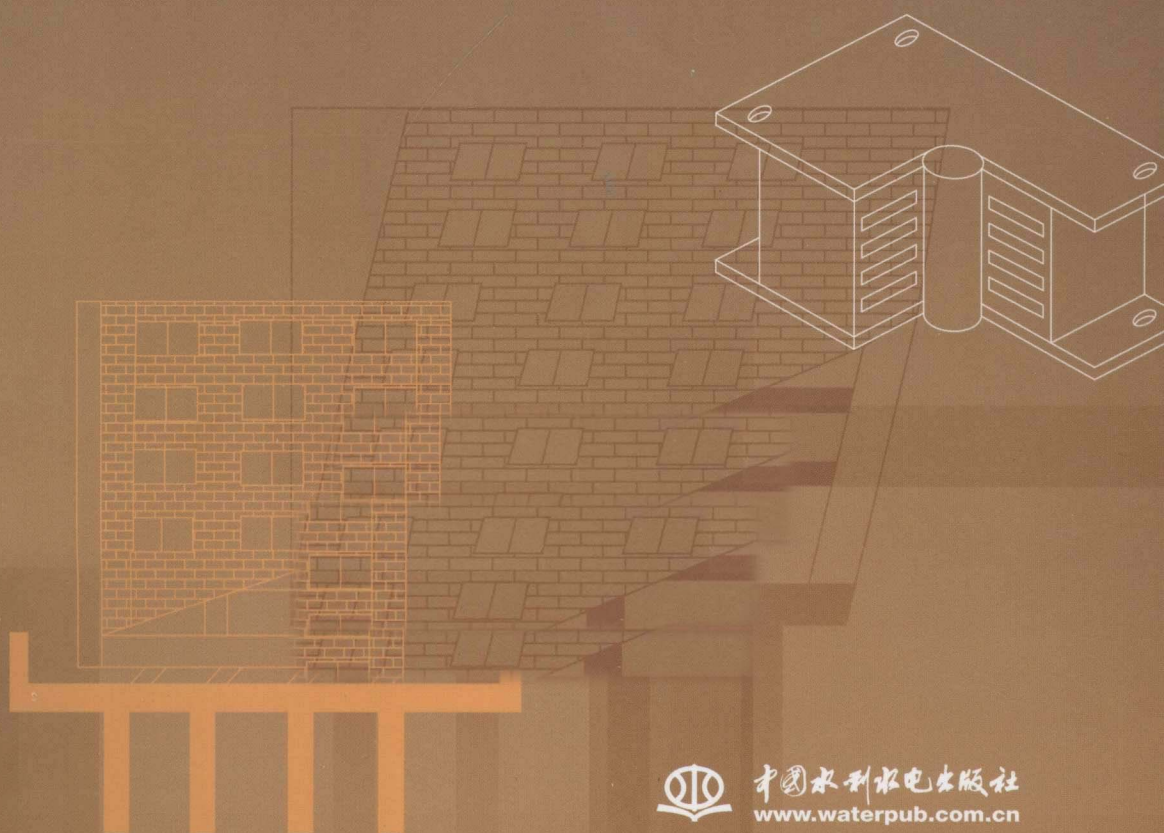


YANTU GONGCHENG KANGZHEN JI GEZHEN
FENXI YUANLI YU JISUAN

岩土工程抗震及隔振 分析原理与计算

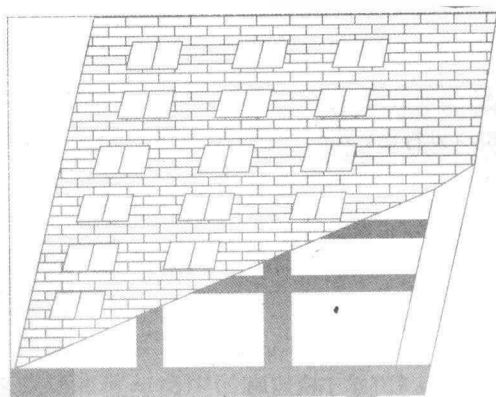
宋焱勋 李荣建 邓亚虹 高虎艳 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

岩土工程抗震及隔振 分析原理与计算

宋焱勋 李荣建 邓亚虹 高虎艳 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

近年来各种岩土工程和设备设施建设的高速发展,在客观上促使岩土工程方面的抗震和减振分析原理逐渐完成了系统化的发展过程。在参阅国内外大量文献和规范的基础上,结合作者们的研究,本书以各种岩土工程抗震设计和动力机器及设备减振评价的分析方法为主线,将岩土工程方面的抗震和减振的主要原理和内容有机联系起来,基本涉及了岩土工程抗震和减振的各个领域,同时注重理论的系统性和应用的可操作性,使读者对岩土工程抗震和减振的理论方法和工程应用有一个较全面的了解,并可在此基础上从事有关的科学研究和工程实践。

本书可供土木、公路、铁道、水利、市政、防灾与减灾和工程地质等相关专业的高年级学生、研究生与教师阅读,也可作为科研和工程技术人员在岩土工程抗震计算和隔振减振分析方面的实用参考书。

图书在版编目(CIP)数据

岩土工程抗震及隔振分析原理与计算 / 宋焱勋等编
著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 9
ISBN 978-7-5170-2592-4

