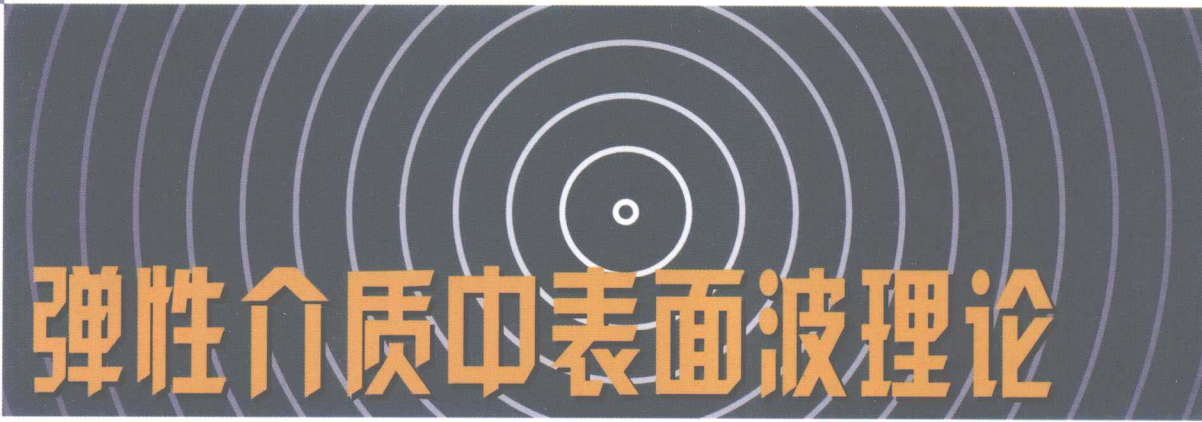


TANXING JIEZHIZHONG BIAOMIANBO LILUN
JIQIZAI YANTU GONGCHENGZHONG YINGYONG



弹性介质中表面波理论 及其在岩土工程中的应用

柴华友 吴慧明 张电吉 刘绍波 编著

 科学出版社
www.sciencep.com

弹性介质中的表面波理论 及其在岩土工程中的应用

柴华友 吴慧明 编著
张电吉 刘绍波

科学出版社

北 京

内 容 提 要

全书共 16 章,从波动理论出发,介绍了传递矩阵、薄层刚度矩阵计算平面或柱面瑞利波模态频散曲线及位移方法;基于模态在层中的能量透射率,分析了模态频散曲线高频及低频渐近趋势与分层剪切波速的关系;讨论了泊松比、密度及阻尼比对模态频散曲线的影响以及分层状态对波场各阶模态能量分配的影响;给出了半无限体在点源或面源作用下表面位移;利用传递矩阵法及薄层刚度矩阵法导出分层介质在点源或面源作用下位移解;分析了波场位移解与模态位移解间的关系。

书中还介绍了目前在岩土工程及金属无损超声检测中广泛应用的两点及多点表面波测试方法;讨论了测试及分析过程一些影响因素,给出了表面波测试得到的有效相速度分析方法。最后,书中还介绍了表面波在岩土工程及超声无损检测一些领域的应用。

本书适合从事地球物理勘探、岩土工程、混凝土及金属构件超声检测工程技术人员及科研人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

弹性介质中的表面波理论及其在岩土工程中的应用/柴
华友等编著. —北京:科学出版社,2008
ISBN 978-7-03-022213-8

I. 弹… II. 柴… III. 弹性—介质—表面波—应用—岩
土工程 IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 080061 号

责任编辑:王雨舸 / 责任校对:梅 莹
责任印制:董艳辉 / 封面设计:苏 波

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市新华印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008 年 6 月第一次印刷 印张:18 3/4

印数:1—4 500 字数:500 000

定价:50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

表面波测试越来越多地应用于工程地质勘察、地基加固处理效果评价、路基检测、地下异质体探测、混凝土及或金属构件裂纹、空洞无损检测等领域。然而,影响表面波测试因素很多,不同的测试方法,影响因素也不同。对两点测试的互谱分析来说,数据筛选是很重要的,采用不同的筛选准则得到的结果可能不同;对多点测试的波数-频率域分析,测点距、测点最大空间距离是影响测试结果关键因素,同一场地,不同测点布置得到的频散数据可能不同,对数据分析、解释也要采用不同的方法。这就要求现场测试及分析人员必须具备一些表面波理论知识及一定的测试经验,因此,系统地介绍分层介质中表面波理论及测试、分析方法对测试及分析人员是很有必要的。

