

# 高等院校 土木工程专业教材

GAODENGYUANXIAO

TUMUGONGCHENGZHUANYEJIAOCAI

## 工程结构抗震设计原理 第二版

GONGCHENGJIEGOU KANGZHEN SHEJIYUANLI

陈国兴 柳春光 邵永健 等 编著 孙伟民 主审

2.104

中国水利水电出版社

[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

知识产权出版社

[www.cnipr.com](http://www.cnipr.com)



高等院校  
土木工程专业教材

# 工程结构抗震 设计原理

第二版

陈国兴 柳春光 邵永健 等 编著

孙伟民 主审

中国水利水电出版社

[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)



知识产权出版社

[www.cnipr.com](http://www.cnipr.com)



## 内容提要

本教材根据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所规定的“工程结构抗震”课程的基本要求,遵循“内容充实、注重实用、兼顾不同行业、便于自学”的原则,主要依据最新《建筑工程抗震设防分类标准》(GB 50223)和《建筑抗震设计规范》(GB 50011)进行编写,既重视基本理论和基本概念的阐述,也注重工程应用和学科前沿知识的教学。书中内容注意深入浅出,力求理论联系实际。为便于读者学习,本书在原理部分适当介绍了一些学科的前沿知识,在应用部分的章节后面附有计算实例,各章均附有复习思考题。

本书可作为高等院校土木工程专业的教材,也可供土建类工程技术人员阅读参考。

责任编辑:阳淼 张宝林 E-mail: yangsanshui@vip.sina.com z\_baolin@263.net

文字编辑:彭天放

## 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.—2版:—北京:  
中国水利水电出版社:知识产权出版社,2009

高等院校土木工程专业教材

ISBN 978-7-5084-6724-5

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(2009)第133046号

高等院校土木工程专业教材

## 工程结构抗震设计原理 第二版

陈国兴 柳春光 邵永健 等 编著

孙伟民 主审

中国水利水电出版社 出版发行 (北京市海淀区玉渊潭南路1号2层;电话:010-68367658)

知识产权出版社 出版发行 (北京市海淀区马甸东路1号;电话:010-82005070)

北京科水图书销售中心 零售 (电话:010-82009088;63202643)

全国各地新华书店和相关出版物销售网点经营

中国水利水电出版社微机排版中心 排版

北京市兴怀印刷厂印刷

184mm×260mm 16开本 21印张 498千字

2002年12月第1版 2009年7月第2版 2009年7月第3次印刷

印数:5501—9500册

定价:40.00元

## 版权所有·侵权必究

如有印装质量问题,可由中国水利水电出版社营销中心调换

(邮政编码100038,电子邮件:sales@waterpub.com.cn)

## 第二版前言

本教材第一版出版于2002年12月,编写的宗旨是适应教育部本科专业目录调整后的土木工程专业的培养目标和教学要求。为适应这一形势的发展,南京工业大学、苏州科技学院(原苏州城建环保学院)、合肥工业大学从事结构抗震教学和研究的教师共同编写了《工程结构抗震设计原理》教材。近年来,结构抗震领域的研究取得了新的进展,国家及相关行业的抗震规范或发布了新版或进行了修订;教学、科研人员和土木工程师在2008年我国四川省汶川M<sub>s</sub>8.0级地震中取得了大量的现场震害资料;根据汶川地震的经验教训,新一版的《建筑工程抗震设防分类标准》(GB 50223—2008)提高了学校、医院、交通枢纽等人员密集的公共服务设施的抗震设防类别,也出版了《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001,2008年版)。因此,本教材的编写人员决定对本教材进行修订,出版《工程结构抗震设计原理》第二版。

本教材第二版仍遵循第一版“内容充实、注重实用、兼顾不同行业、便于自学”的原则,主要依据《建筑工程抗震设防分类标准》(GB 50223—2008)和《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001,2008年版)进行编写,在各相关章节内容的编写中,也融合了《建筑工程抗震性态设计通则(试用)》(CECS160:2004)、《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02—01—2008)、《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)、《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2008)的基本思想和要求,既重视对基本理论与基本概念的阐述,也注重工程具体应用和对学科前沿知识的介绍,注重理论的系统性和应用的可操作性,力求使本教材能更好地满足各高等院校土建类专业的教学要求。

