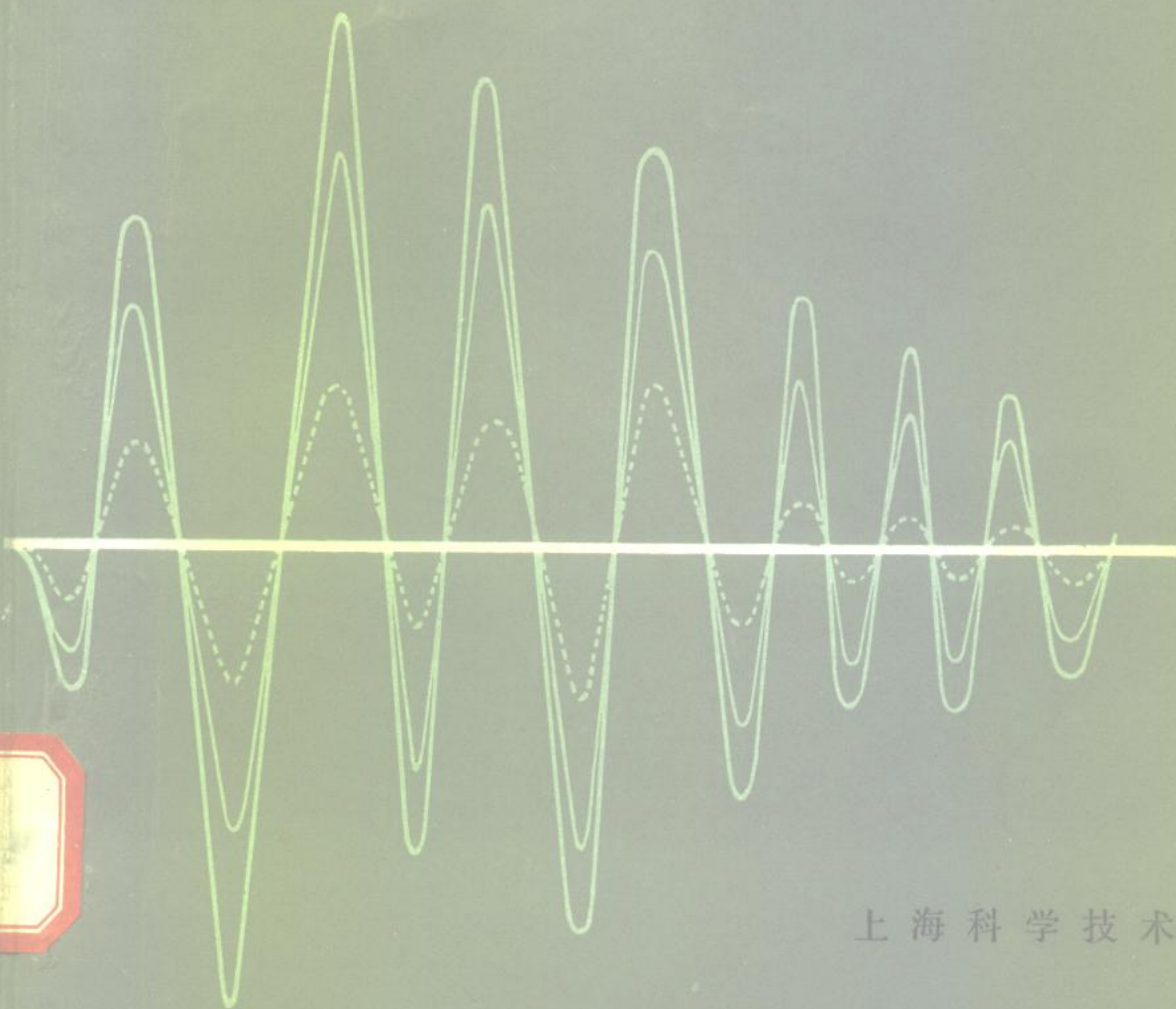


# 工程结构 抗震设计原理

朱伯龙 屠成松 许哲明 等编著



上海科学技术出版社

TU352.1

200

# 工程结构抗震设计原理

朱伯龙 屠成松 许哲明

等编著

上海科学技术出版社

## 内 容 提 要

本书主要论述工程的抗震动力学和结构抗震设计原理。全书共分十章。第一章介绍地震成因及特性。第二、三、四章分别介绍单自由度和多自由度的结构抗震动力学。第五章论述弹性地震反应、反应谱理论及地震荷载。第六章论述非线性地震反应分析。第七、八、九章结合多层混合结构房屋、单层钢筋混凝土厂房以及多层钢筋混凝土房屋介绍设计方法、构造要求和讨论一些设计问题。最后一章论述烟囱结构抗震设计及分析。

本书可作高等学校的土建专业工程抗震课程的教学用书和从事工程抗震设计、研究人员的参考书。

本书由同济大学朱伯龙、屠成松、许哲明、张琨联、曲则生、沈勤斋、李鸿源等同志编著。

### 工程结构抗震设计原理

朱伯龙 屠成松 许哲明  
等编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海市印刷三厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 13.5 字数 319,000

1982 年 5 月第 1 版 1982 年 5 月第 1 次印刷

印数 1—10,200

统一书号: 15119·2180 定价: (科五) 1.40 元

## 前 言

中国是多地震的国家之一,1976年唐山丰南地区的大地震造成了人民生命财产重大损失。1976年以来我国地震区抗震城市的建设和地震工程的科学研究,在党和政府的领导下取得了很大成绩。事实证明,搞好工程抗震需要一支不断提高其专业水平的科学技术队伍。

有鉴于此,我们结合自己的专业在教学和科学研究的基础上编写了本书,供高等学校教学使用和设计、科研人员参考。为提高和普及工程结构抗震设计原理尽我们的一点力量。

在编著过程中,考虑到以下几点:

1. 本书分为十章,可选择其中部分或大部分内容供高等学校已学过或未学过矩阵结构动力学的学生作为教学用书。

2. 本书除结合规范条文以便实用外,比较注意非线性地震反应方面的内容。因此,除第六章专门讨论非线性地震反应外,在第七、八、九三章还结合非线性地震反应讨论了与设计有关的问题。

