受压钢筋的强度设计值 .....	76
4.5.2	双筋矩形截面受弯承载力的基本计算公式 .....	76
4.5.3	双筋矩形截面梁正截面受弯承载力的截面设计及验算方法 .....	78
4.6	T形截面受弯构件正截面受弯承载力的计算 .....	81
4.6.1	T形截面的定义及翼缘计算宽度的取值 .....	81
4.6.2	T形截面单筋受弯构件正截面受弯承载力的计算 .....	82
4.7	公路桥涵规范中受弯构件正截面承载力的计算 .....	86
4.7.1	基本假定 .....	86
4.7.2	受弯构件的相对界限受压区高度 .....	87
4.7.3	单筋矩形截面正截面承载力计算 .....	87
4.7.4	双筋矩形截面正截面承载力计算 .....	88
4.7.5	T形截面正截面承载力计算 .....	89
	思考题 .....	90
	习题 .....	91
<b>第五章</b>	<b>受弯构件斜截面承载力的计算 .....</b>	<b>93</b>
5.1	受弯构件斜截面承载力的概述 .....	93
5.1.1	斜裂缝的出现和开展 .....	93
5.1.2	斜截面受剪承载力与斜截面受弯承载力 .....	94
5.1.3	箍筋、配箍率及弯起钢筋 .....	94
5.2	剪跨比及梁沿斜截面受剪的破坏形态 .....	95
5.2.1	剪跨比 .....	95
5.2.2	斜截面的主要破坏形态 .....	95
5.2.3	保证斜截面受剪承载力的方法 .....	96
5.3	斜截面受剪破坏的机理及主要影响因素 .....	97
5.3.1	斜截面受剪破坏机理 .....	97
5.3.2	影响斜截面受剪承载力的主要因素 .....	99
5.4	斜截面受剪承载力的计算公式与适用范围 .....	102
5.4.1	基本假定 .....	102
5.4.2	受压区混凝土承受的剪力 .....	103
5.4.3	箍筋与弯起钢筋承受的剪力 .....	104
5.4.4	斜截面受剪承载力的计算公式 .....	105



5.4.5	计算公式的适用范围 .....	106
5.4.6	连续梁斜截面的受剪性能与承载力计算 .....	107
5.5	斜截面受剪承载力计算的方法和步骤 .....	109
5.5.1	计算截面的位置 .....	109
5.5.2	斜截面设计与斜截面复核两类问题的计算方法与步骤 .....	110
5.6	保证斜截面受弯承载力的构造措施 .....	115
5.6.1	抵抗弯矩图的概念及绘制方法 .....	115
5.6.2	保证斜截面受弯承载力的构造措施 .....	116
5.7	梁内钢筋的构造要求 .....	118
5.7.1	纵向受力钢筋的构造要求 .....	118
5.7.2	箍筋的构造要求 .....	123
5.7.3	架立筋及纵向构造钢筋 .....	125
5.8	公路桥涵规范中受弯构件斜截面的计算 .....	125
	思考题 .....	127
	习题 .....	128
<b>第六章</b>	<b>受扭构件扭曲截面的承载力计算</b> .....	<b>130</b>
6.1	钢筋混凝土纯扭构件的试验研究 .....	130
6.1.1	素混凝土纯扭构件的破坏形式 .....	130
6.1.2	纯扭构件的配筋 .....	131
6.1.3	钢筋混凝土纯扭构件的试验研究 .....	131
6.2	纯扭构件的扭曲截面受扭承载力计算 .....	132
6.2.1	矩形截面纯扭构件的扭曲截面受扭承载力计算 .....	133
6.2.2	T形和I形截面纯扭构件截面受扭承载力计算 .....	136
6.2.3	箱形截面纯扭构件受扭承载力计算 .....	137
6.3	弯矩、剪力、扭矩共同作用构件的承载力计算 .....	138
6.3.1	试验研究与计算模型 .....	138
6.3.2	矩形截面弯剪扭构件的计算方法和步骤 .....	140
6.3.3	T形和I形截面弯剪扭构件的计算方法和步骤 .....	143
6.4	受扭构件的构造要求 .....	143
6.4.1	抗扭箍筋的构造要求 .....	143
6.4.2	抗扭纵筋的构造要求 .....	144
6.5	公路桥涵工程中受扭构件承载力计算 .....	149
6.5.1	纯扭构件承载力计算 .....	149
6.5.2	剪扭构件 .....	151
6.5.3	弯剪扭构件 .....	151
6.5.4	构造要求 .....	152
	思考题 .....	152
	习题 .....	152

