



普通高等教育“十二五”规划教材
中国科学院教材建设专家委员会“十二五”规划教材

混凝土结构设计原理

主 编 孙跃东
副主编 于述强 彭亚萍



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材
中国科学院教材建设专家委员会“十二五”规划教材

混凝土结构设计原理

孙跃东 主编

于述强 彭亚萍 副主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书根据国家颁发的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)编写而成。

全书的主要内容包括绪论,混凝土结构材料的物理力学性能,混凝土结构设计方法,受弯构件、受压构件、受拉构件、受扭构件承载力计算,正常使用极限状态验算,预应力混凝土构件的计算等。

本书着重讲述混凝土结构构件基本概念、基本原理和基本计算方法,做到重点突出、简明扼要、步骤清晰。每章有提要、小结,以及配有适量的例题、思考题和习题,以帮助读者理解和掌握基本概念和基本设计方法。与本书配套的还有《混凝土结构设计原理学习辅导》,以帮助读者更加深入地学习、理解和掌握混凝土结构设计原理,更加密切地结合工程实践。

本书可作为高等院校土木工程专业及相关专业的教材,也可作为土建类科研、设计、施工和管理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计原理/孙跃东主编. —北京:科学出版社,2013
(普通高等教育“十二五”规划教材·中国科学院教材建设专家委员会“十二五”规划教材)
ISBN 978-7-03-037633-6

I. ①混… II. ①孙… 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(2013)第 116691 号

责任编辑:童安齐 闫红霞 / 责任校对:王万红
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>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013 年 6 月第一次印刷 印张:19 1/2

字数:450 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<骏杰>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

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程,是学习后续专业课程、课程设计、毕业设计以及毕业后从事本专业的基础。本书根据国家颁发的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)(简称《规范》)、《建筑结构设计荷载规范》(GB 50009—2012)、《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)编写而成。在编写中力求贯彻全国高等学校土木工程专业指导委员会审批的“土木工程专业指导规范”和“卓越工程师教育培养计划”精神。

本课程具有内容多、符号多、计算公式多等特点。对初学者来说,往往感觉“杂乱无章”、“逻辑性不强”、“无规律可循”,不像数学和力学课程有严密的逻辑推理。因此,本书着重讲述混凝土结构构件的基本概念、基本原理和基本计算方法,由浅入深、循序渐进,做到简明扼要、重点突出、步骤清晰。与本书配套的还有《混凝土结构设计原理学习指导》。配套辅导书中除了有对基本内容的分析、习题(包括大量选择题、判断题、思考题和计算题)和习题讲评外,还有部分扩展内容。扩展内容是在本教材基础上的深入学习和工程应用,以帮助读者更加深入的学习、理解和掌握混凝土结构设计原理,更加密切的结合工程实践。

本书由孙跃东任主编,于述强、彭亚萍任副主编。本书共分10章,其中第1、2、7章和第4章4.1~4.3节由孙跃东编写,4.4~4.6节由高秋梅编写,第3、5章由于述强、李柏栋编写,第6章由刘锋编写,第8章由李柏栋编写,第9章由彭亚萍编写,第10章由彭亚萍、张玉敏编写。

对本书编写过程中给予指导和帮助的各位教授、同事以及学生们表示衷心的感谢。

由于编者的水平和经验有限,书中不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2013年2月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 混凝土结构的一般概念	1
1.1.1 混凝土结构的定义和分类	1
1.1.2 钢筋和混凝土共同工作的基础	2
1.1.3 钢筋混凝土结构的优缺点	3
1.2 混凝土结构的发展与应用	4
1.2.1 混凝土结构的发展简况	4
1.2.2 混凝土结构的发展展望	5
1.2.3 混凝土结构的工程应用	8
1.3 本课程的教学内容、特点与学习应注意的问题	9
1.3.1 本课程的教学内容	9
1.3.2 本课程的特点	10
1.3.3 学习本课程应注意的问题	10
小结	12
思考题	12
第 2 章 混凝土结构材料的物理力学性能	13
2.1 钢筋	13
2.1.1 钢筋的品种和级别	13
2.1.2 钢筋的强度和变形	14
2.1.3 钢筋的弹性模量	17
2.1.4 钢筋的疲劳	17
2.1.5 混凝土结构对钢筋性能的要求和钢筋的选用	18
2.2 混凝土	18
2.2.1 混凝土的强度	18
2.2.2 混凝土的变形	25
2.3 钢筋与混凝土的粘结	36
2.3.1 粘结的作用和分类	36
2.3.2 粘结力的组成	37
2.3.3 粘结强度	37
2.3.4 影响粘结强度的主要因素	39
2.3.5 钢筋的锚固	41
小结	43

