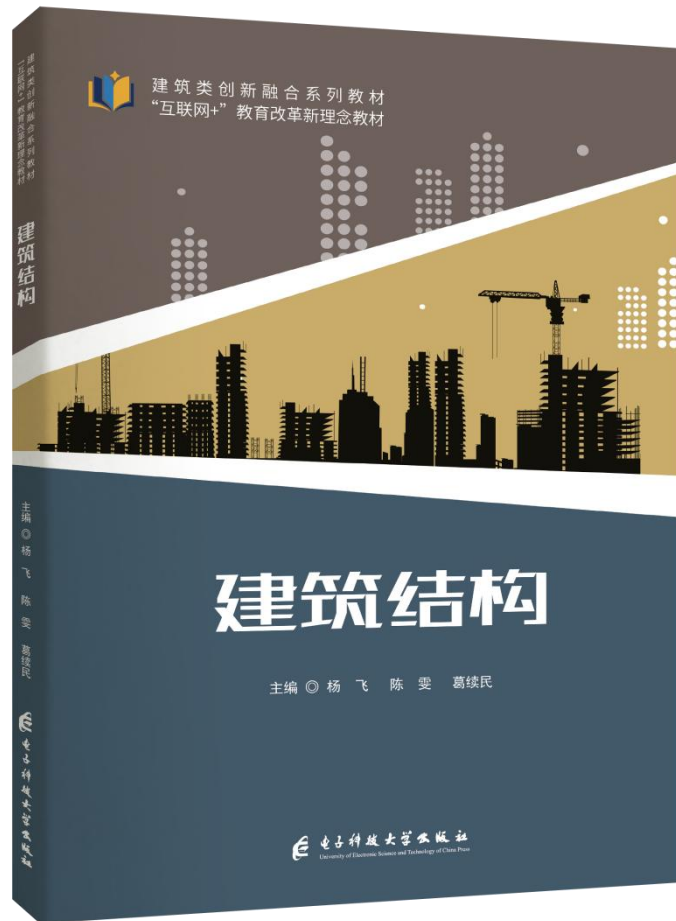


建筑结构



类目：建筑类

书名：建筑结构

主编：杨飞 陈雯 葛续民

出版社：电子科技大学出版社

开本：大16开

书号：978-7-5770-0079-4

使用层次：通用

出版时间：2026年1月

定价：65.00元

印刷方式：双色

是否有资源：是

策划编辑：万晓桐
责任编辑：唐祖琴
封面设计：唐语书装

“互联网+”教育改革创新理念教材
建筑类创新融合系列教材



建筑类创新融合系列教材
“互联网+”教育改革创新理念教材

建筑结构

建筑结构



建筑结构

主编 © 杨 飞 陈 雯 葛续民

主编 © 杨 飞 陈 雯 葛续民

电子科技大学出版社



电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press



建筑类创新融合系列教材
“互联网+”教育改革创新理念教材



建筑结构

主 编 ◎ 杨 飞 陈 雯 葛续民

副主编 ◎ 杨 益 王雨楠 许金钊

何 萍 贾晨曦 杜 娟

卢赫晋 裴 玲 李 超

何程熙 周 敏



电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press

· 成都 ·

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构 / 杨飞, 陈雯, 葛续民主编. — 成都 :
电子科技大学出版社, 2026. 1
ISBN 978-7-5770-0079-4

I. ①建… II. ①杨… ②陈… ③葛… III. ①建筑结
构—高等职业教育—教材 IV. ①TU3

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 019281 号

建筑 结 构

JIANZHU JIEGOU

杨 飞 陈 雯 葛续民 主编

策划编辑 万晓桐
责任编辑 唐祖琴
责任校对 龙 敏
责任印制 梁 硕

出版发行 电子科技大学出版社
成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 三河市祥达印刷包装有限公司

成品尺寸 210 mm×285 mm

印 张 18.5

字 数 470 千字

版 次 2026 年 1 月第 1 版

印 次 2026 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5770-0079-4

定 价 65.00 元

版权所有 侵权必究



Preface 前言

在我国城市化进程背景下，建筑结构作为建筑工程的关键核心，其重要性愈发凸显。它不仅关乎建筑物的安全稳定与耐用性，而且对建筑的空间利用、功能实现以及经济成本起着决定性作用。随着建筑技术的飞速发展、新型材料的不断涌现以及建筑结构形式的日益创新，社会对建筑结构相关专业人才的知识储备、实践能力和创新思维提出了更为严格的要求。

为了适应院校土木工程、工程管理等相关专业的教学需求，紧密贴合建筑行业的发展趋势，我们精心组织编写了这本《建筑结构》。本书以国家现行的建筑结构设计规范、标准和相关技术规程为依据，充分吸纳了国内外建筑结构领域的最新研究成果与工程实践经验，致力于为读者呈现一个系统、全面且实用的建筑结构知识体系。

在内容编排上，我们遵循由浅入深、循序渐进的原则，注重知识的逻辑性和连贯性。本书以建筑结构的基本概念为起点，全面系统地阐述了建筑结构设计的基本原理、各类结构材料的力学性能、不同结构类型的设计方法以及抗震设计等重要内容。

本书具有以下显著特点。

(1) 内容系统完整，兼顾基础和前沿：本书涵盖了建筑结构领域的主要内容，从基本概念、设计原理到各类结构的设计计算和构造要求，形成了一个完整的知识体系，满足相关专业教学和工程实践的需求。

(2) 理论联系实际，强化技能培养：本书通过大量的实际工程案例和例题，将理论知识与工程实践紧密结合，帮助读者更好地理解和掌握所学知识，提高其解决实际问题的能力。

(3) 结合行业标准，突出岗位适配：本书紧密结合国家现行的建筑结构设计标准、规范和规程，注重培养读者的工程应用能力和规范意识，使读者能够直接将所学知识应用到实际工程中。

(4) 定位行业特色，注重认知引导：本书文字表述简洁明了，图表丰富直观，便于读者阅读和理解。

本书不仅可作为高等院校建筑工程、土木工程等相关专业的教材，也可供建筑工程领域的技术人员、管理人员参考使用。

由于编者水平有限，书中难免存在遗漏和不足之处，恳请广大读者和同行专家批评指正。

编者

Contents

目录

项目一 概述	1
任务一 建筑结构的的基本概念	2
任务二 建筑结构的的基本结构构件、结构单元和结构体系	6
任务三 建筑结构的的概念设计	17
任务四 建筑结构和工程管理的的关系	19
思考练习	24
项目二 建筑结构设计的基本原理	25
任务一 建筑结构的失效和结构的三类极限状态	26
任务二 极限状态设计法	32
任务三 实用设计表达式	34
思考练习	37
项目三 钢筋混凝土结构材料的力学性能	38
任务一 混凝土	39
任务二 钢筋	44
任务三 钢筋与混凝土的相互作用	49
思考练习	53
项目四 混凝土结构设计原理	54
任务一 概述	55
任务二 钢筋混凝土受弯构件	67
任务三 钢筋混凝土受压构件	96
任务四 钢筋混凝土其他构件	108
任务五 钢筋混凝土正常使用状态验算	111

任务六 钢筋混凝土平面楼盖	118
任务七 预应力混凝土结构基础	132
思考练习	134
项目五 建筑结构抗震设计基本知识	135
任务一 概述	136
任务二 建筑抗震设防	143
思考练习	148
项目六 钢筋混凝土框架结构	149
任务一 概述	150
任务二 框架结构的内力及侧移的近似计算方法	153
思考练习	159
项目七 钢筋混凝土剪力墙结构	160
任务一 概述	161
任务二 剪力墙结构设计	165
任务三 剪力墙结构的构造要求	168
思考练习	182
项目八 砌体结构	183
任务一 砌体结构的概述及发展历史	184
任务二 砌体材料	186
任务三 砌体结构的类型	189
任务四 无筋砌体受压构件的承载力计算	190
任务五 无筋砌体的局部受压验算	196
任务六 墙、柱高厚比验算	199
任务七 构造柱与圈梁的设置	202
思考练习	206
项目九 钢结构	207
任务一 概述	208
任务二 钢结构的连接	213
任务三 轴心受力构件	230
任务四 受弯构件	243

任务五 拉弯和压弯构件	250
任务六 钢构件间的连接	254
思考练习	257
参考文献	258
附录	259
附录一 钢筋混凝土的主要性能参数表	260
附录二 建筑结构的刚度	272
附录三 平法施工图制图规则	279

建筑
结构

项目一

概述

任务一 建筑结构的 basic 概念

一、建筑结构的 basic 任务

建筑物通常由楼板、屋顶、墙体或柱、基础、楼(电)梯、门窗等几部分组成。其中，梁、板、柱、墙、基础为建筑物的基本结构构件，它们组成了建筑物的基本结构(图 1-1、图 1-2)。

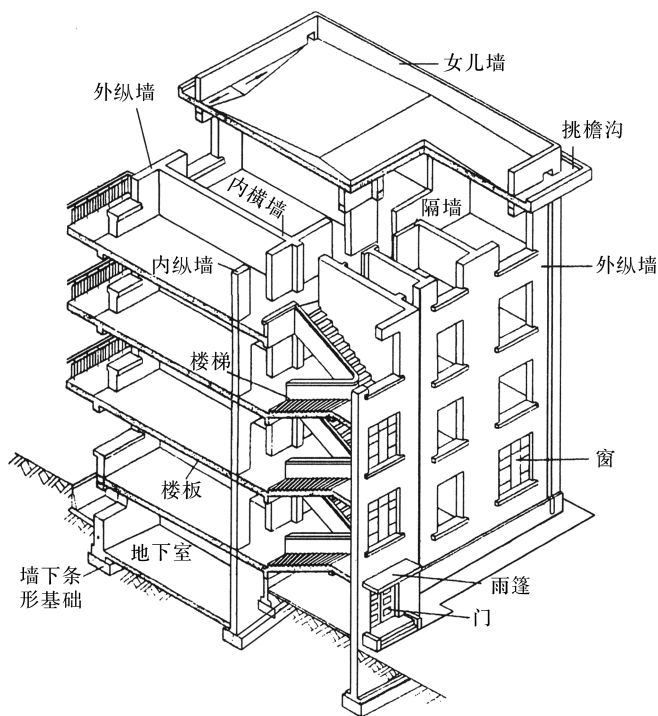


图 1-1 砌体结构的结构构件

1. 建筑结构的任务

在建筑物中，建筑结构的任务主要有如下三个方面。

(1) 服务于人类对空间的应用和美观需求

建筑物是人类社会生活必要的物质条件，是社会生活的人为的物质环境，结构成为一个空间的组织者，如各类房间、门厅、楼梯、过道等。同时，建筑物也是历史、文化、艺术的产物，建筑物不仅要反映人类的物质需要，还要表现人类的精神需求，而各类建筑物都要用结构来实现。可见，建筑结构服务于人类对空间的应用和美观要求是其存在的根本目的。

(2) 抵御自然界或人为施加于建筑物的各种作用

建筑物要承受自然界或人为施加的各种作用(如荷载、地震作用等)，建筑结构就是这些作用的支承者，它要确保建筑物在这些作用施加下不破坏、不倒塌，并且要使建筑物持久地

保持良好的使用状态。可见，建筑结构作为支承者，是其存在的根本原因，也是其最核心的任务。

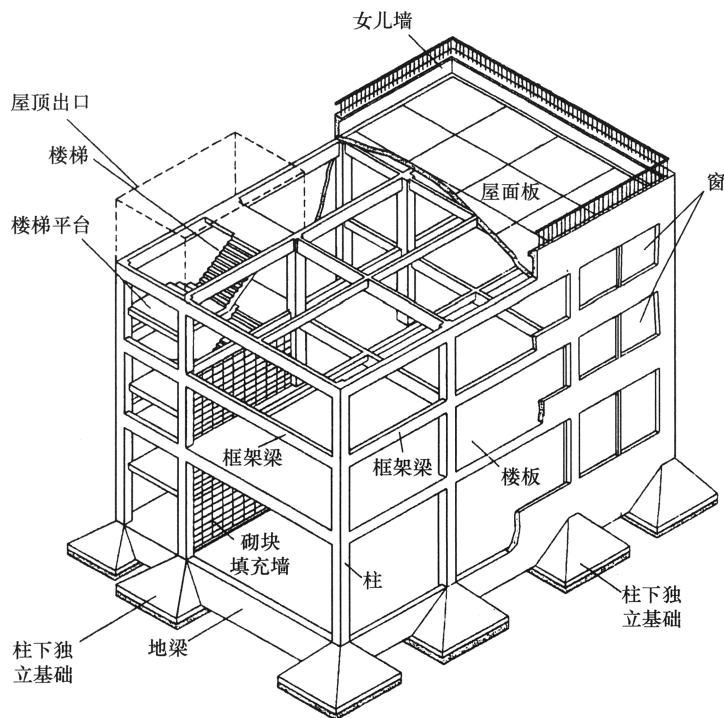


图 1-2 钢筋混凝土框架结构的结构构件

(3) 利用建筑材料并充分发挥其作用

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，如用钢筋和混凝土做成的结构称为钢筋混凝土结构，用砖(或砌块)和砂浆做成的结构称为砌体结构，用钢材做成的结构称为钢结构。建筑结构作为各类作用的支承者的能力实质上是材料的强度、刚度性能的反映。一般地，建筑物的工程建设费用大部分用在建筑结构的材料上。可见，建筑结构作为建筑材料的利用者，是其存在的根本条件。

