

高等院校教材

# 建筑结构

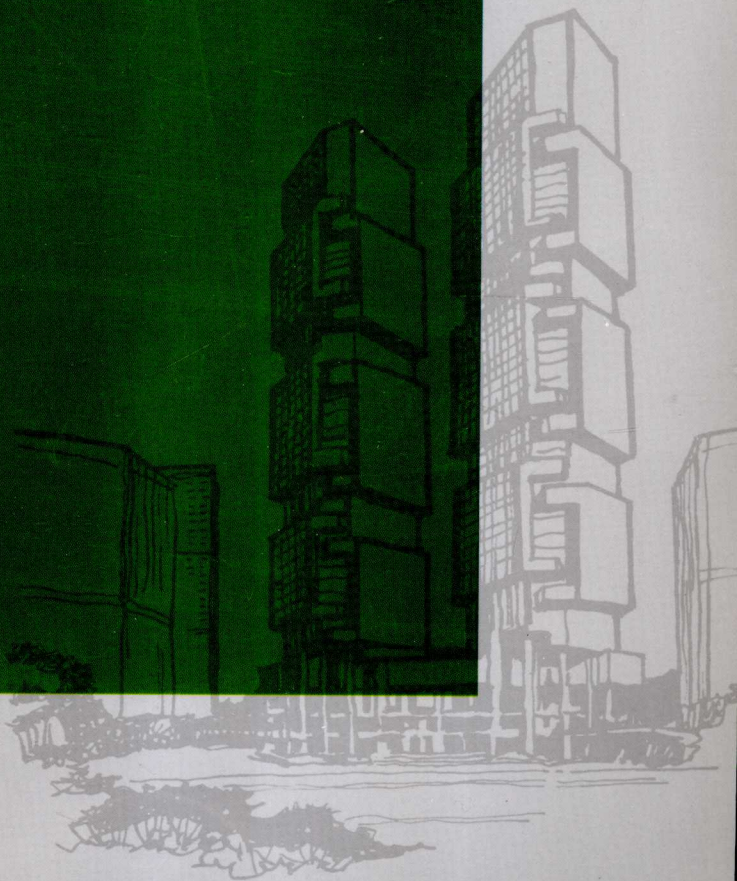
(第2版)



(供建筑学·城市规划·工程管理专业使用)

罗福午 邓雪松 主编

武汉理工大学出版社



高等院校教材

# 建筑结构

(第2版)

(供建筑学 城市规划 工程管理专业使用)

罗福午 邓雪松 主编

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

## 内 容 提 要

本书作为建筑学和工程管理专业所设“建筑结构”课的教科书,也可供土木工程专业和高职高专相应专业使用。本书第1章阐述了结构的任务与功能、荷载与材料、失效与设计以及结构与建筑、施工关系等几个总体问题。第2、3章阐述了梁、板、柱、墙、框架、桁(网)架、拱、壳、索等主要构件和结构单元。第4~6章阐述了钢筋混凝土、砌体、钢结构构件。

### 图书在版编目(CIP)数据

建筑结构/罗福午主编. —2版. —武汉:武汉理工大学出版社,2012.5  
ISBN 978-7-5629-3733-3

I. ① 建… II. ① 罗… III. ① 建筑结构-高等学校-教材 IV. ① TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 099868 号

|        |                                                                     |       |     |
|--------|---------------------------------------------------------------------|-------|-----|
| 项目负责人: | 蔡德民                                                                 | 责任编辑: | 徐秋林 |
| 责任校对:  | 彭佳佳                                                                 | 装帧设计: | 陶冶  |
| 出版发行:  | 武汉理工大学出版社                                                           |       |     |
| 社 址:   | 武汉市洪山区珞狮路 122 号                                                     |       |     |
| 邮 编:   | 430070                                                              |       |     |
| 网 址:   | <a href="http://www.techbook.com.cn">http://www.techbook.com.cn</a> |       |     |
| 经 销 者: | 各地新华书店                                                              |       |     |
| 印 刷 者: | 武汉理工大印刷厂                                                            |       |     |
| 开 本:   | 787×1092 1/16                                                       |       |     |
| 印 张:   | 21.75                                                               |       |     |
| 字 数:   | 554 千字                                                              |       |     |
| 版 次:   | 2012 年 5 月第 2 版                                                     |       |     |
| 印 次:   | 2012 年 5 月第 1 次印刷                                                   |       |     |
| 印 数:   | 15001—20000 册                                                       |       |     |
| 定 价:   | 35.00 元                                                             |       |     |

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87785758 87384729

版权所有,盗版必究。

## 第 2 版前言

本书第 1 版曾于 2005 年出版。自出版以来受到广大教师和学生的欢迎。由于近年来有许多与建筑结构有关的规范相继进行修订,因此编者依据最新修订的规范如《工程结构可靠度统一标准》(GB 50153—2008)、《建筑结构荷载规范》(GB 50005—2001)(2006 年版)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《建筑结构抗震设计规范》(GB 50011—2010)、《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)对本书进行了相应的更改,但依然保持第 1 版的特点并遵循教学改革的原则。

本书与传统教材相比,有以下特点:

- (1) 从建筑结构的整体到结构构件和结构单元的局部;
- (2) 从结构设计的原理到结构构件的计算和估算;
- (3) 从混凝土结构到砌体结构和钢结构;
- (4) 章节清晰、图文并茂,教师学生可以自由选择。

