



抗震工程学

Aseismic Engineering

● 沈聚敏

周锡元

高小旺

刘晶波

编著

中国建筑工业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

抗 震 工 程 学

Aseismic Engineering

沈聚敏	周锡元	编著
高小旺	刘晶波	

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

抗震工程学/沈聚敏, 周锡元, 高小旺等编著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2000.12
ISBN 7-112-04474-X

I. 抗… II. ①沈…②周…③高… III. ①抗震结构-结
构设计 ②抗震结构-工程施工 IV. TU352.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 57647 号

我国是一个多地震国家, 海城、唐山等强烈地震给人民的生命财产造成了巨大损失。减轻地震灾害一直是地震工程和工程抗震科技工作者为之奋斗的目标。本书涉及工程抗震学的各个领域。第一篇重点介绍地震地面运动特性、地震动的随机过程描述、地震区划、场地相关抗震设计反应谱及其工程应用等。第二篇集中介绍结构地震反应分析的理论基础和实用方法, 其中包括结构动力学原理、线性和非线性地震反应和结构随机振动分析方法。第三篇为结构抗震设计方法与抗震加固技术, 在该篇中对抗震设计原则进行了比较深入的分析, 对各类结构抗震能力的理论和试验研究成果作了综合性的介绍, 其中包括砌体结构、高层钢筋混凝土结构和高层钢结构等的概念设计、抗震验算和构造措施等。书中对未经抗震设防的砌体结构和钢筋混凝土结构的抗震能力评价和抗震加固方法也作了概括性的介绍。

本书的读者对象为工程抗震科学研究者、土木工程专业研究生、本科生和工程抗震设计人员等。

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

抗 震 工 程 学

Aseismic Engineering

沈聚敏 周锡元 编著
高小旺 刘晶波

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京二二〇七一厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 46 1/4 字数: 1135 千字

2000 年 12 月第一版 2000 年 12 月第一次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 98.00 元

ISBN 7-112-04474-X
TU·3978 (9944)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

我国是一个多地震的国家，海城、唐山等强烈地震给人民的生命财产造成了巨大损失。对于地震灾害，应贯彻预防为主方针，而其中最根本的预防措施为搞好抗震设防，提高工程结构的抗震能力。因此，提高工程技术人员和工程结构专业大学生、研究生的工程抗震理论和实际应用能力，对于搞好工程抗震的科研，提高工程抗震的设计水平和工程质量具有重要的意义。

本书是一本抗震工程学专著，注重理论的系统性和应用的可操作性。作者力图以建筑抗震设计为主线将抗震工程学的主要内容有机地联系起来，并自成系统，使读者对抗震工程学的学科体系、理论方法和主要内容有清晰和深入的了解，并可在此基础上从事有关的科学研究和工程实践活动。本书编写期间正值建筑抗震设计规范修订，部分作者还是修订组的主要成员，也就很自然地有关的修订内容纳入书中，这对于读者学习和掌握新规范的内容也是很有帮助的。

以往涉及抗震工程的书籍可分为两类：一类为地震工程理论，主要讲述地震学原理、地震发生模型及其影响、结构地震反应、抗震分析方法、设计和工程实践方面的内容涉及较少；另一类为结构抗震设计，如砌体结构抗震设计、单层厂房以及高层建筑抗震设计等。本书在一定程度上弥补了两者之间的空缺，将地震和地面运动、结构地震反应、结构抗震设计理论、原则、结构损伤评估与抗震加固、结构模型试验技术有机地结合起来，促进抗震工程的研究和应用。

本书涉及了国内外工程抗震学科重点研究的几个方面：结构随机振动分析，主要是结构非线性随机地震反应分析；地震作用下材料与构件性态的控制；抗震设计原则和各类结构抗震性能评价以及隔震与减震等。本书力图把工程抗震理论与工程应用方面的研究成果和实际经验结合起来，以便于理解和应用。希望有助于提高工程抗震科研和设计的理论水平，为进一步搞好工程抗震的科学研究、提高工程抗震能力和减轻地震灾害做出贡献。

本书的写作框架和大纲由沈聚敏教授提出。第1~4章由周锡元执笔，第5~7章和第11章由刘晶波执笔，第8章、第14章、第19~21章和第23、24章由高小旺执笔，第10章、第12、13章和第25章由沈聚敏执笔，第15~17章由沈聚敏和高小旺共同完成，第22章由聂建国执笔，第18章由张晋勋执笔，第9章由王巍执笔。本书由周锡元、高小旺定稿。张美丽为整理、抄写沈聚敏的书稿花费了大量的劳动，肖伟、王菁、王金妹、孟钢、周晓夫为本书的一些算例和一些插图等做了大量工作。

作者虽然长期从事工程抗震科研工作，但限于水平和知识面的局限性难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