I. ①岩… II. ①宋… III. ①岩土工程—防震设计②
岩土工程—隔振设计 IV. ①TU4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第229329号

书 名	岩土工程抗震及隔振分析原理与计算
作 者	宋焱勋 李荣建 邓亚虹 高虎艳 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 24.5印张 581千字
版 次	2014年9月第1版 2014年9月第1次印刷
定 价	56.00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



地震是重大自然灾害之一，为减轻地震所造成的生命与财产损失，人类进行了长期不懈的努力，随着科学技术的进步，抗震工程的理论和实践得到很大的发展。但是，近几十年来全球发生的许多大地震，例如，1976年中国的唐山大地震、1994年美国 Northridge 地震、1995年日本阪神大地震、1999年中国台湾集集大地震、2008年中国汶川大地震和 2013年中国雅安大地震等仍然造成大量严重的工程破坏和惨重的生命财产损失。因此，对于各种地震灾害，应贯彻预防为主方针，最根本的预防措施是搞好抗震设防和提高各类岩土工程结构的抗震能力。

由于近年来各种岩土工程结构、大型动力机器设备和交通设施建设的高速发展，在客观上促使岩土工程抗震和减振的分析原理逐渐完成了系统化的发展过程。岩土工程抗震和减振的分析内容不仅涉及地震学、工程地震学、结构动力学、土动力学、地震工程学等多门学科，而且也涉及了地基工程、基础工程、地下工程、隧道工程、边坡工程、土石坝工程、岸坡堤防工程、路基工程和动力机器基础及其减振等相关领域。本书力图以各种岩土工程抗震设计和动力机器设备减振评价的分析为主线，将岩土工程抗震和减振的主要原理和内容有机地联系起来，基本涉及了岩土工程抗震和减振的各个分支领域，同时注重理论的系统性和应用的可操作性，使读者对岩土工程抗震和减振的理论方法和工程应用有一个清晰和较全面的了解，并可在在此基础上从事有关的科学研究和工程实践。

全书分为 11 章，第 1 章介绍了地震与灾害，第 2 章介绍了结构动力学的主要内容和分析方法，第 3 章介绍了地震反应谱的分析和应用，第 4 章介绍了工程场地的分析和评价，第 5 章介绍了建筑结构的抗震分析方法和消能减震措施，第 6 章介绍了土体的动力学特性，涉及土的动力特性测试、动强度、动孔隙压、动本构和动力固结理论，第 7 章介绍了地基的动力分析方法和基础工程抗震设计，第 8 章介绍了边坡和坝坡工程及其加固的动力分析方法、动力离心模型试验和安全评价，第 9 章介绍了地下结构的动力分析方法、数值模拟、动力离心模型试验和地下结构抗震概念设计，第 10 章介绍了动力机器基础设计和设备减振隔振分析方法及相关的减振措施，第 11 章介绍了工程场地的地震安全评价方法和应用。

在本书的编著中不仅参阅了大量的文献、资料和规范，还结合了本书作

者们的一些研究成果，在此向研究者和作者表示衷心感谢，同时对在编著过程中给予热情帮助的人员表示衷心感谢。感谢研究生刘军定、闫蕊、彭光辉、张媛、江浩和李锦等为本书的编辑、绘图和文字校对付出的辛勤劳动！

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请各位专家、学者以及同行不吝赐教和批评指正。

编著者

2014年6月

目 录

前言

第1章 地震与灾害	1
1.1 概述	1
1.2 地球构造与板块运动	2
1.3 地震成因与地震类型	5
1.4 地震活动与地震灾害	6
1.5 地震动特性	10
1.6 震级与烈度	17
本章参考文献	21
第2章 结构动力学基础	22
2.1 地震分析模型概述	22
2.2 单自由度结构的地震反应	24
2.3 多自由度结构的地震反应	32
本章参考文献	44
第3章 地震反应谱理论及应用	45
3.1 地震反应谱概念与计算	45
3.2 地震反应谱的影响因素及衰减关系	48
3.3 地震反应谱的应用	48
3.4 设计地震动	51
本章参考文献	56
第4章 工程场地条件与宏观震害	58
4.1 概述	58
4.2 场地条件对宏观震害的影响	59
4.3 场地地层条件的影响	60
4.4 场地地形条件的影响	64
4.5 场地内断裂带的影响	65
4.6 广义地基失效的影响	66
4.7 抗震地段划分与场地分类	66
本章参考文献	69
第5章 建筑结构抗震验算与隔震减震设计	71
5.1 工程结构震损危害	71

