

“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

# 工程结构抗震设计

合肥工业大学 王静峰 主编  
同济大学 李国强 主审

STRUCTURAL ANTI-SEISMIC DESIGN

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

“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

# 工程结构抗震设计

主 编 王静峰  
副主编 赵春风 胡宝琳 丁兆东 胡 波  
参 编 郭 磊 霍永伦 仲力平 李贝贝  
        潘学蓓 卢 欣 宋慧慧  
主 审 李国强



机械工业出版社

“工程结构抗震设计”课程是高等院校土木工程专业的主要专业课之一。本书依据国家现行标准,参考了土木工程专业指导委员会建议的“工程结构抗震设计”课程要求和国家专业认证(评估)要求,结合作者多年的教学实践经验编写而成,吸收了国内外工程结构抗震的最新研究成果,主要包括:地震工程基础知识,场地、地基和基础抗震,抗震设防与抗震概念设计,地震作用与结构抗震验算,多层及高层钢筋混凝土房屋抗震设计,多层及高层钢结构房屋抗震设计,多层砌体房屋抗震设计,钢筋混凝土排架柱厂房抗震设计,桥梁结构抗震设计,地下建筑抗震设计,隔震和消能减震设计,抗震防灾的高新技术应用。每章均附本章提要、本章知识点和习题,便于读者掌握运用所学知识。

本书可作为高等院校土木工程专业全日制本科生或土建类专业成人教育的教材,也可供土木工程技术人员和研究生阅读参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

工程结构抗震设计/王静峰主编. —北京:机械工业出版社, 2018. 10  
(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 978-7-111-61184-4

I. ①工… II. ①王… 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239362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

责任校对:郑婕 封面设计:张静

责任印制:张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2019年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·24.5印张·559千字

标准书号:ISBN 978-7-111-61184-4

定价:58.00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

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

封面无防伪标均为盗版

# 前言

地震灾害具有突发性、不可预测性，会产生严重次生灾害，对社会产生重大影响。我国地处环太平洋地震带与欧亚地震带之间，是世界地震灾害最严重的国家之一。较严重的地震灾害在我国频繁发生。例如，2008年四川省汶川地震，2010年青海省玉树地震，2013年四川省雅安地震，2015年西藏地震，2016年台湾省高雄地震，2017年四川省九寨沟地震，2018年台湾省花莲地震等。在此背景下，如何提升我国工程结构的防震减灾能力，最大程度降低灾害中人员伤亡数量，最大限度减少财产损失；如何培养具有防震减灾能力的工程技术人才，已成为关乎国家发展与社会安定的重大战略问题。

2008年汶川地震后，住建部、中国地震局制定和出台了《切实做好全国中小学校舍安全工程有关问题的通知》，并对相关国家、行业抗震标准进行了新编和修订，如GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》（2010年、2016年两次修订）、GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》、JTG/T B02—01—2008《公路桥梁抗震设计细则》，JGJ 99—2015《高层建筑民用钢结构技术规程》（2015年修订）、GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》等，促进了我国工程结构抗震的发展和应用。然而，现有抗震教材的知识点尚未能反映这些变化。

近年来，科学技术不断发展和进步，推动了抗震新材料、新技术、新理论在工程结构中的应用，解决了传统抗震能力和手段的不足。一方面，减震技术理论与应用的发展，促进了基础隔震、消能减震、结构主被动控制、功能可恢复等新技术的研究和应用；另一方面，计算机技术的发展，促进了高性能计算、精细有限元模拟方法、城市建筑群震害模拟、虚拟现实等高新技术在城市建设和地震灾害防御中的高效应用。尽管这些抗震新技术在建筑工程、桥梁工程、地下结构和交通工程中也得到飞速发展和良好应用，但是并未在现有抗震教材中得到体现。2017年国务院提出关于进一步加强防震减灾工作的意见，在“十三五”期间加强防震减灾新技术的应用，并推动其在我国建筑、交通、水利行业中的应用。因此，现有抗震教材迫切需要更新和创新。

本书根据《高等学校土木工程本科指导性专业规范》和《土木工程专业工程教育评估（认证）工作指南》的要求，并结合GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》等国家新规范进行编写。本书吸收了当前工程结构新的抗震研究成果，内容通俗易懂，知识点覆盖全面，注重基本理论与方法，核心知识单元、知识点与学时相结合，实现教学内容的系统性、先进性和应用性；紧扣国家标准规范，增加工程结构的实用抗震构造，实现理论与工程实践相结合；实现全覆盖大土木专业的各专业方向，内容更加全面，适用于建筑工程、道路桥梁、岩土工程、地下空间结构、交通工程和港口工程等专业；引入了工程防震减灾新技术，增加了减隔震、计算机与仿真技术、现代结构试验技术、结构监测与预警技术、虚拟现实技术等新技术，丰富了教学手段。