思考题	43
习题	44
第3章 混凝土结构设计方法	45
3.1 结构功能要求和极限状态	45
3.1.1 结构功能要求	45
3.1.2 极限状态	46
3.1.3 结构的设计状况	47
3.1.4 结构上的作用、作用效应和结构抗力	47
3.2 极限状态方程与结构的可靠度分析	48
3.2.1 极限状态方程	48
3.2.2 结构的可靠度	49
3.2.3 失效概率与可靠指标	49
3.2.4 安全等级和目标可靠指标	50
3.3 荷载和材料强度取值	51
3.3.1 荷载的分类	51
3.3.2 荷载的代表值	51
3.3.3 材料强度取值	53
3.4 概率极限状态实用设计表达式	54
3.4.1 承载能力极限状态设计表达式	54
3.4.2 正常使用极限状态设计表达式	56
小结	58
思考题	59
习题	59
第4章 受弯构件正截面承载力计算	61
4.1 受弯构件的一般构造要求	61
4.1.1 梁的截面形式和构造要求	61
4.1.2 板的截面形式和构造要求	64
4.2 受弯梁的试验研究和正截面受力性能	65
4.2.1 适筋梁的试验研究	65
4.2.2 配筋率与受弯构件正截面的破坏特征	68
4.3 受弯构件正截面承载力计算的基本规定	71
4.3.1 基本假定	71
4.3.2 等效矩形应力图	71
4.3.3 适筋梁、超筋梁和少筋梁的界限	73
4.4 单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	75
4.4.1 基本计算公式和适用条件	76
4.4.2 计算方法	77
4.4.3 计算公式的应用	79

4.5 双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	85
4.5.1 简述	85
4.5.2 纵向受压钢筋的强度取值	85
4.5.3 基本计算公式及适用条件	86
4.5.4 计算方法	88
4.6 T形截面受弯构件正截面承载力计算	93
4.6.1 简述	93
4.6.2 T形截面翼缘的计算宽度	94
4.6.3 计算公式及适用条件	95
4.6.4 计算方法	99
小结	103
思考题	104
习题	105
第5章 受弯构件斜截面承载力计算	107
5.1 概述	107
5.2 受弯构件斜截面的受剪性能	109
5.2.1 无腹筋梁的受力特点与受剪破坏形态	109
5.2.2 有腹筋梁的受力特点与受剪破坏形态	112
5.2.3 影响受弯构件斜截面受剪承载力的主要因素	114
5.3 斜截面受剪承载力的计算	116
5.3.1 斜截面受剪承载力的计算公式	116
5.3.2 板类构件的受剪承载力计算	120
5.3.3 斜截面受剪承载力的计算	120
5.4 保证斜截面受弯承载力的构造措施	126
5.4.1 材料抵抗弯矩图	126
5.4.2 纵向钢筋的弯起	128
5.4.3 纵向钢筋的截断	129
5.5 其他构造要求	133
5.5.1 绑扎搭接	133
5.5.2 机械连接和焊接	134
5.5.3 不同位置钢筋的锚固	134
小结	136
思考题	137
习题	137
第6章 受压构件承载力计算	140
6.1 受压构件的构造要求	140
6.1.1 截面形式与尺寸	140
6.1.2 材料强度要求	141

6.1.3 纵筋	141
6.1.4 箍筋	142
6.2 轴心受压构件正截面受压承载力计算	143
6.2.1 轴心受压普通箍筋柱的正截面受压承载力计算	143
6.2.2 轴心受压螺旋箍筋柱的正截面受压承载力计算	147
6.3 偏心受压构件的正截面受压破坏形态	150
6.3.1 偏心受压短柱的破坏形态	150
6.3.2 偏心受压长柱的破坏形态	152
6.3.3 偏心受压构件的二阶效应	152
6.4 矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	155
6.4.1 大、小偏心受压破坏形态的界限	155
6.4.2 矩形截面大偏心受压构件正截面承载力的计算	155
6.4.3 矩形截面小偏心受压构件正截面承载力的计算	157
6.4.4 矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算公式的应用	160
6.5 矩形截面对称配筋偏心受压构件正截面承载力计算	169
6.5.1 大小偏心受压的判别	169
6.5.2 矩形截面对称配筋大偏心受压构件正截面承载力的计算	169
6.5.3 矩形截面对称配筋小偏心受压构件正截面承载力的计算	169
6.5.4 矩形截面对称配筋偏心受压构件正截面承载力的计算公式的应用	171
6.6 矩形截面承载力 N_u - M_u 相关曲线及其应用	174
6.6.1 矩形截面对称配筋大偏心受压构件的 N_u - M_u 相关曲线	174
6.6.2 矩形截面对称配筋小偏心受压构件的 N_u - M_u 相关曲线	174
6.6.3 N_u - M_u 相关曲线的特点和应用	175
6.7 I形截面偏心受压构件正截面承载力计算	177
6.8 受压构件斜截面受剪承载力计算	179
小结	180
思考题	181
习题	182
第7章 受拉构件	184
7.1 轴心受拉构件	184
7.2 偏心受拉构件	185
7.2.1 大小偏心受拉构件的破坏形态	185
7.2.2 偏心受拉构件的承载力计算	186
7.2.3 计算公式的应用	187
7.3 偏心受拉构件斜截面受剪承载力	190
小结	190
思考题	191
习题	191

