

瑞利波勘探:应用、现状和问题

王兴泰 赵东

(地球物理系)

摘要 首先列举了瑞利波勘探的具体应用,简述了其应用及研究现状,最后结合浅层勘探的复杂性,重点论述瑞利波勘探中存在的问题,并提出相应的解决方法和思路。

关键词 瑞利波勘探 相位展开 物质频散 非均匀性 反演

英国学者瑞利(Rayleigh)于1887年在理论上证明均匀半空间瑞利波的存在。

本世纪50年代初,瑞利波在层状介质中具有频散特性被发现后,人们开始利用天然地震记录的瑞利波来研究地球内部结构。但受当时计算技术的限制,研究所得的结果精度低。

60年代后,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,对瑞利波的研究也有很大的发展,其主要标志是出现了瑞利波频散曲线的快速计算。

70年代初,美国F. K. Chagn和R. F. Ballard等人利用瞬态激振产生的瑞利波来研究浅部地质问题,但受当时技术条件的限制,这种应用未能成功。这次尝试和研究却揭开了浅层地震波勘探的新篇章,引起了许多地球物理学者的注意,开始了对瑞利波理论及方法技术的深入研究,试图将其有效地应用到工程地质勘探诸多领域中^[1~5]。

1 应用范围

长期以来,地球物理学家和应用数学家为利用天然地震产生的瑞利波研究地球内部结构进行了大量的工作,取得了一系列理论成果,提供了关于地球内部结构、地壳及地幔的物质组成、大地构造和减轻地震灾害等地球物理证据^[3,6]。

利用人工激发的瑞利波可以解决如下几方面的具体浅层地质问题。

(1)地层划分:通过对瑞利波频散曲线进行定性及定量解释,得到各地层的厚度及弹性波的传播速度。

(2)地基加固处理效果评价: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的物理力学性质的改善程度。

(3)岩土的物理力学参数原位测试:通过对实测资料的反演解释,可以得到岩、土层的S波速度、P波速度及密度等参数。

第一作者简介 王兴泰 男 58岁 教授 地球物理学专业 已发表“用遗传算法进行瑞利波反演”等论文

收稿日期 1995-03-17

(4)公路、机场跑道质量无损检测:利用人工激发的高频瑞利波,可以确定路面的抗折、抗压强度及路基的载荷能力,以及各结构层厚度。该方法用于机场跑道及高等级公路的另一项意义是实现质量随年代变化的连续监控。

(5)地下空洞及掩埋物的探测:当瑞利波的勘探深度与地下空洞及掩埋物的深度相当时,频散曲线会出现异常跳跃,据此可以确定其埋深及范围,这是瑞利波勘探的独特优点之一。

(6)饱和砂土层的液化判别: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,可以计算出饱和砂土层的液化临界波速值。

(7)场地类型划分:通过面积性的瑞利波探测,再结合微动观测,可以更可靠地划分场地类型,或更大范围的地震区划。

(8)其它方面的应用:滑坡调查、堤坝危险性预测、基岩的完整性评价和桩基入土深度探测等^[5]。

和已有的浅层折射波法和反射波法相比,瑞利波的独特之处是它不受地层速度差异的影响,折射波法和反射波法对于波阻抗差异较小的地质体界面反映较弱,不易分辨,尤其是折射波法要求下覆层速度大于上覆层速度,否则为其勘探中的盲层,瑞利波法则不存在这类问题。

以上列举的瑞利波所能解决的工程地质问题,是从瑞利波勘探的原理出发得出的一些理论性结论,目前还很少有解决所有这些问题的应用实例。

2 应用和研究现状

2.1 应用现状

美国学者于70年代应用瞬态激振法进行瑞利波勘探的试验未能成功后,日本学者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探机,利用稳态激振法产生瑞利波,进行工程地质勘探。GR-810勘探系统配有一套不同重量的激振器,根据勘探深度的不同,选用不同的激振器。激振器产生简谐振动,不同频率的振动探测不同的深度。频率高,相应的波长短,探测的深度小;频率低,波长长,探测的深度大。由于振源作单频振动,记录的信号易于分析,结果可靠,但这种稳态勘探系统的设备笨重,工作效率低,使它的普及应用受到限制,于是出现了瞬态法。

