

地震工程概论

《地震工程概论》编写组 编著

科学出版社

内 容 简 介

本书是介绍地震工程的基础理论读物。书中结合我国地震工程特点和经验，对地震力的理论基础与抗震设计原则等地震工程的基本内容作了比较系统的介绍和总结。

全书共分三篇十九章。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及抗震设计的原则与方法；第三篇对桥梁、水坝、烟囱水塔和城市公用设施的抗震问题作了概述。

本书可供从事工程抗震设计、施工和科研工作者以及有关学校师生参考。

地 震 工 程 概 论

《地震工程概论》编写组 编著

*

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂 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
1977年3月第一次印刷 印张：24 1/4 插页：1
印数：0001—35,800 字数：554,000

统一书号：15031·149

本社书号：813·15—10

定价：1.95 元

毛主席语录

备战、备荒、为人民。

要认真总结经验。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

前 言

我国是一个多地震的国家,历史上曾发生过多次的强烈地震。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。

解放以后,尤其是无产阶级文化大革命以来,我国的地震工作发展很快,取得了一定的成绩。遵照毛主席关于“备战、备荒、为人民”的伟大战备部署,认真贯彻执行地震工作要在党的一元化领导下,以预防为主,专业队伍与群众相结合,土洋结合,依靠广大群众,做好预测预防工作的方针,地震战线出现了一派大好形势。1975年2月4日,我国辽南海城地区发生7.3级强烈地震,我国地震工作者以马克思主义、列宁主义、毛泽东思想为武器,专业队伍与群众相结合,做出了预报,并采取了预防措施,使这次地震造成的损失大大减轻。这是我国社会主义制度优越性的生动体现,是毛主席革命路线的伟大胜利。它有力地说明,地震不仅可以预测,而且可以在震前预报,事先做好预防工作。

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结构自振特性的实用计算方法;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。我们还在广大工农兵实践的基础上,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。这是由于我们接触的业务范围所限,所以介绍的内容也不够全面。

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。由于我们的政治思想水平和业务知识有限,地震工程的实践经验不足,书中不当之处在所难免,恳切希望广大读者批评指正,以便修改补充。

本书是由设计、科研、施工、管理等方面工人和技术人员组成的三结合小组共同编写的。第一篇由北京地震队抗震组周锡元、徐渭、符圣聪、林坤泉编写;第二篇由北京市第一建筑工程公司毛增,北京市建筑设计院研究室周炳章,北京市房地产管理局技术处雷同顺编写;第三篇由北京市市政设计院冯先松,北京地震队周锡元、郭纲平,北京电力设计院姚德康,水利电力部水利科学研究院水利调度研究所陈厚群编写。在编写过程中,许多单位的领导干部、工人、科学技术人员及教学人员热情地参加讨论和提供修改意见,谨致谢意。

编 者

1975年8月于北京

目 录

前言

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	6
第六节 震源与震中	8
第七节 地震带的分布	9
第八节 地震的破坏现象	9
一、地表的破坏现象	10
二、工程结构的破坏现象	12
三、次生灾害	15
第二章 地震烈度	16
第一节 地震烈度与烈度表	16
第二节 烈度的定量标准	17
一、以地面最大加速度为标准	17
二、以最大速度为标准	18
三、以地震反应谱为标准	18
第三节 烈度的分布与宏观调查	20
一、等震线及其绘制	20
二、房屋震害的统计方法	21
三、烈度衰减	23
第四节 基本烈度及其区划	24
第五节 场地因素对烈度的影响	25
第三章 简单结构的振动与地震反应	30
第一节 单质点系在地震作用下的振动方程式	30
第二节 单质点系的自由振动	31
第三节 单质点系的地震反应	33
第四节 在简谐力影响下的强迫振动	34
第五节 阻尼理论问题	36

