



普通高等学校“十二五”规划教材

# 钢筋混凝土结构原理与设计

## (上册)

主 编 王庆华 王伯昕



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

普通高等学校“十二五”规划教材

# 钢筋混凝土结构原理与设计

(上册)

主 编 王庆华 王伯昕  
编 著 周林聪 朱 珊 胡忠君 暴 伟(上册)  
暴 伟(下册)

国防工业出版社

北京

## 内 容 简 介

本书为高等院校土木工程专业本科生的专业基础课教材,分为上下两册,内容包括绪论、钢筋混凝土结构材料的基本力学性能、钢筋混凝土结构的设计方法、轴心受力构件正截面承载力设计、受弯构件正截面承载力设计、受弯构件斜截面承载力设计、偏心受力构件承载力设计、受扭构件承载力设计、构件的正常使用极限状态设计、预应力混凝土构件设计、钢筋混凝土梁板结构设计、单层工业厂房结构设计、多层和高层混凝土框架结构设计共十三章。本书是根据《混凝土结构设计规范》GB50010—2010 和《建筑结构荷载规范》GB50009—2012 编写而成。

本书对混凝土结构构件的受力性能和工作原理有充分的论述,基本概念清楚,计算方法明确,设计步骤详细,配有大量的设计实例,便于理解混凝土结构构件的受力性能和具体的设计计算方法。每章内容还配有内容提要、能力要求、知识归纳、独立思考、实战演练等内容,文字通俗易懂,论述由浅入深,循序渐进,便于学习理解。

本书可作为高等院校土木工程专业建筑工程方向、岩土工程方向、隧道与地下工程方向本科生的混凝土结构设计教材使用,也可作为水利工程、地质工程等相关专业和广大设计施工人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

钢筋混凝土结构原理与设计:全2册/王庆华,王伯昕  
主编. —北京:国防工业出版社,2015.9  
普通高等学校“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-118-10278-9

I. ①钢... II. ①王... ②王... III. ①钢筋混凝土结构-结构设计-高等学校-教材 IV. ①TU375.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 213086 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 16 字数 398 千字

2015 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 总定价 68.00 元 上册 35.00 元  
下册 33.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

# 前 言

2012 年教育部颁布了新修订的《普通高校本科专业目录和专业介绍》和《高等学校土木工程本科指导性专业规范》,对“钢筋混凝土结构设计原理”这门课的教学提出了新目标和新要求。本书为适应新的“混凝土结构教学大纲”的要求,根据国内最新修订的《混凝土结构设计规范》GB50010—2010 和《建筑结构荷载规范》GB50009—2012 编写而成,可作为高等院校土木工程专业建筑工程方向、岩土工程方向、隧道与地下工程方向本科生的混凝土结构设计教材使用,也可作为水利工程、地质工程等相关专业和广大设计施工人员的参考用书。

本书详细介绍了钢筋混凝土结构的材料力学性能、轴心受力构件设计方法、受弯构件设计方法、偏心受力构件设计方法、受扭构件设计方法、正常使用极限状态设计与验算方法、预应力混凝土构件设计方法、梁板结构设计方法、单层工业厂房设计方法、多层和高层框架结构设计方法等内容。书中每章开篇都设有课前导读(包括内容提要和能力要求),篇中都配有若干工程实际算例,篇末都设有知识归纳、独立思考、实战演练等环节,便于读者学习和掌握。

考虑到“荷载与结构设计方法”已单独作为一门本科生课程,故本教材仅对荷载与结构设计方法进行了简单阐述。对于“荷载与结构设计方法”未独立开课的院校,可以在使用本教材之余进行适当的知识补充。

本书分为上下册,为吉林大学本科“十二五”规划教材,是由吉林大学建设工程学院建筑工程系的部分教师根据多年混凝土结构设计教学的实践经验编写而成的。上册具体由王庆华(第 1 章)、王伯昕(第 5 章、第 6 章和上册附录)、周林聪(第 2 章和第 9 章)、朱珊(第 3 章和第 10 章)、胡忠君(第 4 章和第 7 章)、暴伟(第 8 章)执笔,下册具体由王庆华(第 11 章、第 12 章和下册部分附录)、暴伟(第 13 章和下册部分附录)执笔,全书由王庆华、王伯昕负责修改、统稿。在编写过程中,吉林大学建设工程学院结构工程专业的硕士研究生王国超、赵建宇、王国超、赵建宇、封雷、汪纯鹏、周向前、李贝娜完成了部分插图的绘制工作。