本书也可供建筑、结构设计人员和土建施工人员应用。

由于编者水平所限,本书第 2 版难免有疏漏和不足之处,热切希望读者批评指正。

编者

2012 年 4 月

# 目 录

|                                    |      |
|------------------------------------|------|
| 1 建筑结构概述 .....                     | (1)  |
| 1.1 建筑结构的任务、功能与定义 .....            | (1)  |
| 1.1.1 建筑结构在建筑物中的任务 .....           | (2)  |
| 1.1.2 建筑结构作为支承者的预定功能 .....         | (3)  |
| 1.1.3 建筑结构的定义 .....                | (5)  |
| 1.2 建筑结构的荷载、作用与荷载效应 .....          | (5)  |
| 1.2.1 荷载和作用 .....                  | (5)  |
| 1.2.2 荷载效应(内力效应和变形效应) .....        | (11) |
| 1.2.3 荷载传递路线 .....                 | (12) |
| 1.3 建筑结构中的材料及其基本性能 .....           | (13) |
| 1.3.1 常用结构材料的基本力学性能 .....          | (14) |
| 1.3.2 材料的基本力学性能和它与结构反应的关系 .....    | (16) |
| 1.3.3 常用结构材料的耐久性能 .....            | (16) |
| 1.3.4 对常用钢材、混凝土、木材、砌体应有的基本认识 ..... | (17) |
| 1.4 建筑结构的失效和结构的两类极限状态 .....        | (21) |
| 1.5 建筑结构的设计方法,承载力设计和变形设计 .....     | (23) |
| 1.5.1 结构设计方法的概念 .....              | (23) |
| 1.5.2 结构构件的截面承载力设计 .....           | (25) |
| 1.5.3 刚度和结构的变形设计 .....             | (28) |
| 1.6 结构与地基的关系 .....                 | (31) |
| 1.6.1 土的工程分类和地基承载力 .....           | (31) |
| 1.6.2 土层的压缩和建筑物的沉降 .....           | (33) |
| 1.6.3 结构设计时应考虑的地基问题 .....          | (34) |
| 1.7 结构和建筑的关系 .....                 | (35) |
| 1.8 结构和施工的关系 .....                 | (38) |
| 思考题 .....                          | (41) |
| 2 建筑结构的基本构件、结构单元和结构体系 .....        | (43) |
| 2.1 建筑结构的基本构件 .....                | (43) |
| 2.2 建筑结构的结构单元 .....                | (45) |
| 2.3 建筑结构的结构体系 .....                | (47) |
| 2.3.1 水平跨越结构体系 .....               | (47) |
| 2.3.2 竖向支承结构体系 .....               | (47) |

|                              |             |
|------------------------------|-------------|
| 2.3.3 基础结构体系·····            | (48)        |
| 2.4 主体结构间的变形缝·····           | (48)        |
| 思考题·····                     | (50)        |
| <b>3 主要的建筑结构构件和结构单元·····</b> | <b>(51)</b> |
| 3.1 梁·····                   | (51)        |
| 3.1.1 梁的概述·····              | (51)        |
| 3.1.2 梁与各种因素的关系·····         | (53)        |
| 3.1.3 伸臂梁、连续梁、静定多跨梁和斜直梁····· | (55)        |
| 3.1.4 平面交叉梁和平面曲梁·····        | (59)        |
| 3.2 板和楼盖结构·····              | (64)        |
| 3.2.1 板的概述·····              | (64)        |
| 3.2.2 单向板和双向板·····           | (65)        |
| 3.2.3 四边支承与四角支承双向板·····      | (66)        |
| 3.2.4 其他形状的双向板·····          | (68)        |
| 3.2.5 楼盖结构的形式·····           | (69)        |
| 3.3 柱和框架结构·····              | (82)        |
| 3.3.1 柱和框架概述·····            | (82)        |
| 3.3.2 柱网和框架结构平面布置·····       | (84)        |
| 3.3.3 柱和框架结构的几个重要概念·····     | (88)        |
| 3.3.4 框架结构的内力分析·····         | (89)        |
| 3.4 墙和墙体结构·····              | (94)        |
| 3.4.1 墙的概述·····              | (94)        |
| 3.4.2 砌筑墙·····               | (95)        |
| 3.4.3 钢筋混凝土墙·····            | (97)        |
| 3.4.4 封闭墙体形成的筒体·····         | (99)        |
| 3.4.5 挡土墙·····               | (102)       |
| 3.5 桁架和网架结构·····             | (103)       |
| 3.5.1 桁架结构·····              | (104)       |
| 3.5.2 网架结构·····              | (108)       |
| 3.6 拱结构·····                 | (118)       |
| 3.6.1 拱结构概述·····             | (118)       |
| 3.6.2 拱结构的组成·····            | (118)       |
| 3.6.3 拱结构的设计要点·····          | (121)       |
| 3.7 壳体结构·····                | (127)       |
| 3.7.1 壳体结构概述·····            | (127)       |
| 3.7.2 壳体结构的曲面形式·····         | (128)       |
| 3.7.3 圆球壳体·····              | (131)       |
| 3.7.4 筒形壳体·····              | (137)       |

|                                   |              |
|-----------------------------------|--------------|
| 3.7.5 双曲抛物面壳体 .....               | (143)        |
| 3.8 索结构 .....                     | (147)        |
| 3.8.1 索结构概述 .....                 | (147)        |
| 3.8.2 索结构的基本受力原理 .....            | (148)        |
| 3.8.3 悬索结构的材料和结构类型 .....          | (152)        |
| 3.8.4 悬挂索结构和斜拉索结构 .....           | (155)        |
| 3.9 基础 .....                      | (157)        |
| 3.9.1 基础概述 .....                  | (157)        |
| 3.9.2 浅埋基础底面积的确定 .....            | (159)        |
| 3.9.3 桩基础和沉井基础 .....              | (162)        |
| 3.9.4 建筑物有过大不均匀沉降时的基础处理 .....     | (163)        |
| 思考题 .....                         | (164)        |
| <b>4 钢筋混凝土结构构件 .....</b>          | <b>(173)</b> |
| 4.1 钢筋混凝土结构的特点 .....              | (173)        |
| 4.2 钢筋和混凝土材料的力学性能 .....           | (174)        |
| 4.2.1 钢筋 .....                    | (174)        |
| 4.2.2 混凝土 .....                   | (175)        |
| 4.2.3 钢筋与混凝土间的粘结 .....            | (176)        |
| 4.2.4 混凝土的收缩和徐变 .....             | (179)        |
| 4.2.5 轴心受力构件的受力分析 .....           | (180)        |
| 4.3 钢筋混凝土轴心受拉构件 .....             | (181)        |
| 4.3.1 钢筋混凝土轴心受拉构件正截面承载力计算 .....   | (182)        |
| 4.3.2 钢筋混凝土轴心受拉构件主要构造要求 .....     | (182)        |
| 4.4 钢筋混凝土轴心受压构件 .....             | (183)        |
| 4.4.1 普通箍筋柱轴心受压时正截面承载力计算 .....    | (183)        |
| 4.4.2 螺旋箍筋柱轴心受压时正截面承载力计算 .....    | (184)        |
| 4.4.3 轴心受压构件的主要构造要求 .....         | (185)        |
| 4.5 钢筋混凝土受弯构件 .....               | (188)        |
| 4.5.1 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算 .....     | (188)        |
| 4.5.2 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算 .....     | (203)        |
| 4.6 钢筋混凝土受扭构件 .....               | (212)        |
| 4.6.1 受扭破坏的空间桁架模型 .....           | (213)        |
| 4.6.2 受扭构件抗扭承载力计算 .....           | (213)        |
| 4.6.3 钢筋混凝土弯剪扭构件的设计计算步骤 .....     | (214)        |
| 4.6.4 受扭构件承载力计算公式的适用条件及构造要求 ..... | (215)        |
| 4.7 钢筋混凝土多跨连续梁、板的设计特点 .....       | (219)        |
| 4.7.1 荷载的不利组合 .....               | (219)        |
| 4.7.2 内力包络图 .....                 | (220)        |