目 录

第一篇 强震地强运动和设计反应谱

第 1 章 地震与地震区划

1.1 地震成因与地震类型	1
1.2 地震波与地震观测	3
1.3 震源、震级和震中	7
1.4 地震宏观破坏现象与震害	7
1.5 地震烈度与震害指数	8
1.6 烈度衰减规律	15
1.7 场地因素对烈度的影响	16
1.8 中国的地震与地震区划	19

第 2 章 地震动的随机过程描述

2.1 强震地面运动的一维概率分布	26
2.2 非平稳随机过程的二维联合概率分布和相关特性	29
2.3 平稳和平稳化随机过程的统计特征	31
2.4 谱密度及其与自相关函数的关系	33
2.5 互相关矩阵与互谱密度矩阵	38
2.6 谱参数及其物理意义	39
2.7 平稳过程的最大值分布	40
2.8 条件概率分布及其应用	45
2.9 地震动的随机过程模型	47

第 3 章 强震地面运动的一般特征和反应谱

3.1 单质点体系的地震反应	49
3.2 地震反应谱	53
3.3 地震傅里叶谱	58
3.4 强地震运动的一般特征和影响因素	60
3.5 弹塑性反应谱及其应用	62

第4章 地震动参数和设计反应谱

4.1 地震动参数衰减规律	68
4.2 抗震设计反应谱	74
4.3 场地分类方法及其在抗震设计规范中的应用	76
4.4 设计地震的选择	82
4.5 强震地面运动的模拟	84

第二篇 结构地震反应分析

第5章 多自由度体系的线性反应分析

5.1 集中质量法	87
5.2 有限单元法	87
5.3 广义坐标法	89
5.4 时域分析方法	90
5.5 频域分析方法	94
5.6 振型叠加法与反应谱理论	97

第6章 具有分布参数体系的线性分析

6.1 具有均匀分布质量的剪切梁	106
6.2 具有非均匀分布质量的剪切梁	112
6.3 具有分布质量的弯曲梁	116
6.4 三维波动方程	119
6.5 体波	120
6.6 面波	124
6.7 波的反射与折射	128

第7章 实用振动分析

7.1 概述	132
7.2 基本模态的迭代方法	132
7.3 高阶模态的迭代方法	134
7.4 Rayleigh 法	138
7.5 Rayleigh-Ritz 法	139
7.6 Dunkerley 法	141

第8章 线性结构随机振动分析

8.1 随机过程的定义和数学描述	143
8.2 单自由度线性体系的随机激励反应	151

8.3	多自由度线性体系对平稳随机激励的反应	156
8.4	随机影响的门槛交叉及峰值分布问题	158

第9章 结构非线性地震反应分析

9.1	恢复力模型	164
9.2	非线性问题的数值解法	178
9.3	非平衡力及拐点的处理	185
9.4	串联多自由度体系	185
9.5	平面框架和框架剪力墙体系	187
9.6	高层建筑偏心支撑钢框架	189
9.7	多维地震动下的框架结构	193
9.8	结构倒塌反应分析	195

第10章 结构物的弹塑性随机响应分析

10.1	概述	199
10.2	弹塑性恢复力的傅里叶积分描述	200
10.3	Fokker-Planck 方法	209
10.4	等价线性化方法	214
10.5	剪弯型多自由度系统非线性随机响应分析	219

第11章 土—结构相互作用

11.1	基本概念和研究方法	227
11.2	透射边界	232
11.3	地震波输入	242
11.4	土—结构相互作用分析的一种直接法	252

第12章 周期反复荷载作用下钢筋混凝土材料及构件的性能

12.1	钢材	263
12.2	混凝土的变形	266
12.3	约束混凝土	270
12.4	钢筋的粘结和锚固	275
12.5	钢筋混凝土构件的极限变形与延性	282
12.6	约束构件的延性比	287
12.7	钢筋混凝土柱滞回曲线	289
12.8	由钢筋粘结滑移产生的附加变形	293

第三章 结构抗震设计与抗震加固

第13章 抗震设计原则

13.1 设防标准与抗震设计目标	297
13.2 抗震概念设计的一般原则	301
13.3 规则结构与不规则结构	310
13.4 抗震设计的一般要求	314

第14章 地震作用和结构抗震验算

14.1 结构自振周期的工程算法	322
14.2 水平地震作用计算的反应谱方法	326
14.3 竖向地震作用的简化计算方法	339
14.4 截面抗震验算	342
14.5 结构抗震变形验算	352

第15章 钢筋混凝土框架结构

15.1 钢筋混凝土框架房屋的震害	370
15.2 钢筋混凝土框架结构的抗震性能	371
15.3 抗震设计的基本要求	375
15.4 钢筋混凝土框架结构的抗震验算	381
15.5 钢筋混凝土框架结构的抗震构造措施	389
15.6 计算例题	392

