

探 勘 波 雷 瑞

杨成林 等编著

地 质 出 版 社



探 勘 雷 瑞

杨成林 等编著

地 质 出 版 社

(京) 新登字 085 号

内 容 简 介

本书介绍了瑞雷波勘探的工作方法技术、资料解释和应用。

全书共分五章，第一章阐述了瑞雷波勘探的理论基础；第二章和第三章分别介绍了勘探基本原理、现场工作方法技术及仪器设备，其中重点介绍了 RL-I 型仪器系统的配置及各部分的技术指标；第四章讨论了瑞雷波勘探资料的定性和定量解释方法；第五章介绍了应用范围并给出了部分勘探实例。

本书可供从事地球物理勘探、岩土原位测试的技术人员阅读，也可供有关院校师生参考。

瑞 雷 波 勘 探

杨成林 等编著

*

责任编辑：曹玉

地质出版社出版发行

(北京和平里)

地矿部河北测绘印制中心印刷

(河北省廊坊市曙光道 30 号)

新华书店总店科技发行所经销

*

开本：850×1168 1/32 印张：6.875 字数：187 千字

1993 年 10 月北京第一版·1993 年 10 月河北第一次印刷

印数：1—2000 册 定价：10.00 元

ISBN 7-116-01520-5/P·1237

前 言

瑞雷波法是一种新兴的岩土原位测试勘探方法,利用其频散特性和传播速度与岩土物理力学性质的相关性可以解决诸多的工程地质问题。河北省地球物理勘查院和河北地质学院物探系在1986年—1992年期间,开展了瑞雷波勘探现场方法技术、资料解释方法和应用范围等方面的试验研究工作,取得了较好的成果,在生产中也取得了显著的社会效益和经济效益。为了推广这一方法技术,推动其进一步发展,我们编写了这本书,书中论述的大部分内容是我们的最新研究和生产成果。同时引用了国内外有关的文献。

本书的第三、四、五章由杨成林同志编写,第一章由宣紫燕、张朝峰同志编写,第二章由张家奇同志编写,绪论和结束语由李从信编写,附录由时福荣同志编写,彭朝辉同志协助进行了电算工作。全书由杨成林同志主编。

该书由中国地质大学蔡柏林教授,地质矿产部王振东、吴海成、翟培英高级工程师审定,在编写过程中得到了参与项目的其他同志的大力支持,孙长缨、周广卿等同志在文稿整理、图件清绘工作中做了大量工作,在此一并表示感谢。由于作者水平有限,书中不当之处敬请读者批评指正。

编 者

1993.6

目 录

绪论	1
第一章 理论基础	7
§ 1.1 物体的弹性与弹性波	7
一、物质的弹性常数	7
二、弹性波	9
三、弹性模量、弹性波传播速度间的关系	13
§ 1.2 均匀半空间介质中的瑞雷波	13
一、弹性波的波动方程	13
二、半空间介质中的瑞雷波	16
§ 1.3 层状介质中的瑞雷波	30
一、二层介质中的瑞雷波	31
二、多层介质中的瑞雷波	35
§ 1.4 多层介质中瑞雷波频散的计算方法	44
一、Knopoff 快速算法	45
二、高频范围频散函数的计算	55
§ 1.5 频散曲线特征分析	58
一、频散曲线(V_R-f)变化规律	58
二、影响瑞雷波频散曲线变化的因素	63
第二章 基本原理及野外工作方法技术	69
§ 2.1 瑞雷波勘探原理	69
§ 2.2 野外工作方法技术	72
一、稳态激振法	73
二、瞬态激振法	76
第三章 仪器设备配置	79
§ 3.1 一般配置	79
一、用于产生瑞雷波的振源系统	79
二、瑞雷波信号接收分析仪器的配置	82
§ 3.2 RL-I 型瑞雷波勘探仪器系统	83
一、RL-I 激振系统	83
二、瑞雷波信号接收处理仪器	84