5.2	抗震设防的目的及目标	71
5.3	抗震设防标准与方法	74
5.4	建筑结构抗震验算	89
5.5	建筑抗震概念设计	93
5.6	建筑结构隔震	97
5.7	建筑结构消能减震	107
	本章参考文献	114
第6章	土的动力特性	115
6.1	概述	115
6.2	振动与波动	115
6.3	土的动力特性测试	116
6.4	土的动强度特性	123
6.5	土的动孔压特性与预测模型	126
6.6	土的振动液化与判别	129
6.7	土的动应力-应变特性	133
6.8	土的动力固结特性	141
	本章参考文献	148
第7章	地基动力分析及基础抗震	152
7.1	天然地基土层动力响应与计算	152
7.2	砂土液化与软土地基震陷评价	163
7.3	地基与基础的抗震验算	171
7.4	桩基础抗震分析与验算	178
7.5	地基基础与上部结构的相互作用	217
	本章参考文献	221
第8章	边坡及其加固的动力响应及安全评价	222
8.1	边坡工程震害及其特点	222
8.2	地震作用下土石坝坝坡和边坡的动力响应分析	224
8.3	地震作用下边坡稳定性分析	233
8.4	边坡的加固措施	241
8.5	挡土墙的抗震验算	242
8.6	抗滑桩加固的计算与分析	245
8.7	抗滑桩抗震加固的离心模型试验分析	263
	本章参考文献	280
第9章	地下结构抗震分析	282
9.1	地下结构震害分析	282
9.2	地下结构抗震特点及设计原则	294
9.3	地震作用下地下结构模型试验分析方法	295

9.4 地下结构抗震设计计算方法	306
9.5 地下结构抗震分析的数值计算分析	318
9.6 地下结构的抗震概念设计和构造措施	326
本章参考文献	331
第10章 动力机器基础及隔振减振设计	332
10.1 动力机器基础设计	332
10.2 隔振设计	335
10.3 主动隔振	343
10.4 被动隔振	356
10.5 隔振减振措施分析	362
本章参考文献	367
第11章 工程场地地震安全性评价	369
11.1 概述	369
11.2 地震安全性评价的范围与分级	370
11.3 地震活动性和地震构造评价	372
11.4 地震危险性分析	374
11.5 场地地震工程地质条件的勘测	376
11.6 场地地震动参数确定和地震地质灾害评价	379
11.7 地震区划	381
本章参考文献	384

第1章 地震与灾害

1.1 概 述

“灾害”是指能够给人类和人类赖以生存的自然或社会环境造成破坏性影响的事物的总称。按照灾害起因，又可以分为“人为灾害”和“自然灾害”两大类，即中国古语所言“天灾人祸”，如地震、滑坡、海啸、风灾、火灾、旱灾、矿难、核泄漏及瘟疫等各种灾害。与人为灾害相比，自然灾害往往具有“不可抗拒性”和“不确定性”，因而其破坏性和灾害损失也往往是巨大的。联合国“国际减灾十年委员会（1990—2000）”提供的资料表明：仅1963—1992年的30年内，全球自然灾害的受灾总人数就超过30亿人，其中死亡36万人，直接经济损失达3400亿美元之巨。这其中又以地震引起的各种灾害所占的比例最大。

“地震”是地壳运动过程中产生的一种自然地质现象，同时也是危及人民生命财产的一种突发式自然灾害。地震时强烈的地面运动会造成建筑物倒塌或损坏，并可能引发火灾、水灾、山崩、滑坡以及海啸等一系列次生灾害。地震灾害除造成惨重的人员伤亡和经济损失外，还会给地震区带来巨大的社会和政治影响，尤其是随着社会经济的快速发展以及城市化进程的加快，人口及物质财富向城市高度集中，现代地震所造成的灾害更加巨大。表1-1为20世纪以来死亡人数超过2万人的地震统计数据。

表 1-1

20 世纪以来死亡人数超过 2 万人的地震

日 期	地 点	震 级	死亡人数/人
1905 年 4 月 4 日	阿富汗克什米尔	8.6	20000
1906 年 4 月 18 日	美国旧金山	8.3	70000
1906 年 8 月 16 日	智利瓦尔帕莱索	8.6	20000
1908 年 12 月 28 日	意大利墨西拿	7.5	120000
1915 年 1 月 13 日	意大利阿韦扎诺	7.0	30000
1920 年 12 月 16 日	中国海原	8.6	230000
1923 年 9 月 1 日	日本关东	8.3	140000
1927 年 5 月 23 日	中国古浪	8.0	40000
1932 年 12 月 25 日	中国昌马	7.6	70000
1935 年 5 月 30 日	巴基斯坦基达	7.5	50000
1939 年 1 月 24 日	智利康塞普西翁	8.3	50000
1939 年 12 月 26 日	土耳其埃尔津詹	7.9	33000
1970 年 5 月 31 日	秘鲁钦博特	7.7	66000



续表

日期	地点	震级	死亡人数/人
1976年2月4日	危地马拉萨尔瓦多	7.5	24000
1976年7月28日	中国唐山	7.8	242000
1978年9月16日	伊朗塔巴斯	7.7	25000
1988年12月7日	苏联亚美尼亚	6.9	25000
1990年6月21日	伊朗吉兰	7.7	50000
1993年9月30日	印度马哈拉施特拉	6.4	30000
2001年1月26日	印度古吉拉特	7.9	20000
2003年12月26日	伊朗巴姆	6.6	38000
2004年12月26日	印尼苏门答腊	8.9	290000
2005年10月8日	巴基斯坦克什米尔	7.6	90000
2008年5月12日	中国汶川	8.0	87000