第 8 章 受扭构件承载力计算	192
8.1 概述	192
8.2 纯扭构件受扭承载力计算	193
8.2.1 裂缝出现前的性能	193
8.2.2 裂缝出现后的性能	193
8.2.3 矩形截面纯扭构件开裂扭矩的计算	194
8.2.4 受扭构件的破坏形态	195
8.2.5 矩形截面纯扭构件扭曲截面受扭承载力计算	196
8.2.6 纯扭构件按《规范》的配筋计算方法	198
8.3 弯剪扭构件的扭曲截面承载力	200
8.3.1 弯剪扭构件的破坏形态	200
8.3.2 剪扭相关性	202
8.3.3 弯剪扭构件按《规范》的配筋计算方法	203
8.4 压弯剪扭构件和拉弯剪扭构件的扭曲截面承载力	205
8.4.1 压弯剪扭构件的承载力计算	205
8.4.2 拉弯剪扭构件的承载力计算	205
8.5 受扭构件的构造要求	206
8.5.1 构件截面最小尺寸要求	206
8.5.2 构件截面构造配筋要求	206
8.5.3 弯剪扭构件中受扭纵筋的最小配筋率	207
8.5.4 弯剪扭构件中箍筋的最小配箍率	207
8.6 矩形截面弯剪扭构件配筋计算实例	207
8.6.1 矩形截面弯剪扭构件配筋计算步骤	207
8.6.2 例题	208
小结	211
思考题	211
习题	212
第 9 章 正常使用极限状态验算	213
9.1 裂缝宽度验算	213
9.1.1 引起裂缝的原因及控制	213
9.1.2 验算公式	214
9.1.3 最大裂缝宽度的计算方法	215
9.1.4 控制及减小裂缝宽度的措施	220
9.2 受弯构件的变形验算	221
9.2.1 验算公式	221
9.2.2 受弯构件最大挠度的计算	221
9.2.3 减小受弯构件挠度的措施	226
9.3 耐久性设计	227

9.3.1 耐久性及其影响因素	227
9.3.2 耐久性设计	228
小结	230
思考题	230
习题	231
第 10 章 预应力混凝土构件的计算	232
10.1 预应力混凝土基本知识	232
10.1.1 预应力混凝土的概念和特点	232
10.1.2 施加预应力的方法	234
10.1.3 预应力混凝土的分类	235
10.1.4 预应力混凝土材料	237
10.1.5 锚具	237
10.2 张拉控制应力和预应力损失	240
10.2.1 张拉控制应力	240
10.2.2 预应力损失	241
10.2.3 预应力损失值的组合	246
10.3 预应力混凝土轴心受拉构件	246
10.3.1 轴心受拉构件各阶段的应力分析	246
10.3.2 预应力混凝土轴心受拉构件的设计	253
10.4 预应力混凝土受弯构件	261
10.4.1 受弯构件的应力分析	261
10.4.2 预应力混凝土受弯构件的设计	268
10.5 预应力混凝土构造要求	284
10.5.1 先张法	284
10.5.2 后张法	285
小结	288
思考题	289
习题	289
附录 A 常用标准	291
附录 B 主要符号	299
主要参考文献	301

第 1 章 绪 论

本章提要

- (1) 混凝土结构的定义、分类,钢筋混凝土的优缺点。
- (2) 混凝土结构的发展简况和发展展望。
- (3) 混凝土结构的工程应用。
- (4) 本课程的教学内容、特点与学习应注意的问题。

1.1 混凝土结构的一般概念

1.1.1 混凝土结构的定义和分类

以混凝土为主要材料,并根据需要配置钢筋、预应力钢筋、型钢、钢管、纤维等制成的结构称为**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、钢筋(型钢)混凝土结构、钢管混凝土结构和纤维混凝土结构等(图 1.1)。