3. 本书以房屋为主要对象,但也包括了部分特种结构如烟囱等。

参加本书工作的除曲则生、沈勤斋、李鸿源三同志编写第一章和第九、十两章的前三节外,其余七章以及第九、十两章的第四节是由屠成松、许哲明、张琨联和笔者编著的。在全书初稿完成后,曲则生同志曾在文字上对全书作了校阅。定稿时,许哲明同志又校订了第二至第六章;屠成松同志又校订了第七至九章。此外在编著过程中,俞载道同志审阅过第五章初稿,潘士劼同志提供了他与部分编著者合作的计算程序并协助计算。第六章的部分例题使用了陈建信同志参加编制的计算程序,特此一并致谢。

地震工程的研究发展很快,我们从事抗震教学与科研工作为时尚短,业务水平有限,书中必有误漏之处,敬希各方面的同行和读者批评指正。

朱 伯 龙

1981年4月

# 目 录

第一章 地震与抗震概论 .....	1
§ 1-1 我国地震学和抗震历史的简单回顾 .....	1
§ 1-2 地震的初步知识 .....	2
§ 1-3 地震分布 .....	11
§ 1-4 地震灾害 .....	13
§ 1-5 工程结构抗震设计的一般原则 .....	16
第二章 单自由度体系的振动 .....	18
§ 2-1 概述 .....	18
§ 2-2 单自由度无阻尼自由振动 .....	20
§ 2-3 单自由度有阻尼自由振动 .....	24
§ 2-4 单自由度无阻尼受迫振动 .....	26
§ 2-5 单自由度有阻尼受迫振动 .....	29
第三章 两个自由度弹性体系的自由振动 .....	32
§ 3-1 两个自由度体系的自振频率计算 .....	33
§ 3-2 振型分析及主振型的特性 .....	41
§ 3-3 对称性的利用 .....	46
第四章 多自由度体系的自由振动 .....	49
§ 4-1 多自由度体系的自振频率及其振型分析 .....	49
§ 4-2 主振型的正交性 .....	76
§ 4-3 自振频率及其主振型的实用算法 .....	79
第五章 单自由度及多自由度弹性体系的地震反应及地震荷载 .....	98
§ 5-1 单自由度体系的弹性地震反应 .....	98
§ 5-2 单自由度体系地震荷载的计算 .....	105
§ 5-3 多自由度弹性体系的弹性地震反应 .....	108
§ 5-4 多自由度体系地震荷载的计算及内力组合 .....	120
§ 5-5 竖向地震荷载 .....	121
§ 5-6 地震荷载与其他荷载的组合原则 .....	121
第六章 结构的非弹性地震反应 .....	122
§ 6-1 钢筋混凝土构件的恢复力模型 .....	123
§ 6-2 按层间剪切模型计算框架非弹性地震反应 .....	125
§ 6-3 按杆系模型计算框架非弹性地震反应 .....	130
§ 6-4 多层框架考虑轴力作用的效应 .....	133
第七章 多层混合结构房屋的抗震设计 .....	140
§ 7-1 震害及其分析 .....	141
§ 7-2 多层混合结构房屋的抗震计算 .....	142
§ 7-3 多层混合结构房屋的抗震构造措施 .....	147
§ 7-4 多层混合结构房屋抗震设计问题的讨论 .....	153

<b>第八章 单层钢筋混凝土厂房抗震设计</b> .....	156
§ 8-1 震害及其分析 .....	156
§ 8-2 单层钢筋混凝土厂房的抗震计算 .....	157
§ 8-3 单层钢筋混凝土厂房的抗震构造措施 .....	167
§ 8-4 单层钢筋混凝土厂房抗震设计问题的讨论 .....	170
<b>第九章 钢筋混凝土多层房屋的抗震设计</b> .....	173
§ 9-1 震害及其分析 .....	173
§ 9-2 钢筋混凝土多层房屋的抗震计算 .....	175
§ 9-3 钢筋混凝土多层房屋的抗震构造措施 .....	184
§ 9-4 多层框架房屋抗震设计问题的讨论 .....	188
附录 9-1 多层房屋的基本自振周期 .....	191
附录 9-2 关于框架梁、柱与剪力墙刚度的取值 .....	193
<b>第十章 烟囱的抗震计算</b> .....	195
§ 10-1 震害及其分析 .....	195
§ 10-2 烟囱的抗震计算 .....	196
§ 10-3 烟囱的抗震构造要点 .....	204
§ 10-4 烟囱的弹性地震反应 .....	205
附录 10-1 烟囱自振周期的其他简化计算方法 .....	208

# 第一章 地震与抗震概论

地震是地壳运动在某些阶段发生急剧变化时的一种自然现象，它往往给人类社会造成不同程度的伤亡事故和经济损失。抗震就是和地震这种自然灾害进行斗争。为了更有效地进行斗争，建筑工程技术人员就有必要对地震有一定的了解。为此，在学习建筑物和构筑物本身的动力性能和抗震设计之前，先扼要地了解一点关于地震和抗震的基本知识是很必要的。

## § 1-1 我国地震学和抗震历史的简单回顾

远在 3000 多年以前，我国就有关于地震的记载。《竹书纪年》记载：“夏帝发七年（公元前 1831 年——注）泰山震。”又据《吕氏春秋》记载：“周文王立国八年（公元前 1177 年——注），岁六月，文王寝疾五日，而地动东西南北不出国郊。”除了一般记载之外，还有较早的关于地震这一自然现象的宏观描述。在《诗经·小雅·十月之交》中，对公元前 1177 年这次地震做了如下的描述：“烨烨震电，不宁不令。百川沸腾，山冢萃崩。高岸为谷，深谷为陵。”既描述了震前的地光、地声，又描述了地震造成地貌的改变。

在公元 132 年，河南南阳人张衡（公元 78~139 年）创制候风地动仪，这是世界上第一架观测地震的仪器（图 1-1），比西方同类型仪器的发明早 1300 多年。《后汉书选》记载：“阳嘉元年（公元 132 年——注），复造候风地动仪。以精铜铸成，圆径八尺，合盖隆起，形似酒尊，饰以篆文龟鸟兽之形。中有都柱，旁形八道，施关发机，外有八龙，首衔铜丸，下有蟾蜍，张口承之。其牙机巧制，皆隐在尊中，覆盖周密无际。如有地动，尊则振龙，机发吐丸，而蟾蜍衔之。振声激扬，伺者因此知觉。虽一龙发机而七首不动，寻其方向，乃知震之所在。验之以事，合契若神。”可见那时已知利用惯性原理、水平摆等量测地动，对地震的传播和方向性也有一定了解。

