



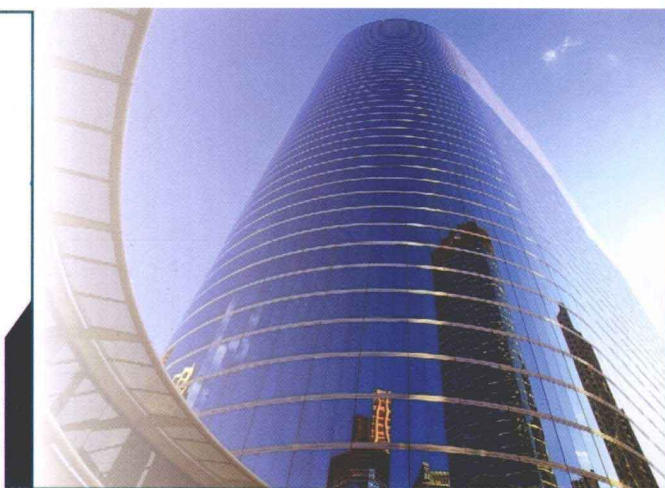
21世纪全国本科院校土木建筑类**创新型**应用人才培养规划教材

# 建筑结构抗震 分析与设计

编 著 裴星洙

赠送电子课件

- 介绍实用计算方法，并辅以适当的设计例题作为示范
- 介绍部分电算源程序，帮助读者提高利用程序解决实际问题的能力



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材

# 建筑结构抗震分析与设计

裴星洙 编著



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书系统地总结和阐述了建筑结构抗震分析与设计的基本理论和方法。全书共分 15 章, 主要包括: 概述、地震动分析、结构自振特性分析、结构粘性阻尼分析、多元一次联立方程的解法、层振动模型地震反应弹性时程分析、刚度矩阵对地震反应的影响分析、非线性恢复力模型、层振动模型地震反应弹塑性时程分析、杆系振动模型地震反应弹塑性时程分析、隔震结构设计、基于能量原理的结构地震反应预测法、消能减震结构设计、结构静力弹塑性分析方法、基于最佳侧移刚度分布的结构抗震设计方法。全书深入浅出, 在强调基本概念和基本理论的基础上, 力求理论联系实际。特别是书中介绍的部分电算源程序, 为读者提高利用程序解决实际工程问题的能力提供了很好的学习资源。

本书可以作为土木工程专业研究生和高年级本科生的学习参考书, 也可供土木工程专业工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

建筑结构抗震分析与设计/裴星洙编著. —北京: 北京大学出版社, 2013. 1

(21 世纪全国本科院校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-21657-6

I. ①建… II. ①裴… III. ①建筑结构—防震设计—高等学校—教材 IV. TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 281838 号

**书 名: 建筑结构抗震分析与设计**

著作责任者: 裴星洙 编著

策 划 编 辑: 吴 迪 卢 东

责 任 编 辑: 伍大维

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-21657-6/TU·0295

出 版 发 行: 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> 新浪官方微博: @北京大学出版社

电 子 信 箱: [pup\\_6@163.com](mailto:pup_6@163.com)

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 三河市博文印刷厂

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.25 印张 432 千字

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 35.00 元

---

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子信箱: [fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

# 前 言

根据中国地震局的预测,目前中国大陆已进入了第五次地震活跃期。地震是威胁人类安全的主要灾害之一,与此相关的抗震工程研究一直是土木工程领域的研究热点之一。

2011年3月11日发生于日本福岛的9.0级大地震,震中位于宫城县以东130千米的太平洋海域,震源深度为20千米,地震引发了海啸,造成2万多人失踪死亡,并造成核辐射,给社会带来重大创伤;2010年2月27日智利发生了8.8级大地震,震源深度为35千米,此次地震造成至少521人死亡,59人失踪,12000多人受伤;2008年5月12日发生在四川汶川的8.0级大地震造成了近十万人伤亡,使我们更加认识到地震无比巨大的破坏力,同时也促使各国有关抗震的设计理论和设计技术的快速发展。

通过多年对结构工程专业研究生建筑“建筑结构抗震分析与设计”课程的讲授,编者逐步认识到研究生层面上需掌握的基本理论和方法。在此基础上,编者结合在结构抗震分析与设计领域中的研究成果编写了本书。

本书的特点是:①全书深入浅出,在强调基本概念和基本理论的基础上,力求理论联系实际;②介绍部分电算源程序,为读者提高利用程序解决实际工程问题的能力提供了很好的学习资源;③理论与应用紧密结合,本书在讲解理论的同时,给出了实用的计算方法,并辅以适当的设计例题作为示范。

在本书编写过程中,编者学习和参考了国内外许多学者的论著,在此谨向原著者致以诚挚的谢意和敬意!编者的研究生王维、王星星、贺方倩、汪玲、王佩、倪慧敏、张映雪、韩露等也为本书的出版做了大量的工作,编者对他们的贡献表示衷心的感谢!

本书部分研究成果得到了江苏省镇江市人民政府和江苏科技大学的基金资助,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中不妥及疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