2. 建筑结构上的作用及其分类

何谓施加于建筑结构上的作用？建筑结构所支承的作用来自两类现象：一类由自然现象产生，如地球的地心引力(即重力)，因气象变化产生的风作用和冰、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。

上述两类现象，从对结构产生的影响和效应(如结构的内力、应力、位移、应变、裂缝)分析，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直接作用(也称为“荷载”)，如结构自身的重力荷载，施加在楼(屋)面上的人群及设备的使用荷载；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间接作用，如材料的温度变化引起的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。可见，直接作用与间接作用是两种不同性质的作用，其分类如图 1-3 所示。在图 1-3 中，除结构自身的重力荷载、土压力、预应力外，其他荷载是随时间及其所处位置

变化的,如使用荷载(如楼面活荷载、屋面活荷载)、屋面积灰荷载、施工荷载、风荷载、雪荷载、吊车荷载,因此,这些荷载也称为“可变荷载”,而结构自身的重力荷载、土压力、预应力则称为永久荷载(又称为“恒载”)。

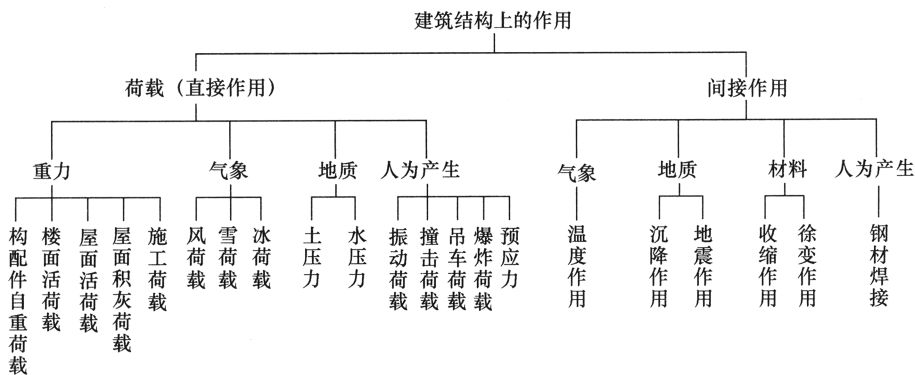


图 1-3 建筑结构上的作用及其分类

二、建筑结构的性能要求

1. 建筑结构设计使用年限

建筑结构设计使用年限,是指设计规定的结构或结构构件不需进行大修即可按其预定目的使用的时期。不同的结构或结构构件,其设计使用年限是不同的。我国《工程结构通用规范》(GB 55001—2021)规定:临时性结构(如施工现场临时职工宿舍),其设计使用年限为 5 年;易于替换的结构构件,其设计使用年限为 25 年;普通房屋和构筑物,其设计使用年限为 50 年;纪念性建筑和特别重要的建筑结构,其设计使用年限为 100 年。

2. 建筑结构的性能要求

在规定的设计使用年限内,建筑结构的性能要求,即建筑结构作为支承者的预定功能如下。

(1)在正常施工和正常使用时,结构能承受可能出现的各种作用。其中,正常施工是指建筑物的工程施工质量满足建筑工程施工质量验收规范的规定;正常使用是指建筑物在使用时对结构施加的作用和所处的环境符合建筑结构设计规范的要求。

(2)在正常使用时,结构具有良好的使用性能,即良好地满足使用要求,不会使人有不安感和不舒适感,如梁的挠度不会偏大、墙体不会因温差出现不允许的裂缝等。

(3)在正常维护下,结构具有足够的耐久性能,即对长期的物理环境作用和化学环境作用有足够的抵御能力。

(4)当发生火灾时,在规定的时间内结构可保持足够的承载力。

(5)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)发生时及发生后,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,对人的生命和财产安全有基本保障。

在上述五个预定的功能中,(1)、(4)、(5)是安全性,(2)是适用性,(3)是耐久性。安全

性、适用性和耐久性三者缺一不可，同时，安全性最为重要。

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。《工程结构通用规范》(GB 55001—2021)和《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)规定，建筑结构设计时，应根据结构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(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	安全等级	破坏后果	建筑物类型
一级	很严重	重要的房屋	三级	不严重	次要的房屋
二级	严重	一般的房屋			

注：对特殊的建筑物，其安全等级应根据具体情况另行确定。

三、建筑结构的定义

认识了建筑结构的任务和建筑结构应满足的功能要求后，可将建筑结构定义为：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。因此，建筑结构是一个由构件组成的“整体”，也是一个被建造的“实体”，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”。可见，建筑结构是形式一定的空间及造型，并具有抵御自然界或人为施加于建筑物的各种作用，使建筑物得以安全使用的有机的整体骨架。

四、建筑结构的分类

根据建筑结构采用的材料、受力特点，可从组成的材料、结构体系及建筑物层数等几个方面进行分类。

1. 按建筑结构所采用的材料分类

(1) 混凝土结构

混凝土结构包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构等。素混凝土结构是无筋或不配置受力钢筋的混凝土结构，其抗拉性能很差，所以主要用于受压为主的结构或构件，如刚性基础等。钢筋混凝土结构是将钢筋和混凝土有机合理地组合在一起共同工作的结构，其整体受力性能好，是目前应用最广泛的结构。预应力混凝土结构是针对钢筋混凝土结构抗裂性差的缺点，在构件受拉区预先施加压应力而形成的结构，适用于跨度较大的梁、板等。

(2) 砌体结构

砌体结构是由块体(砖、混凝土砌块或石块等)用砂浆砌筑组合在一起的结构，主要用于低层、多层建筑。

(3) 钢结构

钢结构是以钢材为主要承重骨架而制作的结构。

(4)混合结构

混合结构(也称“组合结构”)是指由钢框架(框筒),或者型钢混凝土框架(框筒),或者钢管混凝土框架(框筒)等与钢筋混凝土筒体所组成的建筑结构。

2. 按建筑物的层数及高度分类

(1)单层建筑结构

单层建筑结构多用于单层厂房、影剧院、仓库等。

(2)多层建筑结构

一般地,把层数在2~9层的建筑物称为多层建筑结构。

(3)高层建筑结构与超高层建筑结构

从结构设计的角度,我国《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)规定10层及10层以上,或者房屋高度超过28m的住宅建筑和房屋高度大于24m的其他高层民用建筑称为高层建筑结构。一般地,把40层及以上或者房屋高度超过100m的建筑结构称为超高层建筑结构。

此外,还可按建筑结构的结构形式、受力特点进行划分,具体见任务二。

任务二

建筑结构的基本结构构件、结构单元和结构体系

建筑结构是一个由基本结构构件集合而成的空间有机体。有了各种基本结构构件才能组成一个个有使用功能的空间,并使它作为一个整体结构将自然界或人为施加的作用传给基础与地基。结构设计的一个重要内容就是确定用哪些基本结构构件组成结构单元,并将它们联系起来形成符合某种受力特征的结构体系。

一、建筑结构的基本结构构件

在图1-1、图1-2中,建筑结构的基本结构构件主要有板、梁、柱、墙。

(1)板,指覆盖一个具有较大平面尺寸,但却有较小厚度的平面形构件,通常在水平方向设置,承受垂直于板面方向的荷载,以受弯曲为主。

(2)梁,指承受垂直于其纵轴方向荷载的直线形构件,其截面尺寸小于其纵向跨度,以受弯曲、受剪切为主。

(3)柱,指承受平行于其纵轴方向荷载的直线形构件,其截面尺寸小于其高度,以受压缩、受弯曲为主,也受剪切。

(4)墙,指承受平行于及垂直于墙面方向荷载的竖向平面构件,其厚度小于墙面尺寸,以受压缩为主,有时也受弯曲、受剪切。

此外,建筑结构的基本结构构件还包括杆、拱、壳、索、膜等。

(1)杆,指截面尺寸小于其长度的直线形杆件,承受与其长度方向一致的轴力(拉力或压力)。一般地,杆用于组成桁架或网架或用于单独承受拉力的拉杆。

(2)拱,指承受沿其纵轴平面内荷载的曲线形构件,其截面尺寸小于其弧长,以受压缩为主,也受弯曲和剪切。

(3)壳,是一种曲面形且具有很好空间传力性能的构件,能以极小厚度覆盖大跨度空间,以受压缩为主。

(4)索,是一种以柔性受拉钢索组成的构件,有直线形和曲线形。

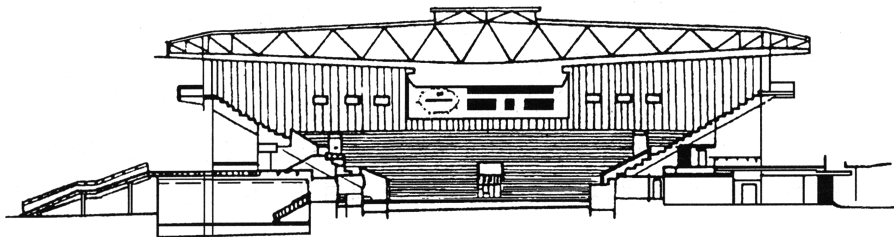
(5)膜,是一种薄膜材料(如玻璃纤维布、塑料薄膜)制成的构件,它只能受拉。

由杆、拱、壳、索、膜基本结构构件所形成的建筑结构,如图 1-4 所示。

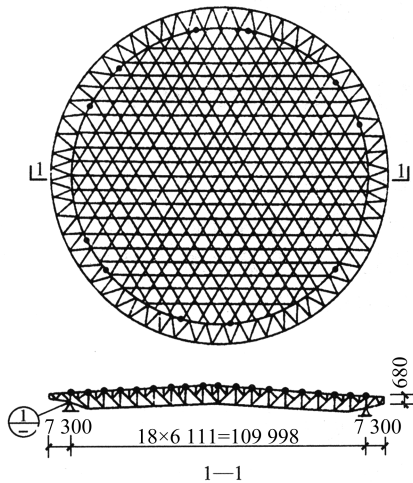
上述常见的结构构件可按不同角度进行分类。

(1)按构件的受力状态分类

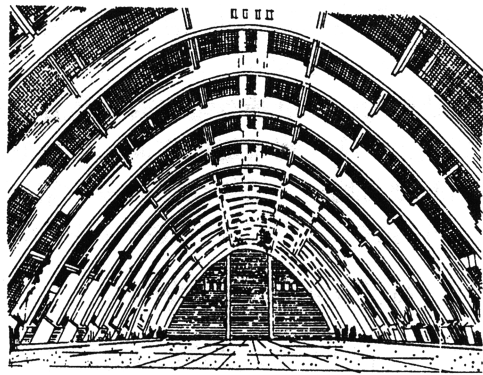
构件的基本受力状态包括拉伸(+N)、压缩(-N)、弯曲(M)、剪切(V)、扭转(M_T)五种。



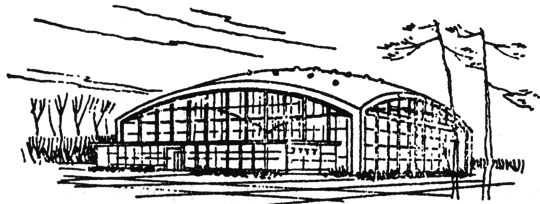
(a) 贝宁科托努市贝宁友谊体育馆(桁架)



(b) 上海体育馆(三向平板网架)