第二版是在继承第一版的编写原则和基本格局的基础上完成的,原教材体系保持不变,所使用的规范和标准均采用国家颁布的最新版。为了适应当前土建类专业工程结构抗震的教学需要,与第一版相比,第二版对各章都进行了较大幅度的修改,补充了汶川大地震的震害资料 and 我国地震工程领域的最新研究成果。全书仍分为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章为桥梁结构抗震,第7章为工程结构的减震控制。

由于第一版编写人员中有的退休、有的移居国外,因此本教材第二版更换

了部分编写人员。本教材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。陈国兴教授撰写第1、2章和3章；苏州科技学院邵永健教授和谢剑学讲师撰写第4章；南京工业大学叶燕华教授撰写第5章；大连理工大学柳春光教授撰写第6章；南京工业大学欧谨副教授撰写第7章。最后，由陈国兴教授负责全书的修改、统稿和定稿工作。

鉴于不少兄弟院校采用本教材，今后在使用过程中，希望各位专家和同仁不吝赐教，以便我们能够继续完善和提高。

**陈国兴**

2009年5月于南京

# 第一版前言

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，《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2001)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《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)和《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)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，也注重了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《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)和《公路工程抗震设计规范》(JT J004—89)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定编写大纲，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

第二版前言

第一版前言

<b>第 1 章 地震工程学概论</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 地震发生的地质构造环境 .....	2
1.3 地震成因与地震类型 .....	5
1.4 地震波的传播 .....	7
1.5 地震震级与地震烈度 .....	12
1.6 地震灾害 .....	17
1.7 工程结构的抗震防灾对策 .....	24
复习思考题 .....	29
<b>第 2 章 场地与地基基础抗震</b> .....	30
2.1 概述 .....	30
2.2 场地分类与地基抗震概念设计 .....	31
2.3 地基承载力抗震验算 .....	36
2.4 砂性土地基液化判别与抗震措施 .....	39
2.5 桩基抗震设计 .....	48
复习思考题 .....	52
<b>第 3 章 工程结构的地震反应分析</b> .....	53
3.1 概述 .....	53
3.2 单质点体系的地震反应分析 .....	55
3.3 单自由度弹性体系水平地震作用与设计反应谱 .....	61
3.4 多自由度弹性体系的地震反应分析 .....	72
3.5 地震反应分析的振型分解反应谱法 .....	79
3.6 水平地震作用计算的底部剪力法 .....	86
3.7 考虑扭转影响的房屋建筑水平地震作用 .....	91
3.8 结构竖向地震作用 .....	96
3.9 建筑结构抗震验算 .....	99
3.10 结构自振周期和频率的实用计算方法 .....	105
3.11 工程结构地震反应的时程分析法 .....	114
3.12 地基与结构动力相互作用效应 .....	124
复习思考题 .....	127
<b>第 4 章 混凝土框架结构房屋抗震设计</b> .....	129
4.1 震害现象及其分析 .....	129
4.2 多高层建筑结构抗震设计的一般规定 .....	133



4.3	框架结构的抗震计算	138
4.4	框架结构的抗震构造措施	160
4.5	混凝土框架结构抗震设计实例	165
	复习思考题	173
<b>第5章</b>	<b>多层砌体房屋和底部框架砌体房屋抗震设计</b>	<b>174</b>
5.1	概述	174
5.2	多层砌体房屋震害分析	174
5.3	建筑布置与结构选型	181
5.4	多层砌体房屋的抗震计算	183
5.5	多层砌体房屋抗震构造措施	191
5.6	多层砌体房屋抗震设计实例	197
5.7	底部框架砌体房屋抗震设计	203
	复习思考题	212
<b>第6章</b>	<b>桥梁结构抗震</b>	<b>213</b>
6.1	概述	213
6.2	桥梁结构的震害现象	216
6.3	桥梁结构抗震设计的理论与方法	219
6.4	桥梁结构地震反应分析的反应谱法	228
6.5	桥墩结构抗震可靠性分析	232
6.6	桥梁结构抗震性能评价方法	236
6.7	桥梁结构的非线性地震反应分析	259
	复习思考题	271
<b>第7章</b>	<b>工程结构的减震控制</b>	<b>273</b>
7.1	概述	273
7.2	建筑结构的基础隔震	275
7.3	隔震层设计	280
7.4	基础隔震体系地震反应分析	287
7.5	隔震结构设计	290
7.6	隔震结构设计实例	299
7.7	建筑结构的耗能减震	305
7.8	耗能减震结构计算实例	316
	复习思考题	321
	参考文献	322