由于水平所限,书中难免有不妥或错误之处,恳请广大读者批评指正。

作 者  
2015 年 6 月

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第1章 绪论                 | 1  |
| 1.1 混凝土结构的概念与分类        | 1  |
| 1.2 钢筋混凝土结构的受力特点和主要优缺点 | 3  |
| 1.2.1 受力特点             | 3  |
| 1.2.2 主要优缺点            | 4  |
| 1.3 混凝土结构的发展概况         | 4  |
| 第2章 钢筋混凝土结构材料的基本力学性能   | 7  |
| 2.1 概述                 | 7  |
| 2.2 混凝土的基本力学性能         | 7  |
| 2.2.1 混凝土的强度           | 7  |
| 2.2.2 混凝土的变形           | 12 |
| 2.2.3 混凝土的选用           | 18 |
| 2.3 钢筋的基本力学性能          | 19 |
| 2.3.1 钢筋的品种和性能         | 19 |
| 2.3.2 钢筋的强度与变形         | 20 |
| 2.3.3 钢筋的选用            | 22 |
| 2.4 钢筋与混凝土的粘结          | 23 |
| 2.4.1 粘结力的作用和组成        | 23 |
| 2.4.2 粘结机理和影响因素        | 24 |
| 2.4.3 提高粘结强度的构造措施      | 25 |
| 第3章 钢筋混凝土结构的设计方法       | 27 |
| 3.1 结构的功能要求和极限状态       | 27 |
| 3.1.1 结构的功能要求          | 27 |
| 3.2 结构上的作用、作用效应和结构的抗力  | 28 |
| 3.2.1 结构上的作用           | 28 |
| 3.2.2 作用效应             | 28 |
| 3.2.3 结构抗力             | 28 |

|       |                          |    |
|-------|--------------------------|----|
| 3.3   | 结构的极限状态的基本概念和原理 .....    | 29 |
| 3.3.1 | 承载能力极限状态 .....           | 29 |
| 3.3.2 | 正常使用极限状态 .....           | 29 |
| 3.3.3 | 结构的设计状况 .....            | 30 |
| 3.3.4 | 结构的失效概率和可靠指标 .....       | 30 |
| 3.4   | 极限状态设计表达式 .....          | 32 |
| 3.4.1 | 承载能力极限状态设计表达式 .....      | 32 |
| 3.4.2 | 正常使用状态设计表达式 .....        | 34 |
| 第4章   | 轴心受力构件正截面承载力设计 .....     | 37 |
| 4.1   | 概述 .....                 | 37 |
| 4.2   | 轴心受拉构件正截面承载力设计方法 .....   | 37 |
| 4.2.1 | 受力过程及破坏特征 .....          | 37 |
| 4.2.2 | 轴心受力构件正截面承载力计算 .....     | 38 |
| 4.2.3 | 轴心受拉构件的构造要求 .....        | 38 |
| 4.3   | 轴心受压构件正截面承载力设计方法 .....   | 39 |
| 4.3.1 | 配有普通箍筋的轴心受压构件 .....      | 39 |
| 4.3.2 | 配有螺旋箍筋的轴心受压构件 .....      | 43 |
| 第5章   | 受弯构件正截面承载力设计 .....       | 48 |
| 5.1   | 概述 .....                 | 48 |
| 5.2   | 受弯构件正截面受弯性能的试验研究 .....   | 49 |
| 5.2.1 | 配筋率对受弯构件破坏特征的影响 .....    | 50 |
| 5.2.2 | 混凝土梁的抗弯试验 .....          | 51 |
| 5.2.3 | 适筋梁正截面受力的三个阶段 .....      | 53 |
| 5.3   | 单筋截面受弯构件正截面承载力设计方法 ..... | 54 |
| 5.3.1 | 四个基本假定 .....             | 54 |
| 5.3.2 | 单筋矩形截面正截面承载力的计算简图 .....  | 56 |
| 5.3.3 | 基本计算公式 .....             | 56 |
| 5.3.4 | 基本计算公式的适用条件 .....        | 57 |
| 5.3.5 | 计算系数与计算表格 .....          | 60 |
| 5.3.6 | 实际工程算例 .....             | 61 |
| 5.4   | 双筋截面受弯构件正截面承载力设计方法 ..... | 64 |
| 5.4.1 | 双筋矩形截面梁的适用情况 .....       | 64 |
| 5.4.2 | 计算公式及适用条件 .....          | 65 |
| 5.4.3 | 计算公式的应用 .....            | 66 |