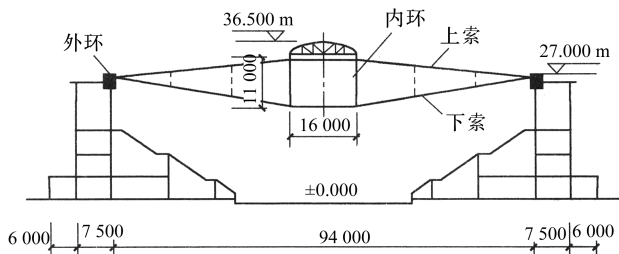


(c) 湖南湘澧盐矿散盐仓库室内图

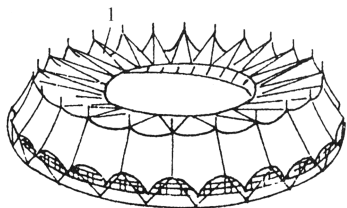


(d) 北京网球馆屋盖(双曲扁壳)

图 1-4 建筑结构



(e) 北京工人体育馆悬索



(f) 沙特阿拉伯法赫德国际体育场悬挂薄膜

图 1-4 建筑结构(续)

- ①受弯、受剪构件(弯矩 M 、剪力 V 常同时存在), 如梁、板等。
- ②受压构件(含压弯构件), 如柱、墙、拱、壳壁、桁架和网架结构中的压杆。
- ③受拉构件(含拉弯构件), 如索、膜、桁架和网架结构中的拉杆。
- ④受扭构件, 如曲梁、雨篷梁、框架结构的边框架梁。

(2)按构件的几何形状分类

按构件的几何形状, 构件可分为线形构件和面形构件, 进一步可细分为以下几类。

- ①直线形构件, 指截面尺寸比构件长度小得多的直线构件, 如梁、柱、杆、索。
- ②曲线形构件, 指截面尺寸比构件弧长小得多的曲线构件, 如曲梁、拱、悬索。
- ③平面形构件, 指厚度比平面边长小得多的构件, 如板、墙。
- ④单曲面形构件, 指只有一个方向有曲率, 另一方向曲率为零的曲面构件, 如拱板、单曲面筒壳、单曲索面。
- ⑤双曲面形构件, 指两个方向都有曲率的曲面构件, 如球壳、扭壳、充气构件、双曲拉索。

(3)按构件的刚性特征分类

- ①刚性构件, 指在荷载作用下没有显著形状改变的构件, 如梁、板、柱、墙。
- ②柔性构件, 指在一种荷载作用下构件只有一个形状, 一旦荷载性质改变(如均布荷载变为集中荷载), 其形状突然变化的构件, 如悬索、薄膜。

构件的刚性或柔性与构件所用材料有关。木材、砌体、普通混凝土等材料一般都可做成刚性构件; 钢材既可以做刚性构件, 也可以做成柔性构件; 塑料薄膜只能做成柔性构件。在结构设计时, 根据构件的刚性或柔性特征, 一般刚性构件可设计成与拉、压、弯、剪、扭有关的各种构件, 而柔性构件只能设计成受拉构件。

(4)按构件的支承系统的空间构成及与支承点的关系分类

- ①单向支承构件, 构件将荷载传递给支承系统的传递路线只能沿一个方向, 如图 1-5(a)、

图 1-5(b)所示。

②双向支承构件，构件将荷载传递给支承系统的传递路线沿两个方向，如图 1-5(c)、图 1-5(d)所示。

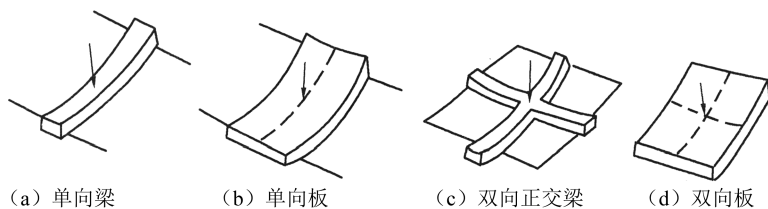


图 1-5 支承构件

在结构设计中，区分单向支承构件、双向支承构件是重要的，这是因为双向支承构件比单向支承构件更优越，它既能增大构件刚度，也能减小构件截面尺寸、节约材料，经济性更好。例如，大跨度柱网的楼盖梁常采用具有双向支承的井字梁。

二、建筑物的结构单元

前面所述各种建筑结构的基本结构构件，既可单独作为承重构件，也必然能和其他构件组合形成一个人们期望的占有—定空间的结构。正是在这一方面，建筑结构和—些用途的工程结构往往有所不同。从性质上说，建筑结构通常是形成体积的，而—些其他的工程结构却并非必然如此，如桥梁结构—般用于形成或支承—个线形平面。

对基本结构构件进行组合可形成—个能够满足使用要求、有效承受荷载、合理利用材料的结构单元。—幢建筑物的整体结构往往是—些结构单元的集合，如—幢住宅建筑可能就是—些板—墙单元的集合；—座体育馆可能是—些拱结构单元的集合。需注意，在—些情况下，—幢建筑物可能只包含—个大的结构单元，而不是—些结构单元的集合，如—座室内溜冰场。

分析结构单元对确定总体结构方案是很重要的，将结构单元做得既合理又经济，就会为—个结构设计和—些施工带来优越性。同时，由于—个结构单元的尺度总是和拟建建筑物的需求密切相关，如住宅建筑的结构单元的尺度直接和住宅自身功能需要的尺度相关，因此，分析结构单元的思路在初步设计时是非常有用的。

结构单元在进行结构分析时具有独立性，它可以与—些相互的其他结构单元进行比较。常用的结构单元如下。

(1) 板—梁结构单元

它属于楼盖(屋盖)结构的基本结构单元，由楼(屋)面板和梁组成，梁是板的支承，梁又支承在墙或柱上，其主要承受楼(屋)的竖向荷载，广泛地运用于—些各类建筑物楼(屋)盖结构。

(2) 板—墙结构单元

它是将板直接搁置在墙(砌体墙，或钢筋混凝土墙)上的基本结构单元，其跨度不能过大，墙体较多，故整体刚性很大，但使用空间不灵活，—般用于住宅、宿舍等建筑物。

(3)板-柱结构单元

它是将板直接支承在立柱上的基本结构单元。若采用柱帽(即在柱顶板底处将板局部加厚),板跨度可以加大,形成宽板的无梁使用空间,一般用于开敞式商业建筑物。它常用于无梁楼盖。

(4)梁-柱结构单元

它是将横梁直接搁置在立柱上的竖向基本结构单元,梁、柱间为铰连接(即不传递弯矩)。它只能承受竖向荷载,不能承受侧向水平荷载,因此,它必须另有能承受侧向水平力的支撑构件来保证其侧向稳定,或将柱固端连接在它的支承结构(如基础)上。它常用于厂房排架结构。

(5)梁-墙结构单元

它是将梁直接搁置在砌体墙上的竖向基本结构单元。梁、墙间一般有梁垫,为铰连接(即不传递弯矩);若将梁端整体做大,与墙黏结成一体,则宜将梁墙间视作刚性连接(即能传递弯矩)。它一般用于砌体结构建筑物。

(6)框架结构单元

它是梁柱间刚性连接的竖向基本结构单元。框架结构单元既能承受竖向荷载,又能承受侧向水平荷载,故不需另设支撑构件,适用于办公、商业、文教等建筑物。

(7)桁架结构单元

桁架是将短直杆件组成为几何形状不变的三角形图形的集合,其杆件间为铰连接,为二维的平面结构。若将桁架做成跨越一个跨度,支承在柱或墙上,两侧有侧向稳定构件(如横梁或支撑构件),就形成一个桁架结构单元,它一般用于屋盖,跨度范围为12~30 m。

(8)网架结构单元

它是桁架结构的演变,将纵横两个方向上的桁架做成等高,将它们的上弦、下弦分别做成交错的网格,每个腹杆都做成斜向的,使它对两个方向的上弦、下弦都起腹杆作用,就形成了网架结构。网架结构是独立的三维空间结构单元,可支承在少量立柱上,形成大跨度的开敞空间,一般用于体育馆、展览馆等建筑物。

(9)拱结构单元

拱是曲线形构件,拱底有水平推力,故需要与能够承受此水平推力的拉杆或墩座连接在一起才能形成独立的结构单元。扁平的拱结构可作为屋盖的基本结构单元,陡峭的拱结构由于既有水平跨越功能又有竖向支承功能,可用于单层建筑物的主要覆盖结构,多用于大型公共建筑、工业建筑。

(10)壳体结构单元

壳体是曲面形构件,壳壁及其边缘构件(如曲梁、拱等)自身形成一个独立的壳体结构单元。壳体结构既可用作屋盖的基本单元,也可作为单层建筑物的主要覆盖结构,后者形式新颖,多用于各类中小型具有观赏性的建筑物,以及大跨度公共建筑物。

三、建筑结构的结构体系

前面各基本结构单元是从某一个典型的建筑空间出发,并与各种单体结构(如板-梁结构、

桁架结构、壳体结构)相关的受力单元。建筑结构的结构体系则是从整体建筑物出发,并与整体建筑结构受力相关的结构系统。

1. 建筑结构的稳定性

工程实践经验使人们注意到,建筑结构在侧向水平荷载作用下,整体结构有着作为一个整体发生滑移、倾覆或倒塌的可能;也可能是整体结构中某些基本结构构件发生断裂或出现不允许的变形等。但是,整体结构发生滑移、倾覆或倒塌的破坏危害性最大,也是结构设计的最关键内容,这涉及建筑结构的整体稳定性。建筑结构设计时的基本考虑是:在任何可能发生的荷载条件下,建筑结构都要保持整体稳定。在一个将分散的结构构件结合在一起的建筑设计中,稳定是一个关键问题。

如图 1-6 所示,一个梁-柱结构单元在图 1-6(a)所示情况下表面上是稳定的,但有水平荷载作用时就可能形成如图 1-6(b)所示的变形状态。显然,这个结构既没有抵抗水平荷载的能力,也没有在水平荷载移走后恢复到原来状态的任何机制。一个不稳定结构的构件夹角发生了大的变化,就表示这个结构开始倒塌,而且只要有荷载作用,它就会立即倒塌。要使如图 1-6(a)所示的一个能自立的结构从不稳定状态转化为稳定状态,能保证其侧向稳定的简单结构组合方法有三个,即支撑、剪力墙和刚节点框架[图 1-6(c)、图 1-6(d)、图 1-6(e)]。对于高层建筑,还可采用筒体结构保证其侧向稳定[图 1-6](f)。

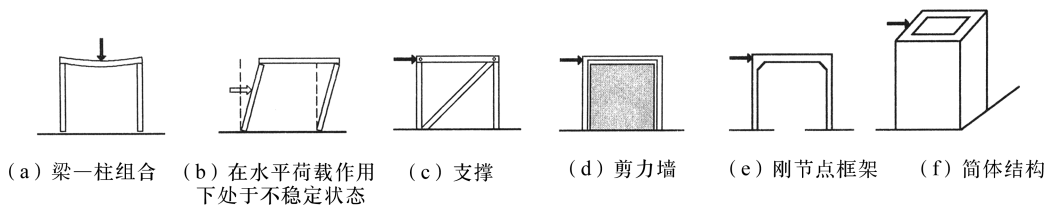


图 1-6 梁-柱结构单元

2. 建筑结构的结构体系基本构成

整体建筑结构的结构体系由水平分体系、竖向分体系和基础分体系三部分构成(图 1-7)。

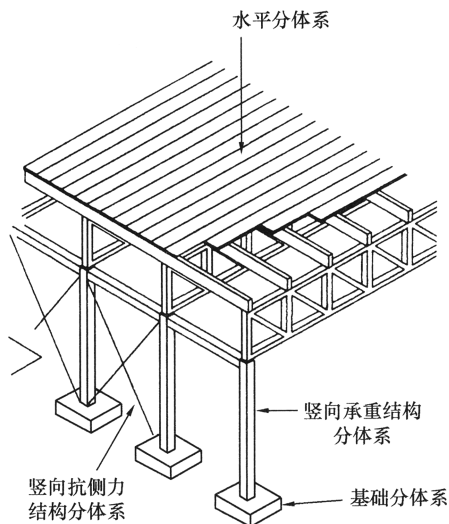


图 1-7 结构体系基本构成

(1) 水平分体系

水平分体系有楼盖结构和屋盖结构两部分。

楼盖是建筑物楼层的结构组成部分，其主要类型有楼面板体系，楼面板与楼面梁组成的板-梁结构体系。楼盖结构又可分为单向板肋梁楼盖、双向板肋梁楼盖、无梁楼盖等(将在混凝土结构设计原理章中讲述)。

