

# 一、二级注册结构工程师专业考试复习教程

2003 年版

北京市注册工程师管理委员会（结构） 编



人民交通出版社  
China Communications Press

华北水利水电学院图书馆



2010145999

TU3  
C152

# 一、二级注册结构工程师专业考试复习教程

2003 年版

北京市注册工程师管理委员会(结构) 编



人民交通出版社

1014599

## 内 容 提 要

本书由北京市注册工程师管理委员会(结构)组织编写,编写人员全部是从事多年注册结构工程师培训工作的专家和教授。本书内容已作为培训讲义使用多年,根据培训回馈意见和以往的考试经验,以及新颁布的规范、标准,对讲义进行了全面修订,现正式出版,以利应考和培训之用。

本教程的最新版以考试大纲为依据,以现行规范、规程为基础编写,目的是为了指导考生复习,因此力求简明扼要,联系实际,着重于对概念和规范的理解运用,并注意突出重点。教程的每章后均附有参考习题,可作为考生检验复习效果和准备考试之用。

本教程适合参加注册结构工程师专业考试的人员使用,是一套优秀的必备参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

一、二级注册结构工程师专业考试复习教程/北京市注册工程师管理委员会编. —北京:人民交通出版社, 2003.4

ISBN 7-114-04635-9

I. 一... II. 北... III. 建筑结构-工程师-资格考核-自学参考资料 IV. TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 020060 号

YiErJi Zhuce Jiegou Gongchengshi Zhiyanye Kaoshì Fuxi Jiaocheng

### 一、二级注册结构工程师专业考试复习教程 (2003 年版)

北京市注册工程师管理委员会(结构) 编

正文设计:姚亚妮 责任校对:尹 静 责任印制:张 恺

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷有限公司印刷

开本:787×1092 1/16 印张:62 字数:1564 千

2003 年 5 月 第 1 版

2003 年 5 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—4000 册 定价:98.00 元

ISBN 7-114-04635-9

# 一、二级注册结构工程师专业考试复习教程

## 编 委 会

主任委员 魏成林

副主任委员 于春普

主 编 曹伟浚

编 委 (以姓氏笔画为序)

于春普 方志禾 李国胜 林焕枢

柴 昶 曹伟浚 崔振亚 曾 俊

魏成林

## 前 言

建设部和人事部决定自 1997 年起实施注册结构工程师执业资格考试制度。

为了帮助结构工程师们准备考试,北京市注册工程师管理委员会(结构)自 1997 年起即委托有关单位举办一、二级注册结构工程师考试辅导班。一级注册结构工程专业考试辅导班的教师都是本专业有较深造诣的高级工程师,分别来自北京市建筑设计研究院、冶金部建筑研究总院、北京市市政专业设计院。教师们以考试大纲为依据,以现行规范、标准为基础,为学员们编写了考试复习教程。教程的目的是为了指导考生复习,因此力求简明扼要,联系实际,着重对规范的理解应用,并注意突出重点概念。

本教程是在北京市注册工程师管理委员会(结构)的组织下,严格按考试大纲编写的,在六年教学实践中不断加以改进,并在 2001 年按 2000 年新考试大纲作了较大的补充修订。自 1997 年至 2002 年,北京地区参加辅导班的考生达 5000 多人次(包括部分外地学员),本教程得到了学员们的广泛欢迎,并深受好评。为满足更多应试考生复习的需要,2003 年初,我们组织教师对教程进行了全面修订,现正式出版。参加本教程编写和修订的专家如下:第一章林焕枢,第二章柴昶,第三章和第七章崔振亚,第四章曾俊,第五章李国胜,第六章方志禾。

全国注册工程师管理委员会(结构)2002 年 7 号文件对 2003 年一、二级注册结构工程师专业考试使用的规范、规程重新作了规定,2002 年底前已颁布的新规范、规程,在 2003 年专业考试中均按新规范、规程执行,本教程已按新规范、规程修订了有关部分。

本教程是根据一级注册结构工程师专业考试大纲编写的,但同时也可作为二级注册结构工程师专业考试复习之用。根据一、二级考试大纲的不同,二级注册结构工程师专业考生不必看本教程第六章《桥梁结构》;对其他各章,作者均在文中写明二级注册结构工程师专业考生可不学习的部分,请报考二级注册结构工程师的考生在使用本教程时注意掌握。

考生在使用本教程时,应结合阅读相应的规范、规程。每章后均附有参考习题,可作为考生检验复习效果和准备考试的参考。

北京市注册工程师管理委员会(结构)