全书分理论分析和测试应用两部分内容,共 16 章,分别是:绪论(第 1 章);曲线坐标下弹性基本理论(第 2 章);波动分析(第 3 章);波的反射和透射(第 4 章);波在自由杆、空心圆柱及板中传播(第 5 章);土的动力特性(第 6 章);水平分层介质中波传播分析方法(第 7 章);水平分层介质中瑞利波传播特性(第 8 章);弯曲介质中瑞利波传播特性(第 9 章);动荷载下半无限体表面响应分析(第 10 章);动荷载下分层介质响应分析(第 11 章);表面波互谱分析方法(第 12 章);表面波互谱分析方法影响因素(第 13 章);频率-波数域分析(第 14 章);有效相速度分析方法(第 15 章);表面波在岩土工程中应用(第 16 章)。前 11 章介绍了波的一些基本知识、分层介质中瑞利波模态频散、瞬态荷载下分层介质响应以及基于传递矩阵及薄层刚度矩阵的分析方法等。后 5 章着重介绍目前在岩土工程界广泛使用的基于互谱分析及波数-频率域分析两种表面波测试方法、测点布置、影响因素及表面波有效相速度分析方法,最后给出了表面波在岩土工程一些领域的应用。本书既适合于从事波动理论分析的科研人员也适合于从事工程检测的技术人员阅读。

在编写本书的过程中得到了浙江宁波开天工程技术有限公司大力支持;中国科学院武汉岩土力学所余诗刚教授、韦昌富教授以及华中科技大学卢应发教授对本书提出了很多宝贵意见,在此表示感谢。

虽然瞬态表面波测试在工程应用已有数十年历史,但该方法数据处理分析仍有很多问题有待解决,书中的一些方法还需在实际工程中进一步验证。由于编者水平有限,书中的错误和不足之处,希望读者及同行专家指正。

编 者

2008 年元月 28 日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 瑞利波基本特性	1
1.2 表面波测试	2
1.3 模态频散曲线分析方法	4
1.4 表面波在岩土参数测试中的应用	4
1.5 表面波在物探方面的应用	5
1.6 表面波测试存在的主要问题	6
1.7 表面波测试进展	7
第 2 章 曲线坐标下弹性基本理论	9
2.1 正交坐标系	9
2.2 微分算子.....	12
2.3 正交曲线坐标系下线弹性理论.....	15
第 3 章 波动分析	23
3.1 波的基本知识.....	23
3.2 直角坐标系波动解.....	31
3.3 柱坐标系波动解.....	36
3.4 直角坐标系层传递矩阵、刚度矩阵	42
3.5 波在半无限体自由表面反射.....	46
第 4 章 波的反射和透射	48
4.1 波在自由面反射.....	48
4.2 波在固体-固体交界面处反射、透射.....	54
4.3 弹性半无限体中表面波	57
第 5 章 波在自由杆、空心圆柱及板中传播	61
5.1 自由杆中波频散方程.....	61
5.2 弹性空心圆柱体中的周向波.....	68
5.3 弹性空心圆柱壳中的纵向波.....	70
5.4 自由板的周期方程.....	71

