

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
面向可持续发展的土建类工程教育丛书

▶ 建筑结构抗震设计

华中科技大学 张耀庭 主编
清华大学 潘 鹏
清华大学 钱稼茹 主审

STRUCTURAL ANTI-SEISMIC DESIGN



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



张耀庭

华中科技大学土木工程与力学学院教授，博士生导师，国家一级注册结构工程师，多年来一直从事结构工程与结构抗震领域的教学、科研与设计工作。在国内外核心期刊上发表科技论文100余篇，主编教材1本；主持或参与主持或参与横向课题多项。主要研究方向为“混凝土与预应力结构的基本理论与应用”及“结构抗震与减震”。



潘鹏

清华大学土木工程系教授，长江学者特聘教授，博士生导师。主要境内学术兼职包括：结构减震控制专业委员会委员、高层抗震专业委员会委员、防震减灾工程技术推广青年委员会副主任委员、建筑结构学报编委等。主要境外学术兼职包括：国际建筑和施工研究创新协会委员、日本兵库县国家地震中心（E-defense）专家委员会委员等。主持或参加多个国家和部委科研课题，主编或参编多部国家设计规范和技术标准。

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
面向可持续发展的土建类工程教育丛书

建筑结构抗震设计

主编 张耀庭 (华中科技大学)

潘 鹏 (清华大学)

参编 黄 斌 (武汉理工大学)

苏 原 (华中科技大学)

樊 剑 (华中科技大学)

主审 钱稼茹 (清华大学)



机械工业出版社

DF请认：e.tongbo

本书按《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)编写,以地震学的基础知识、结构抗震设计的基本理论与方法、工程结构的抗震三部分内容为主线,对结构抗震设防的基本知识、地震作用及危害、结构抗震设计的基本原理与方法等进行了全面的介绍。全书共10章,主要内容包括建筑抗震设计概论、地基与基础抗震设计、地震作用与结构抗震验算、钢筋混凝土结构的抗震性能与设计、砌体结构房屋抗震设计、单层厂房抗震设计、多层和高层钢结构房屋抗震设计、隔震与消能减震设计、结构弹塑性地震反应分析、基于性能的抗震设计方法简介。为便于学习,每章给出了习题及思考题。

本书可作为高等院校土建类专业相关课程的教材,也可作为从事工程结构设计与施工的技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构抗震设计/张耀庭,潘鹏主编. —北京:机械工业出版社, 2018.7

(面向可持续发展的土建类工程教育丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-111-59900-5

I. ①建… II. ①张… ②潘… 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(2018)第094064号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:林辉 责任编辑:林辉 臧程程 高凤春 马军平

责任校对:王延 封面设计:张静

责任印制:孙炜

北京中兴印刷有限公司印刷

2018年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·23印张·563千字

标准书号:ISBN 978-7-111-59900-5

定价:55.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

前言

地震工程学发展至今已有一百余年的历史，“建筑抗震设计”是我国高校土木工程专业的核心专业课程之一。《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）的实施，体现了国家在新时期有关土木工程结构抗震设计的基本原则和方法。《建筑工程抗震设防分类标准》（GB 50223—2008）、《中国地震动参数区划图》（GB 18306—2015）等相关规范的实施，体现了地震工程的最新研究成果。

当前，有关建筑抗震设计方面的教材，大多以抗震规范为蓝本，基于对规范条文的介绍和解释而编写，较严重地受到了规范章节及条文内容的束缚与限制；从学生学习的角度上看，内容多而庞杂。因此，编写一本系统介绍建筑抗震设计基础理论、方法、应用及发展趋势，适应不同层次教学与科研人员需求，具有鲜明特点的建筑抗震设计教科书，正是本书的主要编写宗旨之一。

本书共 10 章，以地震学的基础知识、结构抗震设计的基本理论与方法、工程结构的抗震三部分内容为主线，对结构抗震设防的基本知识、地震作用及危害、结构抗震设计的基本原理与方法等进行了全面的介绍。在有关结构非线性地震响应分析的问题上，对其力学分析基础、数值建模时材料的本构关系与各种单元类型、地震动的选择与调整方法等关键技术问题进行了较全面的分析与介绍。另外，书中吸收了一些近年来在工程抗震领域的最新研究成果，包括基于性能的抗震设计、消能减震与隔震结构的设计等内容。本书第 1 章由张耀庭、潘鹏、苏原执笔，第 2、6 章由张耀庭执笔，第 3、4 章由张耀庭、苏原执笔，第 5、7 章由黄斌执笔，第 8 章由潘鹏执笔，第 9、10 章由樊剑执笔，全书由张耀庭负责统稿，由钱稼茹教授主审。