<b>第七章 受压构件的截面承载力计算</b> .....	154
7.1 受压构件一般构造要求 .....	154
7.1.1 材料强度 .....	154
7.1.2 截面形状与尺寸 .....	154
7.1.3 纵向钢筋 .....	154
7.1.4 箍筋 .....	155
7.2 轴心受压构件正截面受压承载力 .....	156
7.2.1 普通配箍混凝土轴心受压构件正截面受压承载力 .....	156
7.2.2 螺旋箍筋及密排箍筋轴心受压构件正截面承载力 .....	159
7.3 偏心受压构件正截面受压破坏形态 .....	162
7.3.1 偏心受压短柱的破坏形态 .....	162
7.3.2 偏心距增大系数 $\eta$ .....	163
7.4 矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力基本计算公式 .....	165
7.4.1 区分大、小偏心受压破坏形态的界限 .....	165
7.4.2 矩形截面偏心受压构件正截面承载力 .....	166
7.5 非对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面承载力设计与复核 .....	169
7.5.1 大小偏心的判别 .....	169
7.5.2 大偏心压构件正截面承载力设计 .....	170
7.5.3 小偏心受压构件正截面承载力设计 .....	171
7.5.4 偏心受压构件正截面承载力复核 .....	172
7.6 对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面承载力设计与验算 .....	176
7.6.1 对称配筋的特点 .....	176
7.6.2 对称配筋偏心受压正截面承载力设计 .....	176
7.7 正截面承载力 $N_u$ - $M_u$ 的相关曲线 .....	180
7.7.1 实验分析 .....	180
7.7.2 对称配筋偏心受压构件正截面承载力设计曲线 .....	180
7.8 T形和I形截面偏心受压构件正截面承载力计算 .....	182
7.8.1 T形和I字形截面 .....	182
7.8.2 非对称配筋截面 .....	182
7.8.3 对称配筋截面 .....	183
7.9 双向偏心受压构件的正截面承载力计算 .....	183
7.10 偏心受压构件斜截面受剪承载力计算.....	184
7.10.1 受压构件斜截面受剪承载力 .....	184
7.10.2 受压构件斜截面受剪承载力公式应用条件 .....	184
7.11 公路桥涵规范中受压构件的主要规定.....	184
7.11.1 轴心受压承载力 .....	184
7.11.2 矩形截面偏心受压承载力 .....	185
7.11.3 T形截面偏心受压承载力 .....	186

7.11.4 构造要求 .....	187
思考题 .....	187
习题 .....	188
<b>第八章 受拉构件的承载力计算 .....</b>	<b>189</b>
8.1 轴心受拉构件正截面承载力计算 .....	189
8.2 偏心受拉构件正截面承载力计算 .....	189
8.2.1 矩形截面大偏心受拉构件正截面承载力计算 .....	189
8.2.2 矩形截面小偏心受拉构件正截面承载力计算 .....	190
8.3 偏心受拉构件斜截面受剪承载力计算 .....	192
8.4 公路桥涵规范中受拉构件承载力的计算规定 .....	192
8.4.1 轴心受拉构件正截面承载力计算 .....	192
8.4.2 矩形截面偏心受拉构件正截面承载力计算 .....	193
思考题 .....	194
习题 .....	194
<b>第九章 正常使用极限状态验算 .....</b>	<b>195</b>
9.1 钢筋混凝土受弯构件的挠度验算 .....	195
9.1.1 受弯构件挠度验算及挠度限值 .....	195
9.1.2 钢筋混凝土受弯刚度的挠度验算特点 .....	196
9.1.3 钢筋混凝土梁的短期刚度 $B_s$ .....	197
9.1.4 长期荷载作用下钢筋混凝土梁的抗弯刚度 $B$ .....	201
9.1.5 最小刚度原则与受弯构件的挠度验算 .....	202
9.2 钢筋混凝土构件裂缝宽度验算 .....	204
9.2.1 垂直裂缝的出现与开展 .....	204
9.2.2 平均裂缝间距 .....	205
9.2.3 平均裂缝宽度 .....	207
9.2.4 最大裂缝宽度 .....	207
9.2.5 最大裂缝宽度验算 .....	209
9.3 钢筋混凝土构件的截面延性 .....	210
9.3.1 延性的概念与意义 .....	210
9.3.2 受弯构件的截面曲率延性系数 .....	211
9.3.3 偏心受压构件截面曲率延性的分析 .....	213
9.4 公路桥涵规范中受弯构件的应力、裂缝与变形验算 .....	213
9.4.1 换算截面 .....	214
9.4.2 裂缝宽度验算 .....	216
9.4.3 受弯构件挠度验算 .....	218
思考题 .....	219
习题 .....	220

