

高等学校大土木工程专业新编教材

工程结构抗震 设计原理

GONGCHENGJIEGOU KANGZHEN SHEJIYUANLI

- 陈国兴 陈忠汉 马克俭 等 编著
- 孙伟民 主审

2.104



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

工程结构抗震
设计原理

主编 李国强
副主编 李宏男



清华大学出版社

高等学校大土木工程专业新编教材

工程结构抗震 设计原理

陈国兴 陈忠汉 马克俭 等 编著
孙伟民 主审



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材系根据全国土木工程专业教学指导委员会对由建筑工程、岩土工程、地下结构工程、交通土建工程、矿井建设、城镇建设等相近的若干专业或专业方向合并成的大土木工程专业的培养规格要求和目标所规定的“工程结构抗震”课程教学的基本要求,按照GB50011—2001《建筑抗震设计规范》、JTJ004—89《公路工程抗震设计规范》和GB50010—2002《混凝土结构设计规范》的基本思想和要求而编写的。本书既重视基本理论和基本概念的阐述,也注重学科前沿知识的教学;注重理论的系统性和应用的可操作性。内容包括:地震工程学概论,场地与地基基础抗震,工程结构的地震反应分析,混凝土框架结构房屋抗震设计,多层砌体房屋和底部框架砌体房屋抗震设计,梁桥及拱桥抗震分析和工程结构的隔震与消能减震。

本书可作为高等学校全日制本科生土木工程专业的教材、成人教育有关土建类专业的教材,也可作为有关土建类研究生的教学参考书,并可供土建类工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程结构抗震设计原理/陈国兴等编著. —北京:中国水利水电出版社, 2002

高等学校大土木工程专业新编教材

ISBN 7-5084-1253-2

I. 工… II. 陈… III. 工程结构-抗震设计-高等学校-教材
IV. TU352.104

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第084667号

书 名	高等学校大土木工程专业新编教材 工程结构抗震设计原理
作 者	陈国兴 陈忠汉 马克俭 等 编著 孙伟民 主审
出版、发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京密云红光印刷厂
规 格	787×1092毫米 16开本 16.25印张 385千字
版 次	2002年12月第一版 2002年12月第一次印刷
印 数	0001—3500册
定 价	25.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

国家教育部于1998年7月颁布了新的本科专业目录,调整后设立的土木工程专业涵盖了原来的建筑工程、岩土工程、地下结构工程、交通土建工程、矿井建设、城镇建设等相近的若干专业或专业方向,相应的专业培养目标和业务要求有了很大变化,专业的知识面大大拓宽;其次,公路、桥梁工程的抗震设计知识已成为土木工程专业的学生应当修读的基本内容,但现有的有关结构抗震方面的教材,显然不能同时满足各行业对土木工程专业的学生在工程抗震领域业务知识的要求;再次,GB18306—2001《中国地震动参数区划图》已于2001年8月1日起施行,取代了1990年颁布的《中国烈度区划图》;同时,新的GB50011—2001《建筑抗震设计规范》和GB50010—2002《混凝土结构设计规范》已颁布施行,工程抗震的设防依据、建筑抗震的设计技术和设计要求,均发生了相当大的变化。因此,为土木工程专业编写一本新的工程抗震方面的教材,已成为当前抗震课程教学改革与实践的当务之急。

为了适应当前结构抗震的教学需要,并反映近年来我国地震工程领域的最新研究成果,结合多年的教学经验,我们编写了《工程结构抗震设计原理》一书。本教材的编写是按照全国土木工程专业教学指导委员会对土木工程专业的培养规格要求和目标进行的。编写中遵循“内容充实、注重实用、兼顾不同行业、便于自学”的原则,既重视基本理论和基本概念的阐述,也注重学科前沿知识的教学;注重理论的系统性和应用的可操作性,并尽量密切结合我国的工程实际,力求使本教材能较好地满足各高等院校土木工程专业的教学要求。

本书是按照新的GB50011—2001《建筑抗震设计规范》、GB50010—2002《混凝土结构设计规范》和JTJ004—89《公路工程抗震设计规范》的基本思想和要求而编写的。全书共分7章,第1章为地震工程学概论,第2章为场地与地基基础抗震,第3章为工程结构的地震反应分析,第4章为混凝土框架结构房屋抗震设计,第5章为多层砌体房屋和底部框架砌体房屋抗震设计,第6章为梁桥及拱桥抗震分析,第7章为工程结构的隔震与消能减震。

本书由南京工业大学陈国兴教授主编,南京工业大学孙伟民教授主审。全书由陈国兴教授制订编写大纲,并撰写第2、3章;苏州城建环保学院陈忠汉教授(副主编)和陈国兴教授共同撰写第1章;合肥工业大学马克俭副教授(副主编)撰写第4章;南京工业大学叶燕华副教授撰写第5章,欧谨副教授撰写

第7章；苏州城建环保学院孙敏讲师、朱聘儒教授和陈国兴教授共同撰写第6章。孙伟民教授仔细审阅了全书，并提出了修改意见。最后，由陈国兴教授负责全书的统稿定稿工作。

南京工业大学李鸿晶教授也仔细地审阅了全书，并提出了许多宝贵的修改意见；博士研究生王志华为本书完成了部分绘图和校对工作，硕士研究生刘雪珠也参与了本书的部分绘图工作，在此表示衷心感谢。