2003 年 4 月

# 目 录

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| <b>第一章 钢筋混凝土结构</b>       | 1   |
| 第一节 建筑结构荷载及极限状态设计方法      | 1   |
| 第二节 钢筋混凝土结构的基本概念和材料的基本性能 | 8   |
| 第三节 受弯构件的正截面受弯承载力        | 16  |
| 第四节 受弯构件的斜截面承载力          | 32  |
| 第五节 受压构件的截面承载力           | 42  |
| 第六节 受拉构件的截面承载力           | 71  |
| 第七节 受扭构件的扭曲截面承载力         | 73  |
| 第八节 其他承载力计算              | 84  |
| 第九节 钢筋混凝土构件的变形和裂缝宽度的验算   | 100 |
| 第十节 构造设计和结构构件的基本规定       | 110 |
| 第十一节 预应力混凝土构件设计          | 129 |
| 第十二节 钢筋混凝土结构构件的抗震设计      | 162 |
| <b>第二章 钢结构</b>           | 191 |
| 第一节 材料                   | 191 |
| 第二节 钢结构构件设计的基本规定         | 196 |
| 第三节 钢结构构件的布置与选型          | 200 |
| 第四节 基本构件的设计与计算           | 203 |
| 第五节 钢结构的疲劳计算             | 221 |
| 第六节 钢结构的塑性设计             | 226 |
| 第七节 钢与混凝土组合梁             | 228 |
| 第八节 钢结构的连接设计             | 232 |
| 第九节 钢结构设计的构造要求           | 246 |
| 第十节 钢结构防锈的基本要求           | 249 |
| 第十一节 钢结构防火的基本要求          | 254 |
| 第十二节 钢结构制作与安装的基本要求       | 257 |
| 第十三节 钢结构设计计算实例           | 260 |
| 第十四节 本章教材编写、教学说明与复习大纲    | 279 |
| 参考习题                     | 286 |
| 答案                       | 290 |
| <b>第三章 砌体结构与木结构</b>      | 292 |
| 第一节 砌体结构的应用              | 292 |
| 第二节 基本假定及砌体结构房屋墙、柱设计     | 296 |

|            |                          |            |
|------------|--------------------------|------------|
| 第三节        | 无筋砌体构件承载力计算              | 303        |
| 第四节        | 墙、柱的允许高厚比                | 310        |
| 第五节        | 墙梁、过梁、挑梁                 | 312        |
| 第六节        | 配筋砖砌体构件                  | 317        |
| 第七节        | 配筋砌块砌体构件                 | 321        |
| 第八节        | 多层砌体房屋的抗震设计              | 328        |
| 第九节        | 多层砌体结构墙体截面抗震承载力验算        | 334        |
| 第十节        | 底部框架—抗震墙房屋抗震设计及计算        | 339        |
| 第十一节       | 例题                       | 350        |
| 第十二节       | 木结构部分                    | 376        |
|            | 参考习题                     | 382        |
|            | 答案                       | 387        |
|            | 附录 1 《砌体结构设计规范》局部修订内容    | 389        |
|            | 附录 2 《多孔砖砌体结构技术规范》局部修订内容 | 397        |
| <b>第四章</b> | <b>地基与基础</b>             | <b>401</b> |
| 第一节        | 岩土工程勘察                   | 401        |
| 第二节        | 地基土(岩)的物理性质和工程分类         | 407        |
| 第三节        | 地基基础设计的原则、要求及计算          | 419        |
| 第四节        | 基础                       | 428        |
| 第五节        | 地基变形计算                   | 439        |
| 第六节        | 建筑桩基设计与计算                | 455        |
| 第七节        | 挡土墙与土坡稳定                 | 485        |
| 第八节        | 饱和液化土的处理                 | 511        |
| 第九节        | 特殊土地基                    | 514        |
| 第十节        | 山区地基                     | 515        |
| 第十一节       | 建筑地基处理                   | 523        |
| 第十二节       | 岩石锚杆基础                   | 539        |
| 第十三节       | 基坑工程                     | 540        |
| 第十四节       | 例题                       | 544        |
|            | 参考习题                     | 558        |
|            | 答案                       | 561        |
| <b>第五章</b> | <b>高层建筑结构、高耸结构及横向作用</b>  | <b>562</b> |
| 第一节        | 高层建筑设计的特点和重要概念           | 562        |
| 第二节        | 高层建筑结构荷载及地震作用            | 569        |
| 第三节        | 高层建筑设计的基本规定              | 585        |
| 第四节        | 高层建筑结构内力和位移计算            | 600        |
| 第五节        | 框架结构                     | 605        |
| 第六节        | 剪力墙结构                    | 630        |
| 第七节        | 框架—剪力墙结构                 | 662        |
| 第八节        | 筒体结构                     | 684        |
| 第九节        | 底部大空间剪力墙结构               | 691        |