第 6 章 土的动力特性	75
6.1 土的动力特性描述	75
6.2 小应变情况下土的黏弹模型	76
6.3 土阻尼比	80
6.4 衰减系数与阻尼比关系	81
6.5 阻尼对波传播影响	83
第 7 章 水平分层介质中波传播分析方法	85
7.1 直角坐标下传递矩阵算法	85
7.2 Knopoff 改进算法	87
7.3 柱坐标下传递矩阵算法	94
7.4 薄层刚度矩阵分析	100
第 8 章 水平分层介质中瑞利波传播特性	105
8.1 分层介质中瑞利波特性	105
8.2 刚性基固体层中波	109
8.3 薄层厚度、刚性基位置与波长关系	115
8.4 薄层分析方法	116
8.5 模态能量透射率	117
8.6 分层参数对瑞利波模态频散的影响	118
8.7 模态频散确定性分析	123
第 9 章 弯曲介质中瑞利波传播特性	125
9.1 圆柱曲率对瑞利波传播的影响	125
9.2 表面弯曲半无限体中瑞利波	126
9.3 凹面介质中瑞利波	131
第 10 章 动荷载下半无限体表面响应分析	136
10.1 柱状表面波	136
10.2 简谐点荷载下表面质点响应	138
10.3 瞬态荷载下瑞利波表面质点响应	141
10.4 波场分析	142
10.5 半无限体在面荷载作用下响应	144
第 11 章 动荷载下分层介质响应分析方法	149
11.1 Haskell 传递矩阵方法	149
11.2 改进的传递矩阵方法	150
11.3 薄层刚度矩阵方法	154
11.4 简谐荷载下波场分析	161

11.5 冲击荷载下分层介质响应	162
第 12 章 表面波互谱分析方法	165
12.1 稳态表面波测试方法	165
12.2 互谱分析测试方法	165
12.3 互相关分析	169
12.4 互谱分析数据处理	171
第 13 章 表面波互谱分析方法影响因素	176
13.1 频率分辨率影响	176
13.2 高阶模态影响	177
13.3 波场噪音影响	178
13.4 测试因素影响	181
第 14 章 频率-波数域分析	189
14.1 一维傅里叶变换	189
14.2 二维傅里叶变换	195
14.3 $\tau-p$ 变换	202
14.4 表面波 $f-k$ 分析	206
14.5 表面波多点测试	207
14.6 改进的 $f-k$ 分析	212
14.7 Capon 最大似然法	213
14.8 空间自相关分析	214
14.9 $f-k$ 分析影响因素	215
第 15 章 有效相速度分析方法	227
15.1 相速度近似分析方法	227
15.2 平稳波场有效相速度	229
15.3 非平稳波场有效相速度	233
15.4 基于薄层法有效相速度计算	234
15.5 有效相速度主要影响因素	242
15.6 有效相速度确定性分析	244
15.7 二维剪切波速剖面构筑	246
第 16 章 表面波在岩土工程中的应用	247
16.1 裂缝深度探测	247
16.2 异质体对瑞利波传播的影响	253
16.3 路面厚度及波速测试	261
16.4 碾压层密度估计	262

16.5	衰减系数测试.....	262
16.6	砂土液化分析.....	263
16.7	动力参数及地基刚度系数.....	265
16.8	标准贯入击数.....	266
16.9	土的类型划分及建筑场地类别.....	267
参考文献		269
附录 A	Fourier-Bessel 积分变换.....	274
附录 B	薄层刚度矩阵法计算瑞利波模态频散及模态位移的 Matlab 源代码	277
附录 C	薄层刚度矩阵法计算模态在分层中能量透射率的 Matlab 源代码	281
附录 D	薄层刚度矩阵法计算瑞利波振动传播速度的 Matlab 源代码	286

第 1 章 绪 论

1.1 瑞利波基本特性

1887 年,瑞利(Rayleigh)在研究半无限体弹性介质的波动问题中发现一种与压缩波(或纵波,简称 P 波)及剪切波(或横波,简称 S 波)不同的波,这种波具有以下特性:能量主要集中于介质浅部,随着深度的增加,能量迅速衰减,这种波后来就被称为瑞利波(Rayleigh 波,简称 R 波)。该类型波有水平及竖向两个方向质点运动,在深度约为 $0.15 \sim 0.2\lambda$ (λ 为波长,具体值与泊松比有关)处存在质点振动轨迹的分界线,在分界线上部竖向运动一般滞后于水平运动,运动呈后退椭圆形,下部质点轨迹为顺时针椭圆形,见图 1-1。