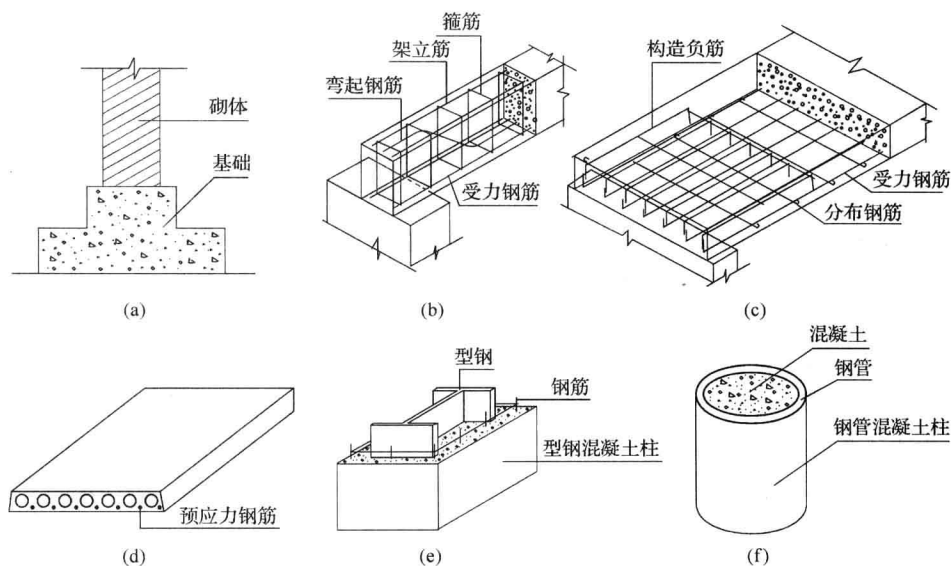


图 1.1 常见混凝土结构构件

- (a) 素混凝土基础; (b) 钢筋混凝土梁; (c) 钢筋混凝土板;
(d) 预应力混凝土空心板; (e) 型钢混凝土柱; (f) 钢管混凝土柱

素混凝土结构是指无筋或不配置受力钢筋的混凝土结构,主要应用于以受压为主的路面、基础、柱墩和一些非承重结构。**钢筋混凝土结构**是指配置受力钢筋、钢筋网或钢筋骨架的混凝土结构,是目前应用最广泛的结构形式。**预应力混凝土结构**是指配置受力预

应力筋,通过张拉或其他方法建立预加应力的混凝土结构。**钢筋混凝土结构**是指配置轧制型钢或焊接型钢和钢筋的结构,具有承载力大、延性好、刚度大等特点,主要应用于多、高层建筑结构的各种体系中。**钢管混凝土结构**是指钢管中充填混凝土形成的结构构件,具有承载力高、延性好、抗震性能优越等特点,主要用于以轴心受压和小偏心受压构件为主的高层建筑工程、地铁车站工程和大跨度桥梁工程中。**纤维混凝土结构**是指以纤维混凝土为主制作的结构,包括无筋纤维混凝土结构、钢纤维混凝土结构和预应力纤维混凝土结构,具有抗拉强度高、抗裂性能好、抗渗性能强、抗磨损和抗冲击等性能,主要应用于建筑楼面、高速公路路面、机场跑道、停车场、贮液池等结构构件中。

目前,混凝土结构广泛应用于工业与民用建筑、桥梁、隧道、矿井以及水利、海港、核电等工程建设中。

本教材主要讲授配置钢筋、预应力钢筋的混凝土结构构件的受力性能、计算理论、设计计算方法和构造要求等内容。

1.1.2 钢筋和混凝土共同工作的基础

如图 1.2 所示的两根除了配筋不同,其他条件完全相同的简支梁。图 1.2(a)为素混凝土制成的梁,在较小的荷载作用下,梁下部受拉区边缘的混凝土即出现裂缝,受拉区混凝土一旦开裂,裂缝将迅速发展,梁瞬间断裂而破坏。破坏时梁的承载力很低,开裂荷载 F_{cr} 和破坏荷载 F_u 基本相等($F_{cr}=F_u=4.8\text{kN}$),此时受压区混凝土的抗压强度还远远没有得到充分利用。

如果在梁的底部受拉区配置适量的受拉钢筋,如图 1.2(b)所示,形成钢筋混凝土梁,当荷载增加到一定值时,梁的受拉区混凝土开裂,此时的开裂荷载 $F_{cr}=4.9\text{kN}$,基本上和素混凝土梁的开裂荷载(破坏荷载)相等。梁开裂后,由于受拉钢筋的存在,裂缝不会迅速向上发展,梁的承载能力继续提高。随着荷载的增加,混凝土的裂缝不断向上延伸,且数量和宽度不断增加,受拉钢筋的应力也不断增加,直到受拉钢筋达到屈服强度,受压区混凝土被压碎,梁失去承载能力而破坏。梁在破坏前,混凝土裂缝充分发展,梁的变形迅速增大,有明显的破坏预兆,见图 1.2(c)。破坏荷载 $F_u=26.5\text{kN}$,远远高于素混凝土梁的破坏荷载,且混凝土的抗压强度和钢筋的抗拉强度都能得到充分利用。