裴星洙

2012年8月于江苏科技大学

# 目 录

|                                |    |                              |     |
|--------------------------------|----|------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 概述</b> .....          | 1  | 5.4 计算机程序设计 .....            | 60  |
| 1.1 地震震害 .....                 | 2  | 本章小结 .....                   | 65  |
| 1.2 建筑结构分析模型 .....             | 3  | 习题 .....                     | 65  |
| 1.3 抗震设计与分析方法 .....            | 5  | <b>第 6 章 层振动模型地震反应弹性</b>     |     |
| 本章小结 .....                     | 9  | <b>时程分析</b> .....            | 66  |
| 习题 .....                       | 9  | 6.1 层模型 .....                | 67  |
| <b>第 2 章 地震动分析</b> .....       | 10 | 6.2 时程分析法定位 .....            | 68  |
| 2.1 周期-频度谱 .....               | 11 | 6.3 Wilson- $\theta$ 法 ..... | 69  |
| 2.2 反应谱 .....                  | 15 | 6.4 振型叠加法 .....              | 74  |
| 2.3 地震动积分 .....                | 26 | 6.5 纯剪切和弯剪层模型的差异 .....       | 80  |
| 2.4 地震动时间间隔调整 .....            | 31 | 本章小结 .....                   | 83  |
| 本章小结 .....                     | 31 | 习题 .....                     | 84  |
| 习题 .....                       | 32 | <b>第 7 章 刚度矩阵对地震反应的</b>      |     |
| <b>第 3 章 结构自振特性分析</b> .....    | 33 | <b>影响分析</b> .....            | 85  |
| 3.1 自振特性分析方法 .....             | 34 | 7.1 概述 .....                 | 86  |
| 3.2 自振特性分析程序设计 .....           | 36 | 7.2 结果分析 .....               | 107 |
| 本章小结 .....                     | 43 | 本章小结 .....                   | 110 |
| 习题 .....                       | 43 | 习题 .....                     | 111 |
| <b>第 4 章 结构粘性阻尼分析</b> .....    | 45 | <b>第 8 章 非线性恢复力模型</b> .....  | 112 |
| 4.1 速度无耦合假设 .....              | 46 | 8.1 恢复力模型 .....              | 113 |
| 4.2 阻尼矩阵的形成 .....              | 47 | 8.2 Masing 规则 .....          | 114 |
| 4.3 几种无耦合阻尼模型 .....            | 48 | 8.3 计算机程序设计 .....            | 118 |
| 4.4 速度无耦合阻尼分析程序设计 .....        | 50 | 本章小结 .....                   | 122 |
| 本章小结 .....                     | 53 | 习题 .....                     | 124 |
| 习题 .....                       | 54 | <b>第 9 章 层振动模型地震反应</b>       |     |
| <b>第 5 章 多元一次联立方程的解法</b> ..... | 55 | <b>弹塑性时程分析</b> .....         | 125 |
| 5.1 LU 三角分解法的基本思想 .....        | 56 | 9.1 增量运动方程 .....             | 126 |
| 5.2 LU 三角分解 .....              | 58 | 9.2 Wilson- $\theta$ 法 ..... | 127 |
| 5.3 一次联立方程的解 .....             | 59 | 9.3 计算机程序设计 .....            | 131 |
|                                |    | 本章小结 .....                   | 139 |
|                                |    | 习题 .....                     | 139 |

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| <b>第 10 章 杆系振动模型地震反应</b>                |     |
| 弹塑性时程分析 .....                           | 141 |
| 10.1 振动方程与杆系模型 .....                    | 142 |
| 10.2 质量矩阵 .....                         | 143 |
| 10.3 结构振动方程的处理 .....                    | 145 |
| 10.4 阻尼矩阵 .....                         | 148 |
| 10.5 恢复力模型的选取 .....                     | 149 |
| 10.6 结构形成机构的判断 .....                    | 151 |
| 10.7 FEPT 程序设计 .....                    | 151 |
| 10.8 平面框架结构弹塑性时程分析 .....                | 157 |
| 本章小结 .....                              | 169 |
| 习题 .....                                | 170 |
| <b>第 11 章 隔震结构设计</b> .....              | 171 |
| 11.1 隔震结构的原理与特点 .....                   | 172 |
| 11.2 隔震系统的组成与类型 .....                   | 174 |
| 11.3 隔震结构的设计要求 .....                    | 176 |
| 11.4 隔震结构的抗震计算 .....                    | 177 |
| 11.5 隔震结构的构造要求 .....                    | 181 |
| 11.6 隔震结构工程设计实例 .....                   | 182 |
| 本章小结 .....                              | 189 |
| 习题 .....                                | 190 |
| <b>第 12 章 基于能量原理的结构地震反应预测法</b> .....    | 191 |
| 12.1 能量平衡方程 .....                       | 192 |
| 12.2 计算能量程序设计 .....                     | 194 |
| 12.3 基于能量原理的隔震结构地震反应预测法 .....           | 196 |
| 本章小结 .....                              | 205 |
| 习题 .....                                | 206 |
| <b>第 13 章 消能减震结构设计</b> .....            | 207 |
| 13.1 概述 .....                           | 208 |
| 13.2 基于等效线性化理论的消能减震结构设计方法 .....         | 211 |
| 13.3 算例模型 .....                         | 218 |
| 13.4 地震波的选用 .....                       | 220 |
| 13.5 消能减震结构附加金属阻尼确定方法 .....             | 221 |
| 13.6 消能减震结构附加粘滞阻尼确定方法 .....             | 226 |
| 13.7 同时附加金属阻尼和粘滞阻尼的消能减震结构设计方法 .....     | 229 |
| 13.8 同时附加金属阻尼和粘滞阻尼结构设计方法总结及结论 .....     | 248 |
| 本章小结 .....                              | 249 |
| 习题 .....                                | 250 |
| <b>第 14 章 结构静力弹塑性分析方法</b> .....         | 251 |
| 14.1 概述 .....                           | 252 |
| 14.2 计算实例 .....                         | 255 |
| 本章小结 .....                              | 264 |
| 习题 .....                                | 265 |
| <b>第 15 章 基于最佳侧移刚度分布的结构抗震设计方法</b> ..... | 266 |
| 15.1 概述 .....                           | 267 |
| 15.2 算例模型 .....                         | 267 |
| 15.3 分析用输入地震波的选取 .....                  | 269 |
| 15.4 最佳侧移刚度、剪力系数和截面惯性矩 .....            | 269 |
| 15.5 最佳侧移刚度计算 .....                     | 270 |
| 15.6 最佳层间屈服剪力系数 .....                   | 271 |
| 15.7 最佳截面惯性矩计算 .....                    | 272 |
| 15.8 式(15.6)和式(15.9)的验证 .....           | 274 |
| 15.9 设计算例 .....                         | 275 |
| 15.10 结语 .....                          | 280 |
| 本章小结 .....                              | 280 |
| 习题 .....                                | 281 |
| <b>参考文献</b> .....                       | 282 |