Lamb 研究了在不同振源(如点源、线源等)下半无限体弹性介质表面质点位移响应。在脉冲点源的作用下,水平方向和竖直方向表面质点位移响应不同时间段分别与 P、S、R 波对应,见图 1-2。由于 Lamb 对瑞利波研究的贡献,所以在半无限体下瑞利波传播问题,一般称之为 Lamb 问题。Wood 研究了泊松比为 0.25 弹性半无限体在简谐点荷载作用下,各类型波波阵面位移及振动相对幅值^[1],见图 1-3,距振源一定距离后,瑞利波沿介质表面以 $r^{-1/2}$ 几何衰减,P 波、S 波以 r^{-2} 沿表面几何衰减,瑞利波能量占整个波场能量的 67%,剪切波和压缩波分别占 26% 和 7%。

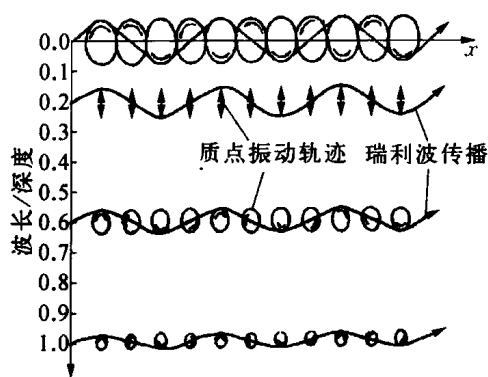


图 1-1 瑞利波质点运动轨迹

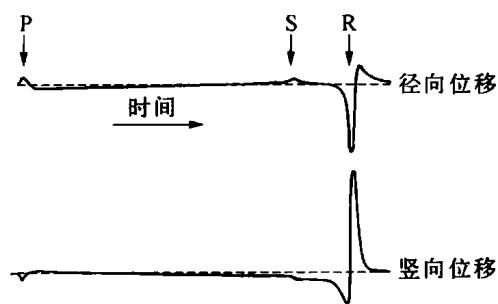


图 1-2 半无限体弹性介质在瞬态荷载下表面质点位移

在水平分层状况下,瑞利波有多个模态,同一频率,不同模态的相速度不同;同一模态,不同频率下相速度是不同的,这就是波的频散特性。频散特性受介质分层厚度、分层数量以及层剪切波速、泊松比等材料参数影响,这表明瑞利波传播特性包含剖面刚度重要信息。

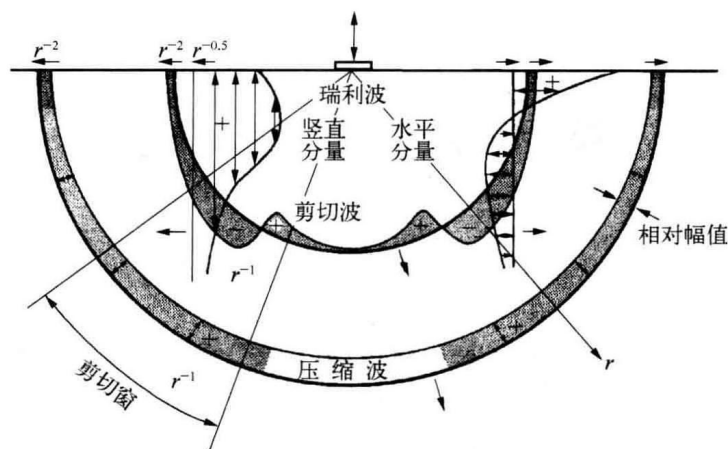


图 1-3 半无限体中压缩波、剪切波、瑞利波质点振动方向、相对幅值及几何衰减

1.2 表面波测试

由于瑞利波的传播特性包含着地下丰富的地质信息,得到瑞利波在分层介质中模态频散曲线就可以对介质的剖面刚度进行分析。瑞利波模态频散特性是无法直接测量的。然而,在介质表面施加荷载(主动振源)或利用微动(被动振源),通过表面响应测试以及对测试信号分析可以间接得到与瑞利波模态频散有关的相速度-频率曲线。表面波一般主要指瑞利波,所以瑞利波测试一般称之为表面波测试。

1.2.1 振源

振源会影响到表面波测试布点方式及测试精度。振源可分为主动振源及被动振源两种形式。

1. 主动振源

主动振源就是由人工来激发,有稳态激振及瞬态激振。

稳态激振就是通过激振频率及激振能量调整来控制激振产生的瑞利波长,提高信号的信噪比,日本 VIC 公司于 20 世纪 80 年代初推出的 GR-810 佐藤式全自动地下勘探机就是采用稳态激振^[2]。手锤、大锤、落重、小型爆炸均可作为瞬态激振振源,振源不同,谱能量分布也不同,根据探测深度,选择合适的激振方式。