限于编者水平，书中难免存在不当之处，敬请读者批评指正。

编者

目 录

前言

上篇 基础篇

| | | |
|--------------|---------------------------|-----|
| 第 1 章 | 建筑抗震设计概论 | 2 |
| 1.1 | 地震及地震波 | 2 |
| 1.2 | 地震震级与地震烈度 | 10 |
| 1.3 | 地震动 | 15 |
| 1.4 | 地震震害与工程抗震设防 | 23 |
| 1.5 | 建筑抗震概念设计 | 26 |
| 1.6 | 建筑抗震设计课程的任务和内容 | 40 |
| | 习题及思考题 | 42 |
| 第 2 章 | 地基与基础抗震设计 | 44 |
| 2.1 | 场地 | 45 |
| 2.2 | 地震时地面运动特性 | 49 |
| 2.3 | 天然地基与基础 | 55 |
| 2.4 | 地基土的液化 | 57 |
| 2.5 | 桩基的抗震验算 | 64 |
| 2.6 | 软弱黏性土地基 | 66 |
| | 习题及思考题 | 67 |
| 第 3 章 | 地震作用与结构抗震验算 | 69 |
| 3.1 | 结构抗震设计理论的发展 | 69 |
| 3.2 | 单自由度体系的地震反应 | 71 |
| 3.3 | 单自由度弹性体系地震作用计算的反应谱法 | 78 |
| 3.4 | 多自由度弹性体系的水平地震反应分析 | 86 |
| 3.5 | 振型分解反应谱法 | 92 |
| 3.6 | 底部剪力法 | 96 |
| 3.7 | 结构基本周期的近似计算 | 100 |
| 3.8 | 平扭耦联振动时结构的抗震计算 | 103 |
| 3.9 | 竖向地震作用计算 | 105 |
| 3.10 | 结构抗震验算 | 106 |



| | |
|----------------------------|-----|
| 习题及思考题 | 111 |
| 第4章 钢筋混凝土结构的抗震性能与设计 | 115 |
| 4.1 多层和高层钢筋混凝土结构的震害 | 115 |
| 4.2 多高层钢筋混凝土结构选型、结构布置和设计原则 | 121 |
| 4.3 钢筋混凝土框架结构的抗震设计 | 131 |
| 4.4 抗震墙结构的抗震分析 | 157 |
| 4.5 框架-抗震墙结构的抗震设计 | 164 |
| 习题及思考题 | 173 |
| 第5章 砌体结构房屋抗震设计 | 175 |
| 5.1 震害及其分析 | 175 |
| 5.2 砌体结构房屋抗震设计的一般规定 | 178 |
| 5.3 砌体结构房屋抗震验算 | 181 |
| 5.4 砌体房屋抗震构造措施 | 191 |
| 5.5 配筋混凝土小型空心砌块抗震墙房屋抗震设计要点 | 196 |
| 5.6 底层框架-抗震墙砌体房屋的抗震设计 | 201 |
| 习题及思考题 | 206 |
| 下篇 提 高 篇 | |
| 第6章 单层厂房抗震设计 | 210 |
| 6.1 震害及分析 | 210 |
| 6.2 单层厂房结构的抗震措施 | 211 |
| 6.3 单层厂房横向抗震计算 | 215 |
| 6.4 单层厂房纵向抗震计算 | 223 |
| 6.5 抗震构造措施和连接的计算要求 | 234 |
| 6.6 计算实例 | 238 |
| 习题及思考题 | 245 |
| 第7章 多层和高层钢结构房屋抗震设计 | 248 |
| 7.1 概述 | 248 |
| 7.2 震害及其分析 | 248 |
| 7.3 抗震设计一般规定 | 251 |
| 7.4 抗震验算 | 257 |
| 7.5 抗震构造措施 | 263 |
| 7.6 多层与单层钢结构厂房的抗震设计 | 268 |
| 习题及思考题 | 277 |
| 第8章 隔震与消能减震设计 | 278 |
| 8.1 结构振(震)动控制概述 | 278 |
| 8.2 隔震结构设计 | 279 |



| | |
|---------------------------------|------------|
| 8.3 消能减震结构设计 | 296 |
| 习题及思考题 | 313 |
| 第9章 结构弹塑性地震反应分析 | 314 |
| 9.1 概述 | 314 |
| 9.2 结构恢复力模型 | 315 |
| 9.3 结构计算模型 | 317 |
| 9.4 时程分析法 | 322 |
| 9.5 静力弹塑性分析 | 327 |
| 习题及思考题 | 343 |
| 第10章 基于性能的抗震设计方法简介 | 344 |
| 10.1 概述 | 344 |
| 10.2 结构性能抗震设计的理论框架 | 345 |
| 10.3 直接基于位移的抗震设计方法 | 348 |
| 10.4 框架结构直接基于位移的抗震设计 | 351 |
| 习题及思考题 | 358 |
| 参考文献 | 359 |

