

瞬态瑞利波勘探技术及其应用述评

邱 颖,任青文

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:简要介绍瞬态瑞利波勘探技术的基本理论,重点论述瞬态瑞利波频散曲线的计算方法、频散曲线反演解释中存在的不足、有限元法对 SASW 测试的数值模拟以及现场勘探时应注意的问题,并对瞬态瑞利波应用现状与发展趋势作了述评。

关键词:瞬态瑞利波;勘探技术;有限元法

中图分类号:P624

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2004)03-0066-03

随着地下空间的不断开发与利用,对地下情况的探测显得越来越重要。此外,对已建建筑物内部损伤的检测也随着结构不断老化而日趋重要。因弹性波在其传播过程中携带了许多有关介质特性的信息,同时由于反演方法不断的改进,使得基于弹性波传播理论的各类浅层地震勘探方法得到了蓬勃的发展。反射波法、衍射波法、瑞利波法(R波)等无损检测法以其无需钻孔、测试经济方便等优点,被广泛应用于土木工程中。但是反射波法在进行浅层洞穴探测时,几乎与能量较强的表面波同时到达,难于确定反射波到达的时间;衍射波探测过程中如遇到充满水或者填满固体的空洞时,衍射波到达的时间变化量很小,很难测试出空洞。稳态瑞利波法因其设备较重、成本较高难于推广应用。而瞬态瑞利波法以其测试简便、快速、经济、分辨率高等优点,广泛应用于地基勘探、划分地层、探测岩洞与裂隙、地基加固效果的评价,以及探测路面厚度、工程质量检测、煤矿井及巷道的超前勘探、考古及管道勘探等。

1 瞬态瑞利波基本理论

1.1 瞬态瑞利波法应用的理论基础

在地表附近 R 波引起的质点运动形式是在垂直平面内作逆时针方向的椭圆振动。R 波的能量主要集中在一个波长内,所以其传播特性也主要受该深度内介质特性的控制。Miller 于 1955 年研究了 P 波、S 波和 R 波 3 种弹性波总输入能量的百分比:P 波占 6.9%,S 波占 25.8%,R 波占 67.3%。

R 波波速 v_R 与 S 波波速 v_s 的近似关系^[1]:

$$v_R = \frac{0.847 + 1.117\nu}{1 + \nu} v_s \quad (1)$$

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

式中: E 为弹性模量; ν 为泊松比; ρ 为密度。

对于层状介质,各层介质参数随深度而变化,故瑞利波波速 v_R 随频率而变化,即为频散波,波速 v_R 随频率变化的曲线即为频散曲线。不同频率的瑞利波具有不同的波长,其平均速度就反映不同深度范围内的介质性质,故可以通过频散曲线来反演地下介质的剪切波速度,反映地下介质的结构和性质。

1.2 关于频散曲线的计算

瞬态瑞利波在层状介质及其它复杂介质中有较明显的频散特性。1950 年,Thomson^[2]首次应用矩阵方法在假设层面两侧的应变连续条件下得出弹性波在水平多层介质半无限大空间体内传播的理论频散曲线。Haskell^[3]对 Thomson 的方法进行了修正,补充了层面两侧的位移连续条件,但是因指数项的存在还是不能避免有效数字的损失。随后,Knopoff, Dunkin, Waston 等建议了一些方法,在一定程度上解决了这个问题,但都不便在计算机上实现。为解决这一问题,陈云敏^[4]、任青文^[5]、林维正^[6]等对特征曲线的计算进行了研究,但是在如何计算多阶行列式以及如何保证数值计算稳定性方面仍没有得到较好的解决。目前,尚需进一步探讨和完善的问题如下:

a. 瑞利波频散曲线的理论计算。在大多数频散曲线的计算方法中,由于传递矩阵各元素的量纲不同,计算过程中可能出现复值,直接影响计算的稳定性。而且很多方法都是基于层状介质中的平面瑞利

