

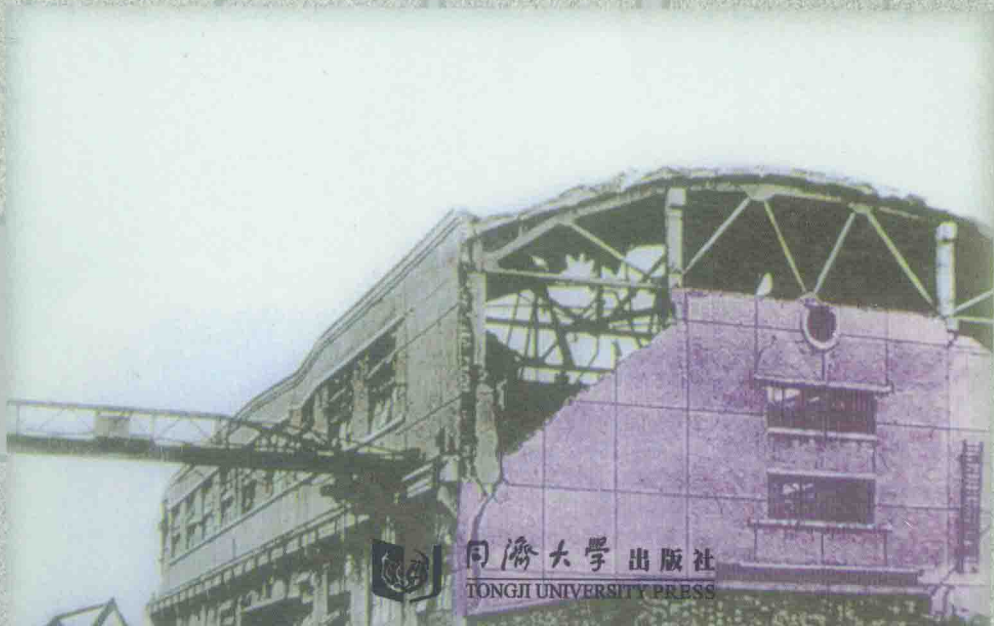


“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

# 建筑 结构

## 抗震设计理论与实例 (第四版)

■ 吕西林 主编



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS



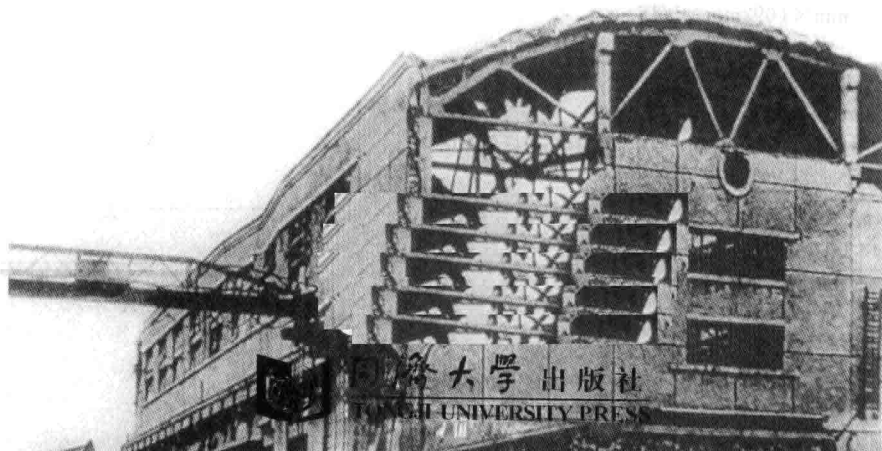
“十二五”普通高等教育本科

# 建筑 结构

## 抗震设计理论与实例

(第四版)

■ 吕西林 主编



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

本书介绍了建筑结构抗震设计的基础理论,包括地震及结构抗震的基本知识,抗震设计中的场地、地基和基础;单自由度体系结构的地震反应和反应谱,多自由度体系结构的地震反应和振型分解法;按抗震规范进行结构地震作用计算和抗震设计的要点;多层和高层钢筋混凝土结构及钢结构房屋的抗震设计;多层砌体房屋和底部框架砌体房屋的抗震设计;单层钢筋混凝土柱厂房的抗震设计;非结构构件的抗震设计;以及结构隔震与消能减震设计基本知识。全书在介绍基本概念和基础理论的同时,还辅助以几类工程的抗震设计实例,以便于读者深刻理解基本概念和规范中的设计方法。

本书中有关抗震设计的要求和规定,已按现行设计规范的相关内容做了修订。

本书可作为高等院校土木工程专业及相关专业的教材使用,也可供土建类专业的技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

建筑结构抗震设计理论与实例/吕西林主编. --

4版. --上海:同济大学出版社,2015.1

ISBN 978-7-5608-5747-3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 001987 号

---

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

## 建筑结构抗震设计理论与实例(第四版)

吕西林 主编

责任编辑 高晓辉 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

---

出版发行 同济大学出版社 [www.tongjipress.com.cn](http://www.tongjipress.com.cn)  
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)  
经 销 全国各地新华书店  
印 刷 同济大学印刷厂  
开 本 787mm×1092mm 1/16  
印 张 21  
印 数 17 601—21 700  
字 数 524 000  
版 次 2015 年 1 月第 4 版 2015 年 1 月第 7 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5608-5747-3