|        |                               |       |
|--------|-------------------------------|-------|
| 4.7.3  | 考虑塑性变形内力重分布的估算方法 .....        | (221) |
| 4.7.4  | 钢筋混凝土梁、板非计算的构造要求 .....        | (223) |
| 4.7.5  | 钢筋混凝土连续梁、板的配筋图 .....          | (226) |
| 4.8    | 钢筋混凝土偏心受压构件 .....             | (229) |
| 4.8.1  | 偏心受压构件正截面的破坏特征 .....          | (229) |
| 4.8.2  | 大小偏心受压界限 .....                | (230) |
| 4.8.3  | 附加偏心距、初始偏心距和二阶效应 .....        | (231) |
| 4.8.4  | 矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算及配筋估算 ..... | (232) |
| 4.8.5  | 偏心受压构件的 $N_u-M_u$ 相关曲线 .....  | (234) |
| 4.8.6  | 主要构造要求 .....                  | (235) |
| 4.9    | 钢筋混凝土构件的裂缝概述 .....            | (238) |
| 4.9.1  | 裂缝的成因 .....                   | (238) |
| 4.9.2  | 裂缝的形态和性质 .....                | (241) |
| 4.9.3  | 构件受力裂缝产生的机理 .....             | (241) |
| 4.9.4  | 受力构件控制裂缝宽度的意义 .....           | (243) |
| 4.10   | 钢筋混凝土构件的刚度概述 .....            | (243) |
| 4.10.1 | 受弯构件短期截面抗弯刚度的估计值 .....        | (244) |
| 4.10.2 | 受弯构件长期截面抗弯刚度的估计值 .....        | (245) |
| 4.10.3 | 受弯构件挠度计算的概念 .....             | (245) |
| 4.11   | 预应力混凝土的基本知识 .....             | (247) |
| 4.11.1 | 预应力混凝土的分类 .....               | (248) |
| 4.11.2 | 施加预应力的方法 .....                | (248) |
| 4.11.3 | 预应力混凝土的几个基本概念 .....           | (249) |
| 4.11.4 | 预应力混凝土的材料和配筋形式 .....          | (254) |
| 4.11.5 | 预应力混凝土构件的截面形状和尺寸 .....        | (254) |
|        | 思考题 .....                     | (255) |
|        | 习题 .....                      | (257) |

|       |                          |       |
|-------|--------------------------|-------|
| 5     | 砌体结构构件 .....             | (262) |
| 5.1   | 砌体结构的特点 .....            | (262) |
| 5.2   | 块材、砂浆和砌体 .....           | (263) |
| 5.2.1 | 块材的种类和强度等级 .....         | (263) |
| 5.2.2 | 砂浆的种类和强度等级 .....         | (264) |
| 5.2.3 | 砌体的种类 .....              | (265) |
| 5.3   | 砌体受压、受拉、受弯及受剪的力学性能 ..... | (268) |
| 5.3.1 | 砌体受压时的破坏过程及其抗压强度 .....   | (268) |
| 5.3.2 | 砌体的受拉性能 .....            | (270) |
| 5.3.3 | 砌体的受弯性能 .....            | (270) |
| 5.3.4 | 砌体受剪性能 .....             | (270) |

|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| 5.3.5 砌体轴心受压时的变形及弹性模量 .....          | (270) |
| 5.4 砌体受压构件承载力计算 .....                | (271) |
| 5.4.1 砌体受压截面的应力分析 .....              | (271) |
| 5.4.2 砌体受压构件承载力计算 .....              | (272) |
| 5.5 墙体的内力分析和墙、柱设计 .....              | (275) |
| 5.5.1 砌体结构房屋静力计算的三种方案 .....          | (275) |
| 5.5.2 墙体计算要点和计算简图 .....              | (277) |
| 5.6 墙、柱高厚比验算和砌体的构造要求 .....           | (280) |
| 5.6.1 墙、柱高厚比的验算 .....                | (280) |
| 5.6.2 墙体的主要构造要求 .....                | (285) |
| 5.7 墙体设计中的其他问题——梁垫、过梁、挑梁、圈梁、墙梁 ..... | (285) |
| 5.7.1 梁垫 .....                       | (285) |
| 5.7.2 挑梁 .....                       | (287) |
| 5.7.3 过梁 .....                       | (288) |
| 5.7.4 圈梁 .....                       | (289) |
| 5.8 防止或减轻墙体开裂的主要措施 .....             | (290) |
| 5.8.1 由于收缩和温度变化引起墙体开裂及其防止措施 .....    | (290) |
| 5.8.2 由于地基不均匀沉降引起墙体开裂及其防止措施 .....    | (291) |
| 思考题 .....                            | (292) |
| 习题 .....                             | (294) |

|                             |              |
|-----------------------------|--------------|
| <b>6 钢结构构件 .....</b>        | <b>(296)</b> |
| 6.1 钢结构的特点 .....            | (296)        |
| 6.2 钢结构材料常用指标与钢材种类 .....    | (297)        |
| 6.2.1 钢材的强度和弹性模量等常用指标 ..... | (297)        |
| 6.2.2 钢材的塑性和冲击韧性 .....      | (297)        |
| 6.2.3 钢材的冷弯性能 .....         | (297)        |
| 6.2.4 钢材的可焊性 .....          | (298)        |
| 6.2.5 钢材种类与选用 .....         | (298)        |
| 6.3 钢轴心受力构件 .....           | (299)        |
| 6.3.1 轴心受力构件的类型 .....       | (299)        |
| 6.3.2 轴心受力构件的强度、刚度 .....    | (300)        |
| 6.3.3 轴心受压构件的整体稳定 .....     | (301)        |
| 6.3.4 实腹式轴心受压构件的局部稳定 .....  | (302)        |
| 6.3.5 轴心受压构件的设计步骤 .....     | (303)        |
| 6.4 钢受弯构件 .....             | (304)        |
| 6.4.1 受弯构件的截面类型 .....       | (304)        |
| 6.4.2 钢梁的强度和刚度 .....        | (305)        |
| 6.4.3 钢梁的稳定问题 .....         | (306)        |

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 6.4.4 钢梁的设计 .....      | (308) |
| 6.5 钢构件间的连接 .....      | (309) |
| 6.5.1 次梁与主梁连接 .....    | (309) |
| 6.5.2 梁与柱连接 .....      | (310) |
| 6.5.3 柱与基础连接(柱脚) ..... | (310) |
| 6.5.4 连接方法分类 .....     | (312) |
| 思考题 .....              | (321) |
| 习题 .....               | (321) |

|          |       |
|----------|-------|
| 附录 ..... | (324) |
|----------|-------|

|                                                                                                   |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 附表 1 常用楼面均布活载的标准值及其组合值、频遇值、准永久值系数 .....                                                           | (324) |
| 附表 2 常用材料单位重和构件自重 .....                                                                           | (324) |
| 附表 3 常用结构或构件的变形容许值 .....                                                                          | (325) |
| 附表 4 一般单跨梁在各种荷载作用下的最大弯矩和挠度 .....                                                                  | (325) |
| 附表 5 等截面三等跨连续梁常用荷载作用下内力系数 .....                                                                   | (326) |
| 附表 6 正放正交交叉梁系内力和挠度系数 .....                                                                        | (327) |
| 附表 7 斜放正交交叉梁系内力和挠度系数 .....                                                                        | (328) |
| 附表 8 混凝土强度标准值( $f_{ck}$ 、 $f_{tk}$ )、设计值( $f_c$ 、 $f_t$ )和弹性模量( $E_c$ )(N/mm <sup>2</sup> ) ..... | (328) |
| 附表 9 普通钢筋强度标准值( $f_{yk}$ )、设计值( $f_y$ 、 $f'_y$ )和弹性模量( $E_s$ )(N/mm <sup>2</sup> ) .....          | (328) |
| 附表 10 钢筋的公称直径、公称截面面积及理论重量 .....                                                                   | (329) |
| 附表 11 每米板宽内各种间距的钢筋截面面积 .....                                                                      | (329) |
| 附表 12 混凝土保护层的最小厚度 $c$ (mm) .....                                                                  | (330) |
| 附表 13 钢筋混凝土构件的稳定系数 $\varphi$ .....                                                                | (330) |
| 附表 14 常用烧结普通砖和烧结多孔砖砌体抗压强度设计值(MPa) .....                                                           | (331) |
| 附表 15 常用单排孔混凝土砌块和轻集料混凝土砌块对孔砌筑砌体的抗压强度<br>设计值(MPa) .....                                            | (331) |
| 附表 16 各种砌体轴心抗拉、弯曲抗拉和抗剪强度设计值(MPa) .....                                                            | (331) |
| 附表 17 常用各种砌体的弹性模量(MPa) .....                                                                      | (332) |
| 附表 18 砌体受压构件的计算高度 .....                                                                           | (332) |
| 附表 19 砌体房屋的静力计算方案 .....                                                                           | (333) |
| 附表 20 砌体受压构件承载力影响系数 $\varphi$ .....                                                               | (333) |
| 附表 21 钢材的强度设计值(N/mm <sup>2</sup> ) .....                                                          | (334) |
| 附表 22 焊缝的强度设计值(N/mm <sup>2</sup> ) .....                                                          | (334) |
| 附表 23 螺栓连接的强度设计值(N/mm <sup>2</sup> ) .....                                                        | (334) |
| 附表 24 钢结构 b 类截面轴心受压构件稳定系数 $\varphi$ .....                                                         | (335) |

|            |       |
|------------|-------|
| 参考文献 ..... | (336) |
|------------|-------|

# 1 建筑结构概述

## 1.1 建筑结构的任务、功能与定义

宇宙之间结构无所不在。无垠的太空中,有天体结构;超微观世界里,有原子结构;大到恐龙身上有骨骼结构,小到树叶片中有茎脉结构;人类的环境中有社会结构,人类的交流中有语言结构……对于建筑物来说,它有着楼板、屋顶、墙体、门窗、给排水、机电设备等多种成分,其中板、梁、柱、墙体、基础组成了建筑物的基本结构(图 1.1)。结构虽然是组成万物的重要因素,但是结构不等于各种物体的全部。一幢建筑物不但要有由板、梁、柱和墙体组成的空间,更要有这个空间为人类需求服务的各种使用功能,如分隔的房间、露天的阳台、照明的灯光、洗