# 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。强度低的地震在全球范围内是经常发生的，尤其是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，对工程结构也不会造成危害。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，严重危害人民生命和财产的安全。特别是当大地震发生在经济发达、人口密集的地区时，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。

地震一旦发生，人们的第一反应就是迅速离开建筑物，这说明人们对现有建筑物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、地震波的传播和影响等环节还有许多问题有待于进一步探讨。在这种情况下，土木工程师的责任就是利用现有的工程技术对未来可能遇到的地震精心设防，尽量减轻震害，保护人民生命和财产的安全。

地球从形成到现在，其各部位的变化从未间断过，地震也从未中断过。人们从沉痛的教训中不断摸索和总结经验，尝试新的设计方法，有效地减轻地震灾害。然而，每次发生大地震时都会发现新的问题。《中华人民共和国防震减灾法》规定：防震减灾工作实行预防为主，防御与救助相结合的方针，包括地震监测预报、地震灾害预防、地震应急三大工作体系，这是符合中国基本国情的。震害表明，防震减灾是一个庞大的系统工程，需要全社会各方面的配合，至少应包括以下三方面的内容。

### 1. 地震监测预报

地震监测预报是指，根据地震监测信息研究结果，对可能发生地震的地点、时间和震级作出预测。地震预报包括长期预报、中期预报、短期预报和临震预报（《中华人民共和国防震减灾法》规定：国家对地震预报实行统一发布制度；任何单位和个人不得向社会散布地震预测和地震预报意见）；根据地震活动趋势和震害预测结果，提出确定地震重点监视防御区。地震监测预报是防震减灾的基础和首要环节。

### 2. 防震减灾规划

防震减灾规划是加强地震灾害预防，提高综合防震减灾能力的重要依据，也是防震减灾事业依法行政的重要依据。一个国家或地区的防震减灾规划，将在未来一定时期内指导全国或地区的防震减灾工作，在国家或地区的层面明确防震减灾工作的总体规划和发展方向。防震减灾规划应包括以下内容：震情形势和防震减灾总体目标，地震监测台网建设布局，地震灾害预防措施，地震应急救援措施，以及防震减灾技术、信息等保障措施。

### 3. 工程抗震设防

为了减少人员伤亡和经济损失，有效地减轻地震灾害，需要明确各类建筑抗震设计的设防类别和相应的抗震设防标准，制定相应的抗震设计规范。对新建、改建、扩建的建筑，应按不低于相应抗震设计规范所规定的要求进行抗震设计，对已建的未达到抗震设防

要求的建筑应进行抗震加固，以保证建筑的抗震安全。

## 1.2 地震发生的地质构造环境

据史料记载，我国历史上最早一条关于地震的记载在公元前 2222 年（帝舜三十五年），发生在今山西永济蒲州。据《墨子》云“龙生庙，犬哭于市”。因此，地震活动至少已有 4200 多年的历史。实际上，地震活动是地球形成以后持续发生的自然现象。

地震是发生在地下的自然现象，要了解地震活动的起因，应首先了解地球的内部结构。

### 1.2.1 地球内部构造

地球是一个巨大的近似于绕其短轴旋转的实心椭圆球体，其赤道半径为 6378km，极半径为 6357km。尽管目前钻探技术有了很大的发展，可面对这样庞大的球体，采用直接观察和测量的方法还是困难的。目前世界上所钻的最深的井不超过 13km。因此，对于地球内部构造的认识，大部分只能通过地球物理手段得到，其中最主要、最有效的方法是利用地震波法。其原理是地震波在地球内部的传播速度与其经过的介质有关，一般来说，介质越硬其波速越快。