可见,把钢筋和混凝土这两种材料按照合理的方式结合在一起,使钢筋主要承受拉力,混凝土主要承受压力,可以取长补短,充分发挥两种材料的性能。钢筋和混凝土是两种物理力学性能截然不同的材料,为什么能够有效地结合在一起共同工作,共同变形,有效地抵抗外荷载呢? 其主要原因有:

(1) 钢筋和混凝土之间存在良好的**粘结力**,在外荷载作用下,两者之间能有效地进行力和变形的传递。

(2) 钢筋和混凝土两种材料的**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 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,因此当温度变化时,钢筋和混凝土的粘结力不会因两者之间产生较大的相对变形而破坏。

此外,钢筋埋在混凝土中,边缘混凝土作为钢筋的保护层,使钢筋不易锈蚀,并能提高钢筋的耐火性能。

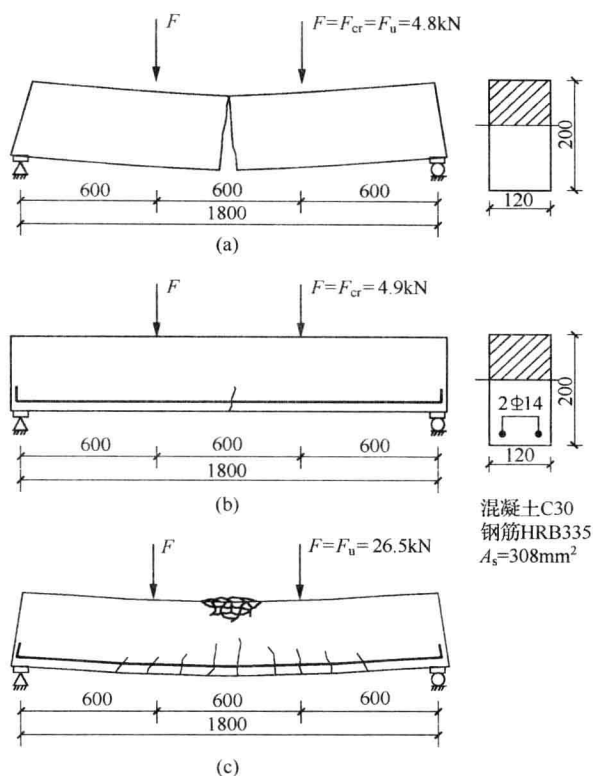


图 1.2 素混凝土梁和钢筋混凝土梁的受力情况
(a) 素混凝土梁; (b) 钢筋混凝土梁的开裂荷载; (c) 钢筋混凝土梁的破坏荷载

1.1.3 钢筋混凝土结构的优缺点

1) 钢筋混凝土结构的优点

易于就地取材: 混凝土结构中所用的砂、石等材料,属于地方材料,可就地供应。近年来利用建筑垃圾、工业固体废渣制造再生骨料配置混凝土,利用粉煤灰作为水泥或混凝土的外加成分改善混凝土的性能,既可变废为宝,又有利于保护环境,实现建筑业的可持续发展。

材料利用合理: 充分利用钢筋的抗拉和抗压性能以及混凝土的抗压性能,使两种材料的强度均可得到充分发挥;与钢结构相比,钢筋混凝土可以降低造价。

耐久性和耐火性好: 钢筋有混凝土作为保护层,在一般环境条件下不会发生锈蚀,当发生火灾时,也不会像钢结构那样很快升温达到软化而丧失承载能力。混凝土的强度随着时间的增长还会有所增长,后期维护费用低。

可模性和整体性好: 钢筋混凝土可以根据需要浇筑成各种形状和尺寸的构件或结构,如空间结构、箱形结构等。采用高性能混凝土浇筑的清水混凝土具有很好的建筑效果。现浇式或装配整体式的钢筋混凝土结构整体性好,对抗震、抗爆有利。

2) 钢筋混凝土结构的缺点

自重大: 普通混凝土的密度一般为 2400kg/m^3 , 钢筋混凝土的密度一般为 2500kg/m^3 , 与钢结构相比其自重大, 对建造大跨、高层结构不利。因此需要研究和发展轻质混凝土、高强混凝土和预应力混凝土来克服混凝土自重大的缺点。