虽然本书已在南京工业大学土木工程学院试用两届，但由于编著者业务水平所限，书中难免会有错误和不妥之处，敬请读者批评指正，并告知编著者。

陈国兴

2002年11月于南京

目 录

前言

第 1 章 地震工程学概论	1
1.1 概述	1
1.2 地震学基本知识	1
1.3 地震波与地震强度指标	7
1.4 地震灾害概况	12
1.5 工程结构的抗震防灾对策.....	15
复习思考题	21
第 2 章 场地与地基基础抗震	22
2.1 概述	22
2.2 场地与地基基础的震害经验	23
2.3 场地分类与地基抗震概念设计	30
2.4 地基承载力抗震验算	36
2.5 砂性土地基液化判别与抗震措施	39
2.6 桩基抗震设计	44
复习思考题	48
第 3 章 工程结构的地震反应分析	49
3.1 概述	49
3.2 单质点体系的地震反应分析	51
3.3 单自由度弹性体系水平地震作用与设计反应谱	58
3.4 多自由度弹性体系的地震反应分析	67
3.5 地震反应分析的振型分解反应谱法	74
3.6 房屋建筑水平地震作用的简化计算——底部剪力法	81
3.7 考虑扭转影响的房屋建筑水平地震作用	83
3.8 结构竖向地震作用	88
3.9 建筑结构抗震验算	90
3.10 结构自振周期和频率的实用计算方法	97
3.11 工程结构地震反应的时程分析法	106
3.12 地基土与上部结构动力相互作用概论	118
复习思考题	121
第 4 章 混凝土框架结构房屋抗震设计	122
4.1 震害现象及其分析	122
4.2 框架结构抗震设计原则	126

4.3 框架结构抗震计算	129
4.4 框架结构抗震构造措施	141
4.5 设计实例	148
复习思考题	160
第5章 多层砌体房屋和底部框架砌体房屋的抗震设计	161
5.1 概述	161
5.2 多层砌体房屋震害分析	161
5.3 建筑布置与结构选型	165
5.4 多层砌体房屋的抗震计算	167
5.5 多层砌体房屋抗震构造措施	175
5.6 多层砌体房屋抗震设计实例	181
5.7 底部框架—抗震墙砌体房屋抗震设计	187
复习思考题	195
第6章 梁桥及拱桥抗震分析	196
6.1 梁桥抗震分析	196
6.2 拱桥抗震分析	211
复习思考题	221
第7章 工程结构的隔震与消能减震	222
7.1 结构控制方法概述	222
7.2 工程结构隔震	224
7.3 基础隔震体系地震反应	231
7.4 隔震结构设计	234
7.5 工程结构的消能减震	242
7.6 隔震结构设计实例	246
复习思考题	252
主要参考文献	253

第1章 地震工程学概论

1.1 概 述

地震与风、霜、雨、雪一样，都是地球上经常发生的自然现象，前者是发生在地面以下的自然现象，而后者则是发生在大气层里的自然现象。强度低的地震在全球范围内是经常发生的，而且小地震的发生区域很广。对绝大多数的小地震，人是感觉不到的，对工程结构不会造成危害。强度高的地震虽然发生的频率较低，但会使建（构）筑物破坏、倒塌，严重危害生命和财产的安全。特别当这种大地震发生在经济发达、人口稠密的地区时，造成的灾害往往是灾难性的。因此，抗震防灾是全人类共同面临的问题。

一旦地震来临，人们的第一反应是迅速离开建筑物及工程结构，这说明人们对现有建筑物与工程结构在地震中的表现缺乏安全感。从根本上来说，目前对于地震的发生、影响和作用等环节还有许多问题有待于进一步探讨。在这种情况下，工程技术人员的责任就是利用现有的研究成果对未来可能遇到的地震精心设防，尽量减轻震害，保护人民的生命和财产安全。

从地球形成到现在，地球各部位的变化从未间断，地震也没有中断过。人们从沉痛的教训中不断摸索经验，尝试新的设计方法，有效地减轻了地震震害。然而，每次大地震都提出新的问题和研究课题。震害表明，防震减灾是一个庞大的系统工程，需要各方面的配合，从工程抗震的角度来考虑，至少应包括以下三方面的内容：

(1) 地震的监测预报。根据地质活动的监测资料，利用地震学方法进行分析，对地震发生的时间、地点和强度做出有一定准确度的预报，供政府部门、设计部门参考。

(2) 地震作用预测。确定了工程结构可能遭遇的地震强度后，分析地震对特定的已建或拟建结构物的作用，是进一步判断工程结构的抗震能力的基础。

(3) 地震作用效应分析。地震作用确定以后，还需对受到地震作用的结构及构件所产生的内力和变形进行分析，为判定结构及构件的抗震设计提供直接的依据。

地震的监测预报有赖于世界范围内地震历史记录的经验、分析，利用现代测试技术对地壳活动进行持续的监视，并依此对可能发生的地震做出长期、中期、短期或临震预报。由于对地壳活动情况的总体了解还不够清晰，地震预报的准确度还很低。地震作用的估计是以抗震设防区划为基础的，而地震的监测预报又是抗震设防区划的基础，因此，地震作用的估计相当粗糙。由于地震作用是动态的，而大部分工程材料具有弹塑性的特性，这就给理论分析带来了许多困难。