---

定 价 42.00 元

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

## 第四版前言

本书的作者多年来从事地震工程、地基基础、结构动力学、钢筋混凝土结构、钢结构和砌体结构的研究、教学和工程实践,也参加了国家《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)和上海市《建筑抗震设计规程》的修编工作,深感结构抗震是一门涉及多个学科、综合性很强的学科,要把这一领域的知识在一本书中介绍清楚,需要多个学科的同仁们共同努力,才能把上述各个学科在结构抗震方面的精华深入浅出地奉献给读者。有鉴于此,同济大学的多位作者,在总结十多年结构抗震研究成果和工程实践的基础上,于1995年编写了《房屋结构抗震设计理论与实例》教材,该书曾在国内7所高等院校使用。2010年12月新修订的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)出版后,又结合学习和使用该规范,在该书第二版的基础上,修改、编写了《建筑结构抗震设计理论与实例》(第三版),以满足教学和工程实践的需求。

第四版是在《建筑结构抗震设计理论与实例》(第三版)的基础上,结合土木工程专业教学计划的修订和作者近20年教学和工程实践的经验,重新编写和修订的。修订时根据土木工程专业教学计划学时的变化和近10多年来计算机设计软件的普及,合并了部分章节,删除了部分手工计算的内容,增加了概念设计的思考题,强化了对计算机软件设计结果的评判和理解,以适应建筑工程抗震设计发展的需要。

本书(第四版)由吕西林担任主编并编写第1章(地震及结构抗震的基本知识)、第4章(地震作用和结构抗震设计要点)、第9章(非结构构件抗震设计);郑晓芬编写第2章(场地、地基和基础)、第8章(单层钢筋混凝土柱厂房抗震设计);周颖编写第3章(单自由度及多自由度体系结构的地震反应)、第10章(结构隔震与消能减震设计基础知识);熊海贝编写第5章(多层和高层钢筋混凝土结构房屋抗震设计);任晓崧编写第6章(多层砌体房屋和底部框架砌体房屋抗震设计);陈俊岭编写第7章(钢结构房屋抗震设计)。全书由吕西林修改定稿。

本书的特点是理论叙述与设计实例并重,注意基本概念的阐述,辅之以详细的例题示范。希望读者通过本书的学习,不仅能掌握结构抗震方面的基本理论和基本方法,而且能熟练运用规范进行各类建筑结构的抗震设计。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏之处,欢迎读者批评指正。

作者

2014年12月于同济大学

## 第三版前言

自本书第二版出版以来近 10 年间,世界各地发生了 7 级以上强震数十起,其中 2008 年 5 月我国汶川发生的 8.0 级强震造成了大量的人员伤亡和建筑结构破坏。震后的灾害调查使我们积累了新的震害经验,对各类建筑结构的抗震性能又有了进一步认识,也发现了现行抗震设计规范存在的不足或有待改进的地方;同时也有许多抗震新技术经受了大地震的考验。

近几年,世界上抗震水平比较先进的国家如美国、日本、欧洲、新西兰等先后完成了抗震规范修订工作,为了认真总结震害经验和有关科研成果,吸收国外抗震规范的优点,我国 2010 年也完成了抗震设计规范的修订。

本书的作者多年来从事地震工程、地基基础、结构动力学、钢筋混凝土结构、钢结构和砌体结构的研究、教学和工程实践,也参加了国家《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)和上海市《建筑抗震设计规程》的修编工作,深感结构抗震是一门涉及多个学科、综合性很强的学科,要把这一领域的知识在一本书中介绍给读者,需要多个学科的同人们共同努力,把上述各个学科在结构抗震方面的精华深入浅出地奉献给读者。有鉴于此,同济大学的多位作者,在总结十多年结构抗震研究成果和工程实践的基础上,于 1995 年编写了《房屋结构抗震设计理论与实例》教材,并曾在国内 7 所高等院校使用。2010 年 12 月新修订的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)出版后,又结合学习和使用该《建筑抗震设计规范》,在该书第二版的基础上,修改、编写了《建筑结构抗震设计理论与实例》(第三版),以满足教学和工程实践的需求。

本书(第三版)由吕西林担任主编并编写第 1 章(地震及结构抗震的基本知识)、第 5 章(地震作用和结构抗震设计要点)、第 10 章(非结构构件抗震设计);第 11 章(结构隔震与消能减震设计的基础知识);陆浩亮编写第 2 章(场地、地基和基础);周德源编写第 3 章(单自由度体系结构的地震反应)、第 4 章(多自由度体系结构的地震反应)、第 7 章(多层砌体房屋和底部框架砌体房屋抗震设计);李思明编写第 6 章(多层和高层钢筋混凝土结构房屋抗震设计)、第 9 章(单层厂房及单层空旷房屋抗震设计);陈以一编写第 8 章(钢结构房屋抗震设计);全书由吕西林修改定稿。