2. 被动振源

被动振源就是利用大地的微动,这种微动是由于人类日常活动以及自然现象所产生^[3]。当人类的日常活动为微动振源时,这种微动的主频约为 1 Hz 以上,且其振幅、周期有明显的日变化。另一方面,当主要由风、气压、波浪等自然现象为微动振源时,这种微动的主频约为 1 Hz 以下,其振幅、周期随这些自然现象变化,此外,微动还有随场所而变的特性。微动频谱变化一般是比较微小的,在 2~3 km 空间范围内,持续时间大约为 1 小时的微动可以将其视为一种平稳的随机过程,微动的功率谱基本上是保持平稳的。与主动震源相比,微动源的波传播路径复杂。因为微动源大多存在于地表或海底,所以微动中的面波的含量与体波相比占绝对

优势。

由于人工激发或信号激励器产生的瑞利波频率一般都在 5 Hz 以上,要得到更低频率的瑞利波就比较困难,利用微动源可以弥补这方面不足。与主动源结合,可以得到较宽频率范围(低至几赫兹高至数千赫兹)瑞利波相速度数据。

1.2.2 表面波测试方法

1. 稳态测试

Jones(1958, 1962)和 Ballard(1964)利用稳态激励器作振源,由表面不同位置质点响应同相位点距离得到相应频率的波长,进而得到该频率的相速度^[4]。我国一些科研和生产单位于 20 世纪 80 年代后期利用日本 VIC 公司的 GR-810 佐藤式全自动地下勘探机开展稳态表面波测试、分析方法研究,并在工程上进行应用,如管道及掩埋物探测、路基压实度实验、地基加固前后对相速度影响^[2,5,6]。虽然稳态方法可以有效提高信号的信噪比,然而,稳态测试设备笨重、实验费时。

2. 瞬态测试

为了克服稳态测试方法缺点,Nazarian 和 Stokoe 提出两点测试的表面波谱分析方法(Spectral Analysis of Surface Waves,简称 SASW)^[4,7,8],该方法利用瞬态冲击信号丰富的频率成分,通过对不同位置两测点竖直向质点响应互谱分析获取面波的相速度-频率曲线。由于瑞利波水平向与竖直向的振动不同,考虑两个方向振动可以更好提取瑞利波,Tokimatsu 等^[9]提出用两分量传感器测量瑞利波位移两个分量。在振源近场,除了体波对瑞利波相速度影响外,瑞利波以非平面波或柱面波传播,相速度随距离变化,两点测试 SASW 分析得到的相速度是无法基于自由状态下平面或柱面瑞利波传播模型来分析。在远场,高频瑞利波衰减严重,信号信噪比较低,噪音对相速度分析影响较大。由于近场及远场这些因素的影响,需对测试信号叠加以及对频散数据筛选以提高信噪比、消除近场影响^[10,11]。当表面波场有多个模态时,SASW 测试无法得到高阶模态频散曲线,在多个模态共同作用下,表面波相速度不同于模态的相速度,SASW 得到的是有效相速度曲线(或表观相速度),有效相速度与模态频散相速度及模态在波场中能量分配有关。

为了能得到表面波较高阶模态频散数据,表面波多点测量方法(Multichannel Analysis of Surface Waves,简称 MASW)被广泛采用^[12-14]。该方法一般使用主动式振源,与地球物理勘探无基本的区别。基于这种测量方法,北京水电物探研究所于 20 世纪 90 年代研制出 SWS 系列瞬态多道瑞利波勘探仪器^[15],长春科技大学工程技术研究所开发出 Geopen 系列综合工程探测仪,这些仪器被广泛应用于各类岩土工程检测。河北地球物理勘查院研发了 SM98 系列,它不仅用于稳态测试还可用于瞬态测试,该仪器已用于公路路基压实度、混凝土结构强度及厚度以及软土地基加固效果评价^[16]。Ryden 等^[17]在路面检测中,采用固定振源位置移动单个传感器测量方法,将每次冲击信号合成多道(Multichannel Simulation Using One Receiver,简称 MSOR)来模拟 MASW 测试,然后对合成的测量数据作二维傅里叶变换。由于 MASW 是基于 $f-k$ 域的能量分析,它可以有效地降低近场及信噪比对分析的影响。当测点数量足够多及测试最大空间距离足够大时,可以得到波场某些频率范围内部分高阶模态频散数据,否则,只能得到有效相速度。无论是两点还是多点表面波测试方法,测点、振源一般布置在一条直线上。