|       |                    |     |
|-------|--------------------|-----|
| 5.4.4 | 实际工程算例             | 67  |
| 5.5   | T形截面受弯构件正截面承载力设计方法 | 68  |
| 5.5.1 | 概述                 | 68  |
| 5.5.2 | 基本计算公式             | 70  |
| 5.5.3 | 基本计算公式的应用          | 72  |
| 5.5.4 | 实际工程算例             | 72  |
| 5.6   | 受弯构件正截面设计的构造要求     | 74  |
| 5.6.1 | 概述                 | 74  |
| 5.6.2 | 板的构造要求             | 74  |
| 5.6.3 | 普通梁的构造要求           | 75  |
| 第6章   | 受弯构件斜截面承载力设计       | 82  |
| 6.1   | 概述                 | 82  |
| 6.2   | 受弯构件斜截面受剪性能的试验研究   | 83  |
| 6.2.1 | 受弯构件斜截面受力与破坏分析     | 83  |
| 6.2.2 | 影响斜截面受力性能的主要因素     | 85  |
| 6.2.3 | 斜截面破坏的主要形态         | 87  |
| 6.3   | 受弯构件斜截面抗剪承载力设计方法   | 88  |
| 6.3.1 | 受弯构件斜截面抗剪承载力的计算公式  | 88  |
| 6.3.2 | 抗剪承载力计算公式的适用范围     | 89  |
| 6.3.3 | 抗剪承载力计算公式的应用       | 91  |
| 6.3.4 | 实际工程算例             | 92  |
| 6.4   | 受弯构件斜截面抗弯承载力设计方法   | 97  |
| 6.4.1 | 受弯构件斜截面的抗弯承载力的概念   | 97  |
| 6.4.2 | 纵向受力钢筋的弯起、截断和锚固等构造 | 98  |
| 6.5   | 箍筋的构造要求            | 102 |
| 6.5.1 | 箍筋的形式和肢数           | 102 |
| 6.5.2 | 箍筋的直径和间距           | 103 |
| 6.5.3 | 箍筋的布置              | 103 |
| 6.6   | 伸臂梁设计实例            | 103 |
| 6.6.1 | 设计条件               | 103 |
| 6.6.2 | 伸臂梁的内力图            | 104 |
| 6.6.3 | 伸臂梁的配筋计算           | 105 |
| 6.6.4 | 布置钢筋并绘制抵抗弯矩图       | 107 |
| 6.6.5 | 绘制梁的配筋图            | 109 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| <b>第7章 偏心受力构件承载力设计</b>    | 114 |
| 7.1 概述                    | 114 |
| 7.2 偏心受力构件的构造要求           | 115 |
| 7.3 偏心受压构件正截面承载力设计方法      | 117 |
| 7.3.1 偏心受压构件的破坏特征         | 118 |
| 7.3.2 矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算  | 123 |
| 7.3.3 I形和T形截面偏心受压构件正截面承载力 | 139 |
| 7.4 偏心受拉构件正截面承载力设计方法      | 145 |
| 7.4.1 偏心受拉构件受力分析          | 145 |
| 7.4.2 偏心受拉构件正截面承载力计算      | 146 |
| 7.5 偏心受力构件斜截面承载力设计方法      | 148 |
| <b>第8章 受扭构件承载力设计</b>      | 152 |
| 8.1 扭转构件的受力特点             | 152 |
| 8.2 矩形截面纯扭构件的承载力设计方法      | 153 |
| 8.3 矩形截面剪扭构件的承载力设计方法      | 155 |
| 8.3.1 构件剪扭计算模式的建立         | 155 |
| 8.3.2 设计时对构件剪扭承载力的简化计算    | 155 |
| 8.4 T形和I形截面剪扭构件的承载力设计方法   | 157 |
| 8.4.1 T形和I形截面剪扭构件的受力特点    | 157 |
| 8.4.2 T形和I形截面弯剪扭构件的承载力计算  | 158 |
| 8.5 受扭构件的构造要求             | 159 |
| 8.5.1 截面限制条件              | 159 |
| 8.5.2 构造配筋                | 159 |
| <b>第9章 构件的正常使用极限状态设计</b>  | 163 |
| 9.1 概述                    | 163 |
| 9.2 裂缝控制验算                | 164 |
| 9.2.1 裂缝的形成               | 164 |
| 9.2.2 裂缝的分布与发展            | 164 |
| 9.2.3 裂缝宽度验算              | 165 |
| 9.3 受弯构件挠度验算              | 170 |
| 9.3.1 变形控制的目的是要求          | 170 |
| 9.3.2 钢筋混凝土受弯构件截面刚度       | 171 |
| 9.3.3 钢筋混凝土受弯构件挠度计算       | 174 |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 9.4 耐久性设计                           | 176        |
| 9.4.1 结构工作环境分类                      | 176        |
| 9.4.2 混凝土耐久性设计的基本要求                 | 176        |
| <b>第10章 预应力混凝土构件设计</b>              | <b>179</b> |
| 10.1 预应力混凝土的基础知识                    | 179        |
| 10.1.1 一般概念                         | 179        |
| 10.1.2 预应力混凝土的分类                    | 180        |
| 10.1.3 施加预应力的方法                     | 180        |
| 10.1.4 预应力混凝土的特点                    | 181        |
| 10.2 预应力混凝土的材料                      | 181        |
| 10.2.1 预应力钢筋                        | 181        |
| 10.2.2 预应力混凝土                       | 182        |
| 10.2.3 锚具与夹具                        | 182        |
| 10.3 预应力混凝土构件设计的一般规定                | 182        |
| 10.3.1 张拉控制应力 $\sigma_{\text{con}}$ | 182        |
| 10.3.2 预应力损失 $\sigma_1$             | 183        |
| 10.3.3 预应力损失 $\sigma_1$ 的分阶段组合      | 184        |
| 10.4 预应力混凝土轴心受拉构件的受力分析              | 185        |
| 10.4.1 先张法轴心受拉构件                    | 185        |
| 10.4.2 后张法轴心受拉构件                    | 188        |
| 10.4.3 先、后张法计算公式比较                  | 190        |
| 10.5 预应力混凝土轴心受拉构件的设计方法              | 192        |
| 10.5.1 使用阶段正截面承载力计算                 | 192        |
| 10.5.2 使用阶段正截面裂缝控制验算                | 192        |
| 10.5.3 施工阶段承载力验算                    | 194        |
| 10.5.4 施工阶段后张法构件端部局部受压承载力验算         | 195        |
| 10.6 预应力混凝土受弯构件的设计方法                | 198        |
| 10.6.1 各阶段应力分析                      | 198        |
| 10.6.2 使用阶段计算                       | 204        |
| 10.6.3 施工阶段验算                       | 216        |
| 10.7 预应力混凝土构件的构造要求                  | 222        |
| 10.7.1 先张法构件                        | 222        |
| 10.7.2 后张法构件                        | 223        |
| <b>附录1 混凝土的材料基本参数</b>               | <b>227</b> |
| <b>附录2 钢筋的材料基本参数</b>                | <b>228</b> |