抗裂性差: 由于混凝土的抗拉强度小, 钢筋混凝土受拉、受弯和大偏心受压构件受力后易开裂, 在正常使用阶段往往是带裂缝工作的, 如果裂缝宽度符合规范要求, 不会影响混凝土结构的正常使用, 但裂缝的存在会影响混凝土结构的耐久性, 限制了混凝土在防渗、防漏要求较高的结构中的应用。采用预应力可有效地解决混凝土的开裂问题; 在混凝土中掺入适量纤维, 也可提高混凝土的抗拉强度, 增强混凝土的抗裂能力。

施工复杂: 混凝土的施工具有工序多、工期长, 受季节和天气影响大等缺点。利用预制混凝土构件, 采用装配式或装配整体式混凝土结构, 施工采用大模板、滑模、飞模、爬模等先进模板技术, 混凝土采用泵送混凝土、自密实混凝土等高性能混凝土, 可大大提高混凝土的施工效率。

补强修复困难: 混凝土一旦被破坏, 其修复、加固、补强较困难。采用植筋、粘贴钢板、粘贴碳纤维布、外包钢等加固技术, 可以较好地对发生损坏的混凝土结构或构件进行修复。

1.2 混凝土结构的发展与应用

1.2.1 混凝土结构的发展简况

混凝土结构发展到今天已有 160 多年的历史。1824 年, 英国人阿斯普丁发明了波特兰水泥(硅酸盐水泥), 距今已有 180 多年。水泥的发明为混凝土的产生和发展奠定了基础。一般认为, 混凝土结构的发展经历了以下三个阶段:

第一阶段是从钢筋混凝土发明至 20 世纪初。1850 年, 法国人郎波用水泥砂浆涂抹在钢丝网两面做成的小船, 成为最早期的钢筋混凝土结构。1854 年英国人威尔金森获得真正的一种钢筋混凝土楼板的专利权。但一般认为钢筋混凝土结构最早的发明者和使用者是法国花匠约泽夫·莫尼埃, 1861 年莫尼埃用水泥砂浆制造花盆, 在其中增加钢丝网以提高花盆的强度。他于 1867 年申请了专利, 并在当年巴黎世博会上展出了钢筋混凝土制作的花盆, 而后又获得制造其他钢筋混凝土构件(梁、板及管等)的专利。当时他把钢筋配置在板的中心, 表明他还不了解这种结构的受力特点。1872 年美国沃德建造了第一幢钢筋混凝土构件的房屋, 从此钢筋混凝土小构件进入工程实用阶段。这一阶段所采用的钢筋和混凝土的强度都比较低, 混凝土结构主要用来建造中小型楼板、梁、拱和基础等构件, 计算理论套用弹性理论, 设计方法采用容许应力法。

第二阶段是从 20 世纪初到第二次世界大战前后。1928 年法国工程师弗列西涅利用高强钢丝及高标号混凝土来制造预应力混凝土构件, 使钢筋混凝土用于建造大跨度的空间结构、高层建筑结构成为可能。此阶段开始进行混凝土结构的试验研究, 在计算理论上已开始按破损阶段计算结构的破坏承载力, 对某些结构也开始考虑材料的塑性发展。第

二次世界大战后,由于钢材的短缺,混凝土结构建筑得到大规模的应用。

第三阶段是从第二次世界大战以后至今。这一阶段随着高强混凝土和高强钢筋的出现,预制装配式混凝土结构、高效预应力混凝土结构、钢-混凝土组合结构、泵送混凝土、高性能混凝土以及各种新的施工技术得到了发展和应用。世界上建造了一大批超高层建筑、大跨度桥梁、特长跨海隧道、高速铁路、城市地铁、高耸结构等大型结构工程,这些工程已成为现代土木工程的标志,也说明了混凝土结构正逐步走向完善和成熟。其在计算理论上已过渡到充分考虑钢筋和混凝土塑性的极限状态设计理论,在设计方法上已过渡到以概率理论为基础的多系数表达的设计公式。现代计算机技术的发展,计算机辅助设计的程序化,大大提高了设计质量和设计速度;混凝土强度理论和本构关系的深入研究,使人们可以利用非线性分析方法对各种复杂混凝土结构进行全过程受力模拟;而新型钢筋和高性能混凝土材料以及复合(组合)结构的出现,又不断提出新的课题,并不断促进混凝土结构的发展。

1.2.2 混凝土结构的发展展望

混凝土是现代工程结构的主要材料,2011年中国商品混凝土总产量达到了14.2亿 m^3 ,约占世界混凝土用量的50%以上,钢筋用量约3000万t,规模之大,耗资之巨,居世界前列。可以预见,混凝土仍将是中国在今后相当长时期内的一种重要的土木工程结构材料,并将在材料、结构、计算理论和设计方法、施工技术、试验技术、耐久性和可持续发展等方面得到进一步发展。