|                                        |            |
|----------------------------------------|------------|
| 第十节 高层钢结构                              | 695        |
| 第十一节 高耸结构                              | 710        |
| 第十二节 例题                                | 725        |
| 参考习题                                   | 740        |
| 答案                                     | 754        |
| <b>第六章 桥梁结构</b>                        | <b>755</b> |
| 第一节 概述                                 | 755        |
| 第二节 桥梁基本构件的设计与计算                       | 769        |
| 第三节 混凝土梁桥和刚架桥                          | 790        |
| 第四节 拱桥                                 | 813        |
| 第五节 桥梁的墩台与基础                           | 828        |
| 第六节 桥梁的总体设计和抗震                         | 843        |
| 参考习题                                   | 853        |
| 答案                                     | 856        |
| <b>第七章 极限状态设计方法及静力计算方法</b>             | <b>857</b> |
| 第一节 结构设计方法的几个阶段                        | 857        |
| 第二节 极限状态设计方法                           | 858        |
| 第三节 设计中荷载的选用及组合                        | 864        |
| 第四节 极限状态的表达方法                          | 868        |
| 第五节 关于结构计算中常用力学静力计算方法的说明               | 870        |
| 第六节 截面惯性矩的计算                           | 870        |
| 第七节 静定梁的内力计算                           | 871        |
| 第八节 静定平面桁架的计算                          | 874        |
| 第九节 静定结构的位移计算                          | 879        |
| 第十节 用力法计算刚架及梁                          | 883        |
| 第十一节 用位移法计算刚架及梁                        | 894        |
| 第十二节 弯矩分配法                             | 913        |
| 第十三节 $D$ 值法计算刚架结构                      | 925        |
| 第十四节 剪力分配法                             | 931        |
| 第十五节 其他计算问题                            | 935        |
| 参考习题                                   | 966        |
| 答案                                     | 967        |
| <b>附录一 一级注册结构工程师专业考试大纲、参考书目及题量、分值等</b> | <b>969</b> |
| 1. 一级注册结构工程师专业考试大纲                     | 969        |
| 2. 一级注册结构工程师专业考试参考书目                   | 971        |
| 3. 一级注册结构工程师专业考试各科题量、分值、时间分配及题型特点      | 972        |
| <b>附录二 二级注册结构工程师专业考试大纲、参考书目及题量、分值等</b> | <b>974</b> |
| 1. 二级注册结构工程师专业考试大纲                     | 974        |
| 2. 二级注册结构工程师专业考试参考书目                   | 975        |
| 3. 二级注册结构工程师专业考试各科题量、分值、时间分配及题型特点      | 976        |
| <b>附录三 全国注册工程师管理委员会(结构)2002年7号通知</b>   | <b>978</b> |



# 第一章 钢筋混凝土结构

## 第一节 建筑结构荷载及极限状态设计方法

### 一、荷载和效应概念

#### (一)结构上的作用、作用效应和结构抗力

结构产生各种效应的原因,统称为结构上的作用。结构上的作用包括直接作用和间接作用。直接作用指的是施加在结构上的集中力或分布力,例如结构自重、楼面活荷载和设备自重等。直接作用的计算一般比较简单,引起的效应比较直观。间接作用指的是引起结构外加变形或约束变形的作用,例如温度的变化、混凝土的收缩或徐变、地基的变形和地震等,这类作用不是以直接施加在结构上的形式出现的,但同样引起结构产生效应。间接作用的计算和引起的效应一般比较复杂,例如地震会引起建筑物产生裂缝、倾斜下沉以致倒塌,但这些破坏效应不仅仅与地震震级、烈度有关,还与建筑物所在场地的地基条件、建筑物的基础类型和上部结构体系有关。

过去习惯上将上述两类不同性质的作用统称为荷载。例如将温度变化称为温度荷载,将地震作用称为地震荷载等,这样就混淆了两类不同性质的作用,特别是对间接作用的复杂性认识不足。

根据目前结构理论发展水平以及现有规范颁布的现状,对直接作用在结构上的荷载可按《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)的规定采用,对间接作用,除了对地震作用按《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)的规定采用外,其余的间接作用暂时还未制定相应的规范。

考虑到广大设计人员的现状及习惯上的衔接,目前还未将两类作用严格划分,而将其简称为荷载。

作用在结构上的直接作用或间接作用,将引起结构或结构构件产生内力(如轴力、弯矩、剪力、扭矩等)和变形(如挠度、转角、侧移、裂缝等),这些内力和变形总称为作用效应,其中由直接作用产生的作用效应称为荷载效应。

结构或结构件承受内力和变形的能力,称为结构的抗力,如构件的承载能力、刚度的大小、抗裂缝的能力等。结构抗力与结构构件的截面形式、截面尺寸及材料强度等级等因素有关。

#### (二)荷载的分类

荷载是一个不确定的随机变量。在《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)中,规定设计基准期为50年,在这段期间内,荷载不仅在量值上是变化的,并且,作用在结构上的时间持续性也是变化的。因此在荷载规范中,将荷载按以下原则进行了分类。

##### 1. 按随时间变异分类

注:本章中被※……※所标段落,为二级注册结构工程师考试不要求的内容,相应考生可不必复习。

(1)永久荷载(亦称恒载)。在设计基准期内,其量值不随时间变化,或即使有变化,其变化与平均值相比可以忽略不计的荷载。如结构的自重、土压力、预应力、基础沉降、焊接等。其中,直接作用亦称恒载。

(2)可变荷载(亦称活载)。在设计基准期内,其量值随时间变化,且其变化与平均值相比不能忽略的荷载。如楼(屋)面活荷载、屋面积灰荷载、雪荷载、风荷载、安装荷载、吊车荷载、温度变化、地震等。其中,直接作用亦称为活荷载。