本书由合肥工业大学王静峰教授担任主编。全书共 12 章，第 1、6、7、8 章由合肥工业大学王静峰编写，第 2、11、12 章由合肥工业大学赵春风编写，第 3、4 章由合肥工业大学丁兆东编写，第 5 章由中国矿业大学胡波编写，第 9、10 章由上海大学胡宝琳编写。在本书编校整理过程中，郭磊、霍永伦、仲力平、李贝贝、潘学蓓、卢欣、宋慧慧协助主编做了大量工作。

本书在编写过程中，学习和参考了国内外已出版的大量教材和论著，谨向相关作者致以诚挚的谢意。

同济大学李国强教授在百忙之中对本书进行了认真审阅，提出了许多宝贵意见和建议，使本书得到了进一步的完善。在此对其表示衷心的感谢。

限于时间和水平，书中的疏漏与不妥之处，敬请广大同行及读者批评指正。

编 者



工程结构抗震设计  
使用说明



# 目 录

## 前 言

<b>第 1 章</b>	<b>地震工程基础知识</b> .....	1
	本章提要 .....	1
1.1	概述 .....	1
1.2	地震基础知识 .....	2
1.3	地震活动与地震分布 .....	4
1.4	地震动 .....	5
1.5	地震震害 .....	12
1.6	地震预警与救援 .....	16
	本章知识点 .....	18
	习题 .....	19
<b>第 2 章</b>	<b>场地、地基和基础抗震</b> .....	20
	本章提要 .....	20
2.1	概述 .....	20
2.2	工程地质条件对震害的影响 .....	20
2.3	场地对震害的影响 .....	23
2.4	地基基础抗震验算 .....	26
2.5	地基液化对震害的影响 .....	28
2.6	桩基抗震设计 .....	35
	本章知识点 .....	36
	习题 .....	37
<b>第 3 章</b>	<b>抗震设防与抗震概念设计</b> .....	39
	本章提要 .....	39
3.1	工程结构抗震设防 .....	39
3.2	工程结构抗震理论的演变 .....	43
3.3	工程结构抗震概念设计 .....	45
	本章知识点 .....	50
	习题 .....	50
<b>第 4 章</b>	<b>地震作用与结构抗震验算</b> .....	51
	本章提要 .....	51
4.1	概述 .....	51

4.2	单质点弹性体系水平地震作用	52
4.3	多质点弹性体系水平地震作用	64
4.4	竖向地震作用	82
4.5	结构平扭耦合地震反应与双向水平地震影响	84
4.6	结构非线性地震反应分析	89
4.7	结构抗震验算	100
	本章知识点	106
	习题	107
<b>第5章</b>	<b>多层及高层钢筋混凝土房屋抗震设计</b>	108
	本章提要	108
5.1	概述	108
5.2	多层及高层钢筋混凝土房屋的震害分析	109
5.3	多层及高层钢筋混凝土房屋的抗震设计要求	113
5.4	多层及高层框架结构的抗震计算要点	122
5.5	多层及高层框架结构的抗震构造措施	130
5.6	多层及高层抗震墙结构的抗震设计	144
5.7	多层及高层框架-抗震墙结构的抗震设计	150
5.8	多层及高层框架结构抗震设计实例	156
	本章知识点	167
	习题	167
<b>第6章</b>	<b>多层及高层钢结构房屋抗震设计</b>	169
	本章提要	169
6.1	概述	169
6.2	多层及高层钢结构房屋的震害分析	169
6.3	多层及高层钢结构房屋的结构体系和抗震防线	172
6.4	多层及高层钢结构房屋的抗震设计要求	178
6.5	多层及高层钢结构房屋的抗震计算要点	181
6.6	多层及高层钢结构房屋的抗震构造措施	187
6.7	多层及高层钢结构房屋抗震计算实例	192
	本章知识点	203
	习题	204
<b>第7章</b>	<b>多层砌体房屋抗震设计</b>	205
	本章提要	205
7.1	概述	205
7.2	多层砌体房屋的震害分析	205
7.3	多层砌体房屋的抗震设计要求	208
7.4	多层砌体房屋的抗震计算要点	211
7.5	多层砌体房屋的抗震构造措施	221