本书的特点是理论叙述与设计例题并重,注意基本概念的阐述,辅之以详细的例题示范。本书所附的部分计算机程序,不仅可在本书的教学中使用,亦可用于工程实践和科研工作。作者希望读者通过本书的学习,不仅能掌握结构抗震方面的基本理论和基本方法,而且能熟练运用规范进行各类建筑结构的抗震设计。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏之处,欢迎读者批评指正。

作 者

2011 年 5 月于同济大学



## 第二版前言

本书的作者多年来从事地震工程、地基基础、结构动力学、钢筋混凝土结构、钢结构和砌体结构的研究、教学和工程实践,也曾参加过国家《建筑抗震设计规范》或上海市《建筑抗震设计规程》的修编工作,深感结构抗震是一门涉及多个学科、综合性很强的学科,要把这一领域的知识在一本书中介绍给读者,需要多个学科的同仁们共同努力,把上述各个学科在结构抗震方面的精华深入浅出地奉献给读者。有鉴于此,同济大学的多位作者,在总结十几年来结构抗震研究成果和工程实践的基础上,于1995年编写了《房屋结构抗震设计理论与实例》教材,并曾在国内7所高等院校使用。2001年10月新修订的《建筑抗震设计规范》出版后,又结合学习和使用《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001),编著了这本《建筑结构抗震设计理论与实例》,以满足教学和工程实践的需求。

本书由吕西林担任主编并编写第一章(地震及结构抗震的基本知识)、第五章(地震作用和结构抗震设计要点)、第十章(非结构构件抗震设计);陆浩亮编写第二章(场地、地基和基础);周德源编写第三章(单自由度体系结构的地震反应)、第四章(多自由度体系结构的地震反应)、第七章(多层砌体房屋和底部框架、内框架砌体房屋抗震设计);李思明编写第六章(多层和高层钢筋混凝土结构房屋抗震设计)、第九章(单层厂房及单层空旷房屋抗震设计);陈以一编写第八章(钢结构房屋抗震设计);全书由吕西林修改定稿。

本书的特点是理论叙述与设计例题并重,注意基本概念的阐述,辅之以详细的例题示范。本书所附的部分计算机程序,不仅可在本书的教学中使用,亦可用于工程实践和科研工作。作者希望读者通过本书的学习,不仅能掌握结构抗震方面的基本理论和基本方法,而且能熟练运用规范进行各类建筑结构的抗震设计。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏之处,欢迎读者批评指正。

作者

2002年4月于同济大学

# 目 录

第四版前言

第三版前言

第二版前言

<b>第 1 章 地震及结构抗震的基本知识</b> .....	( 1 )
1.1 地震成因与地震类型 .....	( 1 )
1.1.1 地球构造 .....	( 1 )
1.1.2 地震的发生过程 .....	( 2 )
1.1.3 地震的成因与类型 .....	( 2 )
1.2 地震波及其传播 .....	( 3 )
1.2.1 体波 .....	( 3 )
1.2.2 面波 .....	( 4 )
1.2.3 地震波的主要特性及其在工程中的应用 .....	( 5 )
1.3 地震震级与地震烈度 .....	( 7 )
1.3.1 地震震级 .....	( 7 )
1.3.2 地震烈度 .....	( 8 )
1.3.3 震级与震中烈度的关系 .....	( 10 )
1.4 中国地震的特点与地震灾害 .....	( 11 )
1.4.1 中国的地震活动与分布 .....	( 11 )
1.4.2 中国地震活动的主要特点 .....	( 12 )
1.4.3 中国的地震灾害 .....	( 13 )
1.5 结构的抗震设防 .....	( 15 )
1.5.1 抗震设防的目标 .....	( 15 )
1.5.2 抗震设防目标的实现 .....	( 15 )
1.5.3 建筑结构抗震设计的基本要求 .....	( 16 )
<b>第 2 章 场地、地基和基础</b> .....	( 18 )
2.1 建筑场地 .....	( 18 )
2.1.1 建筑地段的选择 .....	( 18 )
2.1.2 场地类别的分类 .....	( 20 )
2.1.3 建筑场地类别 .....	( 22 )
2.2 抗震验算 .....	( 24 )
2.2.1 天然地基的抗震能力 .....	( 24 )