第六节	能量法, 等效单质点系的概念	39
第七节	弹塑性体系的强迫振动	41
第八节	弹塑性体系的地震反应	45
第四章	强地震运动特性与设计反应谱	48
第一节	地震反应谱	48
第二节	地震福里哀谱	52
第三节	强地震运动的一般特征	54
第四节	地震影响场	56
第五节	地面运动与地震参数的关系	57
第六节	地基土对地面运动的影响	59
第七节	设计用反应谱	62
一、	地震系数 k	62
二、	动力系数 β	63
第八节	弹塑性反应谱的某些特点, 延性系数	64
第五章	计算地震反应的理论基础	68
第一节	多质点系在地震作用下的振动方程	68
第二节	多质点系的自由振动	69
第三节	多质点系地震反应的一般理论	72
第四节	阻尼影响	75
第五节	地震反应的自振分解	79
第六节	多质点系在地震时的振动能量	80
第七节	地震荷载与内力	81
第八节	剪切梁结构的地震反应	83
第九节	弯曲梁结构的自由振动	87
第十节	弯曲-剪切结构自由振动	89
第十一节	空间结构的三向地震反应	91
第十二节	地震观测与理论计算结果的比较	94
第十三节	地震反应的数值积分法	95
第六章	结构自振特性和地震反应的实用计算方法	99
第一节	剪切型结构	99
第二节	一般多质点系的迭代法	102
第三节	框架和悬臂梁结构	106
第四节	框架剪力墙结构的总体计算	109
第五节	框架剪力墙结构的分片计算	111
第六节	有限元法概述	116
第七节	单质点系地震反应的计算方法	119
第七章	地基土的动力性质	123
第一节	土的振动模量和阻尼	123
一、	共振柱法	123
二、	幅比方法	123
三、	动力三轴仪和直剪仪的测定方法	124
第二节	土动力性质的现场试验	127

一、爆破方法	128
二、落锤撞击试验	128
三、剪切波的激发和观测	128
四、稳定震源试验	129
第三节 饱和砂层的液化	132
一、模拟地震荷载的途径	133
二、影响砂土液化的因素	134
三、砂土液化可能性的评价	136
第四节 饱和粘土的动力强度	141
第八章 振动试验技术与强震观测	145
第一节 概述	145
第二节 振动试验的荷载	147
一、动力激振方式与设备	147
二、往复水平静力施加方式	149
第三节 测振仪器的一般原理	151
一、拾振器	151
二、放大器	153
三、记录器	154
第四节 数据分析	155
一、共振曲线	155
二、周期、阻尼的实验确定	156
三、复杂振动形式分析	158
第五节 强震的仪器观测工作	158
一、强震观测的任务	158
二、加速度强震仪	159

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	166
第一节 震害概况	166
一、承重墙体的破坏	166
二、转角墙及内外墙连接处的破坏	167
三、空旷房间墙体的破坏	167
四、楼盖和抗震圈梁的破坏	168
五、房屋端部的破坏	169
六、较高层砖结构的破坏	169
七、门窗过梁的破坏	169
八、附属结构的破坏	170
九、砖结构房屋的其它破坏现象	171
十、空斗墙房屋的破坏	171
十一、砌块房屋的破坏	171
十二、砖柱承重房屋的破坏	172

十三、空旷砖房的破坏	172
第二节 抗震计算	173
一、多层砖房的抗震计算	173
二、空旷砖房的抗震计算	178
第三节 砖结构房屋的抗震构造措施	179
一、多层砖房的抗震构造措施	179
二、空旷砖房的抗震构造措施	183
第十章 钢筋混凝土多层框架房屋的抗震设计	185
第一节 震害简介	185
一、框架柱的破坏	185
二、框架梁的破坏	186
三、梁柱节点的破坏	186
四、框架-抗震墙结构的破坏	186
五、装配式框架结构的破坏	186
六、钢筋混凝土多层框架厂房的破坏	187
七、其它破坏	187
第二节 计算方法	188
一、地震荷载的计算	188
二、地震荷载的分配	190
第三节 抗震构造措施	204
一、结构布置	204
二、抗震墙	205
三、梁柱及节点配筋	208
四、对装配式框架结构的要求	209
五、施工质量要求	211
第十一章 多层混合承重房屋的抗震设计	212
第一节 震害概况	212
一、多层混合承重房屋中的内框架外砖墙结构的震害	212
二、底层为柔性框架房屋的震害	213
第二节 抗震核算方法	214
一、内框架结构的核算方法	214
二、底层为柔性框架房屋的核算方法	220
第三节 抗震构造措施	221
一、多层内框架房屋的抗震构造措施	221
二、底层为柔性框架的抗震构造措施	222
第十二章 单层工业厂房的抗震设计	224
第一节 地震区震害现象的综述	224
一、钢筋混凝土厂房	224
二、砖柱承重厂房	227
三、木构架厂房	227
第二节 抗震计算	228
一、计算简图	228