7.6 多层砌体房屋抗震计算实例 .....	225
本章知识点 .....	231
习题 .....	232
<b>第8章 钢筋混凝土排架柱厂房抗震设计</b> .....	234
本章提要 .....	234
8.1 概述 .....	234
8.2 钢筋混凝土排架柱厂房震害分析 .....	234
8.3 钢筋混凝土排架柱厂房的抗震设计要求 .....	238
8.4 单层厂房的抗震计算要点 .....	242
8.5 钢筋混凝土排架柱厂房的抗震构造措施 .....	260
8.6 钢筋混凝土排架柱厂房计算实例 .....	264
本章知识点 .....	271
习题 .....	272
<b>第9章 桥梁结构抗震设计</b> .....	273
本章提要 .....	273
9.1 概述 .....	273
9.2 桥梁震害分析 .....	273
9.3 桥梁抗震设防原则与设防标准 .....	281
9.4 桥梁地震作用计算要点 .....	285
9.5 桥梁抗震设计 .....	292
9.6 桥梁结构抗震措施 .....	300
本章知识点 .....	303
习题 .....	304
<b>第10章 地下建筑抗震设计</b> .....	305
本章提要 .....	305
10.1 概述 .....	305
10.2 地下建筑震害分析 .....	305
10.3 地下建筑抗震设计原则 .....	310
10.4 地下建筑抗震设计计算方法 .....	311
10.5 地下建筑抗震构造措施 .....	319
本章知识点 .....	321
习题 .....	322
<b>第11章 隔震和消能减震设计</b> .....	323
本章提要 .....	323
11.1 概述 .....	323
11.2 隔震设计 .....	325
11.3 消能减震设计 .....	337
11.4 被动控制减震设计 .....	347



11.5 主动控制设计 .....	351
11.6 可恢复功能结构 .....	354
本章知识点 .....	360
习题 .....	361
<b>第 12 章 抗震防灾的高新技术应用</b> .....	<b>363</b>
本章提要 .....	363
12.1 概述 .....	363
12.2 计算机仿真技术 .....	364
12.3 现代结构试验技术 .....	370
12.4 结构监测与预警技术 .....	374
12.5 虚拟现实 (VR) 技术 .....	377
本章知识点 .....	379
习题 .....	380
参考文献 .....	381

# 第1章

## 地震工程基础知识

### 本章提要

本章主要介绍了地球构造、地震类型和成因，描述了世界及我国地震活动性；介绍了地震常用术语、地震波、震级、地震烈度及地震区划图；给出了地震成灾机制及地震预警与救援的原则与意义。

### 1.1 概述

地震是一种灾难性自然现象，是地球内部缓慢积累的能量突然释放而引起的地球表面的震动。据统计，全世界每年大约发生 500 万次地震，其中绝大多数地震发生在地球深处或者释放的能量小而使人类难以感觉，只有非常灵敏的仪器才能监测到。人类能感觉到的地震（有感地震）每年约发生 5 万次。其中 5 级以上破坏性地震有 1000 次，能够造成严重破坏的强烈地震平均每年发生约 18 次。我国为地震多发区。20 世纪共发生破坏性地震 3000 余次，其中 6 级以上地震近 800 次，8 级以上特大地震 9 次。

地震给人类带来了惨重的人员伤亡。1976 年 7 月 28 日发生的河北唐山地震，地震发生在凌晨时分，人们处于熟睡之中猝不及防，死亡 24 万人，受伤 36 万人，是近代地震史上死亡人数最多的一次地震。2008 年 5 月 12 日发生的汶川地震，死亡和失踪人员 8.7 万人，受伤 37.5 万人。2010 年 4 月 14 日玉树地震造成了 2698 人遇难。2014 年 8 月 8 日鲁甸地震共造成 617 人死亡，112 人失踪，3143 人受伤，22.97 万人被紧急转移安置。

地震还给人类带来了巨大的经济损失。唐山地震直接经济损失达 100 亿元，恢复重建费用达 100 亿元；汶川地震直接经济损失达 8451 亿元；1999 年土耳其伊兹米特地震直接经济损失达 500 亿美元。

地震给人民生命财产和国民经济带来严重的损失。因此，人类自古以来一直对地震和抗震进行着不断探索，对地震认识也随着人类文明的进步而不断深入，防灾减灾技术和方法也在不断完善和成熟。尽管目前科学技术还不能完全准确预测并控制地震的发生，但是实践证明，对建筑结构进行抗震设计是减轻地震灾害的一种积极有效方法。因此，有必要进行工程结构的抗震设计。