§ 3.3 GR-810 全自动地下勘探机	87
第四章 资料整理及解释方法	89
§ 4.1 资料整理	89
§ 4.2 瑞雷波传播速度的计算	89
一、稳态法瑞雷波传播速度的计算方法	91
二、瞬态法瑞雷波传播速度的计算方法	96
§ 4.3 频散曲线的绘制	98
§ 4.4 层厚度的确定方法	99
一、一次导数($\partial V_R / \partial \lambda_R$)极值点法	99
二、拐点法	103
三、三层情况	105
四、解释实例	106
§ 4.5 层速度的计算方法	108
一、渐近线法	109
二、($\partial V_R / \partial \lambda_R H$)极值法	110
三、近似计算法 ^{〔3〕〔7〕〔22〕}	117
§ 4.6 层厚度、层速度综合解释法	119
一、半波长解释法($H=1/2\lambda_R$)产生误差的原因	119
二、合理的综合解释方法	120
§ 4.7 资料解释步骤及应注意的几个问题	123
一、解释步骤	123
二、薄层问题	124
三、正演计算参数的选择	126
第五章 应用	129
§ 5.1 岩土物理力学参数原位测试	129
一、计算岩土动力学参数和地基刚度系数 ^{〔25〕}	129
二、横波波速 V_s 与土层的标准贯入击数 $N_{63.5}$ 的关系	131
三、 V_R 与土层容许承载力 $[R]$ 和变形模量 E_s 的关系 ^{〔4〕、〔12〕、〔14〕、〔15〕} ...	133
四、 V_R 与碎石桩复合地基承载力 R_f 和变形模量 E_s 的相关关系 ...	134
§ 5.2 工程地质勘察	140
一、瑞雷波工程地质勘察的主要内容	141

二、工程地质勘察实例分析	141
§ 5.3 软地基加固处理效果评价	149
一、瑞雷波检验复合地基的内容	150
二、工程实例	150
§ 5.4 V_s 或 V_R 在地基抗震设计中的应用	157
一、划分场地土类型和场地土类别	157
二、饱和砂土液化判别	158
三、研究地基的振动特性 ⁽²²⁾	159
§ 5.5 公路质量无损检测	162
一、确定结构层的厚度及探测裂隙	163
二、水泥路面强度的计算	165
三、高等级公路频散曲线与水泥便道频散曲线的对比	168
§ 5.6 地下空洞和掩埋物探测	168
一、空洞探测实例	169
二、掩埋物探测实例	170
§ 5.7 其它方面的应用	172
结束语	174
附录 瑞雷波频散曲线正、反演程序 ^[6]	176
一、正演程序	176
二、反演程序	184
参考文献	211

绪 论

弹性波在到达弹性或速度、密度不同的介质界面上时,会产生反射、折射现象,同时产生界面波。特别将沿自由表面传播的波称做表面波 (Surface Wave)。在表面波中存在有两种不同类型的波,一种是质点在波的传播方向垂直平面内振动,质点的振动轨迹为逆时针方向转动的椭圆,且振幅随深度呈指数函数急剧衰减,传播速度略小于横波;另一种是质点在垂直于波传播方向的水平面内振动。前一种类型的波是最初由英国学者瑞雷 (Rayleigh) 在理论上确定的,称做瑞雷波 (Rayleigh Wave);后一种类型的波由拉夫 (Love) 从数学上给以证明,称为拉夫波 (Love Wave)。

在天然地震中,瑞雷波是危害性最大的一种地震波。在人工地震勘探中,瑞雷波是一种强干扰波。因此,对瑞雷波的早期研究,人们主要是根据瑞雷波的特点,采取诸多方法来减小它的危害或消除它的影响。

从本世纪 50 年代初,人们发现了瑞雷波在层状介质中所具有的频散特性,而广泛地利用天然地震记录的瑞雷波来研究地球内部的结构。但受当时计算技术的影响,由地震记录得到瑞雷波的频散曲线只是采用峰谷法,这是一种目视对比的手工操作方法,精度低且易出错。自 60 年代以来,随着高速数字计算机广泛地应用于地球物理学的各个领域,对瑞雷波频散特性的研究也有了突飞猛进的发展。

到了 70 年代,出现了利用人工激发的高频(数赫兹—数百赫兹)瑞雷波来解决浅层(数十米深度范围)工程地质问题的方法技术。70 年代初,美国 F·K·Chang 和 R·F·Ballard 等人利用瞬态激振产生的瑞雷波来研究浅部地质问题,并于 1973 年在第 42 届国际地球物理勘探年会上以“Rayleigh—Wave Dispersion