上篇

基础篇



第1章

建筑抗震设计概论

地震是危及人民生命财产的突发式自然灾害，地震活动是地球形成以后持续发生的自然现象。地球上每天都在发生地震，一年约有 500 万次，其中约 5 万次人们可以感觉到；能造成破坏的约有 1000 次；7 级以上的大地震平均一年有十几次。据史料记载，我国历史上最早关于地震的记载约为公元前 23 世纪，发生在今山西永济蒲州，迄今已有四千多年的历史。然而，现代地震工程学发展至今仅有一百多年的历史，工程界在有关地震动及结构抗震的问题上进行了大量的研究，基本上掌握了结构抗震设计的一般原理与方法。大量的震害表明，对土木工程结构进行必要的抗震设计，是消除或减轻地震灾害的有效措施。但是，很多结构在不断出现的地震中的表现，往往并非人们所预期的结果，因地震动而导致的结构物破坏，依然是地震引起的主要灾害。这促使土木工程师们更深入地研究和掌握地震作用的基本规律，以便更加合理地进行结构的抗震设计。工程抗震设计的主要目的是增强建筑结构抵抗地震作用的能力，了解和掌握地震学的基本概念。因此，本章将主要介绍有关地震学及工程抗震的一些基本概念和知识。

■ 1.1 地震及地震波

1.1.1 地震

地震是地壳快速释放能量过程中产生的地面运动，或者说地震主要是指因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。图 1-1 为有关地震概念的示意图。

震源是地壳深处岩石发生断裂、错动的地方，即地震时应变能释放区。

震中是震源在地表的投影点。震中距是指从震中到地面上任何一点的距离。

能量中心是指地震能量释放的中心，一般是断层破裂面的几何中心。图 1-2a 显示了世界上最大的陆地断裂带——东非大裂谷，其绵延 6000km，最深处达 2km。对于较小的地震，能量中心一般和震源重合；对于较大的地震，能量中心则多和震源不重合。

描述地震的三要素为时间、空间和强度。描述一个地震的时候，应该说明地震发生的时间，震源的经纬度、深度及本次地震的强度。在地震预报中预报一次地震也需要确定这三个要素。对已发生的地震，实际的震中、震源位置的确定通常会有几千米到几十千米的误差，极个别的可能存在上百千米的误差。地震预报很难，几乎不可能给出准确预报，世界上最成功的典范是 1975 年我国地震工程学者对辽宁海城地震做出的预报。

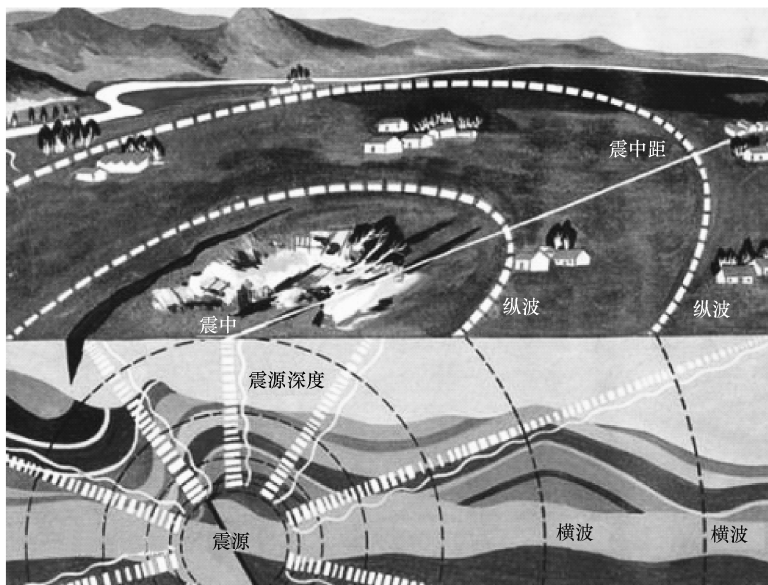
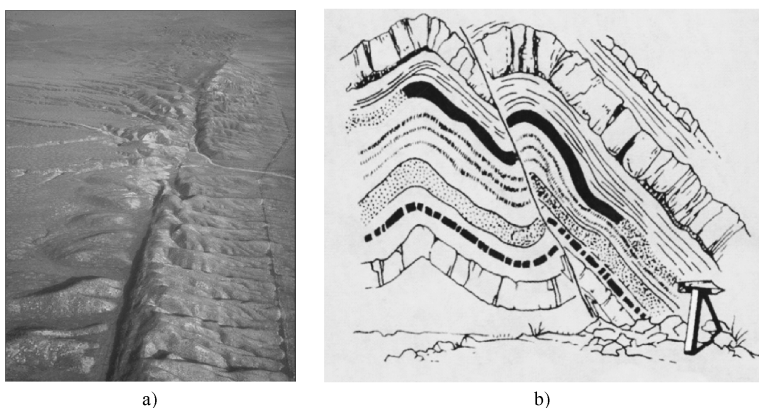