至明、清两代，地方志流行，关于地震的记载就更为丰富，对地震灾害的描述也较为详

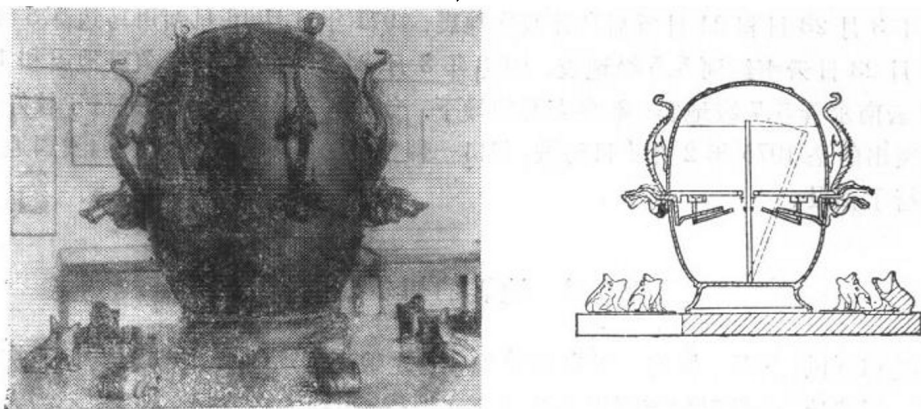


图 1-1 张衡的候风地动仪复制模型

细。这些都是我们研究工程抗震时很有用的资料。

我国劳动人民在与地震自然灾害作斗争的长期过程中,积累了不少抗震经验,并提出了一些抗震措施。如公元605~617年落成的著名的赵州桥(图1-2),它是工匠李春创造的,至今已经1300



图 1-2 赵州桥

多年了。赵州桥地处多地震地区,桥建成以来,虽经受过多次地震,犹基本上保持原状。1966年邢台发生7.2级地震时,震中离桥位不到40km,赵州桥再次经受住了地震的考验。

台湾省是我国地震最多、最强烈的一个省。该地古代兴建的城墙,有的是用竹、木等材料筑成的,古书上有这样的记载:“以台地沙土浮松,不时地动,故以树为城。”可见以竹、木筑城是劳动人民采取的一种抗震措施。又如在云南省农村,居民多采用荆条、木筋等材料编墙,既经济又抗震。

我国古代劳动人民的这些实践,充分表现对于测震和抗震基本原理的早期认识。可是,由于2000多年封建社会的统治,劳动人民的发明创造得不到支持和发展。在旧中国,对关系到广大人民群众生命财产安全的地震自然灾害,反动统治阶级除乘灾打劫、横征暴敛外,对于抗震措施则根本不闻不问。解放前,全国只有一个地震台和三、五个地震工作人员,根本谈不上有地震预报。震灾发生后,灾民的遭遇更是惨不忍睹。1920年宁夏海原发生8.5级大地震,死亡约20余万人,根据一些历史资料记载和调查访问,绝大多数灾民都是在震后,由于没有得到及时抢救和治疗而病死、饿死和冻死的。有关记述1668年山东郯城一次大地震的《地震歌》中曾写有:“……先时自谓灾方过,谁知灾后病还来。恨不当时同日死,于今病死有谁哀!”这正是对万恶旧社会里反动统治政权的强烈控诉!

解放后,党中央、毛主席多次指示加强地震测报和抗震工作的研究;周总理提出了“在党的一元化领导下,以预防为主,专群结合,土洋结合,依靠广大群众,做好预测预防工作”的方针,从而取得了一定的成绩,展现了我国地震科学的发展道路。全国各地普遍建立了地震工作专业队伍,设置了观测站和群众测报点,初步形成了群测群防监视预报网,在社会主义革命和建设中发挥了积极的作用。例如,1970年11月8日四川马尔康县木朗5.5级地震,1971年3月23日和24日新疆乌什两次地震,1971年8月16日四川马边5.8级地震,1972年1月23日云南红河5.5级地震,1973年3月24日四川甘孜5.7级地震和1974年6月15日云南永善5.7级地震,都在党的领导下,专群结合,土洋结合,进行了较好的震前预报。最突出的是1975年2月4日海城、营口一带发生的7.3级地震,震前我国地震队伍成功地进行了预报。

## § 1-2 地震的初步知识

地震是和刮风、下雨一样的一种自然现象。它是地壳运动的一种表现,与地质构造有密切的关系。据统计,全世界每年要发生数百万次地震,但绝大多数是小地震,不为人们所感觉;至于能造成破坏性灾害的地震则为数很少,平均每年只有十多次。



### 一、地球的构造

为了初步了解地震的发生和地震发展的规律,就要大致对地球的构造有个了解。

地球是一个很大的实心扁球体,它的平均半径约为 6400 km。地球内部如图 1-3 所示,大致可分为三个同心圆层。地壳是地球最表面的一层,平均厚度为 30 km。地壳下面约 2900 km 厚的一层叫做地幔;最里面的那部分叫做地核,其半径约为 3470 km。

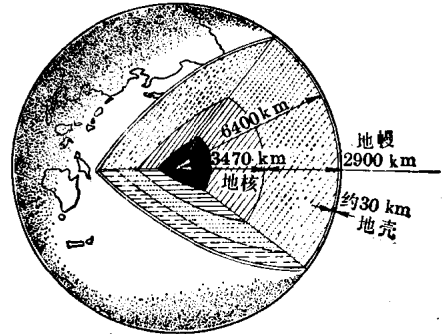


图 1-3 地球构造示意图

地壳由各种不均匀的岩石组成,它的厚度也不是均匀的,高山或高原处厚度可达 60 km,而在深海底只有 5~8 km,世界上绝大多数的地震都发生在地壳这一层内。

地幔主要由质地非常坚硬、比重较大的黑色橄榄岩组成。由于这一部分压力大(地幔上部的压力约为 9 千个大气压)、温度高(按照地热增温率计算,地面以下 30 km 处就可达 1000°C),因此一般推测地幔的地质可能具有粘弹性。