<b>第十章 预应力混凝土结构构件的计算</b> .....	221
10.1 预应力混凝土结构的基本概念.....	221
10.1.1 预应力混凝土的原理 .....	221
10.1.2 预应力混凝土的分类 .....	222
10.1.3 张拉预应力筋的方法 .....	224
10.1.4 部分预应力混凝土及无粘结预应力混凝土结构 .....	226
10.1.5 锚、夹具与预应力设备 .....	227
10.2 预应力混凝土的一般规定与预应力损失.....	230
10.2.1 张拉控制应力 .....	230
10.2.2 先张法构件预应力钢筋的预应力传递长度.....	231
10.2.3 预应力损失值的计算 .....	232
10.2.4 预应力损失值的组合 .....	240
10.3 后张法构件端部锚固区的局部受压承载力验算.....	241
10.4 预应力混凝土轴心受拉构件的计算 .....	243
10.4.1 先张法轴心受拉构件各阶段的应力分析 .....	244
10.4.2 后张法轴心受拉构件各阶段的应力分析 .....	247
10.4.3 几点说明.....	249
10.4.4 轴心受拉构件的承载力计算与抗裂度验算.....	250
10.4.5 轴心受拉构件施工阶段的验算 .....	252
10.5 预应力混凝土受弯构件的计算.....	255
10.5.1 受弯构件的应力分析 .....	255
10.5.2 正截面受弯承载力计算 .....	259
10.5.3 正截面受弯抗裂度与裂缝宽度验算 .....	263
10.5.4 斜截面受剪承载力计算 .....	264
10.5.5 斜截面抗裂度验算 .....	267
10.5.6 挠度与反拱验算 .....	269
10.5.7 施工阶段的验算 .....	270
10.6 公路桥涵规范中预应力混凝土受弯构件的设计与计算.....	271
10.6.1 概述 .....	271
10.6.2 钢筋预应力损失的估算 .....	274
10.6.3 钢筋的预应力损失值组合 .....	277
10.6.4 张拉控制应力 .....	277
10.6.5 持久状态预应力混凝土受弯构件的抗裂验算 .....	280
思考题.....	281
<b>参考文献</b> .....	282
<b>附录</b> .....	283
1 《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2002)的规定 .....	283
2 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62-2004)的规定 .....	285
3 钢筋计算截面面积 .....	287

# 第一章 绪 论

## 1.1 混凝土结构基本概念

所谓结构,指用一定的材料建造的具有足够抵抗能力的空间骨架。结构应具备抵抗各种作用力的能力和足够的抵抗变形的能力,并组成为特定使用功能服务的空间。

根据建造材料的不同,可将结构分为钢筋混凝土结构(reinforced concrete structure)、砌体结构(masonry structure)、钢结构(steel structure)、木结构(wood structure)或混合结构(mixed structure)等结构类型。以混凝土为主要材料的结构,称为混凝土结构,它是素混凝土结构(plain concrete structure)、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构(prestressed concrete structure)、钢管混凝土结构(steel tube concrete structure)和钢骨钢筋混凝土结构(structure steel concrete)的总称。素混凝土结构指不配任何钢材的混凝土结构。钢筋混凝土结构是由钢筋和混凝土两种性质不同的材料所组成的普通混凝土结构。钢骨钢筋混凝土结构指用型钢或钢板作钢骨架的混凝土结构。钢管混凝土结构是指在钢管内浇筑混凝土的结构。预应力混凝土结构是指在结构或构件制作时,在某些部位预先施加预应力的混凝土结构。