图 1-1 有关地震概念的示意图



a)

b)

图 1-2 裂谷与断层

a) 东非大裂谷 b) 断层示意图

根据震源位置的深浅，地震可分为浅源地震、中源地震和深源地震。对于浅源地震来说，其震源深度一般不超过 70km，唐山地震及 El-Centro 地震均为浅源地震，浅源地震约占总地震的 72.5%。当震源深度在 70~300km 时，该地震称为中源地震，中源地震约占总地震的 23.5%，在南美、日本海、印尼及中国北部地区较为常见。深源地震的震源深度超过 300km，约占总地震的 4%，深源地震的峰值加速度小，卓越频率在 0.2~3Hz，由于岩石和土壤的作用，当深源地震传递至地面时，高频部分一般已被过滤掉。

大地震前后，在震源附近总有一系列小震发生，按发震时间排列起来（包括本次大地震）称为地震序列。某一序列地震中最强烈的一次地震称为主震，主震前的地震称为前震，一般主震之后还伴随有数次余震。根据地震序列的特征不同，地震也可分为以下几种类型。

单发型：有突出的主震，余震次数少、强度低；主震所释放的能量占全序列的 99.9% 以上；主震震级和最大余震相差 2.4 级以上。

主震型：主震非常突出，余震十分丰富；最大地震所释放的能量占全序列的 80% 以上；主震震级和最大余震相差 0.7~2.4 级。海城地震和唐山地震均属于此类型。

群震型：有两个以上大小相近的主震，余震十分丰富；主要能量通过多次震级相近的地震释放，最大地震所释放的能量占全序列的 80% 以下；主震震级和最大余震相差 0.7 级以下。较为典型的群震型地震发生在 1960 年智利，从 5 月 21 日到 6 月 22 日发生三次超过 8 级的地震。

1.1.2 地震的成因和机制

根据地震的成因，可将地震分为以下几类：

构造地震——由于岩层断裂，发生变形和错动，在地质构造上发生巨大变化而产生的地震，也叫断裂地震。此类地震占总地震数量的 90% 以上，破坏性地震多属于构造地震。

火山地震——火山爆发时所引起的能量冲击产生的地壳振动。火山地震有时也相当强烈，但这种地震所波及的地区通常只限于火山附近几十千米的范围内，而且发生次数也较少，只占地震次数的 7% 左右，所造成的危害较轻。

陷落地震——地层陷落引起的地震。这种地震发生的次数更少，只占地震总次数的 3% 左右，震级不大，影响范围有限，破坏也较小。

诱发地震——在特定的地区因某种地壳外界因素诱发（如陨石坠落、水库蓄水、深井注水）而引起的地震。

人工地震——如地下核爆炸、工业爆破等人为活动引起的地面振动。

由于构造地震发生的次数多，影响范围广，它是地震工程的主要研究对象。对于构造地震，可以从宏观背景和局部机制两个层次上解释其具体成因。板块运动目前被公认为诱发构造地震的宏观原因，即外因。板块构造学说认为地球表面的岩石圈分为几个大板块，均漂浮在其下面的软流圈上，如图 1-3 所示。软流圈的物质较轻、较软，为板块运动提供了条件。

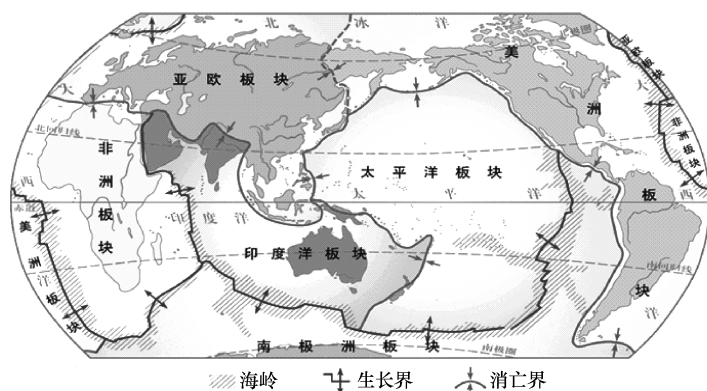


图 1-3 地球表面 6 大板块

板块构造理论将地球分为 6 大板块，分别为亚欧板块、非洲板块、美洲板块、印度板块（或称印度洋板块、澳大利亚板块）、南极洲板块和太平洋板块，板块厚 80~200km。有人将



