



普通高等教育“十五”国家级规划教材修订版

# 建筑结构

(第2版)

主编 丁天庭 胡兴福



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS



普通高等教育“十五”国家级规划教材修订版

# 建筑结构

(第2版)

JIANZHU JIEGOU

主编 丁天庭 胡兴福



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容提要

全书以结构施工图识读为主线,重点介绍结构构件和基础的受力特点、构造要求以及施工图识读方法。全书共分为10章。主要包括:建筑结构概论、钢筋与混凝土材料的力学性能、混凝土结构基本构件、钢筋混凝土梁板结构、钢筋混凝土单层工业厂房结构、钢筋混凝土多层及高层房屋结构、地基与基础、砌体结构、钢结构、建筑结构施工图识读。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校的工程造价、建筑工程管理、建筑工程技术和工程监理等专业教材,也可供有关的管理工作人员及自学人员学习参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

建筑结构 / 丁天庭, 胡兴福主编. —2 版. —北京: 高等教育出版社, 2013. 7

ISBN 978 - 7 - 04 - 037461 - 2

I. ①建… II. ①丁… ②胡… III. ①建筑结构 - 高等职业教育 - 教材 IV. ①TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 100237 号

|          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|
| 策划编辑 毛红斌 | 责任编辑 毛红斌 | 特约编辑 杨 磊 | 封面设计 李卫青 |
| 版式设计 杜微言 | 插图绘制 尹 莉 | 责任校对 刁丽丽 | 责任印制 朱学忠 |

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
印 刷 高教社(天津)印务有限公司  
开 本 787mm × 1092mm 1/16  
印 张 21.5  
字 数 520 千字  
购书热线 010 - 58581118  
咨询电话 400 - 810 - 0598

|      |                                                                                                                                  |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 网 址  | <a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a><br><a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>           |
| 网上订购 | <a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a><br><a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a> |
| 版 次  | 2003 年 8 月第 1 版<br>2013 年 7 月第 2 版                                                                                               |
| 印 次  | 2013 年 7 月第 1 次印刷                                                                                                                |
| 定 价  | 33.60 元                                                                                                                          |

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物 料 号 37461 - 00



## 第2版前言

本书是根据工程造价、建筑工程管理、建筑工程技术和工程监理等专业的建筑结构课程的基本要求,并结合高职高专教学改革的实践经验,为适应高职高专教育的需要而编写的。

本书按照《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)、《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)、《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)等最新规范和《混凝土结构施工图平面整体表示方法制图规则和构造详图》(11G101—1、11G101—2、11G101—3)编写。全书简明扼要,深入浅出,概念清晰,通俗易懂,理论联系实际,通过各类结构构件的受力特点和构造要求的系统介绍,致力于结构施工图识读能力的培养。特别是“建筑结构施工图识读”一章,结合 11G101—1、11G101—2、11G101—3 图集和计算机出图的特点,系统地介绍了结构施工图的识读方法,实用性强。为了便于读者掌握重点内容,各章均附有学习目标、本章小结、思考题与习题。

本书由浙江建设职业技术学院丁天庭、四川建筑职业技术学院胡兴福主编。第2版修订分工为:四川建筑职业技术学院胡兴福第3、5、6章,浙江建设职业技术学院李启华第1、2、9章,浙江建设职业技术学院王伟第4、8、10章,深圳职业技术学院叶玲第7章。全书由胡兴福统稿。

本书由沈克仁高级工程师审阅。

由于时间仓促,编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2013年4月



## 第1版前言

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育),是根据工程造价、建筑经济管理等专业建筑结构课程的基本要求,并结合高职高专教学改革的实践经验,为适应高职高专教育的需要而编写的。

本书按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)、《砌体结构设计规范》(GB 50003—2001)、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)、《钢结构设计规范》(送审稿)、《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002)及其他相应新规范编写。在编写工程中,本书力求内容翔实,概念清晰,简明扼要,深入浅出,通俗易懂,注重理论联系实际。通过各类结构构件的受力特点和构造要求的系统介绍,致力于结构施工图识读能力的培养。在“建筑结构施工图识读”一章编写中,结合国家建筑标准设计图集《混凝土结构施工图平面整体表示方法制图规则和构造详图》(03G101—1)和计算机出图的特点,系统地介绍了结构施工图的识读方法,实用性强。为了便于读者掌握重点内容,各章均附有学习目标、小结、思考题与习题。

本书由丁天庭任主编,胡兴福任副主编。参加本书编写工作的有刘世美(第1、2章)、丁天庭(第4、8、10章)、李启华(第9章)、胡兴福(第5、6章)、杨娟(第3章)、叶玲(第7章)。

本书由沈克仁高级工程师审阅。在本书的编写过程中得到了浙江建设职业技术学院、四川建筑职业技术学院、黑龙江建筑职业技术学院、山东理工大学职业技术学院等单位的大力支持,并参考了一些公开出版和发表的文献,谨此一并致谢。