## 1.2 地震基础知识

### 1.2.1 地球的构造

地球是一个略呈椭圆的球体（图 1-1），平均半径约为 6400km。研究表明：地球，从地表至核心，由性质不同的三个层次构成。地球最外层是薄薄的地壳，厚度约为 30~40km；中间层是地幔，厚度约为 2900km；最里层是地核，厚度约为 3500km。

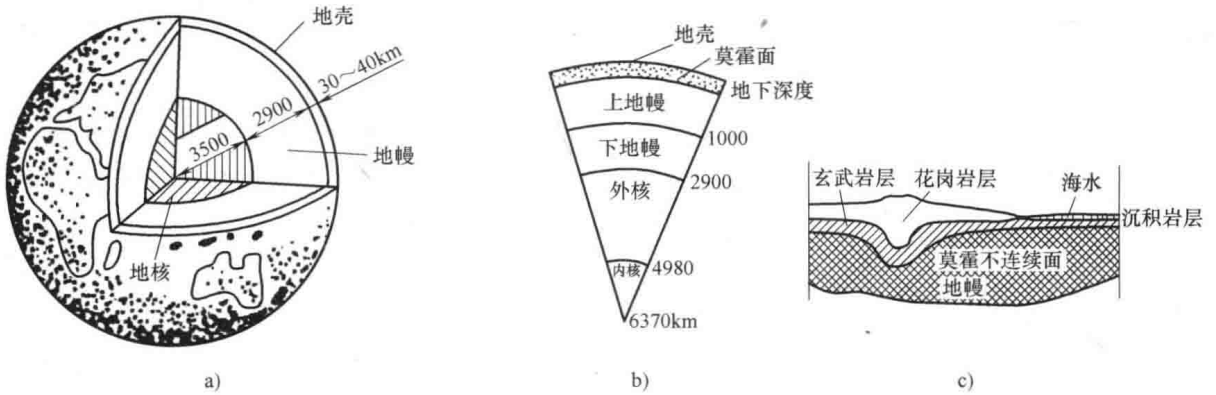


图 1-1 地球断面与地壳剖面

a) 地球的构造 b) 分层结构 c) 地壳剖面

地壳由各种结构不均匀、厚度不一的岩层组成。在陆地上，除表面的沉积层外，陆地地壳主要有两大层：上部花岗岩层和下部玄武岩层，平均厚度约为 30~40km。海洋下面的地壳一般只有玄武岩层，平均厚度约为 5~8km。地球上绝大部分地震都发生在这一层薄薄的地壳内。

地幔是地球内部体积最大、质量最大的一层，主要由质地坚硬、密度较大的橄榄岩组成。地壳与地幔的分界面叫莫霍界面，是一个地震波传播速度发生急剧变化的不连续界面。莫霍面以下 40~70km 是岩石层，它与地壳共同组成岩石圈。岩石层以下存在一个厚度几百千米的软流层，该层物质呈塑性状态并具有黏弹性质。岩石层与软流层合称上地幔。上地幔之下为下地幔，其物质成分和结构与上地幔差别不大，但物质密度较大。

古登堡界面以下直到地心的部分为地核，是一个半径为 3500km 的球体，又可分为外核和内核。目前对地核的成分和状态尚不清楚，据推测，地核构成物质主要是镍和铁。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。

到目前为止，所观察到的地震深度最深为 700km，仅占地球半径的 1/10，可见地震仅发生于地球的表面部分——地壳内和地幔上部。

### 1.2.2 地震类型和成因

地震按照其成因可分为四种主要类型：构造地震、火山地震、塌陷地震和诱发地震。

#### 1. 构造地震

由于地壳构造运动造成地下岩层断裂或错动引起的地面振动称为构造地震。这类地震破

坏性大,影响面广,而且发生次数多(约占全球地震的90%以上),延续时间长。世界上许多著名的大地震都属于此类,如1976年唐山大地震,在几十秒内,将一座近百年建设的工业城市几乎夷为平地。构造地震一直是人们的主要研究对象。

构造地震成因的局部机制可以用地壳构造运动来说明。地球内部在不断运动着,地幔物质发生对流释放能量,使得地壳岩石层处在强大的地应力作用之下。在漫长的地质年代中,原始水平状的岩层在地应力作用下发生形变;当地应力只能使岩层产生弯曲而未丧失其连续性时,岩层发生褶皱;当岩层变形积累的应力超过本身强度极限时,岩层就会发生突然断裂和猛烈错动,岩层中原先积累的应变能全部释放,并以弹性波的形式传至地面,地面随之震动,形成地震。构造运动与地震形成示意如图1-2所示。