混凝土抗压强度较高而抗拉强度很低,适用于以受压为主的结构或构件。素混凝土结构或构件当以受弯或受拉为主时,承载力将受很低的抗拉强度控制,抗压强度得不到充分利用,其抵抗动力荷载及地震作用的能力很差,破坏具有脆性性质。所以,素混凝土结构的使用有很大的局限性,甚至不可能实现。钢是一种强度高、延性好的材料,将钢筋置于混凝土结构的受拉区,可以很好地解决混凝土抗拉强度低的问题,在钢筋混凝土结构中,钢筋主要用来受拉,混凝土用来受压,钢筋不仅可以承受荷载,减小构件截面尺寸,还可以大大改善混凝土的工作性能。

### 1.1.1 钢筋和混凝土共同工作的条件

钢筋和混凝土有良好的共同工作性能,这主要基于三个条件:

#### 1. 钢筋和混凝土之间的粘结性

对于钢筋混凝土结构,由于混凝土硬化后与钢筋之间可以形成很强的粘结力,保证二者共同变形,不产生或很少产生相对滑移。

#### 2. 钢筋和混凝土的线膨胀系数十分接近

由于钢筋和混凝土的线膨胀系数十分接近(钢: $1.2 \times 10^{-5}$ ,混凝土: $1 \times 10^{-5}$ ),使得钢筋和混凝土随温度变化可以共同变形,不协调变形和内应力较小,使得二者之间的粘结一般不会遭到破坏。

### 3. 混凝土的碱性可以保护钢筋

钢筋本身易生锈,也随温度产生力学性能的退化。混凝土作为钢筋的保护层,其碱性可以保护钢筋在长期使用过程中不致锈蚀,并延长高温下钢筋强度退化所需的时间。

因此在混凝土结构中配置适量的钢筋,不仅可以使混凝土结构具有良好的共同工作性能,充分发挥各自材料的优势,且使结构的承载力、耐火性、耐久性显著提高,结构的延性大为改善。

## 1.1.2 钢筋混凝土结构的主要优、缺点

### 1. 钢筋混凝土结构的优点

(1) 钢筋混凝土结构能合理地利用钢筋和混凝土两种材料的性能

(2) 现浇钢筋混凝土结构(cast-in-situ reinforced concrete structure)的整体性好

将混凝土构件浇筑成整体,可以使结构获得较大的空间刚度,抗震、抗振动、抗风和抗冲击波的能力强。装配式混凝土结构(prefabricated concrete structure)施工速度快但整体性较差,通过采取整结措施形成装配整体式混凝土结构(assembled monolithic concrete structure)即可提高施工速度又可获得较好整体性。

(3) 具有良好的可模性

混凝土可根据设计要求浇筑成各种形状和尺寸的结构或构件。

(4) 具有良好的耐久性

混凝土的强度随时间的增长而发展,并具有较好的抗风化能力。通常使用期内不需要特殊的维护,维修费用低。

(5) 钢筋混凝土结构耐火性好

钢筋混凝土结构可以在许多气候条件下应用。在 $40\sim 60^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,混凝土和钢筋的物理、力学性能不会有明显的改变。

钢筋混凝土结构的应用范围非常广泛,除了在房屋工程中大量采用之外,在水利工程、港口工程、桥梁工程、隧道工程、地下工程、海洋工程以及原子能工程等领域亦得到广泛、有效的应用。

### 2. 混凝土结构的主要缺点

1) 混凝土的极限拉应变(约为 $0.15\times 10^{-3}$ )仅为极限压应变(约为 $2\times 10^{-3}$ )的 $1/20\sim 1/10$ ,故其抗拉强度低,抗裂性较差。