(3)偶然荷载。在设计基准期内,可能出现,也可能不出现,但一旦出现,其量值很大且持续时间很短的荷载。如地震、爆炸力、撞击力等。

## 2.按随空间位置的变异分类

(1)固定荷载。在结构空间位置上具有固定分布的荷载。如结构自重、楼面上的固定设备荷载等。

(2)自由(可动)荷载。在结构上的一定范围内可以任意分布的荷载。如民用建筑楼面上的活荷载、工业建筑中的吊车荷载等。

## 3.按结构的动力反应分类

(1)静态荷载。对结构或结构构件不产生加速度或产生的加速度很小可以忽略不计。如结构的自重、楼面的活荷载等。其中,直接作用亦称为静荷载。

(2)动态荷载。对结构或构件产生不可忽略的加速度。如吊车荷载、地震荷载、设备振动、作用在高耸结构上的风荷载等。其中,直接作用亦称为动荷载。

## (三)荷载的代表值

设计中用来验算极限状态所采用的荷载量值,称为荷载代表值。例如标准值、组合值、频遇值和准永久值。

### 1.荷载标准值

荷载标准值是指在结构的设计基准期内,在正常情况下可能出现的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)。例如在荷载规范中,住宅楼面的均布活荷载规定为  $2.0\text{kN/m}^2$ 。

对于永久荷载的标准值,是按结构构件的尺寸(如梁、柱的断面)与构件采用材料的容重的标准值(如梁、柱材料为钢筋混凝土,则其容重的标准值一般取  $25\text{kN/m}^3$ )来确定的数值。对常用材料容重,可按荷载规范附录 A 采用。

对于可变荷载的标准值,则由设计基准期内最大荷载概率分布的某一分位数来确定,一般取具有 95% 保证率的上分位值。但对许多还缺少研究的可变荷载,通常还是沿用传统的经验数值。对可变荷载的标准值,可按荷载规范的规定采用。

### 2.荷载组合值

当结构上作用两种或两种以上的可变荷载时,考虑到其同时达到最大值的可能性较少,因此,在按承载能力极限状态设计或按正常使用极限状态的短期效应组合设计时,应采用荷载的组合值作为可变荷载的代表值。即对可变荷载,使组合后的荷载效应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,或使组合后的结构具有统一规定的可靠指标的荷载值。

可变荷载的组合值,为可变荷载乘以荷载组合值系数。组合值系数见《建筑结构荷载规范》(以下简称荷载规范)表 4.1.1。

### 3.荷载频遇值

对可变荷载,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。

可变荷载频遇值应取可变荷载标准值乘以荷载频遇值系数。荷载频遇值系数见荷载规范表 4.1.1。

#### 4. 荷载准永久值

对可变荷载,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。

作用在建筑物上的可变荷载(如住宅楼面上的均布活荷载为  $2.0\text{kN/m}^2$ ),其中有部分是长期作用在上面的(可以理解为在设计基准期 50 年内,不少于 25 年),而另一部分则是不出现的。因此,我们也可以把长期作用在结构物上面的那部分可变荷载看作是永久活载来对待。可变荷载的准永久值,为可变荷载标准值乘以荷载准永久值系数  $\Psi_q$ 。也就是说,准永久值系数  $\Psi_q$  为荷载准永久值与荷载标准值的比值,其值恒小于 1.0。

在荷载规范中,规定了各种不同建筑楼面上均布活荷载的准永久值系数  $\Psi_q$ ,如对住宅楼面的均布活荷载,其准永久值系数  $\Psi_q = 0.4$ ,而对书库、档案库则  $\Psi_q = 0.8$ ,这表示了对不同用途的建筑物,其准永久值系数  $\Psi_q$  是不同的。 $\Psi_q$  的大小表示了均布活荷载数值变动的大小, $\Psi_q$  大表示变动较小, $\Psi_q$  小则表示变动大。如住宅楼面的均布活荷载标准值为  $2.0\text{kN/m}^2$ ,准永久值系数  $\Psi_q = 0.4$ ,因此,荷载准永久值为  $2.0 \times 0.4 = 0.8\text{kN/m}^2$ ;而对一般书库、档案库楼面均布活荷载为  $5.0\text{kN/m}^2$ ,准永久值系数  $\Psi_q = 0.8$ ,因此荷载准永久值为  $5.0 \times 0.8 = 4.0\text{kN/m}^2$ 。

#### (四) 荷载分项系数与荷载设计值

##### 1. 荷载分项系数

荷载分项系数是在设计计算中,反映了荷载的不确定性并与结构可靠度概念相关联的一个数值。对永久荷载和可变荷载,规定了不同的分项系数。

(1)永久荷载分项系数  $\gamma_G$ :当永久荷载对结构产生的效应对结构不利时,对由可变荷载效应控制的组合取  $\gamma_G = 1.2$ ;对由永久荷载效应控制的组合取  $\gamma_G = 1.35$ ;当产生的效应对结构有利时,一般情况下取  $\gamma_G = 1.0$ ;当验算倾覆、滑移或漂浮时,取  $\gamma_G = 0.9$ ;对其余某些特殊情况,应按有关规范采用。

(2)可变荷载分项系数  $\gamma_Q$ :一般情况下取  $\gamma_Q = 1.4$ ;但对工业房屋的楼面结构,当其活荷载标准值  $> 4\text{kN/m}^2$  时,考虑到活荷载数值已较大,则取  $\gamma_Q = 1.3$ 。

##### 2. 荷载设计值

荷载设计值等于荷载代表值乘以荷载分项系数。按承载能力极限状态计算荷载效应时,需考虑荷载分项系数;按正常使用极限状态计算荷载效应时(不管是考虑荷载的短期效应组合还是长期效应组合),由于对正常使用极限状态的可靠度比对承载能力极限状态的可靠度要求可以适当放松,因此可以不考虑分项系数,即分项系数为 1.0。

#### (五) 材料强度指标的取值

##### 1. 强度标准值

材料强度标准值为结构设计时采用的材料性能的基本代表值,具有 95% 的保证率。

##### 2. 材料分项系数

材料强度分项系数是在按承载能力极限状态设计时,按可靠度指标  $[\beta]$  值在计算中所采用的系数值。在我国规范中,通过  $[\beta]$  值及材料、几何参数、荷载基本参量,求出各种结构用的

材料分项系数。混凝土强度的分项系数取  $\gamma_c = 1.4$ ; 钢筋强度分项系数按表 1-1 取值。

各类钢筋的材料分项系数  $\gamma_s$  值

表 1-1

| 项 次 | 种 类                      | $\gamma_s$     |
|-----|--------------------------|----------------|
| 1   | HPB235 (Q235)            | $\approx 1.15$ |
| 2   | HRB335, HRB400, RRB400   | $\approx 1.1$  |
| 3   | 消除应力钢丝, 刻痕钢丝, 钢绞线, 热处理钢筋 | $\approx 1.2$  |

### 3. 材料强度设计值

指材料强度标准值除以材料分项系数后的值。

在承载力极限状态设计中, 采用材料强度设计值。

## 二、建筑结构极限状态设计方法

根据《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001) 所确定的原则, 应用我国现行规范进行结构设计时, 采用的是以概率理论为基础的极限状态设计方法。

### (一) 结构的功能

结构在设计基准期内 (我国现行规范规定为 50 年), 在规定的条件下 (即正常设计、正常施工、正常使用、正常维修) 必须保证完成预定的功能, 这些功能包括:

安全性。即建筑结构必须能承受可能出现的各种作用 (如荷载、温度变化、基础不均匀沉降), 并且能在偶然事件 (如地震、爆炸) 发生时和发生后保持必需的结构整体稳定性。

适用性。建筑结构在正常使用过程中, 应保持良好的工作性能, 例如结构构件应有足够的刚度, 以免产生过大的振动和变形, 使人产生不适应的感觉。

耐久性。建筑结构在正常使用和正常维修的条件下, 应能在规定的使用年限期间内满足使用要求, 例如构件裂缝能满足设计规定的要求。

以上所述的结构的安全性、适用性和耐久性, 总称为结构的可靠性。结构可靠性的概率度量值称为结构的可靠度, 也就是说, 可靠度是指在规定的时间内和规定的条件下, 结构完成预定功能的概率。

### (二) 结构功能的极限状态

区分结构是可靠还是失效, 其分界标志就是极限状态。当整个结构或某一构件超过规定许可的某一特定状态时, 就不能满足设计所规定的某一功能的要求, 这种特定的状态即称为该功能的极限状态。

极限状态分为两类:

#### 1. 承载力极限状态

当结构或构件达到了最大承载能力, 或者产生了不适于继续承载的过大变形时, 即认为超过了承载力极限状态。例如:

(1) 整个结构或结构的一部分作为刚体失去平衡, 例如烟囱在风荷载作用下整体倾翻。

(2) 结构构件或其连接因超过材料强度而破坏 (包括疲劳破坏), 例如轴心受压短柱中的混凝土和钢筋分别达到抗压强度而破坏, 或构件因塑性变形过大而不适于继续承载。

(3) 结构转变为机动体系, 如简支梁跨中截面达到抗弯承载力形成三铰共线的机动体系, 从而丧失承载能力。

(4)结构或构件因达到临界荷载而丧失稳定,例如细长柱达到临界荷载后因压屈失稳而破坏。

(5)地基丧失承载能力而破坏(如失稳等)。

## 2. 正常使用极限状态

这种极限状态是对应于结构或构件达到正常使用或耐久性能的某项规定限值的状态。当出现下列状态之一时,即认为超过了正常使用极限状态:

(1)影响正常使用或出现明显的难以接受的变形,如梁的挠度过大影响正常使用。

(2)影响正常使用或耐久性能的局部破坏(包括裂缝)。

(3)影响正常使用的振动,如楼板的振幅过大而影响使用。

(4)影响正常使用的其他特定状态,如基础产生的不均匀沉降过大。

### (三)结构极限状态的实用设计表达式

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效应组合进行设计。

#### 1. 承载能力极限状态设计表达式

令  $S_k$  为荷载效应的标准值,  $\gamma_s$  为荷载分项系数,则荷载效应的设计值为

$$S = \gamma_s S_k \quad (1-1)$$

令  $R_k$  为结构抗力标准值,  $\gamma_R$  为抗力分项系数,二者之比为抗力设计值。

$$R = \frac{R_k}{\gamma_R} \quad (1-2)$$

考虑到结构安全等级的差异,引入结构重要性系数  $\gamma_0$ 。由

$$\gamma_0 S \leq R \quad (1-3)$$

得

$$\gamma_0 \gamma_s S_k \leq \frac{R_k}{\gamma_R} \quad (1-4)$$

上式是极限状态设计的简单表达式。实际上,荷载效应中的荷载分为永久荷载和可变荷载,且可变荷载不止一个,同时,可变荷载对结构的影响有大有小,多个可变荷载也不一定会同时发生。例如,高层建筑各楼层可变荷载全部满载且遇到最大风荷载的可能性就不大。考虑到两个或两个以上可变荷载同时出现的可能性较小,因此引入荷载组合值系数对其标准值进行折减。

按承载能力极限状态设计时,应考虑作用效应的基本组合,必要时尚应考虑作用效应的偶然组合。《建筑结构荷载规范》规定:对于基本组合,荷载效应组合的设计值应从由可变荷载效应控制的组合和由永久荷载效应控制的两组组合中取最不利值确定。

对由可变荷载效应控制的组合,其承载能力极限状态设计表达式一般形式为

$$\begin{aligned} & \gamma_0 (\gamma_G C_G G_k + \gamma_{Q1} C_{Q1} Q_{1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{Ci} C_{Qi} Q_{ik}) \leq R \left( \frac{f_{sk}}{\gamma_s}, \frac{f_{ck}}{\gamma_c}, a_k, \dots \right) \\ & = R(f_s, f_c, a_k, \dots) \end{aligned} \quad (1-5)$$

对由永久荷载效应控制的组合,其承载能力极限状态设计表达式的一般形式为

$$\begin{aligned} & \gamma_0 (\gamma_G C_G G_k + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \psi_{Ci} C_{Qi} Q_{ik}) \leq R \left( \frac{f_{sk}}{\gamma_s}, \frac{f_{ck}}{\gamma_c}, a_k, \dots \right) \\ & = R(f_s, f_c, a_k, \dots) \end{aligned} \quad (1-6)$$

上述式中:  $\gamma_0$ ——结构构件的重要性系数,与安全等级相对应,对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;

$G_k$ ——永久荷载标准值(符号  $G$  表示永久荷载);

$Q_{1k}$ ——最大的一个可变荷载的标准值(符号  $Q$  表示可变荷载);

$Q_{ik}$ ——其余可变荷载的标准值;

$\gamma_G, \gamma_{Q1}, \gamma_{Qi}$ ——永久荷载、最大的一个可变荷载、其他可变荷载的分项系数,当永久荷载效应对结构不利时,对由可变荷载效应控制的组合  $\gamma_G$  取 1.2;对由永久荷载效应控制的组合  $\gamma_G$  取 1.35,当永久荷载效应对结构有利时,取  $\gamma_G = 1.0$ ;对结构的倾覆、滑移或漂浮验算时,  $\gamma_G = 0.9$ ;可变荷载的分项系数  $\gamma_{Q1}, \gamma_{Qi}$  一般情况下取 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;

$C_G, C_{Q1}, C_{Qi}$ ——分别为永久荷载、第一个可变荷载、其他可变荷载的荷载效应系数,即由荷载求出荷载效应(如荷载引起的弯矩、剪力、轴力和变形等)须乘的系数,例如,对跨度为  $l$  承受均布荷载的简支梁,跨中弯矩的荷载效应系数为  $\frac{1}{8}l^2$ ;

$\psi_{Ci}$ ——可变荷载组合值系数。

以上不等式右侧为结构承载力,用承载力函数  $R(\cdots)$  表示,表明其为混凝土和钢筋强度标准值( $f_{ck}, f_{sk}$ )、分项系数( $\gamma_G, \gamma_S$ )、几何尺寸标准值( $a_k$ )以及其他参数的函数。

## 2. 正常使用极限状态设计表达式

正常使用极限状态设计,主要是验算构件的变形、抗裂度或裂缝的宽度。按正常使用极限状态设计时,构件变形过大或裂缝过宽虽然影响正常使用,但是危害程度比起承载力引起的结构破坏造成的损失要小,所以可适当降低对其可靠度的要求。《建筑结构可靠度设计统一标准》规定计算时取荷载标准值,不需乘分项系数,也不考虑结构重要性系数  $\gamma_0$ 。在正常使用状态下,可变荷载作用时间的长短对于变形和裂缝的大小显然是有影响的。可变荷载的最大值并非长期作用于结构上,所以应按其在设计基准期内作用时间的长短和可变荷载超越的总时间或超越的次数,对其标准值进行折减。《建筑结构可靠度设计统一标准》采用一个小于 1 的准永久值系数和频遇值系数来考虑这种折减。荷载的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持续时间与设计基准期内总持续时间的比值而确定。荷载的准永久值系数乘以可变荷载标准值称为荷载的准永久值。可变荷载的频遇值系数,是根据在设计基准期间可变荷载超越的总时间或超越的次数来确定的。荷载的频遇值系数乘以可变荷载标准值称为荷载的频遇值。

这样,可变荷载就有四种代表值,即标准值、组合值、准永久值和频遇值。其中标准值称为基本代表值,其他代表值可由基本代表值乘以相应的系数得到。各类可变荷载和相应的组合值系数、准永久值系数、频遇值系数可在荷载规范中查到。