波的频散特性,基于此,文献[7,8]导出了层状介质中轴对称柱面瑞利波的频散方程及该方程的快速矢量传递算法,该算法也适用于平面瑞利波和非轴对称瑞利波频散曲线的计算,但是在采用表面波波谱分析方法(spectral analysis of surface waves,简称SASW)进行无损检测时对该算法应用较少。

b. 瑞利波频散曲线的反演解释. 频散曲线反演属于非线性最优化问题,而20世纪90年代广泛应用的最小二乘法却属局部线性化方法,它常常导致解估计陷入目标函数的局部极小值之中,且对初始模型的依赖性较大.文献[9]提出的遗传算法是一种非线性全局搜索方法,不易陷入局部最优解,但是仍然以其它反演解释获取的初始模型为前提.近20年来,人工神经网络的快速发展为频散曲线的非线性反演提供了重要的途径。

由于基于层状介质模型的理论本身就存在先天的不足,加上对“之”字形频散曲线机理及对模式波理论研究程度不够深入,从而限制了瑞利波理论的合理使用.另外,仅仅通过频散曲线上“之”字形的形状大小或者锯齿状摆动的剧烈程度来划分地层界面,判断空洞、异常物、断层破碎带等,可能会与实际情况产生较大的误差.如果能够避开“之”字形频散曲线的反演问题,转而应用波包和能量团作为分析对象不失为一种好的方法^[10].因为瑞利波的频散特征主要源于基阶和高阶模式的截止频率,其基阶模态与层状介质的层参数有着密切的关系.这些理论及近年来瑞利波勘探在工程实践中的一些成功应用,可以充分说明通过分析瑞利波的模态特征来获得下伏介质结构的物性是可行的。

c. 有限元法对SASW测试的数值模拟.在波动问题中,由于物体几何形状的不规则或介质的不均匀性等原因,要得到问题的解析解往往是困难的.有限元是目前应用最广泛的一种数值分析方法,为处理弹性波问题提供了一个有效的途径.但是把无限连续域进行有限化和离散化无疑会使结果偏离精确解,所以在利用有限元来模拟SASW测试时,应通过人工边界的设置及网格的优化来减小因有限化和离散化而带来的误差。

文献[11]借助有限元方法来模拟SASW测试,针对不同形状及不同埋深的异常物和孔穴对频散曲线的影响进行了深入的研究,并将有限元得到的结果与实验测试和一个简单数学模型进行了比较.文中将边界设置在远离震源处,通过对计算时间的设置来避免边界对检波器附近波场的影响,这也是一种处理边界条件的方法.但是这种方法由于网格的增加显然会降低求解的效率.另一种方法是通过设

置人工边界条件(artificial boundary conditions 简称ABC)来减小边界的影响^[12].但是对于复杂的边界条件,人工边界的设置非常困难,例如对黄河大堤混凝土防渗墙的质量检测,不仅现场检测时由于边界的影响得不到理想的频散曲线,而且如何在有限元数值分析中模拟混凝土墙两侧土以及施工缝对波场影响等,都是目前瞬态瑞利波现场检测及数值模拟中难以解决的问题.对于由于离散化而带来的误差,可以通过网格优化来减小,建议在地表处有限元网格划分较细密,而在远离震源处,网格则向边界逐渐增大.文献[13]利用有限元和解析法推导了求解上软下硬地基、夹层地基及道路结构瑞利波频散曲线及位移分布的计算公式.文献[14]利用有限元分析了道路结构的瑞利波传播特性,并提出了适合于道路结构动力计算的方法。

2 瞬态瑞利波现场测试

瞬态瑞利波测试是由一个垂直作用于地面的冲击震源(爆炸、落重、铁锤等)产生信号,用两个或多个检波器从震源开始沿直线布置,对一定频率范围内的瑞利波信号进行记录.现场测试时,应合理选择震源、检波器频率、偏移距、道间距等.当采用两个检波器时,检波器应对称布置在测点两侧.为了消除近场波动的影响,震源与最近检波器的距离通常等于两个检波器之间的距离.同时为消除设备内部的相位及分层倾角的影响,对于同一地点的测试可以进行几次相同的测量,即通过改变震源的位置再做几次检测。

在某些边界条件比较复杂的情况下,如何获得良好的瑞利波记录以保证其频散曲线的正确性这一问题没有很好地解决.例如在对黄河大堤混凝土防渗墙的质量检测时,由于边界条件及介质的复杂性,在反射波、折射波、衍射波、Love波等的干扰下,几乎得不到理想的频散曲线.两道瞬态瑞利波测试方法虽然简单,但其所受干扰较大,尽管可以采用滤波技术,但其结果不可能是单一的频率成分.如果采用多道信号叠加方法测量相速度频散,则必须利用多道记录,而且所给出的频散曲线是沿测线的一个平均结果,不能准确反映道间的介质变化情况,这就给反演测线以下介质的横向结构带来了困难。

3 瞬态瑞利波在工程勘察中的应用进展

1959年,Jones首次利用瑞利波来测试原状土的弹性模量^[15],但限于当时的实验设备和数据处理手段,试验最终以失败而告终.在最近的20年内,由于计算机在信号处理领域应用的发展及计算机数值模拟能力的突飞猛进,为瑞利波应用于现场测试提供

了条件.20世纪80年代中期,美国得克萨斯大学的Nazarian^[16]等总结了瑞利波在土木工程中的应用,概述了SASW在岩土工程和道路工程中运用的理论依据和试验结果,并把瑞利波现场测试方法简化到切实可行的程度.他们用实测得到的瑞利波曲线为依据,通过反演确定各土层的模量,至此奠定了瑞利波测试的基本方法.

3.1 岩土参数原位测试

由频散曲线反演得到横波波速进而计算纵波波速,然后利用相关公式便计算出介质的动弹模、动泊松比、动剪切模量等岩土力学参数.近10年来对瑞利波波速与地基承载力和变形模量之间的关系也做了大量的研究工作,文献[17]给出了相应的公式及表格.

3.2 地层的划分

目前多采用半波长法经验公式通过计算得到层厚度和层速度的函数关系,并根据速度差异进行分层,从而得到测试点的频散曲线.文献[18]研究了瑞利波勘探技术在第四系分层方面的应用,但是半波长法是基于匀质条件下的近似公式,缺乏理论依据且存在较大的误差,会直接影响瑞利波勘探的解释精度.文献[19]从理论上探讨了瑞利波波长与探测深度之间转换关系,引入波长深度转换系数得出其与界面深度、层厚度的关系,但是这仍属于一种半定量的估算.目前,就如何提高波长解释法的精度问题仍需要深入研究.

3.3 地下异常物、裂隙、孔洞等的检测

1996年,Nenad Gucunski^[20]等发现地下异常物也会反射瑞利波,从而引起频散曲线的波动,因此他认为可以根据频散曲线的波动情况来确定地下异常物的位置、大小和性质.近年来瑞利波在无损检测方面的应用论证了这一结论.但是弹性波在有损介质中的传播规律现在仍然没有被完全掌握,这一点大大限制了瑞利波在探测地下异常物、结构中裂隙及孔洞等方面的应用.目前根据频散曲线的波动情况,只能粗略地判断异常物、裂隙、孔洞的尺寸及位置.

此外,瑞利波技术在地基加固效果评价^[21]、预测基桩承载力^[22]、道路质量无损检测、场地土类型的划分等方面有着广泛的应用.

4 结 论

瑞利波检测的数学模型均为层状水平均匀介质,对成层地基检测有比较成熟的理论和方法,已成为采矿、地质勘查等领域的主要物探方法之一.但目前对于混凝土结构中的裂缝、土体中的空洞、岩体软弱带等的检测还处于研究阶段.因为波在遇到障碍物及复杂边界条件时,会发生反射、折射、衍射、绕射等现象,使得波在复杂介质特别是有损介质中的传播规律非常复杂,很难了解清楚,从而限制了它在土

木工程结构无损检测方面的应用.

参考文献:

- [1] 杨桂通,张善元.弹性动力学[M].北京:中国铁道出版社,1988.
- [2] Thomson W T. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium[J]. Journal of Applied Physics, 1950, 21: 89 ~ 93.
- [3] Haskell N A. The dispersion of surface waves on multilayered media[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1951, 43(1): 27 ~ 34.
- [4] 陈云敏,吴世明.成层低级的 Rayleigh 波特征方程的解法[J].浙江大学学报(工学版),1991,25(1):40 ~ 50.
- [5] 任青文. Rayleigh 表面波理论频散曲线的特征方程解法[J].河海大学学报(自然科学版),1995,23(5):32 ~ 38.
- [6] 林维正,苏勇. Rayleigh 表面波频散曲线的特征方程的计算方法[J].同济大学学报(自然科学版),1997,25(5):570 ~ 574.
- [7] 凡友华,刘家琪,韩波.瑞利面波频散曲线的理论计算研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2001,28(3):10 ~ 16.
- [8] 凡友华,刘家琪,肖柏勋.计算瑞利波频散曲线的快速矢量传递算法[J].湖南大学学报(自然科学版),2002,29(5):25 ~ 30.
- [9] 赵东,王光杰,王兴泰,等.用遗传算法进行瑞利波反演[J].物探与化探,1995,19(3):178 ~ 185.
- [10] 朱德兵.超浅层弹性波波振二相拟模态试验分析理论研究[D].长沙:中南大学,2002.
- [11] Ganji V, Gucunski N, Maher A. Detection of underground obstacles by SASW method—numerical aspects[J]. J Geotech and Geoenvironmental Engrg, 1997, 123(3): 212 ~ 220.
- [12] 廖振鹏.工程波动理论导引[M].北京:科学出版社,1996.141 ~ 181.
- [13] 夏唐代,陈云敏,吴世明.匀质软夹层地基瑞利波弥散特性[J].振动工程学报,1993,6(1):42 ~ 49.
- [14] 夏唐代,胡永生,杨顺群,等.道路结构瑞利波特性及动力响应分析[J].郑州工业大学学报,2000,21(1):19 ~ 22.
- [15] Addo K O, Robertson P K. Shear-wave velocity measurement of soils using Rayleigh waves[J]. Canadian Geotech Jr, 1992, 29(3): 558 ~ 568.
- [16] Nazarian S. In-situ determination of elastic moduli of soil deposits and pavement systems by spectral-analysis-of-surface waves method[D]. Texas: Un Of Texas at Austin, 1984.
- [17] 陈宏林,丰继林.工程地震勘察方法[M].北京:地震出版社,1998.
- [18] 杜正涛,刘丽敏,程道伟.瑞利面波勘探技术在第四系分层方面的应用[J].物探与化探,1999,23(4):277 ~ 282.
- [19] 张恒山,王庆海.瑞利波勘探的波长解释法新探[J].物探与化探,1998,22(4):279 ~ 283.
- [20] Gucunski N, Ganji V, Maher M H. Effects of obstacles on Rayleigh wave dispersion obtained from the SASW test[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1996, 15(4): 223 ~ 231.
- [21] 赵金龙,吕德龙,杜永清.瞬态瑞利波检测碎石桩地基的效果评价[J].西部探矿工程,2000,63(2):54 ~ 56.
- [22] 张献民,王建华,武炜.应用瞬态面波预测基桩承载力[J].天津大学学报(自然科学版),2002,35(6):726 ~ 730.

(收稿日期:2003-08-25 编辑:张志琴)