# 第1章 绪 论

## 课前导读

### 【内容提要】

本章主要介绍了混凝土的概念与分类、受力特点和主要优缺点, 简略介绍了混凝土及混凝土结构的发展概况。

### 【能力要求】

通过对本章的学习, 要求学生能够理解混凝土的基本概念, 掌握混凝土与钢筋共同工作的特点和原因。

## 1.1 混凝土结构的概念与分类

结构是指在建筑物或其他工程实体中, 由若干个构件(如梁、板、柱等)连接而成的起承受和传递作用(一般简称荷载)的承重骨架或传力体系。根据结构所用材料不同, 可分为混凝土结构、砌体结构、钢结构、木结构和组合结构等。

混凝土结构是以混凝土为主要材料制作的结构, 它包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、型钢混凝土结构和钢管混凝土结构等。

素混凝土结构是指无筋或者不配置受力钢筋的混凝土结构。这种结构或构件具有较高的抗压强度, 但抗拉强度很低, 破坏时具有明显的脆性, 应用范围受到很大限制, 一般在以受压为主的结构构件中采用, 如柱墩、基础、重力堤坝、挡土墙等(如图 1-1)。

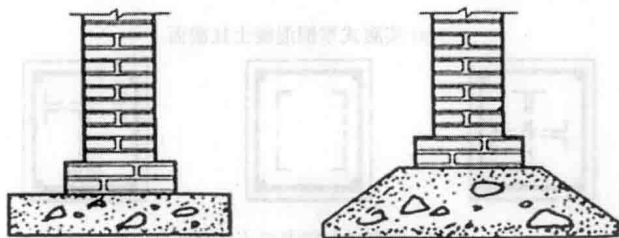


图 1-1 素混凝土基础

混凝土中配以适量钢筋的普通混凝土结构为钢筋混凝土结构(如图 1-2)。这种结构合理地利用了钢筋和混凝土二者的优点, 可以形成强度较高、刚度较大的结构, 且其耐久性、防火性、可模性、整体性和延性均较好, 在建筑结构以及其他土木工程结构中得到了广泛应用。

预应力混凝土结构是在构件承受荷载之前, 在使用阶段的拉区通过张拉高强度预应力钢筋使混凝土受到挤压, 所产生的预压应力可以抵消外荷载所引起的大部分或全部拉应力(如图 1-3)。通过施加预应力, 可以提高结构构件的抗裂度, 可以不出现裂缝或裂缝宽度较小。