统计资料表明,国民生产总值增加1倍,自然灾害损失就增加3倍,随着世界经济的增长,自然灾害的损失呈几何级数增长,这在现代地震造成的经济和财产损失方面表现得尤为明显。如1994年美国洛杉矶Northridge地区6.6级地震,造成62人死亡,但累计经济损失却超过300亿美元;1995年日本关西地区的阪神7.3级地震,造成的经济损失甚至超过1000亿美元,为同期所有其他自然灾害所引起的经济损失的总和;2008年的汶川8.0级大震,虽然不是发生在大城市,但由于震区城镇密集,人口聚居,死亡和失踪人口近10万,而直接经济损失更是高达近万亿人民币。

我国地处世界上两个最活跃的地震带——环太平洋地震带和欧亚地震带之间,是一个地震频发的国家。据统计,全国80%以上的大中城市均在地震区,Ⅵ度及Ⅵ度以上的震区几乎遍及全国各个省和自治区。我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中明确规定:抗震设防烈度为Ⅵ度及以上地区的建筑,必须进行抗震设计。因此,为预防和减轻各种土工结构由于地震而造成的破坏,工程技术人员就需要对地震及其灾害有较深入的了解和认识,就需要学习和研究岩土工程的抗震问题。

工程抗震研究和设计是地震灾害防灾减灾的重要基础,学习地震作用下各种土工结构的抗震分析和评价方法,具有重要的工程实际意义。

1.2 地球构造与板块运动

1.2.1 地球内部构造

地球是一个平均半径约6400km的近似椭球体,其赤道半径略大于极半径。现代卫星资料表明,地球的真实形状近似梨形,北极略隆起,而南极略凹进(图1-1)。地球的平均密度约为 $5.517\text{g}/\text{cm}^3$,从地表岩石的密度来看,常见的花岗岩密度为 $2.67\text{g}/\text{cm}^3$,玄武岩密度为 $2.85\text{g}/\text{cm}^3$,仅是地球平均密度的一半。这表明,地区内部物质的密度不但高于表面岩石的密度,同时也高于地球的平均密度。一般而言,地球内部的物质密度随深度



而逐渐增大。同时，地球内部的温度和压力一般也随深度而增加，如地心的温度可能高达 3000°C ，甚至 $4000\sim 5000^{\circ}\text{C}$ ，而压力则可达 350 万个大气压。

对于地球这样一个半径 6400km 的庞然大物，我们通过钻井所能直接观察或测量的深度却不超 13km ，因此，我们对于地球内部物质及构造的认识主要依赖地震波法等地球物理手段，即根据地震波在地球内部不同深度处的速度变化来推测地球内部的物质结构。据实测资料，地球内部存在两个波速变化明显的不连续面，一个位于地下平均 33km 处，地震波通过此界面后，剪切波（S 波）和压缩波（P 波）波速均突然增大。

此界面于 1909 年由前南斯拉夫地球物理学家 Mohorovicic（莫霍洛维奇）首先发现，因此后人称之为“莫霍面”。另一个在地下约 2900km 处，地震波通过该界面后，P 波波速突然减小，而 S 波消失，这个界面是由德国地球物理学家 Gutenberg（古登堡）于 1914 年发现的，后人称之为“古登堡面”。依据上述两个不连续面把地球由外向内分为三大部分：表面很薄的一层叫地壳，平均厚度约 30km ；中间很厚的一层叫地幔，厚度约 2900km ；最里面的一层叫地核，厚度约 3500km （图 1-2）。

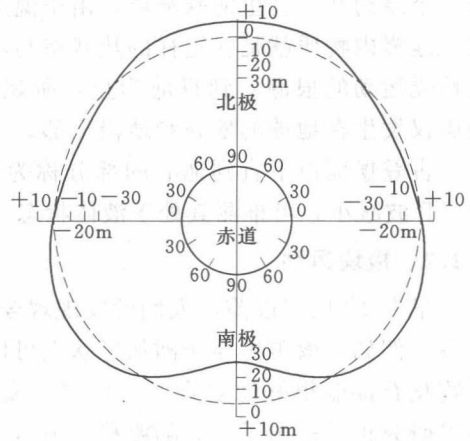


图 1-1 真实的地球——梨形椭球体

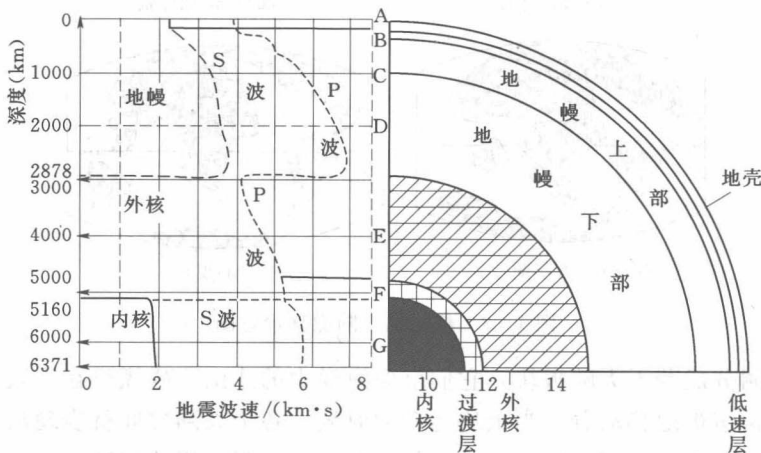


图 1-2 地球内部结构及 P 波和 S 波速度分布

地壳是地球的外壳，由各种不均匀的岩石组成。地壳在地球各处厚薄不均，一般陆壳较厚，约 $30\sim 70\text{km}$ ，洋壳较薄，约 $5\sim 8\text{km}$ 。地壳表面为沉积层，陆地下面主要有花岗岩和玄武岩，海洋下面的地壳一般只有玄武岩层。地壳的下界称为莫霍面，是第一个地震波传播速度发生急剧变化的不连续面。