1. 材料方面

(1) 混凝土。随着科学技术的进步,混凝土正朝着高性能、轻质、耐久、易施工、绿色环保的方向发展。

高性能混凝土: 高性能混凝土是20世纪80年代末90年代初,一些发达国家基于混凝土结构耐久性设计提出的一种全新概念的混凝土,它以耐久性作为设计的主要指标,这种混凝土有可能为基础设施工程提供100年以上的使用寿命。由于高性能混凝土具有高耐久性、高工作性、高强度和高体积稳定性等诸多优良特性,在高层建筑结构、桥梁结构和海港工程结构中得以推广应用。如上海环球金融中心,通过加入聚羧酸盐系高效减水剂,掺入一定量的矿粉和粉煤灰,配制的具有高强度、高耐久、高流态、高泵送等特性的C60混凝土,创造了40小时连续浇筑3万余立方混凝土和主体结构混凝土一次泵送至492m高空等多项纪录。

高性能混凝土被认为是今后混凝土技术的发展方向。

超高性能混凝土: 近几年,人们又提出了超高性能混凝土的概念。超高性能混凝土比高性能混凝土具有超高的耐久性和超高的力学性能,如法国人研制出的超高性能的水泥基复合材料-活性粉末混凝土,其抗压强度可以达到200MPa以上。超高性能混凝土在国防工程、海洋工程、核工业、特种保安和防护工程,以及市政工程领域有良好的应用前景。

轻质混凝土: 为了减轻混凝土结构的自重,国内外都在大力发展轻质混凝土。轻质

混凝土是指利用天然轻集料(如浮石、凝灰岩等)、工业废料(如炉渣、粉煤灰陶粒、自燃煤矸石等)、人造轻集料(如页岩陶粒、黏土陶粒、膨胀珍珠岩等)制成的轻集料混凝土,具有容重较小、相对强度高以及保温、抗冻性能好等优点。密度小于 1800kg/m^3 ,强度在 CL30 以上的轻质高强混凝土,在大跨度桥梁结构和高层建筑结构中有较好的应用前途。

绿色混凝土:绿色混凝土是指大量利用工业废料,降低水泥用量,比传统混凝土有更好的力学性能和耐久性能,具有与自然环境的协调性,能够为人类提供安全、舒适、温馨的生存环境的混凝土,其主要研究方向有绿色高性能混凝土、再生骨料混凝土、环保型混凝土等。如何将高性能混凝土与环境保护、生态保护和可持续发展结合起来,成为绿色高性能混凝土的发展方向。

智能混凝土:智能混凝土是在混凝土原有的组成基础上,掺加复合智能型组分,使混凝土材料具有一定的自感知、自适应和损伤自修复等智能特性的多功能材料,可以有效地预报混凝土材料内部的损伤,满足结构自我安全检测需要,防止混凝土结构潜在的脆性破坏,能显著提高混凝土结构的安全性和耐久性。近年来,损伤自诊断混凝土、温度自调节混凝土及仿生自愈合混凝土等一系列机敏混凝土的相继出现,为智能混凝土的研究和发展打下了坚实的基础。

此外,**自密实混凝土**具有流动度高,不离析等特点,在钢筋布置较密、构件体型复杂的结构和地下工程结构中有广阔的应用前景。**聚合物混凝土**具有高强、耐蚀、耐磨、粘结力强等优点,在腐蚀介质中的结构、海洋构筑物、路面和桥面板,以及水利工程中对抗冲、耐磨、抗冻要求高的结构中有广阔的应用前景。**膨胀混凝土**在超长混凝土结构、大体积混凝土结构和防水混凝土结构中得到广泛应用。**碾压混凝土**在大体积混凝土结构(如水工大坝、大型基础)、工业厂房地面、公路路面及机场道面等工程中的应用越来越广泛。

(2) 钢材。对于钢材,主要向高强和耐腐蚀方向发展。目前美国等西方工业国家相继研制开发了 600MPa 级别的高强钢筋,我国河北钢铁集团承钢公司于 2011 年成功轧制 $\phi 25\text{mm}$ 的 HRB600 高强抗震钢筋。与发达国家相比,我国建筑行业使用钢筋的强度普遍低 1~2 个等级,因此要大力加强高强钢筋的研究和推广。国家发展与改革委员会颁布的《产业结构调整指导目录》(2011 版本)中将热轧钢筋 HPB235 和 HRB335 作为淘汰产品。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中,增加了 500MPa 级高强钢筋,明确将 400MPa 级钢筋作为主力钢筋,倡导应用 500MPa 级钢筋,用 HPB300 钢筋取代 HPB235 钢筋,逐步淘汰 335MPa 级钢筋。