Technique for Rapid Subsurface Exploration”为题报道了有关的研究成果。在利用稳态激振法产生瑞雷波方面,日本国 VIC 株式会社经过多年的研究试制,于 80 年代初推出了 GR-810 佐藤式全自动地下勘查机,并在工程地质勘察的诸多领域内应用。在我国,河北省地球物理勘查院率先(1987)应用浅层地震仪配制国产电磁激振器开展了瑞雷波法的试验研究,几年来,在瑞雷波勘探的基础理论和应用等方面取得了可喜的研究成果。

利用瑞雷波进行地质勘探是基于瑞雷波具有如下的特性:

1. 在分层介质中,瑞雷波具有频散特性;
2. 瑞雷波的波长不同,穿透深度也不同;
3. 瑞雷波传播速度与横波传播速度具有相关性。

前两种特性为瑞雷波勘探提供了充分的理论依据,后一种特性为方法的应用开拓了广阔的前景。

利用天然地震中的瑞雷波,可以研究如下几方面的地学问题:

1. 研究地球的内部结构:天然地震能量大,产生的瑞雷波频率低,瑞雷波的传播过程携带有大量的地球内部结构的信息,利用计算机对记录的瑞雷波资料进行 Fourier 变换、相干、相关等处理分析,可得到瑞雷波的频散曲线,而频散曲线的变化规律与地球的内部结构密切相关。

2. 研究地壳及地幔的物质组成:利用定量反演解释,可以得到地球深部不同层位的弹性波传播速度,速度的大小与物质的弹性性质,如密度、剪切模量、泊松比等密切相关,进而可对不同层的物质组成或状态做出分析。

3. 研究大地构造:不同时代和不同岩性的岩石,弹性波传播速度存在着较大的差异,研究不同区域的瑞雷波传播速度差异可以划分大地构造。

4. 地震灾害的研究:瑞雷波是地震中的一种危害最大的弹性波,通过对天然地震中的瑞雷波传播机制、振幅、频率和历时的调查,可以研究分析地震的破坏模式,以便采取相应措施来减轻灾害的程度。

利用人工激发的瑞雷波,可以解决如下几方面的浅层地质问题:

1. 工程地质勘察:利用实测的瑞雷波频散曲线,通过定量解释,可以得到各地质层的厚度及弹性波的传播速度,传播速度的大小直接反映了地层的“软”“硬”程度。因此,可以对第四系地层进行划分,确定地基的持力层。地层中存在低速度带反映了地下赋存有软弱夹层,这类地层对建筑物易造成危害。瑞雷波勘探可方便地划分出该软弱层的埋深及范围。

2. 地基加固处理效果评价:软地基的加固处理,就是通过不同的方法,如强夯、挤密置换、化学处理等,使软地基变“硬”。瑞雷波法评价加固效果,是通过实测地基加固前后的波速差异,得到处理后的地基较处理前土体的物理力学性质的改善程度,同时可方便地对处理后场地在水平方向的均匀性做出评价,以及确定加固所影响的深度和范围。

3. 岩土的物理力学参数原位测试:波速的大小与介质的物理力学参数,如密度、剪切模量、压缩模量、泊松比密切相关。因此,通过对实测资料的反演拟合解释,可以得到岩、土层的横波速度、纵波速度、密度等参数,进而计算出其它的参数。

4. 地下空洞及掩埋物探测:地下土洞、溶洞、矿区废弃矿井以及各种地下掩埋物,有时需要准确地探测其在地下的赋存位置。用瑞雷波进行勘查时,当瑞雷波的勘探深度与这些物体的深度相当时,频散曲线就会出现异常跳跃。据此可以确定其埋深及范围。

5. 公路、机场跑道质量无损检测:利用人工激发的数十—数千赫兹的高频瑞雷波,可以分别测出路面、路基的波速,进而计算出路面的抗折、抗压强度及路基的载荷能力,以及各结构层的厚度。该方法用于机场跑道和高等级公路的另一项意义是可实现质量随年代变化的连续监控。

6. 饱和砂土层的液化判别:当较松散的饱和砂土层受到振动时就会被振实,体积减小。如果不排水,孔隙水压力就会增高。在连续振动条件下,砂土层内的孔隙水压力增高到了某个时候,孔隙