第16章 钢筋混凝土抗震墙结构

16.1 钢筋混凝土抗震墙结构的抗震性能	415
16.2 高层钢筋混凝土抗震墙结构和钢筋混凝土框架-抗震墙结构房屋的震害	418
16.3 钢筋混凝土抗震墙房屋的结构布置	419
16.4 钢筋混凝土抗震墙结构的内力计算	421
16.5 截面抗震验算	426
16.6 抗震墙结构的抗震构造措施	431
16.7 底部大空间剪力墙结构的抗震设计	437
16.8 计算例题	443

第17章 钢筋混凝土框架-抗震墙结构

17.1 钢筋混凝土框架-抗震墙结构的受力特点	452
17.2 抗震设计的基本要求	453
17.3 框架-抗震墙结构的内力分析	456

17.4	框架-抗震墙结构中框架的剪力调整	463
17.5	框架-抗震墙结构的截面承载力计算和抗震构造措施	464
17.6	计算例题	465

第 18 章 钢筋混凝土筒体结构

18.1	概述	477
18.2	一般构造要求	478
18.3	近似抗震分析	480
18.4	筒体结构的弹塑性地震反应分析	481

第 19 章 多层砌体房屋

19.1	砌体房屋的抗震性能	483
19.2	砖砌体房屋的震害	486
19.3	多层砌体房屋抗震设计的基本要求	488
19.4	地震作用计算和截面抗震验算	492
19.5	主要抗震构造措施	496
19.6	抗震设计实例	503

第 20 章 底部框架抗震墙砖房

20.1	底层框架砖房的震害特点	519
20.2	底部框架抗震墙砖房的抗震性能	520
20.3	底部框架抗震墙砖房抗震设计的基本要求	532
20.4	地震作用计算和抗震验算	536
20.5	底层框架抗震墙砖房的底层框架梁和底部两层框架抗震墙砖房 第 2 层框架梁承担竖向荷载的合理取值	542
20.6	底部框架抗震墙砖房的主要构造措施	546
20.7	抗震设计实例	548

第 21 章 高层钢结构房屋

21.1	概述	559
21.2	钢结构构件的性能	560
21.3	高层建筑钢结构的结构体系	562
21.4	高层钢结构房屋的适用高度和结构布置	566
21.5	地震作用计算和抗震验算	567
21.6	高层钢结构梁柱节点设计的改进	573

第 22 章 钢-混凝土组合结构

22.1	概述	578
22.2	钢-混凝土组合结构的特点	578

22.3	钢-混凝土组合结构的适用范围	579
22.4	应用前景	579
22.5	钢-混凝土组合梁	579
22.6	钢-混凝土组合梁设计	583
22.7	组合梁截面抗剪	587
22.8	剪力连接件设计	587
22.9	钢-混凝土组合梁正常使用极限状态的验算	591
22.10	构造要求	593
22.11	工程应用实例	594

第 23 章 现有建筑的抗震鉴定

23.1	概述	598
23.2	抗震鉴定的基本要求	599
23.3	现有建筑结构的检测	603
23.4	多层砌体房屋抗震鉴定	608
23.5	多层钢筋混凝土框架房屋抗震鉴定	624

第 24 章 现有建筑的抗震加固技术

24.1	建筑抗震加固技术的研究	633
24.2	现有建筑抗震加固的基本要求	634
24.3	多层砖房抗震加固技术	637
24.4	钢筋混凝土房屋抗震加固技术	643

第 25 章 结构抗震试验

25.1	概述	649
25.2	结构模型设计与相似条件	650
25.3	反复荷载下结构的静力试验	659
25.4	结构拟动力试验	675
25.5	结构模型的振动台模拟地震试验	696
25.6	原型结构物的现场动力试验	716

第一篇 强震地面运动和设计反应谱

第1章 地震与地震区划

1.1 地震成因与地震类型

地震是我们栖居的星球——地球上的自然现象，它与地球本身的构造，尤其是它的表面结构，密切相关。

地球的半径约 6400km，简单地可分地壳、地幔、地核三部分。前二者平均厚度分别约为 30~40km 与 2850km，半径约 3500km 之内为地核部分。这三者的重力密度分别为 $27\sim30\text{N/cm}^3$ ， $33\sim55\text{N/cm}^3$ 与 $97\sim123\text{N/cm}^3$ ，平均重力密度约为 55N/cm^3 ，地球内部的温度是随距地表面深度增加而递增的，深度每增加 1 公里温度约升高 30°C ，但增长率随深度增加而减小。经推算，在地下 20km 深处的温度约为 600°C ，100km 处约为 $1000\sim1500^\circ\text{C}$ ；700km 处约为 2000°C ，地球内部的压力也是随距地表面的深度增加而增加的，有资料表明，地幔外部的压力约为 90kN/cm^2 （相当于 9t/cm^2 ），地核外部的压力约为 14000kN/cm^2 ，地核中的压力约为 37000kN/cm^2 。这些差别必将引起地壳的局部变形，变形积累到一定程度，将引出突变——爆发地震，一般表现三种类型的突变。