屋盖是建筑物屋顶的结构组成部分，其主要类型有屋面板、屋面梁构成的板-梁结构体系，屋面板、檩条、桁架构成的桁架结构体系，屋面板、网架构成的网架结构体系，由拱板、壳体构成的拱结构体系或壳体结构体系，由索或薄膜构成的索结构体系或膜结构体系。楼盖(屋盖)结构主要承受楼(屋)盖构件及其构造层的自重恒载、楼(屋)面的活荷载。

(2) 竖向分体系

竖向分体系主要是指墙、柱以及支撑。它可以是竖向承重结构体系，其主要承受由竖向荷载产生的内力和变形效应；也可以是竖向抗侧力结构体系，其主要承受由水平风荷载和水平地震作用产生的内力和变形效应。

常见的竖向分体系如下。

①砌体结构承重墙结构体系。它指楼盖、屋盖一般采用钢筋混凝土结构构件，墙体由砌体墙构成(图 1-1)，墙体既是竖向承重结构分体系，也是竖向抗侧力结构分体系，其适用于单层和多层住宅建筑。

②排架结构体系，它由屋面梁(或屋架)、柱和基础组成，其屋面梁(或屋架)与柱顶为铰连接，柱与基础顶面为刚性连接(图 1-8)，主要用于单层工业厂房。

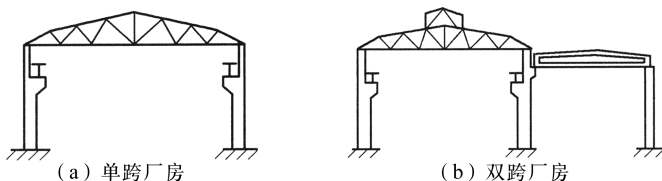


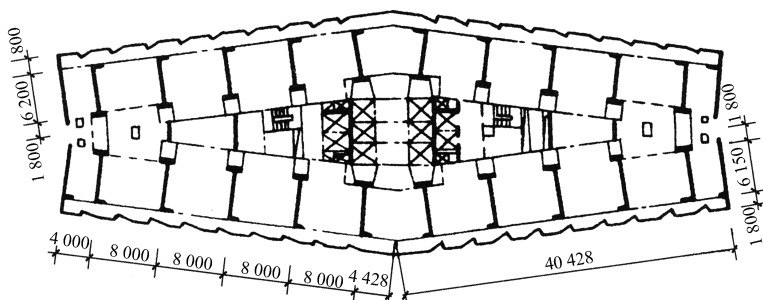
图 1-8 排架结构

③框架结构体系。它由梁、柱等构件刚性连接组成(图 1-2)。因为框架结构中梁、柱节点都是刚性连接，故框架结构在不太高的建筑物中可以用作竖向承重结构分体系和竖向抗侧力结构分体系，但过高时它只用作竖向承重结构分体系，故适用 15 层以下的建筑物。它主要用于多层工业厂房、仓库，需要较大空间的商业、旅馆、办公建筑，以及建筑组合较复杂的多层住宅建筑。

④剪力墙结构体系。其墙体由钢筋混凝土墙构成，既是竖向承重结构分体系，也是竖向抗侧力结构分体系。它比框架结构体系具有更强的侧向和竖向刚度，抵抗水平荷载的能力强，其缺点是平面布置、竖向布置都受到一定的局限，其适用于住宅、旅馆等高层建筑(图 1-9)。



(a) 外立面



(b) 结构标准层平面

图 1-9 广州白天鹅宾馆

⑤ 框架-剪力墙结构体系。它是在框架结构中适当布置一定数量的剪力墙，以框架—剪力墙共同承受竖向、水平荷载作用(图 1-10)。在结构中有框架，故空间布置较为灵活，且易形成较大的空间，同时，有剪力墙的存在，结构具有较强的侧向刚度。因此，它广泛用于高层建筑。

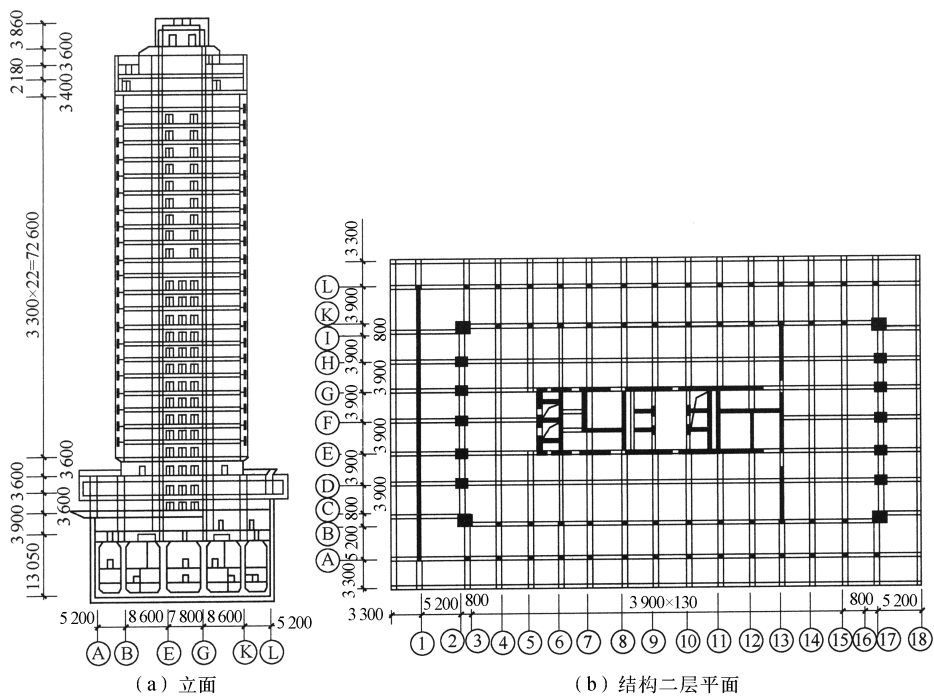


图 1-10 北京国际大厦

⑥筒体结构体系。按筒体的布置及组成方式不同，筒体结构体系可分为框架-核心筒结构体系、筒中筒结构体系和束筒结构体系。筒体结构体系的筒体分为剪力墙围成的薄壁筒、由密柱框架或壁式框架围成的框筒(图 1-11)。

框架-核心筒结构体系是指由核心筒与外围的稀柱框架组成的筒体结构(图 1-12)。目前，我国高层和超高层建筑大量采用框架-核心筒结构体系。筒中筒结构体系是由核心筒与外围框筒组成的筒体结构(图 1-13)。

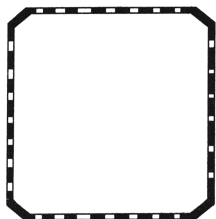


图 1-11 框筒

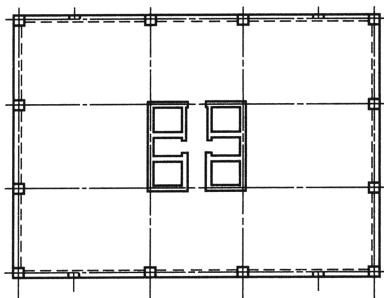


图 1-12 框架-核心筒结构

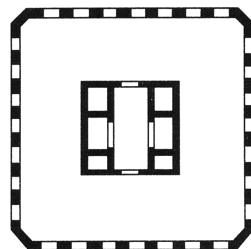


图 1-13 筒中筒结构

束筒结构体系是指由多个筒体组合在一起而形成的结构，具有竖向和水平刚度都很大的优点，如世界著名的芝加哥西尔斯大厦(图 1-14)。

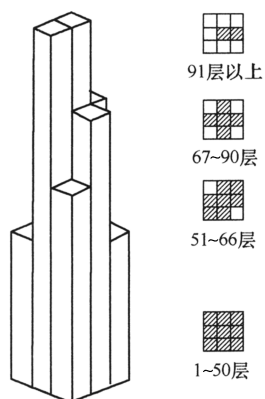


图 1-14 芝加哥西尔斯大厦

⑦巨型框架-核心筒结构体系。它由楼、电梯层组成大尺寸箱形截面巨型柱，有时也可以是大截面实体柱，每隔若干层设置一道 1~2 层楼高的巨型梁，核心筒采用钢筋混凝土(图 1-15)，适用于超高层建筑。

⑧巨型支撑结构体系。它由巨型空间支撑、支撑平面内的次框架及结构内部的次框架组成，竖向支撑在整体建筑物中起着抗侧向水平力的作用，适用于超高层建筑，如美国芝加哥的约翰·汉考克大厦(图 1-16)、中国的中国尊(图 1-17)。