1.2 地震学基本知识

一、地震活动的起因

有史料记载的地震活动至少已有三千多年的历史了，实际上地震活动是地球形成以后

持续发生的自然现象。

远古时代的人们缺乏有效的科学技术手段去揭示地震活动的奥秘，相信是因为“天怒而地动”，是神的意志。因为地震与火山常常结伴而行，18世纪最流行的说法是：由于地下着火而引起地震活动。直到19世纪，人们感到地震活动是由于机械能而不是化学能引起的。即使在科学技术相当发达的今天，人们对地震活动的发生机制尚未完全搞清楚。

根据地震监测仪器的记录，全球每年可监测到的地震有几百万次，平均几秒钟就发生一次，足见地震发生的频率是相当高的，只不过许多地震很弱，人们感觉不到而已，而造成严重震害的强烈地震每年大约十多次。

地震根据震源的深度可以分为：浅源地震（ $H < 60\text{km}$ ）、深源地震（ $H > 300\text{km}$ ）以及中源地震。

根据地震成因可以分为：构造地震、火山地震、陷落地震与诱发地震（由于建造水库，向地下注液或从地下抽液，大型的采矿活动，工程爆破等足以破坏地应力平衡的人为干扰所诱发的地震）。

对土木工程而言，危害最大的是浅源构造地震，这类地震频率高、强度大，是工程结构抗震设防的主要研究对象。地震是发生在地下的自然现象，要了解地震活动的起因，应先了解地球的内部结构。

1. 地球的内部构造

地球是一个孕育着生命的神奇星球，大气层保护生物免受过量的宇宙辐射，也带来了风雨冰霜的气候变化，这是人们日常能感觉得到的；但是地下世界也是很不平静的，从火山岩浆的剧烈喷发就足以说明地球内部蕴藏的能量之巨大。由于大地震的发生周期相当长，普通老百姓很少关心大地深处的变化。

地球是一个直径为 $12714 \sim 12756\text{km}$ 的椭球体，两极较短，整个地球从物质成分和构造特征来划分，可分三部分（见图1-1）：

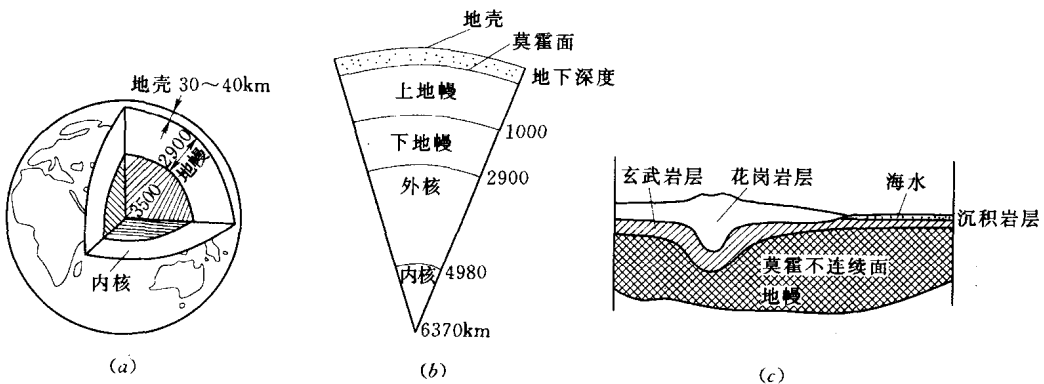


图 1-1 地球内部的分层构造

(a) 地球断面；(b) 分层结构；(c) 地壳剖面

(1) 地壳。地球外表面的一层硬壳称为地壳 (Crust)，其上表面与地表风化层、水或大气接触，底面与地幔相接。地壳下表面以莫霍面为界，各处的地壳厚度不一，从 5km 到 80km ，平均厚度为 30km 。地壳的上层为花岗岩层，由于花岗岩以硅、铝为主要成分，也叫

做硅铝层，这一层厚度极不均匀，在海底可能失缺。穿过康德拉界面就是玄武岩构成的地壳下层，以硅、镁为主要成分，也叫做硅镁层。浅源地震大部分发生在地壳中。

(2) 地幔。地壳以下是地幔 (Mantle)，据推测地幔上部是软流层，其下表面深度达到 2865km，底部的古登堡界面以下为地核。地幔约占地球总体积的 80%，由比重大，质地坚硬的黑色橄榄岩组成，地幔中的铁、镍含量随深度而增加。

(3) 地核。地幔以下是地心部分，是一个直径 6950km 的球体，根据波的传播原理可以推测地核 (Core) 表层是液态物质。地核又可以分成外核、内核，一般认为，深度 5000km 以下为地球内核。主要由铁、镍组成，有研究表明地球内核可能是固态的。