第一种突变：已有许多科学论据表明，全球地壳由六大板块组成，即欧亚大陆、太平洋、美洲大陆、非洲大陆、印澳与南极板块。各大板块内还可以划分为较小的板块。由于地壳的缓慢变形，各板块之间发生顶撞、插入等突变，形成地壳的振动，此即构造地震之一，它都发生在各板块的边缘或沿海的岛屿。我国的台湾岛和日本都位于大板块的交界处，所以是多地震的地区。

第二种突变：由于地球内外层构造的巨大差异，地区之间也有很大差别，板块内部也产生不均匀的应变，首先在地质构造不均匀处或薄弱处发生地层的错动或崩裂而形成地震。这是另一种构造地震。

这二种地震是最主要的，占地震总数中的绝大多数，释放的能量影响范围也很广。第一种地震主要发生在大陆的边缘，有很多是发生在大洋或海底，这种地震的破坏影响比起第二种地震要小。而后者多发生在大陆内部，通常称为板内地震，分布面比较广，不确定性大，虽然发生的概率较低，但有时其强度很大，如果发生在人口密集的大城市及其周边地区，其破坏性极大。如 1976 年的唐山大地震，在几十秒钟时间内，将一座用了近百年时间才建设起来的工业城市几乎夷为平地。

第三种突变：某些地壳薄弱点，发生火山喷射，也能造成地震，即所谓的火山地震。

这就是第三种构造地震。以上三种地震均是由于地壳的缓慢变化，能量积累到一定程度引起的破坏性地震。第三种地震相对于前两者来说，其能量与影响均要小很多。

第四种是塌陷地震：它的成因不外乎二种，一是由于岩层受地下水的侵袭形成溶洞；二是由古旧砂坑，当它们大到一定程度，将形成局部地层塌落，造成地面震动。如 1954 至 1985 年间在四川省自贡市发生多次地震，它的能量较小，震源浅，波及范围也小。此外还有爆炸地震和水库地震等。下面主要介绍一下构造地震的发生与发展过程。

地壳是由各种岩层构成的，大量事实说明，地壳是在很长的地质年代中连续地变动着，广大地区或在上升，或在下沉，或在倾斜。由于地球在它作用下使原始水平状态的岩层（图 1.1.1）发生形变，当着作用力只能使岩层产生弯曲而没有丧失其连续完整时，岩层只发生褶皱（图 1.1.2b）；但当岩层脆弱部分岩石强度承受不了强大力的作用时，岩层便产生了断裂和错动（断层，图 1.1.2c）。在这种地壳岩层构造状态的改变（称为构造变动）过程中，地壳岩层处在复杂的地应力作用状态之下，随着地壳运动的不断变化，地应力的作用逐渐加强，构造变动也随之加剧，当地应力的作用超过某处岩层的强度极限而发生突然的断裂和猛烈的错动时就会引起振动，它以弹性波的形式传到地面，地面也随之运动，这就是地震。地震使得构造运动过程中积累起来的应变得到释放，地震波只是地震能量的一小部分，大部分变为热能。关于地震成因还有其他一些学说，但在地壳或地幔上部岩层由于力的作用达到极限时，岩石发生破裂引起地震这一点上是基本一致的。