根据实际设计的需要,常要区分荷载的短期作用(标准组合、频遇组合)和荷载的长期作用(准永久组合)下构件的变形大小和裂缝宽度计算。所以,《建筑结构可靠度设计统一标准》规定按不同的设计目的,分别选用荷载的标准组合、频遇组合和荷载的准永久组合。对标准组合,主要用于当一个极限状态被超越时将产生严重的永久性损害的情况。对频遇组合,即主要

用于当一个极限状态被超越时将产生局部损害、较大变形或短暂振动的情况,而准永久组合则主要用在当长期效应是决定性因素的情况。

按荷载的标准组合时,荷载效应组合的设计值  $S$  应按下式计算

$$S = C_G G_k + C_{Q1} Q_{1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{Ci} C_{Qi} Q_{ik} \quad (1-7)$$

式中,永久荷载及第一个可变荷载采用标准值,其他可变荷载均采用组合值。 $\psi_{Ci}$ 为可变荷载组合值系数。

按荷载的频遇组合时,荷载效应组合的设计值  $S$  应按下式计算

$$S = C_G G_k + \psi_n C_{Q1} Q_{1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{qi} C_{Qi} Q_{ik} \quad (1-8)$$

式中: $\psi_n$ ——可变荷载  $Q_1$  的频遇值系数;

$\psi_{qi}$ ——可变荷载  $Q_i$  的准永久值系数。

按荷载的准永久组合时,荷载效应组合的设计值  $S$  应按下式计算

$$S = C_G G_k + \sum_{i=1}^n \psi_{qi} C_{Qi} Q_{ik} \quad (1-9)$$

式中: $\psi_{qi}$ ——可变荷载准永久值系数。

荷载效应的计算由下例说明。

**【例题 1-1】** 某办公楼楼面采用预应力混凝土空心板,安全等级定为二级。板长 3.3m,计算跨度 3.18m,板宽 0.9m,板自重  $2.04\text{kN/m}^2$ ,后浇混凝土面层厚 40mm,板底抹灰厚 20mm,可变荷载取  $1.5\text{kN/m}^2$ ,准永久值系数为 0.4。试计算按承载能力极限状态和正常使用极限状态设计时的截面弯矩设计值。

解:永久荷载标准值:

|            |                                     |
|------------|-------------------------------------|
| 自重         | $2.04\text{kN/m}^2$                 |
| 40mm 后浇面层  | $25 \times 0.04 = 1\text{kN/m}^2$   |
| 20mm 板底抹灰层 | $20 \times 0.02 = 0.4\text{kN/m}^2$ |
| <hr/>      |                                     |
|            | $3.44\text{kN/m}^2$                 |

沿板长每延米均布荷载标准值为

$$0.9 \times 3.44 = 3.1\text{kN/m}$$

可变荷载每延米标准值为

$$0.9 \times 1.5 = 1.35\text{kN/m}$$

在均布荷载作用下简支板的弯矩为

$$M = (1/8)ql^2$$

荷载效应系数为

$$(1/8)l^2 = (1/8) \times 3.18^2 = 1.26$$

题中只有一种可变荷载,因此弯矩为

$$M = \gamma_0(\gamma_G C_G G_k + \gamma_{Q1} C_{Q1} Q_{1k})$$

取  $\gamma_0 = 1.0$ ,  $\gamma_G = 1.2$ ,  $\gamma_{Q1} = 1.4$ ,  $C_G = C_{Q1} = 1.26$ ,  $G_k = 3.1$ ,  $Q_{1k} = 1.35$ 。

按承载能力极限状态设计时,按可变荷载效应控制的组合弯矩设计值为

$$M = 1.0(1.2 \times 1.26 \times 3.1 + 1.4 \times 1.26 \times 1.35) = 7.07\text{kN} \cdot \text{m}$$



按正常使用极限状态设计时弯矩设计值

按荷载的标准组合时为

$$M = 1.26 \times 3.1 + 1.26 \times 1.35 = 5.61 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

按荷载的准永久组合时为

$$M = 1.26 \times 3.1 + 0.4 \times 1.26 \times 1.35 = 4.59 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

上例中仅有一个可变荷载,计算较为简单。若有二个或二个以上可变荷载,则需确定其中哪一个可变荷载的影响最大,并取之为  $Q_{1k}$ ,即第一个可变荷载,其余可变荷载均作为  $Q_{ik}$ 。在实际设计中,判别可变荷载中哪一个的影响最大常较为困难。《建筑结构可靠度设计统一标准》规定,对于一般常遇的排架结构和框架结构,为了简化计算,可变荷载的影响大小可以不予区分,并采用相同的组合值系数,其承载能力极限状态设计表达式可以简化表达为

$$\gamma_0(\gamma_G C_G G_k + 0.9 \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} C_{Qi} Q_{ik}) \leq R(f_s, f_c, a_k) \quad (1-10)$$

对由永久荷载效应控制的组合,其承载能力极限状态设计表达式仍为(1-6)式。

## 第二节 钢筋混凝土结构的基本概念和材料的基本性能

### 一、钢筋混凝土的基本概念

混凝土的抗压强度很高,但抗拉强度很低,在拉应力处于很小的状态时即出现裂缝,影响了构件的使用,为了提高构件的承载能力,在构件中配置一定数量的钢筋,用钢筋承担拉力而让混凝土承担压力,发挥各自材料的特性,从而可以使构件的承载能力得到很大的提高。这种由混凝土和钢筋两种材料组成的构件,就成为钢筋混凝土结构。