据实测，地球内部有两个波速变化明显的不连续面：一个是在地下平均 33km 处，地震波通过此界面后，横波（S 波）和纵波（P 波）的波速都突然增加，1909 年南斯拉夫地球物理学家莫霍洛维奇根据近震地震波走时确认地壳下界面的存在，后人称这个分界面为“莫霍面”；另一个是在地下 2900km 处，地震波通过该界面后，P 波波速突然减小，S 波消失，这个界面是 1914 年由美国地质学家古腾堡发现的，后人称这个分界面为“古腾堡面”。根据这两个不连续面把地球内部分为三个圈层：地壳、地幔、地核，如图 1-1 所示。

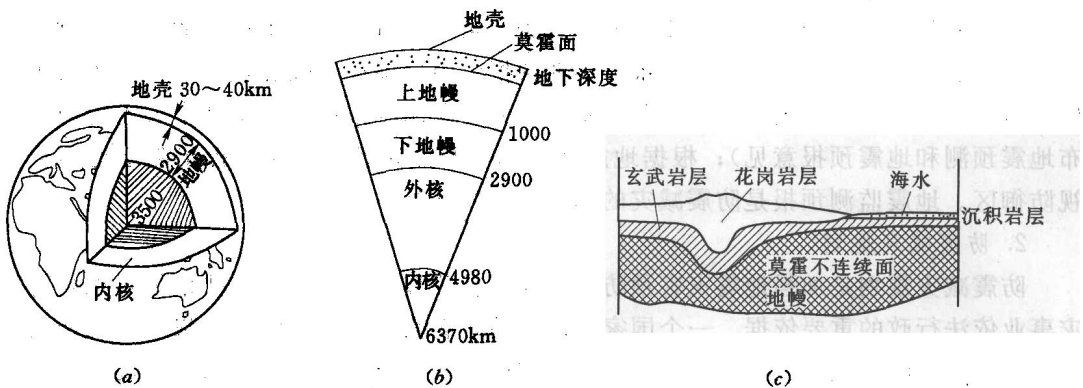


图 1-1 地球内部的分层构造

(a) 地球断面；(b) 分层结构；(c) 地壳剖面

#### 1. 地壳

地壳为固体地球的最外一圈，其范围从地表到莫霍面，厚度不均，大陆地壳厚度约为 30~70km，大洋地壳厚度约为 5~8km。除地表覆盖一层薄薄的沉积岩、风化土和海水

外，上部主要由花岗岩类的岩石组成，由于富含硅和铝，称为硅铝层。硅铝层的厚度并不到处一样，在大洋深处有的地方甚至没有硅铝层，下部主要由玄武岩或辉长岩类的岩石组成，由于富含硅和镁，称为硅镁层。除大洋底部有硅镁层直接露出外，其余都埋在硅铝层之下。

## 2. 地幔

地幔位于莫霍面和古腾堡面之间，厚度约为 2900km，地幔体积占地球总体积的 83%，质量占整个地球的 66%。以 1000km 深度为界，地幔可分为上、下地幔。在地幔的外层 40~70km 内是一岩石层，岩石层以下是一几百千米厚的软流层（地幔上部的 S 波和 P 波波速都很小，说明可能有一软流层，如图 1-2 所示），岩石层与软流层合称为上地幔，主要由比重大、质地坚硬的黑色橄榄岩组成；上地幔以下为下地幔，下地幔成分比较均一，与上地幔相似，但随深度增加，铁的含量增加，从而使密度增加。

## 3. 地核

从古腾堡面以下至地心部分，为地核，厚 3473km。地核可分为“外地核”和“内地核”两层。处在地表以下 2900~4980km 的部分为外地核，是液体状态（S 波和 P 波波速都发生突变，S 波消失，P 波也突然减小，由于 S 波不能在液态物质中传播，据此可推测外核为液态，如图 1-2 所示）。4980~5120km 深处，是一个过渡带，从 5120km 直到地心则为内地核，是固体状态，主要由铁、镍组成。由于地核离地面太深，至今对它了解得很少。