那么引起地壳构造变动的巨大作用力是如何产生的呢？一般认为这可能有地球内部物质中的放射性元素在蜕变过程中释放的热能，天体，特别是太阳和月亮对地球的引力以

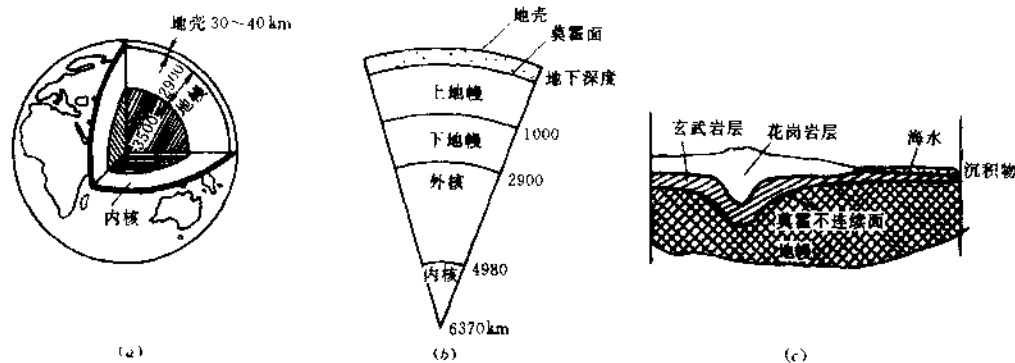


图 1.1.1 地球内部的分层构造
(a) 地球断面；(b) 分层结构；(c) 地壳剖面

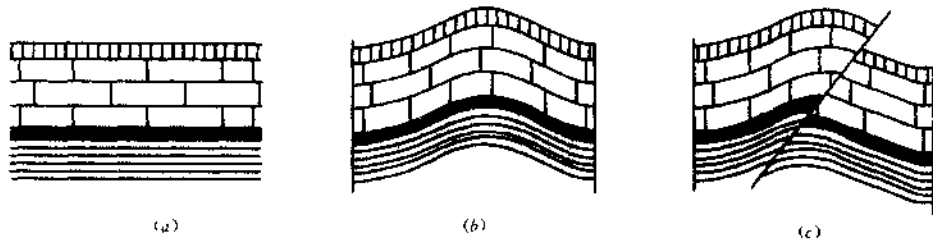


图 1.1.2 构造地震形成示意图
(a) 岩层原始状态；(b) 受力后发生变形；(c) 岩层断裂产生震动

及地球自转过程中产生的回转能等所引起的。

从上面已经知道，地震的发生与地质构造密切相关，那么哪些部位比较易于产生地震呢？一般说来，许多地震都集中发生在活动性大断裂带的两端和拐弯的部位、两条活动断裂的交汇处，以及现代断裂差异运动变化剧烈的大型隆起的和凹陷的转换地带。这些地方是地应力比较集中、构造比较脆弱的地段，往往易于发生强烈地震。

以上是关于地震类型和构造地震成因及其与地质构造关系的简单介绍，更详细的叙述可参考文献 [1]、[2]、[3]。

1.2 地震波与地震观测

地震引起的振动以波的形式从震源向各个方向传播，这就是地震波，地震波可以看作是一种弹性波，它主要包含可以通过地球本体的两种“体波”和只限于在地面附近传播的两种“面波”。下面分别介绍体波和面波的一些主要特性。关于地震波的更详细的介绍参见 6.4~6.7 节中的叙述

1.2.1 体波

体波包括“纵波”与“横波”两种类型：

纵波是由震源向外传递的胀缩波，质点的振动方向与波的前进方向一致，在空气里纵波就是声波，一般表现出周期短、振幅小；横波是由震源向外传递的剪切波，质点的振动方向与波的前进方向相垂直，一般表现为周期较长、振幅较大（见图 1.2.1），应指出，横波只能在固体里传播，而纵波在固体、液体里都能传播。

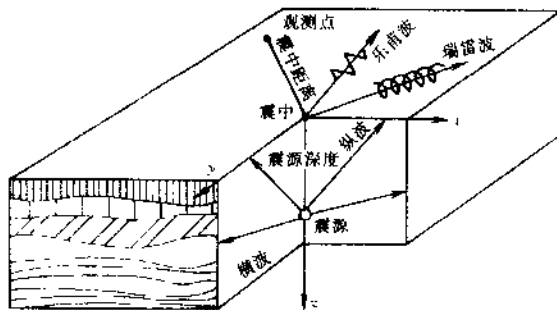


图 1.2.1 震源、震中示意图

纵波与横波的传播速度可分别用下列公式计算：

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1.2.1)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.2.2)$$

式中 V_P 是纵波速度； V_S 是横波速度； E 是介质的弹性模量； ρ 是介质的密度； ν 是介质的泊松比，随介质不同而有一定幅度的变化，在一般情况下，当 $\nu=0.22$ 时，

$$V_P = 1.67 V_S \quad (1.2.3)$$

由此可知，纵波比横波的传播速度要快，在仪器观测到的记录图上，纵波要先于横波到达。因此，通常也把纵波叫“P波”（即初波），把横波叫“S波”（即次波），体波在地球内部的传播速度随深度增加而增大，如图 1.2.2 所示，表 1.2.1 给出了 S 波在一些介质中的传播速度值。

S 波的传播速度 (m/s)