地球内部的温度与压力都随着深度的增加而提高，地幔上部的温度可达 1000℃，压力达到 9000 个大气压，而地核内的温度则高达 4000℃，压力则高出 300 万个大气压。按目前的技术水平，人类能直接勘探到的深度不过十多公里，但根据地震波的反射与折射规律，如图 1-2 所示，可以得出波速随深度而变化的规律。因为波在物质中传播的速度与其物理状态有关，据此可以推测深层物质的性状：无论 S 波还是 P 波，在密度较大的介质中波传播的速度比较快，对照图 1-2 可知，从地面向下物质密度不断增加，地幔上部物质的 S 波与 P 波波速都相当小，说明可能有一个非固态的软流层，两波波速在地幔底部均发生突变，S 波消失、P 波也突然减小，因为波不能在液态物质中传播，据此推测地核上部是液态。

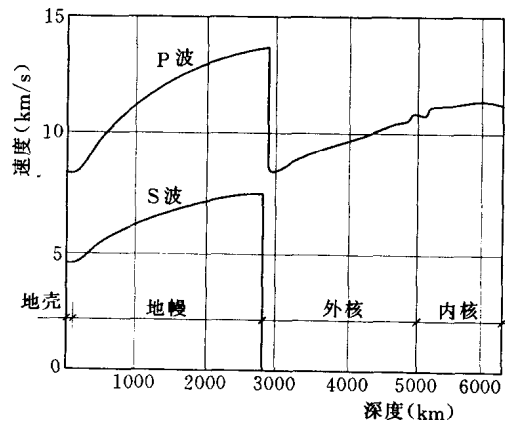


图 1-2 地震波波速与深度关系

2. 板块构造学说

地球的外壳不是一个完整、连续的壳体，是由几十块碎片拼接而成 (见图 1-3)，粗分为六大板块：美洲板块、非洲板块、欧亚板块、印度洋板块、太平洋板块与南极洲板块。这些板块的大小与相对位置都随时间而缓慢变迁，1921 年魏格纳提出的大陆漂移学说指出：全球的陆地原先都集中在南半球，后来逐步向北扩散而形成目前这种四分五裂的现状。

板块构造学说认为，大小不等的板块构成了地球最外层的岩石圈，而板块则是“漂浮”在地幔塑性软流层上的，随着地幔物质的流动而移动。软流物质从海底破裂带溢出向两侧挤压，使板块的另一端向下插入相邻板块，返回地幔。在地幔对流上升区形成海岭，在地幔对流下降区形成海沟。

对于板块构造运动的动力来源还有不少其他的假设：地球膨胀说、地球收缩说、邻近星球的引力产生的体潮以及地球自转速度的变化等等。目前认为地幔对流是板块运动的主要动力。

3. 弹性回跳理论

对于地震的起因已提出了许多理论，但对地震现象能作出较好解释的是弹性回跳理论。这一理论认为地震是这样引起的：由于各板块始终处于缓慢的运动状态，而且板块的位移方向与大小各不相同，其边缘必然受到相邻板块的约束，这种约束在相邻板块边缘产生剪

应力，并以应变能的方式使能量长期积累，一旦岩石中的应力达到复杂应力状态下的破坏条件，岩体破坏产生错动，能量在短时间内释放，其中一部分以波的形式向各方向传播，到达地表使地面产生波动，引起地震。这就是地震发生的弹性回跳理论，可用图 1-4 所示的构造地震形成示意图来说明。