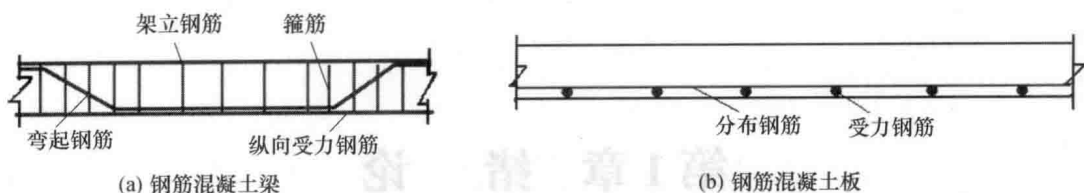


图 1-2 钢筋混凝土构件

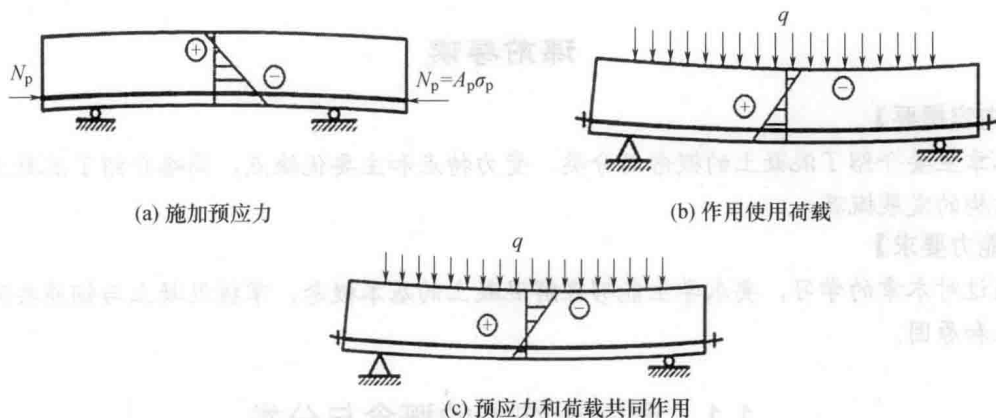


图 1-3 预应力混凝土梁的基本原理

因此，它比普通钢筋混凝土构件的截面刚度大、变形小，适宜建造大跨度结构、水工、储水和其他不渗漏结构。

型钢混凝土结构又称钢骨混凝土结构。它是指用型钢或钢板焊成的钢骨架作为配筋的混凝土结构(如图 1-4)。型钢混凝土构件中的型钢和混凝土在箍筋及型钢本身约束下形成一体，使得两种材料的强度都能得到充分利用，其性能优于型钢与混凝土的简单叠加。这种结构具

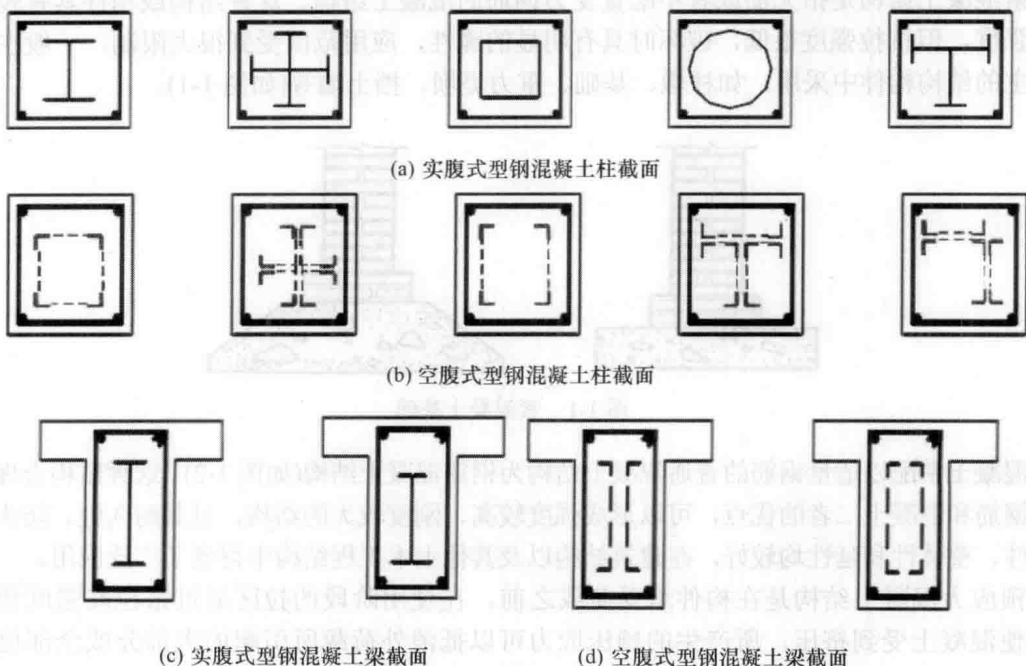


图 1-4 型钢混凝土梁、柱截面

有变形能力强、抗震性能好、承载力高、构件自重小、传力性能好以及施工周期短等优点。型钢混凝土结构除应用于高层建筑及一些特殊结构外，在桥梁工程上的应用也已从局部构件发展到桥梁整体结构。

在钢管内浇筑混凝土做成的结构称为钢管混凝土结构，可分为填充型和包覆填充型钢混凝土(如图 1-5)，也可分为实心 and 空心钢管混凝土。一般把混凝土强度等级在 C50 以下的钢管混凝土称为普通钢管混凝土；在 C50 以上的称为高强钢管混凝土；在 C100 以上的称为超高强钢管混凝土。混凝土的抗压强度高，但抗弯能力很弱，而型钢或钢管的抗弯能力强，但在受压时容易失稳。将二者结合，可使混凝土处于侧向受压状态，其抗压强度成倍提高，同时由于混凝土的存在，提高了钢管的刚度，二者共同发挥作用，从而大大提高了承载能力。钢管混凝土结构主要以轴心受压和作用力偏心较小的受压构件为主，被广泛使用于建筑结构中。钢管混凝土结构不仅承载力高、延性好、抗震性能优越，而且其抗火和耐腐蚀性能也优于钢结构。

