



21st CENTURY

实用规划教材

21世纪全国应用型本科**土木建筑系列**实用规划教材



# 荷载与结构设计方法

|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 主 编 | 许成祥 | 何培玲 |
| 副主编 | 刘开敏 | 陈卫华 |
| 主 审 | 徐礼华 |     |



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国应用型本科土木建筑系列实用规划教材

# 荷载与结构设计方法

|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 主 编 | 许成祥 | 何培玲 |
| 副主编 | 刘开敏 | 陈卫华 |
| 参 编 | 高妍妍 |     |
| 主 审 | 徐礼华 |     |



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书参照全国高等学校土木工程专业指导委员会对土木工程专业学生的基本要求和审定的教学大纲而编写。全书共分为 10 章,包括:绪论;重力荷载;风荷载;地震作用;侧压力;其他荷载与作用;荷载的统计分析;结构构件抗力的统计分析;结构可靠度分析与计算;概率极限状态设计法。各章除附有思考题和习题外,还附有教学提示和教学要求,便于教学使用。

本教材可作为高等学校土木工程及相关专业的教学用书,也可用做继续教育的教材或土木设计和工程技术人员参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

荷载与结构设计方法/许成祥,何培玲主编. —北京:北京大学出版社,2006.6

(21 世纪全国应用型本科土木建筑系列实用规划教材)

ISBN 7-301-10754-4

I. 荷… II. ①许… ②何… III. ①工程结构—结构荷载—高等学校—教材②工程结构—结构设计—高等学校—教材 IV. TU31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 057966 号

书 名: 荷载与结构设计方法

著作责任者: 许成祥 何培玲 主编

策划编辑: 吴 迪 李昱涛

责任编辑: 李娉婷

标准书号: ISBN 7-301-10754-4/TU · 0040

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667

电子信箱: [pup\\_6@163.com](mailto:pup_6@163.com)

排 版 者: 北京东方人华北大彩印中心 电话: 62754190

印 刷 者: 河北涿县鑫华书刊印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.25 印张 295 千字

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 20.00 元

# 《21 世纪全国应用型本科土木建筑系列实用规划教材》

## 专家编审委员会

主 任 彭少民

副主任 (按拼音顺序排名)

陈伯望 金康宁 李 忱 李 杰

罗迎社 彭 刚 许成祥 杨 勤

俞 晓 袁海庆 周先雁 张俊彦

委 员 (按拼音顺序排名)

邓寿昌 付晓灵 何放龙 何培玲

李晓目 李学罡 刘 杰 刘建军

刘文生 罗 章 石建军 许 明

严 兵 张泽平 张仲先

# 丛书总序

我国高等教育发展迅速,全日制高等学校每年招生人数至2004年已达到420万人,毛入学率19%,步入国际公认的高等教育“大众化”阶段。面临这种大规模的扩招,教育事业的发展与改革坚持以人为本的两个主体:一是学生,一是教师。教学质量的提高是在这两个主体上的反映,教材则是两个主体的媒介,属于教学的载体。

教育部曾在第三次新建本科院校教学工作研讨会上指出:“一些高校办学定位不明,盲目追求上层次、上规格,导致人才培养规格盲目拔高,培养模式趋同。高校学生中‘升本热’、‘考研热’、‘考博热’持续升温,应试学习倾向仍然比较普遍,导致各层次人才培养目标难于全面实现,大学生知识结构不够合理,动手能力弱,实际工作能力不强。”而作为知识承载体的教材,在高等教育的发展过程中起着至关重要的作用,但目前教材建设却远远滞后于应用型人才培养的步伐,许多应用型本科院校一直沿用偏重于研究型的教材,缺乏针对性强的实用教材。

近年来,我国房地产行业已经成为国民经济的支柱产业之一,随着本世纪我国城市化的大趋势,土木建筑行业对实用型人才的需求还将持续增加。为了满足相关应用型本科院校培养应用型人才的教学需求,从2004年10月北京大学出版社第六事业部就开始策划本套丛书,并派出10多位编辑分赴全国近30个省份调研了两百多所院校的课程改革与教材建设的情况。在此基础上,规划出了涵盖“大土建”六个专业——土木工程、工程管理、建筑学、城市规划、给排水、建筑环境与设备工程的基础课程及专业主干课程的系列教材。通过2005年1月份在湖南大学的组稿会和2005年4月份在三峡大学的审纲会,在来自全国各地几十所高校的知名专家、教授的共同努力下,不但成立了本丛书的编审委员会,还规划出了首批包括土木工程、工程管理及建筑环境与设备工程等专业方向的40多个选题,再经过各位主编老师和参编老师的艰苦努力,并在北京大学出版社各级领导的关心和第六事业部的各位编辑辛勤劳动下,首批教材终于2006年春季学期前夕陆续出版发行了。