地壳与地幔的分界面称之为莫霍诺维奇间断面(简称莫霍面),它是一个地震波传播速度急剧变化的不连续面。

据推测,地核主要由铁、镍等物质组成,那里的压力大于 300 万个大气压力,温度高达 4000~5000°C。根据地震波传播的分析,在 2900 km 以下,物质的物理性质发生了变化,由刚性变为塑性,由固体变为液体。图 1-4 中见到的,当深度超过 2900 km 时,剪切(S)波消失,就是这种分析的例证。

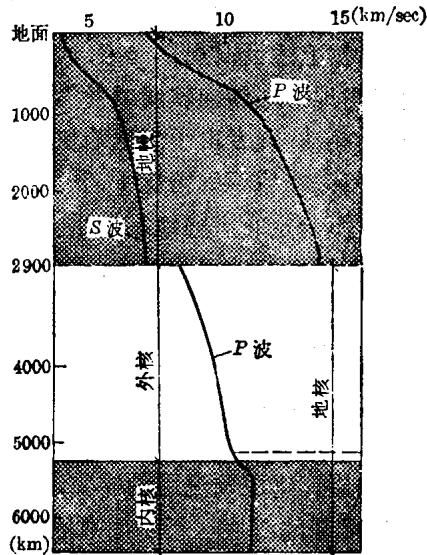


图 1-4 地震波在地球内传播速度的变化

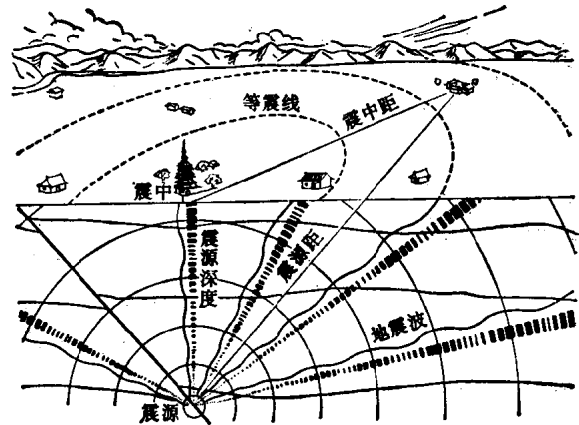


图 1-5 几个常用地震术语示意图

### 二、常用的几个术语

图 1-5 为几个常用地震术语的示意。

在地层构造运动中,由于发生比较剧烈的破坏性变动,并从这里释放出大量的能量,从而引起地震的这个区域叫做震源。

震源在地面上的投影就是震中。震中与震源之间的距离叫做震源深度。建筑物与震中的距离叫做震中距。建筑物与震源的距离叫做震源距。震中附近震动最剧烈的，一般也就是破坏最严重的地区，叫做极震区。

在地面上，把震级相同的地区以线连起来，这条线就叫等震线。

### 三、地震成因和类型

地震按其产生的原因，主要的可分为三种基本类型，即构造地震，火山地震和坍塌地震。除此以外还有水库地震、注水地震、抽水地震、爆炸激发的地震和山崩引起的地震等。其中以构造地震发生的次数最多（为世界地震总数的90%），造成的危害最大，为此下面只介绍构造地震的成因。

地震又可按震源的深浅分类：浅源地震（震源深度在几 km 到 60 km，简称浅震）；中源地震（震源深度大于 60 km，小于 300 km）；深源地震（震源深度大于 300 km）。我国发生的地震，绝大多数是浅震，震源深度在 10~20 km 左右。中源地震主要分布在台湾省东部沿海、西藏雅鲁藏布江以南地区和新疆帕米尔附近，其震源深度在 100~200 km 之间。深源地震集中分布在黑龙江、吉林两省交界处的牡丹江-延吉-线以东地区，震源深度在 400~600 km 之间。目前世界上观测到的地震中，其最大震源深度是 720 km。

地震是地壳运动的一种表现，也就是在现代构造上运动剧烈地带所发生的破坏活动。我国著名的地质学家李四光同志认为“……地震之所以发生，可以肯定是由于地下岩层，在一定部位，突然破裂。岩层之所以破裂又必然有一股力量（机械的力量）在那里不断加强，直到超过了岩石在那里的对抗强度，而那股力量的加强，又必然有个积累的过程，问题就在这里。逐渐强化的那股地应力，可以按上述情况积累起来，通过破裂引起地震；也可以由于当地岩层结构软弱或者沿着已经存在的断裂，产生相应的蠕动；或者由于当地地块产生大面积、小幅度的升降或平移。在后两种情况下，积累的能量，可能逐渐释放了，那就不一定有有感地震发生。”地应力积累并达到使岩层破裂而引起地震的过程，可简示如图 1-6。

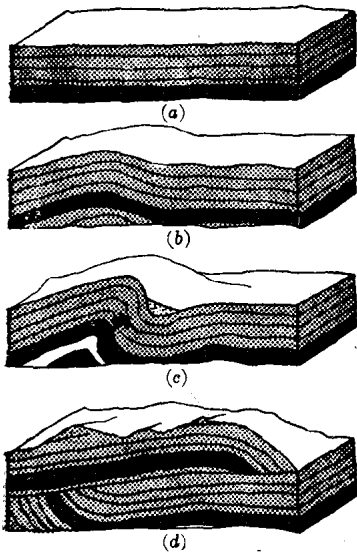


图 1-6 构造变动形成地震示意图

对于地应力的产生有很多种学说，在有关著作中均可见到。这里简要介绍一下板块构造说。其大意是这样：地球的最上层是由强度较大的岩石组成，叫做岩石层，厚度约为 70~100 km。其下为强度较低并带有塑性的软流层。组成软流层的物质，由于对流运动，从海底的破裂带（海岭处）喷出来，向两边流去，造成新的海底。新海底则把旧海底推开去。据观测，太平洋海底有一块厚约为 70 km 的板块，以每年约 10 cm 的速度向日本列岛方向移动，并在日本海沟向日本列岛下方潜入，这样就等于对日本列岛下的地壳和地幔加上一个作用力，使岩石产生变形，达到一定限度就产生破坏，即发生地震。板块构造学说认为地球表面是由几个大板块组成的。图 1-7 是世界板块示意图。各板块由于地幔对流运动而相互地运动着，它们之间的作用力，有的是张力，有的是压力，有的是剪切力。地球上的主要地震带就发生在这些大板块的交界地区。板块构造学说的提出，有助于解释许多以前所不