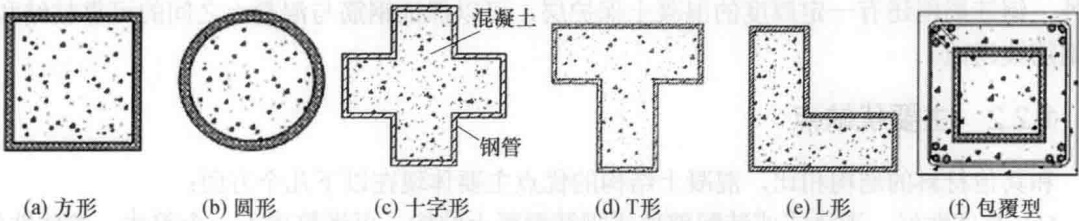


图 1-5 实心钢管混凝土柱的截面形式

## 1.2 钢筋混凝土结构的受力特点和主要优缺点

### 1.2.1 受力特点

钢筋混凝土结构是由钢筋和混凝土两种性能不同的材料组成的。混凝土具有较高的抗压强度，但其抗拉强度较低，大致是抗压强度的 1/10 左右，而钢筋具有较高抗拉强度，因而在钢筋混凝土结构中，利用钢筋承担拉力，混凝土承担压力，使两种材料能充分发挥各自优点，组成性能良好的结构。

图 1-6 分别为截面尺寸、跨度和混凝土强度等级均相同的素混凝土梁和钢筋混凝土梁。在图示荷载作用下，梁截面中和轴以上受压，以下受拉。当荷载较小、梁下部的拉应力未达到混凝土的抗拉强度时，两根梁均未开裂，截面上的应变沿截面高度呈直线分布；随着荷载加大，梁下部拉应力达到混凝土抗拉强度，拉区边缘应变达到混凝土极限拉应变时，下部将出现裂缝。对于素混凝土梁，下部一旦开裂，裂缝即迅速向压区发展，梁随即发生断裂破坏，其破坏时的极限荷载与开裂荷载较为接近，没有明显的预兆，属于脆性破坏，混凝土抗压强度没有得到充分利用。对于配筋适量的钢筋混凝土梁，开裂前的应力状态与素混凝土相同，但当梁下部出现裂缝后，裂缝截面的混凝土退出工作，原来由混凝土承担的拉力转由钢筋承担，此时裂缝不会沿截面高度迅速开展，梁上荷载仍可继续增大，变形持续发展，裂缝的数量和宽度也将增大，直到受拉钢筋达到屈服、受压边缘的混凝土被压碎，梁即认为达到极限承载力。钢筋混凝土梁破坏时，极限荷载要远高于开裂荷载，并且有明显的预兆，属于延性破坏，此时受拉钢筋抗拉强度和受压区混凝土的抗压强度都被充分利用。



图 1-6 钢筋混凝土梁与素混凝土梁的比较

由此可见，在素混凝土结构中配置一定数量的钢筋，可以使结构的承载能力有很大的提高，而且还会显著改善构件的变形能力。

钢筋和混凝土这两种物理、力学性能差异很大的材料之所以能有效地结合在一起共同工作，主要是由于混凝土硬化后混凝土与钢筋之间产生了粘结力，受荷时可以协调变形；再者这两种材料温度线膨胀系数接近，钢筋的线膨胀系数为  $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，混凝土的为  $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，当温度变化时，二者之间不会产生较大的相对变形和温度应力而发生粘结破坏。此外，钢筋周围还有一定厚度的混凝土保护层，可以保证钢筋与混凝土之间的可靠粘结和防止钢筋被锈蚀。

## 1.2.2 主要优缺点

和其他材料的结构相比，混凝土结构的优点主要体现在以下几个方面：

(1) 整体性好。现浇式或装配整体式钢筋混凝土结构，可浇筑成为一个整体，整体性好，刚度大。

(2) 可模性好。钢筋混凝土结构可以根据需要浇捣成各种形状和尺寸。

(3) 耐久性和耐火性好。钢筋埋放在混凝土中，受混凝土保护不易发生锈蚀，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燃烧，也不会像钢结构那样很快软化而破坏。

(4) 节约钢材。钢筋混凝土结构的承载力较高，大多数情况下可用来代替钢结构，因而节约钢材。

钢筋混凝土结构也存在一些缺点：混凝土抗拉强度非常低，容易出现裂缝，影响结构的耐久性和美观程度，甚至给人造成不安全感；结构自重比钢结构、砌体结构以及木结构都大；室外施工受气候和季节的限制；新旧混凝土不易连接，增加了补强修复的困难。此外，混凝土结构施工工序复杂，周期较大，隔热、隔声性能也较差。但是针对混凝土结构的缺点，已有一些改进的措施，比如，为了克服钢筋混凝土自重大的缺点，可以采用高强轻质的混凝土和强度很高的钢筋；为了克服普通钢筋混凝土容易开裂的缺点，可以对它施加预应力或者掺加各种纤维等。