2.2.2	天然地基的抗震验算	( 24 )
2.2.3	桩基的抗震验算	( 25 )
2.3	液化地基的判别与处理	( 26 )
2.3.1	地基土的液化现象	( 26 )
2.3.2	地基土的液化判别	( 27 )
2.3.3	地基抗液化措施	( 33 )
2.3.4	液化地基上低承台桩基的抗震验算	( 34 )
2.3.5	桩基的其他要求	( 35 )
2.4	地基基础的抗震加固	( 36 )
<b>第 3 章</b>	<b>单自由度及多自由度体系结构的地震反应</b>	<b>( 39 )</b>
3.1	单自由度体系的自由振动	( 40 )
3.1.1	力学模型及其运动方程	( 40 )
3.1.2	单自由度体系的无阻尼自由振动	( 41 )
3.1.3	单自由度体系的有阻尼自由振动	( 42 )
3.2	单自由度体系在任意荷载作用下的受迫振动	( 44 )
3.2.1	瞬时冲量及其引起的自由振动	( 44 )
3.2.2	一般动力荷载下的动力反应——杜哈美积分	( 44 )
3.3	单自由度体系地震反应的数值计算	( 45 )
3.3.1	杜哈美积分的数值计算	( 45 )
3.3.2	运动方程数值计算解	( 46 )
3.4	抗震设计反应谱	( 48 )
3.4.1	水平地震作用的基本公式	( 49 )
3.4.2	地震影响系数——《抗震规范》采用的反应谱	( 49 )
3.5	单自由度体系的非线性地震反应与计算	( 50 )
3.5.1	材料的非线性	( 50 )
3.5.2	单自由度非线性体系的运动方程	( 50 )
3.5.3	非线性运动方程的求解	( 51 )
3.5.4	恢复力模型	( 52 )
3.6	多自由度体系的自由振动	( 53 )
3.6.1	运动方程的建立	( 53 )
3.6.2	多自由度体系的自振频率及振型	( 55 )
3.6.3	多自由度体系的自振频率及振型的计算	( 58 )
3.7	多自由度体系的振型分解法	( 62 )
3.8	多自由度体系的水平地震作用及效应	( 65 )
3.8.1	振型分解反应谱法	( 66 )
3.8.2	底部剪力法	( 69 )
3.9	多自由度体系地震反应的时程分析	( 71 )
3.9.1	多自由度体系的线性加速度法	( 71 )



3.9.2	多自由度体系的 Wilson- $\theta$ 法	( 72 )
3.9.3	多自由度非线性体系的地震反应计算	( 73 )
<b>第 4 章</b>	<b>地震作用和结构抗震设计要点</b>	<b>( 75 )</b>
4.1	建筑的分类与抗震设防	( 75 )
4.1.1	建筑抗震设防分类	( 75 )
4.1.2	抗震设防标准	( 75 )
4.1.3	抗震设防目标	( 76 )
4.1.4	小震,中震,大震	( 76 )
4.2	抗震概念设计	( 78 )
4.3	地震作用的计算	( 81 )
4.3.1	地震作用计算的一般规定	( 81 )
4.3.2	水平地震作用的计算	( 84 )
4.3.3	竖向地震作用的计算	( 89 )
4.4	结构抗震验算	( 91 )
4.4.1	截面强度抗震验算	( 92 )
4.4.2	抗震变形验算	( 93 )
<b>第 5 章</b>	<b>多层和高层钢筋混凝土结构房屋抗震设计</b>	<b>( 97 )</b>
5.1	概述	( 97 )
5.2	震害及分析	( 97 )
5.3	结构体系与抗震等级	( 99 )
5.4	框架结构抗震设计	( 104 )
5.4.1	抗震设计步骤	( 104 )
5.4.2	地震作用计算	( 104 )
5.4.3	水平地震作用下框架内力分析	( 106 )
5.4.4	竖向荷载作用下的框架内力分析	( 111 )
5.4.5	梁柱截面内力组合和截面设计	( 111 )
5.4.6	框架结构水平位移验算	( 118 )
5.5	抗震墙结构抗震设计	( 122 )
5.5.1	一般规定	( 122 )
5.5.2	抗震墙结构的内力分析	( 123 )
5.5.3	抗震墙结构的截面设计	( 129 )
5.6	框架-抗震墙结构抗震设计	( 135 )
5.6.1	框架-抗震墙结构的受力特点	( 135 )
5.6.2	基本假设和计算简图	( 136 )
5.6.3	框架和抗震墙结构的协同工作分析	( 137 )
5.6.4	各片抗震墙和框架柱的地震内力分配及截面设计	( 142 )
5.7	抗震构造措施	( 143 )

5.7.1	框架结构抗震构造措施	(143)
5.7.2	抗震墙结构抗震构造措施	(147)
5.7.3	框架-抗震墙结构的抗震构造措施	(150)
5.8	抗震设计实例	(150)
5.8.1	多层钢筋混凝土框架抗震设计实例	(150)
5.8.2	高层钢筋混凝土框架-抗震墙结构抗震设计实例	(162)
<b>第6章</b>	<b>多层砌体房屋和底部框架砌体房屋抗震设计</b>	<b>(168)</b>
6.1	概述	(168)
6.1.1	砌体房屋的震害及原因	(168)
6.1.2	砌体房屋的震害总结	(170)
6.1.3	抗震设计三要素	(171)
6.2	建筑布置与结构选型	(171)
6.2.1	平、立、剖面布置和结构布置	(171)
6.2.2	房屋总高度与层数	(172)
6.2.3	层高	(173)
6.2.4	最大高宽比	(173)
6.2.5	抗震横墙间距	(173)
6.2.6	局部尺寸限值	(174)
6.3	抗震强度验算	(174)
6.3.1	多层砌体房屋	(175)
6.3.2	底部框架-抗震墙砌体房屋抗震强度验算	(181)
6.4	抗震构造措施	(182)
6.4.1	多层砌体房屋	(183)
6.4.2	底部框架-抗震墙砌体房屋	(186)
6.5	抗震设计实例	(187)
6.5.1	纵横墙承重砌体结构抗震设计实例	(187)
6.5.2	底层框架砌体结构抗震设计实例	(191)
<b>第7章</b>	<b>钢结构房屋抗震设计</b>	<b>(198)</b>
7.1	概述	(198)
7.1.1	钢结构房屋的主要震害特征	(198)
7.1.2	钢结构房屋的抗震设计目标	(200)
7.2	多高层钢结构房屋的抗震设计	(202)
7.2.1	抗震概念设计	(202)
7.2.2	地震作用的计算	(209)
7.2.3	构件和节点抗震承载力验算	(212)
7.2.4	抗震构造措施	(217)
7.3	单层钢结构厂房的抗震设计	(222)