在首批教材的编写出版过程中,得到了越来越多的来自全国各地相关兄弟院校的领导和专家的大力支持。于是,在顺利运作第一批土建教材的鼓舞下,北京大学出版社联合全国七十多家开设有土木建筑相关专业的高校,于2005年11月26日在长沙中南林学院召开了《21世纪全国应用型本科土木建筑系列实用规划教材》(第二批)组稿会,规划了①建筑学专业;②城市规划专业;③建筑环境与设备工程专业;④给排水工程专业;⑤土木工程专业道路、桥梁、地下、岩土、矿山课群组近60多个选题。至此,北京大学出版社规划的“大土木建筑系列教材”已经涵盖了“大土建”的6个专业,是近年来全国高等教育出版界唯一一套完全覆盖“大土建”六个专业方向的系列教材,并将于2007年全部出版发行。

我国高等学校土木建筑专业的教育,在国家教育部和建设部的指导下,经土木建筑专业指导委员会六年来的研讨,已经形成了宽口径“大土建”的专业发展模式,明确了土木建筑专业教育的培养目标、培养方案和毕业生基本规格,从宽口径的视角,要求毕业生能从事土木工程的设计、施工与管理工作。业务范围涉及房屋建筑、隧道与地下建筑、公路

与城市道路、铁道工程与桥梁、矿山建筑等,并且制定一整套课程教学大纲。本系列教材就是根据最新的培养方案和课程教学大纲,由一批长期在教学第一线从事教学并有多年工程经验和丰富教学经验的教师担任主编,以定位“应用型人才培养”为目标而编撰,具有以下特点:

(1) 按照宽口径土木工程专业培养方案,注重提高学生综合素质和创新能力,注重加强学生专业基础知识和优化基本理论知识结构,不刻意追求理论研究型教材深度,内容取舍少而精,向培养土木工程师从事设计、施工与管理的应用方向拓展。

(2) 在理解土木工程相关学科的基础上,深入研究各课程之间的相互关系,各课程教材既要反映本学科发展水平,保证教材自身体系的完整性,又要尽量避免内容的重复。

(3) 培养学生,单靠专门的设计技巧训练和运用现成的方法,要取得专门实践的成功是不够的,因为这些方法随科学技术的发展经常在改变。为了了解并和这些迅速发展的方法同步,教材的编撰侧重培养学生透彻理解教材中的基本理论、基本特性和性能,又同时熟悉现行设计方法的理论依据和工程背景,以不变应万变,这是本系列教材力图涵盖的两个方面。

(4) 我国颁发的现行有关土木工程类的规范及规程,系1999~2002年完成的修订,内容较大的取舍和更新,反映了我国土木工程设计与施工技术的发展。作为应用型教材,为培养学生毕业后获得注册执业资格,在内容上涉及不少相关规范条文和算例。但并不是规范条文的释义。

(5) 当代土木工程设计,越来越多地使用计算机程序或采用通用性的商业软件,有些结构特殊要求,则由工程师自行编写程序。本系列的相关工程结构课程的教材中,在阐述真实结构、简化计算模型、数学表达式之间的关系的基础上,给出了设计方法的详细步骤,这些步骤均可容易地转换成工程结构的流程图,有助于培养学生编写计算机程序。

(6) 按照科学发展观,从可持续发展的观念,根据课程特点,反映学科现代新理论、新技术、新材料、新工艺,以社会发展和科技进步的新近成果充实、更新教材内容,尽最大可能在教材中增加了这方面的信息量。同时考虑开发音像、电子、网络等多媒体教学形式,以提高教学效果和效率。

衷心感谢本套系列教材的各位编著者,没有他们在教学第一线的教改和工程第一线的辛勤实践,要出版如此规模的系列实用教材是不可能的。同时感谢北京大学出版社为我们广大编著者提供了广阔的平台,为我们进一步提高本专业领域的教学质量和教学水平提供了很好的条件。

我们真诚希望使用本系列教材的教师和学生,不吝指正,随时给我们提出宝贵的意见,以期进一步对本系列教材进行修订、完善。

本系列教材配套的PPT电子教案以及习题答案在出版社相关网站上提供下载。

《21世纪全国应用型本科土木建筑系列实用规划教材》

专家编审委员会

2006年1月

# 前 言

“荷载与结构设计方法”是土木工程专业必修的专业基础课程。该课程分两部分：一部分介绍工程结构可能承受的各种荷载与作用；另一部分介绍工程结构设计的可靠度背景。通过对本课程的学习，学生应掌握工程结构设计时需考虑的各种主要荷载，这些荷载产生的背景，以及各种荷载的计算方法；并掌握结构设计的主要概念、结构可靠度原理和满足可靠度要求的结构设计方法。

本书参照全国高等学校土木工程专业指导委员会对土木工程专业的学生的基本要求和审定的教学大纲而编写。教材编写内容力求做到符合国家现行结构设计规范、规程和标准要求，反映工程结构荷载取值和结构设计方法在理论和实践上的新进展。