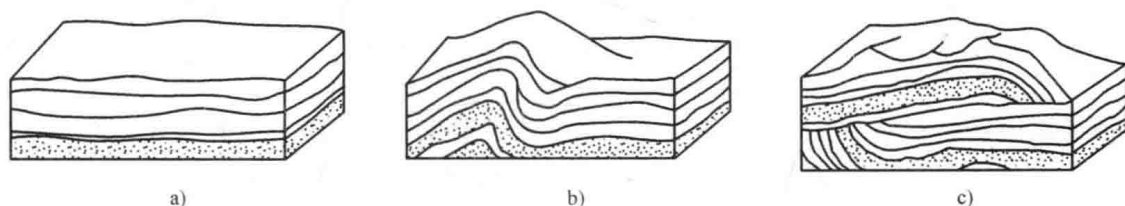


图 1-2 构造运动与地震形成示意图

a) 岩石原始状态 b) 褶皱变形 c) 断裂错动

构造地震成因的宏观背景可以借助板块构造学说来解释。板块构造学说认为,地壳和上地幔顶部厚约70~100km的岩石组成了全球岩石圈。全球岩石圈由大大小小的板块组成,类似一个破裂后仍连在一起的蛋壳,板块下面是塑性物质构成的软流层。软流层中的地幔物质以岩浆活动的形式涌出海岭,推动软流层上的大洋板块在水平方向移动,并在海沟附近向大陆板块之下俯冲,返回软流层。这样在海岭和海沟之间便形成地幔对流,海岭形成于对流上升区,海沟形成于对流下降区(图1-3)。全球岩石圈可以分为六大板块,即亚欧板块、太平洋板块、美洲板块、非洲板块、印度洋板块和南极洲板块(图1-4)。

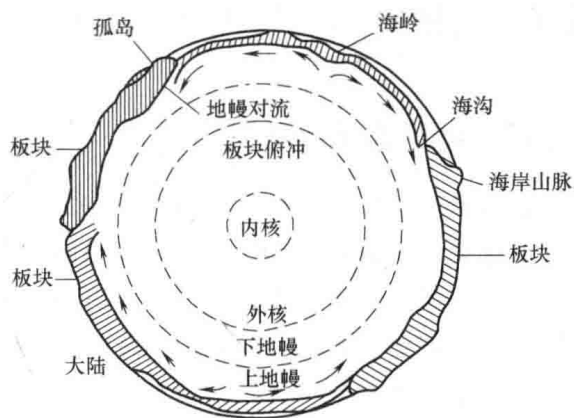


图 1-3 板块运动

各板块之间由于其下软流层的对流运动而产生相互挤压、碰撞和插入,地球上的主要地震带就分布在这些大陆块的交界处。据统计,全球约85%的地震发生在板块边缘及其附近,15%左右发生于板块内部。

## 2. 火山地震

由于火山喷发,地下岩浆迅猛冲出地面引起的地面运动称为火山地震。这类地震一般强度不大,影响范围和造成的破坏程度比较小,主要分布于环太平洋、地中海及东非等地带,其数量占全球地震的7%左右。

## 3. 塌陷地震

地表或地下岩层由于某种原因陷落和塌陷引起的地面运动称为塌陷地震。此类地震的发



图 1-4 全球大板块划分示意图

生既有天然因素的一面，也有人为因素的一面，主要发生在具有地下溶洞或古旧矿坑地质条件的地区，其数量占全球地震的 3% 左右，且震源浅，震级也不大，影响范围及危害较小。

#### 4. 诱发地震

由于水库蓄水、矿山开采、注水抽水和地下核爆炸等引起的地面振动称为诱发地震。这种地震发生的概率很小，影响也较小。

## 1.3 地震活动与地震分布

### 1.3.1 世界地震活动

地震是一种随机现象，从统计的角度，地震的时空分布呈现某种规律性。在地理位置上，地震震中呈带状分布，集中于一定的区域；在时间过程上，地震活动疏密交替，能够区分出相对活跃期和相对平静期。根据历史地震的分布特征和产生地震的地质背景，可以绘制出世界地震震中分布图。图 1-5 明确了地球上的地震活动集中分布在两个主要地震带和其他