地壳以下到约 2900km 的古登堡面为止的部分称为地幔，约占地球总体积的 $5/6$ 。其主要由质地坚硬的橄榄岩组成，该物质具有黏弹性。在地幔的上部（上地幔），可能存在



着一个厚约几百公里的软流层，由于温度和压力分布的不均匀，发生了地幔内部物质的对流，地幔内物质就是在这样的热状态与不平衡的压力作用下缓慢地流动着，这可能就是其上地壳运动的根源。到目前为止，所观测到的最深地震发生在地下 700km 左右，可见，地震仅发生在地球的地壳和地幔上部。

古登堡面以下直到地心的部分称为地核，地核可分为内核和外核。由于外核 S 波消失，P 波减小，可推测其处于液体状态，而内核可能是固态，主要由镍和铁组成。

1.2.2 板块运动

早在 19 世纪以前，人们就发现现今被大洋分隔的各大陆之间在历史上曾经有过陆地联系。例如，南美洲与非洲从形状上可以拼合在一起，且上亿年以来不同年龄的岩层和古生物化石都能很好地吻合。1912 年，德国气象学家和地球物理学家 Wegener（魏格纳）通过研究正式提出了“大陆漂移学说”，并在 1915 年出版的《海陆的起源》一书中进行了论证。大陆漂移说认为，地球上所有大陆在中生代以前曾经是统一的巨大陆块——“泛大陆”，中生代开始，泛大陆分裂并漂移，逐渐达到现在的位置（图 1-3）。

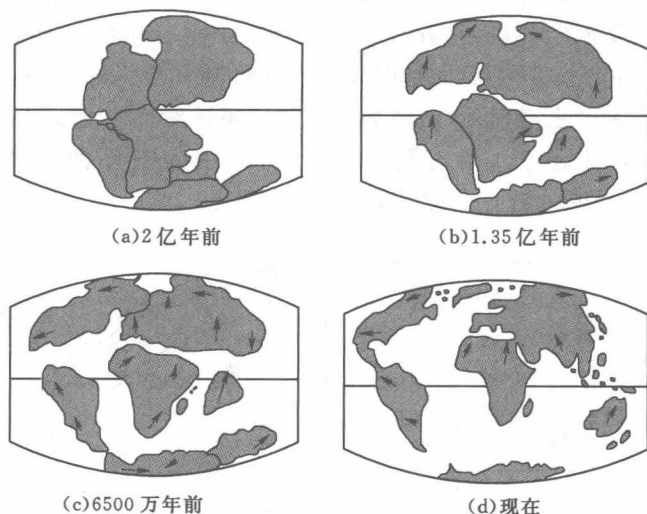


图 1-3 魏格纳大陆漂移示意图

地壳岩石圈分成若干大陆板块，它们就像海洋中的冰山一样漂浮在玄武岩质的上地幔软流层上，非常缓慢地移动着。当板块运动的时候，各个大陆之间就表现出了相对的水平运动——碰撞或离析，从而构成地球表层的各种地质景观。板块构造理论认为，地球表层（岩石圈）是由厚度大约为 100~150km 的巨大板块构成，根据法国地质学家 Le Pichon（勒皮雄）等人的观点，全球岩石圈划分为六大板块，即太平洋板块、印度洋板块、亚欧板块、非洲板块、美洲板块和南极洲板块，其中只有太平洋板块几乎完全在海洋，其余均包括大陆和海洋（图 1-4）。板块间的分界线是海岭、海沟、大的褶皱山脉和裂谷与转换断层带。大板块中又可分出一些较小的板块，例如，把美洲板块分为北美洲板块和南美洲板块；从太平洋板块中分出东太平洋板块；从亚欧板块中分出以中国大陆为主体的东亚板块等。

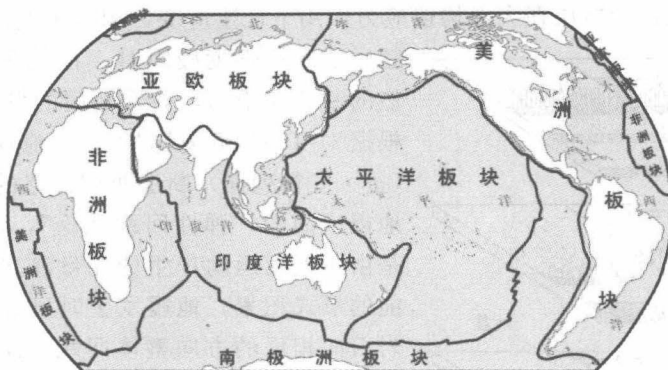


图 1-4 地球板块构造分布

很明显，板块与板块之间的交界部位是构造活动最强烈、构造应力最为集中的地方，因而也是全球地震、火山活动的主要发生地（图 1-5）。据统计，全球 85% 的地震发生于板块边界地带，仅有 15% 发生于板块内部。