本教材由长期担任该课程的教师共同编写。参加编写的教师有：何培玲、高妍妍(第1章～第6章)、刘开敏(第7章、第8章)、许成祥(第9章)、陈卫华(第10章)。全书由许成祥统稿。

全国高校土木工程专业指导委员会委员、武汉大学徐礼华教授在百忙之中为本教材审阅，并提出宝贵意见，在此表示诚挚谢意。

由于编者知识所限，书中难免有缺点和错误，敬请读者批评指正。

编 者

2006年2月10日

# 目 录

## 第 1 章 绪论.....1

- 1.1 结构上的作用及作用效应.....1
  - 1.1.1 结构上的作用.....1
  - 1.1.2 作用效应  $S$ .....2
- 1.2 工程结构设计理论演变简况.....3
  - 1.2.1 容许应力设计法.....3
  - 1.2.2 破损阶段设计法.....3
  - 1.2.3 多系数极限状态设计法.....4
  - 1.2.4 概率极限状态设计法.....4
- 1.3 思考题.....5

## 第 2 章 重力荷载.....6

- 2.1 结构自重.....6
- 2.2 土的自重应力.....7
- 2.3 雪荷载.....8
  - 2.3.1 基本雪压.....8
  - 2.3.2 雪荷载标准值、组合值系数、频遇值系数及准永久值系数.....13
  - 2.3.3 屋面积雪分布系数.....13
- 2.4 车辆荷载.....15
  - 2.4.1 公路桥梁车辆荷载.....15
  - 2.4.2 城市桥梁汽车荷载.....16
- 2.5 人群荷载.....18
  - 2.5.1 公路桥梁人群荷载.....18
  - 2.5.2 城市桥梁人群荷载.....18
- 2.6 吊车荷载.....19
  - 2.6.1 吊车工作制等级与工作级别.....19
  - 2.6.2 吊车竖向荷载和水平荷载.....19
- 2.7 楼面和屋面活荷载.....22
  - 2.7.1 楼面活荷载的取值原则.....22

- 2.7.2 民用建筑楼面均布活荷载.....24
- 2.7.3 工业建筑楼面活荷载.....27
- 2.7.4 屋面活荷载和屋面积灰荷载.....30
- 2.7.5 施工、检修荷载及栏杆水平荷载.....33

- 2.8 思考题.....34
- 2.9 习题.....34

## 第 3 章 风荷载.....36

- 3.1 风的有关知识.....36
  - 3.1.1 风的形成.....36
  - 3.1.2 两类性质的大风.....36
  - 3.1.3 我国风气候总况.....37
  - 3.1.4 风级.....37
- 3.2 风压.....38
  - 3.2.1 风速与风压的关系.....38
  - 3.2.2 基本风压.....39
  - 3.2.3 非标准条件下的风速或风压的换算.....40
- 3.3 风压高度变化系数.....41
- 3.4 风荷载体型系数.....44
  - 3.4.1 单体风载体型系数.....44
  - 3.4.2 群体风压体型系数.....46
  - 3.4.3 局部风压体型系数.....47
- 3.5 结构抗风计算的几个重要概念.....47
  - 3.5.1 结构的风力与风效应.....47
  - 3.5.2 顺风向平均风与脉动风.....48
  - 3.5.3 横风向风振.....48
- 3.6 顺风向结构风效应.....50
  - 3.6.1 风振系数.....50
  - 3.6.2 脉动增大系数.....50
  - 3.6.3 结构振型系数.....51
  - 3.6.4 脉动影响系数.....52