由于时间仓促,编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2002年3月

# 目 录

|                                  |     |                                                |     |
|----------------------------------|-----|------------------------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 建筑结构概论</b> .....        | 1   | <b>结构</b> .....                                | 109 |
| 学习目标 .....                       | 1   | 学习目标 .....                                     | 109 |
| 1.1 绪论 .....                     | 1   | 5.1 单层厂房结构的组成 .....                            | 109 |
| 1.2 建筑结构的荷载 .....                | 4   | 5.2 单层厂房的结构布置 .....                            | 111 |
| 1.3 建筑结构设计的方法 .....              | 5   | 5.3 排架结构的受力特点 .....                            | 113 |
| 1.4 建筑结构抗震设计综述 .....             | 10  | 5.4 单层厂房柱的主要构造要求 .....                         | 114 |
| 本章小结 .....                       | 14  | 5.5 单层厂房常用节点连接 .....                           | 117 |
| 思考题与习题 .....                     | 14  | 5.6 单层钢筋混凝土柱厂房的抗震<br>措施 .....                  | 120 |
| <b>第 2 章 钢筋与混凝土材料的力学性能</b> ..... | 16  | 本章小结 .....                                     | 124 |
| 学习目标 .....                       | 16  | 思考题与习题 .....                                   | 124 |
| 2.1 钢筋 .....                     | 16  | <b>第 6 章 钢筋混凝土多层及高层房屋<br/>        结构</b> ..... | 126 |
| 2.2 混凝土 .....                    | 19  | 学习目标 .....                                     | 126 |
| 2.3 钢筋与混凝土的共同工作 .....            | 22  | 6.1 钢筋混凝土多层及高层房屋<br>结构体系 .....                 | 126 |
| 本章小结 .....                       | 25  | 6.2 钢筋混凝土框架结构 .....                            | 130 |
| 思考题与习题 .....                     | 25  | 6.3 框架-剪力墙结构 .....                             | 139 |
| <b>第 3 章 混凝土结构基本构件</b> .....     | 26  | 6.4 多层和高层钢筋混凝土房屋的<br>抗震 .....                  | 141 |
| 学习目标 .....                       | 26  | 本章小结 .....                                     | 155 |
| 3.1 钢筋混凝土受弯构件 .....              | 26  | 思考题与习题 .....                                   | 156 |
| 3.2 钢筋混凝土受压构件 .....              | 53  | <b>第 7 章 地基与基础</b> .....                       | 158 |
| 3.3 钢筋混凝土受拉构件 .....              | 58  | 学习目标 .....                                     | 158 |
| 3.4 钢筋混凝土受扭构件 .....              | 59  | 7.1 土的物理性质和工程分类 .....                          | 159 |
| 3.5 预应力混凝土构件 .....               | 61  | 7.2 地基的变形与承载力 .....                            | 168 |
| 本章小结 .....                       | 65  | 7.3 浅基础 .....                                  | 171 |
| 思考题与习题 .....                     | 66  | 7.4 桩基础 .....                                  | 184 |
| <b>第 4 章 钢筋混凝土梁板结构</b> .....     | 67  | 本章小结 .....                                     | 189 |
| 学习目标 .....                       | 67  | 思考题与习题 .....                                   | 190 |
| 4.1 概述 .....                     | 67  | <b>第 8 章 砌体结构</b> .....                        | 191 |
| 4.2 现浇单向板肋形楼盖 .....              | 69  | 学习目标 .....                                     | 191 |
| 4.3 现浇双向板肋形楼盖 .....              | 82  | 8.1 砌体材料及力学性能 .....                            | 191 |
| 4.4 无梁楼盖 .....                   | 85  | 8.2 砌体结构房屋承重体系和静力<br>计算方案 .....                | 200 |
| 4.5 装配式铺板楼盖 .....                | 90  | 8.3 砌体结构房屋的受力特点与                               |     |
| 4.6 楼梯 .....                     | 96  |                                                |     |
| 4.7 悬挑构件 .....                   | 102 |                                                |     |
| 本章小结 .....                       | 106 |                                                |     |
| 思考题与习题 .....                     | 107 |                                                |     |
| <b>第 5 章 钢筋混凝土单层工业厂房</b>         |     |                                                |     |