地球岩层的比重随深度显著增加，地壳岩层密度最小，约为  $2.7\sim 3.0\text{g/cm}^3$ ；地幔上层为  $3.3\text{g/cm}^3$ ，内层为  $5.7\text{g/cm}^3$ ；外核为  $9.7\text{g/cm}^3$ ，内核为  $12.3\text{g/cm}^3$ 。地球内部的温度与压力也都随着深度的增加而提高，地幔上部的温度可达  $1000^\circ\text{C}$  左右，压力达到 9000 个大气压<sup>①</sup>，而地核内部的温度则可达  $4000^\circ\text{C}$ ，压力达到 300 万个大气压。

### 1.2.2 板块运动

在 19 世纪，大陆固定论居统治地位。19 世纪后半叶，人们开始发现被大洋隔开的不同大陆上的生物种群、古生物化石，乃至地质地层构造有着十分相似的亲缘关系。例如，若将南美洲与非洲拼合在一起，则若干亿年来不同年龄的岩层都能吻合；欧洲、北美洲和亚洲，都可以在 1 亿年的岩层中找到同一种动物始祖的化石，在原始大陆分离之后，动物的种类就随着各自的自然环境改变了。这是大陆固定学说难以解释的。1910 年德国气象学家魏格曼在阅读世界地图时发现大西洋东西两岸的地形之间具有交错的关系，特别是南美的东海岸和非洲的西海岸之间，相互对应，简直就可以拼合在一起，像一块完整的大陆，如图 1-3 所示。1912 年，他发表了《大陆的

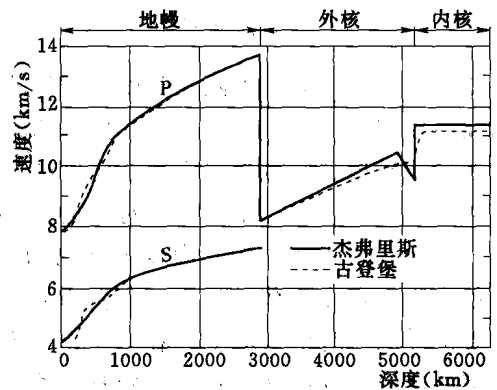


图 1-2 地球内部 P 波和 S 波的速度分布

① 标准大气压 (atm) 为废除计量单位， $1\text{atm}=101325\text{Pa}$ ，全书下同——编辑注



图 1-3 大陆拼合图

成》一文，提出了“大陆漂移学说”：在 2.5 亿年前，地球上原来只有一块完整的大陆“泛大陆”，被一片汪洋“泛大洋”所包围。后来，由于天体的引力和地球的自转离心力所致，泛大陆出现裂缝，开始分裂和漂移。1915 年，又出版了《海陆的起源》一书，给出了大陆漂移的证据，但未能解释大陆漂移的动力学问题。1928 年，英国地质学家霍姆斯提出“地幔对流学说”。但由于当时科学水平的限制，特别是大陆漂移的物理机理没有得到解决，轰动一时的假设很快没了声息。

直到 20 世纪 50 年代，岩石古地磁的研究使这一学说得到了更为科学的论据，从而为更多的人所接受。岩石磁化方向不随地球磁场变化的影响，火山喷发的熔岩研究证明了这一点。地球的北磁极现在位于加拿大北部，离地球的地理北极（旋转极）相当远，从古地磁的研究得知地球北磁极曾经缓慢而连续地变化过，但与旋转极的平均相对位置不变，其轨迹为磁极游动曲线。图 1-4 给出欧美两洲的这种曲线，其中实线为实测的，虚线为推测的，图中数字表示距今年代，以百万年为单位。由于要接受同一时期地球上存在两个磁极和两个旋转极的假设极其困难，假定把两个大陆拼合在一起，这两个轨迹就完全重合，南美洲与非洲也有这一现象。