|                               |           |                                     |            |
|-------------------------------|-----------|-------------------------------------|------------|
| 3.6.5 结构基本周期经验公式.....         | 53        | 5.1.5 板桩墙及支撑板上的<br>土压力 .....        | 102        |
| 3.6.6 阵风系数.....               | 54        | 5.1.6 涵洞上的土压力 .....                 | 105        |
| 3.6.7 顺风向风荷载标准值.....          | 55        | 5.2 静水压力及流水压力 .....                 | 108        |
| 3.7 横风向结构风效应 .....            | 55        | 5.2.1 静水压力 .....                    | 108        |
| 3.7.1 锁定现象.....               | 55        | 5.2.2 流水压力 .....                    | 109        |
| 3.7.2 共振区高度.....              | 55        | 5.3 波浪荷载 .....                      | 111        |
| 3.7.3 横风向风振验算.....            | 56        | 5.3.1 波浪特性 .....                    | 111        |
| 3.8 结构总风效应 .....              | 58        | 5.3.2 波浪荷载 .....                    | 112        |
| 3.9 思考题 .....                 | 58        | 5.4 冰荷载 .....                       | 116        |
| 3.10 习题 .....                 | 58        | 5.4.1 冰堆整体推移的静压力 .....              | 117        |
| <b>第4章 地震作用</b> .....         | <b>60</b> | 5.4.2 大面积冰层的静压力 .....               | 117        |
| 4.1 地震的有关知识 .....             | 61        | 5.4.3 冰覆盖层受到温度影响<br>膨胀时产生的静压力 ..... | 118        |
| 4.1.1 地震的产生和类型.....           | 62        | 5.4.4 冰层因水位升降产生的<br>竖向作用力 .....     | 118        |
| 4.1.2 地震成因.....               | 62        | 5.4.5 流冰冲击力 .....                   | 119        |
| 4.1.3 地震分布.....               | 63        | 5.5 思考题 .....                       | 120        |
| 4.1.4 地震波、震级及地震烈度.....        | 64        | 5.6 习题 .....                        | 120        |
| 4.2 地震作用 .....                | 68        | <b>第6章 其他荷载与作用</b> .....            | <b>121</b> |
| 4.2.1 地震烈度区划与基本烈度.....        | 68        | 6.1 温度作用 .....                      | 121        |
| 4.2.2 单自由度弹性体系<br>地震作用.....   | 69        | 6.1.1 温度作用的概念 .....                 | 121        |
| 4.3 多质点体系的地震作用 .....          | 78        | 6.1.2 温度应力的计算 .....                 | 121        |
| 4.3.1 计算简图.....               | 78        | 6.2 变形作用 .....                      | 123        |
| 4.3.2 运动方程.....               | 79        | 6.3 爆炸作用 .....                      | 124        |
| 4.3.3 自由振动.....               | 80        | 6.3.1 爆炸的概念及其类型 .....               | 124        |
| 4.3.4 方程解耦.....               | 81        | 6.3.2 爆炸对结构的影响及<br>荷载计算 .....       | 125        |
| 4.3.5 方程求解.....               | 82        | 6.4 浮力作用 .....                      | 127        |
| 4.3.6 多质点体系的地震作用<br>计算方法..... | 83        | 6.5 制动力 .....                       | 128        |
| 4.3.7 底部剪力法计算地震作用.....        | 87        | 6.5.1 汽车制动力 .....                   | 128        |
| 4.4 思考题 .....                 | 90        | 6.5.2 吊车制动力 .....                   | 128        |
| 4.5 习题 .....                  | 90        | 6.5.3 汽车竖向冲击力 .....                 | 129        |
| <b>第5章 侧压力</b> .....          | <b>92</b> | 6.5.4 汽车水平撞击力 .....                 | 130        |
| 5.1 土的侧压力 .....               | 92        | 6.6 离心力 .....                       | 130        |
| 5.1.1 土的侧向压力分类.....           | 92        | 6.7 预应力 .....                       | 131        |
| 5.1.2 土压力的基本原理.....           | 93        | 6.7.1 预应力的概念 .....                  | 131        |
| 5.1.3 土的侧压力计算.....            | 95        | 6.7.2 预应力混凝土的分类 .....               | 131        |
| 5.1.4 工程中挡土墙土压力计算.....        | 98        |                                     |            |