钢筋和混凝土这两种材料能有效地结合在一起共同工作,主要是由于混凝土凝结后,钢筋与混凝土之间产生了良好的粘结力,使两者可靠地结合在一起,从而保证了在荷载作用下构件中的钢筋与混凝土协调变形、共同受力。其次,钢筋与混凝土两种材料的温度线膨胀系数很接近,混凝土:  $(1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5})/^{\circ}\text{C}$ , 钢:  $(1.2 \times 10^{-5})/^{\circ}\text{C}$ , 因此,当温度变化时,不致产生较大的温度应力而破坏两者之间的粘结。

钢筋混凝土具有以下特点:

1. 节约钢材,降低造价。由于合理地利用了两种材料的特性,使构件强度较高,刚度较大,比起钢结构来可节约钢材;
2. 耐久性和耐火性较好。由于混凝土对钢筋起到保护作用,使构件的耐久性和耐火性明显优于钢结构;
3. 可塑性好。根据需要,钢筋混凝土可浇筑成各种形状和尺寸的结构;
4. 现浇钢筋混凝土结构整体性好、刚度大,又具有一定的延性,有利于抗震、抵抗振动和爆炸冲击波;
5. 可以就地取材。钢筋混凝土中的砂、石一般可以就地取材,降低造价。

由于钢筋混凝土具有以上优点,因此,在建筑结构中得到了广泛的应用。但是,钢筋混凝土也存在着自重大、抗裂性差、隔热隔声性能较差、施工现场作业劳动量大等缺点。这些缺点,随着技术的进步(如轻质高强混凝土和预应力混凝土)将会逐步得到克服和改善。

## 二、混凝土材料的力学性能

### (一)混凝土强度标准值

#### 1. 立方体抗压强度 $f_{cu,k}$

混凝土强度等级应按立方体抗压强度标准值确定,立方体抗压强度标准值是混凝土各种力学指标的基本代表值。

混凝土的立方体抗压强度是根据边长为 150mm 的立方体试件,用标准方法制作和养护(即温度为  $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度  $\geq 90\%$  以上),经 28 天龄期,用标准试验方法(加荷速度:当混凝土强度等级低于 C30 时,为每秒  $0.3 \sim 0.5\text{MPa}$ ;当混凝土强度等级等于或高于 C30 时,为每秒  $0.5 \sim 0.8\text{MPa}$ )进行抗压试验,测得的具有 95% 保证率的抗压强度极限值。

我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)规定,将混凝土的强度等级分为 14 级: C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75、C80。符号中 C 表示混凝土, C 后面的数字表示立方体抗压强度标准值,单位为 MPa。

混凝土的立方体抗压强度与下列因素有关:

- (1)试件表面不涂油的强度大于涂油的强度;
- (2)加荷时试件的龄期越早,强度越低;
- (3)试件的尺寸越小,强度越高,这种现象称为尺寸效应;
- (4)加载速度越快,强度越高。

#### 2. 轴心抗压强度标准值 $f_{ck}$

轴心抗压强度  $f_c$  亦称为棱柱体抗压强度。设计中通常采用的构件并不是立方体构件,而是长度往往大于边长。根据试验结果,随着长度的增加,抗压强度亦随之降低,但当长宽比大于一定数值后,抗压强度值即趋于定值。试验中取  $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 300\text{mm}$  的棱柱体作为试块,试件上下表面不涂润滑剂。上述棱柱体试件测得的具有 95% 保证率的抗压强度为混凝土轴心抗压强度标准值。应该注意,在新规范 GB 50010—2002 中,将原规范 GBJ 10—89 中的弯曲抗压强度  $f_{cm,k}$ 、 $f_{cm}$  取消。

#### 3. 抗拉强度标准值 $f_{tk}$

混凝土抗拉强度一般取圆柱体或立方体为试件,通过劈裂试验间接测试混凝土的轴心抗拉强度。

混凝土的抗拉强度取决于水泥石(在凝结硬化过程中,水泥和水形成水泥石)的强度和水泥石与骨料间的粘结强度。采用增加水泥用量减少水灰比以及采用表面粗糙的骨料,可提高混凝土的抗拉强度。

混凝土的抗拉强度很低,大约只相当于立方体抗压强度的  $1/17 \sim 1/8$ 。

以上混凝土轴心抗压强度标准值及抗拉强度标准值均可通过立方体抗压强度求得。

※轴心抗压强度标准值与立方体抗压强度标准值按下式确定:

$$f_{ck} = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k}$$

式中:  $\alpha_{c1}$ ——对普通混凝土为 0.76,对高强混凝土则大于 0.76。规范取 C50 及以下为 0.76,对 C80 取 0.82,中间值按线性规律变化;

$\alpha_{c2}$ ——对 C40 以上混凝土考虑的脆性折减系数,对 C40 取 1.0,对 C80 取 0.87,中间值按线性规律变化。