美洲板块分为北美板块和南美板块，则全球有7大板块。根据地震带的分布及其他标志，人们进一步划出纳斯卡板块、科科斯板块、加勒比板块、菲律宾海板块等次一级不定型板块。板块的划分并不遵循海陆界线，也不一定与大陆地壳、大洋地壳之间的分界有关。大多数板块包括大陆和洋底两部分。太平洋板块是唯一基本上由洋底岩石圈构成的大板块。

板块边缘则是指一个板块的边缘，板块边界是地质活动带。根据板块的相对运动状态，边界可分为四类：①分离型板块边界；②汇聚型板块边界；③转换型板块边界；④不定型。震源机制表明，前三类边界的主导应力状态分别是引张、挤压和剪切。板块间相对运动会导致能量在板块边界累积。板块运动引起岩层变形积累，达到一定程度突然破裂，释放的巨大能量以波的形式向外传播，引起地面运动，迫使结构振动，产生破坏。在大板块边缘地震最多，这些地震称为板缘地震，一般属于浅源地震。

图1-4为全球地震带分布图，图上可以看到两条大地震带：环太平洋地震带，该地区地震占世界地震总数75%以上；亚欧地震带，至印度与环太平洋地震带相遇，其上发生的地震占地震总数22%。这两个地震带属于板缘地震带，大小板块边缘都是地震集中处。有些地震不发生在板块边缘，而是在板块内，称为板内地震，约占15%。板块内部地震分布零散，危害性大，机制复杂，如唐山地震。中国位于亚欧板块东南端，东为太平洋板块，南为印度洋板块，亚欧板块向东、太平洋板块向西、印度洋板块向北挤压中国大陆，因此，中国是地震多发国家。

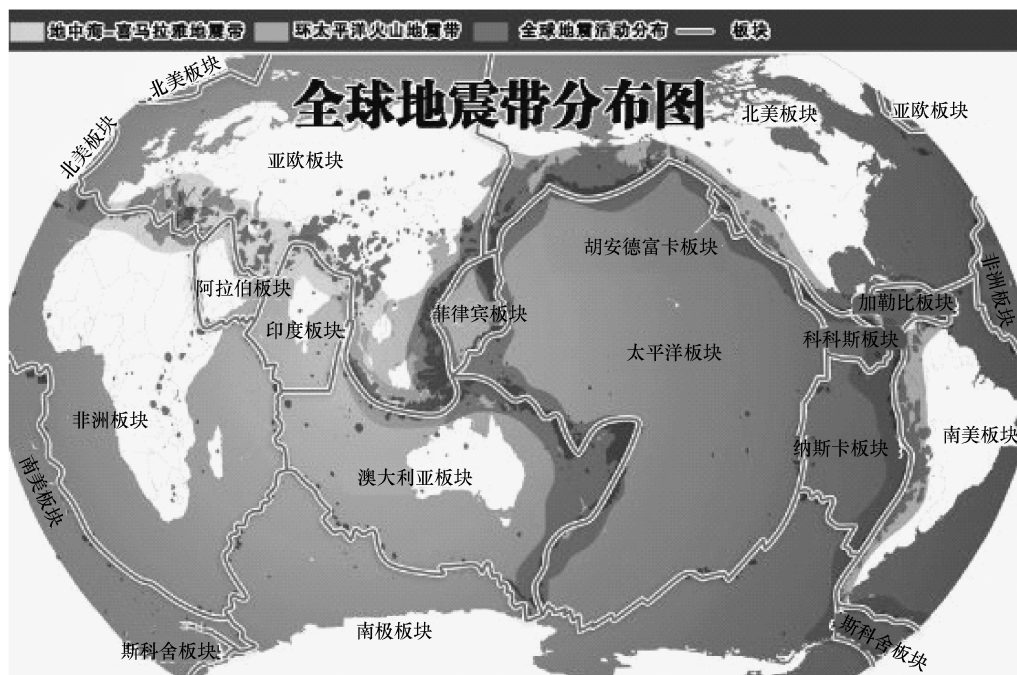


图 1-4 全球地震带分布图

目前最流行且最有说服力的解释构造地震成因的局部机制理论是弹性回跳理论，即内因。这一理论是由里德（H. F. Reid）在 1911 年根据 1906 年旧金山 8.3 级大地震前后的观测结果提出的，如图 1-5 所示。其主要论点如下：