能解释的现象。板块构造学说的提出，有助于解释许多以前所不能解释的现象。

能解释的现象,如深源地震的断层成因。板块构造学说是一个新提出不久的学说,还存在一些缺点,需要长期考验和加以修正。

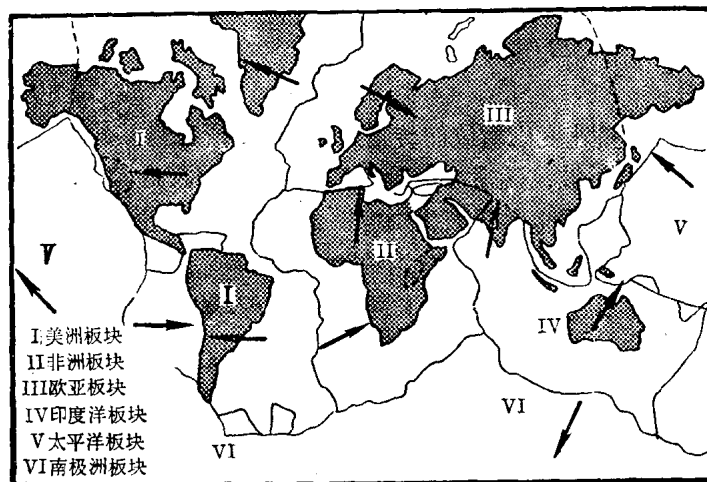


图 1-7 地球板块划分示意图

#### 四、地震波

在地球内部由于构造运动,当在某一部位所积蓄的能量达到一定限度时就在这个部位产生构造上的急剧变化。由于断裂处的地壳或地幔的物质具有相当的刚性,所以在发生断裂或错动时,就以弹性波的形式释放能量。这种波称为地震波。

由于地震波是弹性波,因此它具有两种形式的波:即疏密波(图 1-8a)和剪切波(图 1-8b)。由于这两种波都是从震源在地球体内向四面八方传播开去的,所以总称之为体波。

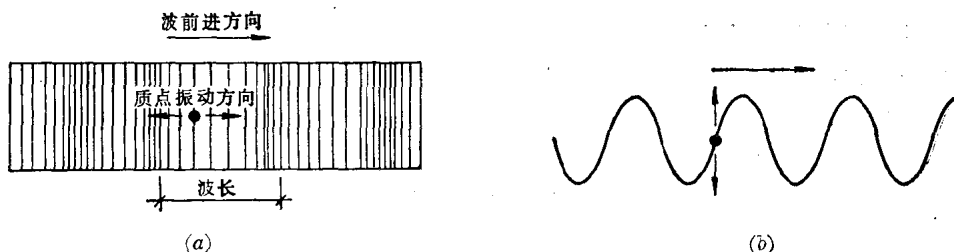


图 1-8 弹性波传递示意图

(a) 疏密波; (b) 剪切波

疏密波由于在其传递过程中介质质点的振动方向与波的前进方向一致,因此也称做纵波。如在空气中传播的声波就是一种纵波。纵波的周期较短,振幅较小。剪切波传递时使介质质点产生与波前进方向成垂直的振动,因此也称做横波。横波的周期较长,振幅较大。

根据弹性理论,纵波和横波的速度在理论上可分别按下式计算

$$\text{纵波速度 } V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1-1)$$

$$\text{横波速度 } V_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1-2)$$

式中  $E$ ——介质的弹性模量;

- $G$ ——介质的剪切模量;
- $\rho$ ——介质的密度;
- $\nu$ ——介质的泊松比。

在一般情况下,当  $\nu=0.22$  时

$$V_P = 1.67V_S \quad (1-3)$$

由此可知,纵波的传播速度比横波的传播速度为快,所以当某地发生地震时,在地震仪上首先记录到的地震波是纵波,随后才记录到横波(这两种波是体波,其后则是只在弹性体表面传播的面波)。为此,通常也称纵波为“初波”或“P波”;称横波为“次波”或“S波”。

在地表面附近的地层内,  $V_P$  和  $V_S$  分别约为  $5\text{km/sec}$  和  $3\text{km/sec}$  而在地表面的洪积层和冲积层中则地震波的速度大为减低,  $V_P$  约为  $100\sim 200\text{m/sec}$ ,  $V_S$  约为  $70\sim 100\text{m/sec}$  左右。

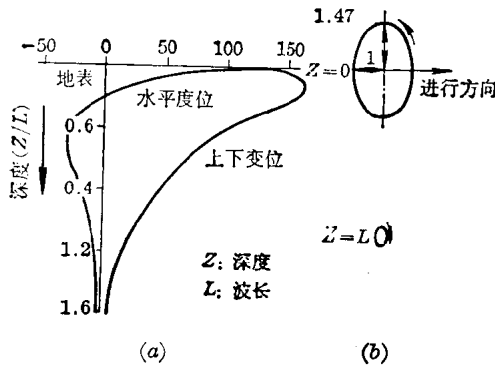


图 1-9 瑞雷波随深度变化的示意图

一般认为面波是体波经地层界面多次反射所形成的次生波。其中主要的两种是:瑞雷波和乐甫波。

瑞雷波传播时使质点在与地面成垂直的平面内做与波前进方向相反的椭圆轨道运动,椭圆的长轴垂直地面,如图 1-9(b) 当泊松比为  $0.25$  时,长轴与短轴之比为  $1.47$ ,瑞雷波的传播速度  $V_R = 0.92V_S$ 。从图 1-9(a) 可见,瑞雷波具有随深度增加而振幅急剧减小的特性。这可能就是在地震时地下建筑物比地上建筑物受害较轻的一种原因。