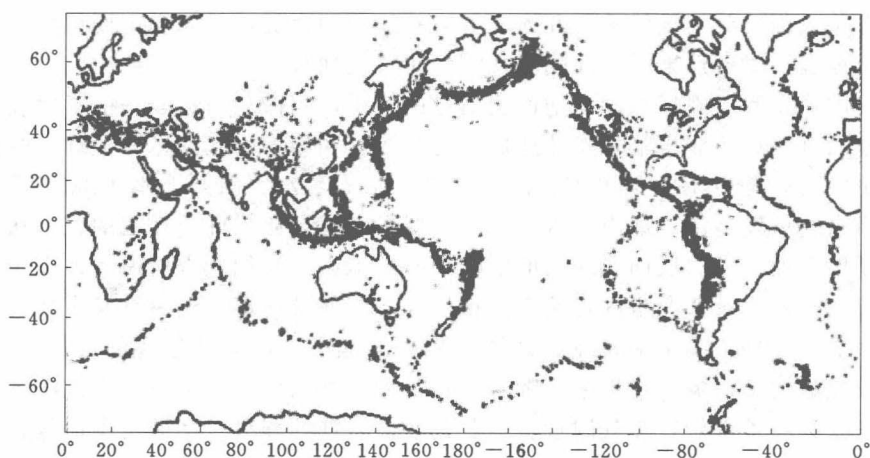


图 1-5 全球地震震中分布图（1961—1967 年）

1.3 地震成因与地震类型

1.3.1 地震成因

地震是地壳能量的一次巨大释放，并常常伴随着新的地表（岩石）破裂和强烈的地面震动。因而早期的地震成因说倾向于断层破裂引起的“弹性回跳说”，进而追踪断层破裂和弹性回跳的能量起源，发现板块的构造运动和相互碰撞挤压是这种能量积累的原始动力，即“板块运动说”。其实两者并不矛盾，前者解释了某一次具体地震的局部机制，而后者则揭示了全球所有构造地震的宏观动力背景。此外还有“岩体相变学说”，认为地震是由于地壳较小体积内岩体相变引起的体积变化所引起。

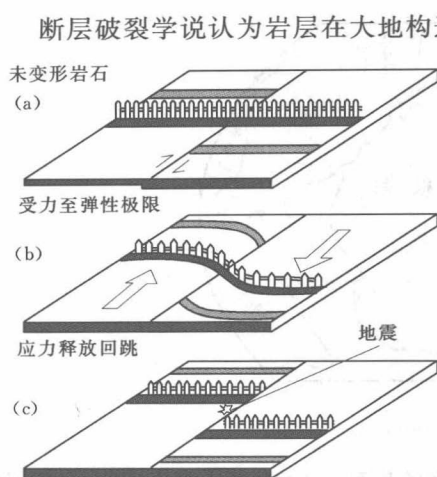


图 1-6 弹性回跳理论示意图

断层破裂学说认为岩层在大地构造应力作用下产生应变，积累了大量应变能，当应力超过了岩石强度极限时，在某些脆弱部位发生突然的断裂和错动，导致地震的发生。Reid（里德）根据对 1906 年美国旧金山地震时 San Andreas（圣·安德列斯）断层两侧位移的实测数据提出了地震成因的“弹性回跳理论”，认为地震的发生，是由于地壳运动产生的能量在岩石中以弹性应变能的形式积累，地震发生时已经发生弹性变形的岩石向相反的方向整体回跳，恢复到未变形前的状态，这就是所谓的“回跳”。这种弹跳可以产生惊人的速度和力量，把长期积蓄的能量瞬间释放出来，引起地面强烈震动，即地震。其示意图如图 1-6 所示。

1.3.2 地震类型

地震按其成因可分为天然地震和人工（为）地震两大类，具体又主要包括以下几种类型：①火山地震；②构造地震；③陷落地震；④诱发地震。

伴随火山喷发和岩浆猛烈冲出地面而引起的地震，叫做火山地震。由于地表或地下岩层因某种原因（例如溶洞塌陷）突然造成大规模陷落和崩塌引起的地面振动，叫做陷落地震。地震诱发地震是由于人工爆破、矿山开采、水库蓄水、深井注水等原因所引发的地震，一般指水库诱发地震，即由于水库蓄水改变了水文地质条件及地层的应力状态和岩土体物理力学性质而诱发岩层面或断层面活动引起的地震。我们通常所说的地震一般指的是构造地震，它是地壳运动产生的自然力推挤地壳岩层使其薄弱部位突然发生断裂错动引起的地震，是上述 4 种地震中最常见、破坏性最大的地震，占全部地震的 90% 以上，也是工程抗震研究的主要对象。近年来，随着一些巨型大坝的修建，水库诱发地震也受到广泛关注，如三峡大坝蓄水后，在其附近就监测到数以万计的震级较小的诱发地震。