3. 微动测试

对被动源,一般将测点二维布置在地表面观测微动的竖直向振动^[3,18-22],对测试信号进行空间自相关法(Spatial Autocorrelation,简称 SPAC)分析或 $f-k$ 域分析。

1.3 模态频散曲线分析方法

虽然测试往往得到的是有效相速度,但它与瑞利波模态相速度有关,因此,研究模态频散特性非常重要。

Thomson 最先用传递矩阵方法研究水平分层介质中瑞利波频散特性,之后, Haskell^[23] 对其进行了详细的研究,给出了周期方程、表面竖向及水平向质点速度比值以及两个方向质点速度的相位关系。瑞利波的相速度与频率关系隐含在周期方程中。Haskell 基于周期方程还讨论了在分层介质中瑞利波相速度渐近特性。Harkrider^[24,25] 用传递矩阵方法研究了各向异性介质的瑞利波频散,以及不同埋深点源下分层介质竖直方向质点位移表达式。

但 Haskell 方法有在高频计算时数字溢出以及有效数字损失导致数值不稳定问题。后来许多改进的方法,如: δ 矩阵法, Schwab-Knopoff 算法, Ben-Menahem、Abo-Zena、Menke 等人提出的算法^[2,26-33],都是以提高算法的数值稳定性为主要目标。

张碧星等^[29]、凡友华等^[33] 提出了无量纲实数传递矩阵算法以及在无量纲实数传递矩阵算法基础上改进的快速矢量传递算法和快速标量传递算法,这些方法可以减少有效数字的损失,提高计算频率上限,然而,算法繁琐。

在结构有限元分析中一般采用刚度矩阵方法, Kausel 和 Roësset^[34]、Wolf^[35] 在研究分层介质中 P, SV 波传播时导出层刚度矩阵,虽然刚度矩阵形式上是对称的,但在运算中仍然很繁琐。Lysmer 和 Wass^[36] 在研究 Love 波时,将分层细化成很多薄层,薄层刚度矩阵元素可简化成代数。Kausel 和 Roësset 将此方法推广至分层介质中 P, SV 波场研究。当分层介质位于刚性基时,求总刚度矩阵行列式问题就变成求二次特征值及特征矢量问题,通过适当的自由度重组,可使二次特征值问题简化成一次特征值问题,特征值与波数有关,特征矢量与模态位移有关。利用薄层法, Kausel 和 Peek^[37] 得到刚性基上分层介质在瞬态荷载作用下质点位移响应离散解。由位移响应离散解可以研究瑞利波不同模态的质点位移响应,这是有限元法无法实现的。

利用传递矩阵及薄层刚度矩阵法可以模拟出在点源或面源下各阶模态响应以及总响应,与传递矩阵相比,薄层刚度矩阵法可作复数运算,可以更好地考虑介质阻尼对模态传播特性影响。此外,刚度矩阵法可避免传递矩阵连乘导致的数值不稳定。

1.4 表面波在岩土参数测试中的应用^[2]

在很多情况下,介质的力学参数对评价地基非常重要,如地基承载力、饱和砂土层与混凝土路基抗压强度等与介质剪切波速有很高的相关性。

工程地质勘察 利用实测的瑞利波频散曲线,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,可以确定地基的持力层。地层中存在低速度带反映了地下存有软弱夹层,这类地层对建筑物易造成危害。瑞利波

勘探可方便地划分出该软弱层的埋深及范围。

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”。瑞利波法评价加固效果,是通过实测地基加固前后的波速差异比较,无须进行繁琐的正、反演计算便可得到处理后的地基较处理前地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。