7.3.1	抗震设计概念 .....	(222)
7.3.2	地震作用计算 .....	(224)
7.3.3	杆件验算和构造措施 .....	(226)
7.4	抗震设计实例 .....	(228)
<b>第8章</b>	<b>单层钢筋混凝土柱厂房抗震设计 .....</b>	<b>(242)</b>
8.1	单层钢筋混凝土柱厂房震害及其分析 .....	(242)
8.1.1	屋盖系统 .....	(242)
8.1.2	柱 .....	(242)
8.1.3	柱间支撑 .....	(243)
8.1.4	墙体 .....	(243)
8.2	单层钢筋混凝土柱厂房抗震设计的一般规定 .....	(244)
8.2.1	结构布置 .....	(244)
8.2.2	天窗布置 .....	(244)
8.2.3	屋架布置 .....	(244)
8.2.4	柱的布置 .....	(244)
8.2.5	围墙布置 .....	(245)
8.3	单层钢筋混凝土柱厂房的抗震计算 .....	(245)
8.3.1	横向计算 .....	(245)
8.3.2	纵向抗震计算 .....	(254)
8.4	单层钢筋混凝土柱厂房的抗震构造措施 .....	(270)
8.4.1	有檩屋盖构件的连接及支撑布置 .....	(270)
8.4.2	无檩屋盖构件的连接及支撑布置 .....	(270)
8.4.3	屋盖支撑 .....	(271)
8.4.4	突出屋面的混凝土天窗架的连接 .....	(272)
8.4.5	钢筋混凝土屋架的截面和配筋 .....	(272)
8.4.6	厂房柱子的箍筋 .....	(272)
8.4.7	大柱网厂房柱的截面和配筋构造 .....	(273)
8.4.8	山墙抗风柱的配筋 .....	(273)
8.4.9	厂房柱间支撑的设置和构造 .....	(273)
8.4.10	8度时跨度不小于18m的多跨厂房中柱和9度多跨厂房各柱 .....	(274)
8.4.11	厂房结构构件的连接节点 .....	(274)
8.4.12	单层钢筋混凝土柱厂房的砌体隔墙和围护墙 .....	(274)
8.5	单层钢筋混凝土柱厂房抗震设计实例 .....	(275)
8.5.1	横向抗震计算实例 .....	(275)
8.5.2	纵向抗震计算实例 .....	(282)
<b>第9章</b>	<b>非结构构件抗震设计 .....</b>	<b>(288)</b>
9.1	概述 .....	(288)

9.2	抗震计算要点 .....	(289)
9.3	建筑非结构构件的基本抗震措施 .....	(292)
9.4	建筑附属机电设备支架的基本抗震措施 .....	(294)
9.5	考虑附属设备与结构共同工作的简化抗震分析方法 .....	(295)
9.5.1	计算设备地震反应的时程分析法 .....	(295)
9.5.2	楼面设备地震反应的实用计算方法 .....	(296)
9.5.3	实用抗震计算方法的验证 .....	(296)
9.6	抗震设计实例 .....	(298)
9.6.1	建筑非结构构件抗震设计实例 .....	(298)
9.6.2	建筑附属设备支架抗震设计实例 .....	(298)
<b>第 10 章</b>	<b>结构隔震与消能减震设计基础知识 .....</b>	<b>(300)</b>
10.1	概述 .....	(300)
10.1.1	结构隔震 .....	(300)
10.1.2	结构消能减震 .....	(300)
10.2	建筑结构的基础隔震 .....	(301)
10.2.1	隔震装置 .....	(302)
10.2.2	隔震房屋的设计原理和设计要求 .....	(303)
10.2.3	建筑隔震示范工程 and 实际工程简介 .....	(308)
10.3	建筑结构的消能减震 .....	(313)
10.3.1	消能减震技术的特点 .....	(313)
10.3.2	消能减震装置 .....	(314)
10.3.3	消能减震建筑工程的设计要点 .....	(317)
10.3.4	消能减震建筑工程实例简介 .....	(319)
<b>参考文献</b>	.....	<b>(322)</b>

# 第 1 章 地震及结构抗震的基本知识

## 1.1 地震成因与地震类型

地震是一种自然现象。据统计,全世界每年发生的地震约达 500 万次,绝大多数地震由于发生在地球深处或者它所释放的能量小而使人们难以感觉到。人们能感觉到的地震叫有感地震,占地震总数的 1% 左右。造成灾害的强烈地震则为数更少,平均每年发生十几次。强烈地震会引起地震区地面剧烈摇晃和颠簸,并会危及人民生命财产安全和造成工程建筑物的破坏。地震还可能引起火灾、水灾、山崩、滑坡以及海啸。这些现象都会给人类造成灾难。

### 1.1.1 地球构造

为了便于了解地震的成因及其发展规律,我们简单地介绍一下地球的构造。

地球是一个近似于球体的椭球体,平均半径约 6370 km,赤道半径约 6378 km,两极半径约 6357 km。从物质成分和构造特征来划分,地球可分为地壳、地幔和地核三大部分(图 1-1)。

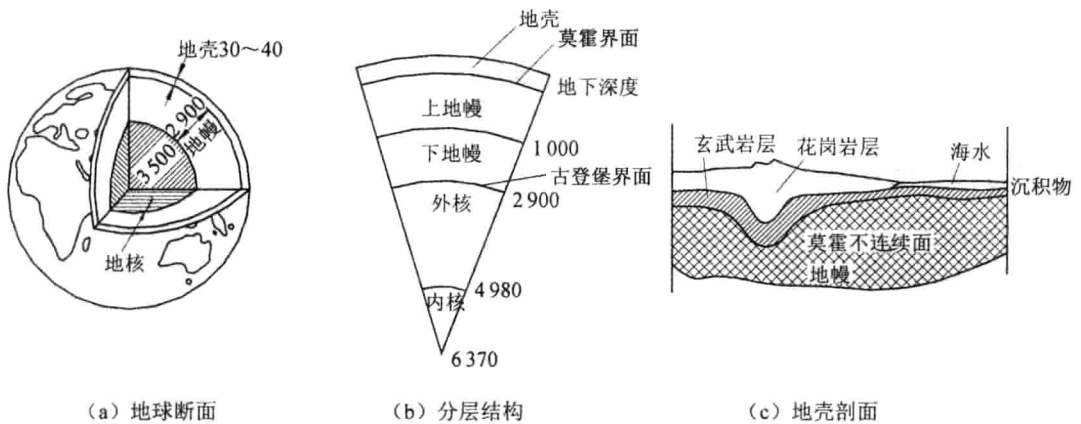


图 1-1 地球断面与地壳剖面(单位:km)

### 1. 地壳

地壳是地球外表面的一层很薄的外壳,它由各种不均匀的岩石组成。地壳的下界称为莫霍界面,或称莫霍不连续面。地壳的厚度在全球变化很大,大陆内一般厚 16~40 km,高山地区厚度更大,中国西藏高原及天山地区厚达 70 km。海洋下面厚度最小,一般为 10~15 km,最薄的约 5 km,世界上绝大部分地震都发生在这一层薄薄的地壳内。地壳表面为沉积层,陆地下面主要有花岗岩层和玄武岩层,海洋下面的地壳一般只有玄武岩层。

## 2. 地幔

地壳以下到深度约 2895 km 的古登堡界面为止的部分为地幔,约占地球体积的 5/6。地幔由密度较大的黑色橄榄岩等超基性岩石组成,其中上地幔物质结构不均匀,中、下地幔部分是比较均匀的。由于地幔能传播横波(剪切波),所以,根据推算,地幔应为固体。

## 3. 地核

古登堡界面以下直到地心的部分为地核,地核半径约为 3500 km,又可分为外核和内核。据推测,地核的物质成分主要为镍和铁。由于至今还没有发现有地震横波通过外核,故推断外核处于液态,而内核可能是固态。

地球各部分的密度随深度增加而增大,地球内部的温度随深度增加而升高。地球内部的压力强度在地幔上部约为 883 MPa( $9 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ ),地核中心的压力强度达 36 284 MPa ( $37 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ )。

### 1.1.2 地震的发生过程

地震就是地球内某处岩层突然破裂,或因局部岩层塌陷、火山爆发等发生了振动,并以波的形式传到地表引起地面的颠簸和摇晃,从而引起了地面的运动。发生地震的地方叫震源。震源是有一定范围的,但地震学里常常把它当作一个点来处理,这是因为地震学考虑的是大范围的问题,震源相对来说很小,可以当作一个点。震源在地表的投影叫作震中。震源至地面的垂直距离叫作震源深度。通常把震源深度在 60 km 以内的地震叫作浅源地震,60 ~ 300 km 以内的叫作中源地震,300 km 以上的叫作深源地震。

世界上绝大部分地震是浅源地震,震源深度集中在 5~20 km,中源地震比较少,而深源地震为数更少。中国东北吉林省东部地区曾发生过深源地震。一般来说,对于同样大小的地震,当震源较浅时,波及范围较小,而破坏程度较大;当震源深度较大时,波及范围则较大,而破坏程度相对较小,深度超过 100 km 的地震在地面上不致引起灾害。

### 1.1.3 地震的成因与类型

从地震成因来分,可分为构造地震、火山地震、塌陷地震等,此外,水库也能诱发地震,核爆炸可能在场地激发地震。

构造地震是由于地应力在某一地区逐渐增加,岩石变形也不断增加,到一定时候,在岩石比较薄弱的地方突然发生断裂错动,部分应变能突然释放,其中一部分能量以波的形式在地层中传播,这就产生了地震。构造地震发生断裂错动的地方形成断层,叫作发震断层,以区别于其他一些由于地震地面运动而造成的断层。构造地震常常发生在已有的断层上,这是因为这些地方既是应力集中的地方,又是岩石强度低的地方<sup>[1]</sup>。

近年来,从获得的地震记录和地震所伴生的地壳变动进行分析,有些学者认为,地震的成因是地下某地区因受到外力而破坏,亦即应力使地层面的两侧发生错移运动,形成断层,产生地震。从断层运动的种类来看,又分为正断层(图 1-2(a))、逆断层(图 1-2(b))以及横向断层(图 1-2(c))。1999 年 9 月 21 日,中国台湾集集大地震的现场可以清晰地看到上述三种断层的实际震害情况。

由于火山爆发,岩浆猛烈冲击地面时引起的地面震动叫作火山地震,火山地震的影响一般比较小,不致引起较大的灾害。



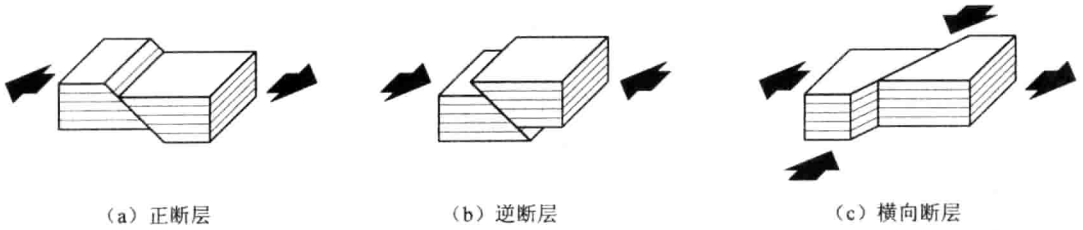


图 1-2 断层运动的种类

由于地表或地下岩层因某种原因(如较大的地下溶洞的塌陷或古旧矿坑的塌陷等)突然造成大规模陷落和崩塌时导致小范围内的振动叫作塌陷地震,塌陷地震造成的危害一般也比较小。

一般地,造成较大灾害的为构造地震,尤以浅源构造地震造成的危害大。因此,从工程抗震角度来说,主要是研究占全球地震发生总数约 90%的构造地震。

## 1.2 地震波及其传播

地震引起的振动以波的形式从震源向各个方向传播,这就是地震波。地震波是震源辐射的弹性波,一般分为体波和面波。体波是纵波和横波的总称,包括原生体波和各种折射、反射及其转换波。面波为次生波,一般指乐甫(Love)波和瑞雷(Rayleigh)波。下面分别介绍这两种波的主要特性。

### 1.2.1 体波

体波是指通过地球本体内传播的波,它包含纵波与横波两种。

纵波是由震源向外传递的压缩波,质点的振动方向与波的前进方向一致,如图 1-3(a)所示,一般表现出周期短、振幅小的特点。纵波的传播是介质质点间弹性压缩与张拉变形相间出现、周而复始的过程,因此,纵波在固体、液体里都能传播。横波是由震源向外传递的剪切波,质点的振动方向与波的前进方向垂直,如图 1-3(b)所示,一般表现为周期长、振幅较大的特点。由于横波的传播过程是介质质点不断受剪变形的过程,因此横波只能在固体介质中传播。

纵波与横波的传播速度理论上可分别用下式计算:

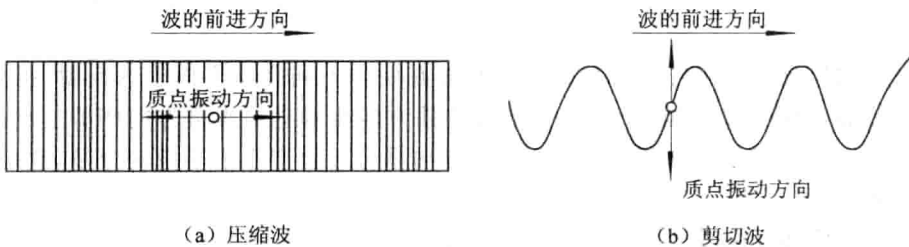


图 1-3 体波传播示意图

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\gamma)}{\rho(1+\gamma)(1-2\gamma)}} = \sqrt{\frac{\lambda+2G}{\rho}} \quad (1-1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\gamma)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1-2)$$

式中  $V_p$ ——纵波速度；  
 $V_s$ ——横波速度；  
 $E$ ——介质的弹性模量；  
 $\gamma$ ——介质的泊松比；  
 $\rho$ ——介质的密度；  
 $G$ ——介质的剪切模量；

$\lambda$ ——拉梅常数， $\lambda = \frac{\gamma E}{(1+\gamma)(1-2\gamma)}$ 。

在弹性介质中，这两种体波的传播速度之比为

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\gamma)}{1-2\gamma}} \quad (1-3)$$

一般情况下，式(1-3)的值大于1，例如，当 $\gamma=0.25$ 时， $V_p=\sqrt{3}V_s$ 。因此，纵波传播速度比横波传播速度要快，在仪器观测到的地震记录图上，一般也是纵波先于横波到达。因此，通常也把纵波叫作P波(Primary Wave)，把横波叫作S波(Secondary Wave)。

通过式(1-1)式(1-3)，不仅可以得到两种体波的传播速度和它们之间的关系，还可以得到介质的一些弹性参数。例如，当实际测得 $V_p$ 和 $V_s$ 时，利用式(1-3)可以得到介质的波松比 $\gamma$ ；在介质密度 $\rho$ 已知的情况下，在 $(E, G)$ ， $(\gamma, \lambda)$ ， $(V_p, V_s)$ 这三组参数中，若已知其中一组，利用式(1-1)式(1-3)就可以求得其他两组参数，这些参数在地震工程的研究与应用中是非常重要的。

### 1.2.2 面波

面波是指沿介质表面(或地球地面)及其附近传播的波，一般可以认为是体波经地层界面多次反射形成的次生波，它包含瑞雷波和乐甫波两种。

地震瑞雷波是纵波(P波)和横波(S波)在固体层中沿界面传播相互叠加的结果。瑞雷波传播时，质点在波的传播方向与地表面法向组成的平面内做逆进椭圆运动，如图1-4所示。瑞雷波在震中附近并不出现，要离开震中一段距离才形成，而且其振幅沿径向按指数规律衰减。

乐甫波的形成与波在自由表面的反射和波在两种不同介质界面上的反射、折射有关。乐甫波的传播，类似于蛇行运动，质点在与波传播方向相垂直的水平方向作剪切型运动，如图1-5所示。质点在水平向的振动与波行进方向耦合后会产生水平扭转分量，这是乐甫波的一个重要特点。

地震波的传播以纵波最快，横波次之，面波最慢。所以在地震记录上，纵波最先到达，横波到达较迟，面波在体波之后到达，一般当横波或面波到达时，地面振动最强烈。地震波记录是确定地震发生的时间、震级和震源位置的重要依据，也是研究工程结构物在地震作用下

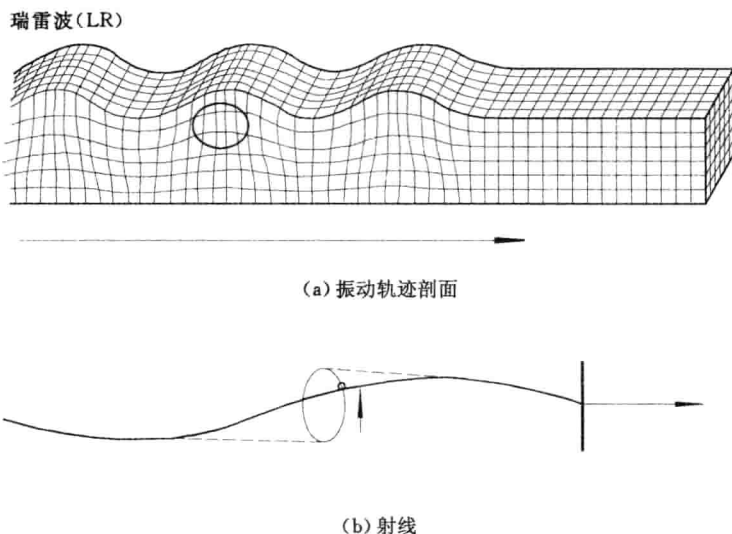


图 1-4 瑞雷波振动轨迹剖面和射线

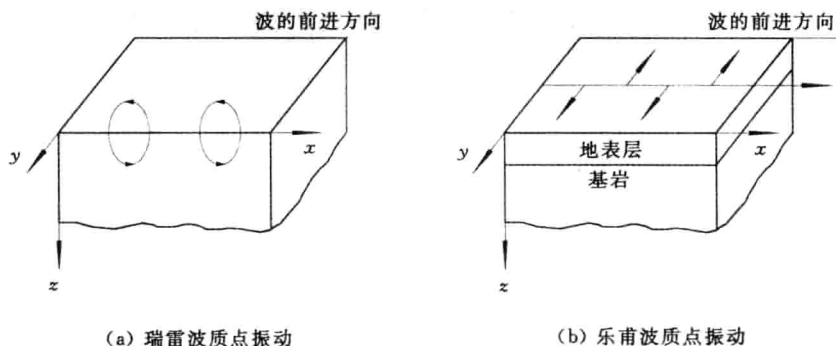


图 1-5 面波质点振动示意图

的实际反应的重要资料。

### 1.2.3 地震波的主要特性及其在工程中的应用

由震源释放出来的地震波传到地面后引起地面运动,这种地面运动可以用地面上质点的加速度、速度或位移的时间函数来表示,用地震仪记录到的这些物理量的时程曲线习惯上又称为地震加速度波形、速度波形和位移波形。我国在 2008 年 5 月 12 日汶川地震中记录到的加速度时程曲线如图 1-6 所示,这是我国近年来记录到的最有价值的地震地面运动记录之一。在目前的结构抗震设计中,常用到的则是地震加速度记录,下面就地震加速度记录的一些特性作简单的介绍。

#### 1. 地震加速度记录的最大幅值

最大幅值是描写地震地面运动强烈程度的最直观的参数,尽管用它来描写地震波的特性时还存在一些问题,但在工程实际中得到最普遍的接受与应用。在抗震设计中对结构进行时程反应分析时,往往要给出输入的最大加速度峰值,在设计用反应谱中,地震影响系数