乐甫波传播时使质点在地平面内产生与波前进方向相垂直的运动。它的传播速度介于上层横波和下层横波速度之间。

一般地说,面波的周期比体波的周期长,在距震中近的地方,面波成分较少,随震中距离的增加,面波的成分也增加。在有些情况下,面波对地面建筑的破坏也是很显著的。

综上所述,地震波的传播速度由于波的类型不同而各异,其中  $P$  波最快,  $S$  波次之,面波最慢,图 1-10 为地震波记录示意图。

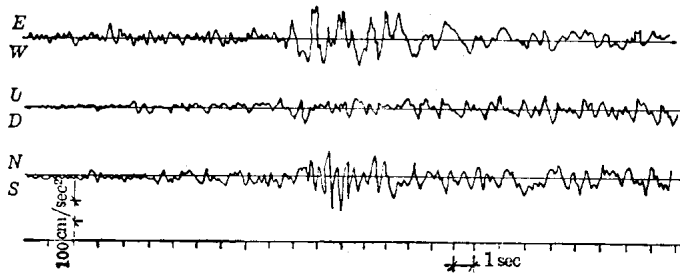


图 1-10 地震波记录示意图

$P$  波使建筑物产生上下颠簸,  $S$  波使建筑物产生水平方向的摇动,而面波则使建筑物既产生上下颠簸又产生水平摇动,一般是在  $S$  波和面波都到达时振动最为剧烈。过去多认为主要是  $S$  波使建筑物产生破坏,但在震后的宏观考查中发现,由  $P$  波所造成的破坏也是不容忽视的。

地震波也具有光波的某些性质。如从一种介质进入另一种介质时产生折射和反射的现象。但不同的是,在一个不连续的界面上,一种入射  $P$  波可反射、折射产生四种波( $P_1$ 、 $S_1$  及  $P_2$ 、 $S_2$ ),如图 1-11 所示。这些波之间的关系如下式

$$\frac{\sin \theta_{P1}}{V_{P1}} = \frac{\sin \theta_{S1}}{V_{S1}} = \frac{\sin \theta_{P2}}{V_{P2}} = \frac{\sin \theta_{S2}}{V_{S2}} \quad (1-4)$$

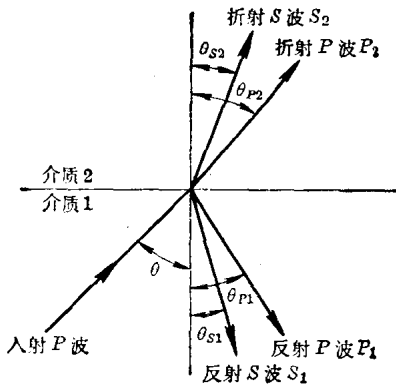


图 1-11 地震波的反射和折射

式中  $\theta$ ——P 波入射角;  
 $\theta_{P1}$ ——P 波反射角;  
 $\theta_{S1}$ ——S 波反射角;  
 $\theta_{P2}$ ——P 波折射角;  
 $\theta_{S2}$ ——S 波折射角;  
 $V_{P1}$ ——P<sub>1</sub> 波的速度;  
 $V_{S1}$ ——S<sub>1</sub> 波的速度;  
 $V_{P2}$ ——P<sub>2</sub> 波的速度;  
 $V_{S2}$ ——S<sub>2</sub> 波的速度。

另外,地震波还具有从一种介质进入另一种介质时,振幅发生变化的性质。弹性理论计算的结果表明:当从硬土层进入软土层时,地震波的振幅被增大;相反,当从软土层进入硬土层时,则振幅被减小。增大与减小的数量与振动阻抗比  $\alpha$  有关

$$\alpha = \frac{\rho_2 V_2}{\rho_1 V_1} \quad (1-5)$$

式中  $\rho_1, \rho_2$ ——分别为相邻两土层(如图 1-12)的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  
 $V_1, V_2$ ——为相应的 S 波速度 ( $\text{cm}/\text{sec}$ )。

例如当地震波从某硬土层进入软土层,设  $\alpha = \frac{1}{4}$  时,折射波的振幅是入射波振幅的 1.6 倍,如果反过来地震波从软土层进入硬土层,则因  $\alpha = 4$ ,所以折射波的振幅是入射波振幅的 0.4 倍,即被缩小了百分之六十。

## 五、震级

震级是衡量一次地震大小的尺度。

震级的原始定义是:在离震中 100 km 处由伍德-安德生 (Wood-Anderson) 式标准地震仪(摆的自振周期为 0.8 sec, 阻尼为 0.8, 放大倍数为 2800 倍)所记录到的最大水平位移(单振幅,单位为微米,即  $10^{-3} \text{mm}$ )的常用对数值。震级  $M$  可用公式表述如下

$$M = \log A \quad (1-6)$$

式中  $A$  即是上述标准地震仪在距震中 100 km 处记录到的最大振幅。例如,在距震中 100 km 处标准地震仪记录到的最大振幅  $A = 100 \text{mm} = 100000 \mu$ , 则  $M = \log A = \log 10^5 = 5$ , 即这次地震为 5 级。因为这个震级的定义是 1935 年里希特 (C. F. Richter) 所给出的, 故称之为里氏震级。

但由于地震发生时不可能正好在 100 km 处记录, 以及所使用的仪器不尽相同, 需要根据震中距和使用的仪器对实测的震级进行适当的修正。

国际上一般远震用面波定震级, 近震用体波。我国地震部门为统一起见, 规定全用面波定震级上报。

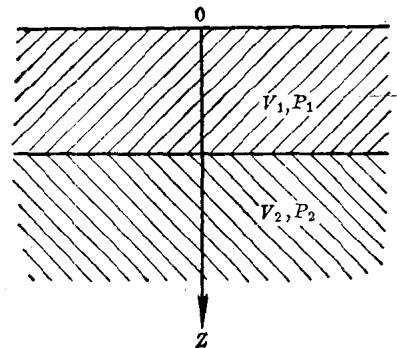


图 1-12 不同土层示意图

震级的大小直接与震源释放的能量大小有关。震级  $M$  与地震释放能量  $E$  (erg) 之间有如下的关系

$$\log E = 11.8 + 1.5M \quad (1-7)$$

根据式(1-7), 将各级地震所释放的能量列出如表 1-1, 从表中可见震级差一级, 能量就要差 32 倍之多。一个 6 级地震所释放的能量, 相当于一个 2 万吨级的原子弹。