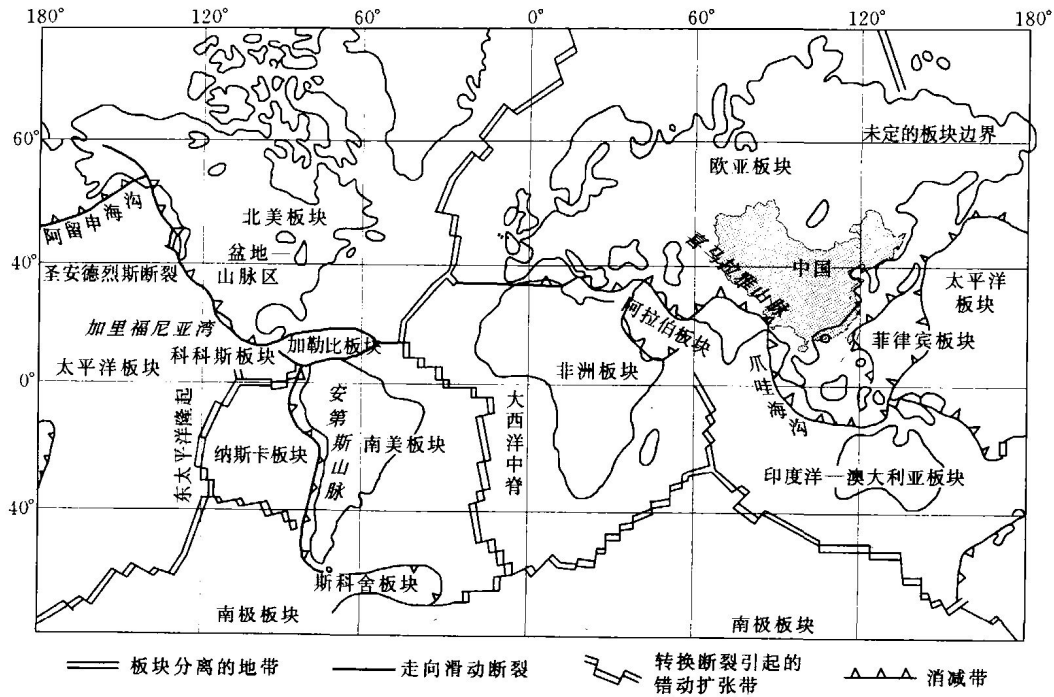


图 1-3 全球大、小板块构造划分简图

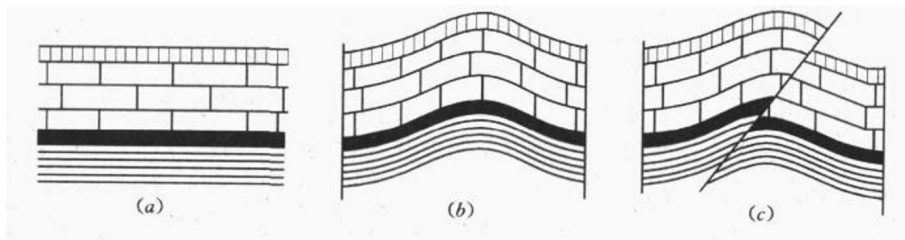


图 1-4 构造地震形成示意图

(a) 岩层原始状态；(b) 受力后发生变形；(c) 岩层断裂产生震动

圣安德烈斯断层是太平洋板块东北边缘的一条大断裂带，1906 年 4 月该断裂带中长达四百多公里的一段突然发生水平向错动，如图 1-5 所示。这从直观上说明了弹性回跳理论的适用性。地表的水平向错动是由于深处断裂带两侧相互错动的结果，板块边缘中首先破坏的地方是震源。震源在地表的投影位置为震中。

二、地震的时空分布

地震在时间上的分布对小地震是杂乱无章的，据统计全球每年可以监测到的地震在 500 万次以上，而造成严重灾害的大地震每年大约有十多次。大地震有一定的周期，例如有

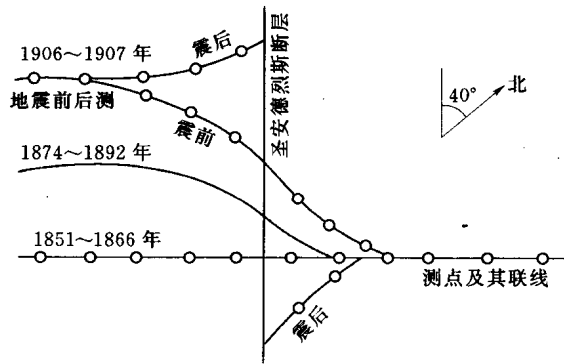


图 1-5 圣安德烈斯断层某区域内基线地震的前后的变化

学者统计表明，日本关东地区的大地震的发生大致按 11 年为周期，而我国东南沿海地区的大地震发震周期为 300~400 年。目前对特定地区的地震预报还无法达到令人满意的准确度。

地震的空间分布对小地震也是无规律可循，但较大地震的震中是呈条状分布的，而且基本上是沿板块的边缘分布的，如图 1-6 所示，这从一个侧面支持了弹性回跳理论。

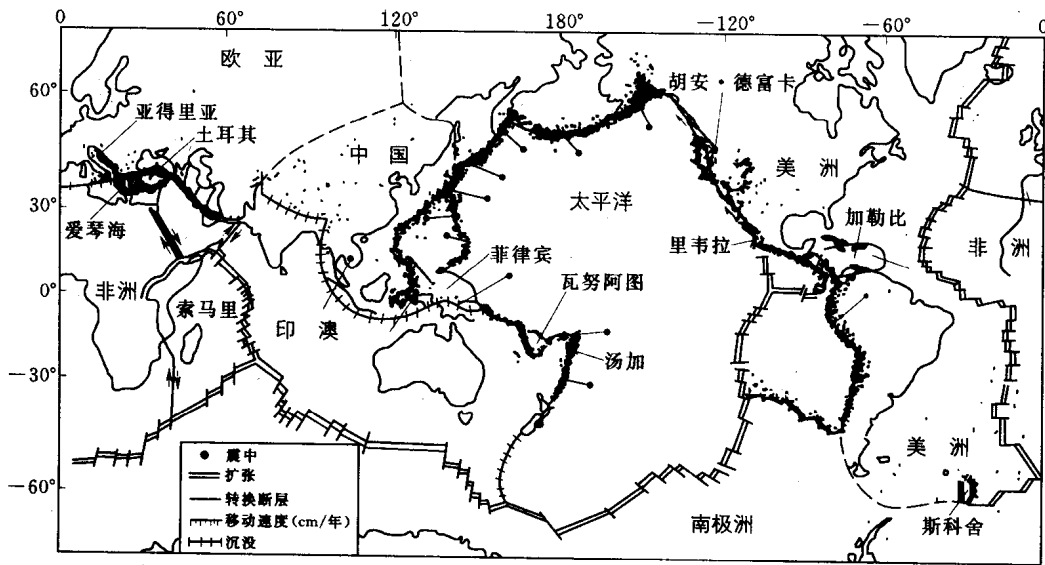


图 1-6 全球六大板块及两大地震带分布图 (包括 1961~1967 地震震中)