表 1.2.1

砂	人工填土	砂质粘土	粘土	含砂砾石	饱和砂土	砾石	第三纪岩层
60	100	100~200	250	300~400	340	600	1000 以上

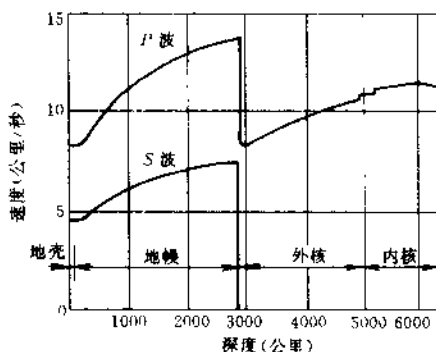


图 1.2.2 体波在地球内传播速度的变化

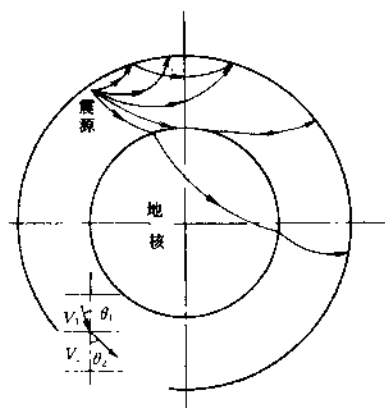


图 1.2.3 地震波射线的途径

由于地球是层状构造, 因此体波通过分层介质, 在界面上将产生折射; 若波的射线由震源出发时与垂直方向的夹角是 θ_1 , 波速是 V_1 , 折射后的夹角是 θ_2 , 波速是 V_2 (图 1.2.3), 则有下列关系:

$$\frac{V_1}{\sin \theta_1} = \frac{V_2}{\sin \theta_2} \quad (1.2.4)$$

由于速度一般是随着深度增加增大的, 即 $V_2 > V_1$, 故由 (1.2.4) 式可知, 射线要逐渐向水平方向弯曲, 直到速度增大到 $V_2 = V_1 / \sin \theta_1$ 时射线弯到了水平方向, 然后, 射线还可以继续往上弯, 直到地面 (图 1.2.3)。一般接近地表, 由于土层变软地震波传播速度变慢, 由 (1.2.4) 式可知在地表附近地震波的进程近于铅直方向, 因此在地表面, 对纵波 (P 波) 感觉上是上下动, 而对横波 (S 波) 感觉是水平动。

当地震波遇到一个界面, 不但产生折射而且还发生反射; 当一个 P 波入射到一个界面时, 不但产生折射和反射的 P 波而且还发生折射和反射 S 波, 同样当 S 波入射到一个边界时也是如此, 此外由震源发出的振动首先通过岩层传到基岩表面 (此间 S 波速度变化不大), 然后, 基岩表面的振动再经基岩以上的地层传到地表面, 在此过程中由于重复反射, 地表面的振动常常得到放大。

1.2.2 面波

面波只限于沿着地球表面传播, 一般可以说是体波经地层界面多次反射形成的次生波, 它包含瑞雷波和乐甫波两种类型。

瑞雷波传播时, 质点在波的传播方向和自由面 (即地表面) 法向组成的平面内 (图 1.2.4 中的 xz 平面)

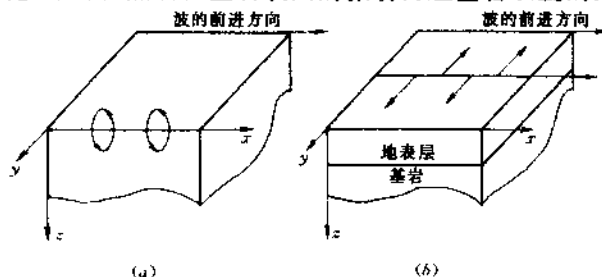


图 1.2.4 面波质点振动示意图

(a) 瑞雷波质点振动; (b) 乐甫波质点振动

作椭圆运动，而与该平面垂直的水平方向（ y 方向）没有振动，它在地面上呈滚动形式（图 1.2.1）。

乐甫波只是在与传播方向相垂直的水平方向（图 1.2.4b）运动，即地面水平运动或者说在地面上呈蛇形运动形式（图 1.2.1）。

瑞雷波的传播速度（ V_R ）比 S 波稍微慢一点，它们的比值

$$K_1 = \frac{V_R}{V_S} \quad (1.2.5)$$

与介质的泊松比有关，可按下式确定，

$$\frac{1}{8}K_1^6 - K_1^4 + \frac{2}{1-\nu}K_1^2 - \frac{1}{1-\nu} = 0 \quad (1.2.6)$$

当 $\nu = 0.22$ 的情况下， $K_1 = 0.914$ ，即

$$V_R = 0.914 V_S \quad (1.2.7)$$

乐甫波在层状介质中的传播速度介于最上层横波速度及最下层横波速度之间。

瑞雷波是由靠近震源出射的 P 波和 S 波而产生的，但震中附近并不发生瑞雷波，其发生的范围是在

$$\frac{V_R}{\sqrt{V_P^2 - V_R^2}} h \text{ (P 波)} \quad (1.2.8)$$

$$\frac{V_R}{\sqrt{V_S^2 - V_R^2}} h \text{ (S 波)} \quad (1.2.9)$$

以远的地区（式中 h 是震源深度）。当 $\nu = 0.22$ 时，这个范围是 $0.65h$ 和 $2.25h$ 。

综上所述，地震波的传播以纵波最快，横波次之，面波最慢。所以在地震记录图上，纵波最先到达，横波到达较迟，面波在体波之后到达（图 1.2.5）。当横波或面波到达时地面振动才趋于猛烈。一般认为地震动在地表面引起的破坏力主要是 S 波和面波的水平 and 竖向振动。