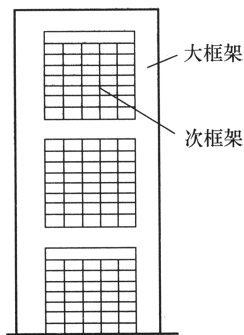


图 1-15 巨型框架-核心筒结构

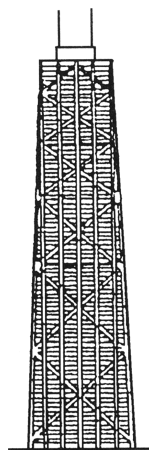


图 1-16 约翰·汉考克大厦

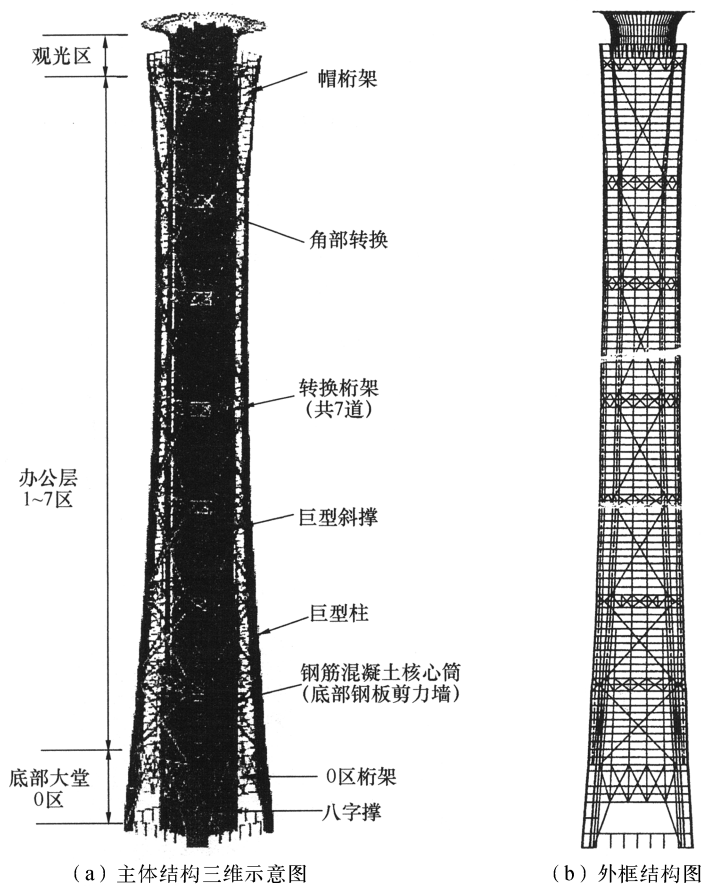


图 1-17 中国尊

应注意的是，如何才能保证建筑结构的竖向分体系和水平分体系相互作用，并形成空间结构整体性呢？这对水平分体系的基本要求如下(图 1-18)。

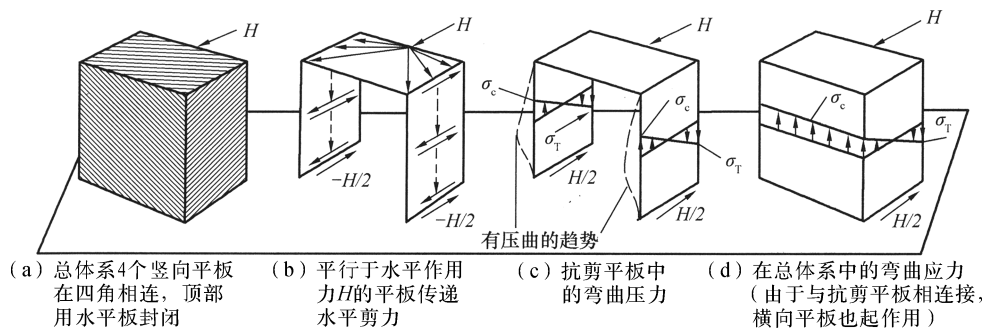


图 1-18 竖向和水平分体系相互作用实现抗剪和抗弯

①在竖向，由于通过构件的弯曲，它要能承受楼面或屋面的竖向荷载，把荷载传递给竖向分体系。

②在水平方向，它应能承受水平荷载，并把荷载传至竖向分体系，且能保持其截面的几何形状不变。

③在水平方向，它应能起水平的刚性横隔板和支承竖向构件的作用，保持竖向构件间的整体性和它们的稳定性。

对竖向分体系的基本要求如下。

①在竖向，要能承受由水平分体系传来的全部荷载，并把它们传给基础。

②在水平方向，要能抵抗水平力（如外墙面上的风荷载、地震时引发的水平地震作用），并将其传递给基础；还要能抵抗水平力产生的倾覆力矩所产生的弯曲应力。

竖向分体系必须联系在一起，以便获得最好的抗弯和抗压能力。如图 1-19 所示，楼盖结构中水平分体系增多后，竖向分体系的抗弯和抗压能力增加。

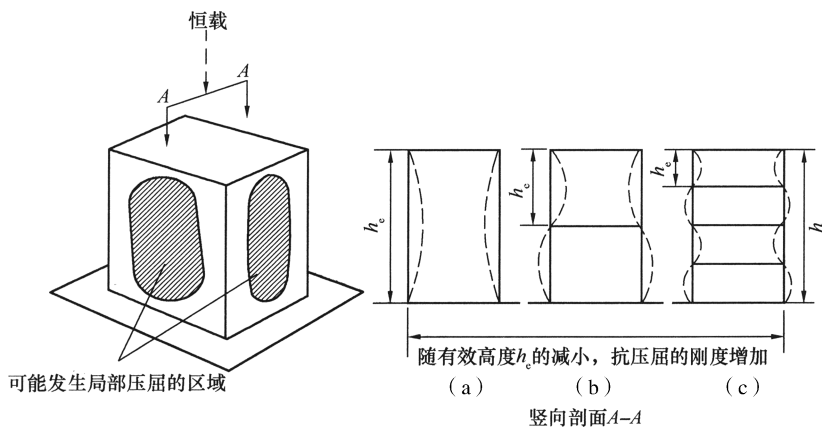


图 1-19 水平分体系增加了竖向分体系的局部刚度

凡是可能设置水平分体系的地方，竖向分体系应当与水平分体系相连接。

(3) 基础分体系

基础分体系是指承受由柱或墙传来的竖向力和由抗侧向力分体系传来的水平力的基础构件所组成的结构体系，一般可分为浅基础和深基础。

浅基础包括柱下的独立基础、双柱联合基础、柱下的条形基础，墙下的条形基础，高层

建筑物下的筏形基础、箱形基础等。它们的埋置深度比较浅，一般在地面下 1~5 m。

深基础包括桩基础、沉井基础(实质是四周受土约束的筒体)、沉箱基础(有顶盖的沉井)、地下连续墙基础等。它们的埋置深度较深，一般在地面下 5 m 以上。

对基础分体系的基本要求如下。

①足够的承载力，以便将竖向分体系传来的全部竖向力和水平力传给地基，因此，要有足够的基础底面积使地基能够承受这些作用力。

②足够的刚度，以避免地基发生不均匀沉降时影响建筑物中的水平分体系和竖向分体系产生不应有的缺陷，如开裂、局部损伤等。

3. 建筑结构的结构体系分类

按建筑结构的结构形式、受力特点划分，建筑结构的结构体系主要有以下几类。

(1)砌体结构体系。

(2)排架结构体系。

(3)高层及超高层建筑结构体系，主要有框架结构体系、剪力墙结构体系、框架-剪力墙结构体系、筒体结构体系、巨型框架-核心筒结构体系、巨型支撑结构体系等。

(4)大中跨度结构体系，主要有单层刚架结构体系、桁架结构体系、网架结构体系、拱结构体系、壳体结构体系、索结构体系、膜结构体系等。

任务三 建筑结构的概念设计

1. 建筑物的设计过程

狭义地讲，一幢建筑物的设计过程是从组织方案设计竞赛或委托方案设计开始，到施工图设计结束为止，可划分为方案设计、初步设计和施工图设计三个主要阶段。对小型和技术简单的建筑物，可分为方案设计和施工图设计两个阶段。对一些重大建设工程项目，在三阶段设计中，通常会在初步设计之后增加技术设计阶段，然后才是施工图设计阶段。如图 1-20 所示为通常的三阶段设计的主要设计阶段划分及相互关系。

2. 结构概念设计的基本概念

建筑物的概念设计一般包括建筑方面的建筑概念设计和结构方面的结构概念设计两大部分，两者相互影响、相互协调、相互整合。

建筑物的结构概念设计从设计过程的方案设计阶段开始，其目标是确定结构方案，使结构方案达到功能优、造型美、技术先进、经济性和可施工性好的要求。

建筑设计和结构设计按分阶段的设计方法在各阶段的相互作用及反馈过程，如图 1-21 所示。

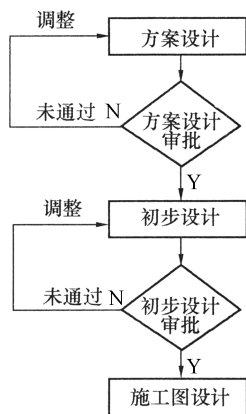


图 1-20 主要设计阶段划分及相互关系

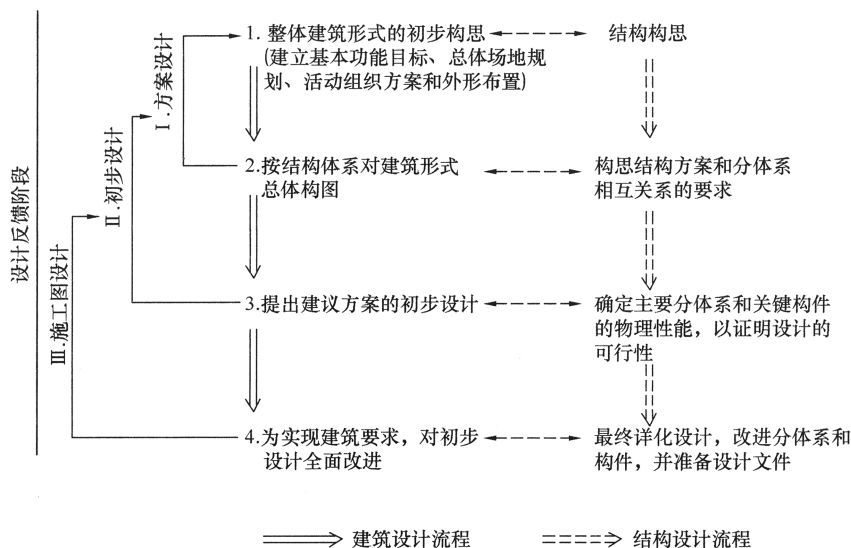


图 1-21 各设计阶段的相互作用及反馈

由图 1-21 可知，结构概念设计是指从整个结构体系，即从整体性的角度，首先确定建筑物的结构方案和结构体系，然后设计主要分体系（即水平分体系、竖向分体系和基础分体系），再设计各分体系的主要构件，形成从整体到局部的设计过程。

3. 建筑与结构的统一

由图 1-21 可知，在第 I 阶段（方案设计阶段），建筑师必须首先用概念的方式来确定基本方案的全部空间形式的可行性。在这个阶段，建筑师、结构工程师之间的合作是有益的，但对于结构设计仅在于形成总体构思方面。在第 II 阶段（初步设计阶段），建筑师必然能够用图形表达出对主要分体系的要求，并通过近似估计关键构件的性能来证明它们的相互关系的可行性，这意味着建筑师与结构工程师的合作比第 I 阶段要更具体一些。在第 III 阶段，建筑师和结构工程师必须继续合作，完成所有构件的设计细节。

建筑和结构的统一，最终要达到形式与功能的统一，正如西班牙结构工程师托罗哈 (E. Torroja) 的座右铭：“永远将一个建筑工程的功能、结构、美观方面表现为一个体质上和形式上的整体。”建筑物应是各部分相互联系形成的有机体。这就要求“结构工程师就是建筑师，建筑师也是结构工程师”。意大利著名结构工程师、建筑师奈尔维 (P. L. Nervi) 在 1957 年设计建成的罗马小体育馆 (图 1-22) 就充分体现了建筑和结构的统一，成为建筑工程的典范。

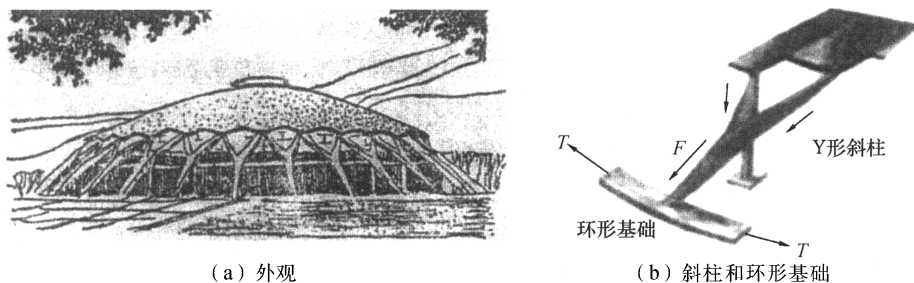


图 1-22 罗马小体育馆

建筑物的设计过程，需要建筑师、结构工程师和其他专业工程师(电气、暖通空调、给水排水工程师等)共同合作完成，特别是建筑师与结构工程师的合作，建筑设计和结构设计任务见表 1-2。

表 1-2 建筑设计和结构设计的任务

建筑设计	结构设计
(1)与规划的协调，房屋体型和周围环境的设计； (2)合理布置和组织房屋室内空间； (3)解决好采光通风、照明、隔声、隔热等建筑技术问题； (4)艺术处理和室内外装饰	(1)正确选用总结构体系和分体系； (2)确定结构承受的荷载，合理选用结构材料； (3)解决好结构承载力、变形、稳定、抗倾覆等结构技术问题； (4)解决好结构及结构构件的连接构造和施工方法问题

任务四 建筑结构和工程管理的关系

1. 建筑物全生命周期和结构全生命周期

建筑物全生命周期(也称“全寿命周期”)是指项目的前期阶段(也称“决策阶段”)、实施阶段、使用阶段，直到项目废除(图 1-23)。其中，实施阶段可划分为设计前准备阶段、设计阶段和施工阶段(含竣工验收)。一般地，将项目的决策阶段管理称为开发管理(DM)、实施阶段管理称为项目管理(PM)，使用阶段管理称为设施管理(FM)。

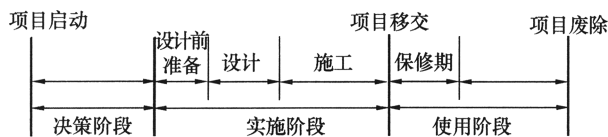


图 1-23 建筑物全生命周期

建筑物的结构全生命周期一般可分为建造阶段(即施工阶段)、正常使用阶段和老化阶段三个阶段。在这三个阶段中，结构面临着不同原因(如设计、施工、管理等)引起的结构安全风险，平均风险率也不同，结构全生命周期与平均风险的关系如图 1-24 所示，由此可知，结构在其建造阶段(即施工阶段)、老化阶段的平均风险率比正常使用阶段高很多。

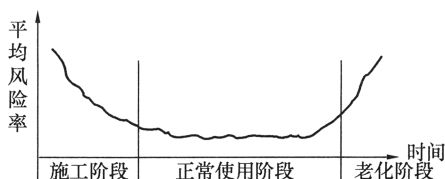


图 1-24 结构全生命周期与平均风险的关系

2. 工程管理的概念与结构设计对三大目标的影响

工程管理的内涵涉及工程项目全过程的管理,即开发管理(DM)、项目管理(PM)和设施管理(FM),并涉及参与项目的各个单位的管理,即业主、业主委托的咨询管理方(如监理方)、设计方、施工方、供货方、项目使用期管理方的管理(图 1-25)。可见,业主工程管理的时间范围最长,各参与方要与业主建立合同关系,业主工程管理的核心。