地震根据震源的深浅不同又可分为浅源地震（震源深度 $d < 60\text{km}$ ）、中源地震（ $60 \leq d < 300\text{km}$ ）和深源地震（ $d \geq 300\text{km}$ ）三种类型。浅源地震约占地震总数的 70% 左右，一年中全世界所有地震释放能量约 85% 来自浅源地震。浅源地震波及范围较小，但由于其距离地表较近，往往破坏程度较大。中源地震约占地震总数的 25%，而深源地震仅占地震总数的 5% 左右。

根据震中距的大小，地震又可分为地方震（local earthquake）、近震和远震。震中距在 100km 以内的地震叫地方震；震中距在 100~1000km 之间的地震称为近震；震中距大于 1000km 的地震为远震。

1.4 地震活动与地震灾害

1.4.1 世界地震活动

全世界每年要发生 500 万次地震，但其中大部分是人们感觉不到的小震，人们能感觉



到的地震（有感地震）仅占1%。5级以上的破坏性地震全球每年1000次左右，6级以上地震每年100次左右，7级以上的地震每年只有十几次，而8级以上的强震则每年仅有1~2次。这些地震以地震波形式释放出来的能量估计每年可达 $9 \times 10^{17} \text{J}$ ，但主要是由少数大地震释放出来的，其中约85%是浅源地震释放的。

地震在全球的分布是相当不均匀的，但又表现出某种规律性。根据历史地震的震中分布，我们可以发现全球主要有两大地震活动带，即环太平洋地震带和欧亚地震带（又称地中海—喜马拉雅地震带）。环太平洋地震带沿南北美洲西海岸、阿留申群岛，转向西南到日本列岛，再经我国台湾省达菲律宾、新几内亚和新西兰，全球约80%浅源地震和90%中深源地震，以及几乎所有的深源地震都集中在这一地带。除分布在环太平洋地震活动带的中深源地震以外，几乎所有的其他中深源地震和一些大的浅源地震都发生在欧亚地震带。它西起大西洋的亚速岛，经意大利、土耳其、伊朗、印尼北部、我国西部和西南地区，过缅甸至印度尼西亚与上述环太平洋带相衔接。

1.4.2 中国地震特点

我国是一个多地震国家，地震活动频度高、强度大、分布广，灾害严重。我国的绝大部分地区都受到地震的威胁，除浙江和贵州两省之外，其余各省均发生过6级以上强震。抗震设防烈度为7度以上的高烈度区覆盖了一半以上的国土，其中包括3个直辖市、23个省会城市（含台北）和2/3的100万以上人口大城市。而目前居住在农村地区的人口，超过80%居住在地震高烈度区。1900年以来，我国发生的7级以上大震就达80余次，约占全世界的1/3。20世纪全球8.5级以上的大地震共3次，其中有2次发生在我国。全国平均每年发生5级以上地震30次，6级以上强震6次，7级以上大地震1次。

1556年（明嘉靖三十四年）发生在今陕西省华县的“关中大地震”，震级超过8级，死者不计其数，奏报有名者就达83万人，是现今文献记载死亡人数最多的一次地震。1668年（清康熙七年）山东省郯城发生8.5级大地震，这次地震破坏区域纵长1000余km，面积达50多万 km^2 。当时，蒲松龄出游在山东省临淄县，亲身经历了这一次地震，蒲松龄把自己的这些亲身体验和见闻，记录在《聊斋志异》中的《地震》一文中（图1-7）。而现代死亡人数最多的两次地震也发生在我国（1920年宁夏海原8.5级地震，死亡23.4万余人；1976年唐山7.8级地震，死亡24.2万多人，重伤16.4万余人）。据统计，20世纪以来，全球因地震而死亡的人数超过120万人，其中我国就占一半以上。据新中国成立以来近50年的统计资料，地震所造成的人口死亡数量位居各种自然灾害之首。特别是1976年的唐山大地震和2008年的汶川大地震，其灾害损失在中国乃至全世界都是史无前例的。

2008年5月12日14时28分，四川省汶川县发生8.0级强烈地震（震中位于映秀镇西南，地理位置为北纬 31.0° ，东经 103.4° ），极震区破坏烈度高达Ⅺ度，曾经山青水秀的北川县城、汶川县映秀镇等城镇被夷为平地，青川县城及多个乡镇基本变为废墟，茂县、绵阳、德阳、都江堰等地遭受重创。地震发生时，全国25个省（自治区、直辖市）有明显震感，其中又以四川、甘肃、陕西、重庆四地受灾最为严重。汶川地震全国直接经济损失达8451亿元，是新中国成立以来破坏性最强、波及范围最广、诱发地质灾害最多、救灾难度最大的一次地震，造成大面积房屋倒塌、山体滑坡、道路、桥梁、通信和电力中



图 1-7 蒲松龄《聊斋志异》中记录的郏城地震

断，重灾区面积超过 10 万 km^2 ，受灾人口近 4000 万，共造成 37 万余人受伤，87000 多人死亡。汶川地震后，国务院将每年的 5 月 12 日定为全国防灾减灾日。

我国地震在空间上分布不均匀，呈带状分布。新编的《中国及邻区地震区、带划分图》将中国及邻近地区划分为 7 个地震区，4 个地震亚区和 23 个地震带。7 个地震区分别为天山地震区、青藏地震区、东北地震区、华北地震区、华南地震区、台湾地震区和南海地震区。地震区下又分若干地震亚区或地震带。如 2008 年的汶川地震就发生在青藏地震区的龙门山地震带上。