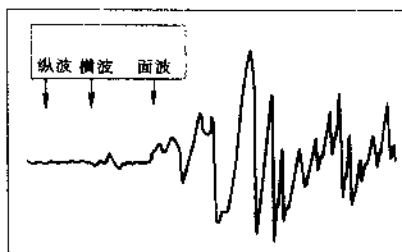


图 1.2.5 地震波记录图

1.2.3 地震观测

观测记录地震动的仪器叫做地震仪。早在公元 132 年（东汉时），我国古代科学家张衡首先创造了世界上第一台地震仪——张衡地动仪，安置在当时的京城洛阳。6 年后甘肃发生了一次地震，地动仪正西方向的龙吐出一珠，使张衡首先知道正西方向发生地震，开创了人类用仪器记录地震的先河^[4]。近代的地震仪发端于 18 世纪 80 年代，一般包括拾振器（传感器），放大器和记录装置三个系统。拾振器通常是一个具有一定周期和阻尼的单自由度振动子，选择适当的参数再配备积分和微分装置后可以记录位移，速度和加速度。地震仪通常以观测弱震位移和速度为主。传统的地震仪主要采用模拟记录，各个台站独立进行记录，但可按统一时标进行分析。进入 80 年代以后才发展了由不同频带的记录仪器组成的多点记录、有线和无线传输的数字化地震台网^[5]。我国的数字地震台网（CDSN）中采用了短周期（SP）、宽频带（BB）、长周期（LP）和甚长周期（VLP）等 4 种仪器相互配合，实现了宽频带、可控增益的数字化记录，从而大大提高了观测精度和测报

能力。

1.2.4 强震观测

我国的强震观测开始于 60 年代, 主要目的是记录强震地面运动加速度, 作为抗震设计的依据^[6]。早期的强震仪是动圈式加速度计, 机械触发, 只具有相对时标的光记录仪器, 其代表性型号是哈尔滨工程力学研究研制的多道强震仪, 在 1975 年海城和 1976 年唐山地震中记录到若干中强地震记录, 其中以 1976 年 11 月 15 日宁河 6.9 级地震中在天津医院得到的加速度记录最为著名, 通常被称为天津波, 这是一个在很厚的软土地地上的记录。进入 80 年代以后我国的强震仪已从单一的多道光记录发展到多种光记录, 模拟磁带和数字磁带记录^[7], 其主要技术性能见表 1.2.2。其中 GQ-Ⅲ是工力所研制的直接光记录式强震仪, 具有使用维护方便, 成本低, 环境适应性较强的特点。模拟磁带记录强震仪 GQ-Ⅳ由加速度计和回放装置两部组成。记录仪采用脉冲调宽技术, 动态范围 50dB 以上, 具有绝对时标。上海同济大学研制的 CQZ-1 型强震仪也具有类似的性能。

SCQ-1 型强震仪是数字磁带记录的三分量加速计, 由以下三部分组成 (1) WJL-1 型微功耗力平衡伺服加速度计, (2) 数字磁带记录装置, 具有绝对时码, 预存储器, 动态范围 102dB, (3) 回放装置。SCQ-1 型强震仪的特点是: 抗干扰能力强, 触发装置可靠, 适用范围广。有关该仪器回放和数据处理方法见文献^[8]。