20 世纪 50~60 年代，海洋地质研究，尤其是海洋钻探的开展，取得了重大成果，其中之一就是发现了海岭和海沟，证实了地幔对流和海底扩张的存在，并依靠无线电测距方法测定了海底扩张和大陆漂移的速率。1967 年，法国人勒皮雄、美国人摩根和英国人麦肯齐等建立了“地球板块构造模型”。他们将地球的岩石圈分为欧亚、美洲、非洲、太平洋、澳洲和南极洲等六大板块和若干小板块。板块间的分界是大洋中脊、俯冲带和转换断层，板块在大洋中脊继续增生扩张，而在俯冲带则下沉和消减。那正是构造动荡激烈的部位，是地震、火山活动的主要发生地。

板块构造学说认为地壳与上地幔的岩石层组成了全球岩石圈，地幔上部软流层的物质由海岭涌出，推着软流层上厚约 100km 的岩石圈在水平方向移动，形成新的海底并造成海底扩张现象，大部分物质又同时在海岭下部形成上升流，如图 1-5 所示；岩石圈在海沟处又插入另一部分岩石圈之下，返回软流层，同时形成下降流。这样，在海岭带与海沟

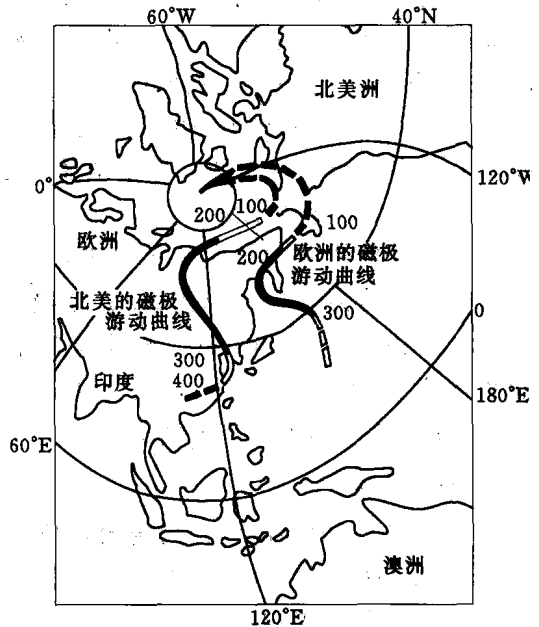


图 1-4 磁极游动曲线

带之间便形成地幔对流体，地幔对流体对于板块的作用使板块仿佛坐在传送带上一一般，被载运而缓慢漂移。

大陆漂移学说与地球板块构造不仅可以解释地球大陆的变迁历史，而且可以预测其未来的发展，是人类对固体地球运动模式整体性及其运动学和动力学认识的深化，是现代地质学的重大发现，堪称 20 世纪地球科学最伟大的成就。



图 1-5 板块运动

### 1.3 地震成因与地震类型

#### 1.3.1 地震成因

地震成因的研究包括两个方面：一方面从断层成因说出发，更深入地研究地震发生时地球介质的运动方式和原理，统称震源机制研究；另一方面着重于研究地震发生前，局部地区应力-应变的发展过程（孕震过程），统称震源物理研究。

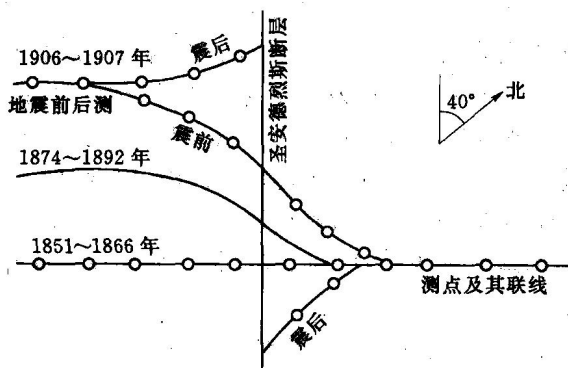


图 1-6 旧金山地震前后横跨圣安德烈斯断层基线变化示意图

关于地震成因的研究已有近百年的历史，早期的地震成因说倾向于断层破裂学说，后期的观点则侧重于板块观点。这两个观点并不矛盾，主要是出发点不同，前者是从局部机制，后者是从宏观背景来论述震源机制。