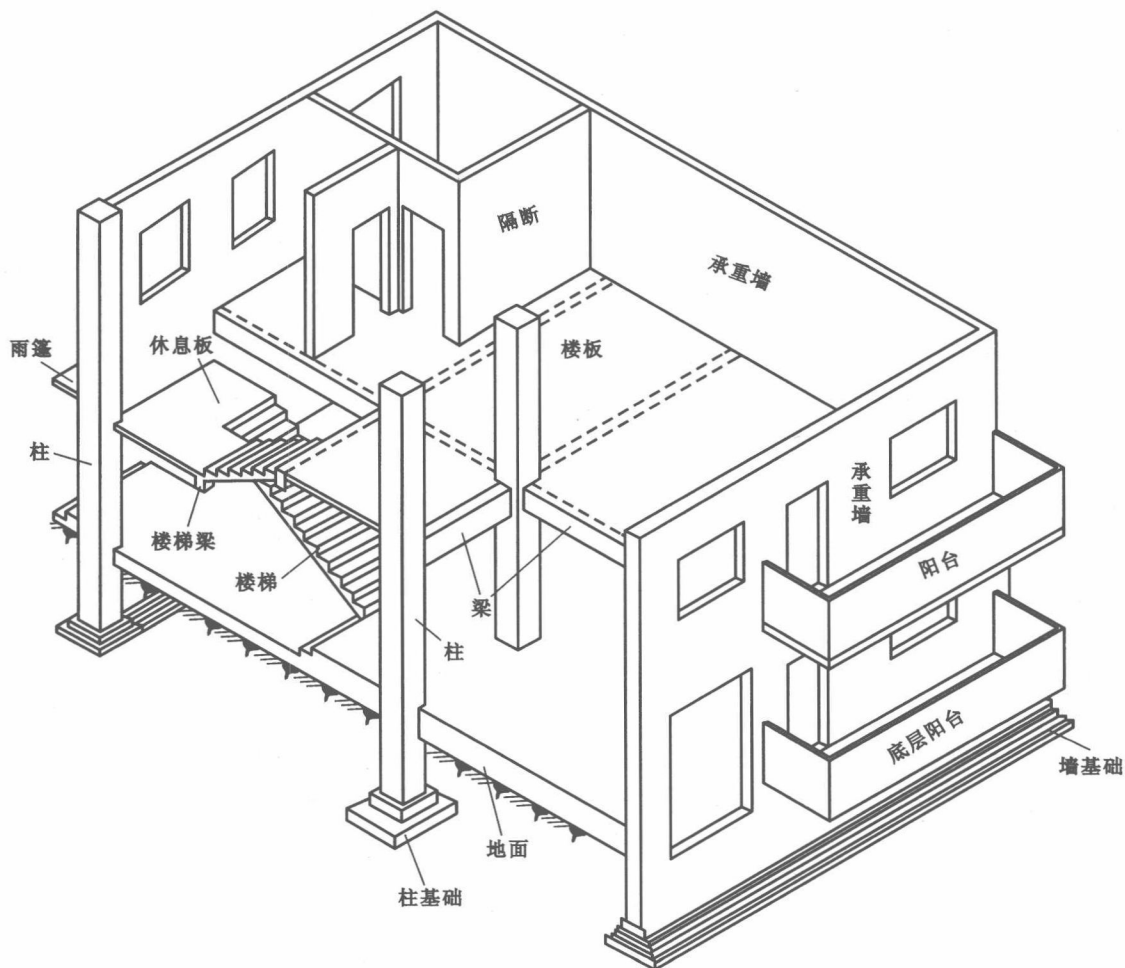


图 1.1 建筑物中的结构构件和其他

涂的设施等(图 1.1),还有使人们赏心悦目的建筑体型和室内外环境,这就是一幢建筑物除结构以外对建筑、给排水、供热、电气以至园林绿化等多方面的需要。

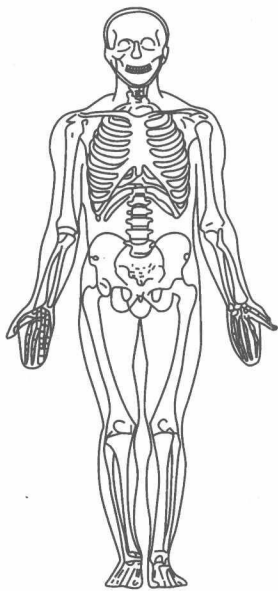


图 1.2 骨骼

建筑物好比一个人,建筑相应于人的容貌、体型、气质;结构相应于人的骨骼、耐力、寿命;给排水、供热、电气等系统相应于人的神经、血液、器官。骨骼对人的形成固然必不可少,血液对人的生存、容貌对人的形象也很重要,有时更为重要(图 1.2)。本书的目的是较为完整地并较为简要地陈述建筑物中的结构,即建筑结构的内涵,使初学者对建筑结构有一个全面清晰的认识,以便在从事建筑物的规划、设计、施工、管理的工作中有所遵循。

### 1.1.1 建筑结构在建筑物中的任务

要认识建筑结构,首先要掌握结构在建筑物中的任务,一般来说它的任务有 4 个方面:

(1) 它是一个空间的**组织者**——它首先要组成人类活动需要的多种空间,如各类房间、厅室、过道、楼梯,还要形成为人类服务的各种构筑物,如水池、贮罐、烟囱。

(2) 它是一个形状的**表现者**——建筑物是历史、文化、艺术的产物,它不但要反映人类的物质需要,还要表现人类的精神需求。从小尺度的别墅住宅到大尺度的高楼大厦,从简单的四方盒子到复合的多面体,各种形状的建筑物都要用结构来表现。应该认识到结构的任务之一是表现“建筑美”,建筑中的结构表现的却是一种“结构美”。

(3) 它是一个荷载的**支承者**——建筑物不是存在于真空中,它必然要承受自然界的各种荷载,如地心吸力的重力荷载、风压风吸的风荷载、热胀冷缩产生的隐形荷载等。结构就是这些荷载的支承者,它不仅要确保建筑物在这些荷载作用下不破坏、不倒塌,还要使建筑物持续地保持良好的使用状态。

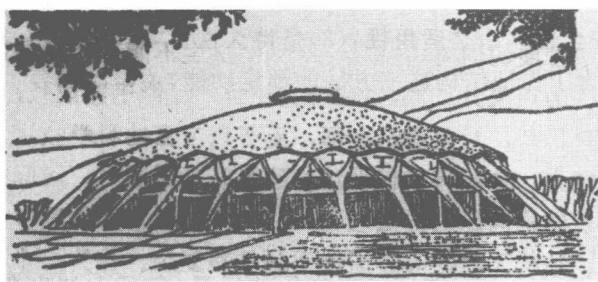
(4) 它是一个材料的**利用者**——建筑结构的物质基础是建筑材料,结构是由各种材料组成的,如用钢材做成的结构称钢结构、用木材做成的结构称木结构、用钢筋(钢丝)和混凝土(水泥砂浆)做成的称钢筋混凝土结构(钢丝网水泥结构)等。结构作为支承者的能力实质上是材料强度和刚度性能的反映;结构发生的变形和位移实质上是材料应变性能的反映;建筑物自身的物理、化学性能,如质量、体积、胀缩、腐蚀等都是组成它的材料性能的反映。一般来说,建筑物所花的费用大部分用在结构材料上。建筑物设计的根本矛盾之一是“以较少、较好的材料达到最佳的效果”,这个矛盾的主要方面是通过巧妙的结构设计来解决的。

由此可见:

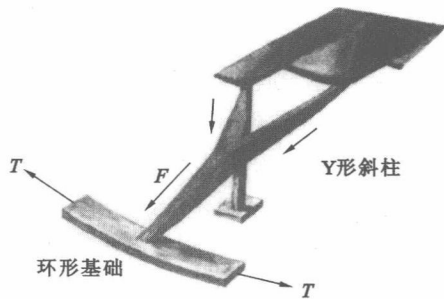
- 结构存在的根本目的,是服务于人类对空间的应用和美观需求;
- 结构存在的根本原因,是抵御自然界对建筑物生成的各种荷载;
- 结构存在的根本条件,是利用并发挥了建筑材料的作用。

以 1960 年建成的罗马小体育宫(图 1.3)的结构为例,可以充分说明建筑结构的这 4 方面的任务:这个覆盖 61m 直径庞大高耸的圆形空间是一个落地的扁圆球形壳体屋盖结构(关于壳体结构的讨论,见第 3 章 3.7 节),它的曲面形屋面板由 1620 个壁厚为 25mm 的轻型钢丝网水泥菱形槽板拼装而成。由于落地圆屋盖接近地面,使建筑物的高度不够,就把圆屋盖的支承

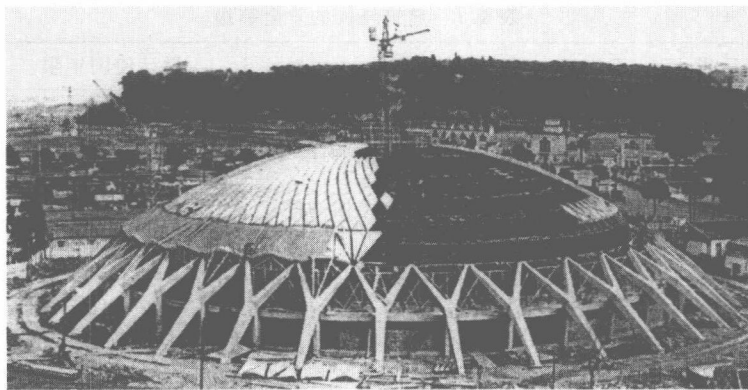
结构放在外墙外面,用 36 个 Y 形斜柱支承在圆环形基础板上。这样,屋盖所承受的全部重力荷载(约  $5\text{kN/m}^2$ ,可以认为是很轻的,一般建筑物的全部重力荷载为  $8\sim 10\text{kN/m}^2$ )和风荷载都能自然地由斜柱顺利传给环形基础。此环形基础既能作为承受斜向反力的竖向分力的支承构件,又能作为承受斜向反力的水平分力的自平衡构件。所以这个由槽板、斜柱、环形基础组成的结构既是建筑空间完美组织者的典型,又是荷载有利支承者和材料充分利用者的楷模。从建筑形式看,小体育宫的屋顶结构无论从室内仰视还是从空中俯视看都酷似盛开的向日葵;屋面与斜柱交接处的檐边结构波浪起伏、优美雅致,是二者的天然过渡;屋顶中央的采光天窗结构突出屋面少许,使立面视觉更加完美(其洞口在施工期间还便于安装起吊设备);它们都使整个结构成为突出的建筑形式表现者。意大利著名的结构工程师奈尔维(P. L. Nervi)设计的罗马小体育宫早已成为全世界对建筑结构赞颂的典范。



(a)



(c)



(b)

图 1.3 罗马小体育宫

(a) 外观;(b) 结构施工现场;(c) 斜柱和环形基础做法

### 1.1.2 建筑结构作为支承者的预定功能

在上述结构的 4 个任务中最为核心的是作为一个荷载的支承者。因为“皮之不存,毛将焉附”,结构若失去支承者的作用,建筑物的其他成分也就失掉依托和背衬,它们的作用也就不存在了。

在规定的设计使用年限(建筑结构定为 50 年,在此年限内只需进行必要的防护和维修,不需进行大修,就能完成下述预定功能,50 年后建筑物并不完全失效,但完成预定功能的概率降

低;关于失效概率可参见 1.4 节)内,建筑结构作为支承者的预定功能有 4 点:

(1) 结构应该能够承受正常使用<sup>①</sup>和正常施工<sup>②</sup>时可能出现的各种荷载,即结构的各个构件有足够承受荷载的能力(称承载力)和必需的可靠度<sup>③</sup>。

(2) 结构在正常使用时具有良好的工作性能,即良好地满足使用要求,不会使人有不安全感和不舒适感,如梁的挠度不会偏大、屋面不会渗漏、墙体不会因温差出现不允许的裂缝<sup>④</sup>等。

(3) 结构的构件和所用材料在正常维护下具有足够的耐久性,即对长期的物理环境作用(如温度变化、摩擦)和化学环境作用(如腐蚀、化学变化)有足够的抵御能力,不致因此而丧失承载力或降低可靠度。

(4) 结构在设计规定的偶然事件(如符合抗震设防烈度有关条件下的地震)发生时和发生后,仍能保持必需的整体稳定性,即建筑物不会发生整体或局部倒塌,对生命财产的安全有基本保障。

在这 4 个预定的功能中,(1)和(4)是**安全性**, (2)是**适用性**, (3)是**持久性**。“安全、适用、持久”三者缺一不可,当然安全性更为重要。为了保证结构这三方面的预定功能,关键的是要:

- 掌握建筑物需要承受荷载的情况;
- 了解建筑结构所采用材料的性能;
- 充分发挥材料的作用,组成有足够承载力、变形能力、耐久性和整体稳定性的结构。

建筑结构的安全性首先表现在确定建筑结构的安全等级上。我国《工程结构可靠度统一标准》(GB 50153—2008)规定:建筑结构设计时应根据破坏可能产生的后果(危及人的生命、造成经济损失、产生社会影响等)的严重性,采用不同的安全等级(见表 1.1)。

表 1.1 建筑结构的安全等级

| 安全等级 | 破坏后果 | 建筑物类型           | 设计使用年限   | 重要性系数 $\gamma_0$ |
|------|------|-----------------|----------|------------------|
| 一级   | 很严重  | 重要的房屋           | 100 年及以上 | 1.1              |
| 二级   | 严重   | 普通的房屋和构筑物       | 50 年     | 1.0              |
| 三级   | 不严重  | 次要的房屋和易于替换的结构构件 | 25 年     | 0.9              |
|      |      | 临时性房屋和构筑物       | 5 年      |                  |

注:(1) 构筑物指没有人居住的结构物,如烟囱、水池、煤仓等;