## 1.3 混凝土结构的发展概况

最早的混凝土可追溯至古罗马时期。古罗马人利用天然火山灰加石灰、石料残渣、砖块、天然卵石制成混凝土。现存的罗马万神殿(Pantheon)，顶部穹顶直径和最高点均为 43.3m，整幢建筑都是用混凝土浇灌而成，在其不同位置采用了不同的骨料，基础中用凝灰岩，穹顶中用浮石混杂多孔火山岩。建于公元 12—14 年的那不勒斯海港，混凝土历时 2000 多年依然完好无损，数百米长的墙几乎无一裂缝。古埃及人用石膏作为胶结材料建造金字塔，中国修建

长城曾在石灰中添加糯米汁(最早形式的化学外加剂)。

1824年,英国建筑工人约瑟夫·阿斯普丁(Joseph Aspdin)将石灰石与黏土一起煅烧,制出了波特兰水泥,并取得了专利,这种水泥就是现代广泛使用的硅酸盐水泥。他也因此被认为是现代水泥的鼻祖。

混凝土材料在发展初期,由于没有机械设备,只能人工拌和和插捣,为便于施工,也只能采用流动性大的混凝土,质量较差。1850年法国人兰伯特(Lambot)用加钢筋的混凝土做了小水泥船;1861年巴黎花匠蒙耶(Monier)将铁丝网放置于水泥砂浆花盆中,制成的花盆薄且强度大,他为此申请了专利,其后又陆续获得了梁、板、管等多项专利。至此,钢筋混凝土开始具有实用价值,蒙耶因此被称为钢筋混凝土结构的创始人。预应力钢筋混凝土的概念最早是1886年美国工程师杰克逊(Jackson)在楼板中应用的;1888年德国工程师德林(Dohling)获得在混凝土板、梁中用钢筋施加预应力的专利。弗雷西奈1919年在法国建成了博浪加斯特(Plougastel)混凝土拱桥,并陆续发明了施加预应力的机械,从而使预应力混凝土在建筑业中广泛使用。

近年来,“高性能混凝土”、“绿色混凝土”以及“智能混凝土”等也逐渐得到重视。这些混凝土的应用,将在不同程度上降低水泥用量、减轻环境污染、提高混凝土的工作性和耐久性、延长结构构件使用寿命、降低维修费用等,具有良好的发展前景。

混凝土结构的应用约有150年的历史,可大致分为四个阶段:

(1) 1850—1920年,这一阶段钢筋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;

(2) 1920—1950年,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;

(3) 1950—1980年,混凝土材料强度不断提高,房屋结构的跨度不断增大,高度不断加大,已达近300m;

(4) 1980年至今,混凝土结构的发展迅猛,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得到大量的应用。

在混凝土材料和结构形式不断发展的同时,混凝土结构的设计计算理论也经历了不同的发展阶段:

(1) 容许应力设计法。19世纪以后,Navier提出了基于弹性理论的容许应力法。其表达式为 $\sigma \leq [\sigma]$ ,即要求构件在使用荷载作用下截面上的最大应力不超过材料的容许应力。但是这种方法存在很多问题,它没有考虑材料塑性性质;使用期间荷载的取值原则规定的也不明确;把影响结构可靠性的各种因素(荷载的变异、施工的缺陷、计算公式的误差等)统统归结在反映材料性质的容许应力上不够合理;容许应力的取值无科学根据,纯靠经验;按容许应力法设计的构件是否安全可靠,无法用实验来验证。

(2) 破损阶段设计法。20世纪30年代,苏联学者格沃兹捷夫、帕斯金尔纳克等提出了按破损阶段的设计方法,假定材料已达到塑性状态,依据截面所能抵抗的破损内力建立计算公式 $M \leq M_0/K$ , $M_0$ 为构件最终破坏时的承载能力, $K$ 为安全系数,用来考虑影响结构安全的所有因素。这种方法可以反映材料的塑性性质,而非假定混凝土为弹性体;采用一个安全系数,使构件有了总的安全度的概念;它以承载能力值为依据,其计算值是否正确可由试验检验。但是这种方法也存在很多问题,在破损阶段计算时,构件的承载力可以保证,但无法了解构件在正常使用时能否满足正常使用要求;安全系数 $K$ 的取值仍需经验确定,无法根据不同荷载、不同材料结构件安全的影响加以区别对待,不能正确地度量结构的安全度;荷载的取值仍是经验值等。

(3) 多系数极限状态设计法。这是一种半经验半概率的方法,提出了极限状态的概念,在承载力极限状态设计中,采用多个系数来分别反映荷载、材料性能及工作条件等方面随机因素的影响,而且开始将荷载和材料强度作为随机变量,采用数理统计方法进行调查分析后来确定。

(4) 以概率理论为基础的极限状态设计法。20世纪40年代,美国学者弗劳腾脱开创性地提出了结构可靠度理论,到20世纪60—70年代结构可靠性理论得到了很大的发展。康乃尔于1969年提出了与结构失效概率 $P_f$ 相联系的可靠指标作为衡量结构可靠度的一种统一定量指标,并建立了计算结构可靠度的二阶矩模式。1971年加拿大学者林德提出了分项系数的概念,将可靠指标表达成设计人员习惯采用的分项系数形式。1971年,结构安全度联合委员会(JCSS)成立。概率极限状态设计法在可靠性理论的基础上,将作用效应和影响结构抗力的主要因素作为随机变量,运用概率论和数理统计分析全部参数和部分参数,计算结构的可靠指标或失效概率。其特点是有明确的、用概率尺度表达的结构可靠度的定义,通过预先规定的可靠指标值,使结构各构件间,以及不同材料组成的结构之间有较为一致的可靠度水平。