总体来说，由于我国夹于世界两大地震带（环太平洋地震带和欧亚地震带）之间，因而地震频发，灾害严重，全国除个别省份外，绝大部分地区都发生过较强的破坏性地震，且现今地震活动仍相当强烈。据统计，我国国土面积占全世界的 7%，人口占全世界的 22%，但地震和地震灾害却分别占到全世界的 33% 和 52%，可以说是世界上地震灾害最为严重的国家。

1.4.3 地震灾害

地震是一种突发式地质灾害，地震发生时巨大的能量释放、强烈的地面震动，往往造成地表形态的巨大改变，工程结构的损毁倒塌，并可能诱发诸如火灾、水灾、毒气泄漏、海啸、瘟疫等次生灾害。因此，从地震工程学的角度出发，地震灾害又可以分为直接灾害和间接灾害两大类。直接灾害主要包括地震直接导致的地表形变和工程结构破坏，而间接灾害则指上述地震后诱发的各种次生灾害。

1.4.3.1 直接灾害

强烈的地震常常伴生许多地表宏观破坏现象，如震中区的地面，在几十甚至几百公里长的区域，会沿发震断层产生相对水平或竖向错动并形成永久性位移；会造成大量的山体崩塌、滑坡和泥石流，严重的还会堵塞河道，形成堰塞湖而使山河改观。此外，地震时地



下饱和砂土和粉土等会出现喷砂冒水等液化现象，也会造成地表塌陷、不均匀沉降和开裂等破坏。

(1) 地表破裂。

一般来说，6级以上的浅源地震就能在震中附近区域形成明显的地表断层和位错，断层的长度、错距等与震级密切相关，8级以上的地震形成的地表断层长度可达数百公里，断层两侧地表垂直位错可达数米甚至十几米。如我国1970年的云南通海7.7级地震，震后沿曲江形成了全长54km、断距2m的地表新断层；2001年青海与新疆交界处昆仑山8.1级强烈地震所产生的地面破裂带全长426km，宽数米至数百米，是近50年来我国大陆发生的震级最大、地表破裂最长的地震；2008年汶川8.0级大地震形成长300km、宽30km的地表断裂带，最大垂直和水平错距分别达6.8m和4.8m。

(2) 崩塌滑坡、堰塞湖。

地震时的强烈震动往往在高山峡谷区引发大量的崩塌和滑坡灾害，当崩滑体体积较大时，还有可能阻塞河道，形成堰塞湖。如1933年四川叠溪地震后，巨大的山崩体堵塞了岷江河道，形成堰塞湖，并于45天后溃坝，造成严重水灾；1974年云南昭通地震使手扒崖山崩，岩体沿层状结构向木杆河崩塌，使木杆河断流形成地震堰塞湖；2008年的汶川大地震引发的崩塌和滑坡随处可见，数以万计，是造成财产损失和人员伤亡最为严重的灾害之一。据统计，由崩塌滑坡造成的人员死亡近2万人，如北川县城王家崖滑坡就直接导致1600多人丧生。此外，山体滑坡在四川境内共形成了具有一定规模的堰塞湖34座，如北川县城上游的唐家山堰塞湖，堰体长803m、宽612m，最大堰高124m，堰体体积2037万 m^3 ，极易形成溃坝洪灾。

(3) 地震液化。

地震液化是指地震时饱和的砂土等由于振动丧失剪切承载力而类似液体的现象。此时，含水层受到挤压，地下水带着砂土沿裂缝一起冒出地面，形成喷砂冒水现象。地震液化会造成地面倾斜、不均匀沉降甚至开裂，继而因地基失效引起建筑物下沉、倾斜甚至坍塌损毁。如1964年日本新潟地震就引发砂土层广泛液化，大量建筑物倾斜、下沉，数千建筑物坍塌或严重损毁。我国1975年的海城地震和1976年的唐山地震均引发了较大规模的液化现象，唐山地震时，天津市有近50处发生喷砂冒水现象。海城地震后，地面到处喷砂冒水，造成道路、建筑受损，堤防沉陷。

(4) 工程结构破坏。

地震时，各种工程建（构）筑物的破坏和坍塌是最为常见的宏观灾害现象。工程结构破坏的最直接原因是地震诱发的强烈振动，当这种振动产生的附加荷载超过工程结构所能承受的极限时便发生破坏。此外，地震诱发的地表断层错动、崩塌、滑坡及地震液化等地表形变也可直接导致筑于其上或位于附近的工程结构的损毁和破坏。

砖混结构的建筑主要表现为承重砖墙的剪切破坏，如形成交叉剪切裂缝，或水平剪断而引起坍塌。钢筋混凝土框架结构的建筑主要表现为梁柱节点的塑性破坏或立柱在竖向地震荷载下的屈服和压溃等破坏形态。钢筋混凝土厂房的破坏多表现为由构件连接不牢而导致的屋顶塌落等形态。除各种房屋建筑外，其他工程结构，如道路、桥梁、大坝、管道、港口码头等也会在地震中由于振动或地表形变而产生破坏，其破坏程度和破坏模式决定于