|                                |     |                               |     |
|--------------------------------|-----|-------------------------------|-----|
| 构造要求 .....                     | 205 | 9.4 钢结构的连接 .....              | 255 |
| 8.4 配筋砖砌体构件 .....              | 221 | 9.5 梁与轴心受力构件 .....            | 267 |
| 8.5 墙梁、过梁和圈梁 .....             | 223 | 9.6 钢屋盖 .....                 | 271 |
| 8.6 多层砌体房屋和底部框架房屋的<br>抗震 ..... | 229 | 本章小结 .....                    | 279 |
| 本章小结 .....                     | 244 | 思考题与习题 .....                  | 280 |
| 思考题与习题 .....                   | 245 | <b>第 10 章 建筑结构施工图识读</b> ..... | 282 |
| <b>第 9 章 钢结构</b> .....         | 247 | 学习目标 .....                    | 282 |
| 学习目标 .....                     | 247 | 10.1 概述 .....                 | 282 |
| 9.1 钢材的主要力学性能 .....            | 247 | 10.2 结构制图规则 .....             | 284 |
| 9.2 各种因素对钢材主要性能的<br>影响 .....   | 249 | 10.3 建筑结构施工图识读 .....          | 320 |
| 9.3 钢材的种类、规格和标准 .....          | 251 | 本章小结 .....                    | 332 |
|                                |     | 思考题与习题 .....                  | 332 |
|                                |     | <b>参考文献</b> .....             | 334 |

### ■ 学习目标 ■

本章主要学习绪论、建筑结构荷载、建筑结构的设计方法、建筑结构抗震设计综述等内容。通过本章的学习,了解建筑结构的发展概况及其分类;了解概率极限状态设计方法及相关知识;熟悉建筑结构抗震的基本概念、结构的受力特点、抗震设计的基本要求,以及建筑场地、地基及基础的设计要求;掌握结构荷载的分类及荷载组合。

## 1.1 绪 论

### 1.1.1 建筑结构发展概况

在19世纪中叶之前,建筑结构主要以木结构、砖石结构为主,由于早期建筑材料强度低,导致建筑物自重过大,影响建筑物功能的充分发挥。从19世纪50年代开始,钢筋混凝土结构首先在英、法两国得到应用。在钢筋混凝土结构发展的初期阶段,所采用的混凝土强度和钢筋强度都较低,主要用于建造板、梁、柱和拱等简单构件。二次世界大战以后,钢筋混凝土结构有了较大的发展,混凝土强度和钢筋强度不断提高。目前,常用的混凝土强度为 $20 \sim 40 \text{ N/mm}^2$ ,根据工程需要,还可制成强度达 $80 \sim 100 \text{ N/mm}^2$ 的混凝土。

在建筑结构计算理论方面,由原来的简单近似计算到以统计数学为基础的结构可靠度理论已逐步进入工程实用阶段,使极限状态设计方法向着更加完善、更加科学的方向发展。经过不断充实提高,一个新的分支学科——“近代钢筋混凝土力学”正在逐步形成,将计算机、有限元理论和现代测试技术应用到钢筋混凝土理论和试验研究中,建筑结构的计算理论和设计方法必将日趋完善,并向着更高的阶段发展。

建筑结构的施工工艺近年也有了很大发展,建筑结构的定型化、标准化大大加快了建筑结构工业化进程,建筑结构中预应力混凝土结构的应用也日益广泛。在工业与民用建筑中,预应力混凝土构件(如吊车梁、空心板等)的应用较广泛,预应力混凝土楼盖和预应力混凝土框架结构也有较快发展。如北京体育学院田径房采用了跨度为 $46.7 \text{ m}$ 的钢筋混凝土落地拱,北京民航机库采用了跨度达 $60 \text{ m}$ 的块体拼装式预应力混凝土拱形屋盖,广州体育馆采用了跨度为 $49.8 \text{ m}$ 的现浇钢筋混凝土双铰门式刚架,广东63层国际大厦采用筒中筒结构和无黏结部分预应力混凝土平板楼盖等,减少了自重,节约了材料,加快了施工速度。在高层建筑中,大模板滑模等施工方法也已得到广泛推广和应用。

按照《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)规定的基本原则,在总结工程建设

的实践经验以及科学研究成果的基础上,我国编制了用于多种不同材料的一系列结构设计规范,把我国的建筑结构设计提高到一个新的水平,对建筑结构的的发展起着重大的影响。

### 1.1.2 建筑结构的分类及其应用

所谓建筑结构,就是由梁、板、墙(或柱)、基础等基本构件构成建筑物的承重骨架体系。由于各种建筑物在使用功能、建筑形状、建筑用途等方面各不相同,建筑结构有各种不同的类型。建筑结构可按所用的材料和承重结构类型来分类。

#### 1. 按材料的不同分类

##### (1) 钢筋混凝土结构

钢筋混凝土结构是建筑结构中应用最为广泛的结构形式。钢筋混凝土作为一种钢筋与混凝土的复合材料结构,具有其他材料无法比拟的特点。其特点是:强度高、整体性好、耐久性与耐火性好、承载力较高、结构的刚度大、抗震性能高、具有良好的可模性等。但钢筋混凝土材料自重重大、抗裂性差、施工时费工费料。