|                                |     |                                |     |
|--------------------------------|-----|--------------------------------|-----|
| 6.8 思考题 .....                  | 134 | 9.1.1 结构的功能要求和<br>极限状态 .....   | 154 |
| 6.9 习题 .....                   | 135 | 9.1.2 结构抗力 .....               | 155 |
| <b>第 7 章 荷载的统计分析</b> .....     | 136 | 9.1.3 结构功能函数 .....             | 155 |
| 7.1 荷载的概率模型 .....              | 136 | 9.1.4 结构可靠度和可靠指标 .....         | 156 |
| 7.1.1 平稳二项随机过程模型 .....         | 136 | 9.2 结构可靠度计算 .....              | 158 |
| 7.1.2 荷载统计参数分析 .....           | 137 | 9.2.1 均值一次二阶矩法 .....           | 158 |
| 7.2 荷载效应组合规则 .....             | 139 | 9.2.2 改进的一次二阶矩法 .....          | 159 |
| 7.3 常遇荷载的统计分析 .....            | 140 | 9.2.3 JC 法 .....               | 162 |
| 7.3.1 永久荷载 .....               | 140 | 9.3 相关随机变量的结构可靠度计算 .....       | 165 |
| 7.3.2 民用楼面活荷载 .....            | 141 | 9.3.1 变量相关的概念 .....            | 165 |
| 7.3.3 办公楼楼面活荷载的<br>统计参数 .....  | 143 | 9.3.2 相关变量的变换 .....            | 166 |
| 7.3.4 住宅楼楼面活荷载的<br>统计参数 .....  | 143 | 9.3.3 相关变量可靠指标的计算 .....        | 168 |
| 7.4 荷载的代表值 .....               | 143 | 9.4 结构体系的可靠度计算 .....           | 169 |
| 7.4.1 荷载标准值 .....              | 143 | 9.4.1 结构体系可靠度 .....            | 169 |
| 7.4.2 荷载准永久值 .....             | 144 | 9.4.2 结构系统的基本模型 .....          | 170 |
| 7.4.3 荷载组合值 .....              | 144 | 9.4.3 结构系统中功能函数的<br>相关性 .....  | 171 |
| 7.4.4 荷载频遇值 .....              | 144 | 9.4.4 结构体系可靠度计算方法 .....        | 172 |
| 7.5 思考题 .....                  | 146 | 9.5 思考题 .....                  | 178 |
| 7.6 习题 .....                   | 146 | 9.6 习题 .....                   | 178 |
| <b>第 8 章 结构构件抗力的统计分析</b> ..... | 147 | <b>第 10 章 概率极限状态设计法</b> .....  | 180 |
| 8.1 结构构件抗力的不定性 .....           | 147 | 10.1 结构设计的目标 .....             | 180 |
| 8.1.1 结构构件材料性能的<br>不定性 .....   | 147 | 10.1.1 设计要求 .....              | 180 |
| 8.1.2 结构构件几何参数的<br>不定性 .....   | 149 | 10.1.2 目标可靠指标 .....            | 182 |
| 8.1.3 结构构件计算模式的<br>不定性 .....   | 150 | 10.2 直接概率设计法 .....             | 184 |
| 8.2 结构构件抗力的统计特征 .....          | 151 | 10.2.1 一般概念 .....              | 184 |
| 8.2.1 结构构件抗力的统计参数 .....        | 151 | 10.2.2 直接概率法的基本方法 .....        | 184 |
| 8.2.2 结构构件抗力的分布类型 .....        | 152 | 10.3 概率极限状态的实用设计表达式 ...        | 186 |
| 8.3 材料强度的标准值和设计值 .....         | 152 | 10.3.1 承载能力极限状态设计<br>表达式 ..... | 186 |
| 8.4 思考题 .....                  | 153 | 10.3.2 正常使用极限状态设计<br>表达式 ..... | 188 |
| 8.5 习题 .....                   | 153 | 10.3.3 结构抗震设计表达式 .....         | 190 |
| <b>第 9 章 结构可靠度分析与计算</b> .....  | 154 | 10.4 思考题 .....                 | 192 |
| 9.1 结构可靠度的基本概念 .....           | 154 | 10.5 习题 .....                  | 192 |
|                                |     | <b>附录</b> .....                | 193 |
|                                |     | <b>参考文献</b> .....              | 195 |

# 第1章 绪 论

**教学提示：**本章介绍了结构上的作用与作用效应，作用按时间变化、空间位置变异，以及结构反应性质的分类。随着科学的发展和技术的进步，工程结构设计理论经历了从弹性理论到极限状态理论的转变，设计方法经历了从定值法到概率法的发展。我国的工程结构设计方法经历了容许应力设计法、破损阶段设计法、多系数极限状态设计法和概率极限状态设计法4个阶段。

**教学要求：**学生应掌握结构上的作用及作用效应的基本概念，了解工程结构设计理论的发展概况。

工程是指用石材、砖、砂浆、水泥、混凝土、钢材、钢筋混凝土、木材、塑料、铝合金等建筑材料修建的房屋、铁路、道路、桥梁、隧道、运河、堤坝、港口、塔架等工程设施。结构是指由若干构件连接而成的能够承受作用的平面或空间体系。工程结构就是能为人们的“衣、食、住、行”提供各种活动所需要的、功能良好、舒适美观的空间和通道，并具有承受其使用过程中可能出现的各种环境作用而满足安全、适用、耐久的功能。

进行工程结构设计的目的是要保证结构具有足够的抵抗自然界各种作用的能力，满足各种预定的功能要求。设计的结构和结构构件在规定的使用年限内，在正常的维护条件下，应能保持其使用功能，而不需大修加固。为使工程结构在规定的使用年限内具有足够的可靠度，结构设计的第一步就是要确定结构上的作用(类型和大小)。

## 1.1 结构上的作用及作用效应

### 1.1.1 结构上的作用

《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)对结构上的作用有明确的阐述。结构上的作用是指施加在结构上的集中或分布荷载，以及引起结构外加变形或约束变形的原因。

作用就其形式而言，可分为以下两类。

(1) 直接作用。当以力的形式作用于结构上时，称为直接作用，习惯上称为荷载。例如由于地球引力而作用在结构上的结构自重，人群、家具、设备、车辆等重力，以及雪压力、土压力、水压力等。

(2) 间接作用。当以变形的形式作用于结构上时，称为间接作用。例如基础沉降引起结构外加变形；材料收缩和徐变或温度变化引起结构约束变形；由于地震造成地面运动，致使结构产生惯性力等。