表 1-1 震级及其相应的能量

震 级	能 量 (erg)	震 级	能 量 (erg)
1	$2.00 \times 10^{13}$	6	$6.31 \times 10^{20}$
2	$6.31 \times 10^{14}$	7	$2.00 \times 10^{22}$
3	$2.00 \times 10^{16}$	8	$6.31 \times 10^{23}$
4	$6.31 \times 10^{17}$	8.5	$3.55 \times 10^{24}$
5	$2.00 \times 10^{19}$	8.9	$1.41 \times 10^{25}$

根据震级可将地震划分为: 微震(2 级以下者, 人一般感觉不到, 只有仪器才能记录到), 有感地震(2~4 级), 破坏地震(5 级以上), 强烈地震(7 级以上)。我国 1974 年 2 月 4 日发生的海城地震, 震级为 7.2 级, 就是强烈地震。

## 六、地震烈度

地震烈度是以一次地震对该地区的一些有代表性的建筑物造成或可能造成的破坏程度来衡量地震强弱程度的指标。

一般说来, 地面上的烈度与震中距成反比, 即距震中愈远烈度愈低。

到目前为止, 地震烈度仍然是把地震破坏能力与一般性的工程抗震联系起来的一条纽带。

### (一) 地震烈度表

地震烈度表是评定烈度大小的标准和尺度, 它是以描述震害的宏观现象为主的。

我国目前采用的是 1957 年公布的《新的中国地震烈度表》。此表是中国科学院地球物理研究所根据我国地震调查的经验、建筑特点和地震历史资料, 并参照国外的烈度表编制的。该表对最有实际意义的烈度(5 度~10 度)作了较详细的描述, 易于掌握, 并采用世界上多数国家采用的 12 度分度法, 便于与国际上烈度表进行对照, 所以比较切合我国实际情况。但不足之处是对比较现代化的建筑物、构筑物(如多层砖混结构、内框架房屋、单层钢筋混凝土厂房以及多层钢筋混凝土框架房屋等)的破坏情况描述不够, 而且也多数国家采用的烈度表一样, 未能提供具有工程意义的定量标准。这也是地震工程设计部门向地震地质部门提出的一个迫切需要解决的课题。

目前, 国际上常见的地震烈度表有加拿大和拉丁美洲各国所采用的《修订的麦卡里(Mercalli)烈度表(MM 表)》; 苏联采用的《苏联地球物理研究所烈度表》; 日本采用的《日本气象厅烈度表(JMA 表)》; 以及企图逐步统一烈度标准而由国际地震和地震工程方面的有关组织在 1962~1964 年制定的《MSK-1964 烈度表》。几种地震烈度表的对应关系如表 1-2 所示。

### (二) 地震烈度的定量指标

目前采用的烈度表大多数以描述宏观的震害现象为主, 没有反映出地震破坏的定量指

表 1-2 几种地震烈度表的对照

新的中国地震烈度表 (1957年)	麦卡里里度表 (MM表) (1931年)	苏联地球物理研究所烈度表 (1952年)	MSK-1964 烈度表	欧洲烈度表 (MCS表) (1917年)	欧洲 R-F (Rossi-Forel) 烈度表 (1873年)	日本烈度表 (JMA表) (1952年)
1	1	1	1	1	1	0
2	2	2	2	2	2	1
3	3	3	3	3	3	2
4	4	4	4	4	4	2.3
5	5	5	5	5	5~6	3
6	6	6	6	6	7	4
7	7	7	7	7	8	4.5
8	8	8	8	8	9	5
9	9	9	9	9	10	6
10	10	10	10	10	10	6
11	11	11	11	11	10	7
12	12	12	12	12	10	7

标,因此在据以鉴定地震烈度时,往往由于鉴定者的主观看法不同而有差别(可达一度之多)。另外,在抗震工程中也迫切要求有一个定量的指标。为此,多年来有不少研究人员和学者试图从仪器观测资料中寻找出较为科学的定量尺度。这一工作概括起来可以归结为以下三个方面:

1. 以地面运动最大加速度为标准 抗震工程方面比较普遍地认为地震时地面运动的最大加速度是对结构产生影响并造成其破坏的主要参数。同时认为地震荷载主要是以惯性力的形式作用在建筑物结构上,所以利用加速度这个量更便于与荷载的计算联系起来。为此试图以加速度作为地震烈度的定量指标,并以相对加速度这一地震系数( $K = \frac{a}{g}$ ,  $a$ 为地面最大加速度,  $g$ 是重力加速度)作为烈度指标,表 1-3 给出一些不同烈度的地震系数的参考值。地震系数就是把地震时的地面运动加速度看做是地震烈度的直接函数。

从表 1-3 可以看出,来源不同的资料,它们之间相应烈度的相对加速度数值差别还是很大的,但是却可以看到一个共同的规律性,即烈度每增加一度,地面运动的最大加速度大致增加一倍。

至于,地震时地面运动在垂直方向的加速度,根据有关资料所提供的数据,可以认为垂直方向的最大加速度是水平方向最大加速度的  $1/2 \sim 1/3$ 。

随着强震观测技术的提高和强震观测点的增加,必能提供地震烈度与地面运动加速度关系方面更多的资料。

2. 以地面运动最大速度为标准 随着对地震震害认识的深化和研究工作的不断深入,发现震害与地面运动的最大速度有关。同样的地面运动加速度,由于地面运动周期的长短不同,所产生的震害程度也不同。但是在相同速度的情况下,震害却不受地面运动周期的影响。自 G. W. Housner 建议以速度反应谱在一定周期范围内所包含的面积为指标以来,国际上又有一部分人提出以地面运动的最大速度为烈度的定量指标。