二、地震荷载的计算	229
第三节 主要抗震构造措施	233
一、钢筋混凝土厂房	233
二、砖柱厂房	235
三、木构架厂房	236
第十三章 土木结构房屋	237
第一节 震害的主要特征	237
一、土坯墙房屋的破坏	237
二、土筑墙房屋的破坏	238
三、木构架房屋的破坏	239
四、石墙房屋的破坏	240
五、土坯拱房屋的破坏	241
第二节 土木结构房屋的抗震措施	241
一、土坯墙房屋的抗震措施	241
二、土筑墙房屋的抗震措施	242
三、木构架房屋的抗震措施	242
四、石墙房屋的抗震措施	243
五、土坯拱房屋的抗震措施	243
第十四章 各类建筑自振周期的计算	244
第一节 建筑物自振周期的近似计算法	245
一、能量法	245
二、顶点位移法	246
三、折算刚度法	246
四、剪切振动折算模量法	247
第二节 建筑物自振周期计算的经验公式	247
一、中国的经验公式	248
二、美国的经验公式	249
三、日本的经验公式	249
四、苏联的经验公式	249
五、罗马尼亚的公式	250
第三节 关于实测周期	251

第三篇 其他结构的抗震问题

第十五章 桥梁的抗震	256
第一节 桥梁震害现象及其原因	256
一、梁式桥(钢板梁及钢筋混凝土梁桥)	256
二、拱桥	262
三、木桥	265
第二节 桥梁的抗震措施	265
第三节 桥梁的抗震计算	267
一、计算地震荷载的基本理论	267
二、桥梁结构地震力的计算	267

第十六章	贮液池(罐), 气柜和地下管道的抗震分析	277
第一节	贮液池(罐)的液动压力	277
第二节	液体粘滞阻尼的近似计算公式	280
第三节	反应谱理论的应用	281
第四节	贮液容器液动压力的计算例题	284
第五节	构架式贮液容器的抗震设计	286
第六节	构架式贮液容器的算例	289
第七节	定压式气柜的抗震设计	293
第八节	地下管道的抗震设计	293
第十七章	烟囱和水塔的抗震	298
第一节	烟囱的震害经验	298
一、	历次地震中烟囱的震害概况	298
二、	烟囱破坏的一般规律	298
三、	烟囱的破坏形式	301
第二节	烟囱的抗震措施	303
一、	提高烟囱抗震性能的重要意义	303
二、	砖烟囱的配筋方式	303
三、	配筋数量问题	304
第三节	烟囱的地震力计算	305
一、	计算原则	305
二、	关于抗震设计规范中的简化计算方法	306
三、	其他方法简介	309
第四节	烟囱自振周期的计算	310
一、	中国的简化计算方法	310
二、	其他简化计算方法	311
三、	计算实例比较	316
第五节	水塔震害经验	317
一、	震害经验	317
二、	抗震措施	318
第六节	水塔的抗震计算	319
第十八章	悬吊结构的抗震	330
第一节	概述	330
一、	由软索悬吊的结构有没有刚度	331
二、	由软索悬吊的结构是否产生地震力	332
三、	悬吊结构与支承结构的振动特征	332
四、	悬吊重物后能否减小厂房的地震力	332
五、	悬吊结构在抗震方面有没有优越性	334
第二节	简单悬吊结构的振动特性	335
一、	振动型式	336
二、	悬吊结构的刚度	336
三、	自振周期计算	337
四、	地震力计算	339

第三节	悬吊锅炉的振动特性	339
一、	悬吊锅炉的震害情况	342
二、	悬吊锅炉的自振特性	343
三、	地震力计算	344
四、	构造要求	350
第十九章	水工建筑物的抗震	352
第一节	概况	352
第二节	大体积水工建筑物的抗震计算	358

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晃,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,四川甘孜和辽宁海城地区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)。

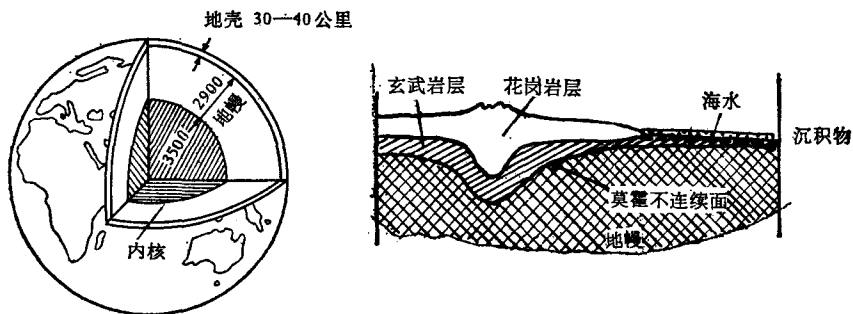


图 1.1 地球断面与地壳剖面

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。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。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



图 1.2 构造变动与地震形成示意图

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迴转能等所引起的。

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:

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

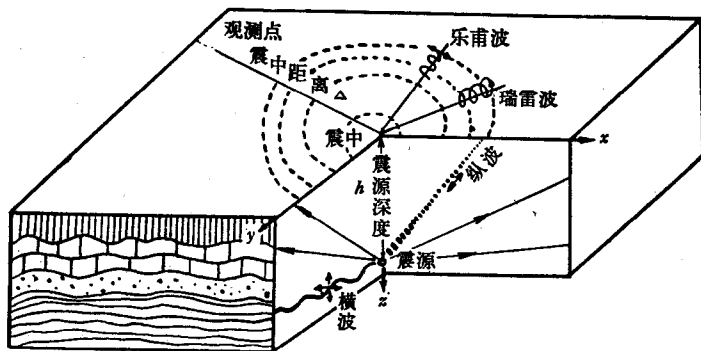


图 1.3 地震波传播与运动形式示意图

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

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。

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 1.5), 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

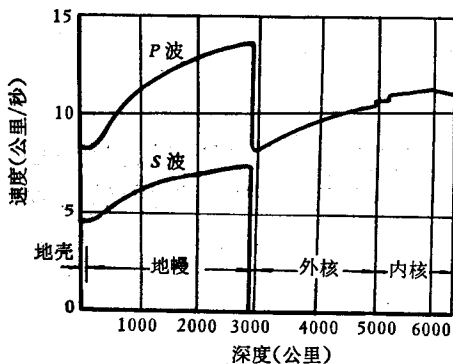


图 1.4 体波在地球内传播速度的变化

砂	60	含砂砾石	300—400
人工填土	100	饱和砂土	340
砂质粘土	100—200	砾石	600
粘土	250	第三纪岩层	1,000 以上

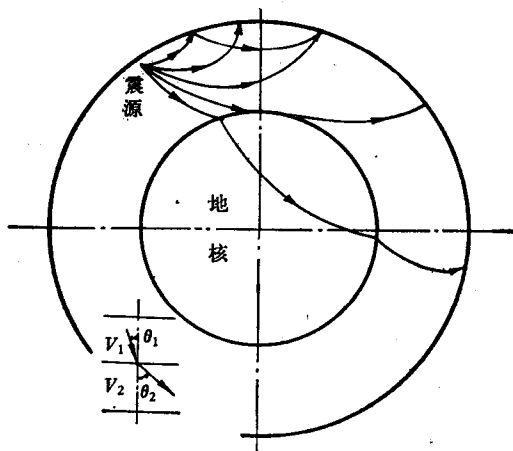


图 1.5 地震波射线的途径

$V_2 > V_1$, 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)。此外, 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的 S 波(转换波 PS)。同样, 当 S 波入射到一个边界时也是如此。

二、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 1.6 xz 平面)作椭圆运动, 而与该平面垂直的水平方向(y 方向)没有振动, 如在地面上呈滚动形式(图 1.3)。

乐甫波只是在与传播方向相垂直的水平方向(图 1.6 y 方向)运动, 即地面水平运动或者说在地面上呈蛇形运动形式(图 1.3)。

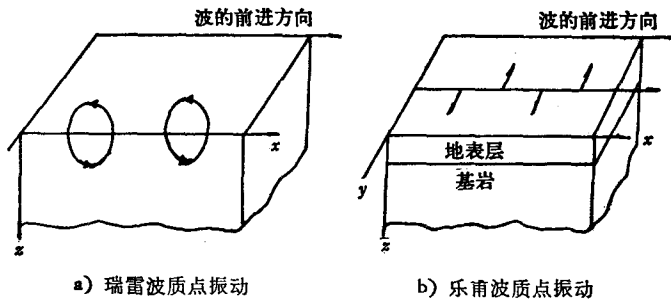


图 1.6 面波质点振动

瑞雷波的传播速度(V_R)比 S 波稍微慢一点, 它们的比值

$$K_1 = \frac{V_R}{V_S} \quad (1.5)$$

与介质的泊松比有关, 可用下式确定:

$$\frac{1}{8} K_1^6 - K_1^4 + \frac{2-\nu}{1-\nu} K_1^2 - \frac{1}{1-\nu} = 0. \quad (1.6)$$

当 $\nu = 0.22$ 的情况下, $K_1 = 0.914$, 即

$$V_R = 0.914 V_S. \quad (1.7)$$

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

$$\frac{V_R}{\sqrt{V_P^2 - V_R^2}} h \quad (P \text{ 波}), \quad (1.8)$$

$$\frac{V_R}{\sqrt{V_S^2 - V_R^2}} h \quad (S \text{ 波}), \quad (1.9)$$