作用按时间不同可分为以下3类。

(1) 永久作用。在结构使用年限内，其值不随时间变化，或其变化的量值相对于平均

值而言可以忽略不计,或其变化是单调的并能趋于限值的作用。例如结构自重,随时间单调变化而能趋于限值的土压力、预应力,水位不变的水压力,在若干年内基本上完成的混凝土收缩和徐变、基础不均匀沉降等均可列为永久作用。

(2) 可变作用。在结构使用年限内,其值随时间变化,且其变化的量值与平均值不可忽略不计的作用。例如楼面活荷载,车辆、人群、设备重力,车辆冲击力和制动力,风荷载,雪荷载,波浪荷载,水位变化的水压力,温度变化等均属可变作用。

(3) 偶然作用。在结构使用年限内不一定出现,但一旦出现,其值很大且持续时间很短的作用。例如地震作用、爆炸力等均属偶然作用。

随时间变异的作用分类是结构作用的基本分类,应用非常广泛。在分析结构可靠度时,它直接关系到作用概率模型的选择;在按各类极限状态设计时,它关系到荷载代表值及其效应组合形式的选择。如可变作用的变异性比永久作用的变异性大,可变作用的相对取值应比永久作用的相对取值大;偶然作用出现的概率小,结构抵抗偶然作用的可靠度可比抵抗永久作用的可靠度小。

永久荷载和可变荷载类同于以往所谓的恒荷载和活荷载,而偶然荷载也相当于特殊荷载。

作用按空间位置不同可分为以下两类。

(1) 固定作用。在结构空间位置上具有固定不变的分布,但其量值可能具有随机性。例如固定设备荷载、屋顶水箱重量等。

(2) 自由作用。在结构空间位置上一定范围内可以任意分布,出现的位置和量值都可能是随机的。例如车辆荷载、吊车荷载等。

由于自由作用是可以任意分布的,结构设计时应考虑其位置变化在结构上引起的最不利效应分布。

作用按结构反应不同可分为以下两类。

(1) 静态作用。不使结构或结构构件产生加速或产生的加速度很小可以忽略不计的作用。例如结构自重、楼面上人员荷载、雪荷载、土压力等。

(2) 动态作用。使结构或结构构件产生不可忽略的加速度的作用。例如地震作用、吊车荷载、设备振动、作用在高耸结构上的风荷载、打桩冲击等。

在进行结构分析时,对于动态作用应当考虑其动力效应,用结构动力学方法进行分析;或采用乘以动力系数的简化方法,将动态作用转换为等效静态作用。

### 1.1.2 作用效应 $S$

由于直接作用或间接作用于结构构件上,在结构内产生的内力(如轴力、弯矩、剪力、扭矩等)和变形(如挠度、转角、裂缝等),被称为“作用效应”,用  $S$  表示。当作用为直接作用(荷载)时,其效应也被称为“荷载效应”。荷载  $Q$  与荷载效应之间,一般近似按线性关系考虑:

$$S=CQ \quad (1-1)$$

式中,常数  $C$  为荷载效应系数。例如,均布荷载  $q$  作用在  $l/2$  处的简支梁,最大弯矩为  $M=ql^2/8$ ,  $M$  就是荷载效应,  $l^2/8$  就是荷载效应系数,  $l$  为梁的计算跨度。

结构上的作用,除永久作用外,都是不确定的随机变量,有时还与时间变量甚至空间

参数有关,所以作用效应一般来说也是随机变量或随机过程,甚至是随机场,它的变化规律与结构可靠度的分析关系密切。

## 1.2 工程结构设计理论演变简况

工程结构设计的目的在于保证设计结构和结构构件在施工和使用过程中能满足预期的安全性和使用性能要求。早期的工程结构中,保证结构安全主要依赖经验。随着科学的发展和技术的进步,工程结构设计理论经历了从弹性理论到极限状态理论的转变,设计方法经历了从定值法到概率法的发展。我国的工程结构方法经历了容许应力设计法、破损阶段设计法、多系数极限状态设计法和概率极限状态设计法4个阶段。

### 1.2.1 容许应力设计法

早期由于人们对结构材料的性能及其内在规律尚未认识,大多数国家采用以弹性理论为基础的容许应力设计方法。实践证明,这种设计方法与结构的实际情况有很大出入,并不能正确揭示结构或构件受力性能的内在规律,现在已不被绝大多数国家采用。容许应力设计法是建立在弹性理论基础上的设计方法。其表达式为:

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (1-2)$$

式中,  $\sigma$ ——构件在使用阶段(使用荷载作用下)截面上的最大应力;

$[\sigma]$ ——材料的容许应力。

容许应力设计法计算简单,但其有许多问题:①没有考虑材料塑性性质。②没有对作用阶段给出明确的定义,也就是使用期间荷载的取值原则规定得不明确。实际上,使用荷载是由传统经验或个人判断确定的,缺乏科学根据。③把影响结构可靠的各种因素(荷载的变异、施工的缺陷、计算公式的误差等)统统归结在反映材料性质的容许应力 $[\sigma]$ 上,显然不够合理。④ $[\sigma]$ 的取值无科学根据,纯属经验的,历史上曾多次提高过材料的容许应力值。⑤按容许应力法设计的构件是否安全可靠,无法用实验来验证。