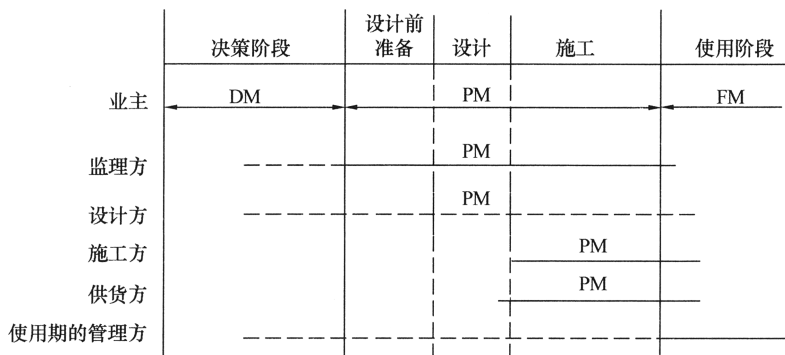


图 1-25 各单位的工程管理

工程管理的核心任务是为工程建设增值,其增值主要表现在两个方面:一是为工程建设增值,二是为工程使用(或运营)增值。

各参与方工程管理的三大目标是费用、质量和进度,其管理的任务主要包括费用控制、质量控制、进度控制、安全管理、合同管理、信息管理等。其中,从业主、监理方、设计方的角度,工程费用是指工程造价(或工程投资);从施工方的角度,工程费用是指工程成本(或施工成本)。

建筑结构是一个被建造的实体,它需要设计(包括结构设计)和施工两个阶段共同完成。结构设计的最终成果是结构施工图及设计文件,而施工是将设计图纸变为实体的建筑结构的过程。设计(包括结构设计)阶段对工程费用的影响,如图 1-26 所示。实际上,它对工程质量、工程进度的影响也可以用该图来反映。

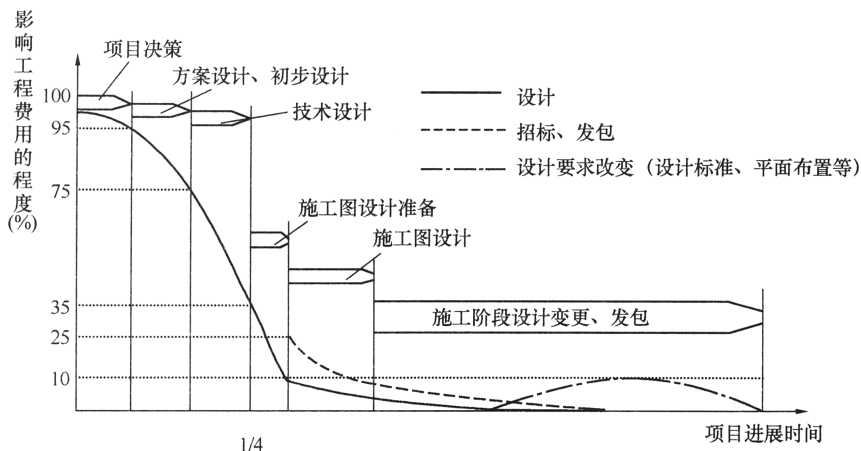


图 1-26 设计(包括结构设计)阶段对工程费用的影响

3. 结构与工程造价

(1) 结构造价与工程造价的比例

工程总费用(或工程总造价)一般包括工程前期费用(如地价、筹资利息、勘察设计费、咨询管理费等)和施工阶段建筑安装费用(如结构、装修、设备管道等部分的材料费、人工费、安装费及管理费、利润等)。为便于比较,此处的工程造价仅指施工阶段的建筑安装费用。这样,结构造价可以用其占建筑物工程造价的比例进行量度。

不同类型的建筑物,结构造价在工程造价中所占的百分比也不同。

中等高度的多层办公建筑和公寓建筑(5~9层),结构造价约占工程造价的25%;低层和小跨度的商业建筑和住宅建筑(3~4层),其结构造价占工程造价的30%~40%。

高层建筑、大跨度建筑,其结构造价占工程造价的30%~35%,其设备管道系统造价占工程造价的30%~40%。

需注意,上述结构造价的比例会随设计创新、新材料、新技术的出现而发生变化。但是,结构造价仍在工程造价中占有相当高比例,因此,结构设计应当考虑结构造价,即需要对不同的结构体系和结构方案等进行技术经济分析,进行结构设计优化。

(2) 结构与建筑物全生命周期费用

从建筑物全生命周期的角度,设计过程中,结构设计应当考虑建筑物全生命周期费用,即不仅考虑项目决策阶段费用、设计阶段费用、施工阶段费用,还要考虑正常使用阶段、老化阶段费用,如使用阶段的使用费用(或运营费用)、维护费用,以及建筑物废除时的拆除费用。同时,结构设计在实施建筑物全生命周期费用中起关键作用。因此,建筑物全生命周期费用应成为评价优秀结构设计的一项重要指标。

(3) 结构设计在一定程度上制约施工方法并影响工程造价

结构设计确定结构方案,而不同的结构方案需要不同的施工方法(或施工技术方案);同一结构方案可采用不同的施工方法(或施工技术方案),因此,在结构设计阶段应考虑结构方案与施工方法的协调性,即在确定结构体系和结构布置时,要同时考虑结构的施工方法。一般地,施工方法包括传统施工法、工业化施工法和特殊技术施工法三种。

① 传统施工法。

在传统施工法中,如钢筋混凝土楼盖通常采用现浇式、装配整体式或装配式,几乎所有结构构件都是根据某个具体的建筑物来设计的,而且采用定型的轧制钢材或标准的模具来制作,同时,它们采用合理的,有一定工业化程度的传统做法。这些都是设计结构时应遵守的,如钢筋混凝土结构构件梁、柱的截面尺寸一般以50 mm进位,即梁截面高度为150 mm、200 mm、300 mm等。传统施工法不仅影响工程造价,也影响施工工期。

② 工业化施工法。

工业化施工法是基于建筑物结构构件不同完整程度的组合而组织实施的施工方法,其范围可以从活动住宅的成品到在工厂预制装配的结构系统,包括:完整的建筑产品;部分建筑产品;结构系统,如板—墙系统;盒子结构系统;其他分系统,如幕墙系统、顶棚系统等。工业化施工法影响了工程造价,并有利于缩短施工工期。

③特殊技术施工法。

特殊技术施工方法有升板施工、滑动模板施工等。在升板施工中,如图 1-27 所示,要将几层楼板构件预先在地面上做好,再用提升法沿结构的立柱提升就位,这时楼板的设计(常用无梁楼板)就会与传统施工法中的楼板(常为有梁楼板)有所不同。因此,采用升板施工方法时,在结构设计阶段就应考虑其影响。

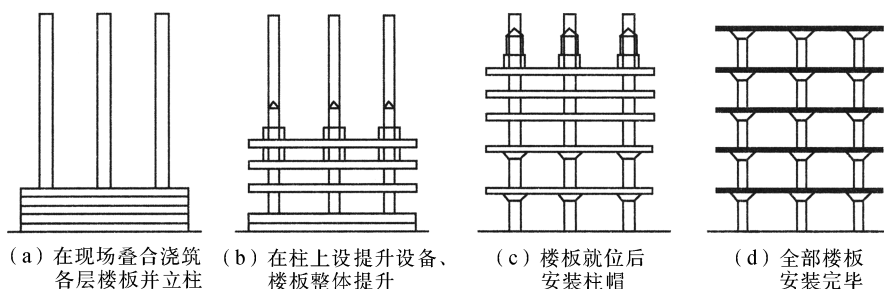


图 1-27 无梁楼盖大型预制平板升板施工工艺

4. 结构与工程质量

广义地讲,工程质量是由项目的决策质量、设计质量和施工质量构成的。其中,项目的决策质量就是确定强制性质量目标(即法律法规和规范标准规定的建筑物必须满足的目标)和一般性质量目标(即应尽可能满足的可以优化的目标)。项目的决策质量对设计质量、施工质量起决定性影响,因此,应重视项目的决策质量。

(1)结构设计是设计质量的根本保证

结构设计及结构设计质量是保证整体建筑物设计质量的最重要内容,这是因为它直接关系到建筑物的施工安全、使用安全,避免建筑物倒塌及人员伤亡。设计质量通常是由建筑、结构、设备(电气、暖通、给水排水等)等多个设计工种的合作来保证的,但是,结构设计工种是保证设计质量的核心工种。

结构设计质量直接影响施工质量。施工过程具有不可逆的特点,即下一道施工工序必须在上一道施工工序完成后才开始,如基础工程要先绑扎钢筋后浇筑混凝土。因此,结构设计质量的缺陷会给施工质量带来严重危害。这也意味着在施工前,应对设计图纸进行图纸会审与技术交底,查找设计(包括结构设计)中存在的问题是必要的,也是重要的。

(2)结构与施工质量的结合

为保证结构设计质量,结构工程师不仅应做好结构分析、计算、结构施工图纸及设计文件的编制,还应熟悉结构及结构构件在施工过程中是如何通过质量管理得到保证的,并掌握相关的施工技术与操作工艺等要求。在此基础上,结构工程师才能够在结构设计中提出合理的技术要求,从而确保在施工阶段得到应有的质量保证。同时,工程管理者也应明确,为实现结构设计目标,在建筑材料、施工技术、操作技艺等方面所需满足的常规与特殊的质量控制指标。因此,结构与施工应密切结合,才能全面保证工程质量。

5. 结构与工程安全

广义地讲,工程安全涉及设计安全、施工安全和使用安全。

(1) 结构设计应考虑施工对结构安全的不利影响

正如图 1-24 所示, 在施工阶段, 结构面临的风险最大, 是最不利的时期。在结构设计中, 结构工程师要同时考虑施工过程中结构及结构构件可能遇到的不利受力情况。

例如, 结构构件在起吊、安装过程中的实际受力状况, 即要考虑结构构件吊装时的动力系数, 考虑钢材焊接时对结构构件可能产生的内应力。

在施工过程中, 人为的或自然的原因使结构构件承受超过正常使用阶段荷载, 包括施工荷载超出正常使用荷载, 材料产生干缩变形会使结构构件产生较大的内应力等。

施工过程中荷载的传递方式、分配与正常使用阶段的荷载很可能不同, 如新浇筑楼板的自重及施工荷载通过支撑系统向下层楼板传递, 荷载的分配在很大程度上受到施工方案和施工进度的影响。因此, 结构构件的形状、材料的性能及所承受的施工荷载在各施工阶段均随时间不停地发生变化, 有的变化对结构构件是很不利的。

对于不利受力状况发生的可能性, 结构工程师应在结构设计时有一个预见性, 作为结构设计时要考虑的因素之一。

(2) 结构分析与施工相一致, 以保证结构安全

结构的分析过程是一个用力学模型来模拟实际结构的受力和变形的过程, 而有效的模拟取决于准确地识别结构构件间的连接、支承做法的结构性能(图 1-28), 铰连接、刚性连接、固端、滚轴等支承条件和简支、连续梁(板)、悬挑等受力方式就成为结构分析的一个关键。这就要求工程管理者要理解结构施工图上表现出来的构造做法, 特别是构件间的连接、支承等, 要懂得结构施工图中的构造方法和结构分析的一致性, 并在施工中实际操作程序上严格执行。

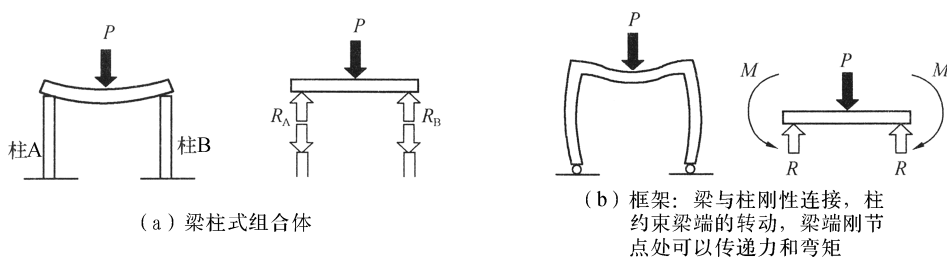


图 1-28 隔离的结构构件

6. 结构设计与工程进度

广义地讲, 工程进度包括项目的决策阶段进度、设计进度和施工进度。

(1) 结构设计对施工进度的影响

正如前面所言, 结构方案影响了施工方法, 不同的施工方法对施工工期的影响也很大。

施工阶段的荷载与正常使用阶段的荷载一般是不同的, 通常结构设计的荷载是按正常使用阶段时的荷载进行确定取值的。因此, 工程管理者应充分考虑和利用结构设计的安全储备及对施工阶段结构的安全性影响, 在有利条件下, 如当设计的楼板较薄而设计的正常使用阶段的楼面活荷载较大时, 现场可以通过提前拆模等办法来加快模板的周转, 缩短施工工期, 加快施工进度。

