

地震工程概论

(第二版)

《地震工程概论》编写组 编著

科学出版社

地震工程概论

(第二版)

《地震工程概论》编写组 编著

科学出版社

1985

内 容 简 介

本书是地震工程学基础读物，书中结合我国建筑特点和抗震经验，对地震力的理论基础与抗震设计方法等地震工程的基本内容作了比较系统的介绍。

全书共分三篇二十章。第一篇主要介绍地震时的地面运动特征和结构的地震反应以及地基土的动力特性和振动试验技术的基础知识；第二篇着重介绍各类房屋的震害经验和抗震设计的原则、方法与有关抗震措施；第三篇对桥梁、水坝、烟囱水塔和其它特种结构的抗震问题作了叙述。

本书1977年初版，这次又经作者补充修改，增加了唐山和其它地区地震的工程经验以及近年来抗震研究设计方面的某些新资料。

本书可供从事工程抗震设计、施工和科研工作者以及有关院校师生参考。

地震工程概论

(第二版)

《地震工程概论》编写组 编著

责任编辑 周文辅

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

长春新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1977年3月第 一 版	开本：787×1092 1/16
1985年3月第 二 版	印张：40
1985年3月第二次印刷	插页：1
印数：35,801—39,400	字数：926,000

统一书号：13031·2497

本社书号：3430·13—15

定价：9.60 元

再 版 前 言

我国是一个多地震的国家，历史上曾发生过多次强烈地震。几千年来，我国广大劳动人民一直在和这个自然灾害进行着顽强的斗争。经过不断地实践，记述和认识了许多地震现象。闻名世界的第一台记录地震的仪器——张衡地动仪，在东汉（公元132年）就设计制造成功了。在抗震方面，如1556年关中大地震就有“多用木板合厢四壁，上起暗楼”为住房可免倒塌伤人的记载。有些地震区的古建筑曾经历过多次强烈地震，至今仍巍然屹立。在防震、抗震等方面也积累了许多丰富的经验和记载。所有这些，都是我国劳动人民抗御地震灾害的历史见证。

人民抗御地震主要包含着两个方面：一方面是地震预报，研究地震发生的规律，抓住地震前兆，于震前发出预报，以便及时采取安全措施，特别是保障人身安全；另一方面是工程抗震，研究提高各类建筑物的抗震能力，防止地震时受到破坏，借以保障人民生命安全和避免或减少我国社会主义建设的损失。地震预报与工程抗震是相辅相成的两个方面。要预防必先预测，预报是基础，而抗震又是一种积极的预防，特别是要确保人口集中的城市、大水库、电力枢纽和铁路干线等重大工程设施的安全。地震工作实践表明，地震是可以预防的，房屋具有抗震和不具抗震措施的效果大不一样。在国内外的历次大地震中，总有一些在设计和建造上不符合抗震要求的建筑物倒塌了，而另一些抗震性能好的建筑物基本上完好，或只受到轻微的破坏。许多事实表明，对地震区的工程建筑采取抗震措施，预防地震破坏是完全可能的。

我国的地震工作是随着社会主义革命和社会主义建设的不断发展而发展起来的。几年来，在抗震设计、科学研究、队伍建设等方面都有很大发展，取得了丰硕的成果。为了适应这个不断发展的大好形势，进一步促进抗震工作的开展，我们编写了这本基础理论读物，为开始从事或接触工程抗震工作的技术人员及有关同志介绍一些工程抗震的内容、原理和方法等基础知识，作为入门的向导。

为了使读者对地震工程有比较系统的了解和便于阅读起见，本书从介绍地震现象和地震烈度的概念开始，逐步深入到工程抗震的各个领域。全书共分三部份，第一篇重点介绍地震时地面运动与结构反应等有关地震力理论基础和抗震试验研究的一些实用方法；第二篇集中介绍各类房屋的抗震设计原理与方法；第三篇概述了房屋建筑以外的其他工程结构的抗震问题。我们还尽量搜集、总结国内有关抗震方面的经验。由于本书是基础理论读物，因此在内容上以介绍地震工程中比较成熟和实用的成果为主，对于发展趋势和进一步的研究方面只作一般性介绍。在结构类型方面以介绍一般工业、民用建筑为主，其他结构为辅。

本书于1977年初版。出版后得到广大读者的热情支持并提出不少宝贵的意见，我们借再版的机会表示深切的谢意。

本书在第一版编写和出版期间先后发生了海城、唐山等强烈地震。尤其是唐山地震，波及范围之广，遭受损失之大，人员伤亡之多，都是解放以来所没有过的，也是我国地震历

史上所罕见的。地震发生后, 各类建筑物均遭到极大的破坏, 许多单位深入震区进行了细致的调查和分析, 总结了经验。另外, 近年来抗震科研和设计工作也有较大的发展。这些经验均为丰富和充实本书内容提供了良好基础。作者在第二版中对各章内容都做了补充修改, 其中第七、八、十六、十九、二十章是重新编写的, 第二篇增加了钢筋混凝土剪力墙房屋抗震设计一章, 其余两篇章目未变。在初版书中发现的错漏之处均做了校订和补遗。

本书在编写中引用了许多兄弟单位的工作成果和资料, 除在参考资料中列出的之外, 还有一些资料因篇幅所限, 恕不能一一列举。本书是集体的劳动成果, 由作者分工编写, 由周锡元、周炳章、徐渭对全书进行了编纂。毛增同志曾参加第二篇施工部分的讨论。本书虽经反复核对, 但不协调和谬误之处在所难免, 望读者批评指正。

编 著 者

1981年3月于北京

编著者名单与分工

(以章次为序)

徐 渭 (中国建筑科学研究院工程抗震研究所)	第一篇第一、二章和第八章第一、二、三节
周锡元 (中国建筑科学研究院工程抗震研究所)	第一篇第三、四、五、六章, 第三篇第十七章
符圣聪 (中国建筑科学研究院工程抗震研究所)	第一篇第七章
林坤泉	第一篇第八章第五节
张志芳	第一篇第八章第四节
周炳章 (北京市建筑设计院研究所)	第二篇第九至十五章
雷同顺 (北京市房管局研究所)	第二篇第十四章
冯先松 (北京市市政设计院)	第三篇第十六章
郭刚平 (中国建筑科学研究院工程抗震研究所)	第三篇第十八章
姚德康 (北京电力设计院)	第三篇第十九章
陈厚群 (水利水电科学研究院抗震防护所)	第三篇第二十章

目 录

再版前言	i
------------	---

第一篇 地震地面运动与结构反应

第一章 地震	1
第一节 地球的结构	1
第二节 地震的类型与成因	2
第三节 地震序列	3
第四节 地震波与地震观测	3
一、体波	3
二、面波	5
三、地震观测	6
第五节 震级及其确定	7
第六节 震源与震中	8
第七节 地震的分布	9
第八节 地震的破坏现象	12
一、地表的破坏现象	12
二、工程结构的破坏现象	14
三、次生灾害	18
第二章 地震烈度	20
第一节 地震烈度与烈度表	20
第二节 烈度的定量标准	22
一、以地面最大加速度为标准	22
二、以最大速度为标准	25
三、以地震反应谱为标准	25
第三节 烈度的分布与宏观调查	26
一、等烈度线及其绘制	26
二、房屋震害的统计方法	28
三、烈度衰减	30
第四节 基本烈度与设计烈度	31
第五节 场地因素对烈度的影响	32
第三章 简单结构的振动与地震反应	40
第一节 单质点系在地震作用下的振动方程式	40
第二节 单质点系的自由振动	41
第三节 单质点系的地震反应	43
第四节 在简谐力影响下的强迫振动	44
第五节 阻尼理论问题	46
第六节 能量法, 等效单质点系的概念	49

第七节 弹塑性体系的强迫振动	32
第八节 弹塑性体系的地震反应	56
第四章 强地震运动特性与设计反应谱	58
第一节 地震反应谱	58
第二节 地震福里哀谱	64
第三节 强地震运动的一般特征	66
第四节 地震影响场	69
第五节 地面运动与地震参数的关系	69
第六节 地基土对地面运动的影响	71
第七节 设计用反应谱	75
一、地震系数 k	75
二、动力系数 β	75
第八节 弹塑性反应谱的某些特点, 延性系数	77
第五章 计算地震反应的理论基础	81
第一节 多质点系在地震作用下的振动方程	81
第二节 多质点系的自由振动	83
第三节 多质点系地震反应的一般理论	86
第四节 阻尼影响	89
第五节 地震反应的自振分解	93
第六节 多质点系在地震时的振动能量	95
第七节 地震荷载与内力	96
第八节 剪切梁结构的地震反应	98
第九节 弯曲梁结构的自由振动	102
第十节 弯曲-剪切结构自由振动	104
第十一节 空间结构的三向地震反应	107
第十二节 地震观测与理论计算结果的比较	111
第十三节 地震反应的数值积分法	112
第六章 结构自振特性和地震反应的实用计算方法	117
第一节 剪切型结构	117
第二节 一般多质点系的迭代法	120
第三节 框架和悬臂梁结构	125
第四节 框架剪力墙结构的总体计算	127
第五节 框架剪力墙结构的分片计算	130
第六节 有限元法概述	136
第七节 单质点系地震反应的计算方法	139
第八节 强震加速度记录的零线调整	141
第七章 地基土的动力性质和地基抗震	144
第一节 土的动模量和阻尼	144
一、等效模量和阻尼比	145
二、初始加载曲线方程	146
三、马兴准则和埃万模型	147
四、室内实验测定土的剪切模量和阻尼比	150

第二节 土动力性质的现场试验	152
一、爆破方法	153
二、落锤撞击试验	153
三、剪切波的激发和观测	153
四、稳定震源试验	154
第三节 饱和砂层的液化	158
一、饱和砂样的循环剪切试验	158
二、地震时饱和砂层液化可能性的估计	161
三、饱和砂土孔隙水压力的产生和消散	167
四、考虑有效应力的土层地震反应	170
五、液化安全系数的估计	171
六、抗液化措施	171
第四节 粘土的动强度	172
第五节 地基的抗震和桩基抗震计算	174
第八章 抗震试验技术与强震观测	180
第一节 概述	180
一、抗震试验的任务	180
二、试验内容与程序	181
第二节 模型设计与相似准则	182
一、相似条件	182
二、模型与材料选择	188
第三节 抗震试验方法	191
一、原型结构动力试验方法与激振器	191
二、模拟地震试验方法与振动台	218
三、伪静力试验方法与结构液压试验装置	223
第四节 振动测量与分析仪器	230
一、拾振器	231
二、放大器	241
三、记录器	248
四、数据采集与分析仪器	252
第五节 强震仪和强震观测工作	258
一、强震观测的任务	258
二、强震加速度仪	259

第二篇 各类房屋的抗震设计

第九章 砖结构房屋的抗震设计	268
第一节 震害概况	269
一、承重墙体的破坏	269
二、转角墙及内外墙连接处的破坏	269
三、空旷房间墙体的破坏	271
四、楼盖和抗震圈梁的破坏	271
五、房屋端部的破坏	273

六、较高层砖结构的破坏	273
七、设有钢筋混凝土构造柱房屋的震害	274
八、门窗过梁的破坏	275
九、附属结构的破坏	275
十、砖结构房屋的其它破坏现象	276
十一、空斗墙房屋的破坏	277
十二、砌块房屋的破坏	278
十三、砖柱承重房屋的破坏	278
十四、空旷砖房的破坏	278
第二节 抗震计算	280
一、多层砖房的抗震计算	280
二、空旷砖房的抗震计算	285
第三节 砖结构房屋的抗震构造措施	286
一、多层砖房的抗震构造措施	286
二、空旷砖房的抗震构造措施	291
第十章 钢筋混凝土多层框架房屋的抗震设计	293
第一节 震害简介	293
一、框架柱的破坏	293
二、框架梁的破坏	294
三、梁柱节点的破坏	294
四、框架-抗震墙结构的破坏	295
五、装配式框架结构的破坏	295
六、钢筋混凝土多层框架厂房的破坏	296
七、无梁楼盖结构的破坏	296
八、其它破坏	296
第二节 抗震计算方法	297
一、地震荷载的计算	297
二、地震荷载的分配	300
第三节 抗震构造措施	314
一、结构布置	314
二、抗震墙	315
三、梁柱及节点配筋	318
四、对装配式框架结构的要求	319
五、施工质量要求	321
第十一章 钢筋混凝土剪力墙房屋的抗震设计	323
第一节 剪力墙房屋的震害	323
第二节 抗震计算方法	324
一、地震荷载计算	324
二、地震荷载分配及内力计算原则	325
第三节 抗震构造措施	327
一、结构布置	327
二、配筋构造	328
三、施工要求	331

第十二章 多层混合承重房屋的抗震设计	332
第一节 震害概况	332
一、多层混合承重房屋中的内框架外砖墙结构的震害	332
二、底层为柔性框架房屋的震害	334
第二节 抗震核算方法	335
一、内框架结构的核算方法	335
二、底层为柔性框架房屋的核算方法	341
第三节 抗震构造措施	343
一、多层内框架房屋的抗震构造措施	343
二、底层为柔性框架的抗震构造措施	344
第十三章 单层工业厂房的抗震设计	346
第一节 地震区震害现象的综述	346
一、钢筋混凝土厂房	346
二、砖柱厂房	350
三、木构架厂房	351
第二节 抗震计算	351
一、计算简图	352
二、地震荷载的计算	352
第三节 主要抗震构造措施	356
一、钢筋混凝土厂房	356
二、砖柱厂房	358
三、木构架厂房	359
第十四章 土木结构房屋	361
第一节 震害的主要特征	361
一、土坯墙房屋的破坏	361
二、土筑墙房屋的破坏	362
三、木构架房屋的破坏	363
四、石墙房屋的破坏	364
五、土坯拱房屋的破坏	365
第二节 土木结构房屋的抗震措施	365
一、土坯墙房屋的抗震措施	365
二、土筑墙房屋的抗震措施	366
三、木构架房屋的抗震措施	366
四、石墙房屋的抗震措施	367
五、土坯拱房屋的抗震措施	367
第十五章 各类房屋自振周期的计算	368
第一节 建筑物自振周期的近似计算法	369
一、能量法	369
二、顶点位移法	370
三、折算刚度法	370
四、剪切振动折算模量法	371
第二节 建筑物自振周期计算的经验公式	372

一、中国的经验公式	372
二、美国的经验公式	373
三、日本的经验公式	374
四、苏联的经验公式	374
五、罗马尼亚的公式	375
六、其它各国的公式	376
第三节 关于实测周期	377

第三篇 其他结构的抗震问题

第十六章 桥梁的抗震	383
第一节 桥梁震害现象及其原因	383
一、梁式桥(钢板梁及钢筋混凝土梁等)	384
二、拱桥	399
三、其他桥梁	405
第二节 桥梁的抗震措施	406
第三节 桥梁的抗震计算	407
一、计算地震荷载的基本理论和依据	407
二、一般桥梁结构的抗震计算	409
第十七章 贮液池(罐),气柜和地下管道的抗震分析	443
第一节 震害概况	443
第二节 贮液池(罐)的液动压力	446
第三节 液体粘滞阻尼的近似计算公式	448
第四节 反应谱理论的应用	449
第五节 贮液容器液动压力的计算例题	453
第六节 构架式贮液容器的抗震设计	455
第七节 构架式贮液容器的算例	459
第八节 低压湿式储气柜的抗震设计	462
第九节 地下管道的抗震设计	463
第十八章 烟囱和水塔的抗震	468
第一节 烟囱的震害经验	468
一、烟囱的破坏规律	468
二、烟囱的破坏形式	471
三、破坏原因分析	474
第二节 烟囱的抗震计算	475
一、一般计算方法	475
二、简化计算方法	475
三、精确计算方法	478
第三节 烟囱自振周期的确定	480
一、我国《工业与民用建筑抗震设计规范》所列公式	480
二、钱培风提供的简化公式	481
三、1963年彭克中等提出的简化公式	481
四、美国豪斯纳(Housner)法	485

五、美国ACI法	486
六、计算实例比较	486
第四节 烟囱的抗震措施	487
一、提高砖烟囱的抗震性能	487
二、几种抗震措施	488
三、配筋原则	489
第五节 水塔震害经验	490
一、震害特点	490
二、震害分析	491
三、抗震措施	492
第六节 水塔的抗震计算	494
一、地震荷载	494
二、自振周期	495
 第十九章 悬吊结构与若干工业构筑物及设备的抗震	508
第一节 悬吊结构的抗震	508
一、概 述	508
二、简单悬吊结构的振动特性	520
三、悬吊锅炉的振动特性	525
第二节 通 廊	536
一、震害概述	537
二、抗震计算	542
三、构造措施	548
第三节 拉线结构	549
一、震害概述	549
二、抗震计算	551
三、构造措施	555
第四节 设备及基座	556
一、震害概述	557
二、抗震计算	562
三、构造措施	565
第五节 管道和支架	566
一、震害概述	567
二、抗震计算	569
三、构造措施	572
 第二十章 水工建筑物的抗震	574
第一节 震害概况	574
一、土石坝	574
二、混凝土坝	575
三、水闸和其它水工建筑物	577
四、结 语	578
第二节 抗震计算	578

一、概 况	578
二、水坝设计地震的确定	580
三、水坝动力分析方法	582
四、坝体材料动力特性	591
第三节 抗震措施	595
一、土石坝	595
二、混凝土坝	597
三、水闸和其它水工建筑物	599
第四节 研究动态	601
一、库水和坝体的相互作用	601
二、坝体和地基的相互作用	606
三、混凝土坝的非线性动力分析	616
四、水坝的强震观测、原体测振和模型试验	619

第一篇 地震地面运动与结构反应

第一章 地 震

地震和刮风、下雨一样是一种自然现象。当地下某处岩层突然破裂，或因局部岩层塌陷、火山喷发等发出了振动，并以波的形式传到地表引起地面的颠簸和摇摆，这种地面运动就叫做地震，有人也叫它“地动”。据统计，世界上每年发生数百万次地震。人们对许多小地震并无感觉，只有仪器才能记录到，三级左右的有感地震每年发生约五万次，但它对人民的生命安全和工程建设并无危害；能造成严重破坏的地震，世界上每年平均约十八次。近年来在我国河北邢台，云南通海、昭通，四川甘孜，辽宁海城和河北唐山发生的几次地震都属于这种破坏性的强烈地震。

这一章我们简单介绍一些与工程抗震有关的一般地震知识。

第一节 地球的结构

为了便于解释地震的发生及其发展规律，我们首先需要对地球的内部构造有个初步了解。

地球是一个平均半径为 6,400 公里的椭圆球体，至今已有 45 亿年的历史。研究表明，地球是由性质不同的三个层构成：最外面是一层很薄的地壳，中间很厚的一层是地幔，最里面叫地核（图 1.1）。

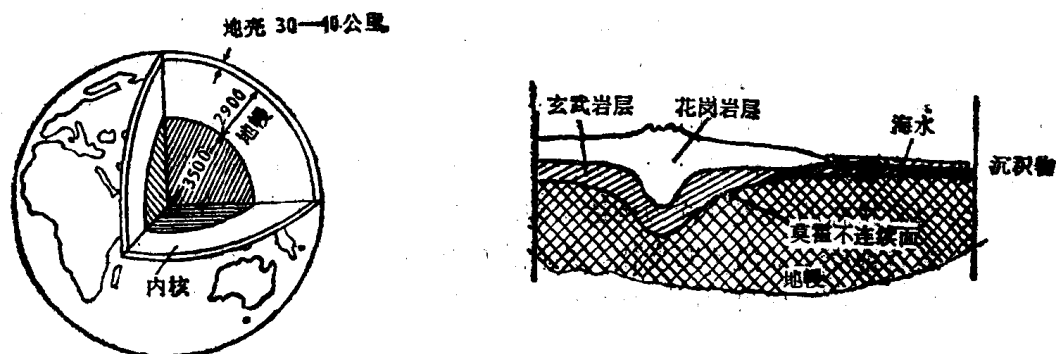


图 1.1 地球断面与地壳剖面

地壳是由各种不均匀的岩石组成的。除表面的沉积层外，陆地下面的地壳主要有两大层：上部的花岗岩层和下部的玄武岩层；海洋下面的地壳一般只有玄武岩层。地壳的厚度很不均匀，在大陆下面，地壳平均厚度是 30 公里；在海洋下面，地壳只有几公里。世界上绝大部分地震都发生在这一薄薄的地壳内。

地幔主要是由质地非常坚硬、结构比较均匀的橄榄岩组成。据推测，构成地幔的物质是具有粘弹性的。地幔厚 2,900 公里，即从地表起接近地球半径一半的深度。占地球全部体积的六分之五。

到现在为止，所观测到最深的地震是 700 多公里，这比起地球半径来仅占十分之一，可见地震仅发生于地球的表面部分——地壳中和地幔上部。

地核是半径为 3,500 公里的球体，又可分为外核（厚 2,100 公里）和内核。据推测，主要构成物质是镍和铁。由于至今还没发现有地震横波通过外核，故推断外核处于液态，而内核可能是固态。

地球各部分的比重随深度增加而增大，平均比重约为 5.5 克/厘米³。

地球内部的温度也随深度增加而升高，从地表每深 1 公里约升高 30℃，但增长率随深度增加而减小。经推算地下 20 公里（多数地震发生在这个深度）深处温度大约 600℃，地幔上部（地下 700 公里左右）温度约 2,000℃，地核内部温度可达 4,000—5,000℃。地球长期保持高温主要是其内部放射性物质不断释放热量的缘故。