# 第 1 章 概 述

## 教学目标

本章主要讲述地震灾害、建筑结构分析模型、抗震设计与分析方法等内容。通过本章的学习，应达到以下目标：

- (1) 重视地震所造成的地表破坏及其给工程结构所造成的破坏；
- (2) 了解建筑结构分析模型类型和常用分析模型的适用条件；
- (3) 掌握抗震设计要求，了解各种抗震设计方法。

## 教学要求

| 知识要点    | 能力要求               | 相关知识            |
|---------|--------------------|-----------------|
| 地震灾害    | 加深认识地震是威胁人类安全的主要灾害 | 地震及其成因；地震活动性    |
| 分析模型    | 理解线杆模型、有限元等模型      | 层模型；杆系模型；层-杆系模型 |
| 分析与设计方法 | 掌握设计要求，了解设计方法      | 抗震设计发展历史        |

## 基本概念

地震、震害、分析模型、分析方法、设计方法。

## 引言

人物介绍：

大森房吉(1868年10月30日—1923年11月18日)是日本的地震工程学者。1890年，他毕业于东京大学物理学科，在硕士研究生阶段攻读气象学和地震学，在东京大学的英国客座教授 John Millu(地震工程学者)的指导下，对1891年的浓尾地震的余震进行了研究，1894年发表与余震次数相关的大森公式，从1894年开始利用3年时间去欧洲留学，1896年回国后胜任东京大学地震工程学科教授。后来他指引日本地震工程学科的前沿研究方向，被称为“日本地震学之父”。他于1898年开发了世界上第一个能够连续记录地震动的大森式地震仪，1899年发表了基于初期微小振动持续时间能够判定离震源距离的大森公式。1905年，为了警告今后50年内东京将会发生大地震，大森教授跟东京大学同专业的今村明恒副教授将题目为“城市发生地震时减轻生命和财产损失的简单方法”文章发表在《太阳》杂志上。这一文章被报纸转载之后成为“引人注目”的事件，引起了社会问题。虽然他们的初衷是全社会要重视防灾对策的必要性，但是担心此文章会引起社会混乱，因此，最后他们收回了此文章。1923年大森教授去澳大

利亚出席环太平洋学术会议,在此期间,发生了关东地震。他说:“我亲眼看到悉尼天文台的地震仪正在记录某一地震的地震波。”当他知道该地震是发生在日本后,就要求紧急回国,在回国的轮船上发生脑肿瘤病倒,回国以后不久去世。

佐野利器(1880年4月11日—1956年12月5日)是日本的建筑家、结构学者,抗震结构的创始者,建立了建筑结构基本理论和抗震结构基础理论体系。虽然日本是地震频发国家,但是明治以前对建筑结构几乎没有采取任何抗震措施。佐野利器在1903年毕业于东京大学建筑学科,同年攻读硕士课程,毕业后留校。1906年美国旧金山发生大地震,佐野利器作为日本政府“大地震调查团”的成员,对此进行现场调查。通过调查,形成了“抗震结构”的基本构思。1909年,他设计了日本第一个钢结构建筑——日本桥丸善书店。1911—1914年去德国留学。1915年,他被聘任为东京大学教授。1915年,他获得工学博士学位,其学位论文为《家屋耐震构造论》。至于地震动的大小,当时许多学者站在物理学的角度利用“加速度”来衡量其大小。为了便于理解和实际工程设计,佐野利器在该论文中引进“设计震度(水平震度)”即质点振动加速度与重力加速度之比来考虑地震动对结构的危害性。这是在世界上提出的第一个抗震设计方法。1928年,佐野利器辞职离开东京大学,到日本大学设立了以结构工程为主的建筑学科,并担任日本大学理工学部首位理工学部长,1929—1932年任清水建筑会社副社长。

## 1.1 地震震害

地震是地球内部缓慢积累的能量突然释放而引起的地球表层的振动,是对人类构成严重威胁的一种突发性自然灾害。据统计,全世界每年约发生500万次地震,震级在2.5级以上的有感地震达15万次以上,绝大多数地震均较小,而能够造成严重破坏的大地震,全世界平均每年亦发生18次左右。

自20世纪以来发生了一系列的强震,最近的一次大地震是2011年3月11日发生于日本福岛的9.0级大地震,震中位于宫城县以东130千米以外的太平洋海域,震源深度为20千米,并引发了海啸,造成2万多人失踪死亡,并造成了重大的经济损失;2010年2月27日,智利发生了8.8级大地震,震源深度为35千米,此次地震造成至少521人死亡,59人失踪,12000多人受伤;2008年5月12日发生在四川汶川的8.0级大地震造成了近10万人伤亡;2005年3月28日,印度尼西亚苏门答腊发生8.7级大地震,震中位于印度尼西亚苏门答腊岛北部近海,震源深度为30千米,共造成1313人死亡;2004年12月26日,印度尼西亚苏门答腊发生了8.9级大地震,地震引发的海啸席卷斯里兰卡、泰国、印度尼西亚及印度等国,导致约30万人失踪或死亡;1999年9月21日,台湾发生了7.6级大地震,死亡人数超过2000人;1976年7月28日,河北唐山发生了7.8级大地震,地震共造成了24.2万人死亡,16.4万人受伤。

由此可见,地震给人类的生命财产带来了不可估量的损失。地震震害主要包括由于地震产生的地表破坏、地震对建筑结构的破坏以及地震引发的次生灾害。其中地震对建筑结构的破坏是造成人民生命财产损失的主要原因。建筑结构在地震中的破坏主要是由承重结构承载力不足或者变形过大而造成的;由结构丧失整体性而造成的;由地基承载力下降而引起的。因此,为了减轻地震对人类的伤害和损失,有必要对建筑结构的抗震设计方法和技术进行完善,提升建筑结构的抗震水平。

## 1.2 建筑结构设计分析模型

结构的分析模型是结构在外部作用(荷载、惯性力、温度等)影响下进行结构作用效应(内力、位移等)计算分析的主体,主要由几何模型、物理模型两部分组成。几何模型主要反映结构分析模型的几何构成;物理模型主要反映材料或构件的力学性能。

振动分析与静力分析有很大区别,会有大量数据输出,而且分析所用的时间较长,因此对于分析模型来说,不一定越详细越好。

图 1.1 所示为结构振动模型分类。对框架结构进行分析时,根据需要可以选择线材模型或有限元模型,其中线材模型可分为质点系模型与杆系模型。

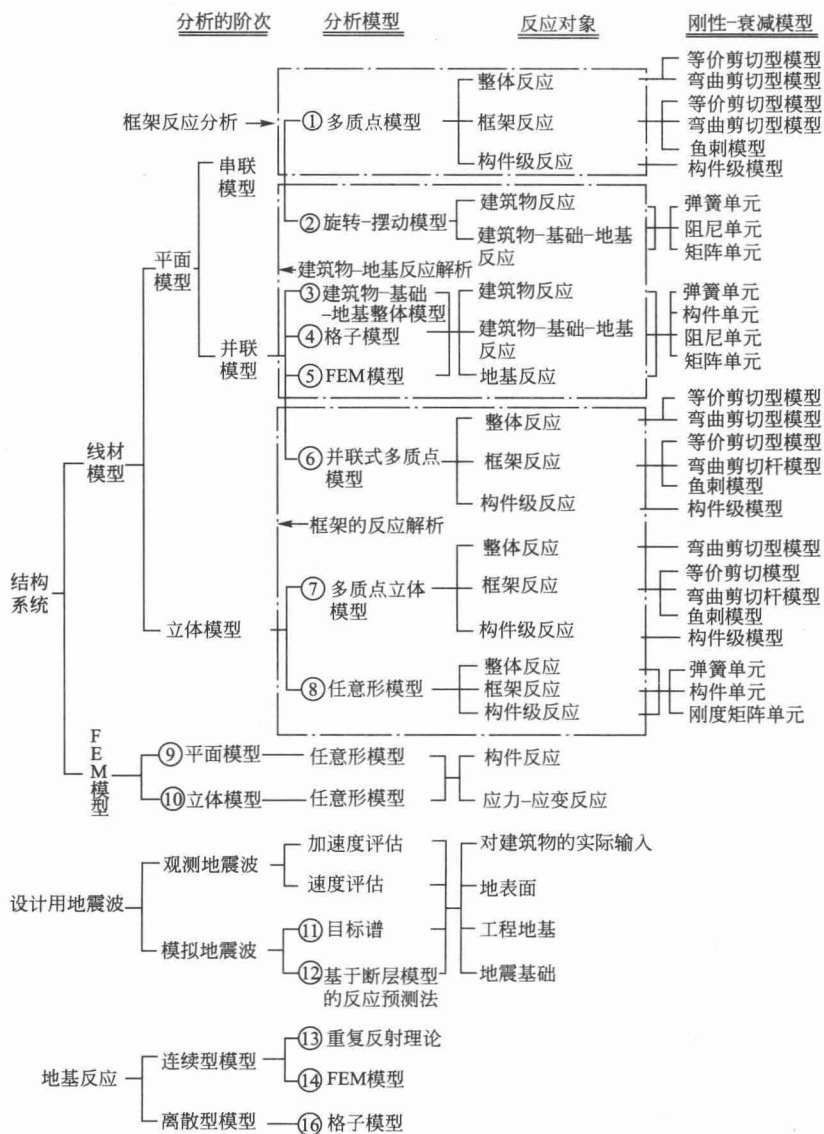


图 1.1 结构振动模型分类

## 1. 线材模型

### 1) 质点系模型

每一层的质量集中于第一层地板以上的各层楼板的位置,并用每一层的等价剪切弹簧连接这些质量的模型,称为多质点系模型。此模型是用于结构地震振动分析的基本模型,作为超高层建筑物动态分析的基本模型,现在仍然可以继续使用。此分析模型假设第一层楼板与地基刚性连接,并不考虑建筑物与地基相互作用的影响。

质点系模型其优点为自由度少、恢复力特性容易通过试验研究确定、动力反应计算工作小、实用简便。但楼盖平面内刚度无限大的假定会导致自振频率、振型的计算误差,特别是对于低频结构其计算精度较低。忽略转动自由度及柱子轴向变形的层间剪切模型,也会导致其振动特性计算的误差。

《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)规定,规则结构可采用层间弯剪模型进行罕遇烈度下的弹塑性变形计算。

### 2) 杆系模型

杆系模型假定楼板在其自身平面内为绝对刚性,以构件作为基本杆件单元,将梁、柱简化为以中性轴表示的无质量杆,将质量集中于各节点,利用构件连接处的变形协调条件建立各构件的变形关系,利用构件的恢复力特性集成整个结构的弹塑性刚度,而后采用数值积分方法对结构进行地震反应分析。

杆件单元可以是带刚域的平面杆件单元或空间单元,根据杆件单元的不同分别建立平面杆系模型和空间杆系模型。

杆系模型的优点是可用结构构件自然组成几何模型,构件的连接可以是刚性连接,也可以根据实际情况考虑弹性连接,以构件本身的力学性能构成物理模型,构件的非线性力学模型可根据力学试验确定。杆系模型的缺点是对剪力墙、筒体非线性性能的模拟存在一定的局限性,如在构件开裂、受弯屈服以后,构件的实际几何形心发生变化,会影响到结构内力重分配;对于弹性楼板问题或楼盖开洞复杂情况,使用此种模型会造成较大误差。杆系模型一般适用于框架结构。《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)规定,规则结构可使用平面杆系模型计算罕遇烈度地震作用下结构弹塑性变形,而对不规则结构则应采用空间结构模型。

## 2. 有限元模型

上述的线材模型都使用了刚性楼板假定,楼盖基本自由度数目大大减小,使问题得以简化,有利于提高计算效率。但是对于必须考虑弹性楼板连接问题、多塔楼问题、柔性楼盖等问题的复杂结构,不能继续沿用刚性楼板假定。

有限元模型的优点是计算精度高,几乎适用于所有工程问题;缺点是计算工作量大,耗费机时。但在计算机技术较为发达的今天,运行可靠、使用方便的结构分析软件已基本适应各项工作要求。

实际的结构分析中,采用合适的分析模型及判断分析结果的精度都是较为困难的,对模型化的验证及对分析结果精度的验证是要对多个模型反应的反应值进行相互比较的。因此,分析计算时经常建立从简单到比较详细的多种模型对地震反应进行分析、研究,以模型的详细程度对分析结果变化的影响来提高分析结果的精度与可靠性。

### 1.3 抗震设计与分析方法

#### 1. 抗震设计要求

国内外抗震设防目标的发展总趋势是要求建筑物在使用期间对不同频率和强度的地震具有不同的抵抗能力,即“小震不坏、中震可修、大震不倒”。基于这一抗震设防标准,建筑物在使用期间对不同强度的地震应具有不同的抵抗能力,可采用3个地震烈度水准,即多遇烈度、基本烈度与罕遇烈度。

《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)提出了两阶段设计方法以实现上述3个烈度水准的抗震设防要求。第一阶段设计是在方案布置符合抗震设计原则的前提下,按与基本烈度相对应的众值烈度(相当于小震)的地震动参数,用弹性反应谱法求得结构在弹性状态下的地震作用标准值和相应的地震作用效应,然后与其他荷载效应按一定的组合系数进行组合,并对结构构件截面进行承载力验算,对于较高的建筑物还要进行变形验算,以控制其侧向变形不要过大。这样,既满足了第一水准下必要的承载力可靠度,又可满足第二水准的设防要求(损坏可修),然后再通过概念设计与构造措施来满足第三水准的设防要求。对于大多数结构,一般可只进行第一阶段的设计,而对于少部分结构,如有特殊要求的建筑和地震时易倒塌的结构,除了应进行第一阶段的设计外,还要进行第二阶段的设计,即按与基本烈度相对应的罕遇烈度(相当于大震)验算结构的弹塑性层间变形是否满足规范要求(不发生倒塌),如果存在变形过大的薄弱层(或部位),则应修改设计或采取相应的构造措施,以使其能够满足第三水准的设防要求(大震不倒)。

#### 2. 抗震分析方法

根据计算分析理论的不同,结构地震反应的分析方法可以分为静力法、反应谱法、时程分析法、静力弹塑性分析法、能量法和基于性态的抗震设计方法等。

##### 1) 静力法

日本的大森房吉首次提出了震度法的概念。该方法假定结构物与地震动具有相同的振动,把结构物在地面运动加速度 $\alpha$ 作用下产生的惯性力视作静力作用于结构物上做抗震计算。惯性力的计算公式为

$$F = \alpha \frac{G}{g} = kG \quad (1.1)$$

式中, $\alpha$ 为地震动最大水平加速度; $g$ 为重力加速度; $G$ 为建筑物的自重; $k$ 为地震系数,是地面运动加速度峰值与重力加速度的比值,其值与结构动力特性无关。

此后,日本学者佐野利器倡导震度法,并提出 $k=0.1$ ,据此建立了最早的工程结构抗震分析方法。1926年,日本对地震荷载做了规定,即按不同地区把地震系数大小分为0.15~0.4。

静力法假定整个上部结构随地面做刚体平动,结构各质点上的水平地震作用最大值为该点质量与地面运动最大加速度的乘积,其概念较为简单。但由于静力法忽略了结构的动力特性这一重要因素,把地震动加速度作为结构地震破坏的单一因素,因而具有很大的局限性,常导致对结构抗震能力的错误判断。只有当结构物的基本周期比场地特征周期小很

多时,结构物在地震时才可能几乎不产生变形而可以被视为刚体,此时静力法成立,而超出此范围则不适用。

## 2) 反应谱法

1940年,美国的皮奥特(BIOT)教授提出了弹性反应谱的概念,使结构抗震设计的理论大大地向前迈了一步。反应谱理论考虑了结构动力特性与地震动特性之间的动力关系,通过反应谱来计算结构动力特性(自振周期、振型与阻尼)所对应的共振效应。地震时结构所受到的最大水平基底剪力,即总水平地震作用为

$$F=k\beta(T)G \quad (1.2)$$

式中, $k$ 为地震系数; $\beta(T)$ 为加速度反应谱与地震动最大加速度的比值,它表示地震时结构振动加速度的放大倍数。

反应谱方法是目前世界各国计算地震作用时普遍使用的方法,其优点是考虑了地震影响的强烈程度——烈度,考虑了地面运动的特性,特别是场地性质的影响,考虑了结构自身的动力特性——周期与阻尼比。通过反应谱值将结构的动力反应转化为作用在结构上的静力,抗震计算时不需要特殊的计算方法,简便易用,并且加速度反应谱值是加速度反应的最大值,用它来进行设计一般来说也是安全的。

但是,由于反应谱实质上的局限性,反应谱分析法仍不免存在不足之处:反应谱只考虑地面运动中的加速度分量,未考虑地面运动中速度和位移的影响;反应谱是通过单自由度体系计算得出的,应用在多自由度体系时,只能将结构分解为许多独立的振型,每个振型作为一个单自由度结构,得到对应的反应谱值和对应的惯性力,而后通过振型组合得到多自由度结构的内力与位移,振型组合法是基于概率统计法得到的,因此所计算内力与位移不够精确;设计反应谱只给出了加速度反应中的最大值,虽然它是惯性力的最大值,但不一定是结构的最危险状态,因为结构的最大剪力、最大倾覆力矩与最大位移都不是发生在同一时刻的;设计反应谱是单自由度弹性结构的反应谱,只能进行弹性计算来考虑地震动持时的影响,未考虑结构可能出现塑性与塑性变形累积的过程。

## 3) 时程分析法

时程分析法是直接通过动力方程求解地震反应,通过直接动力分析可得到结构反应随时间的变化关系,因此又称动力法,时程分析法将地震波按时段进行数值化后,输入结构体系的振动微分方程,采用直接积分法计算出结构在整个强震时域中的振动状态全过程,给出各时刻各杆件的内力与变形。

时程分析法能真实地反映结构地震反应随时间变化的全过程,并可处理强震作用下结构的弹塑性变形,因此已成为结构反应分析的一种重要方法。但是其在应用上尚存在一定局限,尤其是工程设计时的应用,如输入地震波的不确定性、结构性能的近似假定与模拟等,使分析结果的可信度受到限制。该方法需要专门的程序与应用知识,输入、输出数据量大,计算技术复杂,一般需要专业技术人员进行分析。因此,我国规范只要求少数重要、超高或有薄弱部位的结构采用时程分析法进行多遇地震下的补充计算或罕遇地震作用下薄弱层弹塑性变形验算。

## 4) 静力弹塑性分析法

静力弹塑性分析法是于结构上施加一组静力(竖向荷载和水平荷载),考虑构件从开裂到屈服,刚度逐步改变的弹塑性计算方法。计算时竖向荷载不变(自重和活荷载等),水平荷载由小到大,逐步加载,每一步会有部分构件屈服,屈服的构件需要改变刚度,并重新

建立刚度矩阵,在增量荷载作用下再进行分析。所得结果逐级累加,直到结构达到其极限承载力或极限位移后倒塌。静力弹塑性分析可得到结构从弹性状态到倒塌的全过程,因此也称为推覆分析。

静力弹塑性分析法分析的概念、所需参数及计算结果都更加明确,得到的结构性能比较丰富和详细,构件设计与配筋是否合理都能很直观地判断,容易为工程设计人员了解与接受。但其也存在一定问题:结构计算时施加的水平荷载形式不确定;构件的弹塑性性能需要在材料非线性性能(应力-应变关系)的基础上进一步深入研究与量化;只能给出结构在某种荷载作用下的性能,对结构某一特定地震作用下的表现并不能直接得到,因此对地震作用下结构状态的判断与评价不如地震反应时程分析直接。

能力谱法是静力弹塑性分析方法之一,是由 Freeman 于 1975 年提出的,该方法经多年研究已渐趋成熟。能力谱方法可用以估算强地震作用下结构的非线性变形行为状态,也可进行满足不同水平目标位移需求的结构抗震设计,概念清晰简单。结构的水平抗震能力用力-位移曲线(可用推力-位移关系分析得到)表示,地震反应需求由反应谱曲线表示。将此两条曲线绘制于同一坐标系下,如图 1.2 所示,其能力与需求之间的关系非常明显。若能力谱曲线位于需求曲线下方时,结构于地震中不会破坏;两条曲线的交点近似地表示了结构在相应地震作用下的反应水平。当某结构的能力曲线确定后,即可比较结构在不同地震作用下的反应。

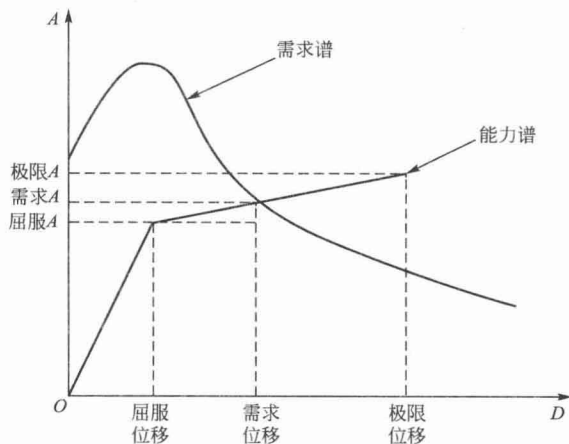


图 1.2 能力谱与需求谱曲线

能力曲线可以是结构近似的力-位移关系,也可以是精确与详细的力-位移关系,相应地,需求曲线可以是简单的理想光滑谱曲线,也可以是按某一地震记录得到的非光滑谱曲线。为了反映结构的非线性行为,非线性变形按能量等效原则转换为等效阻尼比,需求谱曲线即是按不同阻尼比绘制的等效弹性谱曲线族。

能力谱方法的特点是将能力与需求以位移-加速度关系绘出,表征结构性能的 4 个基本参数(强度、位移、延性、弹性刚度)分别由加速度  $S_a$ , 位移  $S_d$ , 延性系数  $\mu$  与弹性周期  $T$  表示,能力-需求图可清晰地表示出结构的抗震能力与其地震反应关系,概念明确,设计参数容易控制。当已知周期和目标延性时,用能力谱方法进行的估算就是以力为基础的设计过程;当已知目标位移和延性时,用能力谱方法进行的估算就是以位移为基础的设计过程;说明能力谱方法可以适应以力为基础和以位移为基础两种抗震设计需要。

#### 5) 能量法

能量法是直接通过能量评价结构的抗震性能。自 20 世纪 50 年代 G. Housner 提出基于能量抗震设计的概念以来,该方法的基础工作已趋于完善,相应的设计框架也已基本成熟。

结构抗震能量法,是将地震作用视为结构的能量输入与耗散过程,并认为当结构的耗能能力大于地震能量输入时,结构便能抵御地震作用,不产生倒塌。由于结构在往复地震

作用下一旦进入塑性状态,将不可避免地产生累积损伤,以单一承载力或位移指标评价结构抗震性能及进行抗震设计时,均无法考虑地震持时对结构造成的累积损伤效应,因此,基于能量的抗震设计法能更全面地分析与评价结构在强震作用下的性能,充分保证结构的抗震安全性,对实现基于性能结构抗震设计具有重要意义。

水平地震作用下,结构的动力方程为

$$[M]\{\ddot{x}\}+[C]\{\dot{x}\}+\{F(t)\}=-[M]\{\ddot{x}_g\} \quad (1.3)$$

式中,  $[M]$  为结构的质量矩阵;  $\{\dot{x}\}$ 、 $\{\ddot{x}\}$  分别为结构的相对速度与加速度反应;  $[C]$  为结构的阻尼矩阵;  $\{F(t)\}$  为结构的恢复力;  $\{\ddot{x}_g\}$  为地面运动的加速度。

式(1.3)左右均乘  $\{\dot{x}\} dt$ , 并对地震时间从  $0 \sim t$  进行积分, 得到

$$E_K+E_D+E_F=E_1 \quad (1.4)$$

式中,  $E_K = \int_0^T \{\dot{x}\}^T [M] \{\dot{x}\} dt$  为结构的动能;  $E_D = \int_0^T \{\dot{x}\}^T [C] \{\dot{x}\} dt$  为结构的阻尼耗能;  $E_F = \int_0^T \{\dot{x}\}^T \{F(t)\} dt$  为结构的变形能;  $E_1 = -\int_0^T \{\dot{x}\}^T [M] \{\ddot{x}_g\} dt$  为地震输入能。

其中, 结构的变形能  $E_F$  包括可恢复的弹性应变能  $E_E$  与不可恢复的累积塑性滞回耗能  $E_H$ 。地震结束后,  $E_K$  与  $E_E$  均为零, 因此, 地震输入能  $E_1$  由阻尼耗能  $E_D$  与结构累积滞回耗能  $E_H$  耗散。累积滞回耗能  $E_H$  反映了结构构件在地震过程中的损伤程度, 是结构构件抗震设计的依据, 即基于能量抗震设计需要确定各结构构件的滞回耗能  $E_H$ 。

不同类型的结构, 其累积滞回耗能分布特性差异较大。对于规则的普通钢框架, 其累积滞回耗能  $E_H$  沿高度线性分布; 肖明葵等提出可通过静力弹塑性方法确定  $E_H$  的分布; 史庆轩等研究了地面运动参数与结构参数对钢筋混凝土框架结构  $E_H$  层间分布的影响, 认为  $E_H$  层间分布为下大上小的梯形分布, 其薄弱层易在底层形成; 程光煜对钢支撑框架结构的研究表明, 对于安装了阻尼器的减震机构,  $E_H$  可满足沿高度线性分布, 而对于阻尼较小的一般结构, 则需通过静力弹塑性方法确定其  $E_H$  的分布; 刘哲锋等对高层钢框架-剪力墙混合结构的分析研究表明, 累积滞回耗能主要集中于剪力墙底部区域, 而钢框架部分则基本不参与滞回耗能, 并通过参数分析研究得到底层剪力墙耗能比例与结构自振周期及强震持时影响的关系式。

基于能量的抗震设计方法通过地震输入能量确定结构的耗能需求, 通过结构构件的累积塑性变形耗能总和得到结构的耗能能力。在相应的设计阶段, 当结构的耗能能力大于结构的耗能需求时, 则认为结构满足设计要求。基于能量的抗震设计方法同时考虑了结构的承载能力与变形能力, 更全面地反映了结构的抗震能力, 因此, 其较基于承载力的设计方法与基于位移的设计方法更为全面合理, 即基于能量的抗震设计方法是继基于位移设计方法后抗震设计方法的主要发展方向, 也是形成未来基于性能抗震设计方法的主要组成部分。

#### 6) 基于性态的抗震设计方法

20 世纪 80 年代末、90 年代初, 美国科学家与工程师提出了基于性态的抗震设计理论的新概念。基于性态的抗震设计是指根据建筑物的重要性和用途, 并考虑建筑物所处场地的地震强度及其所能接受的地震破坏水平、建造费用与震后修复费用及投资者的经济实力, 选择合适的结构性态设计目标; 并根据不同的性态目标提出不同的抗震设防标准, 使设计的建筑在未来地震中具备预期功能。因此, 基于性态的抗震设计方法较只强调保障生

命安全的单一设防目标的抗震设计法更为科学、合理,已成为抗震设计理论新的发展方向。

基于性态的抗震设计理论主要包括确定地震设防水准、选择合适的抗震性态目标、研究抗震性态分析方法与研究基于性态的抗震设计方法等。

地震设防水准是指未来可能作用于场地的地震作用的大小。为使结构满足多水准的设防要求,需要根据不同重现期选择所有可能发生的、对应不同等级的用于结构抗震设计的地震动参数。结构抗震性态目标是指针对某一地震设防水准而期望达到的结构抗震性能等级。基于性态的抗震设计既可有效地减轻工程结构的地震破坏,减少经济损失与人员伤亡,又能合理地使用有限的资金,保障结构在地震作用下的使用功能。因此,结构抗震性态目标的确定应综合考虑场地与结构的功能与重要性、投资与效益、震后损失与恢复重建、社会效益及业主承受能力等诸多因素。

## 本章小结

(1) 地震是地球内部缓慢积累的能量突然释放而引起的地球表层的振动,是对人类构成严重威胁的一种突发性自然灾害。

(2) 结构的分析模型是结构在外部作用(荷载、惯性力、温度等)影响下进行结构作用效应(内力、位移等)计算分析的主体,主要由几何模型、物理模型两部分组成。几何模型主要反映结构分析模型的几何构成,物理模型主要反映材料或构件的力学性能。

(3) 对框架结构进行分析时,根据需要可以选择线材模型或有限元模型,其中线材模型可分为质点系模型与杆系模型。

(4) 工程结构的抗震设防目标是要求建筑物在使用期间,对不同频率和强度的地震,应具有不同的抵御能力,即“小震不坏,中震可修,大震不倒”。为了实现这3个烈度水准的抗震设防要求,《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)提出了两阶段抗震设计方法。

(5) 结构地震反应的分析方法可分为静力法、反应谱法、时程分析法、静力弹塑性分析法、能量法和基于性态的抗震设计方法等。

## 习 题

### 思考题

- (1) 地震按其成因分为哪几种类型?
- (2) 试写出世界地震的主要活动带。
- (3) 试写出我国两个主要地震带和6个地震活动区。
- (4) 抗震设防三水准的要求是什么?简述两阶段设计方法。
- (5) 简述各种地震反应分析方法。

# 第 2 章 地震动分析

## 教学目标

本章主要讲述周期-频度谱分析、反应谱分析、地震动积分、地震动时间间隔调整等内容。通过本章的学习，应达到以下目标：

- (1) 基本理解零点交叉法、顶点法等周期-频度谱概念，掌握利用电算程序分析地震动周期-频度谱的方法；
- (2) 基本理解地震动反应谱概念，掌握利用电算程序分析地震动反应谱的方法；
- (3) 基本理解积分地震动和调整地震动时间间隔的意义，利用电算程序能够得到相关地震动。

## 教学要求

| 知识要点     | 能力要求                          | 相关知识               |
|----------|-------------------------------|--------------------|
| 周期-频度谱分析 | 利用零点交叉法和顶点法对给定地震动能够进行周期-频度谱分析 | Fortran77 算法语言、谱理论 |
| 反应谱分析    | 对给定地震动能够进行反应谱分析               | Fortran77 算法语言、谱理论 |
| 地震动积分    | 对地震动加速度曲线进行积分生成速度曲线峰值为任意值的地震动 | 加速度曲线记录基线补正方法      |
| 时间间隔调整   | 任意改变地震动时间间隔                   | 线性内插值法             |



## 基本概念

周期-频度谱、反应谱、地震动积分、时间间隔调整。



## 引言

由于地震的作用，建筑物产生位移、速度和加速度。人们把不同周期下建筑物反应值的大小画成曲线，这些曲线称为反应谱。

一般来说，随周期的延长，位移反应谱为上升的曲线，速度反应谱比较恒定，而加速度的反应谱则大体为下降的曲线。一般说来，设计的直接依据是加速度反应谱。加速度反应谱在周期很短时有一个上升段(高层建筑的基本自振周期一般不在这一区段)，当建筑物周期与场地的特征周期接近时，出现峰值，

随后逐渐下降。出现峰值时的周期与场地的类型有关：Ⅰ类场地约为 0.1~0.2s；Ⅱ类场地约为 0.3~0.4s；Ⅲ类场地约为 0.5~0.6s；Ⅳ类场地约为 0.7~1.0s。

建筑物受到地震作用的大小并不是固定的，它取决于建筑物的自振周期和场地的特性。一般来说，随建筑物周期延长，地震作用减小。

目前常用地面运动的最大加速度  $A_{\max}$  作为衡量地震作用强烈程度的标志，它就是建筑物抗震设计时的基础输入最大加速度，其单位为重力加速度  $g(9.81\text{m/s}^2)$  或  $\text{Gal}(\text{Gal}=10\text{mm/s}^2)$ ，大体上，7 度相当于最大加速度为 100Gal，8 度相当于 200Gal，9 度相当于 400Gal。

在地震时，结构因振动而产生惯性力，使建筑物产生内力，振动建筑物会产生位移、速度和加速度。地震作用大小与建筑物的质量和刚度有关。在同等的烈度和场地条件下，建筑物的质量越大，受到的地震作用也越大，因此减小结构自重不仅可以节省材料，而且有利于抗震。同样，结构刚度越大、周期越短，地震作用也大，因此，在满足位移限值的前提下，结构应有适宜的刚度。适当延长建筑物的周期，从而降低地震作用，能够取得很大的经济效益。

## 2.1 周期-频度谱

图 2.1 中去除部分波动微段后非常简单而规则的函数  $f(t)$ ，即为正弦函数曲线。从图中容易看出，这一曲线按照一定的时间间隔，重复出现同样的状态，即相等的振幅重复出现。此种按照一定时间间隔重复出现同样状态的事件，可用下式表示。

$$f(t) = f(t+T) \quad (2.1)$$

其中， $T$  表示同样状态的事件重复出现的时间间隔，即为周期，其量纲为秒。图 2.1 即表示周期  $T=0.25\text{s}$  的正弦波。从周期的定义中可以看出，曲线上设定的某一点与其附近寻找到的具有相同性质的另一点，其间的时间间隔即是周期。而无论在曲线上设定某点，其结果均相同。但是，举曲线中的零点，即跟横轴相交的点进行讨论，其结果比较简单。图 2.1 中点  $c_1$  和  $c_3$  的时间间隔即表示周期，其大小  $T=0.25\text{s}$ 。当然，此处，点  $c_1$  和  $c_2$ 、 $c_2$  和  $c_3$ 、 $c_3$  和  $c_4$ ……其间的时间间隔为  $T/2$ 。待测定  $T/2$  后，乘 2，即可得到周期  $T$ 。测定曲线通过横轴相邻两点间的时间间隔再乘 2 来计算曲线周期的方法称之为零点交叉法。若曲线为正弦或余弦函数，则利用零点交叉法可得到精度较高的解。时程分析中采用的实际地震波，看似波形杂乱无序，没有周期性，但因地震波本身是简单的正弦波或余弦波的合成，所以利用零点交叉法，也可得到具有统计意义的地震波的频度特性。

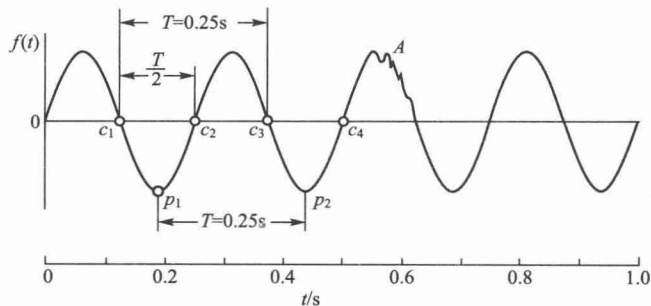


图 2.1 正弦曲线