国际上把处理可靠度的精确程度分为3个水准:

(1) 半概率方法。对荷载效应和结构抗力的基本变量部分地进行数理统计分析,并与工程经验结合引入某些经验系数,所以尚不能定量地估计结构的可靠性。

(2) 近似概率法。该法对结构可靠性赋予概率定义,以结构的失效概率或可靠指标来度量结构可靠性,并建立了结构可靠度与结构极限状态方程之间的数学关系,在计算可靠指标时考虑了基本变量的概率分布类型,并采用了线性化的近似手段,在设计截面时一般采用分项系数的实用设计表达式。目前我国的《工程结构可靠度设计统一标准》(GB50153—2008)、《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068—2001)都采用了这种近似概率法,在此基础上颁布了各种结构设计的规范。

(3) 全概率法。这是完全基于概率论的结构整体优化设计方法,要求对整个结构采用精确的概率分析,求得结构最优失效概率作为可靠度的直接度量,由于这种方法无论在基础数据的统计方面还是在可靠度计算方面都不成熟,目前尚处于研究探索阶段。

### 【知识归纳】

1. 混凝土结构是以混凝土为主要材料制作的结构,它包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、型钢混凝土结构和钢管混凝土结构等。

2. 对于素混凝土梁,由于其抗拉强度很低,一旦开裂就迅速发生断裂破坏,属于脆性破坏。而在其中配置适当数量的钢筋时,当梁下部出现裂缝后,拉力转由钢筋承担,裂缝不会沿截面高度迅速开展,直到受拉钢筋屈服、受压边缘的混凝土被压碎后,梁才发生延性破坏。

3. 钢筋和混凝土能够结合在一起共同工作,主要是由于混凝土硬化后与钢筋之间产生了粘结力,受荷时可以协调变形;再者这两种材料温度线膨胀系数接近,当温度变化时,二者之间不会产生较大的相对变形和温度应力而发生粘结破坏。此外,钢筋周围还有一定厚度的混凝土保护层,可以保证钢筋与混凝土之间的可靠粘结和防止钢筋被锈蚀。

### 【独立思考】

1-1 何谓混凝土结构?混凝土结构如何分类?

1-2 钢筋与混凝土共同工作的原理是什么?

1-3 钢筋与混凝土为什么能够结合在一起共同工作?

1-4 钢筋混凝土结构的优缺点分别有哪些?

## 第2章 钢筋混凝土结构材料的基本力学性能

### 课前导读

#### 【内容提要】

钢筋与混凝土材料的物理和力学性能是建立混凝土结构的计算理论的基础。本章主要介绍混凝土在各种受力状态下的强度与变形性能；钢筋的品种、性能、强度与变形；钢筋与混凝土的粘结机理与连接构造。

#### 【能力要求】

通过本章的学习，学生应达到以下能力：

- (1) 熟悉混凝土在各种受力状态下的强度与变形性能，掌握混凝土的选用原则；
- (2) 熟悉建筑工程中所用钢筋的品种、性能及强度与变形；
- (3) 掌握钢筋的选用原则；
- (4) 了解钢筋与混凝土共同工作的原理，熟悉保证钢筋与混凝土之间协同工作的构造措施。

## 2.1 概 述

钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种力学性能截然不同的材料组成的复合结构，它们共同承受和传递结构的荷载。为正确合理地进行钢筋混凝土结构设计，需要了解、掌握混凝土和钢筋的物理力学性能。钢筋混凝土结构材料的物理力学性能指钢筋混凝土组成材料——混凝土和钢筋各自的强度及变形的变化规律，以及两者共同工作性能。了解这些是掌握钢筋混凝土结构构件工作性能并对其进行分析设计的基础。

## 2.2 混凝土的基本力学性能

### 2.2.1 混凝土的强度

混凝土的强度是指混凝土抵抗外力产生的某种应力的能力，即混凝土材料达到破坏或开裂极限状态时所能承受的应力。混凝土强度是混凝土的重要力学性能，是设计钢筋混凝土结构的重要依据，它直接影响结构的安全性和耐久性。普通混凝土是由水泥、水、砂、石和外加剂、矿物掺合料按一定配合比拌和，经凝固硬化后形成的人工石材。混凝土的强度与水泥强度、水胶比、集料品种、配合比、养护条件、龄期等有很大关系。此外，试件的形状、尺寸、试验方法和加载时间的不同，所测得的强度也不同。

#### 1. 混凝土的抗压强度

##### 1) 立方体抗压强度 $f_{cu}$

混凝土主要用于承受压力，其抗压性能比较稳定。我国以立方体抗压强度值作为混凝土