##### (2) 砌体结构

砌体结构是由块材和砂浆砌筑而成的墙、柱作为建筑物主要受力构件的结构,是目前建筑结构形式中的另一主要类型,是以受压为主的结构构件,如工业与民用建筑工程中的墙体、基础、烟囱、小型水池、地沟等常采用砌体承重。砌体结构特点是:便于就地取材、成本低廉、耐久性较好。特别是砌体结构中各种砌块砌体不断发展,可节约土地,向绿色建筑、环保建筑方向发展。但其砌筑劳动强度较大、结构自重重大、构件强度较低。广泛用于多层民用建筑。

##### (3) 钢结构

钢结构是采用型钢、钢板加工制造而成的工程结构。是继钢筋混凝土结构之后具有广阔发展前景的建筑结构形式,大量适用于工业建筑及高层建筑结构中。钢结构强度高、可靠性好、易施工,但钢结构中的钢材易腐蚀、耐火性差、成本较高。

##### (4) 木结构

木结构建筑受木材生长周期长及砍伐木材对环境带来水土流失等不利因素的影响,目前很少作为建筑结构材料。本书对木结构将不再叙述。

#### 2. 按承重结构类型的不同分类

##### (1) 砖混结构

由砌体和钢筋混凝土材料共同承受外加荷载的结构。通常,房屋的楼(屋)盖由钢筋混凝土的梁、板组成,墙体由砌体材料作为承重构件。由于砌体材料强度较低,且墙体容易开裂、整体性较差,故砖混结构的房屋主要用于层数不多的民用建筑,如住宅、宿舍、办公楼、旅馆等建筑。

##### (2) 框架结构

由梁、柱以刚接(或铰接)相连接而构成承重体系的结构。我国框架结构多采用钢筋混凝土来建造,框架结构能保证建筑平面的灵活布置,可适用于多种用途,框架结构比砖混结构强度高,具有较好的延性和整体性,因此其抗震性能较好。但框架结构属柔性结构,其侧向刚度较小,框架结构的合理建造高度一般为30 m左右,即层高为3 m左右时不宜超过10层。

##### (3) 框架-剪力墙结构

在框架结构内纵横方向适当位置的柱与柱之间布置厚度不小于 140 mm 厚的钢筋混凝土墙体而形成的结构体系。这种体系结合了框架和剪力墙两个体系各自的优点,属中等刚性结构,因而广泛使用于 20 层左右的工业与民用建筑。

#### (4) 排架结构

通常指由柱子和屋架(或屋面梁)组成,且柱与屋架铰接与基础固接的结构。多为混凝土结构,也可以采用钢结构,单层排架结构跨度一般为 12 ~ 36 m,可以是单跨和多跨,广泛用于各种单层工业厂房建筑。

#### (5) 剪力墙结构

是将房屋的内、外墙都做成实体的钢筋混凝土结构,墙体承受全部水平和竖向荷载。剪力墙的刚度很大,可建造比较高的建筑物,一般 15 ~ 50 层的住宅和旅馆等小开间的高层建筑多采用剪力墙结构。

#### (6) 筒体结构

是由单个或多个筒体所组成的空间结构体系。一般可由剪力墙围成的空间薄壁筒体成为竖向悬臂箱形梁,或由加密柱和刚度较大的裙梁形成框架筒。筒体结构的抗侧刚度和承载能力在所有结构体系中是最大的,根据筒体的不同组成方式,筒体结构可分为框架-筒体、筒中筒和多筒结构三种类型。

框架-筒体结构,又称为单筒结构,它兼有框架结构和筒体结构两者的优点,其建筑平面布置比较灵活,有很好的抵抗水平荷载能力。

筒中筒结构,又称为双筒结构。其内筒为实腹筒,外筒为框架筒,内外筒之间用刚性楼盖联结。内、外筒直接承受楼盖传来的竖向荷载,同时又共同抵抗水平荷载。筒中筒结构有较大的使用空间,平面布置灵活,结构布置也较合理,其空间性能更好,刚度更大,因此,适宜于建造较高的高层建筑。

多筒结构是由多个单筒组合而成的多束筒结构,其抗侧刚度比筒中筒结构更大,可以建造更高的高层建筑。

### 1.1.3 本课程的基本要求

建筑结构是一门综合性较强的专业课程,它与其他课程之间有着密切的关系并有其自身的课程特点。本课程内容主要由钢筋混凝土结构、砌体结构、钢结构、地基与基础及建筑结构施工图识读五部分组成;本课程作为工程造价及建筑经济管理及相关专业的一门基础课程,主要介绍钢筋混凝土结构、砌体结构、钢结构的基本知识与一般构造要求;突出培养学生结构施工图识读的能力;重点介绍各类结构及构件的构造要求,结合《混凝土结构施工图平面整体表示方法制图规则和构造详图》(11G101),介绍结构施工图的识读方法与技巧。

通过本课程的学习,要求了解各种结构的材料强度指标及选择原则,建筑结构的基本概念和基本知识,了解结构的布置原则,理解各类结构的受力特点,熟悉结构的构造要求和施工图表达方法,掌握各种施工图的识读方法和技巧,能正确识读结构施工图。为正确计算结构工程量、正确进行建筑设备的布置与施工安装打下基础。本课程在学习时应注意以下几点:

① 在本课程学习的同时,要熟悉和重视国家最新颁布的建筑结构设计规范,对现行各种规范的条款要领会、熟悉并学会应用。

② 本课程涉及的众多构造要求是非常重要的,要充分重视对构造要求的学习,并加深理解其中的道理。

③ 本课程是一门实践性很强的课程,实践性环节在其中起着十分重要的作用。在理论学习的过程中,要注重联系实际,多到施工现场及预制构件厂去实习、观摩、参观,多动手、勤思考、重理解、会分析。结合施工图的识读,积累实践经验。

## 1.2 建筑结构荷载

### 1.2.1 荷载分类

使结构产生内力或变形的原因称为“作用”,分直接作用和间接作用两种。施加在结构上的集中力或分布力系称为直接作用,习惯上称为荷载。混凝土收缩、温度变化、基础不均匀沉降、地震等引起结构外加变形或约束变形的原因称为间接作用。荷载是工程上常见的作用,由它产生的作用效应称为荷载效应。《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)(以下简称为《荷载规范》)将结构上的荷载按作用时间的长短和性质分为下列三类:

#### 1. 永久荷载

在结构使用期间,其值不随时间变化,或者其变化与平均值相比可忽略不计的荷载,如结构自重、土压力、预应力等,永久荷载也称为恒载。

#### 2. 可变荷载

在结构使用期间,其值随时间变化,且其变化值与平均值相比不可忽略不计的荷载,如楼面活荷载、屋面活荷载和积灰荷载、风荷载、雪荷载及工业厂房中的吊车荷载等,可变荷载也称为活载。

#### 3. 偶然荷载

在结构使用期间不一定出现,一旦出现,其量值很大且持续时间很短的荷载。如爆炸、撞击、火灾及其偶然出现的灾害引起的荷载。

### 1.2.2 荷载的代表值

结构设计时,根据各种极限状态的设计要求所采用的不同的荷载数值称为荷载代表值。对于永久荷载以标准值作为代表值;对可变荷载根据不同的设计要求采用不同的代表值,如标准值、组合值、频遇值、准永久值。

#### 1. 荷载标准值

所谓荷载标准值,应根据结构在设计基准期(50年)内,正常情况下可能出现的最大荷载概率分布并满足一定保证率来确定。它是结构设计时采用的荷载基本代表值。而其他的代表值都可由标准值乘以相应的系数后得出。现行的《荷载规范》增加了可变荷载应考虑设计年限的调整系数后的规定。

##### (1) 永久荷载标准值

对结构构件的自重,可按结构构件的设计尺寸与材料单位体积的自重计算确定。《荷载规范》附录A给出了常用材料和构件的自重,设计时可直接查用。

## (2) 可变荷载标准值

《荷载规范》中已给出,设计时可直接查用。

## 2. 可变荷载准永久值

在进行结构构件的变形和裂缝验算时,需要考虑荷载长期作用对构件刚度和裂缝的影响,此时,可变荷载只能取其在设计基准期内经常作用在结构上的那部分荷载作为其代表值,它对结构的影响类似于永久荷载。

## 3. 可变荷载组合值

当结构承受两种或两种以上可变荷载时,由于所有可变荷载同时达到各自最大值的可能性极小,因此除主导的可变荷载外,其他伴随的可变荷载均应乘以一个小于1的组合系数作为可变荷载的组合值。

## 4. 可变荷载的频遇值

可变荷载的频遇值是正常使用极限状态按频遇组合设计时采用的一种可变荷载组合值。它是在统计基础上确定的。在设计基准期内被超越的总时间仅为设计基准期的一小部分,或其超越频率限于某一给定值。

# 1.2.3 荷载的组合

荷载组合即永久荷载与可变荷载的共同作用,有时同时作用几种可变荷载,建筑结构设计应根据使用过程中在结构上可能同时出现的荷载,按承载能力极限状态和正常使用极限状态分别进行荷载(效应)组合,并应取各自的最不利的效应组合进行设计。

对于承载能力极限状态,应按荷载效应的基本组合;对于正常使用极限状态,应根据不同的设计要求,采用荷载的标准组合、频遇组合或准永久组合。

对于需要进行地震作用计算的建筑结构设计时,除上述荷载(效应)组合外,尚应考虑地震作用效应与其他荷载效应的基本组合用于承载能力极限状态计算以及标准组合用于侧移的计算,具体按《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(以下简称《抗震规范》)规定执行。

# 1.3 建筑结构设计方法

## 1.3.1 结构的功能要求

结构在规定的设计使用年限内应满足下列功能要求:即安全性、适用性和耐久性。

### 1. 安全性

即结构在正常施工和正常使用的条件下,能承受可能出现的各种荷载和变形,以及在偶然事件(如强烈地震、爆炸、车辆撞击等)发生时和发生后,保持必需的整体稳定性的能力。

### 2. 适用性

即结构在正常使用条件下,具有良好的工作性能,不发生影响使用的过大变形或振幅,不发生过宽的裂缝等。

### 3. 耐久性

所谓足够的耐久性能,就是指在正常使用和维护条件下结构能完好地使用到规定的设计使

用年限。

### 1.3.2 建筑结构的极限状态

所谓结构的极限状态就是结构或构件满足结构安全性、适用性、耐久性三项功能中某一功能要求的临界状态。超过这一界限,结构或其构件就不能满足设计规定的该功能要求,而进入失效状态。极限状态是区分结构工作状态的可靠或失效的标志。极限状态可分为两类:承载能力极限状态和正常使用极限状态。

#### 1. 承载能力极限状态

承载能力极限状态是指对应于结构或结构构件达到最大的承载能力或不适于继续承载的变形。当结构或结构构件出现下列状态之一时,应认为超过了承载能力极限状态:

- ① 整个结构或结构的一部分,作为刚体失去平衡(如倾覆等)。
- ② 结构构件或连接因为超过材料强度而破坏,或因过度变形而不适于继续承载。
- ③ 结构转变为机动体系。
- ④ 结构或结构构件丧失稳定性(如压屈等)。
- ⑤ 地基丧失承载能力而破坏(如失稳等)。
- ⑥ 结构因局部破坏而连续倒塌。
- ⑦ 结构或结构构件的疲劳破坏。

超越这一极限状态将造成结构全部或部分破坏或倒塌,会导致人员伤亡或严重经济损失。因此对所有结构和构件都必须按承载能力极限状态进行计算,并保证具有足够的可靠度。

#### 2. 正常使用极限状态

正常使用极限状态是指对应于结构或结构构件达到正常使用或耐久性能的某项规定的限值。当结构或结构构件出现下列状态之一时,应认为超过了正常使用极限状态:

- ① 影响正常使用或外观的变形。
- ② 影响正常使用或耐久性能的局部损坏。
- ③ 影响正常使用的振动。
- ④ 影响正常使用的其他特定状态。

按正常使用极限状态设计时,应验算结构构件的变形、抗裂度或裂缝宽度、地基变形、房屋侧移等。超过正常使用极限状态,会使结构或构件不能正常工作,使结构的耐久性受影响。

### 1.3.3 极限状态方程

#### 1. 结构抗力 $R$ 及作用效应 $S$

结构抗力是指结构或构件承受作用效应的能力。如结构构件的承载力、刚度和抗裂度等。当一个构件制作完成后,它抵抗外界的能力(即抗力  $R$ )是一定的,而引起构件上的作用效应是随施加作用的变化而变化的。

结构抗力  $R$  是结构内部固有的,结构抗力  $R$  的大小主要取决于材料的力学性能、构件几何参数及计算模式的精确性。

作用效应  $S$  是指作用引起的结构或结构构件的内力、变形和裂缝等。由荷载引起的作用效应称为荷载效应。

## 2. 极限状态方程

结构可靠度通常受到荷载、材料强度、截面几何参数等因素的影响,而这些因素一般都具有随机性,称为“随机变量” $X_i(i=1,2,\cdots,n)$ 。

结构和构件按极限状态进行设计,因此,针对所需要的各种结构功能(如安全性、适用性和耐久性),通常可以建立包括各有关随机变量在内的关系式:

$$Z = g(X_1, X_2, \cdots, X_n) = 0 \quad (1.1)$$

结构的极限状态可用极限状态方程来表示。

当只有作用效应  $S$  和结构抗力  $R$  两个基本变量时,可令

$$Z = g(S, R) = R - S \quad (1.2)$$

显然,当  $Z > 0$  时,则  $R > S$ ,结构处于可靠状态;

当  $Z = 0$  时,则  $R = S$ ,结构处于极限状态;

当  $Z < 0$  时,则  $R < S$ ,结构处于失效状态。

因此,式(1.1)称为极限状态方程。

当结构按极限状态设计时,应符合下列要求:

$$Z = g(S, R) = R - S \geq 0 \quad (1.3)$$

### 1.3.4 结构的可靠度和失效概率

结构和结构构件在规定的时间内、规定的条件下完成预定功能的概率,称为结构的可靠度。结构的作用效应小于结构抗力时,结构处于可靠工作状态。反之,结构处于失效状态。

由于作用效应和结构抗力都是随机的,因而结构不满足或满足其功能要求的事件也是随机的。一般把不满足功能要求的概率称为结构的失效概率,记为  $P_f$ ;把满足其功能要求的概率称为可靠概率,记为  $P_s$ 。

结构的可靠概率也称结构可靠度,结构的可靠度是结构可靠性的概率度量。由于可靠概率和失效概率是互补的,即  $P_f + P_s = 1$ 。因此,结构的可靠性也可用结构的失效概率来度量。

### 1.3.5 结构的可靠指标和目标可靠指标

可靠指标  $\beta$  也是度量结构可靠性的一种数值指标,它与失效概率  $P_f$  之间具有对应的关系。

可靠指标的物理含义是:  $\beta = \mu_Z / \sigma_Z$ ,与  $P_f$  的关系说明如下。

已知  $Z = R - S$ ,设  $\mu_Z, \mu_R, \mu_S$  分别是  $Z, R, S$  随机变量的平均值,  $\sigma_Z, \sigma_R, \sigma_S$  分别是  $Z, R, S$  随机变量的标准差(又称均方差)。而  $R, S$  是相互独立的随机变量,且又符合正态分布规律,因此

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S \quad (1.4)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (1.5)$$

设  $\beta = \mu_Z / \sigma_Z$ ,则

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (1.6)$$

将可靠指标  $\beta$  与失效概率  $P_f$  的对应关系列于表 1.1 中。

表 1.1 可靠指标与失效概率的对应关系

| $\beta$ | $P_f$                 | $\beta$ | $P_f$                 |
|---------|-----------------------|---------|-----------------------|
| 1.0     | $1.59 \times 10^{-1}$ | 3.2     | $6.87 \times 10^{-4}$ |
| 2.0     | $2.28 \times 10^{-2}$ | 3.7     | $1.08 \times 10^{-4}$ |
| 2.7     | $3.47 \times 10^{-3}$ | 4.2     | $1.33 \times 10^{-5}$ |

可见,  $\beta$  值与  $P_f$  成反比,  $\beta$  值越大,  $P_f$  就越小, 即结构越可靠。因此,  $\beta$  被称为“可靠指标”。

在正常条件下, 失效概率  $P_f$  总是存在的,  $P_f$  不可能为 0, 也没有必要为 0, 只要结构的失效概率  $P_f$  控制在人们能够接受的允许范围内即可。

所谓目标可靠指标就是指结构构件设计时预先给定的可靠指标, 见表 1.2, 用  $[\beta]$  表示。规范规定:  $\beta \geq [\beta]$ 。

$[\beta]$  值的确定主要取决于构件的破坏形式和安全等级。目标可靠指标与建筑物的重要性有关。《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008) 将建筑结构分为三个安全等级。

表 1.2 不同安全等级的目标可靠指标  $[\beta]$ 

| 破坏类型 | 安全等级 |     |     |
|------|------|-----|-----|
|      | 一级   | 二级  | 三级  |
| 延性破坏 | 3.7  | 3.2 | 2.7 |
| 脆性破坏 | 4.2  | 3.7 | 3.2 |

### 1.3.6 极限状态设计表达式

#### 1. 承载能力极限状态设计表达式

(1) 对于承载能力极限状态, 结构构件应按荷载效应的基本组合或偶然组合, 采用下列极限状态设计表达式:

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (1.7)$$

式中  $\gamma_0$ ——结构重要性系数; 对于安全等级为一级或设计使用年限为 100 年及以上的结构构件, 不应小于 1.1; 对于安全等级为二级或设计使用年限为 50 年的结构构件, 不应小于 1.0; 对于安全等级为三级或设计使用年限为 5 年及以下的结构构件, 不应小于 0.9; 在抗震设计中, 不考虑结构构件的重要性系数;

$S_d$ ——承载能力极限状态的荷载效应组合的设计值;

$R_d$ ——结构构件的承载力设计值; 在抗震设计中, 应除以承载力抗震调整系数  $\gamma_{RE}$ 。

公式(1.7)中的  $\gamma_0 S$  通常指各种内力设计值。

(2) 对于基本组合, 荷载效应组合的设计值应从下列组合值中取最不利值确定。

① 由可变荷载效应控制的组合, 即

$$S_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} S_{Gik} + \gamma_{Q1} \gamma_{Li} S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \gamma_{Li} \psi_{ci} S_{Qik} \quad (1.8)$$

式中  $\gamma_{Gi}$  ——永久荷载分项系数;当其效应对结构不利时:对由可变荷载效应控制的组合,应取 1.2;对由永久荷载效应控制的组合,应取 1.35;当其效应对结构有利时:一般情况下取 1.0,对结构的倾覆、滑移或漂浮验算,应取 0.9;

$\gamma_{Q1}$ 、 $\gamma_{Qi}$  ——第 1 个和第  $i$  个可变荷载分项系数,一般情况下应取 1.4;对标准值大于  $4 \text{ kN/m}^2$  的工业房屋楼面结构的活荷载应取 1.3;

$S_{Gik}$  ——按永久荷载标准值  $G_k$  计算的荷载效应值;

$S_{Qik}$  ——按可变荷载标准值  $Q_{ik}$  计算的荷载效应值,其中  $S_{Q1k}$  为诸可变荷载效应中起控制作用者;