地球内部的压力在地幔上部约为 9 吨/厘米²，地核中心达 3,700 吨/厘米²。

第二节 地震的类型与成因

地震通常按照其成因可以划分为三种主要类型：构造地震、火山地震和陷落地震。

由于火山爆发，岩浆猛烈冲出地面时引起的地面振动叫做火山地震；由于地表或地下岩层因某种原因（如石灰岩地区较大地下溶洞的塌陷或古旧矿坑的塌陷等）突然造成大规模陷落和崩塌时导致小范围内的振动叫陷落地震；由于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，这种在构造变动中引起的地震叫构造地震。前两类地震影响范围和破坏程度都相对较小，后一类地震破坏性大影响面广。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，地壳并不是静止不动的，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。由于地球在它运动和发展过程中内部存在着大量的能量，地壳中的岩层在这些能量所产生的巨大力的作用下使原始水平状态的岩层（图 1.2 中 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性时，岩层只发生褶皱（图 1.2 中 2）；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 1.2 中 3）。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



图 1.2 构造变动与地震形成示意图

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。地震使得构造变动过程中积累起来的应变能量突然得到释放。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发生地震呢？一般说来，许多地震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，往往易于发生地震。

第三节 地震序列

在一定时间内相继发生在相近地区的一系列大小地震称为地震序列。某一序列地震中最强烈的那一次叫做主震。大地震有些是突然发生的，但有些大地震前数日就有一些较小地震，叫做前震，研究前震的发生规律及其与主震的关系是地震预报的途径之一。在一次大地震发生后，陆续发生一系列较小的地震，称为余震。主震刚发生后余震非常多，但急剧地减少，过了一定时期恢复到平静状态。余震区多偏于主震发生地区的一边。

根据地震能量释放和活动的特点，地震序列有三种基本类型。

主震型 序列中主震震级显得很突出，释放的能量占全序列的绝大部分。是破坏性地震中常见的一种类型。

震群型 没有突出的主震，主要能量是通过多次震级相近的地震释放出来。

孤立型 或称单发性地震。前震和余震都很稀少，而且与主震震级相差很大，能量基本上通过主震一次释放出来。

第四节 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。地震波是一种弹性波，它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”。下面分别介绍一下关于体波和面波的一些主要特性。

一、体波

体波又包含“纵波”与“横波”两种。

纵波是由震源向外传递的压缩波，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1.3)。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。

纵波与横波的传播速度理论上可分别用下列公式计算：

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (1.1)$$

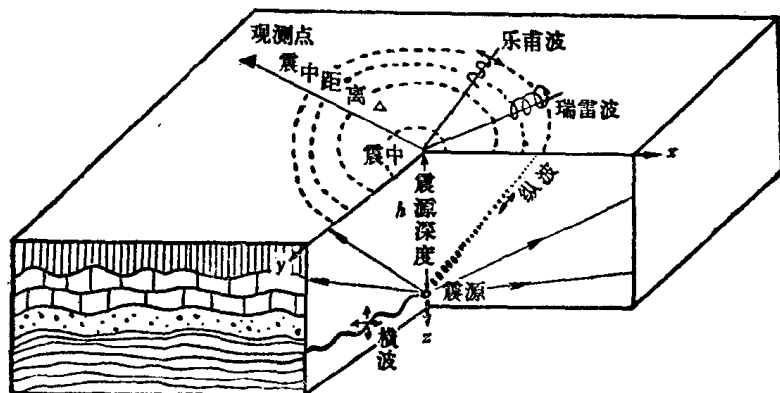


图 1.3 地震波传播与运动形式示意图

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}. \quad (1.2)$$

式中 V_p 是纵波速度； V_s 是横波速度； E 是介质的杨氏弹性模量； G 是剪切模量； 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，

$$V_p = 1.67V_s. \quad (1.3)$$

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1.4所示。表1.1给出了S波在一些介质中的传播速度值。

表 1.1 S波的传播速度(米/秒)

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	1,000以上

由于地球是层状构造，因此，体波通过分层介质，在介面上将产生折射；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1.5），则有下列关系：

$$\frac{V_1}{\sin\theta_1} = \frac{V_2}{\sin\theta_2}. \quad (1.4)$$

由于速度随着深度增加是增大的，即 $V_2 > V_1$ ，故由（1.4）式可知，射线要逐渐向水平弯曲，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1.5）。一般接近地表，由于土层变软地震波传播速度变慢，由