表 1-4 给出一部分以地面运动最大速度作为烈度指标的参考值。

3. 以地震反应谱为标准 前述以地面运动最大加速度为烈度的标准,是以加速度作为

表 1-3 对应诸烈度的相对加速度值参考表

数据提出者	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
古登堡-里希特 (Gutenberg & Richter)		0.0015	0.003	0.007	0.015	0.032	0.070	0.150	0.320	0.690
纽曼 (Neuman)		0.004	0.008	0.016	0.032	0.064	0.130	0.270	0.540	
赫斯贝格 (Herstberger)							0.130	0.350	0.930	
麦德维捷夫 (Медведев)					0.0125~ 0.025	0.025~ 0.05	0.05~ 0.10	0.10~ 0.20	0.20~ 0.40	
霍斯纳尔 (Housner)							0.06	0.13	0.27	
修订的麦卡里 烈 度 表		0.0025~ 0.005	0.005~ 0.010	0.001~ 0.025	0.025~ 0.05	0.05~ 0.01	0.01~ 0.025	0.025~ 0.05	0.05~ 0.10	0.10~ 0.25
中国科学院	<0.001	0.001~ 0.002	0.002~ 0.005	0.005~ 0.01	0.01~ 0.02	0.02~ 0.044	0.044~ 0.094	0.094~ 0.202	0.202~ 0.432	>0.432
8 度 烈 度 表										
	0	1	2	3	4	5	6	7		
日本气象厅	<0.0108	0.0008~ 0.0025	0.0025~ 0.008	0.008~ 0.025	0.025~ 0.080	0.080~ 0.250	0.250~ 0.400	0.400~ 0.630	0.630~ 1.000	>1.000

表 1-4 12 度烈度表的地面最大速度的参考值 (cm/sec)

研 究 者	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
纽 曼	0.14	0.28	0.56	1.12	2.25	4.5	9	18		
麦德维 捷 夫	地震周期 $T=0.5\sim 2\text{sec}$				1.0~ 2.0	2.1~ 4.0	4.1~ 8.0	8.1~ 16.0	16.1~ 32.0	32.1~ 64.0
	爆 破	<0.2	0.2~ 0.4	0.4~ 0.8	0.8~ 1.5	1.5~ 3.0	3.0~ 6.0	6.0~12	12~24	24~48
金井清 (日)	0.47	0.71	1.08	1.63	2.46	3.73	5.64	8.54	12.9	19.6

地震烈度的主要函数的,至于地基土质条件的影响并未顾及。而地基土质条件又影响着地面运动的周期,周期显然也是影响破坏程度的重要因素。从这一点出发,有些人试图寻求以地震反应谱作为地震烈度的定量标准。

在苏联有人认为多数建筑物的周期都在 0.25 sec 左右,所以建议用位移反应谱在周期为 0.25 sec 上的值作为烈度标准,并设计了一种自振周期为 0.25 sec、临界阻尼比  $\xi=0.08$  的单摆位移地震仪作为烈度计,以该仪器所记录到的最大位移反应谱值作为烈度标准。

在美国, G. W. Housner 在阻尼比  $\xi=0.20$  时,得到谱烈度  $SI_{0.2}$  (即相对速度反应谱在周期为 0.1~2.5 sec 之间所包含的面积)与地面最大水平加速度  $a_m$  之间的经验关系式如下

$$\frac{a_m}{g} = 0.1SI_{0.2}$$

另外他建议对美国四个地震区采用如表 1-5 所划分的谱烈度值。

上面简要介绍了当前一些为探求给地震烈度以一个定量的指标的几种主张。不少学者



表 1-5 谱烈度值

地震区	宏观灾害描述	$SI_{0.2}$ (ft·sec/sec)	$a_m$ (g)
0 区	无 损 害	0.3	0.03
1 区	可能受轻微损害	0.6	0.06
2 区	可能受中等损害	1.3	0.13
3 区	可能受严重损害	2.7	0.27

认为应该根据现代强震观测资料建立烈度的定量指标,据以进行地震荷载的理论计算,并分析理论计算与设计经验的差异,吸收设计经验中的合理部分,对理论计算加以修正。这方面的问题将在第五章中进一步加以阐述。

### (三)基本烈度与设计烈度

基本烈度是指在一定期限内(一般以 100 年为期)一个地区可能遭遇到的最大烈度。基本烈度与地震发震机理、地区的地质构造特征和地形地貌特征等有关。但由于目前我们对地震发震机理的认识还很不够,所以在我国,一般地区的基本烈度是由国家有关部门在所占有的地震资料和地质构造资料的基础上经过研究分析确定的,并一般地规定了各地区的基本烈度。至于特别重要的重点工程建设地区的基本烈度,应由有关地震部门专门进行研究确定。

在国外,如日本、德国和苏联,都由国家的有关部门编制全国最大地震烈度图,图上注明某一地区在一定时期内可能出现的最大地震烈度,有的还给出地震活动区建筑设防等级的区域划分,作为设计部门考虑抗震的依据。

在工程抗震设计中所采用的烈度称为设计烈度。它是以基本烈度为基础,考虑建筑物、构筑物的重要性,按抗震设计规范的规定确定的。规范规定的基本精神是:特别重要的建筑物经有关部门批准可将基本烈度提高一度作为设计烈度;一般性工业与民用建筑则按基本烈度采用;而次要的建筑物则将基本烈度降低一度作为设计烈度,但不得低于 7 度;临时性建筑物可不设防。

## § 1-3 地震分布

对地震进行历史性的研究,可看出地震发生的位置是有一定的规律的。图 1-13 是根据历史记载地震发生的情况而描绘出来的世界地震分布图。从图中可以清楚看出,世界地震主要集中分布在下列两个主要地带和其他几个次要的地带。

世界上的两个主要地震带是:

### 一、太平洋地震带

它从南美洲西部海岸起,经北美洲西部海岸——阿拉斯

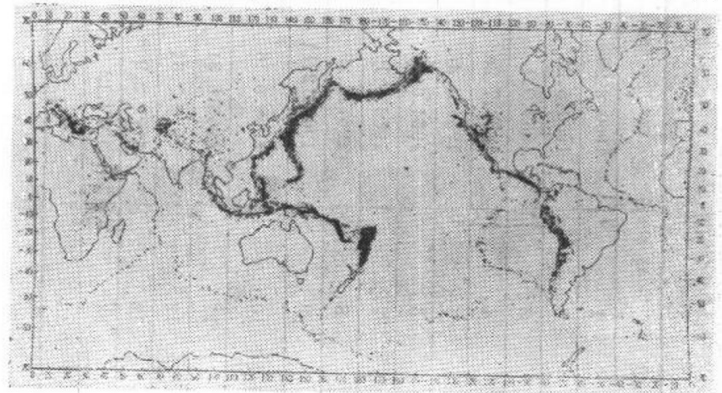


图 1-13 世界地震震中分布图