1. 全球地震带

世界上有两条主要的地震带：环太平洋地震带与欧亚地震带。环太平洋地震带基本上是太平洋沿岸大陆海岸线的连线，从南美洲的西海岸向北，到北美洲的西海岸的北端，再向西穿过阿留申群岛，到俄罗斯的堪察加半岛折向千岛群岛，沿日本列岛，地震带在此分为两支，一支沿琉球群岛南下，经过我国台湾省，到菲律宾、印度尼西亚；另一支转向马里亚纳群岛至新几内亚，两支汇合后，经所罗门到汤加，突然转向新西兰。全世界 75% 左右的地震发生于这一地震地带。

另一条欧亚地震带是东西走向的地震带，西端从大西洋上的亚速尔岛起，向东途经意大利、希腊、土耳其、伊朗、印度，再进入我国西部与西南地区，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。这一地震带是全球中、深源地震的多发地区，全世界 22% 左右的地震发生于这一地震地带。

另外在大西洋、印度洋等大洋的中部也有呈条状分布的地震带。

2. 我国境内的地震带

我国是一个多地震国家，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，见图 1-7。我国地处世界上两条大地震带之间（图 1-6），不少地区地震相当活跃，我国台湾省就处于环太平洋地震带，近年来大震不断，而且发震频率相当高。我国境内断裂带发育，除西藏、台湾位于世界的两大地震带以外，强烈地震主要分布在以下三条地震带上：

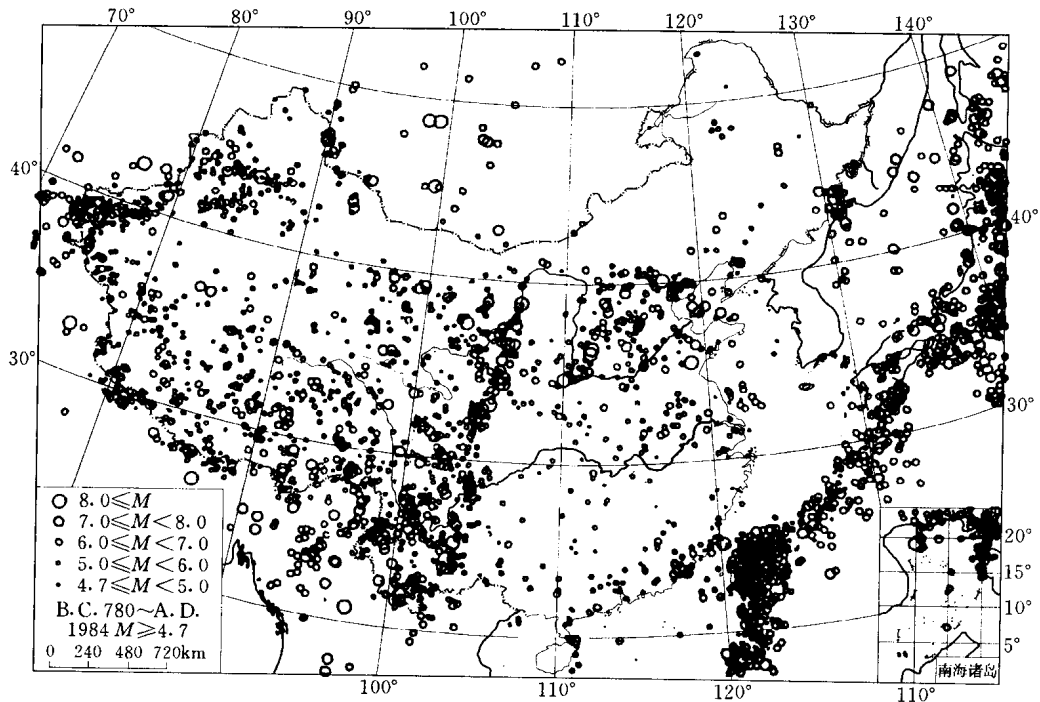


图 1-7 中国及邻近地区地震震中分布（公元前 780 年~公元 1984 年， $M \geq 4.7$ ）

(1) 南北地震带。这条地震带的北端位于宁夏贺兰山，经过六盘山，经四川中部直到云南东部，全长二千多公里。该地震带构造相当复杂，全国许多强震就发生在这条地震带上，例如 1920 年宁夏海原 8.5 级地震，1739 年宁夏银川 8 级地震、1973 年炉霍 7.9 级地震、1970 年通海 7.7 级地震以及 1976 年松潘 7.2 级地震，都位于这条地震带上。这条地震带的宽度比较大，少则几十公里，最宽处达到几百公里。

(2) 东西地震带。东西走向的地震带主要有两条，北面的一条从宁夏贺兰山向东延伸，沿陕北、晋北以及河北北部的狼山、阴山、燕山山脉，一直到辽宁的千山山脉。另一条东西方向的地震带横贯整个国土，西起帕米尔高原，沿昆仑山东进，顺沿秦岭，直至安徽的大