2) 结构构件为满足刚度和强度的要求需较大的截面,故混凝土结构的自重较大,一般可占到结构重力荷载的 $70\%\sim 85\%$ 以上,对结构的抗震性能不利。

3) 现场现浇混凝土的工期较长,模板消耗大,且施工受气候和季节的影响大。

4) 新旧混凝土不易连接,增加了补强、修复的困难。

## 1.2 钢筋混凝土结构及其理论的发展与应用

混凝土与钢筋混凝土结构开始应用于土木工程距今已有150多年历史。与砖石结构、

钢木结构相比,混凝土结构的历史并不长,但由于钢筋和混凝土作为建筑材料具有诸多优点,故应用推广与发展迅速,已成为土木工程结构中最主要的结构类型。伴随高性能混凝土和建筑材料的发展,新型混凝土结构形式及其理论也在向新的领域不断发展。纵观混凝土结构 100 多年的发展历史,大致可以将其发展分为以下 4 个阶段。

### 1.2.1 第一阶段

从钢筋混凝土的发明至 20 世纪初。该时期的钢筋和混凝土强度都比较低,主要用于建造中小型楼板、梁、柱、拱和基础等构件。在计算理论方面,结构内力计算和构件的截面计算均套用弹性理论,采用容许应力设计方法。

1824 年,英国的 J. Aspdin 发明了波特兰(Portland)水泥,根据其成分,我国现在通称为硅酸盐水泥。1849 年,法国的 L. Lambot 制造了第一只水泥船,并在 1855 年的巴黎世界博览会上展出。1854 年,英国的 W. B. Wilkinson 取得了一种钢筋混凝土楼板的专利权。1861 年,巴黎花匠 J. Monier 用水泥砂浆加置钢筋网制作花盆,并于 1867 年获得了制作这种花盆的专利权,而后又将其推广到工程中,获得制造梁、板及管等混凝土构件的专利权,并建造了一座蓄水池。1875 年 Monier 又主持建造了一座 16m 长的钢筋混凝土桥。1872 年,第一所钢筋混凝土房屋出现在纽约,其后在 1884~1892 年间,美国相继建造了一些钢筋混凝土建筑,1894 年,开始又相继建造了大跨钢筋混凝土拱桥。俄国在 1886 年开始采用钢筋混凝土结构,1891 年,进行了多种型式钢筋混凝土结构试验。“十月革命”后,国家工业化的任务使钢筋混凝土建筑在前苏联获得迅速发展,先后建造了很多大型钢筋混凝土水电站,在工业与民用建筑中钢筋混凝土也得到了广泛的应用。

1865 年,德国学者发表了有关钢筋混凝土结构的计算理论并提出了计算方法,1887 年发表了试验结果。1895 年,俄国首先提出了混凝土配合比的基本原则,包括混凝土强度与石灰比的关系,对推广混凝土起到重要作用。

### 1.2.2 第二阶段

从 20 世纪 20 年代到第二次世界大战前后。这一阶段的特征为混凝土和钢筋的强度不断提高,空间结构及预应力混凝土结构得到广泛的研究和应用,理论上开始按破坏阶段计算构件截面强度;对某些结构也开始考虑塑性变形引起的内力重分布。

计算理论方面,1922 年,英国的 Dyson 对受弯构件按照破坏阶段法建立了计算公式。1932 年,前苏联也开始考虑混凝土塑性性能的破损阶段设计法,并最早制定了按破坏阶段计算的准则,并于 1938 年开始在建筑结构设计中使用,使钢筋混凝土结构的计算理论向前跨进了一大步;20 世纪 50 年代又提出更为合理的极限状态设计法,奠定了现代钢筋混凝土结构的基本计算理论。