国内新型强震加速度计的主要性能

表 1.2.2

性 能	GQI	GQII A	GQ Ⅲ	GQ-ⅢA	GQ Ⅳ	SCQ-1	GLXQJ-1A
记录通道	9	10	3	3	3	3	3
传感器类型	动圈式	动圈式	光机械式	伺服式	伺服式	伺服式	伺服式
频带 (Hz)	0.25 ~ 50	0.5 ~ 50	0 ~ 20, 0 ~ 28	0 ~ 20	0.1 ~ 50	0 ~ 50 (0 ~ 25)	0 ~ 50
满量程	可调 (6 档)	可调 (6 档)	1g, 0.5g	1g, 0.5g	1g	2g	2g
触发器型式	机/电阈值	电阈值	电阈值	电阈值	电阈值	模拟 STA/LTA _n	多制式
记录方式	电流计记录	电流计记录	直接光记录	直接光记录	脉冲调宽	数字	数字
记录介质	190mm 胶卷	200mm 相纸	80mm 电胶卷	80mm 电胶卷	盒式磁带	盒式, 四轨	CMOS SRAM
动态范围		有 2 档自动衰减	34dB	34 dB	50dB	102dB	90dB
起动延迟 (ms)	< 100	< 200	< 100	< 50	< 200		0
记录时间	10min (10m 胶卷)	6min (20m 胶卷)	14min (10m 胶卷)	15min (10m 胶卷)	15min	22min	40min
时 标	5 个/s	10 个/s	2 个/s	2 个/s	编码钟	编码钟, 5×10^{-7}	GPS 或编码钟
等待耗电	200 μ A		150 μ A	150/500 μ A	(3×10^{-5})	< 40mA	< 3W
迹线宽度 (mm)	0.4	1	0.3	0.3			
电 源	± 8.4 VDC	12.5VDC	± 6.25 VDC	± 6.25 VDC	± 15 VDC	± 12 VDC	2×6 V, 12A11
使用温度	-10 ~ 40℃		-10 ~ 40℃	-10 ~ 40℃	-10 ~ 40℃	0 ~ 40℃	-20 ~ + 50℃
每道预存						16k (5.12s)	250sps (0 ~ 40s)
采样率						100/200	62.5 ~ 500

90年代哈尔滨工程力学研究所研究生产了GXQJ-1A固态存储地震动强度记录仪是一个三分量数字强震仪。仪器输入幅度为 $\pm 2.5V$ (最大 $\pm 2g$)。动态范围90dB,自动触发,带预存储装置,存储时间40s,采样率62.5sps、125sps、250sps和500sps可调,可配备同放装置RS232,并在现场或用调制解调器(MODEM)遥控使用。由于采用RAM模块存储,信号不易丢失,其信能明显优于盒式数字磁带记录仪器,该仪器的监控程序使用全汉字菜单,可在DOS和WINDOWS95以上版本的软件环境下使用。

1.3 震源、震级和震中

地震是地壳中板块发生顶撞、错动、断裂等产生的振动,产生这种振动的地点称震源。随其发震地点的深度又可分为浅震(震源深度 $h < 70km$)和中深震($70 < h < 700km$)。强烈地震的能量大大超过最大的人造振动——原子弹爆炸。后者能对一个城市的地面建筑造成严重破坏,前者不仅对一个城市的地上地下产生毁灭性破坏,对周围地区也具有很大的破坏力。例如唐山地震时,对将近100km的天津市的地上设施产生了严重的破坏,地下也引起许多地基失效、喷砂、冒水等现象;对150km之外的北京市也产生了许多破坏。震源在地表面上的垂直投影称为震中。

地震学家通常用震级这一名词来衡量地震的大小或规模,它与地震产生破坏力的能量有关。震级标度(单位)通常应用美国地震学家里克特(C.F.Richter)提出的以下计算公式:

$$M = \lg A(\Delta) - \lg A_0(\Delta) \quad (1.3.1)$$

式中 A ——为待定震级的地震记录的最大振幅;

A_0 ——为标准地震在同一震中距上的最大振幅。

$-\lg A_0(\Delta)$ 是震中距的函数,亦即零级地震在不同震中距的振幅对数值,称作起算函数,或标定函数。对不同的测定区域可以列出随震中距变化的 $[-\lg A_0(\Delta)]$ 数值表。里克特规定:用标准地震仪(伍德——安德森扭摆式地震仪,放大倍率为2800倍),在震中距(Δ)为100km处,记录最大振幅的地动位移(A_0)为 $10^{-3}mm$ (μm)时相应的震级为零。

一次地震释放的能量(E)与震级的关系可用以下公式来表达:

$$\lg E = 1.5M + 11.8 \quad (1.3.2)$$

上式表明,震级增加一级,地震波的振幅值增加10倍,地震所释放出的能量约增加30倍。震级标度给人们的一般概念是:4级以下地震为有感地震,5、6级地震将造成一定的破坏,7级以上地震将造成严重破坏。这个概念不很确切,事实上除震级以外震源深度对地面上的破坏也将产生重要影响。

如上所述,震级与震源处在地震过程中释放的能量有关。就对地面上造成的破坏而言,相同震级的地震,随震源的深度不同将有较大的差别,随着距震中(针对震源的地面称震中)的远近更有明显的差别。地震学家将地面上的破坏程度用烈度来表达。一次地震的震级只有一个,地面上的烈度则是因地而异的,一般都有若干个。关于烈度及其随震级和震中距的变化规律将在1.6中讨论。

1.4 地震宏观破坏现象与震害

地震发生时及发生后,将引起人们有震动的感觉、自然和人工环境的变化,通常称之