在海洋环境或者有腐蚀性介质的环境中,为了防止钢筋锈蚀,常采用**环氧树脂涂敷钢筋**,或用**纤维筋**作为混凝土及预应力混凝土结构的非金属配筋。研制出低成本、高抗腐蚀性能的钢筋,以及其他非金属配筋材料是混凝土结构配筋材料的重要研究方向。

2. 结构方面

(1) **预应力混凝土结构。**与非预应力混凝土结构相比,预应力混凝土结构不仅具有跨越能力大、受力性能好、使用性能优越、耐久性高、轻巧美观等优点,而且较为经济、节能,因此是建造大跨度或大空间结构、高层建筑结构、重载结构、特种结构工程中不可缺少的重要结构形式之一。

(2) **钢-混凝土组合结构**。钢-混凝土组合结构是由钢材和混凝土两种不同性质的材料经组合而成的一种新型结构,目前研究和应用比较多的有压型钢板与混凝土组合板、组合梁、钢管混凝土结构和钢管混凝土结构等。它能充分发挥钢材和混凝土的强度,具有强度高、截面小、延性好等优点,加之施工速度快、工业化程度高,已被广泛地应用在高层超高层建筑、重工业建筑、桥梁结构、大跨度和高耸结构中。可以预见,在以后的土木工程建设中必将得到更加广泛的应用。

(3) **新型混合结构体系**。按照目前国内外的一般认识,广义的混合结构是指组合异种材料构成结构构件,且由这些构件形成至少两种不同类型的结构(或子结构)复合而成的结构体系。混合的目的是希望得到单一结构不具有的结构性能,并发挥多种结构有序混合之后结构体系的综合性能。与混凝土结构和钢结构相比,混合结构具有造价比钢结构低,结构刚度比钢结构大,施工速度比混凝土结构快,抗震性能比钢筋混凝土结构好等特点。在我国,目前应用最多的是钢框架+钢筋混凝土筒体和型钢混凝土框架+钢筋混凝土筒体这两种混合结构体系,此外还有巨型型钢混凝土柱+内筒混合结构体系,支撑筒混合结构体系等组合结构体系。我国建造的超高层建筑大部分是采用混合结构体系,如南京绿地紫峰大厦(高 381m)结构为带伸臂桁架的框架-核心筒混合结构体系,其中采用了型钢混凝土柱、钢梁和钢筋混凝土核心筒;上海环球金融中心(高 492m),上部结构同时采用了三重抗侧力结构体系,即由巨型柱、巨型斜撑和周边带桁架组成的巨型框架结构体系,钢筋混凝土核心筒结构体系,连系核心筒和巨型柱间的外伸臂钢桁架结构体系;广州西塔采用了巨型钢管混凝土斜交网格外筒和钢筋混凝土内筒构成的筒中筒体系。

其他结构体系,如悬挑结构、悬挂结构、巨形结构等在建筑结构中也经常应用。可以预见,随着建筑业的不断发展,混合结构体系的应用会更加广泛,且新的结构体系将会不断涌现。

3. 计算理论方面

(1) **钢筋混凝土基本构件计算理论**。在单种荷载作用下的混凝土结构构件的强度计算(本教材讲授的主要内容),基本上已经形成体系,并写入规范。但钢筋混凝土构件在复杂受力及重复或反复荷载作用下的强度和变形计算理论还不够成熟,今后在这方面的研究还有很多工作要做。

(2) **钢筋混凝土结构的有限元分析**。钢筋混凝土结构计算理论的发展是与数学、力学、试验技术、计算机应用技术等基础学科的发展密切相关的,其分析方法从开始的线弹性分析方法逐渐过渡到考虑塑性变形的非线性分析方法,其中有限元分析是研究钢筋混凝土构件或结构非线性性能的主要方法。虽然钢筋混凝土有限元分析方法较为成熟,但在混凝土的破坏准则、本构关系、钢筋与混凝土之间的粘结、裂缝处理等方面还要做更深入研究。

(3) **混凝土损伤与断裂研究**。损伤力学研究材料内部微裂缝、微缺陷所引起的宏观力学响应及其材料最终的破坏过程,而断裂力学研究的是宏观裂缝的扩展行为和规律。把损伤力学和断裂力学引入混凝土的研究中是近几十年的事情,国内外学者应用损伤力学和断裂力学的理论和方法,对混凝土的裂缝开展机理和破坏过程进行了大量研究,提出