在混凝土塑性计算理论的发展方面,丹麦工程师 A. Ingerslev 早于 1921 年提出了双向板的塑性解。1950 年,前苏联根据极限平衡理论制定了世界上第一部板及次梁考虑塑性变形引起内力重分布的计算规程;1960 年的规程中又允许对主梁及单层刚架考虑塑性内力重分布,同样在无梁楼板计算中也允许考虑按塑性绞线法进行计算。1924 年,美国混凝土和钢筋混凝土标准规范联合委员会的报告中,对单向连续板设计已在一定程度上考虑了塑性变形引起的内力重分布,此后美国混凝土学会 ACI-1941 年的钢筋混凝土建筑规

范中对双向板也考虑了这个问题;在轴心受压柱计算中也考虑了混凝土塑性变形的影响。

在空间大跨结构的工程应用方面,1925年德国建造了第一个大型折板煤仓,1926年又建造了圆筒形长薄壳结构,此后双曲扁壳、双曲抛物面、扭壳等相继问世。1936年,美国建造了短薄壳结构,到20世纪50年代后逐渐推广。前苏联从20世纪30年代起,也开始在建筑中应用钢筋混凝土空间薄壁结构,并于1937年制定了世界上第一部《薄壳屋盖及楼板设计及计算规程》,对薄壳结构在工程实践中的广泛采用起了很大的作用。

在高层建筑的发展方面,1903年,美国俄亥俄州辛辛那提建成16层64m高的Ingall大楼,这是最早的钢筋混凝土框架高层建筑,也是混凝土建筑发展的一个重要里程碑。

预应力混凝土结构在这一时期也取得了快速发展。对混凝土预加压应力的概念最早是德国工程师W. Doehri于1888年提出的,因当时钢材强度不高,并未获得实际结果。1928年,法国工程师E. Freyssinet利用高强钢丝及高等级混凝土并施加高预应力来制造预应力混凝土构件,获得有实际意义的成功,使得混凝土可以用来建造大跨度结构,被认为是预应力混凝土结构的起源。

### 1.2.3 第三阶段

第二次世界大战以后到20世纪70年代末。这一阶段的特点是工业化的施工方法得以较大发展,混凝土结构的范围进一步扩大,极限状态设计法被普遍采用。

第二次世界大战结束后,恢复建设的繁重任务对施工技术提出了更高要求,出现了装配式钢筋混凝土结构、泵送商品混凝土等工业化生产技术,加快了施工速度,提高了施工质量。高强混凝土和高强钢筋的发展、计算机的应用和先进施工机械设备的发明,成为现代土木工程的标志,世界上相继建造了一大批超高层建筑、大跨度桥梁、特长跨海隧道、高耸结构等大型工程。

在设计计算理论方面,发展了以概率理论为基础的极限状态设计法,混凝土结构的基础理论问题大都得到解决,而新型混凝土材料的出现又不断提出新的课题,并不断促进混凝土结构的发展。1955年,前苏联颁布了以极限状态设计法为基础的《混凝土及钢筋混凝土设计标准及技术规范》,1958年出版了《预应力钢筋混凝土结构设计规程》。经过不断研究和实践,以概率理论为基础的极限状态设计法目前已成为国际上结构设计方法的主要趋向。一些国际学术组织在促进极限状态设计方法的国际标准化和统一化方面进行了积极的工作。1970年,欧洲混凝土委员会和国际预应力混凝土协会CHB-FIP在第六届国际预应力混凝土会议上提出了《混凝土结构设计施工建议》,这个国际性的建议对各国钢筋混凝土设计规范的影响较大。前苏联、英国、美国的规范中有不少部分引入了这个建议的基本观点。美国在1956年前主要采用以弹性设计方法为基础的许可应力法,1963年起许可应力法和极限状态设计方法并用,1971年的钢筋混凝土设计规范以极限状态设计法为主。1970年前后,英国、联邦德国、加拿大、波兰及印度尼西亚等国家制定的规范对钢筋混凝土结构截面设计也分别采用了极限状态设计法。