(2) 重要性系数  $\gamma_0$  用于进行承载能力极限状态设计时,与荷载效应组合的设计值相乘,见本章 1.5.2 节;

(3) 在一般情况下  $\gamma_0$  均取 1.0。

更具体地说,确保建筑结构的安全、适用和持久,主要反映在能保证结构具有一定**可靠度**的设计方法和对各类结构用建筑材料的要求上。关于这两方面的论述详见本章 1.5 节“建筑设计方法”及本书第 4、5、6、7 章各种材料结构构件的设计计算。

① “正常使用”指建筑物使用时对结构施加的荷载和所处的环境符合《建筑结构设计规范》的要求。

② “正常施工”指建筑物的工程质量满足《建筑施工质量验收规范》的规定。

③ “可靠度”指结构在设计使用年限内,在正常设计、正常施工条件下完成预定功能的概率,见本章 1.4 节。

④ 有些结构(如钢结构)不允许裂缝出现,有些结构构件(如钢筋混凝土梁、砖墙)出现的裂缝宽度在一定范围内是允许的。

### 1.1.3 建筑结构的定义

在认识了结构的任务和结构作为支承者的预定功能后,才有可能对建筑结构给出比较准确的定义,以便指导对建筑结构的全面认识。建筑结构是在一个建筑空间中用各种基本结构构件组合建造成的有某种特征的机体,为建筑物的持久使用和美观需求服务,对人们的生命财产提供安全保障。在这个定义中有几点应引起注意:结构是一个由构件组成的“整体”,不是一个抽象的理念;结构是一个被建造的“实体”,不是一个讨论中的事件;结构是一个与建筑、设备、外界环境形成对立统一的有特征的“机体”,不是它们的简单集合;结构是一个有丰富应用价值的“载体”。不仅起着支承作用,而且是建筑物做到适用、美观、安全的坚定保障。一个优质的建筑结构应该具有以下特色:

- 在应用上,要充分满足空间和多项使用功能要求;
- 在安全上,要完全符合承载、变形、稳定的持久需要;
- 在造型上,要能够与环境规划和建筑艺术融为一体;
- 在技术上,要力争体现科学、技术和工程的新发展;
- 在建造上,要合理用材、节约能源、与施工实际密切结合。

## 1.2 建筑结构的荷载、作用与荷载效应

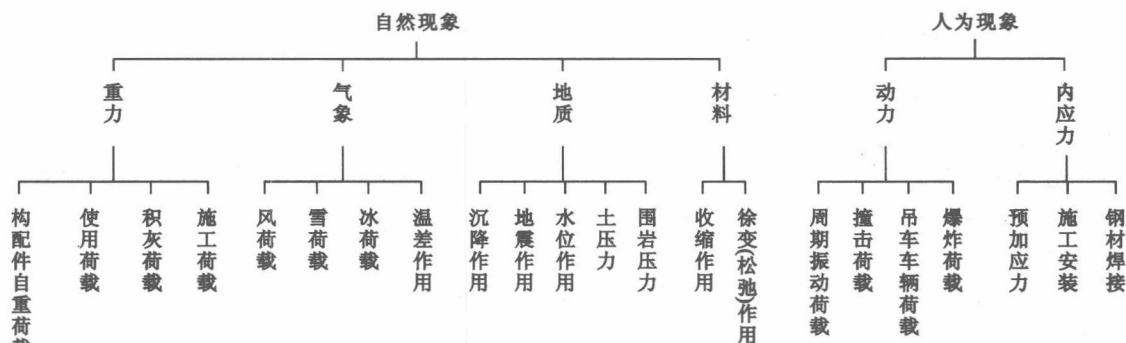
### 1.2.1 荷载和作用

建筑结构所支承的荷载来自两类现象(图 1.4(a))。一类由自然现象产生,如地球的地心吸力(即重力),因气象变化产生的风力和冰、雪的自重,因材料性能产生的热胀冷缩和干缩,因地质原因产生的地基沉降、地震时的地面运动等。另一类由人为现象产生,如机器运行产生的周期振动,爆炸产生的冲击振动,人为施加的预应力等。这两类现象从对结构产生的影响和效应分析,又各自有两种可能:一种是直接施加在结构上使它产生内力和变形的荷载(也称直接作用),如结构自身的重力荷载、施加在楼面上人群和设备的使用荷载;另一种是因某种原因(非直接施加)使结构产生内力和变形的作用(也可认为是间接荷载,或称隐性荷载),如材料热胀冷缩而变形受到约束产生的温差作用,地基不均匀沉降引起的沉降作用,地震使建筑物产生加速度反应导致的地震作用等。

图 1.4(a)中各种“荷载”的值是怎样取的呢?由于实际施加在结构上的荷载与该建筑物所在地区、所用材料、使用状态有关,一般都是随机变量,要用调查统计得到如图 1.4(b)所示的该荷载概率函数和概率分布曲线,取其众值(或峰值,即出现频率最多的数值)才能得到它的标准值(关于标准值的概念可参见 1.5 节)。荷载的标准值可以在《建筑结构荷载规范》中查到。而图 1.4(a)中各种“作用”的值除地震作用根据《建筑抗震设计规范》确定外,其他都要按结构工程的实际情况估计。

在进行结构的分析和设计时,常将荷载(或作用,下同)按下列性质分类:

(1) 按荷载随时间的变异分,有恒载、活载和偶然荷载。恒载也是一种永久作用,其量值不随时间变化或其变化可忽略,如结构自重、预加应力。活载也是一种可变作用,其量值随时间变化,如楼面使用荷载、雪荷载、吊车荷载。偶然荷载如爆炸力和撞击力,则是一种偶然作



(a)