水压力就会等于上覆土压力,在这种情况下,砂土层就不再具有抗剪强度,而处于液化状态。可见,饱和砂土层在振动作用下液化与否,与砂土层的密实度有关,越松散越易发生液化;反之,则不易液化。反映在波速上,波速越低越易液化;反之,不易液化。根据一定场地内的饱和砂土层的埋深,地下水位的深浅等地质条件,可以计算出该饱和砂土层的液化临界波速值。实测波速大于该临界值,则为非液化层,小于该临界值则为液化层。

7. 其它方面的应用:瑞雷波勘探用于工程地质,解决的问题是多方面的,除以上六个方面的应用外,还可有效地用于基岩的完整性评价,场地土类型、类别划分,滑坡调查,堤坝危险性预测,桩基入土深度探测等等。

瑞雷波法与其它地震波法相比有如下几方面的特点:

1. 浅层分辨率高:同一介质中瑞雷波较其它类型的弹性波传播速度小,且只在表层某一深度内传播。在稳态激振条件下,频率范围和频率的变化间隔均可根据勘察目的确定,需要时,波长变化可以控制在毫米级范围,即以深度变化数毫米的间隔由浅向深勘测。所以该方法可以确定路面厚度及探测到地面上厘米级宽度的裂隙。这样的精度,其它弹性波法是无法与之比拟的。

2. 不受各地层速度关系的影响:折射波法要求下伏层速度大于上覆层速度。反之,则为勘探中的盲层;反射波法要求各层具有波阻抗差异。以上这两种方法要求各层的波速或波阻抗具有较大的差异。瑞雷波法只要求具有波速差异,即使差异只有 10% 也可以精确进行分辨。

3. 工作条件:瑞雷波法与其它浅层地震方法工作条件的比较见下表。

瑞雷波用于地质勘探,不仅可以解决诸多的地质问题,在经济效益、社会效益方面也具有较好优势,分析如下:

1. 为工程项目争取时间:基本建设项目用于工程勘察、基础检测时间,即使很小的场地也需要十几天的时间,有的大型项目可达数月。瑞雷波法用于该方面具有省时省力等优点。如进行原位

波速测试,按三个测试点,测试深度 30m,跨孔波速测量从钻孔到

各方法工作条件对比表

工 作 方 法 条 件	瑞雷波法	折射波法	反射波法	跨孔法
波的种类	瑞雷波	P 波	P 波,S 波	P 波,S 波
勘 探 方 式	变化频率, 由浅向深探 测,确定各 界面深度,各 层波速	接收界面 折射波,直接 确定深度及 折射体的波 速	接收反射 波,确定界面 以上平均波 速及界面深 度	在钻孔中 逐点测试,分 层测试各 层波速
震 源 形 式	垂 直 激 振 器	落重法 或爆炸	P 波同左, S 波扣板法	孔 中 剪 切 锤
勘 探 深 度	0—50m	0—数百米	0—数百米	由孔深确定
资 料 处 理	现场可给 出测试结果	室内处理	室内处理	现场可给 出测试结果
场 地 要 求	5×5m ² 范 围即可,大于 测试范围 1— 2m	与深度有 关,一般大于 测试深度 3— 5 倍	与深度有 关,大于深度 2 倍	由钻孔位 置确定
工作效率 (按一个排 列计算)	与深度无关 约 30min	与深度无关 约需 60min	与深度无关 约需 60min	与孔深及测试 深度间隔有关
台班人数	4 人	6—8 人	6—8 人	4 人

完成波速测量,需要 10d 时间,而瑞雷波从测试到提交成果,只需 1d 的时间。地基加固处理后,为确定地基承载力利用静荷载试验,试验三个点,需要 15—20d 时间;用瑞雷波法评价,即使做 10 个点,也只需要 1—2d 的时间。在大面积工程地质勘探方面,瑞雷波更能显示快速的优势,在较短的时间就能提交出面积性的地质资料,可为工程建设项目争取到大量的时间。

2. 为建设单位节省资金:瑞雷波勘探较常规方法勘探费用

低,如进行 30m 深度的波速测试,跨孔法的综合费用需要 8000 元左右,瑞雷波完成 30m 深度的测试,费用为 800 元左右。大面积的载荷试验,如 $3 \times 3\text{m}^2$ 的面积,需费用 3 万元左右,瑞雷波只需 3000 元左右。