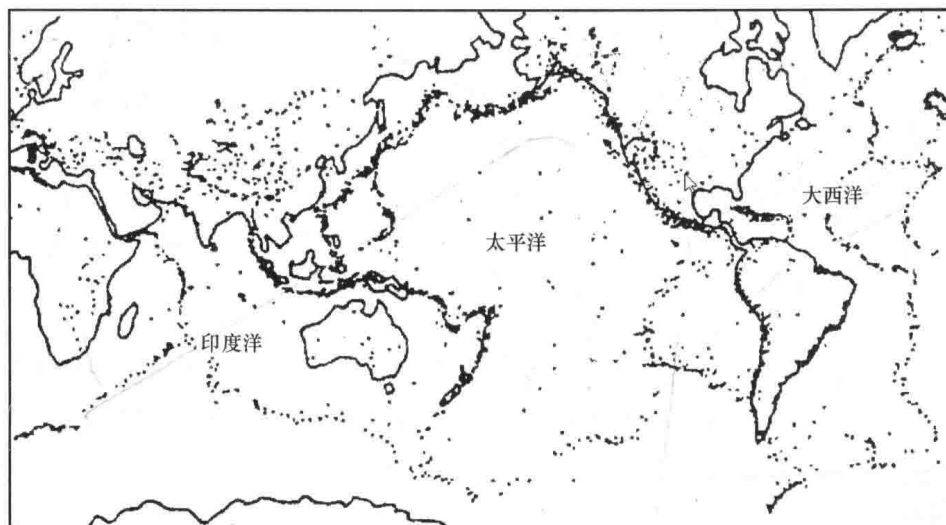


图 1-5 世界地震震中分布示意图



几个次要地震带。世界上的两个主要地震带是环太平洋地震带和欧亚地震带。

### 1. 环太平洋地震带

它从南美洲西海岸起，经北美洲西海岸、阿留申群岛转向西南至日本列岛；然后分成东西两支，西支经我国台湾省、菲律宾至印尼；东支经马里亚纳群岛至新几内亚；两支汇合后，经所罗门群岛至汤加，再向南转向新西兰。该地震带的地震活动最强，发生的地震约占全球地震总数的75%，集中了全世界80%以上的浅源地震、90%的中源地震和几乎全部的深源地震。

### 2. 欧亚地震带

欧亚地震带又称地中海南亚地震带，西起大西洋的亚速尔群岛，向东途经意大利、希腊、土耳其、伊朗、印度北部，再经我国西部和西南地区，向南经过缅甸与印度尼西亚，最后与环太平洋地震带的新几内亚相接。全球地震总数的22%左右发生于此地震带内。

除了上述两条主要地震带以外，在大西洋、太平洋、印度洋中也有一些洋脊地震带，沿着洋底隆起的山脉延伸。这些地震带与人类活动关系不大，地震发生的次数在地震总数中占的比例也不高。对比一下板块划分图（图1-4）可知，上述地震带大多数位于板块边缘，或者邻近板块边缘。

## 1.3.2 我国地震活动

我国地处上述两个最活跃的地震带之间（东濒环太平洋地震带，西部和西南部是欧亚地震带所经过的地区），是一个多地震国家。近四千年的地震文献记载表明：除浙江、江西两省外，我国绝大部分地区都发生过震级较大的破坏性地震。从地震地质背景看，我国存在发生频繁地震的复杂地质条件。因此，我国境内地震活动频度较高，强度较大。

中国地震主要分布在五个区域和23条地震带上。五个区域是：台湾省及其附近海域；西南地区，主要是西藏、四川西部和云南中西部；西北地区，主要在甘肃河西走廊、青海、宁夏、天山南北麓；华北地区，主要在太行山两侧、汾渭河谷、阴山—燕山一带、山东中部和渤海湾；东南沿海地区。

## 1.4 地震动

### 1.4.1 常用术语

图1-6列出了描述地震空间位置的常用术语。震源是指地球内部发生地震首先射出地震波的地方，往往也是能量释放中心。震源正方向相应的地面位置称为震中。震源到地面的垂直距离，或者说震源到震中的距离称为震源深度。地面某处到震源的距离称为震源距。地面某处到震中的距离称为震中距。震中周围地区称为震中区。地震时振动最剧烈、破坏最严重的地区称为极震区，极震区一般位于震中附近。一次地震中，在其所波及的地区内，根据烈度表可以对每一个地点评估出一个烈度，烈度相同点的外包线称为等震线。