从局部机制来论述地震成因的弹性回跳说是 20 世纪初由里德 (H.F. Reid) 提出的。他最初是根据 1906 年旧金山 8.3 级地震前后横跨圣安德烈斯断层的一些侧标位移实测数据（见图 1-6）而得出的结论。这一测量发现：在断层两侧，测点一直在缓慢地移动，而在大地震后的复测发现：测线沿断层出现了最大断距达 6.4m 的错动。这一过程证明了旧金山地震是沿长 960km 的圣安德烈斯断层发生错动的结果。

里德的弹性回跳说认为：①地壳由弹性的、有断层的岩层组成；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岩层中长期积累；③当弹性应变能积累及其岩层发生变形达到一定程度时，断层上某一点的两侧岩体会发生相对位移错动，并使沿断层的邻近点随之发生位移，以致断层两侧岩体向相反方向突然滑动，地震因之产生，此时，断层上长期积累的弹性应变能突然释放；④地震后，过去在应变能作用下发生变形的岩体又重新恢复没有变形的状态。

20 世纪 60 年代中期，根据岩石力学实验结果，改进了弹性回跳说，使得解释局部震源机制的断层说得到了改善。弹性回跳说认为，断层发生错动时，把全部积累的应变能释

放完，震后，震源基本处于无应力状态；而改进后的弹性回跳说，又称为黏滑说，则提出：每一次断层发生错动时只释放了积累的总应变能中的一小部分，而剩余部分则为断层面上很高的动摩擦力所平衡。地震后，断层两侧仍有摩擦力使之固结，并可以再积累应力而发生较大的地震，这一观点得到了地震序列类型的支持。

弹性回跳说对地壳为何发生运动、弹性应变能怎样得以积聚等宏观原因没有给以说明，而板块学说则恰巧说明了这一点。如上节所述，地幔软流物质的涌出与对流，促使板块的构造运动，当两个板块相遇时，其中一个板块俯冲插入另一板块之下，在板块俯冲过程中，由于板块内的复杂应力状态，引起其本身与附近地壳和岩石层的脆性破裂而发生地震。这就是全球大部分地震均发生在板块边缘及其附近的原因。此外，软流层与板块之间的界面是很不平坦的，而且软流层本身仍具有较大刚度，因此造成板块内部的复杂应力状态和不均匀变形，这是发生板内地震的根本原因。而板块内的岩体断层则提供了发生地震的内在条件。据统计，全球85%左右的地震发生于板块边界带上，仅有15%左右发生于大陆内部或板块内部。

世界上有两条主要地震带：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，一支向西南经琉球群岛南下，经过我国台湾、菲律宾到印度尼西亚、苏拉威西岛，另一支向东至马里亚纳群岛、新几内亚，两支会合后，经所罗门群岛、新赫布里底群岛、斐济群岛到汤加，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。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，向东途径意大利、希腊、土耳其、伊朗、印度北部，至喜马拉雅山脉，进入我国西部与西南部边境，向南经过缅甸，呈弧形转向东，至印度尼西亚，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、印度洋等大洋中部也有呈条状分布的地震带。

我国是一个多地震国家，4000余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。我国地处世界上两条大地震带之间，受太平洋板块、印度板块和菲律宾海板块的挤压，地震断裂带十分发育，不少地区地震相当活跃，近年来大震不断，而且发震频率相当高。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南北地震带和东西地震带。南北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2000km多。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，如1920年宁夏海原8.5级地震、1739年银川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，少则几十千米，最宽处达到几百千米。东西走向的地震带有两条，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。

地震的空间分布对小地震几乎无规律可循，但较大地震的震中呈条状分布的，而且基本上是沿板块的边缘分布的，这从一个侧面支持了弹性回跳理论。

地震活动频繁而强烈的区域称为地震区；许多大地震群集的狭长地带，称为地震带。地震区、带划分反映了地震活动在空间分布上的不均匀性。地震区是指大区域范围（数十万平方千米、几百万平方千米范围内）的地震活动性和大地构造活动的特点具有明显相关的地区。同一地震区的地震活动在强度、活动期、空间分布具有共同特征和相互联系。地震带是指同一地震区内地震活动性和地质构造条件密切相关的地带，它是地震活动性参数的统计单元。