瞬态法检测的是瞬态振源激振产生的瑞利波,通过对相邻道记录作傅氏分析,求出各个频率分量的相位差,进而求得相应频率的波速。这种方法开始只用了两个检波器,最近两年,一些生产和研究单位开发研制出多点瞬态瑞利波勘探系统,该系统充分利用一般浅震仪的多通道特点,极大地提高了瑞利波勘探效率。但是这种方法中的相位展开问题没有很好地解决,所以结果的可靠性有待提高^[5]。

目前瑞利波在实际应用中,主要用于划分地层、提取层速度和对空洞进行探测。

2.2 研究现状

目前,在瑞利波勘探中,从瑞利波提取到反演地下介质,都是基于完全弹性均匀层状介质模型,基本上引用地震学中早期有关的面波理论。至于浅层介质的复杂性,从现有的文献来看,在瑞利波勘探中很少加以考虑。

由于面波理论的复杂性,通过物理实验和野外试验对其进行研究是一个较好的选择。一

些研究单位开展了瞬态法和稳态法的对比研究,对较复杂介质的一些物理模拟也有了进展^[7]。

总的情况是对瑞利波的理论研究在工程物探界没有引起足够的重视,一些关于瑞利波的新成果都是地震学家搞出来的,这些研究成果越来越多地考虑了介质的横向变化(如断层等),但几乎没有人将这些成果引入瑞利波勘探中。

3 问题

在瑞利波勘探中,存在几个明显的问题,分别介绍如下。

3.1 瞬态法中的相位展开

有人总结了已有的六种相位展开方法,并将这些方法的结果进行比较,得出的结论是:对一些单频或只含几个频率成分的简单理论曲线,这些方法的结果都令人满意,但对复杂的合成记录,这六种方法的展开结果没有一种是精确的,在某些频段产生很大的误差。这种相位展开问题存在的原因现在看来主要是傅氏分析方法的不足,近年来发展起来的小波分析及分形理论可能会解决这些问题,尽管小波分析是傅氏分析理论的一种升华,而不是全新的理论^[8]。

3.2 介质的粘弹性引起的物质频散效应

瑞利波勘探的基础是它的频散效应,这种效应是介质的层状引起的几何频散。我们知道,当介质为非弹性时,地震波在其中会发生频散,这种频散是物质频散。在P波或S波勘探中,物质频散效应十分明显,但这对结果的影响不是很大,只影响初至的提取和损失分辨率,但在瑞利波勘探中就完全不同,因为它就是靠相位展开来确定速度,这种频散肯定不能忽略。现在的问题是由于介质的粘弹性引起的这种物质频散和介质的层状引起的几何频散叠加在一起后,前者的影响到底有多大。可是,迄今为止,还没有关于粘弹性介质的完善理论,人们只是提出了几种简单的模型,由这些模型得到的结果对某些频率范围效果较好,对某些频率范围则有很大误差。看来,用物理实验来解决这个问题会更可靠一些^[9,10,11]。

3.3 横向非均匀性引起体波和面波的相互转换

在瑞利波勘探中,瑞利波的能量占2/3,P波和S波能量较小,所以由于横向非均匀性引起的体波向面波转换部分的能量也小,但面波向体波转换的能量就不得而知,这要看介质横向非均匀性的强弱^[10]。

3.4 横向非均匀性引起不同振型面波之间的相互转换

面波具有不同的振型,各种振型具有不同的截止频率,基阶振型的截止频率为无穷大,一阶、二阶振型截止频率从某一较小值依次升高。基阶振型能量在所有振型中占大部分,由于横向非均匀性引起不同振型面波之间的转换,也使问题变得复杂。在瑞利波勘探中主要是接受基阶振型的瑞利波,通过控制最高接收频率,可以部分地抑制高阶振型的影响。

不能用解析法对付问题(3)和(4),只有通过半解析法或数值方法来解决,如格林函数法、有限元或边界元等方法。从已有的结果看,其可靠性有待进一步验证^[7,12,13,14]。