根据震源深浅不同，地震可分为浅源地震、中源地震、

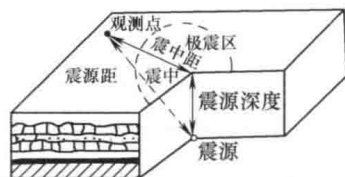


图1-6 地震术语示意图

深源地震。

(1) 浅源地震 震源深度小于 60km, 其造成的危害最大, 全世界每年地震释放的能量约 85% 来自浅源地震。

(2) 中源地震 震源深度在 60~300km, 全世界每年地震释放的能量约 12% 来自中源地震。

(3) 深源地震 震源深度大于 300km, 全世界每年地震释放的能量约 3% 来自深源地震。

我国发生的地震绝大多数是浅源地震, 震源深度在 10~20km。

## 1.4.2 地震波

地震波是地震引起的振动以波的形式从震源向各个方向传播并释放能量。地震波是种弹性波, 它包括在地球内部传播的体波和在地面附近传播的面波。

### 1. 体波

体波包含纵波 (P 波) 和横波 (S 波) 两种形式 (图 1-7)。

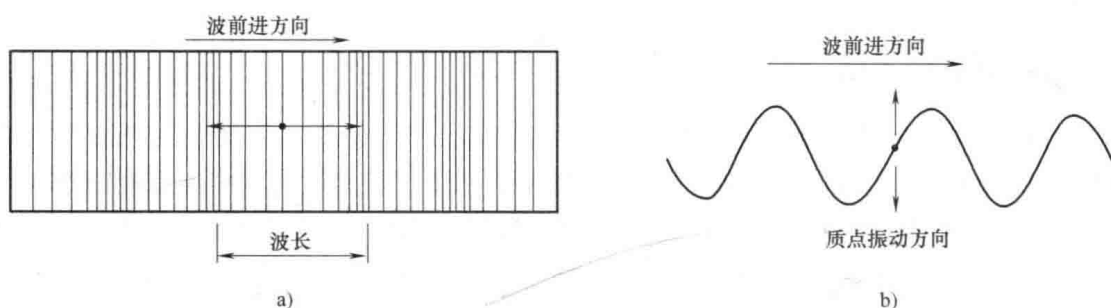


图 1-7 体波质点振动形式

a) 纵波 b) 横波

纵波在传播过程中, 其介质质点的振动方向与波的前进方向一致。在纵波由震源向外传播的过程中, 介质不断地被压缩和疏松, 所以纵波又称为压缩波。其特点是周期较短、振幅小、波速快, 一般为 200~1400m/s。

横波在传播过程中, 其介质质点的振动方向与波的前进方向垂直。横波又称剪切波, 其特点是周期长、振幅大、波速慢, 一般为 100~800m/s。

根据弹性理论, 纵波和横波的传播速度可分别用下列公式计算

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

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

式中  $v_p$ ——纵波波速;

$v_s$ ——横波波速;

$E$ ——介质弹性模量;

$G$ ——介质剪切模量;

$\rho$ ——介质密度;

$\mu$ ——介质的泊松比。

在一般情况下,取  $\mu=0.25$  时

$$v_p = \sqrt{3} v_s \quad (1-3)$$

由此可知,纵波的传播速度比横波的传播速度要快。所以当某地发生地震时,在地震仪上首先记录到的地震波是纵波,随后记录到的才是横波。地表以下地层为多层介质,体波经过分层介质界面时,要产生反射与折射现象,经过多次反射与折射,地震波向上传播时逐渐转向垂直入射于地面(图 1-8)。

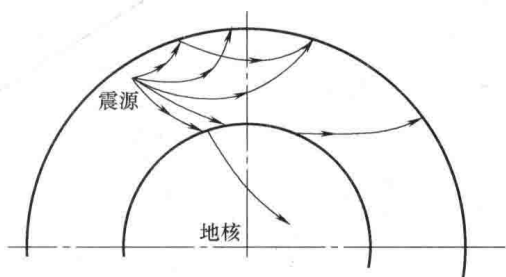


图 1-8 体波传播途径示意

## 2. 面波

面波是指沿地球表面及其附近传播的波。一般认为,面波是体波经地层界面多次反射形

成的次生波,它包括两种形式的波,即瑞利波(R波)和勒夫波(L波)。瑞利波传播时,质点在波的前进方向与地表面法向组成的平面内(图 1-9a 中  $zx$  平面)作逆向椭圆运动;勒夫波传播时,质点在与波的前进方向垂直的水平方向(图 1-9b  $y$  方向)相垂直的运动,在地面上表现为蛇形运动。与体波相比,面波周期长、振幅大、衰减慢,故能传播到很远的地方。

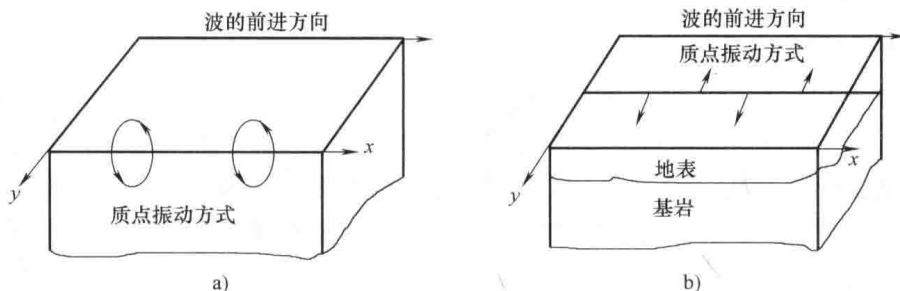


图 1-9 面波质点振动示意图

a) 瑞利波 b) 勒夫波

地震波的传播速度以纵波最快,横波次之,面波最慢。纵波使建筑物产生上下颠簸,横波使建筑物产生水平摇晃,而面波使建筑物既产生上下颠动又产生水平晃动,当横波和面波都到达时振动最为强烈。一般情况下,横波产生的水平振动是导致建筑物破坏的主要因素;在强震震中区,纵波产生的竖向振动造成的影响也不容忽视。

### 1.4.3 地震动的三要素

地震动是由震源释放出来的地震波引起的地面运动。地面运动的位移、速度和加速度可以用仪器记录下来。地面运动记录是地震工程的重要资料。人们一般通过记录地面运动的加速度来了解地震动的特征,对加速度记录进行积分,可以得到地面运动的速度和位移。一般来说,一点处的地震动在空间具有 6 个方向的分量(3 个平动分量和 3 个转动分量),目前

一般只能获得平动分量的记录，对转动分量的记录很难获得。

地面上任意一点的振动过程实际上包括各种类型地震波的综合作用，从地震记录上很难分清是哪一种波的作用，并且地震动是一种随机过程，因此，地震动记录的信号是极不规则的。然而，通过详细分析，可以采用几个特定的要素来反映不规则的地震波。例如，通过最大振幅，可以定量反映地震动的强度特性；通过对地震记录的频谱分析，可以揭示地震动的周期分布特征；通过对强震持续时间的定义和测量，可以考察地震动循环作用的强弱。通常称地震动的峰值（最大振幅）、频谱特性和持续时间为地震动的三要素。工程结构的地震破坏与地震动的三要素密切相关。

#### 1.4.4 震级

地震震级是表示地震本身强度大小的一种度量指标，它是地震的基本参数之一。

##### 1. 里氏震级

里氏震级（Richter Magnitude Scale）是由美国地震学家里克特（C. F. Richter）于1935年提出的一种震级标度，是目前国际通用的地震震级标准。它是根据离震中一定距离所观测到的地震波幅度和周期，并且考虑从震源到观测点的地震波衰减，经过一定公式计算出的震源处地震的大小。

里克特给出了震级的原始定义：用标准地震仪（周期为0.8s，阻尼系数为0.8，放大倍数为2800）在距震中100km处记录到的最大水平位移（以 $\mu\text{m}$ 为单位）的常用对数值。其计算公式为

$$M = \lg A \quad (1-4)$$

式中  $M$ ——地震震级，即里氏震级；

$A$ ——地震仪记录到的最大振幅。

例如，某次地震在距震中100km处地震仪记录到的振幅为10mm即10000 $\mu\text{m}$ ，取其对数等于4，根据定义这次地震就是4级。实际上地震发生时距震中100km处不一定有地震仪，且观测点也不一定采用的是标准地震仪。因此，需要根据震中距和使用仪器对式（1-4）确定的震级进行适当修正。

震级  $M$  与震源释放的能量  $E$ （尔格，erg，1erg=10<sup>-7</sup>J）之间有以下对应关系

$$\lg E = 1.5M + 11.8 \quad (1-5)$$

由式（1-5）可知，震级每增加0.2，释放的能量就会翻倍，即震级每增加一级，地震释放的能量约增大32倍。根据这个关系，一次6级地震所释放的能量为6.31×10<sup>20</sup>erg，相当于一个两万吨级的原子弹所释放的能量。

##### 2. 矩震级

里氏震级是一种面波震级，在地震强到一定程度的时候，尽管地表出现更长的破裂，显示出地震有更大的规模，但测定的面波震级  $M$  值却很难增上去了，出现所谓震级饱和问题。于是，美国学者汉克斯（Hanks）和金森（Kanamori）1977年从反映地震断层错动的力学量地震矩  $M_0$  出发，提出新的震级标度——用地震矩测定的震级，即矩震级  $M_w$ （Moment Magnitude Scale）。矩震级表示震源所释放的能量。

为测定地震矩，可用宏观的方法测量断层的平均位错、破裂长度和岩石的硬度，从等震线的衰减或余震推断震源深度，从而估计断层面积。也可用微观的方法，由地震波记录反演