### 1.2.2 破损阶段设计法

针对容许应力设计法存在的缺陷,之后出现了假定材料均已达到塑性状态,依据截面所能抵抗的破损内力建立的计算公式。其设计表达式为:

$$M \leq M_u / K \quad (1-3)$$

式中,  $M_u$ ——构件最终破坏时的承载能力;

$K$ ——安全系数,用来考虑影响结构安全的所有因素。

式(1-3)的优点为:①它可以反映材料的塑性性质,结束了长期以来假定混凝土为弹性体的局面。②采用一个安全系数,使构件有了总的安全度的概念。③它以承载能力值(如 $M_u$ )为依据,其计算值是否正确可由实验检验。

苏联曾把该理论用下式来表达:

$$KM(\sum q_i) \leq M_u(\mu_{f1}, \mu_{f2}, \dots, a, \dots) \quad (1-4)$$

式中,  $M$ ——正常使用时,由各种荷载 $q_i$ 所产生的截面内力;

$a$ ——反映截面尺寸等的尺寸函数;

$\mu_{f1}, \mu_{f2}$ ——材料强度的平均值。

破损阶段理论仍存在一些重大缺点：①破损阶段计算，构件的承载力是得以保证，但却无法了解构件在正常使用时能否满足正常使用要求。②安全系数  $K$  的取值仍须经验确定，并无严格的科学依据。③采用笼统的单一安全系数，无法就不同荷载、不同材料结构件安全的影响加以区别对待，不能正确地度量结构的安全度。④荷载  $q_i$  的取值仍然也是经验值；⑤表达式中采用的材料强度是平均值，它不能正确反映材料强度的变异程度，显然也是不够合理的。

### 1.2.3 多系数极限状态设计法

由于破损阶段理论仍有许多缺点，进一步发展的极限状态理论便应运而生。极限状态的主要概念是明确结构或构件进入某种状态后就丧失其原有功能，这种状态被称为极限状态。当时曾提出了 3 种极限状态：承载力极限状态、挠度极限状态、裂缝开展宽度极限状态。其表达式分别为：

$$M \leq M_u \quad (1-5)$$

$$f_{\max} \leq f_{\lim} \quad (1-6)$$

$$W_{\max} \leq W_{\lim} \quad (1-7)$$

这样，它就克服了破损阶段理论无法了解构件在正常使用时能否满足正常使用要求的缺陷。

### 1.2.4 概率极限状态设计法

概率极限状态设计法是以概率理论为基础，将作用效应和影响结构抗力的主要因素作为随机变量，根据统计分析确定可靠概率来度量结构可靠性的结构设计方法。其特点是有明确的、用概率尺度表达的结构可靠度的定义，通过预先规定的可靠指标值，使结构各构件间，以及不同材料组成的结构之间有较为一致的可靠度水平。

国际上把处理可靠度的精确程度分为 3 个水准。

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

(2) 水准 II——近似概率法。该法对结构可靠性赋予概率定义，以结构的失效概率或可靠指标来度量结构可靠性，并建立了结构可靠度与结构极限状态方程之间的数学关系，在计算可靠指标时考虑了基本变量的概率分布类型，并采用了线性化的近似手段，在设计截面时一般采用分项系数的实用设计表达式。目前我国的《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153—1992)、《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)都采用了这种近似概率法，在此基础上颁布了各种结构设计的规范。

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

### 1.3 思 考 题

1. 工程结构设计的目的是什么?
2. 什么是施加于工程结构上的作用? 荷载与作用的概念有什么不同?
3. 工程结构设计中, 如何对结构上的作用进行分类?
4. 作用(荷载)有哪些类型?
5. 什么是概率极限状态设计法? 为什么目前采用的方法称为近似概率设计法?

## 第2章 重力荷载

**教学提示：**本章叙述了结构自重、土的自重应力及雪荷载的计算方法，介绍了民用建筑楼面及屋面活荷载的分布规律，分析了工业厂房吊车荷载的作用特点，给出了桥梁工程车辆荷载及人群荷载的确定途径。

**教学要求：**学生应掌握各种重力荷载的取值和计算方法。

地球上一定高度范围内的物体均会受到地球引力的作用而产生重力，该重力导致的荷载则称为重力荷载，主要包括结构自重、土的自重、雪荷载、车辆重力、屋面和楼面活荷载等。

### 2.1 结构自重

结构的自重是由地球引力产生的组合结构的材料重力，一般而言，可以根据结构的材料种类、材料体积和材料容重计算结构自重(式 2-1)。结构自重一般按照均匀分布的原则计算，在施工阶段，构件在吊装运输或悬臂施工时引起的结构内力，有可能大于正常设计荷载产生的内力，因此，在施工阶段演算构件的强度和稳定时，构件重力应乘以适当的动力系数。