$\gamma_{Li}$  ——第  $i$  个可变荷载考虑使用年限的调整系数,设计使用年限为 5 年、50 年、100 年时分别为 0.9、1.0、1.1,设计使用年限为其他数值时可按线性内插值确定;

$\psi_{ci}$  ——可变荷载  $Q_i$  的组合值系数,应分别按规定采用;

$n$  ——参与组合的可变荷载数;

$m$  ——参与组合的永久荷载数。

② 由永久荷载效应控制的组合,即

$$S_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} S_{Gik} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \gamma_{Li} \psi_{ci} S_{Qik} \quad (1.9)$$

需要说明的是:基本组合中的设计值仅适用于荷载与荷载效应为线形的情况;当对  $S_{Q1k}$  无法明显判断时,依次以各可变荷载效应为  $S_{Q1k}$ ,选其中最不利的荷载效应组合;当考虑以竖向的永久荷载效应控制的组合时,参与组合的可变荷载仅限于竖向荷载。

## 2. 正常使用极限状态设计表达式

对于正常使用极限状态,应根据不同的设计目的,分别按荷载效应的标准组合、频遇组合和准永久组合进行设计,使变形、裂缝等荷载效应的设计值符合下列的要求:

$$S_d \leq C \quad (1.10)$$

式中  $C$  ——设计对变形、裂缝等规定的相应限值;

$S_d$  ——变形、裂缝等荷载效应组合的设计值。

变形、裂缝等荷载效应的设计值  $S_d$  应符合下列规定:

(1) 标准组合

$$S_d = S_{Gik} + S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} S_{Qik} \quad (1.11)$$

(2) 频遇组合

$$S_d = S_{Gik} + \psi_{f1} S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{qi} S_{Qik} \quad (1.12)$$

(3) 准永久组合

$$S_d = S_{Gik} + \sum_{i=1}^n \psi_{qi} S_{Qik} \quad (1.13)$$

式中  $\psi_{f1} S_{Q1k}$  ——在频遇组合中起控制作用的一个可变荷载频遇值效应;

$\psi_{qi} S_{Qik}$  ——第  $i$  个可变荷载准永久值效应。

## 1.4 建筑结构抗震设计综述

### 1.4.1 基本概念

地震俗称地动,是一种具有突发性的自然现象。在建筑抗震设计中,所指的地震是由于地壳构造运动(岩层构造状态的变动)使岩层发生断裂、错动而引起的地面振动,这种地面振动称为构造地震,简称地震。

地壳深处发生岩层断裂、错动的地方称为震源。震源至地面的距离称为震源深度。一般把震源深度小于 60 km 的地震称为浅源地震;60 ~ 300 km 称为中源地震;大于 300 km 成为深源地震。中国发生的绝大部分地震均属于浅源地震。

震源正上方的地面称为震中。地震引起的振动以波的形式从震源向四周传播,这种波就称为地震波。地震波按其在地壳传播的位置不同,分为内部传播(纵、横波)和表面传播。

地震的震级是衡量一次地震大小的等级,用符号  $M$  表示。地震的震级  $M$ ,一般称为里氏震级。一般说来, $M < 2$  的地震,人们感觉不到,称为微震; $M = 2 \sim 4$  的地震称为有感地震; $M > 5$  的地震,对建筑物就要引起不同程度的破坏,统称为破坏性地震; $M > 7$  的地震称为强烈地震或大地震; $M > 8$  的地震称为特大地震。

地震烈度是指地震时在一定地点震动的强烈程度。相对震源而言,地震烈度也可以把它理解为地震场的强度。抗震设防烈度是指按国家规定的权限批准作为一个地区抗震设防依据的地震烈度。

### 1.4.2 建筑抗震设防分类和设防标准

所谓建筑抗震设防是对建筑物进行抗震设计,包括地震作用、抗震承载力计算和采取抗震措施,以达到抗震的效果。

从抗震防灾的角度,根据建筑物使用功能的重要性,按其受地震破坏时产生的后果严重程度,建筑抗震设防分类按行业和建筑功能进行,国家标准《抗震规范》将建筑物分为甲、乙、丙、丁四类,见表1.3。

表 1.3 建筑抗震设防分类

|                  |    |                                      |
|------------------|----|--------------------------------------|
| 设<br>防<br>分<br>类 | 甲类 | 重大建筑工程和地震时可能发生严重次生灾害的建筑              |
|                  | 乙类 | 地震时使用功能不能中断需尽快恢复的建筑                  |
|                  | 丙类 | 除甲、乙、丁类以外的一般建筑                       |
|                  | 丁类 | 抗震次要建筑                               |
| 地<br>震<br>作<br>用 | 甲类 | 地震作用应高于本地区抗震设防的要求,其值应按批准的地震安全性评价结果确定 |
|                  | 乙类 | 应符合本地区抗震设防烈度要求                       |
|                  | 丙类 | 应符合本地区抗震设防烈度要求                       |
|                  | 丁类 | 一般情况下,仍应符合本地区抗震设防烈度的要求               |