



地震学引论

[瑞典] M. 巴特著 许立达译 叶世元校

地震出版社

地 震 学 引 论

〔瑞典〕 M. 巴 特 著

许立达译 叶世元校

内 容 提 要

本书介绍了地震学的研究内容及研究方法。前九章论述了经典地震学,介绍了地震学发展的历史背景和改善地震观测的方法。其后的三章论述了当前地震学中极为重要的三个分支——地震预报、核试验侦察与行星地震学。最后一章探讨了地震学的教学与实践。

本书是地震学的入门书,可供广大地震工作者、地震科学爱好者以及有关专业的师生参考。

Markus Báth
Introduction to Seismology
1973 Birkhäuser Verlag
Basel and Stuttgart

地 震 学 引 论

[瑞典] M. 巴特著
许立达译 叶世元校

地震出版社出版

北京三里河路54号

北京印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

850 $\frac{1}{2}$ ×1160 $\frac{1}{2}$ 1/32 10 $\frac{1}{2}$ 厘米 插页图1 300字

1978年9月第一版 1978年9月第一次印刷

统一书号: 13180·43 定价: 1.50元

限国内发行

目 录

序言	(1)
第一章 地震学的研究范围和历史	(3)
第一节 什么是地震学?	(3)
第二节 弹性理论的发展	(6)
第三节 地震的观测	(9)
第四节 早期对地球内部的认识	(12)
第五节 地震仪的装设: 地震学成为一门科学	(13)
第二章 地震仪	(18)
第一节 基本原理	(18)
第二节 摆式地震仪	(25)
第三节 其它地震仪	(36)
第四节 某些发展	(39)
第五节 地震台网	(40)
第三章 地震波	(45)
第一节 地震波的主要类型和基本定律	(45)
第二节 远震体波	(50)
第三节 近震体波	(58)
第四节 面波(基阶振型)	(61)
第五节 面波(高振型)和通道波	(68)
第六节 走时图表	(73)
第七节 脉动	(78)
第四章 震源参数及其测定	(81)
第一节 震源参数	(81)

第二节	坐标与发震时刻·····	(83)
第三节	震级与能量·····	(88)
第四节	烈度·····	(95)
第五节	地震对建筑物的影响·····	(99)
第六节	附录 1: 1964年修订的麦德维捷夫- 斯普休尔-卡尼克地震烈度表(略有删节)···	(101)
第七节	附录 2: 地震宏观调查表一例·····	(104)
第五章	地震统计学与地震地理学 ·····	(107)
第一节	地震灾害·····	(107)
第二节	地震的频度与能量·····	(118)
第三节	地理分布·····	(122)
第六章	地震机制 ·····	(132)
第一节	个别地震的解·····	(132)
第二节	地震机制的地理组合·····	(141)
第三节	新的全球构造·····	(146)
第四节	地震的时间序列·····	(153)
第七章	地球内部的构造 ·····	(162)
第一节	地球物理性质的主要特征·····	(162)
第二节	地壳·····	(177)
第三节	地核·····	(187)
第八章	改进地震观测的方法 ·····	(198)
第一节	数据交换与资料的改善·····	(198)
第二节	信号灵敏的地点·····	(202)
第三节	地下记录·····	(205)
第四节	台阵与特殊分析方法·····	(206)
第五节	全球地震台网·····	(213)
第六节	全球地震台阵网·····	(220)
第七节	结束语·····	(222)

第九章 模型地震学	(225)
第一节 基本问题	(225)
第二节 地震波的传播	(227)
第三节 地震机制	(231)
第四节 地震波速度	(233)
第十章 地震预报与地震的人工释放	(238)
第一节 背景与目的	(238)
第二节 地震预报的物理基础与观测	(241)
第三节 现有的地震预报计划	(243)
第四节 摆动与迁移	(246)
第五节 触发效应	(249)
第六节 大坝与地震	(251)
第七节 爆炸与地震	(257)
第十一章 核试验和其它爆炸	(263)
第一节 地震学方面的研究	(263)
第二节 地震学的研究结果	(265)
第三节 探测：一般问题	(271)
第四节 探测：地点、深度和发震时刻	(273)
第五节 探测：震源机制和地震波	(274)
第六节 震级与能量	(281)
第七节 核爆炸的统计	(285)
第八节 核爆炸的和平利用	(289)
第九节 化学爆炸	(290)
第十二章 行星地震学	(294)
第一节 研究目的与早期得到的结果	(294)
第二节 月球的磁场、地形与起源	(296)
第三节 月球物理现象：火山喷发，月震等	(299)
第四节 月球的仪器观测和理论模型	(300)

第十三章	地震学的教学与实践.....	(307)
第一节	乌普萨拉大学的地震学课程.....	(307)
第二节	练习.....	(310)
第三节	地震学的实际应用.....	(316)
参考文献		

序 言

资料必须大大丰富与充实。

本诺·古登堡 (1959)

著述本书的意图是通俗地介绍现代地震学及其研究方法,以及当前感兴趣的课题和研究结果,并简略地叙述一下它的历史背景。特别是在最近几年,地震学在社会公众和新闻界中引起了很大兴趣。其原因一是地震仪器可记录大型爆炸(如核试验),再是多次发生了地震灾害。过去几年人们的这种兴趣和向我们作出的若干提问在一定程度上促进了本书的撰写。因而本书的目的是以准确易懂的方式来解答一些常见的问题。

地震学是一门应用数学-物理科学。在介绍这门科学时,目的是使读者知道那些主要的现象,而不是长篇累牍地详细描述地震的各种次生效应或者罗列事实。换言之,是让读者了解一些基本现象,这些基本现象往往隐匿在那些显而易见的现象背后。在阐述地震学时几乎不运用数学无疑是存在一定困难的,例如叙述某些研究结果而乏其数学证明。尤其在要较完整地理解事物的过程而不得不为之作出数学解释时,困难就更显著。

通常我们可以认为,解答地震学问题时所依赖的数学工具的程度,远远超越了中学课程的水平。实际上,需要的应用数学知识远比理学士一般所学的要多。而中学教授的物理学在许多方面已可很好地引导我们去理解各种地震学问题。这是通过较直觉的方式而不是严格的数学推导来理解。例如我们看到电学理论在正确了解现代地震仪结构方面的重要意义,以及光学理论在理解弹性波在地球内部传播方面的重要性。因此在本书中我述及的是中学物理学,而未作高等数学讨论。在这一点上,地震学有效地应用

了中学物理学。

本书所述内容的选择及其描述的宗旨是使该书成为中学物理学、地理学和有关学科教师的入门书,并成为中学生的阅读书籍,以及大学生的引导书。同时它也将成为需要了解地震效应的建筑工程师们和其他人的参考书,作为地震勘探原理的引论与感兴趣的一般读者的知识读物。

第一章至第七章描述了经典地震学。这样就有了能使我们理解现代地震学发展趋势的背景。在书中我们讨论了改善地震信息的方法,包括自然界观测(第八章)和实验室研究(第九章)。第十一、十二章论述了当前地震学中极重要的三个分支:地震预报,核试验侦察与行星地震学。最后在第十三章中探讨了地震学的教学与实践。

本书基本上是瑞典文版 *Introduktion till Seismologin* (1970年由斯德哥尔摩 *Natur and Kultur* 公司出版) 的英译本。在整理本版英译本时,对瑞典文版作了几处较小的改动,特别是补充了近两年来的地震学发展的成果。本版英译本中删除了一些较局限于瑞典或斯堪的纳维亚半岛的少量描述,如瑞典、挪威、芬兰和丹麦的地震活动性。由于我们对瑞典台站的记录掌握最完全,故尔书中所举的许多地震观测例子均以瑞典台站的记录作依据。

著者在此谨向乌普萨拉大学哲学博士 R·J·布朗 (R.J. Brown) 先生致谢,承他在语言方面进行了校对与修饰,向乌普萨拉大学的 E·德赖马尼斯 (E. Dreimanis) 夫人致谢,她为本书绘制了大部分插图;并向对本书的出版给予关注的巴塞尔的比克霍伊泽尔出版社表示谢意。

M·巴特

1971年11月

第一章 地震学的研究范围和历史

第一节 什么是地震学？

地震学一词是由希腊语 *seismos* (地震) 和 *logos* (科学) 两词构成的。有时人们相信地震学的确切译义是地震的科学，其实不完全准确。同许多其它科学一样，地震学的发展已超越了原来的范围。虽然地震的研究是地震学的主要组成部分，但地震学中还增加了若干其它重要的研究分支。我们能根据全球地震台站所记录的地震时辐射的弹性波，对地球内部的组成进行最可靠的研究，并得出最可靠的结论。从而探究地球内部的物理性质就成了地震学研究的另一重要分支。根据内容在此对地震学下了两个定义：

1. 地震学

a) 地震的科学，加上

b) 地球内部物理学（主要研究地震波的传播，可得出有关地球内部组成的结论）；

2. 地震学

弹性（地震）波的科学，即：

a) 弹性波的产生（地震，爆炸等），

b) 弹性波在地球内部的传播，

c) 弹性波的记录，包括记录的解释。

地震学基础研究涉及的问题即是上述几项。此外，还有一门应用地震学，也可把它分为几个分支，如地震勘探，即是利用地震方法去寻找盐、油、矿物和矿石等经济上的重要资源。还有为建筑目的服务的基岩深度探测等。此外，辨别地震和核爆炸问题也可认为是应用地震学的另一个研究分支。

地震学是一门涉及面极为广泛的科学——地球物理学的一部分。地球物理学就是地球的物理学，包括固体地球，海洋，大气层和电离层的物理学。从狭义来说，“固体地球物理学”或地球物理学是指地球内部的物理学。正如根据不同的物理现象把普通物理学分为几个较小的学科一样，一般也以相同的方式对固体地球物理学作了划分。但出于一些自然原因，以一种略微不同的方式划分地球物理学显得比较合适，在“固体地球物理学”范围内可以列出以下几部分：

1. 地震学。
2. 火山学（也是地质学的一部分）：火山，温泉等。
3. 地磁学：地球的磁场。
4. 地电学：地球的电性质。
5. 地壳构造物理学（与地质学有共同之处）：地质过程的物理学。
6. 重力测量学（也是大地测量学的一部分）：重力测量及其解释。
7. 地热学：地球内部的温度状况。
8. 地球宇宙学：地球的起源。
9. 地质年代学：地球历史事件的年测。

这种划分在国际上是最常见的一种，由九个部分组合成为“固体地球物理学”。大地测量学研究地球的形状和大小，是一门与地球物理学密切有关的科学。目前往往把地球物理学、大地测量学同其它有关地球自然性质的科学如地质学和地理学组合为一门较大的学科，称为地球科学。示意图见图 1。

“固体地球物理学”这个名词也并不完全令人满意。“固体”是指除了液体和气体部分（海洋和大气层）以外的那一部分地球。从严格的物理学意义而言，它并不能表示地球内部的性质。从物理学角度来说，地球仅在大约80公里深的范围内是固体，即呈晶态。在许多大学里，人们简单地用“地球物理学”这个名称

来指“固体地球物理学”范围内的内容。地球化学是另一门相关的学科,在此没有分列出来,它作为图1中某些学科的一个部分。

地震学和普通地球物理学一样,在三个平行的方面展开研究:对自然界进行观测(包括自然现象的记录),开展实验室研究和理论研究。然而对其课题的研究往往是颇为困难,主要因为我们对所研究的对象——地球内部——不能直接进行考察。我们仅依靠在地面和接近地面处进行间接的观测。很显然,对这些观测结果进行解释时就会产生很大的困难。确实,在很大的程度上地震学课题是由这些有待解释的问题组成的。毫无疑问,地震学观测(一般是地震仪记录)较之其它地球物理学观测如重力和地磁观测可得出更明确可靠的解释。为了使得到的地球内部图象尽可能可靠和完全,最合适的方法是尽量采用多种不同的观测手段。如果要使人信服,地球内部组成的解释必须同所有可靠的观测结果一致。一位著名的地球物理学家曾经这样说:“我们必须记住,只有一个地球。”

实验室研究对观测结果的解释具有重要的意义。我们在实验

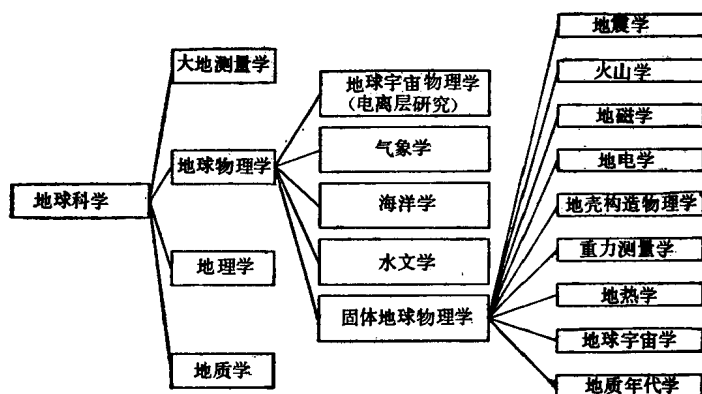


图1 地球科学,地球物理学,固体地球物理学细分为不同的学科。对所列其它学科未作细分

室中对高压和高温下各种材料（金属和矿物）的性质作了研究。现在已有可能模拟地震区的地震过程和地震波在地球内部的传播。刚才所说的那种实验一般称作模型地震学。实验室研究的优点是能把参数任意变化，即使不能经常完全如实地模拟天然条件，但可获得比之天然条件控制得更好的条件下的样品。现代电子计算机为模拟复杂的自然现象提供了又一个有效的方法。

事实上，理论和观测（记录）在地震学研究中往往起着重要的作用。在最近几十年中开展了实验室研究，特别是模型地震学研究，使地震学研究日趋完善。

显然，地震学是一门应用科学。为了对这门科学作出较重大的贡献，首先必须具备全面的数学和物理学知识。此外，其它如地质学、统计学方面的知识也有很大的用处。

在十九世纪末与本世纪之初，地震学初次成为一门独立的科学。地震学的理论基础，特别是弹性理论和地震波传播理论却很早就有了发展，由柯西（A.L.Cauchy）和泊松（S.D.Poisson）奠定的弹性理论早在十九世纪上半期就已出现。很早以前，人们就对人口稠密地区的地震及其影响作了观测。公元一世纪时，在中国已出现了世界上第一台地震观测仪器——候风地动仪。但是直到十九世纪行将结束时，理论基础和观测之间还毫无联系。幸而人们制造成功了地震仪，才有可能把理论基础和实际观测联系起来。由于地震仪的良好工作，使我们在本世纪对地球内部的认识有了飞快的发展，并使地震学成为一门科学。

第二节 弹性理论的发展

在此我们将详细考查一下地震学的发展，先从弹性理论或材料强度谈起。所研究的是各种物体（尤指固体）在受力作用下的性质，包括形变的过程和在足够大的应力作用下最终发生破裂的过程。伽利略（G.Galileo）是第一位研究这些问题的数学家，在1638年对此作了研究。他研究了一端固定在墙壁的横梁受荷载时

的性质。他发现,随着荷载的增加,横梁围绕一根垂直于它并位于墙平面的轴弯曲。测定这根轴的问题称为伽利略问题。尽管伽利略并没有给出荷载和形变之间的任何数学关系,但他所作的研究在探索弹性理论方面起了先导作用。

在弹性理论的进一步发展两个最重大的事件是,1660年建立了胡克定律,1821年法国科学家纳维尔(C.L.M.H.Navier)把弹性理论中的普通方程公式化。胡克定律规定,物体的形变与外施应力成正比。它确立了弹性的数学理论基础,在对地球内部的研究中也被认为是有用的。至少胡克定律对于地球内部的弹性状态仍可看作是良好的第一近似。弹性学家早期从事研究的主要课题是,发展伽利略问题,研究棒和板的振动、柱的稳定性等。纳维尔首次研究了弹性固体的平衡和振动的普通方程。弹性理论,特别是弹性波在介质中传播的问题几乎在同时引起了两位权威的法国科学家柯西和泊松的关注。通过他们的研究,弹性理论有了发展,使之与光传播问题紧密联系起来。1822年,柯西提出了弹性理论的大部分理论基础,随后又把研究扩展到晶体方面。泊松在研究弹性介质中波的传播时,于1830年左右发现了两种波。在距震源较远处,实际上存在纵波和横波,其波速比为 $\sqrt{3}:1$ 。1849年,斯托克斯(G.H.Stokes)在英国就此作了证实。这是我们第一次发现P波与S波,而现今在地震学中已人人皆知。泊松还研究了固体球的自由径向振动,后来英国的拉姆(H.Lamb)和其他人又对这个问题作了研究。

1845年,斯托克斯观测到,各向同性体对作用应力的弹性阻力可分为对压缩或伸张的阻力和对剪切的阻力(所谓“各向同性”是说弹性与方向无关)。压缩和伸张是由正应力引起的。而剪切则起因于切向应力。斯托克斯为表达这些阻力定了两种参数或弹性模量。这两种参数现被称为压缩模量和刚性模量。

上文已谈到泊松发现的固体弹性体内部通过的纵波和横波。1887年,瑞利(Lord Rayleigh)发现了另外一种弹性波,这种波

沿着物体表面传播，并发现这种波的波速或传播速度低于纵波和横波。在地震学中这些表面波也是人们很熟悉的，称为瑞利波，它以理论发现者瑞利的名字来命名。另一主要的地震面波是勒夫波，它按照英国人勒夫 (A.E.H.Love) 的名字而定名，勒夫波发现于1911年。

德国科学家 A·施米特 (A.Schmidt) 在 1888 年发表了一篇论文，文中探讨了地震波在地球内部的传播。他强调指出，一般来说，地震波速必定随着地球深度而增加，因此波程是曲线而不是直线。曲线的波程对地面来说呈凹形。与此同时，英国的诺特 (C.G.Knott) 研究了反射波和折射波的能量。

在弹性理论发展的早期阶段研究的问题中，两个固体碰撞的问题也值得提一下。早期的弹性研究者把大部分精力集中在基础研究上。他们的研究结果后来对于一些应用分支如工艺学、地震学等具有最重大的意义。我们从上文已知道，今天完全可从地震记录图上见到的几种主要的地震波，是在地震记录还未出现之前早已由数学家们发现了。为了利于追溯，现把直到本世纪初弹性理论发展的要点归纳在表 1 中。

表 1 弹性理论和地震学早期发展史大事记

1638	伽利略 (G.Galileo)	梁的形变 (伽利略问题)
1660	胡克 (R.Hooke)	应力与应变的比例 (胡克定律)
1799	卡文迪什 (H.Cavendish)	地球平均密度的测定
1821	纳维尔 (C.L.M.H.Navier)	弹性的普通方程
1822	柯西 (A.L.Cauchy)	弹性理论的建立
1830	泊松 (S.D.Poisson)	纵波和横波；球的振动
1845	斯托克斯 (G.H.Stokes)	压缩性和切变模量
1860	马利特 (R.Mallet)	全球地震活动图
1874	德·罗西 (M.S.De Rossi)	第一个广泛使用的烈度表
1878	霍尔尼斯 (R.Hoernes)	地震的分类
1880	格雷、米尔恩、尤因 (T.Gray, J.Milne, J.A.Ewing)	研制地震仪
1887	瑞利 (Lord Rayleigh)	瑞利面波
1888	施密特 (A.Schmidt)	地球内部地震波的传播

