

瞬态瑞利波法在探测地下管线中的应用

刘 庆

武汉市汉阳市政建设集团有限公司 湖北武汉 430050

摘要: 在过去的几十年里, 瞬态瑞利波法已经成为地质技术工程的新兴发展方向。本文提出了一个散射弹性波的一般反演算法, 目的是研究利用散射面波获得浅层异质体的空间和深度解析图像的可能性。结果表明: 原则上我们可以通过几个特征频率, 得到深度为一个波长范围内的异质体的位置和尺寸。通过简单的模型实验及案例分析, 对于浅层异质体的探测效果较为准确。

关键词: 有限元; 瑞利波; 频散曲线; 反演

Application of transient Rayleigh wave method in detecting underground pipelines

Qing Liu

Wuhan Hanyang Municipal Construction Group Co.Ltd., Wuhan 430050, Hubei, China

Abstract: In the past few decades, transient Rayleigh wave method has emerged as a new development direction in geotechnical engineering. This paper proposes a general inversion algorithm for scattered elastic waves with the aim of studying the possibility of obtaining spatial and depth-resolved images of shallow heterogeneous media using scattered surface waves. The results show that, in principle, we can obtain the location and size of heterogeneities within a wavelength range using several characteristic frequencies. Through simple model experiments and case studies, the detection of shallow heterogeneities proves to be accurate.

Keywords: Finite element; Rayleigh wave; Dispersion curve; Inversion

引言:

地下溶洞、地下管线的存在不仅会影响工程施工, 还会对道路基础产生不利影响, 严重时可能引发安全事故。因此, 在施工前对场地进行勘探是非常重要的, 也是保证地上建筑物安全的前提和基础。采用钻孔、开挖等方式进行探测必然会对现状土层产生影响, 因此无损检测技术就显得尤为重要了。其中瑞利波法由于其相对于现场实施, 而且成像效果好, 已经成为探测地下管线的标准技术。而频散曲线的反演是建立在将要研究的介质是平面层状(允许平滑的横向变化)的假设之上的。本文使用时频分析和频谱分析来分析地下管线的形状和位置的参数。

一、瞬态瑞利波法简介

瞬态瑞利波法(MASW)作为一种在浅地层勘探领域得到了广泛的应用的分析方法, 其工作原理可以大致的分为三个部分: 第一部分是使用落锤法或电机激振来

激发瑞利波, 使得土体内产生频率成分较为复杂的瑞利波信号; 第二部分是通过布置的传感器接收时域信号, 并通过仪器转换成相关的图像; 第三部分是通过数据分析软件, 将嘈杂的信号进行过滤, 提取出相对精确的瑞利波信号进行分析^[1]。简单的来说, 瞬态瑞利波法就是将提取到不同阶的频散曲线进行反演, 得到相对应的地层剪切波速, 通过剪切波速的差异变化, 从而分析出地下不同的情况。

二、分析方法

在 $x=(x, y, z)$ 处观察到的散射场的垂直速度分量可表示为散射域D上的积分:

$$v^1(x, x^s) = \omega^2 \int_{x \in D} \mu_k^G(x, x^s) v_k(x, x^s) \sigma(x^s) dV \quad (1)$$

式中, σ 表示对比函数。我们通过省略子项3来简化符号, 以表示格林函数的第三分量和该方程左侧速度的第三分量。

为了有效计算浅层异质体引起的散射场, 需要使用了一种基于矩量法的计算方案。当散射发生在接收器附近的情况下(即在近场), 这种方法与渐进方法相比是比较准确的, 它通常比有限差分方法更有效。在这种方法中, 散射场的计算方法是首先使用矩量法求解散射域中观测位置的总场的积分方程。一旦知道了散射域的场, 就可以用公式(1)计算表面的场。这里, 我们使用他们的公式作为反演方案的起点, 以确定近地表异质性的特性。在正向问题中, 右手边的未知数是散射域内的场^[2]。在反演问题中, 散射域内的场和对比函数都是未知的。它是非线性的, 因为散射域中的场取决于它与嵌入物的对比。使用共轭梯度方案, 我们迭代地最小化一个成本函数, 包括实际散射场和用我们的模型得到的散射场之间的平方差。这个成本函数被定义为:

$$F^{(j)} = \frac{\|v - G_s \sigma^{(j)}\|^2}{\|v\|^2} \quad (2)$$

式(2)中 G_s 是一个通过定义的运算符。

$$\{G_s \sigma^{(j)}\}(x, x') = \omega^2 \int_{x' \in D} \sigma^{(j)}(X') u_k^G(x, x') v_k(x') dV \quad (3)$$

式(3)中构建一个序列 $\{\sigma^{(j)}\}$, 对于 $j=0, 1, 2, 3, \dots$, 通过更新对比函数 $\sigma^{(j)}$, 如下所示:

$$\sigma^{(0)} = 0 \quad (4)$$

$$\sigma^{(j)} = \sigma^{(j-1)} + \alpha^{(j)} \omega^{(j)}, (j \geq 1) \quad (5)$$

式中: $\alpha^{(j)}$ 是步长, $\omega^{(j)}$ 是更新方向。

对于每个迭代 j , 将散射域中的场作为常数: $v_k^{(j-1)}$ 。然后, 利用新的对比度 $\sigma^{(j)}$, 采用Riyanti和Herman所述的积分方程方法更新散射域(D)的场^[3]。最后, 利用公式(1)计算表面的散射场。这个过程不断重复, 直到能够达到一个足够小的成本函数值。

三、案例分析

借助有限元软件ANSYS动力学模块LS-DYNA模拟瞬态瑞利波, 对含有地下管线的模型进行数值模拟。瞬态动力学能够用于分析结构的动力响应。

1. 地下管线位置、尺寸确定

首先, 本小节研究是否可以通过散射表面波的反演来解析浅层散射体的位置, 所以必须考虑反演中特征频率的数量于迭代次数的关系。震源在表面位置 $(x, y) = (0, 0)$ 处被激发, 本小结使用100Hz的主频率的Ricker子波源。震源区域的尺寸为 $0.2 \times 1\text{m}$, 单元尺寸为 0.02m , 除了加载区域以外的单元尺寸为 0.04m 。选取土层的参数为: $c_s = 1000\text{m/s}$, 泊松比 $\nu = 0.3$, 密度 $\rho = 1500\text{kg/m}^3$ 。使用这些参数, 主瑞利波长约为 10m , 散射域的顶部位于地表以下 5m 。对于这个模型, 本文假设

知道散射体的空间位置, 这样我们就可以只考虑一个有限的反演域。

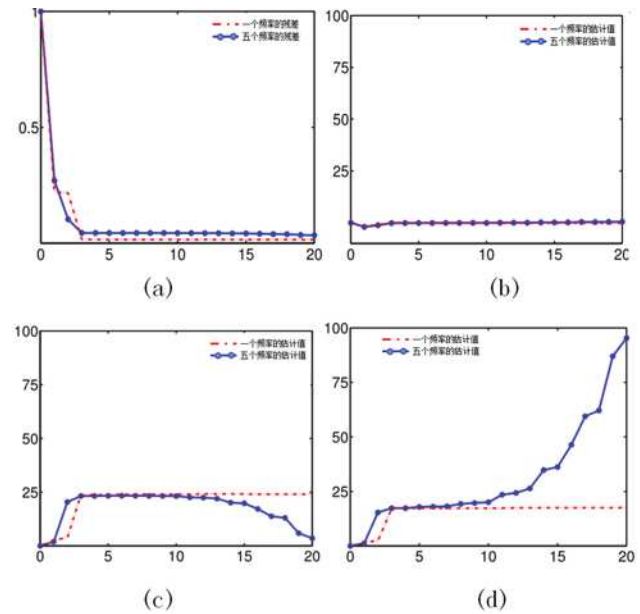


图1 散射面波的反演

图1显示了残差与1个频率(虚线)和5个频率(实线)的迭代次数。由图1(a)中可以看出, 在这两种情况下, 全局误差同样收敛于阈值。然而, 如果对比不同单元中实际对比度值的单个估计值, 可以观察到较深单元的明显差异。对于最浅的单元, 模拟结果表明使用1个或5个频率, 估计值是一样的。如果使用5个频率, 中间单元的实际对比度比较准确, 但只使用一个频率, 实际值比估计值要高很多。对于最深的单元, 使用5个频率, 得出的估计值比较准确。如果只用一个频率, 这个估计值就会偏低。因为5个频率在不同的深度对浅层次表面进行采样, 散射体可以在深度上得到解决。只使用主导频率, 误差同样被最小化, 但对比度在两个较深的单元上被平均化了^[4]。对比图1中(b)~(d), 在使用5个频率的情况下, 对比度值首先以与单一频率相同的方式更新, 并在10次迭代后才开始收敛到正确的值。由图1可知, 瑞利波遇到地下管线时明显发生散射, 提取散射域的特征频率值进行反演可以得出地下管线的位置, 同时计算出地下管线的尺寸。计算结果显示, 不同埋深的地下管线位置、尺寸计算误差均在2%以下, 满足实际工程的精度要求。另外, 由误差增长趋势可知, 表面波场中瑞利波的能量随着深度的增加而减小, 其大部分能量都集中在一个波长范围内。因此, 随着地下管线埋深的增加, 瑞利波散射场对表面波场的影响就越不容易识别, 其计算精度明显降低, 相对误差就会变大。

2. 地下管线埋深确定

之前的简单模型通过瑞利波的反演可以定量的计算出地下管线的位置及尺寸,但是无法确定地下管线的埋深。将模型尺寸设定为:长 $L=30\text{m}$,高 $H=18\text{m}$ 。震源为中心频率 200Hz 的Ricker子波,总计算时间为 0.3s ,震源在表面位置 $(x,y)=(0,0)$ 处被激发。网格采用正方形,震源区域网格边长为 0.02m ,非震源区域网格边长为 0.04m ,模型边界采用无反射边界。选取土层的参数为: $c_s=1000\text{m/s}$,泊松比 $\nu=0.3$,密度 $\rho=1500\text{kg/m}^3$ 。地下管线设置在距离模型左边界 15m 处,具体参数如表1所示:

表1 模型主要参数表

半无限体参数			地下管线参数	
剪切波速 (瑞利波速) (m/s)	密度 (kg/m^3)	泊松比	埋深 (m)	内空直径 (m)
1000 (927.7)	1500	0.3	2	2
1000 (927.7)	1500	0.3	4	2
1000 (927.7)	1500	0.3	6	2
1000 (927.7)	1500	0.3	8	2
1000 (927.7)	1500	0.3	10	2
1000 (927.7)	1500	0.3	12	2

将接收到的60个时域信号进行汇总分析,就得到了距离震源不同位置的质点速度相应谱图。由于各个点的振幅相差较大,所以将其归一化后进行比较,减小噪音对结果的影响。

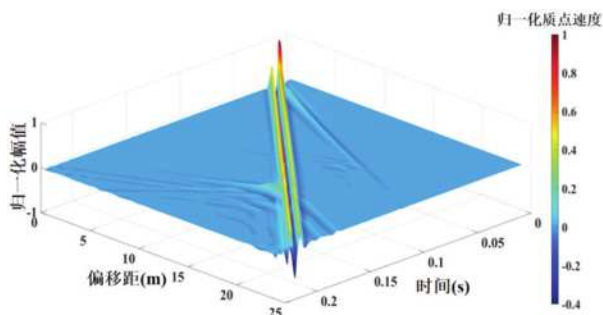


图2 埋深为6m的表面波场图

由图2可以看出,瑞利波遇到地下管线后明显发生反射和散射,由于反射波、透射瑞利波、散射波三者相互叠加影响,导致散射波难以识别。因此,无法直接从时域信号中识别出散射波,需要消除反射波、透射波信号,突出散射波信号,增强散射波场的分辨率。将各接

收器得到的时域图经快速傅里叶变换成频谱图,并从频谱图中提取出频散曲线,将瑞利波的幅值衰减率绘制成图。由此可知,当异质体埋深在一个波长内时,瑞利波的能量衰减最快。当异质体埋深超过一个波长后,瑞利波的能量随着埋深的增加,其衰减率逐渐减小,直至埋深超过两倍的波长之后,瑞利波穿过地下管后能量不会发生变化。由瑞利波的能量变化曲线进行拟合,得到式6:

$$\alpha = \frac{0.9104 \times (d/\lambda)^2 - 2.073(d/\lambda) + 1.275}{(d/\lambda)^2 - 2.471(d/\lambda) + 1.737} \quad (6)$$

式中: α 为瑞利波的能量衰减率; d 为地下管线埋深; λ 为瑞利波波长。

四、结论

1.瑞利波遇到地下管线后会发生散射和反射,散射波能量较小,在表面波场中不容易识别,因此需要对杂波进行消能,突出散射波的能量变化。

2.将瑞利波时域经快速傅里叶变换成频谱,提取散射波的前五阶特征频率值进行反演计算,可以得到地下管线的位置及尺寸。结果表明,计算值的误差较小,该方法的实用性较高。

3.建立瑞利波能量变化和波长之间的关系,将得到的数据进行拟合得出对应公式,可以定量计算出地下管线的埋深。

参考文献:

- [1]张碧星,肖柏勋,杨文杰,曹思远,牟永光.瑞利波勘探中“之”形频散曲线的形成机理及反演研究[J].地球物理学报,2000,43(04):557-567.
- [2]张碧星,鲁来玉,鲍光淑.瑞利波勘探中“之”字形频散曲线研究[J].地球物理学报,2002,45(02):263-274.
- [3]柴华友,汪江波,周一勤,陈星焯.瑞利波分析方法及应用进展[J].岩石力学与工程学报,2002,21(01):119-125.
- [4]邵广周,李庆春.联合应用 τ - p 变换法和相移法提取面波频散曲线[J].石油地球物理勘探,2010,45(06):836-840+936+785-786.
- [5]柴华友,柯文汇,陈健,黄祥国,李忠超.浅部地下洞穴散射波对波场扰动分析[J].岩土工程学报,2017,40(08):1473-1480.