(2)设计的可建造性

结构设计应具有可建造性(也称“可施工性”),它是指在使最终的建筑物能满足所有现实要求的前提下,设计使得施工更加容易的程度。它要求尽可能早地将施工技术引入设计中。可建造性要求设计理性化,这主要体现在简明、模块化、复用施工图三个方面。

(3)设计与施工一体化

传统的建筑物组织实施方式是设计—招标—施工,即先完成建筑物的设计,然后招标选择施工单位,再进行施工。设计任务、施工任务分别由不同的设计单位、施工单位独立完成,故设计、施工是分离的,这易导致工程工期长、投资超额,一旦发生质量问题易导致设计单位、施工单位的互相推诿,难以划分质量责任。

为克服设计(包括结构设计)与施工之间的隔离,借鉴机械制造业、汽车工业的生产方式,在建筑业领域,业主越来越希望设计和施工紧密结合,实行设计—施工模式(design-build, DB),类似于我国的项目总承包模式(也称“工程总承包模式”),即业主将设计和施工任务委托给一个总承包单位,该总承包单位负责整个建筑物的设计和施工。在西方部分国家的政府投资项目中,已大量实施设计—施工模式。工程实践证明,它有利于缩短整个工期,节约费用,但缺点是业主对工程质量缺乏直接的质量控制手段。

思考练习

1. 建筑结构的主要任务是什么?
2. 建筑结构的作用分为哪两类? 其各自的特点是什么?
3. 什么是建筑结构设计使用年限?
4. 建筑结构作为支承者的预定功能包括哪些?
5. 建筑结构的安全等级分为几级? 是如何划分的?
6. 我国多层建筑、高层建筑是如何划分的?
7. 建筑结构的基本结构构件有哪些? 如何划分单向支承构件和双向支承构件?
8. 建筑结构的常用结构单元包括哪些?
9. 一栋建筑物的结构体系由哪几部分组成? 常用的竖向分体系有哪些?
10. 要保证建筑结构的竖向分体系和水平分体系的相互作用,对两者各有什么基本要求?
11. 建筑结构设计的任务包括哪些内容?
12. 在建筑结构全生命周期内,平均风险率的变化特点是什么?
13. 建筑结构设计对工程费用、进度、质量和安全有哪些影响?
14. 如何理解结构分析要与施工相一致?

建筑
结构

建筑结构设计的基本原理

项目二

任务一

建筑结构的失效和结构的三类极限状态

一、荷载的分类与代表值

1. 荷载的分类

荷载可按不同的原则分类，各自适用于不同的对象，同时，荷载的分类与建筑结构设计基准期紧密相关，这是因为建筑结构上的荷载一般是随时间变化的，故结构设计时必须相对固定一个时间坐标以作为基准。设计基准期，是指为确定可变荷载及与时间有关的材料性能等取值而选用的时间参数。我国建筑结构的设计基准期为 50 年，其他工程结构的设计基准期应按相应设计规范确定，如我国桥梁结构的设计基准期为 100 年。

需注意，设计基准期与设计使用年限是不同的概念，即建筑结构超出 50 年设计基准期后并不意味着所设计的建筑结构会失效，建筑结构仍可使用，但是它的失效概率会提高。对于结构失效、失效概率的内涵在本节后面进行阐述。

荷载的分类如下。

(1) 按随时间的变异分类

①永久荷载(也称为“恒载”)，是指在设计基准期内，其值不随时间变化，或其变化与平均值相比可以忽略不计，如结构构件及配件的自重、土压力、人为施加的预加力等。

②可变荷载(也称为“活荷载”)，是指在设计基准期内，其值随时间变化，且其变化与平均值相比不可以忽略不计的荷载，如屋面积灰荷载、雪荷载、屋面活荷载、楼面活荷载、风荷载、吊车荷载、施工荷载等。

③偶然荷载，是指在设计基准期内不一定出现，一旦出现，其值很大且持续时间很短的荷载，如爆炸力、撞击力等。

(2) 按随空间位置的变异分类

①固定荷载，是指在结构空间位置上具有固定分布的荷载，如结构构件的自重荷载，建筑物楼面上的固定设备荷载等。

②可动荷载，是指在结构空间位置上的一定范围内可以任意分布的荷载，如建筑物楼面上的人群荷载、厂房结构中的吊车荷载以及施工荷载等。

(3) 按结构的反应分类

①静态荷载(简称“静载”)，是指使结构或结构构件不产生加速度，或其加速度可忽略不计的荷载，如结构构件的自重荷载，住宅及办公建筑的楼面活荷载、屋面活荷载等。

②动态荷载(简称“动载”)，是指使结构或结构构件产生不可忽略的加速度的荷载。如吊车荷载、设备振动荷载、作用在高耸结构(如烟囱)上的风荷载等。在计算动态荷载时，其荷载值应考虑动力效应，如计算吊车竖向荷载时要将吊车承受的荷载乘以动力系数。需注意，

吊车水平荷载属于惯性力，故不考虑动力系数。

(4)按荷载作用的方向分类

①竖向荷载，通常指由重力作用引起的荷载，如结构构件的自重即恒载、楼面活荷载、屋面活荷载、屋面积灰荷载、屋面雪荷载等，如图 2-1(a)所示。此外，还有由地震的地面运动竖向产生的竖向地震作用。

②水平荷载(也称“侧向荷载”“横向荷载”)，是指由风作用产生的荷载，如图 2-1(b)所示，以及斜柱等产生的水平方向荷载。此外，还有由地震的地面运动水平方向产生的水平地震作用。

③冲击荷载，通常是一种侧向荷载，如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抵抗火灾时受到的侧压力等。

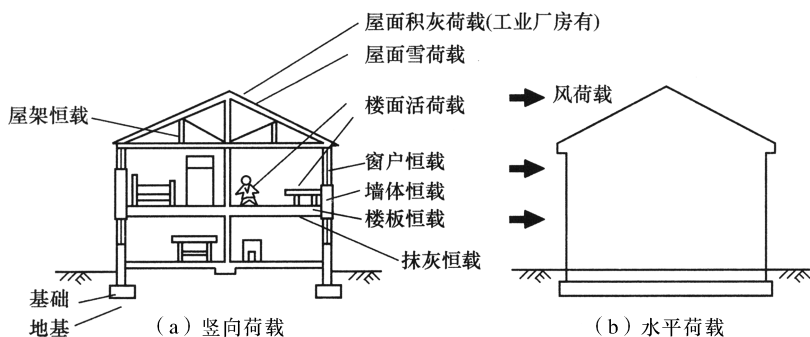


图 2-1 竖向荷载和水平荷载

(5)按荷载实际分布情况分类

①分布荷载，荷载总是分布在一定面积上的，当荷载分布面积较大，并按一定几何关系分布时称为面荷载，如均匀分布面荷载、三角形分布面荷载等，如图 2-2(a)和图 2-2(b)所示，其单位为 kN/m^2 。其中，对可以将面荷载视为集中在一条线上分布的荷载称为线荷载，如均匀分布线荷载(简称“均布线荷载”)、三角形分布线荷载等，如图 2-2(c)和图 2-2(d)所示，其单位为 kN/m 。

②集中荷载，当荷载分布面积不大时，可以近似认为集中于一点时称为集中荷载，其单位为 kN ，如图 2-2(e)所示。

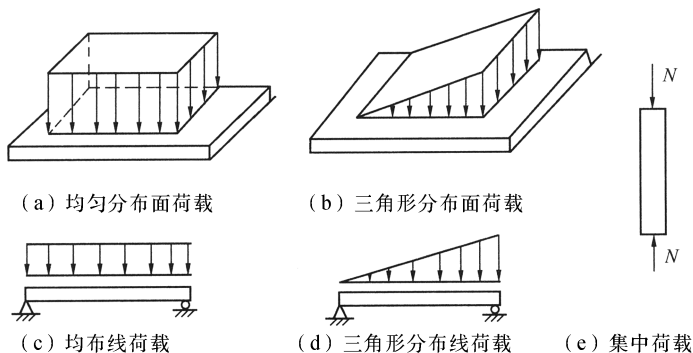


图 2-2 荷载按实际情况分类

③等效均布荷载，结构设计时，楼面上不连续分布的实际荷载，一般采用均布荷载代替；等效均布荷载是指其在结构上所得的荷载效应(如弯矩、剪力等)应能与实际的荷载效应保持一致的均布荷载。

2. 荷载的代表值

荷载是随机变量，任何一种荷载的大小都具有不同程度的变异性，并且可变荷载通常与时间有关，如住宅建筑的楼面活荷载中，人群荷载的流动性大，而家具荷载的流动性则相对较小，因此，结构设计时对不同的荷载和设计状况，应采用不同的荷载代表值。对于永久荷载(恒载)，它只有一个代表值，即永久荷载的标准值；对于可变荷载，它的代表值包括标准值、组合值、频遇值和准永久值。

(1) 标准值

标准值为荷载的基本代表值，是设计基准期内最大荷载统计分布的特征值(如均值、众值、中值或某个分位值)，如图 2-3 所示为荷载分布概率曲线。

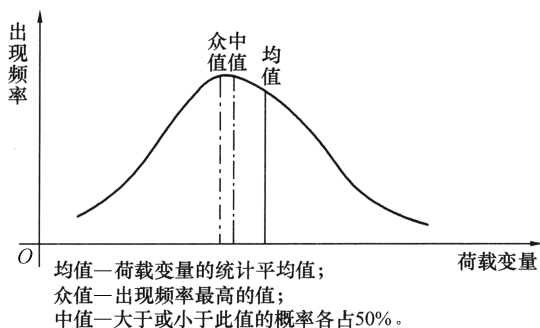


图 2-3 荷载分布概率曲线

对于永久荷载的标准值，如结构构件的自重，可按结构构件的设计尺寸与材料单位体积(或单位面积)的自重计算确定。如钢筋混凝土的自重为 $24\sim 25\text{ kN/m}^3$ 。

对于可变荷载的标准值，我国《工程结构通用规范》(GB 55001—2021)和《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)规定了具体数值或计算方法，设计时可以参照使用。根据《工程结构通用规范》(GB 55001—2021)，民用建筑楼面均布活荷载标准值可按表 2-1(仅列出部分)采用。

由表 2-1 可知，住宅建筑的楼面均布活荷载标准值为 2.0 kN/m^2 ；密集柜书库的楼面均布活荷载标准值较大，为 12.0 kN/m^2 。

表 2-1 民用建筑楼面均布活荷载标准值及其组合值、频遇值、准永久值系数

项次	类别	标准值/ (kN/m^2)	组合值系数 ψ_c	频遇值系数 ψ_f	准永久值系数 ψ_q
1	住宅、宿舍、旅馆、医院病房、托儿所、幼儿园	2.0	0.7	0.5	0.4
	办公楼、教室、医院门诊室	2.5	0.7	0.6	0.5
2	食堂、餐厅、实验室、阅览室、会议室、一般资料档案室	3.0	0.7	0.6	0.5

续表

项次	类别	标准值/ (kN/m ²)	组合值系数 ψ_c	频遇值系数 ψ_f	准永久值系数 ψ_q
3	书库、档案库、储藏室(书架高度不超过 2.5 m)	6.0	0.9	0.9	0.8
	密集柜书库(书架高度不超过 2.5 m)	12.0	0.9	0.9	0.8

(2)组合值

当结构承受永久荷载和两种或两种以上的可变荷载时,考虑到各可变荷载对结构的影响大小不同,两种或两种以上可变荷载同时达到最大值的可能性较小,如高层建筑各楼层可变荷载全部满载并且遇到最大风荷载的可能性就很小,因此,可以将可变荷载的标准值乘以一个小于1的组合值系数,即对其标准值进行折减。由表 2-1 可知,住宅建筑的楼面均布活荷载的组合值系数 ψ_c 为 0.7,密集柜书库的楼面均布活荷载的组合值系数 ψ_c 为 0.9。