### 1.2.4 第四阶段

20世纪80年代至今。特征是钢筋混凝土结构工业化体系在世界范围的发展,设计规范中引入概率方法,电子计算机辅助设计的程序化和优化设计的应用,破坏机理和计算模



式研究的加强,近代钢筋混凝土力学这一新的分支学科逐步建立和各学科间的相互渗透。

这一时期建筑业的发展已从一般的构件标准设计向工业化建筑体系发展,结构构件趋向于一件多用或仅用较少类型的构件(梁板合一、墙柱合一构件)就能建造各类房屋。如前苏联的大板结构体系,波兰的大型壁板体系,法国、罗马尼亚等国家的大模板现浇结构体系,前南斯拉夫的IMS 预应力框架结构体系。工业化建筑体系在加快建设速度、降低建筑造价、提高施工质量等方面提供了较大的优越性。

20 世纪 70 年代以来,以统计数学为基础的结构可靠性理论得到较大发展,半概率极限状态设计法已经逐步被近似概率设计法代替。1974 年,加拿大首次提出以近似概率法作为设计规范中可靠度问题的准则,并按照这一方法制定了钢结构、冷弯型钢结构和混凝土结构设计规范。国际组织“结构安全度联合委员会”按近似概率极限状态设计法编制了《结构统一标准规范的国际体系》,从 1978 年开始分 6 卷陆续出版。国际标准化组织“建筑结构基础”委员会于 1980 年提出了《结构设计可靠性的总原则》,推荐近似概率设计方法。美国也按此方法编制了《钢筋混凝土结构设计规范》(ACI318-83)。全概率设计法也在积极研究中。

国际上电子计算机辅助设计得到快速发展,减轻了手算工作量,也便于深入研究计算理论和方法,提高了设计质量,这是结构设计工作的一项重要突破。计算机的应用对计算方法和材性提出更高的要求,对混凝土结构学科的发展起到重要影响,对结构型式和构造及施工方法的创新有重要意义,并促进了优化设计法的发展。电算的迅速发展使复杂的数学运算成为可能,20 世纪 60 年代后期有限元法开始用于钢筋混凝土梁应力状态的分析。利用混凝土在简单和复合应力状态下的本构关系模型以及握裹条件的模式化,通过电算可以对构件及结构受力全过程进行弹塑性分析并绘出预测的裂缝分布图,并预估裂缝宽度。可以通过材料最基本的本构方程来进行应力应变状态的分析,也可利用简单构件已有的、较成熟的弯矩-刚度或弯矩-曲率全曲线来进行超静定结构弹塑性内力重分布计算。各学科间相互渗透、互相促进也是这一时期的特征。混凝土弹塑性断裂力学、损伤力学在 20 世纪 80 年代发展起来,奠定了近代钢筋混凝土力学的分支。概率论应用于钢筋混凝土结构的设计,促进了结构设计理论的发展。对裂缝分布和开展从以概率统计理论分析为主发展到用断裂力学和损伤力学进行微观分析。模糊数学也渗入到结构抗震设计中。

20 世纪 80 年代开始,混凝土材料的制作技术已进入高科技时代,高性能混凝土在国外已得到较大发展,100MPa、150MPa 以及 230MPa 的高性能混凝土都已在工程中得到应用。高强、高性能混凝土的快速发展,使钢筋混凝土和预应力混凝土结构的安全及耐久性得以提高,混凝土结构更适于向大跨、超高层发展。法兰克福航空港 270m 大跨悬索飞机库采用了预应力轻混凝土制作的 135m 的悬索板,板厚仅 86mm;1978 年建成的阿根廷巴拉圭河预应力混凝土梁式桥主跨达 270m。1991 年,平壤建造了高达 300m、100 层的柳京饭店,在 1997 年以前一直为世界最高混凝土建筑结构。目前世界最高混凝土建筑为 391m 高、81 层的广州国际信托大厦。混凝土桥梁结构也取得长足发展,目前国外最大的混凝土梁桥是跨径 270m 的巴拉圭 Asuncion 桥。1997 年我国万县建成主跨为 420m 的混凝土拱桥,1995 年建成的重庆长江二桥为混凝土斜拉桥,其跨度达到 444m。1994 年建成汕头海湾大桥,是中孔跨度为 452m 的预应力混凝土悬索桥。目前在万里长江的入海口——南通兴建的主跨度达 1088m 的双塔斜拉桥,是继日本的主跨为 890m 的多多罗大桥