3.5 平面瑞利波和柱面瑞利波的差异

在地质学和瑞利波勘探中,都假设瑞利波由线源激发,其波阵面为平面。当震(振)源和测站足够远,这种假设是合理的,但在瑞利波勘探中,振源和检波器一般很近,这种假设就不妥当,应考虑点源激发的柱面瑞利波。所以要进一步弄清平面瑞利波和柱面瑞利波的差异。

3.6 瑞利波反演

这也是一个很麻烦的问题。和其它地球物理问题一样,瑞利波反演得到的解具有高度的非唯一性。传统的阻尼最小二乘法属于局部最优化方法,它需要较苛刻的初始模型,而已有的几种简单的反演解释方法也有明显的不足。日本学者首先用到的求取层速度的近似方法,隐含着—个条件,即瑞利波速度是一定深度内各层波速的加权平均,且其权系数只与各层厚度有关,而与各层深度无关,这显然是错误的。另外拐点法、渐近线法只适用于二层和三层介质,而且其中含有许多统计的成分,不能适应勘探的实际需要。更值得注意的是,以上几种方法都用到深度和波长转换公式: $H = \beta \lambda_r$,这里的转换系数 β 不是以往所认为的0.5,其变化范围相当大,这进一步加剧了这些方法的不可靠性。近年来兴起的遗传算法(GA)有效地解决了瑞利波反演问题,在介质层数给定的情况下,作者用遗传算法得到了足够满意的结果。

在面积性的工程地质勘察中,将涉及二维瑞利波勘探问题。当所研究区域内介质波速横向变化不强烈时,利用某一频率(从而反映某一深度范围)瑞利波的走时,可进行瑞利波速重建;当对不同频率的瑞利波速进行反演时,就实现了一种瑞利波层析成像。作者用BG方法进行了此项工作,效果很好^[15,16,17,18]。

在非均匀介质中,面波会发生散射,散射面波也可以被用来对地球内部的非均匀性进行成像,这属于全息成像方法。国外已做过试验,证明这种全息成像方法是可行的^[19]。

3.7 瑞利波在垂向突变带上的折射和反射

对这类问题,地震学家已进行了大量的研究,尽管各种方法的结果彼此吻合不太好,但比较一致的结论是:瑞利波的反射和透射系数随着波长的不同而变化。作者认为在进一步研究这类问题的同时,再辅以一些物理模拟和野外试验,确定已知垂向断面上的折射系数和反射系数(即使是总结的经验结果),则可利用瑞利波记录。在进行相位分析的同时,也可利用其振幅特性,对垂向突变带进行研究。Tekins和Watt曾给出实现这种方法的简单过程^[3,7,12]。

从以上阐述中,我们已发现瑞利波法存在的问题比反射波法和折射波法多而复杂,这是由瑞利波不寻常的物理性质和较复杂的理论决定的。但瑞利波并不是不可捉摸的,以上所列举的问题也有主次之分。问题(1)和(2)是瞬态法中的首要问题,必须首先解决,好在瑞利波勘探中,瑞利波的波形不很复杂,这样问题(1)相对减轻。其余五个问题为瞬态法和稳态法所共有,当前问题(3)和(4)可放在次要位置,关于问题(5)和(6)作者已在不同程度上给予了解决,而问题(7)的解决也不难进行。

本文是作者在阅读大量文献的基础上总结出来的,目的是为了引起工程物探界对瑞利波研究的重视。但缺乏对足够实际资料的分析,不当和偏颇之处,敬请同行和专家指正。

参 考 文 献

- 1 伊文 W. 层状介质中的弹性波. 刘光鼎译. 北京:科学出版社,1966
- 2 萨瓦林斯基 E Ф. 地震波. 段星北译. 北京:科学出版社,1981
- 3 汉尼加 A. 地球中地震波的传播. 何樵登,杨宝俊译. 北京:地质出版社,1990
- 4 Chang F K, Ballard R F. Rayleigh wave dispersion technique for rapid subsurface exploration. 第43届国际地球物理年会,1973

(下转 100 页)