$$G_k = \gamma V \quad (2-1)$$

式中， $G_k$ ——构件的自重(kN)；

$\gamma$ ——构件材料的容重(kN/m<sup>3</sup>)；

$V$ ——构件的体积，一般按照设计尺寸确定(m<sup>3</sup>)。

常见材料和构件的容重见《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)附录 A。式(2-1)适用于一般建筑结构、桥梁结构及地下结构等各构件自重的计算，但要注意土木工程中结构各构件的材料容重可能不同，计算结构自重时可将结构人为地划分为许多基本构件，然后叠加即得到结构总自重(式 2-2)。

$$G = \sum_{i=1}^n \gamma_i V_i \quad (2-2)$$

式中， $G$ ——结构总自重(kN)；

$n$ ——组成结构的基本构件数；

$\gamma_i$ ——第  $i$  个基本构件的重度(kN/m<sup>3</sup>)；

$V_i$ ——第  $i$  个基本构件的体积(m<sup>3</sup>)。

在工程的简化设计及施工验算中，为应用方便起见，有时将建筑物看成是一个整体，将建筑结构自重简化为平均楼面恒载。近似估算为：一般木结构建筑为 2.0~2.5kN/m<sup>2</sup>，钢结构建筑为 2.5~4.0kN/m<sup>2</sup>，钢筋混凝土结构建筑为 5.0~7.5kN/m<sup>2</sup>。

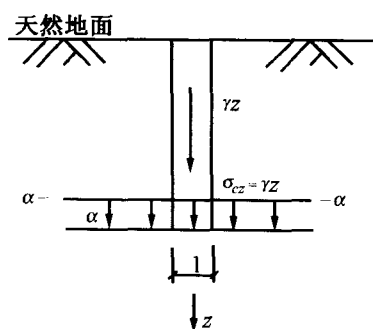


## 2.2 土的自重应力

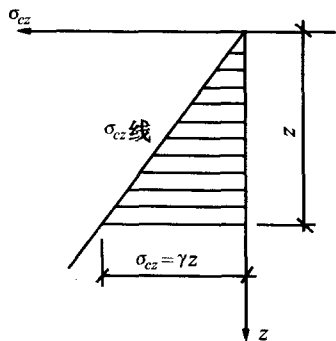
土是由土颗粒、水和气所组成的三相非连续介质。若把土体简化为连续体,则应用连续介质力学(例如弹性力学)来研究土中应力的分布。在计算土中应力时,通常将土体视为均匀连续的弹性介质。假设天然地面是一个无限大的水平面,土体在自重作用下只产生竖向变形,而无侧向变形和剪切变形,因此在任意竖直面和水平面均无剪应力存在。土中任意截面都包括土体骨架的面积和孔隙的面积,地基应力计算时只考虑土中某单位面积上的平均应力。实际上,只有通过颗粒接触点传递的粒间应力才能使土粒彼此挤紧,引起土体变形。因此粒间应力是影响土体强度的重要因素,粒间应力又被称为有效应力。若土层天然重度为 $\gamma$ ,在深度 $z$ 处 $a-a$ 水平面(图2.1(a)),土体因自身重量产生的竖向应力可取该截面上单位面积的土柱体的重力,即:

$$\sigma_{cz} = \gamma z \quad (2-3)$$

可见自重应力 $\sigma_{cz}$ 沿水平面均匀分布,且与 $z$ 成正比,即随深度按直线规律增加,如图2.1(b)所示。



(a) 任意深度水平截面上的土自重应力



(b) 自重应力呈线性增加

图 2.1 均质土中竖向自重应力

一般情况下,地基土由不同重度的土层所组成。如图2.2所示,天然地面下深度 $z$ 范围内各层土的厚度自上而下分别为 $h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_n$ ,则多层土深度 $z$ 处的竖直有效自重应力的计算公式为:

$$\sigma_{cz} = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \dots + \gamma_n h_n = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (2-4)$$

式中, $n$ ——从天然地面起到深度 $z$ 处的土层数;

$h_i$ ——第 $i$ 层土的厚度(m);

$\gamma_i$ ——第 $i$ 层土的天然重度( $\text{kN/m}^3$ );若土层位于地下水位以下,由于受到水的浮力作用,单位体积中,土颗粒所受的重力扣除浮力后的重度称为土的有效重度 $\gamma'_i$ ,即:

$$\gamma'_i = \gamma_i - \gamma_w \quad (2-5)$$

$\gamma_w$ 为水的重度,一般取值为 $10\text{kN/m}^3$ ,这时计算土的自重应力应取土的有效重度 $\gamma'_i$ 代