### 1.3.2 地震类型

根据地震成因，地震可分为人工地震和天然地震两大类。人工地震指爆炸、化学爆炸、机械振动等造成的地震。天然地震包括构造地震、火山地震、陷落地震、诱发地震等。火山地震是因火山喷发时猛烈的冲击造成地面振动而形成的；陷落地震是由于地下溶洞、废旧矿井突然塌陷引起地面振动而形成的。这两种地震数量不多，不到天然地震总数的10%，一般震级都比较低，对人类不构成威胁。地球上发生的绝大多数地震都是构造地震，几乎所有地震灾害都来自构造地震。这类地震破坏性最大，影响最广，发生也最频繁，是人类必须认真对付的地震。对工程建设而言，危害最大的是浅源构造地震，这类地震频度高、强度大，是工程抗震设防的主要研究对象。

根据震源深度  $H$ ，地震又可分为：浅源地震 ( $H < 60 \sim 70 \text{km}$ )，占地震总数的72%；深源地震 ( $H > 300 \text{km}$ )，仅占地震总数的4%，目前观测到的最大震源深度为720km；以及中源地震，占地震总数的23.5%。

人们把一次较大的地震称为主震，与之有关的发生在主震前的地震称为前震，发生在主震后的地震称为余震。前震、主震、余震就构成了一个完整的地震序列。根据地震记录，地震序列有三种基本类型：①主震余震型，主震释放能量最大，伴以相当数目的余震和不完整的前震，如典型的有1976年唐山地震、1975年海城地震等；②震群型地震，主要能量通过多次较强地震释放，并伴以大量小震，如1966年邢台地震、1988年澜沧-耿马地震等；③单发型地震，主震突出，前震与余震很少，如1976年内蒙古和林格尔地震。在这三种类型地震中，主震余震型地震约占60%，震群型占30%，单发型地震仅占10%左右。

## 1.4 地震波的传播

### 1.4.1 波动方程

在均匀、各向同性、无阻尼弹性介质内，质点运动必须满足介质的应力应变关系、连续条件和牛顿运动第二定律，从小变形弹性力学理论可以导出运动的基本方程为

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i \quad (i=1, 2, 3) \quad (1-1)$$

其中

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

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} = G$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2}$$



$$\theta = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3}$$

式中  $x_1, x_2, x_3$ ——分别表示直角坐标  $x, y, z$  三个方向;  
 $u_1, u_2, u_3$ ——分别为沿直角坐标  $x, y, z$  三个方向的质点位移;  
 $\rho$ ——介质密度;  
 $\lambda, \mu$ ——拉梅参数;  
 $E, G$ ——分别为介质弹性模量、剪切模量;  
 $\nu$ ——波松比;  
 $\theta$ ——体应变;  
 $\nabla^2$ ——拉普拉斯算子。

为求解式 (1-1), 取两个势函数, 一个标量势  $\varphi$ , 一个矢量势  $\psi(\psi_1, \psi_2, \psi_3)$ , 位移  $u_1, u_2, u_3$  与这两个势函数的关系为

$$u_1 = \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} + \frac{\partial \psi_3}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi_2}{\partial x_3} \quad (1-2a)$$

$$u_2 = \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} + \frac{\partial \psi_1}{\partial x_3} - \frac{\partial \psi_3}{\partial x_1} \quad (1-2b)$$

$$u_3 = \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} + \frac{\partial \psi_2}{\partial x_1} - \frac{\partial \psi_1}{\partial x_2} \quad (1-2c)$$

因此, 从式 (1-1) 可得

$$\nabla^2 \varphi = \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad (1-3)$$

$$\nabla^2 \psi_i = \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial t^2} \quad (i=1, 2, 3) \quad (1-4)$$

其中

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = v_p$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = v_s$$

式中  $\alpha$ ——纵波速度;

$\beta$ ——横波速度。

从式 (1-2) 可知, 体应变为

$$\theta = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \quad (1-5)$$

而畸变为

$$\omega_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_2} - \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) \quad (1-6a)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_3} - \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) \quad (1-6b)$$

$$\omega_3 = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_1} - \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) \quad (1-6c)$$

由于纵波只产生压张性的位移而不产生旋转位移, 即畸变  $\omega_i = 0$ , 根据这一条件, 可取: