

防災工程学中的 地震学

〔日〕笠原庆一著 郑斯华 庄灿涛 译



地震出版社

(京) 新登字 095 号

内 容 提 要

本书是著者前一本著作《地震力学》(中译本已由地震出版社出版)的姊妹篇,本书适应当前地震学与防灾工程学互相渗透、互相结合的研究新潮流,重点阐述了地震学的最新成果及其在防灾工程学中的应用,介绍了构成防灾工程学这一跨学科领域的基本理论和方法,以及相关各学科之间的关系。

本书可供地震学、工程地震学和防灾工程学等方面的科研及教学人员参考。

防灾工学の地震学

[日] 笠原庆一 著

鹿岛出版会

1988

防灾工程学中的地震学

[日] 笠原庆一 著

郑斯华 庄灿涛 译

责任校对: 李 珩

地震出版社 出版

北京民族学院南路9号

中国地质大学轻印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

850×1168 1/32 6.5印张 1插页 174千字

1992年12月第一版 1992年12月第一次印刷

印数 001—700

ISBN 7-5028-0596-6/P·401

(986) 定价: 4.50 元

前 言

从最近的趋势来看，地震学和防灾工程学的相互融合是一种值得注意的倾向。震灾预防本来就是地震学的一个重大课题，但是由于以往过于专业化，出现了两者各自分别发展的倾向。最近这种情况似乎有了很大的变化。例如，工程学家在考虑地震波的输入问题时不再满足于现有的公式，而开始深入考虑震源过程等问题；另一方面，地震学家也通过基础理论的研究提出防灾工程学的问题。使人感到在这一领域中出现了一种新的研究潮流。

这种新动向来自双方的原因。在防灾工程方面，为了建设巨大建筑物和重要设施，十分需要关于地震动的详细知识；另一方面，地震学的进步已可以在一定程度上响应这种要求。也就是说，出现了两个领域之间可以进行有实效的交流的形势。在这种形势下，地震学领域期望着与防灾工程的结合，这必将是一件十分有意义的事。

本书是前一书《地震力学》的姊妹书，是根据著者在理工科研究生院（建筑系）和大学（土木系）讲授的讲义写成的。前书是以在地球科学课程中的讲义为基础，主要是为了阐明地震现象的基础知识；而本书的重点则在于上述基础知识在防灾工程中的应用。但是执笔的方针没有变化，仍然是以阐明基础知识为主，尽可能回避复杂的数学公式。之所以这样做，是希望即使是只想了解本领域概况的读者们也能容易地阅读本书。此外，对于地震现象的说明，虽然原则上由前书来承担，但是也考虑到本书可以作为一本完整的著作能单独地阅读。若感到有不满足之处，请同时阅读前书（正文中所注的“参照前书”也就是这种意思）。

如目录中所列出的那样，第一章描述了地震灾害的梗概，对问题作了初步的分析。第二章写地震观测概论，重点说明强震的观测。在第三章中考察了波动的基本性质，特别是面波、基底和

表层等，也作为学习后面章节的预备知识。第四章简单地阐述了震源过程问题，并增加了自前书出版以来在断层的微观构造方面的最新知识。在第五章中，从复习前书开始，阐述了对于工程来说特别重要的短周期地震波的发生问题。并对最近引起广泛注意的海啸发生的问题进行了讨论。第六章是有关地震的地质学背景问题，这问题在前书中曾作过详细论述。在第七章中展望了地震学在实际防灾工程中的作用，以及地震预知等问题。

在各章中引用了各种地震，日本地震的震级原则上引自理科年表，而外国的地震则分别引自各种调查报告。

在本书的出版过程中，鹿岛出版会的桥义雄先生始终给予了热情的支持。在写作时使用了东京大学地震研究所、早稻田大学理工学研究所以及日本物理探矿株式会社所藏资料。在此对各位的帮助深表谢意。

笠原庆一
于早稻田大学理工学研究所
1988年1月

目 录

第一章 地震灾害	(1)
1.1 地震的理学和地震的工学	(1)
1.2 从统计上看地震灾害	(2)
1.3 地震与震灾(地震灾害的比较论)	(6)
1.3.1 国土情况和灾害的类型	(7)
1.3.2 震灾与震源的关系	(7)
1.3.3 灾害环境	(8)
1.3.4 防灾效果	(10)
1.3.5 灾害的进化——都市灾害	(12)
1.4 作为灾害源的地震	(13)
1.4.1 破坏性	(13)
1.4.2 范围的宽广性	(14)
1.4.3 复合性	(14)
1.4.4 突发性	(14)
1.5 地震灾害的流程图	(14)
1.6 墨西哥地震(1985 年)	(15)
第二章 地震观测	(19)
2.1 地震的频带	(19)
2.2 地震波的信息	(19)
2.3 地震仪和观测系统	(21)
2.3.1 地震观测	(21)
2.3.2 摆的振动特性	(22)
2.3.3 摆的周期特性	(23)
2.3.4 强震仪和强震台网	(24)
2.3.5 地震观测系统	(26)
2.4 震源位置的确定	(27)

2.5 地震的度量	(30)
2.5.1 烈度	(30)
2.5.2 震级	(31)
2.5.3 地震释放的能量	(34)
2.5.4 地震矩	(35)
2.6 波形数据的处理	(36)
2.6.1 地震记录的数据量	(36)
2.6.2 波形和频谱	(37)
2.6.3 滤波和频谱分析	(40)
2.6.4 反应谱	(42)
2.6.5 各种频谱的表示	(45)
2.6.6 频谱分析仪	(45)
第三章 地震波动	(48)
3.1 波与波形	(48)
3.1.1 行进的正弦波	(48)
3.1.2 波形与波谱	(49)
3.1.3 波动的频散	(50)
3.2 弹性形变及其传播	(52)
3.2.1 平面应变	(53)
3.2.2 应变与应力	(55)
3.2.3 弹性波	(57)
3.2.4 地震波的几何光学	(58)
3.3 基底与表层	(59)
3.3.1 S 波的垂直入射	(59)
3.3.2 波在表层中的多次反射	(62)
3.4 面波与地下构造	(64)
3.4.1 勒夫波的性质	(65)
3.4.2 勒夫波的频散	(67)
3.4.3 瑞利波	(68)

3.4.4 地表振动与地下构造	(71)
3.5 地基调查	(75)
3.5.1 地震勘探	(75)
3.5.2 脉动	(76)
3.5.3 钻探与速度测井	(78)
3.5.4 浅层反射法	(80)
3.5.5 其他方法	(81)
第四章 地震震源	(83)
4.1 点震源和发震机制	(83)
4.2 地震的断层模型	(85)
4.2.1 弹性体的位错理论(位错弹性论)	(85)
4.2.2 三维断层模型	(86)
4.3 震源过程和破裂的传播	(91)
4.3.1 破裂传播速度	(92)
4.3.2 地震矩	(94)
4.3.3 震源时间函数	(95)
4.3.4 尺度关系	(98)
4.4 断层面的摩擦和应力	(99)
4.4.1 岩石破裂的力学	(99)
4.4.2 粘滑和凹凸体	(101)
4.4.3 凹凸体模型和障碍体模型	(103)
4.5 第二代断层模型	(106)
第五章 地震动的预测	(108)
5.1 断层周围的地震动	(108)
5.1.1 烈度分布	(108)
5.1.2 地动加速度的最大值	(109)
5.2 断层附近的地震动	(111)
5.3 强震频谱的合成	(115)
5.4 短周期地震动的合成	(117)

5.4.1	短周期地震动的产生	(117)
5.4.2	动力学断层模型	(118)
5.4.3	强震动波形(速度响应)的包络线	(120)
5.4.4	小地震记录的叠加	(124)
5.4.5	弹性论模型	(129)
5.4.6	附带的问题	(132)
5.5	从地震基底到地表	(133)
5.5.1	地震基底	(133)
5.5.2	地基的分类	(134)
5.5.3	不规则的地基构造	(137)
5.6	地震海啸	(139)
5.6.1	地震海啸的发生和传播	(139)
5.6.2	数值模型	(143)
5.6.3	海啸警报	(143)
第六章	地震的地球科学	(145)
6.1	日本列岛的地学环境	(145)
6.2	地震的重复	(149)
6.2.1	地震的轮回	(149)
6.2.2	板间地震和板内地震	(150)
6.3	活断层的评价	(152)
6.3.1	活断层的形态和活动史	(152)
6.3.2	活断层	(156)
6.3.3	活断层一览表	(157)
6.3.4	活断层的探槽调查	(159)
6.3.5	活断层的地下探测	(160)
6.4	历史地震学	(161)
6.5	地震危险度图	(163)
6.5.1	活断层群的处理	(163)
6.5.2	地震危险度图的制作	(164)

第七章 地震防灾与地震学	(167)
7.1 地震防灾计划的基础	(167)
7.1.1 大范围防灾与建筑物的抗震	(167)
7.1.2 地震危险度的评价(由大尺度到小尺度)	(168)
7.1.3 区域地震危险度评价	(168)
7.2 抗震设计中的地震动预测	(175)
7.2.1 抗震规定的地震荷载	(176)
7.2.2 高层建筑技术指南的底面剪切系数	(176)
7.2.3 观测记录信息	(177)
7.2.4 地震动强度预测的经验公式	(177)
7.2.5 模拟地震动	(180)
7.2.6 根据断层模型计算的理论地震图	(182)
7.3 地震预知	(182)
7.3.1 地震是可以预知的吗	(182)
7.3.2 地震预知的实践	(186)
7.3.3 灾害预知与社会反应之间的差距	(189)
7.3.4 双刃的剑	(190)
7.4 综合防灾中的地震预知	(192)
结束语	(193)

第一章 地震灾害

很多民族都有着关于地震的神话和传说。尽管其内容不同，但共同之处都反映了人们对大自然的威胁具有朴素的恐惧和好奇心。他们所具有的原始地震观，经历了古代和中世纪哲学的地震观，至今发展成现代的科学的的地震观。就地震本身的基本点而言，可以说地震之谜暂且已经解决。但是与此相反的是，地震灾害的威胁却在不断地增加。这也许是近代社会发展所必须蒙受的损失。怎样才能减轻这种灾害呢？可以预料防灾工程中的地震学有着重要的作用。

1.1 地震的理学和地震的工学

作为与自然灾害有关的领域，地震研究具有理学和工学两方面的特点。也就是说，一方面要弄清地球和地学现象，另一方面要以此为基础发展防灾技术。这一特点也十分明显地反映在地震学的创立过程中。从 19 世纪后期到本世纪初，创立地震学的有物理学和地质学方面的理学家，也有建筑业和造船业等与振动关系密切的领域里的工程学家。他们都汇聚在地震研究这一共同的领域中，互相协作，奠定了这一新领域的基础。

此后，地震学发展成为一个体系，加强了专业分化。由此，理学和工学虽然都以地震作为研究对象，但是却逐渐地走上了独自发展的道路。这种影响至今仍不能说完全消失，但是从 70 年代以后的趋势来看，两方面的相互交流和合作似乎重新又密切起来。据笔者看，其重要的原因在于震源研究的进步。震源的研究，在地震学中也是特别基础的研究，但是十分有趣的是它成了与工学交流的窗口。

在这种潮流中，可以考虑到理学和工学本身各自的情况。随着城市文明的发展，在越来越多的工程计划和设计中，需要对地

面震动作出精密的预测。不用说大规模的防灾事业，就是为了每一个建筑物的抗震性能，也必须详细地了解地面振动的知识。表 1.1 列出一些巨大建筑物和重要生产设施的振动特性。

表 1.1 特殊建筑物的固有振动周期(基阶振型的情况)

超高层大楼	3—6s
长大悬垂桥	~ 10s
大型油库	3—12s(原油振荡)
原子能发电站	0.1—1s(要求绝对安全)

注：数字是极概略的值。

另一方面，地震学也在某种程度上逐渐地适应这种要求。例如，震源研究的进步致使可以用模拟方法来进行地面震动的预测。最初采用宏观模型，所研究的地震波的周期长达几十秒、几百秒，没有引起工程学方面的关心。但是后来逐渐引起了工程方面的重视。一方面是因为如表 1.1 所示的那样，工程方面也需要考虑相当长周期的地震动，另一方面是因为随着模型的改进，从地震学角度也可以较细致地处理短周期地震波。不管怎样，为了适应地震防灾的高要求，越来越需要加深对地震动性质的了解。理学和工学围绕着地震研究互相结合已经成为明显的趋势，同时正在不断地给双方都带来有益的结果。

1.2 从统计上看地震灾害

首先让我们引用一些统计数字。在我们的脚下每年都要发生多个大小不同的地震。有的年份多些，有的年份少些。如果以 10 年或者 20 年间隔取其平均值，那么日本附近发生的地震所释放的能量每年约为 $2-5 \times 10^{23} \text{erg}$ ①。如果这些能量集中于一个地

① $1 \text{erg} = 10^{-7} \text{J}$ ，下同。

震来释放，则相当于一个震级为 7.5 级的地震。对于全世界来说，平均每年发生的地震所释放的能量则要比此高一个数量级，为 2.5×10^{24} erg，相当于一个 8.3 级地震。如果取两者之比，估计日本地震所释放的能量，大体上占全世界地震释放总能量的 15%。这是一个了不起的数字。日本的国土面积约为 $38 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，即使加上周围的海域，也只有 $100 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，仅仅是地球表面积（约 $5 \times 10^8 \text{ km}^2$ ）的 0.2%。在这么小的地域中发生了占全球能量 15% 的地震，确实应该把日本称之为地震国。顺便提一下，在北美的太平洋沿岸发生地震释放的能量也占 15%，包括上述地区在内的环太平洋带占全世界地震所释放能量的 75%。

地震灾害究竟使我们的社会蒙受了多大的损失呢？首先让我们看一看地震发生的状况。表 1.2 中列出了近年发生的重要地震，并用死亡人数来比较各次地震的灾害程度。表 1.2 的左侧是在日本发生的地震。当然，关东大地震（1923 年， $M=7.9$ ）的灾害是最突出的，死亡者（包括去向不明者）达 14 万，是世界上屈指可数的大灾害。此后，又发生过几次震灾，虽然破坏没有那么大，但也有几千人死亡。特别是战时和战后的 10 年间，蒙受了异常频繁的大地震的袭击。现在认识到，那时正是南海海沟地震带的活动期。从此以后，直到日本海中部地震之前，每次地震的死亡人数都不超过 100 人。但是应该说这与地震发生的状况有很大的关系，事实上地震活动本身并没有发生变化。

在表的右侧列出了世界各国发生的大震及由于震灾造成的令人痛心的死亡数字，死亡人数从数千人直到 10 万人以上。唯一得救的是中国的海城地震（1975 年），据说当时成功地作出了地震预报，挽救了很多人的生命。但是在第二年，同样在中国，发生了死亡 24 万多人的大惨事。由于在唐山（北京以东约 150km）的地下发生了 $M=7.6$ 的地震（中国定 7.8 级——译者注），该市及其附近一带遭受了毁灭性的打击。这是表中所列的最大的破坏。据说这一地

表 1.2 重要地震及其灾害

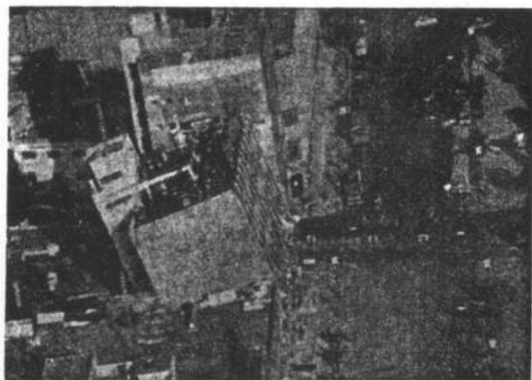
年	地震名/地点	M	死者	备注	年	地震名/地点	M	死者	备注
1923	关东南部	7.9	142807	包括下落不明者	1906	旧金山(美)	8 $\frac{1}{2}$	700	大火灾
1927	(北) 丹后	7.5	2925	海啸	1908	墨西拿(意)	7.5	120000	
1930	北伊豆	7.0	272		1915	阿韦札诺(意)	7	30000	
1933	三陆(昭和)	8.3	3008		1920	甘肃(中)	8.5	180000	
1943	鸟取	7.4	1083	海啸	1932	甘肃(中)	7.6	70000	
1944	东南海	8.0	998	海啸	1935	奎达(巴基斯坦)	7.5	60000	
1945	三河	7.1	1961	海啸	1939	奇廉(智利)	7 $\frac{3}{4}$	30000	
1946	南海	8.1	1330	海啸	1939	埃尔特津(土耳其)	8.0	23000	
1948	福井	7.5	3895	海啸	1949	佩利莱奥(厄瓜多尔)	—	6000	
1952	十胜近海	8.1	28	海啸	1960	阿加迪尔(摩洛哥)	5.9	14000	
1953	房总近海	7.5	0	海啸	1960	智利南部	8.5	5000	海啸, 日本 死亡者 119
1961	北美浓	7.0	8						
1964	新潟	7.5	26	海啸	1962	伊朗北部	7.3	14000	
1968	日向滩(1968)	7.5	0	海啸	1963	斯科普里(南斯拉夫)	6.0	1200	
1968	十胜近海(1968)	7.9	49	海啸	1964	阿拉斯加(美)	8.6	131	
					1968	伊朗	7.4	11600	

续表

年	地震名/地点	M	死者	备注	年	地震名/地点	M	死者	备注
1972	八丈岛东方近海	7.2	0		1970	秘鲁	7.8	6600	损失 5.3 亿美元
1973	根室半岛近海	7.4	0	海啸	1971	圣费尔南多(美)	6.5	65	损失 5.5 亿美元
1974	伊豆半岛近海	6.9	29	海啸	1972	马那瓜(尼加拉瓜)	6.2	5000	
				包括下落不明	1975	海城(中)	7.4	少	预报成功
1978	伊豆大岛近海	7.0	25		1976	危地马拉	7.9	22000	
1978	宫城县近海	7.4	27		1976	弗留利(意)	6.5	965	
1982	浦河冲(昭 57)	7.1	0		1976	唐山(中)	7.6	242000	重伤 164000
1983	日本海中部	7.7	104	海啸	1977	罗马尼亚	7.2	1374	
1984	长野县西部	6.8	29		1978	伊朗	7.8	15000	
					1980	阿尔及利亚	7.7	5000 以上	
					1980	意大利南部	7.2	3000 以上	
					1981	伊朗	7.3	1500	
					1982	也门	6.0	2800	
					1983	土耳其	6.9	1342 以上	
					1985	墨西哥城(墨西哥)	7.1	8000-10000	
					1987	洛杉矶(美)	6.1	6 以上	

注: 日本地震引自理科年表, 外国地震引自 Bolt (1978) 根据 NOAA 资料统计表, 并作了补充。表中伤亡人数包括估计值。

震，事先也警觉到地震可能会发生，但是没能够作出临震预报。这两个在大小、时期和地域上都十分相似的事件的成功和失败，在地震防灾方面给我们留下了很多教训。



照片 1.1 位于革命纪念塔旁倒塌了的卡劳尔旅馆(引自 1985 年墨西哥地震调查报告，鹿岛建设会社)

正如以上数字所反映的那样，在过去的 80 年间，全世界由于地震所造成的死亡人数大致为 80 万人，如果简单地取平均值，那么每年约有 1 万人。假如仅仅从数字上进行比较，交通事故等其他灾害所造成的死亡人数也可能超过这一数字。但是必须考虑到这一数字的背后包含着巨大的损失，很可能使一个国家遭受到突发性的，并且是毁灭性的打击。因此不能不承认，地震对于人类和社会是一种重大的威胁。

1.3 地震与震灾(地震灾害的比较论)

一般都认为大地震等于大震灾。但是如果仔细看一下表 1.2，就会发现问题并不如此简单。 $M=6$ 左右的阿加迪尔地震(摩洛哥，1960 年)和马那瓜地震(尼加拉瓜，1972 年)造成了成千

上万人的丧生,但是阿拉斯加地震(1964年, $M=8.6$)中却只有131人死亡。也就是说,对于震灾大小,除了地震的规模以外,一定还受到各种十分复杂条件的影响。只有在完全同样的条件下,才能是震级越大灾害也越大。

究竟地震所造成的灾害应该包括哪些呢?表1.2中列出了死亡人数,但是又怎样来反映物质的损失呢?震灾是否应该包含波及区的社会和经济的混乱以及后遗症呢?如果这样考虑的话,情况就可能非常复杂,并且涉及到社会科学的问题,这超出了本书的范围。因此,在本书中把地震灾害只理解为直接的灾害,并且只是相对地,甚至是定性地考察某些趋势。

1.3.1 国土情况和灾害的类型

表1.2右侧列出的死亡人数很大,其中大部分都是被压死的。在那些震区,有不少是用土坯建造的房屋,所用的材料又重又不结实,一受到强烈的震动房屋就倒塌,造成了很多人丧生。在那种情况下,火灾并不成为主要的问题。但是日本的灾害就与此不同。在日本虽然也有人被倒塌的房屋压死,但更大的威胁是地震时木造房屋的火灾。在关东大震灾中牺牲的14万人中有90%是在火灾中丧生的。海啸的灾害也是一个明显的特点。日本有着很长的海岸线,并且近海紧靠着地震带,也可以说是命中注定的。在陡坡处的很多内陆地区还不能忽视山崩的危险。由此可见,地震灾害的类型十分明显地反映出国土的情况,所以特别重要的是确切地把握住地震灾害的类型,推进有效的防灾措施。

1.3.2 震灾与震源的关系

首先我们来考察日本地震的情况。图1.1是昭和时代以来,震灾与震源深度、震级的大致关系。受害等级是按照今村明恒的定义定的,其最高级为4度。例如对于震源深度为20km的地震,只有当震级等于或大于7级时才能造成2度的破坏,但是对于很浅的内陆地震,即使震级为6级也可能造成2度的破坏。当然,灾害的内容和规模还与其他很多条件有关,并且随着时代的

变迁也会有所变化，所以在应用上述关系时必须加以注意。

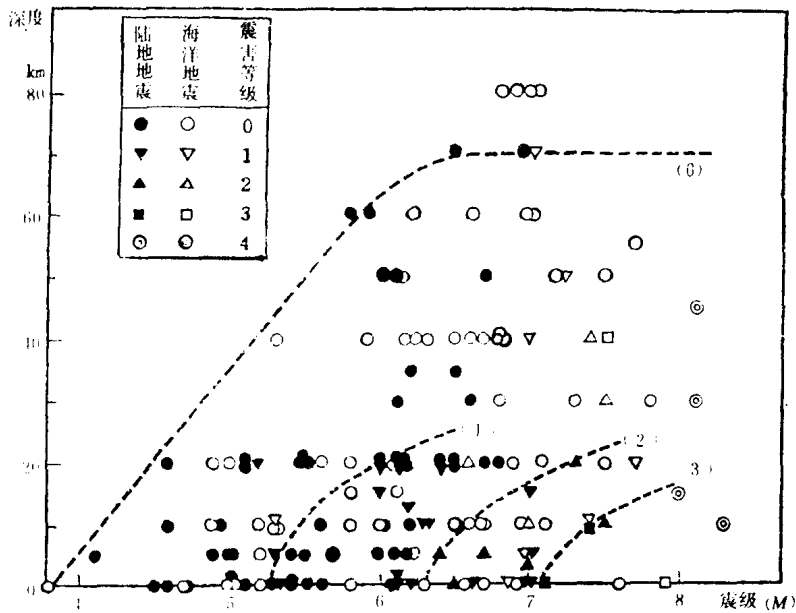


图 1.1 地震震级、深度与震害等级的关系 (引自 1926—1973 年日本破坏性地震, 宇佐美, 1983)

1.3.3 灾害环境

灾害是异常的自然状态给人类社会带来的不利影响。即使发生了大地震, 如果没有造成损失, 那也不成为震灾。阿拉斯加地震 (1964 年) 的震级为 8.6 级, 是历史上震级最大的地震, 与其震级相比, 其损失可以说是相当小的。这就是上述情况的一例。当然也还有不少相反的例子。以下就以东京的情况为例来考察灾害地区的条件对灾害会有影响。

关东地区对地震国日本来说也是有数的地震多发地带。位于