别山。这两条地震带是由一系列地质年代久远的大断裂带构成的。

根据这些地震带可将全国分为五个地震区：东北地震区、华北地震区、华南地震区、西北地震区与西南地震区，如图 1-8 所示。亦可分为以下 10 个地震区：从华南地震区分出台湾地震区、南海地震区，而西北、西南地震区则统一分为青海高原南部地震区、青海高原中部地震区与青海高原北部地震区，还有新疆中部地震区与新疆北部地震区，再加原有的东北、华北、华南地震区，总共 10 个。

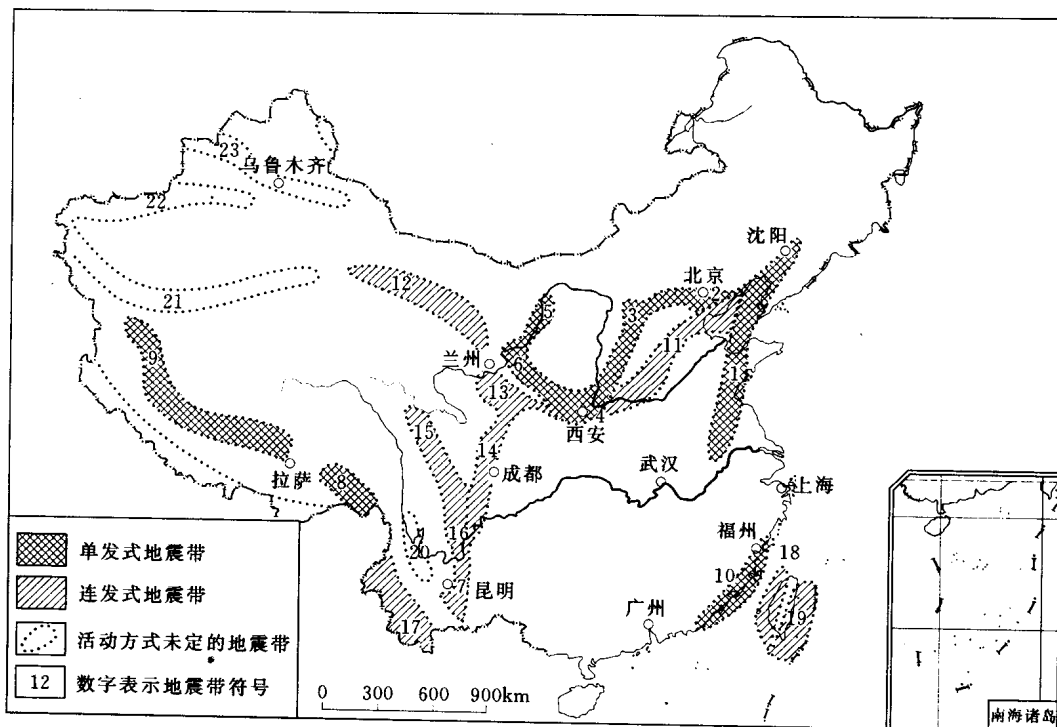


图 1-8 中国的地震带示意图

1.3 地震波与地震强度指标

一、地震波

地震是长期积累的能量突然释放后传播到地面时发生的振动现象。岩石圈里震源处，地震的能量在断层破裂前是以应变能的形式储存的。每次地震中，震源所释放的波动能只占总能量的 30% 左右，还有 1/3 用于岩层内震源附近的应力重分布，另外 1/3 消耗于震源的膨胀过程。

波动能是向三维空间的各方向传播的，途中经过透射、折射与反射，能量不断损耗，到达某一地点并以地震波的形式输入特定结构物的能量与总能量相比是微乎其微的，即便如此，常常足以摧毁整个结构。

地震波在地球内部是以体波的形式传播的。体波又可以分为纵波与横波，如图 1-9 所示，纵波的介质质点振动方向与波的传播方向是一致的，是压缩波，又称为 P 波

(Primary)。纵波既能在固态物质中传播,也能在液态与气态物质中传播,通常其振幅与周期都比较小。横波的介质质点振动方向与波的传播方向是垂直的,是剪切波,又称S波(Secondary)。横波只能在固态物质中传播,通常其振幅较大周期比较长。

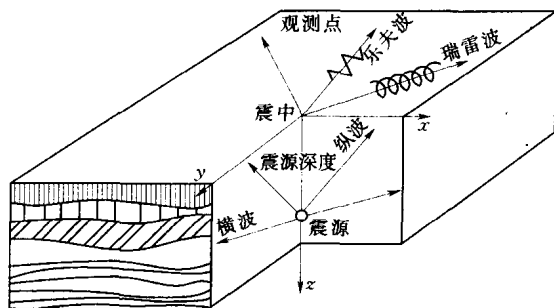


图 1-9 震源、震中与地震波的传播方式示意图

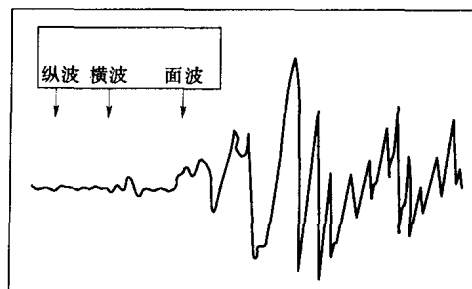


图 1-10 地震波记录

假定地球介质为弹性各向同性,根据弹性波波动理论,可以得到:

$$V_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho} \quad (1-1)$$

$$V_s = \sqrt{\mu/\rho} \quad (1-2)$$

式中 ρ ——介质密度;

V_p ——P波或纵波波速;

V_s ——S波或横波波速;

λ 、 μ ——拉梅常数。

若设定 E 为介质弹性模量, ν 为泊松比, 则有

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

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1-4)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1-5)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1-6)$$

在一般情况下,当 $\nu=0.22$, 则可得纵波与横波波速之间的关系为

$$V_p = 1.67 V_s \quad (1-7)$$

由此可见,P波速度比S波的波速要快,如图 1-10 所示,总是率先到达,英文 Primary 是首先的意思,也叫做初波;而横波要慢一些,Secondary 是其次的意思,故称之为次波。

P波与S波到达的时间差与测定点到震源的距离——震源距有关,就像闪电与雷声相隔时间越长,说明雷电发生的地点越远。

体波传播的速度与介质的密度有关,介质密度越大,传播波速越快。例如横波在松砂中的波速可低至 100m/s 以下,而在岩石中的波速可达到 1000m/s 以上。

体波与其它波一样经过分层介质的界面时,要产生反射与折射现象,折射角和入射角

与相邻介质密度大小有关，有如下关系

$$\frac{V_i}{\sin\theta_i} = \frac{V_j}{\sin\theta_j} \quad (1-8)$$

式中 V ——体波波速；

θ ——折射角；

i, j ——表示不同的地层序号。

一般情况下，地层埋深越大，其密度越高，因此波速也随着深度增加而提高的。由式(1-8)可知，折射角也随着深度而增大。由此可知，地震波向上传播时逐渐转向垂直于地面，而向下传播时则转向平行于地表，如图 1-11 所示。

体波经过各地层界面的折射、反射，在自由地面形成主要在地表传播的地震波——面波。面波包括瑞雷波与乐甫波，瑞雷波是 Rayleigh 在 1885 年证实的、存于在均质弹性半无限空间表面的一种波。如图 1-12 所示，瑞雷波传播时质点的运动轨迹为逆进椭圆形，其横轴长度随深度增加而迅速减小，而且经历一个变号的过程，变号以后横轴长度稍有增大后又逐渐减小。质点振动轨迹的椭圆纵轴，则沿深度方向的变化是稍有增加后呈单调减少。

乐夫波是在表面覆盖着一层横波波速较低的半无限空间里产生的 SH 型面波。质点沿水平方向振动，如图 1-12 所示，振动方向与乐甫波传播方向垂直。质点振动幅度随深度增加而迅速减小。

体波与面波中的四种波的波速最快的是 P 波，S 波其次，乐甫波与瑞雷波的波速相比，瑞雷波的波速更低。

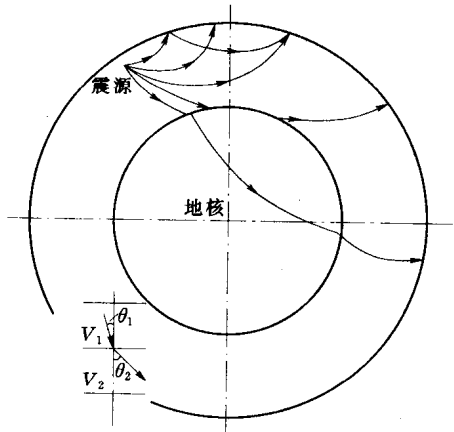


图 1-11 地震波传播途径示意图

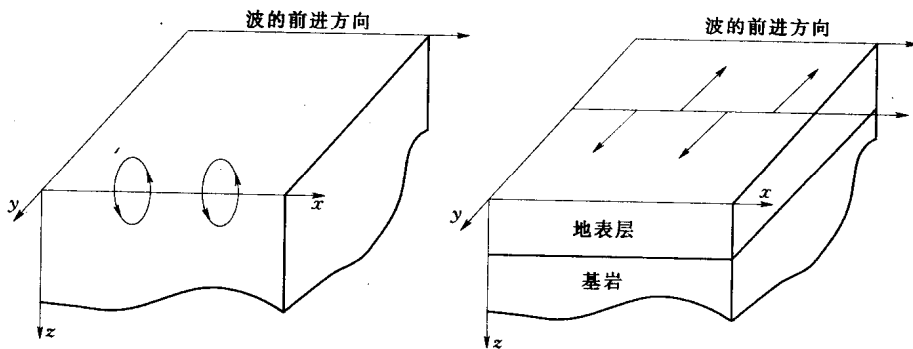


图 1-12 面波质点振动示意图

由图 1-10 可知，纵波首先到达，其振幅很小，周期也短。随后到达的便是横波，横波到达后振幅与周期都明显加大。乐夫波与瑞雷波到达后地震波所记录的波形的振幅陡然放大，在四种波同时作用下地震作用达到最大。这是震源离记录地点的距离比较远的情况；而