1897	维谢尔 (E. Wiechert)	铁核假说
1899	诺特 (C.G. Knott)	弹性波的反射与折射
1900	维谢尔 (E. Wiechert)	维谢尔地震仪的研制
1900	蒙特苏斯·德·巴洛尔, 米尔恩 (F. de Montessus de Ballore, J. Milne)	全球地震活动图
1906	奥尔德姆 (R.D. Oldham)	用地震学方法证实铁核假说
1906	伽利津 (B. Galitzin)	研制伽利津地震仪; 应用电磁感应原理
1906	里德 (H.F. Reid)	“弹性回跳理论”——目前仍是构造地震普遍公认的理论
1909	莫霍洛维奇 (A. Mohorovičić)	地壳下部有一明显的不连续面为界限, 称为莫霍洛维奇不连续面
1911	洛夫 (A.E.H. Love)	洛夫型面波
1913	古登堡 (B. Gutenberg)	测出外核深度为2900公里
1922	特纳 (F.J. Turner)	揭示存在深源地震
1928	和达 (K. Wadati)	确定存在深源地震
1935	贝尼奥夫 (H. Benioff)	研制应变地震仪
1935	里克特 (C.F. Richter)	地震震级表
1936	莱曼 (I. Lehmann)	发现内核

第三节 地震的观测

与直到十九世纪末的弹性理论的发展完全无关, 曾出现过大量有关地震效应的文献。至少早在公元前1800年已出现了有关地震的资料, 但那些古老的资料内容一般很贫乏, 而且不符合现代对观测的科学要求。大约在十八世纪中叶, 第一次出现了科学价值较高的有关地震的描述。人们以比较科学的方式研究了1755年11月1日的里斯本地震。1783年意大利卡拉布里亚地震由专门的科学考察机构作了研究。1819年的印度库奇地震是第一次明显观测到断层作用各种效应的地震。对1857年的那不勒斯地震所作的透彻的野外研究, 是人们把物理学原理应用于地震观测的首次尝试。其它作了详细野外调查的较早的地震可推举: 1891年日本美浓一尾张地震, 这次地震发生时, 地面上出现了很大的裂缝; 1906年的旧金山地震 (由此诞生了里德的“弹性回跳理论”, 作为地震

理论沿用至今);以及1923年的关东地震,在这次地震中东京和横浜的大部分房屋被摧毁。第五章中对较大的地震作了总结。

大部分早期有关地震的报告只描述了地震对建筑物、地形等的各种影响。在大多数场合,读者对这种记述应持批判态度。然而,今天的观测者也应同样的批判态度来看待自己的观测。以科学上令人满意的方式来观测地震效应并不是那么简单。人们往往详细地观测和叙述了那些次要效应,而主要效应如断层作用则被忽视了。而断层作用在地震的科学研究中有极大的意义和价值。从工程地震学角度来看,研究与房屋或其它建筑物具体结构有关的各种效应十分重要,而不应简单地限于描述破坏的程度。

1878年,德国的 R·霍尔尼斯提出了对地震的分类,一直使用至今:

1. 塌陷地震,由地球内部洞穴的塌陷所造成。
2. 火山地震。
3. 构造地震。

构造地震的发震原因是地壳的褶皱、山脉的形成等,大体说来起因于固体地球内部的运动。构造地震是全球主要的一种地震。以前过高估计了塌陷地震和火山地震的重要性,其实这两种地震只有局部意义,而且震级往往很小。

从早期的地震观测中知道,在松软、潮湿的地面上,各种效应的表现要比干燥的地面强烈得多,基岩部分振幅最小。这些观测结果后由直接记录作了肯定。早期曾引起人们很大注意的一个问题是柱子倒塌的方向。人们曾经相信,这种方向会给出有关震源方向的重要资料。但我们发现在许多相同的场合,倒塌的方向垂直于震源方向。这显然取决于导致柱子倒塌的波。如系 P 波(纵波),柱子就会按震源的方向倒塌,或以相反的方向倒塌;如系 S 波(横波)使柱子倒塌,倒塌方向垂直于震源方向。但这也可能由于特殊条件而改变。

在地震报告中,地声和地光的观测占了一定的比例。虽然地