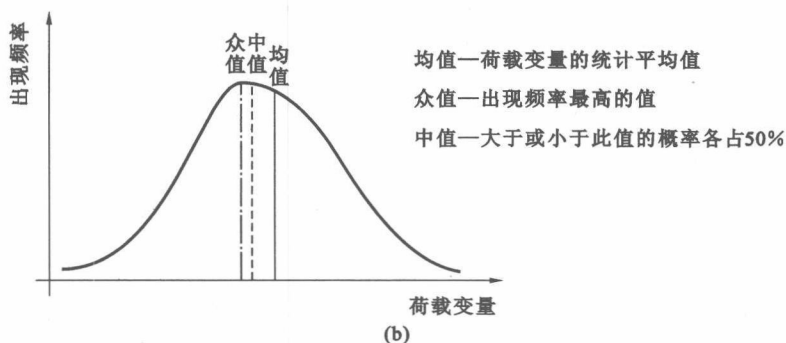


图 1.4 荷载类型与分布概率曲线

(a) 荷载类型;(b) 荷载经统计得到的一般概率分布曲线

用,在设计使用年限内不一定出现,而一旦出现其量值很大且持续时间很短,地震作用就是一种偶然荷载。

(2) 按结构的动力效应分,有静载和动载。**静载**也是一种静态作用,它使结构构件没有动力效应或其动力效应可忽略;恒载当然是静载,一般的活载被认为是慢慢逐渐加在结构上的,所以也认为是静载,譬如人群在楼面上的活动就是对楼面施加静载。**动载**则是一种动态作用,它使结构构件产生的动力效应不可忽略;地震作用、吊车荷载都是动载,在计算吊车荷载时要将吊车承受的荷载乘以动力系数<sup>①</sup>。风荷载是静载还是动载,这要看建筑物的自振周期<sup>②</sup>:高层房屋刚度小、自振周期长(如 9·11 事件的世贸大楼高 412m,自振周期为 10s),由于阵风的周期也较长,二者相近,可能产生共振效应,故高层建筑物的风载为动载;而一般房屋刚度大、自振周期短(如一幢 3 层高砖混房屋的自振周期不足 0.25s),与阵风周期相差甚远,故一般建筑物的风载为静载。

(3) 按荷载实际分布情况分,有分布荷载和集中荷载。荷载总是分布在一定面积上的。当按一定几何关系分布时称**面荷载**,如均匀分布面荷载、三角形分布面荷载等。其中对于可以将面荷载视作集中在一条线上分布的称**线荷载**,如均匀分布线荷载即**均布荷载**,三角形分布线

① 动力系数是动载按静载设计计算时应乘的系数,其值为结构构件的最大动力效应与相应静力效应的比值。

② 建筑物做周而复始的自由往复运动过程中,每重复一次所经历的时间(以秒计)称建筑物的自振周期。

荷载等。当分布面积不大,可近似认为集中于一点时,称**集中荷载**。此外,在结构设计时对于楼面上不连续分布的实际荷载,一般可采用**等效均布荷载**代替,它指其在结构上所得到的内力效应能与施加实际荷载时的内力效应保持一致的均布荷载。

(4) 按荷载作用方向分,有竖向荷载、侧向荷载和冲击荷载。**竖向荷载**显而易见是由重力作用引起的;**侧向荷载**则由风和侧向地震力以及土压力、水压力引起的。侧向荷载可导致建筑物整体滑动和倾覆,风还会掀起屋顶,而重力荷载则可抵抗侧向荷载,保持结构的稳定。**冲击荷载**往往是一种侧向荷载。运行中的电梯类似于气泵对电梯井壁产生侧向泵压作用;高层建筑中楼梯间的墙体必须能抵抗火灾发生时受到的侧压力。有的专著中规定:为防止建筑物遇到爆炸后发生多米诺骨牌式倒塌,它的结构应承受  $7\text{kN/m}^2$  的爆炸压力。

在进行结构的分析和设计时,除考虑承受恒载外,还要考虑承受两种或两种以上活载的情况。由于它们(指两种或两种以上活载)不可能同时到达各自的最大值,为了使结构在承受恒载和两种或两种以上活载时的可靠度与该结构在单一活载作用下的可靠度一致起见,要考虑荷载的最不利组合问题,也即当要同时考虑两种或两种以上活载时,要取用各种活载的**组合值系数**(参见本书 1.5 节)。

下面对恒载、楼屋面活载、雪载、风载、温差作用、沉降作用等进行简要讨论。

(1) **恒载** 指结构构件和建筑构造层的重力荷载,等于它们的体积乘以所用材料的单位重力,以  $\text{N}(\text{牛})$ 、 $\text{kN}(\text{千牛})$  或  $\text{kN/m}$ 、 $\text{kN/m}^2$  表示。主要结构用材料的单位重和常用构件的自重均可参见本书的附表 2 和《荷载规范》<sup>①</sup>。在初步设计阶段,若要估计各种结构构件每平方米覆盖面积中的平均恒载  $w$ (仅考虑构件自重)和各种建筑物每平方米建筑面积上的平均恒载  $W$ (含楼屋盖、柱、墙、构造做法等),可大致取:

|           |                           |                           |
|-----------|---------------------------|---------------------------|
| ● 钢筋混凝土结构 | $w=4\sim6\text{kN/m}^2$   | $W=10\sim14\text{kN/m}^2$ |
| ● 钢结构     | $w=2.5\sim4\text{kN/m}^2$ | $W=6\sim9\text{kN/m}^2$   |
| ● 木结构     | $w=2\sim2.5\text{kN/m}^2$ | $W=4\sim7\text{kN/m}^2$   |

准确计算恒载必须注意以下几点:

1) 恒载虽容易计算,但颇为烦琐且不能遗漏;恒载计算是结构设计过程中不可逾越的基本步骤。

2) 结构构件计算前必然要根据经验假定它的截面尺寸,得到预定自重后才能进行下一步计算;若计算结果与假定截面尺寸误差太大,需要重算。

3) 荷载规范或生产厂家提供的材料容积密度或构造做法并不经常符合实际,要根据实际情况进行判断。

4) 结构自重只占建筑物恒载的一部分,在  $20\%\sim50\%$  间变化,减少结构自重是一条重要设计准则,它可节约材料、运输和施工费用。

(2) **楼屋面活载** 不属于恒载的重力荷载都按活载考虑,它们是变化的(不仅随时间而且随所处位置变化)、不可预测的。由楼面物体引起的楼面活载称**使用荷载**;由屋面物体引起的称**屋面活载**,如施工荷载、积灰、积水或特殊用途等。

楼面活载即使用荷载,实际上是通过一系列集中力传给楼盖结构的,如人的重力由脚底、家具由支承点施加给楼面,但在结构分析和设计中采用的却是均布荷载。由分散的多个集中

<sup>①</sup> 我国当前采用的荷载规范为《建筑结构荷载规范》(GB 50005—2001)(2006 年版),本书简称《荷载规范》,下同。