1) 地壳是由弹性的有断层的岩石组成的。

2) 地壳运动产生的能量以弹性应变能的形式在断层及其附近的岩层中长期积累。

3) 当弹性应变能积累及岩层变形达到一定程度时，断层上某点（应力超过强度极限）两侧的岩体向相反方向突然滑动，地震因之产生，断层上长期积累的弹性应变能突然释放。

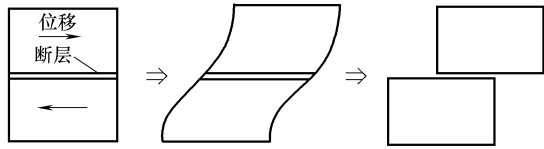


图 1-5 弹性回跳理论示意图

弹性回跳理论没有讲地壳如何运动、弹性能量怎样积累，而板块构造运动弥补了弹性回跳理论的不足，即构造地震是由断层运动引起的。

断层是地震学中的一个重点研究对象。根据断层两侧岩体滑动的形式，可分为倾滑断层和走滑断层两种，如图 1-6 所示。倾滑断层可以分为正断层和逆断层，所产生的地震较小。走滑断层分为左旋断层和右旋断层，可产生较大的地震。实际地震可能出现两种变形模式均存在的情况。如 1995 年日本阪神地震是右旋错动，震中地表错动达 1m，地震机制与唐山地震基本一致。

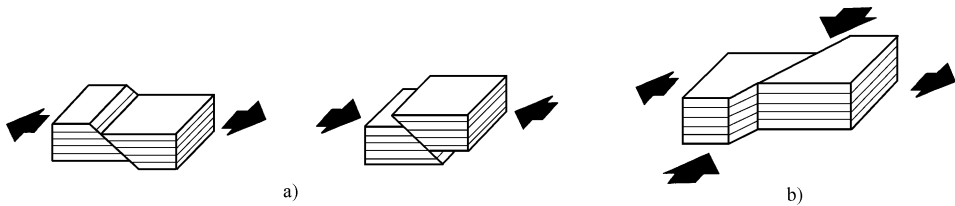


图 1-6 断层变形机制

a) 倾滑断层 b) 走滑断层

1.1.3 地震波的基本概念

1. 地震波特性

地震发生时，震源释放的能量以波的形式从震源向周围地球介质传播，这种波称为地震波。地震波所引起的强烈地面运动，会导致建筑结构的破坏。地震波是地震产生的结果，也是导致结构物发生破坏的直接原因。地震波是研究震源和地球构造的基础，是地震工程学的重要理论基础。

对地震波特征的了解是正确估计结构地震反应的基础。在大型复杂结构抗震问题的研究中，常常需要进行结构多点输入和多维输入的地震反应分析，当计算分析方法合理可靠时，地震动空间分布场特性的确定是否正确，决定了分析结果是否可靠。关于地震波的特性，首先需要强调几个特点：

- 1) 波动是能量的传播，而不是介质物质的传播。
- 2) 固体介质中的波可以是弹性波、非线性波、弹塑性波。
- 3) 在震源处，介质的变形是非线性的，而离开震源一定距离后，岩石的变形表现为线性。在线弹性介质中传播的波称为弹性波，地震波理论一般都是弹性波理论。



在弹性波理论中,最简单的是一维波动理论。在结构地震反应分析中,常采用一维介质模型考虑土层场地的影响,对于构造规则的多层结构也有研究人员采用一维剪切型结构进行研究。图 1-7 为一维剪切直杆的波动示意图,假定 G 为杆的剪切模量, ρ 为杆的质量密度, A 为杆的横截面面积。剪切杆的运动状态可由杆轴线的横向位移 $u(x, t)$ 表示。

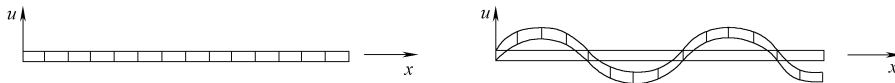


图 1-7 一维剪切直杆及其变形

由达朗贝尔原理很容易推出杆的一维弹性波动方程,即式 (1-1),其中 $c = \sqrt{G/\rho}$ 表示应力波速,是描述波动运动的重要参数。

$$\frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial x^2} \quad (1-1)$$

式中, $u(t, x)$ 为横向位移; x 为空间坐标; t 为时间坐标。

对于波动方程,可以直接求解偏微分方程,该方法称为时域解法;也可以将其通过积分变换转化至频域的范围再求解,该方法也称为频域解法。

2. 地震波的传播机制

地球介质中的地震波类型较多,主要为面波和体波。面波沿着地球表面或者介质界面传播,体波可以在地球内部传播。

体波又分为 P (primary) 波和 S (secondary) 波。P 波也可称为纵波或压缩波,可在固体、液体及气体介质中传播。P 波的质点振动方向与波动的传播方向一致,如杆中纵波、空气中声波。P 波的周期短,振幅小。P 波的速度按式 (1-2) 计算。

$$c_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1-2)$$

式中, E 、 ν 、 ρ 分别为介质的弹性模量、泊松比及密度。

P 波在岩石中的传递速度为 5000~7000m/s,在土壤中的传递速度为 200~1400m/s。

S 波一般称为横波,其主要特点在于质点振动方向与波动的传播方向垂直,只能在固体中传播,与 P 波相比, S 波的周期更长,振幅更大。S 波的速度在岩石中为 3000~4000m/s,在土壤中的传递速度为 100~800m/s, S 波的波速按照式 (1-3) 计算。

$$c_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (1-3)$$

P 波与 S 波的波速之比为

$$\frac{c_P}{c_S} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (1-4)$$

一般来说,岩石的泊松比为 0.25, P 波的速度约为 S 波的 1.73 倍。一般弹性介质的泊松比为正,且不超过 0.5,所以 P 波的速度必然大于 S 波;在一个场地中,人们必然先感知到 P 波后感知到 S 波,这也是 P 波和 S 波名字的由来。

假若介质是均匀无限空间，则只能存在体波，且各种体波可以独立存在。如果介质存在界面，界面两侧介质的性质不同，则体波在界面上将产生反射和折射，除产生反射和折射的体波外，也会产生其他类型的波。面波即是离开震中一定距离后，由体波入射到地面或介质界面时产生的转换波。面波的特点是其能量局限在地表面或界面附近的区域，波的能量沿地表面或界面传播，波动的振幅随深度的增加而减小。地球介质中的 S 波又分为 SH 波和 SV 波。SH 波为平面外波动；SV 波为平面内波动。需要注意的是，引起结构破坏的主要是 S 波。在地球介质的交界面上，地震波的入射、反射和折射遵循斯内尔定律。P 波和 S 波经过反射和折射，可以形成不同类型的地震波，以下分别介绍。

瑞利波是主要的面波之一，它是由 SV 波以超临界角入射到弹性半空间表面时干涉产生的转换波，可以存在于弹性半空间及成层弹性半空间中。在震中区一般不出现瑞利波。瑞利波的存在条件：震中距 Δ 满足式 (1-5) 的要求。

$$\Delta > \frac{c_R h}{\sqrt{c_P^2 - c_R^2}} \quad (1-5)$$

式中， h 为震源深度， c_R 、 c_P 分别为瑞利波和 P 波的波速。

在弹性半空间中，瑞利波是一种沿着自由表面传播的波，地球-空气界面可以看作自由

界面，如图 1-8 所示。瑞利波的特点是在地表面的质点做逆进椭圆运动。理论上说，瑞利波只能沿着均匀半空间自由表面和均匀介质自由界面传播。瑞利波沿二维自由表面扩展，在距波源较远处，其摧毁力比沿空间各方向扩展的纵波和横波大得多，因而它是地震学中的主要研究对象。地滚波

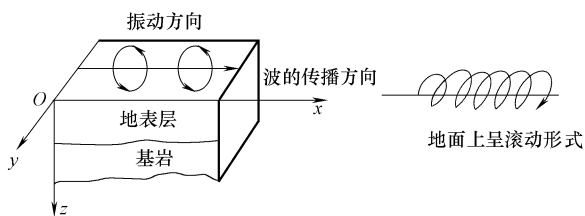


图 1-8 瑞利波示意图

是瑞利波中一种特殊波，它沿着地表传播，其特征是低速、低频和强振幅。

另外一种重要的面波为勒夫波，它在实际地震观测中被发现后，由勒夫从理论上证明了它的存在。勒夫波的存在条件是：弹性半空间上存在一软弱水平覆盖层，覆盖层的波速 $c_{s1} < c_{s2}$ ，如图 1-9 所示。勒夫波是一种 SH 型波，是由 SH 产生的面波。勒夫波的传播类似于蛇行运动，即质点做与传播方向相垂直的水平运动，无竖向运动分量，如图 1-10 所示。

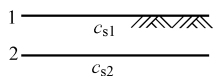


图 1-9 勒夫波存在条件

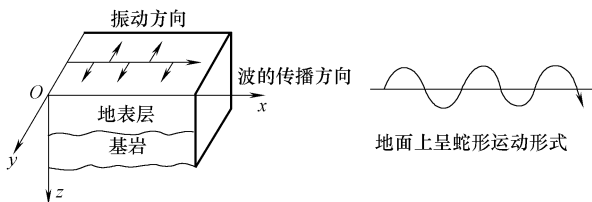


图 1-10 勒夫波传播俯视图



勒夫波的传播速度介于两种介质中的横波波速之间, 即 $c_{s1} < c_L < c_{s2}$ 。相对于瑞利波, 勒夫波仅有一个水平分量。

下面根据球面波和柱面波振幅随传播距离变化的特点来定性说明地震波的几何衰减规律。对于体波, 其波动振幅的平方与地震能量密度成正比, 而地震能量密度与震中距的平方成反比。如式 (1-6) 所示, 体波的振幅与震中距成反比例关系。

$$A^2 \propto E_b \propto 1/r^2 \Rightarrow A \propto 1/r \quad (1-6)$$

式中, A 为波动振幅; E_b 为体波能量密度; r 为震中距, 下同。

而对于面波, 其波动振幅的平方与地震能量密度成正比, 而地震能量密度与震中距成反比, 如式 (1-7) 所示, 面波的振幅与震中距的平方根成反比关系。由此可见, 面波的衰减比体波慢得多。

$$A^2 \propto E_s \propto 1/r \Rightarrow A \propto 1/\sqrt{r} \quad (1-7)$$

三维空间中体波和面波的传播也叫辐射传播。由于波动辐射传播引起的波动振幅衰减这一效应被称为辐射阻尼。引起地震波振幅衰减的另一个原因是介质的非弹性, 即存在介质阻尼。

在震中区, 地震动以体波为主; 在远离震中的区域将出现面波成分, 当震中距较大时, 地震动分量中面波的振幅可能大于体波。图 1-11 显示了不同地震波在空间分布的先后顺序和质点振动的特点。P 波传播速度最快, 接下来是 S 波, S 波之后一般是勒夫波, 而瑞利波最晚到达。

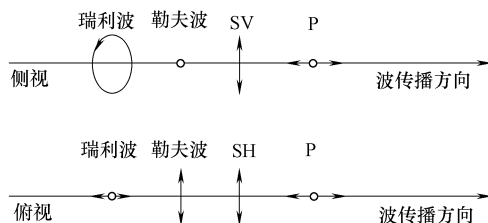


图 1-11 地震波在空间分布的先后顺序和质点振动的特点

各种地震波的传播特性不同, 导致近场地震和远场地震的加速度时程曲线区别较大。近场地震的地面运动在很短时间内达到峰值, 地震波中短周期成分较多, 地面震动的持续时间不长, 衰减较快。在远离震中的地区, 地面运动开始较晚, 但震动幅度大, 长周期成分较多, 衰减较慢。图 1-12 给出了典型的近场地震与远场地震的时程曲线。

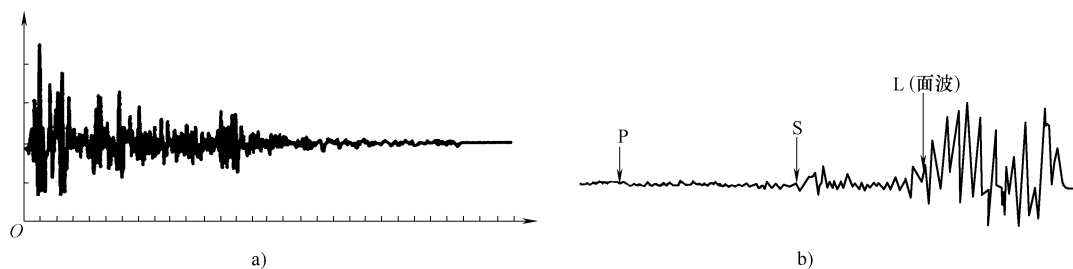


图 1-12 近场地震与远场地震的时程曲线
a) 近场地震时程曲线 b) 远场地震时程曲线

在一个工程场地, P 波首先到达, 然后 S 波到达, 最后面波出现。由于大部分地震台站离震中较远, 所得记录一般为远震记录, 在这些记录中面波的振幅往往大于体波的振幅, 在早期的记录中明显显示了这一特征。但这一结论对强震记录一般不成立: 一是由于强震记录