3. 推动对瑞雷波研究的发展:工程地质勘察涉及到国民经济建设的各个部门。瑞雷波的广泛应用,必将引起更多有关学科科技人员的兴趣,使得更多的人参与对瑞雷波的研究,使这种方法在现场测试技术和资料的解释、正反演计算等方面更快地完善。这些方法的日益成熟,也可以用于深部地质构造的研究,进而推动瑞雷波解决深部地质问题方法技术的发展。

第一章 理论基础

瑞雷波勘探主要利用了瑞雷波的两种特性,一是瑞雷波在分层介质中传播时的频散特性;二是瑞雷波传播速度与介质的物理力学性质的密切相关性。但在讨论瑞雷波的这些特性时必须涉及到其它类型的弹性波,同时瑞雷波勘探的对象是弹性介质。因此,本章主要讨论如下几方面的内容:

1. 弹性介质与弹性波的类型及特点。
2. 均匀及分层介质中的瑞雷波及瑞雷波与其它类型波的内在关系。
3. 分层介质中瑞雷波频散曲线的计算方法。
4. 频散曲线的变化规律及影响其变化的因素。

§ 1.1 物体的弹性与弹性波

弹性波在物体内部传播,其动力学和运动学特性取决于它所通过的物质的弹性性质和密度,外力作用于一物体的表面,使物体的体积和形状发生变化。由于这种变化,在物体内部就产生一个与外力相反的内应力,这种内应力(应变)阻止外应力的作用。物体的弹性,就是物体阻止形变和回复它原来具有的形状和体积的能力。这种能力的大小,即弹性性质通常用物质的弹性常数来表述。

一、物质的弹性常数

作用于物体单位面积的力定义为应力 S ,压应力使物体缩小,张应力使物体伸长。纵应变定义为缩小或伸长量 ΔL 与原长度 L 的比值,即 $\Delta L/L$ 。在垂直于力的方向上,物体也发生膨胀或收缩,这种现象称为横应变。横应变定义为垂直于应力方向上物体的膨

胀或收缩量 Δd 与物体原尺寸 d 的比值,即 $\Delta d/d$ 。应力、应变如图 1·1 所示。

在物体的弹性极限范围内,根据 Hooke's 定律,应变与应力成正比。

即:
$$\Delta L/L = \frac{F/A}{E} \quad E = \frac{F/A}{\Delta L/L} \quad (1 \cdot 1)$$

E 等于单位面积的应力除以相对变化,常数 E 定义为杨氏模量。

横应变与纵应变的比值定义为物质的泊松比 σ 。

$$\sigma = - \frac{\Delta d/d}{\Delta L/L} \quad (1 \cdot 2)$$

σ 是表征物体“软”“硬”程度的无量纲值。理论研究表明,所有的物质 σ 均在 0—0.5 之间变化,数值越大,物质越松软;反之,越坚硬。流体 σ 为 0.5,未固结的第四系地层 σ 为 0.35—0.48,大多数岩石 σ 值为

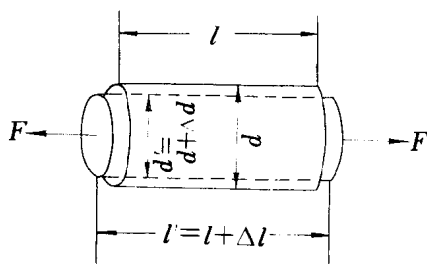


图 1·1 柱体的应力与应变

0.25 左右,极坚硬的刚性岩石 σ 值可小到 0.05。

图 1·2(a)是物体周围均匀受力时的应力与应变的情况。一个均匀的压应力作用于物体上,引起物体体积减小,应力除以体积的相对变化定义为物体的体积模量 K 。

即:
$$K = \frac{P/A}{\Delta V/V} \quad (1 \cdot 3)$$

式中, V 是物体的原体积, ΔV 为体积变化量, A 为表面积。

图 1·2(b)中,作用力 F 平行于物体的底面和顶面。这种作用

力称为剪切应力。由于剪切应力的作用,使原来呈直角的物体变化为 $90^\circ - \varphi$, 变化角 φ 叫做剪切应变, 如 φ 角很小, 剪切应变与应力成正比, 关系为:

$$\mu = \frac{F/A}{\varphi} \quad (1 \cdot 4)$$

比值 μ 定义为物体的剪切模量或称刚度模量。

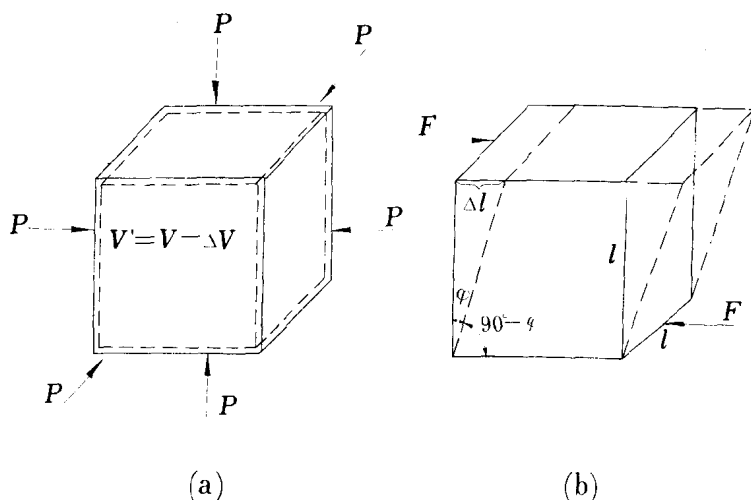


图 1·2 立方体单元的应力与应变

拉梅常数对各向同性介质的弹性性质的表述是方便的, 拉梅常数用 λ 表示:

$$\lambda = \frac{\sigma E}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)} \quad (1 \cdot 5)$$

二、弹性波

在半空间介质中, 当在地面上做竖向激振时, 地下介质中一般产生三种波的传播, 即纵波, 又叫 P 波; 横波, 又称 S 波和瑞雷波。在这一节中, 简要描述这三种波的特点和相互关系。面波中仅讨论瑞雷波。关于瑞雷波的波动方程, 传播过程及其特性, 在下一节中再详细讨论。

在作用于均匀介质中的应力消失后,应变和应力失去平衡,应

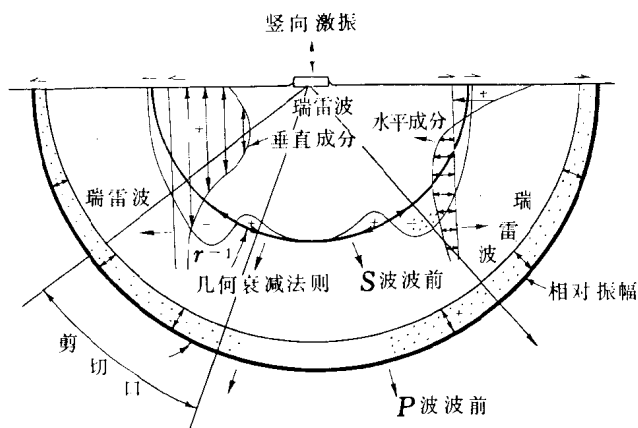


图 1·3 波的类型及波前面

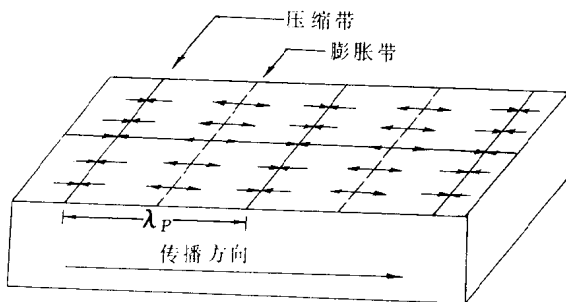


图 1·4 纵波的传播情况

变就在介质中以弹性波的形式由介质中的质点依次向周围传播,质点越致密,介质越坚硬,弹性波传播速度就越快。以 V_P 、 V_S 、 V_R 分别表示纵波、横波和瑞雷波的传播速度,则 V_P 、 V_S 、 V_R 与介质的弹性性质有如下关系:

$$V_P = \sqrt{\frac{(2\mu + \lambda)}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1 - \sigma)}{\rho(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}} \quad (1 \cdot 6)$$