可变荷载的组合值,是指当结构承受两种或两种以上可变荷载时的荷载值,它等于将可变荷载的标准值与其组合值系数 ψ_c 相乘,其目的是组合后的荷载效应(如弯矩、剪力等)在设计基准期内的超越概率能与该荷载单独出现时的相应概率趋于一致。

(3)频遇值

在结构正常使用阶段,可变荷载的最大值并非长期作用于结构上,因此,应按可变荷载在设计基准期内作用时间的长短和可变荷载超越总时间或超越次数,对其标准值进行折减,即可以将可变荷载的标准值乘以一个小于1的频遇系数 ψ_f 。由表 2-1 可知,住宅建筑的楼面均布活荷载的频遇值系数 ψ_f 为 0.5,密集柜书库的楼面均布活荷载的频遇值系数 ψ_f 为 0.9。

可变荷载的频遇值,是指可变荷载在设计基准期内,其超越的总时间为规定的较小比率或超越频率为规定频率的荷载值,它等于将可变荷载的标准值与其频遇值系数 ψ_f 相乘。

(4)准永久值

准永久值系数,是根据在设计基准期内荷载达到和超过该值的总时间与总持续时间的比值进行确定的。由表 2-1 可知,住宅建筑的楼面均布活荷载的准永久值系数 ψ_q 为 0.4,密集柜书库的楼面均布活荷载的准永久值系数 ψ_q 为 0.8。

可变荷载的准永久值,是指可变荷载在设计基准期内,其超越的总时间约为设计基准期一半的荷载值。建筑结构设计基准期为 50 年,故可变荷载的准永久值总的持续时间不低于 25 年。可变荷载的准永久值等于将可变荷载的标准值与其准永久值系数 ψ_q 相乘。

综上所述,标准值为基本代表值,其他代表值可由标准值乘以相应的系数(组合值系数 ψ_c 、频遇值系数 ψ_f 、准永久值系数 ψ_q)得到。

二、结构的荷载效应与结构抗力

结构的作用效应或荷载效应(以下统称荷载效应)是指由作用(或荷载)引起的结构或结构构件的反应。任何一种荷载都会使结构或结构构件产生弯矩、剪力、轴力,它们称为内力效应。同时,还会产生位移、挠度,甚至使其出现裂缝,它们称为变形效应。因此,荷载效应

包括内力效应和变形效应。

如图 2-4 所示为一计算跨度为 l_0 、截面刚度为 EI ，承受均布线荷载 q 的矩形截面简支梁，其跨中最大弯矩 $M = \frac{1}{8}ql_0^2$ ，支座最大剪力 $V = \frac{1}{2}ql_0$ ，跨中最大挠度 $f = \frac{5ql_0^4}{384EI}$ 。这里的弯矩、剪力都称为内力效应，与荷载、计算跨度和支承条件有关；挠度则是变形效应，与荷载、计算跨度、支承条件，以及材料的弹性模量 E 和构件截面几何特征 I 有关。可见，内力效应、变形效应均与荷载有关，因此统称为荷载效应 S 。

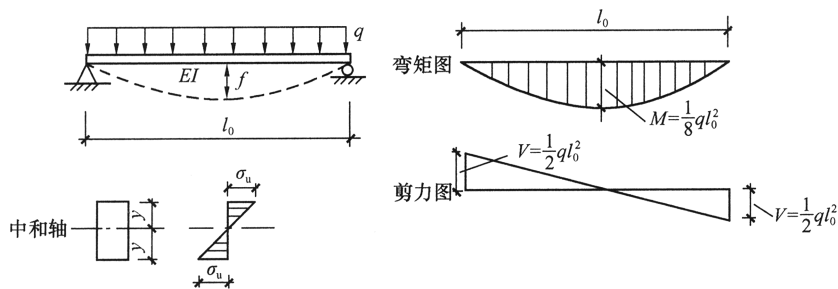


图 2-4 简支梁

结构抗力 R 是指结构或结构构件承受荷载效应的能力，如承载能力等。图 2-4 中的简支梁，由建筑力学知识可得，其跨中截面的抗力为 $\sigma_u W = \sigma_u \frac{I}{y}$ ，其中， y 为截面中和轴至截面边缘的距离， σ_u 为材料的极限应力。可见，结构抗力与结构或结构构件所选用的材料的性能（如材料的极限应力）、构件的几何特征（如构件截面几何特征 I ）等有关。

正如荷载分类中所言，荷载是随机变量，具有随机性质，荷载效应是结构上荷载作用效果的反映，因此，荷载效应也具有随机性质。

对于结构抗力，影响其大小的主要因素是材料性能、构件截面几何特征，以及计算的精确性等。受材质及生产工艺等因素的影响，结构构件存在制作误差及施工安装误差等误差，同时，材料强度、构件几何特征参数也存在差异，以及计算公式的不精确等，这些都使结构抗力具有随机性质，因此可将其视为随机变量。

三、建筑结构的失效和结构的三类极限状态

在项目一中介绍了建筑结构应满足安全性、适用性和耐久性的预定功能，而结构的失效则意味着所述预定功能的丧失，防止结构的失效是建筑结构必须保证的首要任务。

建筑结构的失效包括下列几种可能。

(1) 倾覆或滑移，指结构或结构的一部分作为刚体在各种荷载作用下失去平衡的现象，如图 2-5(a)、图 2-5(b) 所示。这类结构失效对建筑结构的危害性最大。

(2) 地基失稳，指地基丧失承载能力而破坏，导致结构整体倾覆、沉降等现象，如图 2-5(c)、图 2-5(d) 所示。这类结构失效对建筑结构的危害性相当大。

(3) 压屈或失稳，指结构或结构构件因长细比过大而压屈，丧失稳定，或因连接处失效而形成机动的几何可变体系，使得它们在较小的荷载作用下突然发生过度变形或因过度变形而

不适于继续承载的现象,如图 2-5(e)所示。

(4)破坏,指结构或结构构件因所用材料的强度被超载,或材料的应变达到其极限值而丧失承载能力,如压缩破坏、剪切破坏、弯曲破坏、扭曲破坏,如图 2-5(f)、图 2-5(g)所示,以及拉伸破坏等现象,见(图 2-5(e))。

(5)变形过大(含裂缝过宽),指结构或结构构件在施加荷载后发生影响使用的过大变形或过宽裂缝的现象,如图 2-5(e)、图 2-5(f)所示。

(6)耐久性丧失,指结构或结构构件所用的材料在长期经受各种破坏因素后丧失了使用功能的现象,如图 2-5(g)所示。

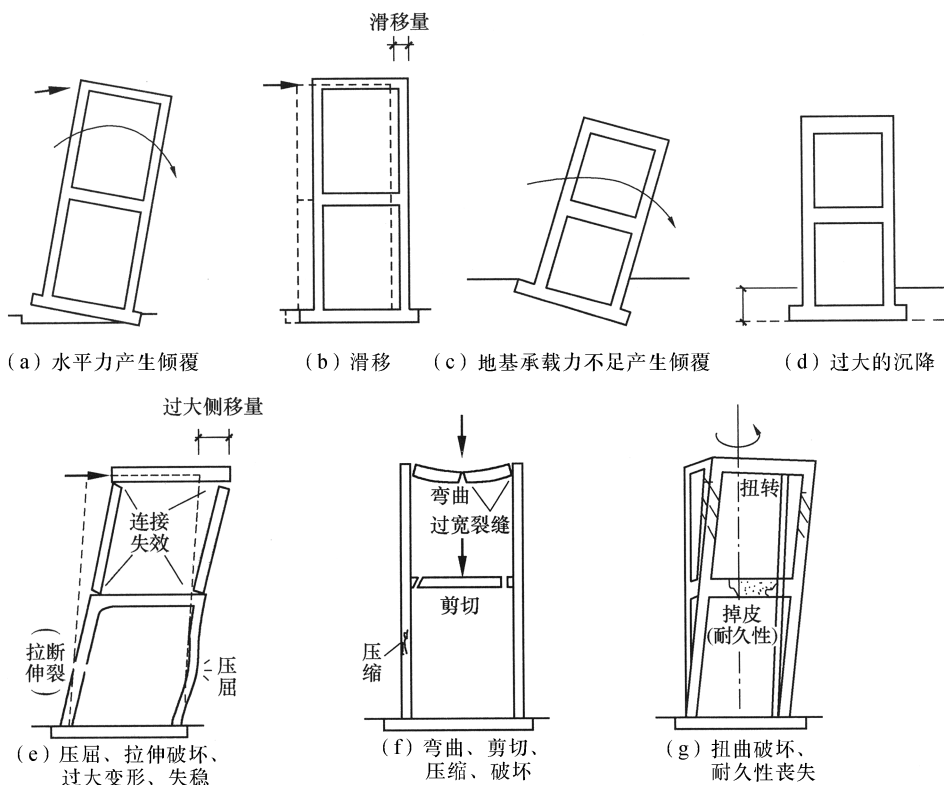


图 2-5 结构的失效现象

为防止结构的失效,在我国《工程结构通用规范》(GB 55001—2021)中为建筑结构设计引入了下列两类极限状态的概念及其标志或限值。

(1)承载能力极限状态,它对应于结构或结构构件达到最大承载能力或不适于继续承载的变形。如上述倾覆或滑移、失稳(地基失稳)、破坏、过度变形等失效现象中的任何一种都被认为是超过了承载能力极限状态的标志。

(2)正常使用极限状态,它对应于结构或结构构件达到正常使用的某项规定限值时的状态。如上述变形大于规定限值(或裂缝宽度大于规定限值)等失效现象中的任何一种都被认为是超过了正常使用极限状态的标志。

此外,在《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)中还增加了耐久性极限状态,它对应于结构或结构构件在环境影响下出现的劣化达到耐久性能的某项规定限值或标志的状态。如影响耐久性能的裂缝、外观、材料削弱等失效现象中的任何一种都认为是超过了耐久性极限

状态的标志。

结构的极限状态可用下列极限状态函数表示：

$$Z=R-S=0 \quad (2-1)$$

式中， Z ——结构的功能函数；

R ——结构的抗力；

S ——结构的荷载效应(内力效应或变形效应)。

可见，结构按极限状态设计的重要条件如下。

结构抗力不小于结构的荷载效应： $Z=R-S \geq 0$ ，或 $R \geq S$ 。

由图 2-4 简支梁可知，内力效应 S 是荷载、构件的跨度和构件支承条件的函数，结构抗力 R 是结构构件所选用材料性质和构件截面几何特征的函数。同样，变形效应 S 是荷载、构件的跨度、构件支承条件、构件截面几何特征和材料性能的函数， R 是根据长期工程实践得到的经验限值。由此得到，结构的极限状态函数中 R 、 S 与荷载、材料有关，而荷载、材料都是随机变量，因此，结构的功能函数(Z)也是随机变量，这就意味着结构设计按承载能力极限状态设计、按正常使用极限状态设计、按耐久性极限状态设计，均是一个与概率相关的问题，即要用基于概率论的可靠度理论进行结构的承载能力设计和变形设计。

任务二 极限状态设计法

1. 结构的可靠度理论

结构的可靠度，是指结构在规定的时间内(即设计基准期内)，在规定的条件下(即正常设计、施工、使用和维护下)，完成预定功能的概率。它一般用概率 P_s 表示。需注意，结构的可靠性是指结构在规定的时间内和规定的条件下，完成其预定功能的能力。

任务一讲述了结构的极限状态函数为

$$Z=R-S \quad (2-2)$$

当 $Z > 0$ 或 $R > S$ 时，结构处于可靠状态；

当 $Z < 0$ 或 $R < S$ 时，结构处于失效状态；

当 $Z = 0$ 或 $R = S$ 时，结构处于平衡状态。

因此，结构可靠的基本条件是 $Z \geq 0$ 或 $R \geq S$ 。

由任务一可知，结构抗力 R 、荷载效应 S 、功能函数 Z 均是随机变量。假定 R 和 S 相互独立并且服从正态分布， Z 也服从正态分布，根据数理统计的概率方法，功能函数 Z 的平均值 μ_z 、标准差 σ_z 和变异系数 δ_z 分别为

$$\mu_z = \mu_R - \mu_S \quad (2-3)$$

$$\sigma_z = \sigma_R - \sigma_S \quad (2-4)$$

$$\delta_z = \sigma_z / \mu_z \quad (2-5)$$

结构功能函数分布曲线如图 2-6 所示，在纵坐标以左($Z < 0$)，其分布曲线所围成的面积