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。因此,通过对实测资料反演分析,可以得到岩土层的横波速度、纵波速度、密度等参数,进而计算出其他物理力学参数。

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剪切波速有关。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。

路基系统 路基是较为典型的水平分层系统,利用人工激发高频表面波,可以分别测出路面的波速、厚度,进而计算出路面的抗折、抗压强度及路基的载荷能力。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。

废料处理场 由于废物土样钻孔采集困难及危险,通过无损表面波测试可得到场地剪切波速及其他土动力学参数,这对构筑土壤动力学模型、预测填埋堆体沉降及固体垃圾填埋场动力稳定具有重要意义。

气温变化对冻土影响评价 我国青藏高原有大量的冻土带,青藏铁路有相当长度经过冻土地带,冻土的刚度变化关系到铁路的安全,随着全球气温变暖,变暖影响冻土刚度及冻土层厚度,在每年的不同时期,重复进行表面波测试,可以观测不同季节温度变化对冻土的刚度的影响。

1.5 表面波在物探方面的应用

在地震勘探中,反射波法及折射波法是两种很重要的勘探方法。反射波法就是利用波在分层层面、空洞、裂缝带等处反射特征、走时来判断反射体位置、结构。反射波法要求在反射界面处有相当的波速(或阻抗差异)差异,差异越大,反射越强。然而,在浅层地质勘探中,由于瑞利波相对于P波、S波具有较大的能量,其波速与S波接近,反射P波走时与瑞利波接近,反射波被瑞利波淹没,从表面波场中分离或识别反射波困难。折射波法要求下覆层的波速高于上覆层波速,在地质勘探中应用易受限制。

在浅层地质勘探中,地质雷达也是常用的工具,电磁波在介质的传播过程中会发生衰减,电导率是影响地质雷达探测深度的重要因素。介质电导率越高,穿透深度越小。反射信号的强度主要取决于上、下介质的电性常数差,介电常数的差异越大,反射信号越强,因而,地质雷达得到的是介质介电常数变化分布。地质雷达对地下水位以下介质分层及充水洞穴探测就比较困难。

电法检测,如高密度电法,是利用介质的电阻率差异进行地下勘探的一种地球物理方法。当地下岩土层中存在洞穴、裂缝或不密实区、含水区时,它们与周围介质就有电性差异。电法勘探可得到介质电阻率变化分布,该方法在岩土勘查和水文地质调查中应用较广,如追索构造破碎带、寻找岩溶、圈定富水地带、考古、寻找地下水源、地下障碍物等。

当介质有表面裂缝或有异质体(如充气或充水洞穴)存在时,表面波会发生散射,表面波场在散射波影响下,表面波能量分布及有效相速度发生变化,这种变化与裂缝或地下异质体方位埋深、范围有关。

每一种物探方法有其局限性,结合表面波勘探可以弥补其不足,表面波勘探方法在物探领域主要应用有:

(1) 裂缝深度检测。大坝、路基等由于温度变化等原因会出现不均匀沉降,导致坝体、路面出现裂缝,若不及时处理可能会影响坝体、路面安全。灌浆处理是裂缝处理的有效手段。裂缝的长、宽肉眼是可以观测出,但裂缝的深度确定是相当困难的一项工作,钻探取样只能得到某一位置点的裂缝深度。若要得到整个裂缝深度,则需要很多钻探点,对坝体、路面是一种破坏。采用表面波测试,一些频率成分表面波被裂缝阻隔,另有一些频率成分表面波绕过裂缝直接透射,通过裂缝两侧表面波能量变化比较可估算裂缝深度^[38-41]。

(2) 地下空洞及掩埋物探测。当地下含空洞、溶洞、废弃矿井等各种地下异质体时,表面波会发生散射^[42-47],振源与异质体之间的表面波场在散射波的影响下发生扰动^[48,49],利用 SASW 测试,可以得到散射波对表面波相速度扰动情况,通过散射源位置对相速度扰动程度的分析,可以确定异质体埋深及范围。当表面波被地下异质体散射,在异质体前、后方表面波能量会有所加强,而在异质体上方传播的表面波能量随波长发生变化,特别对充水或充气的洞穴来说,波长大于洞穴埋深的表面波能量会逐渐减少,通过 MASW 测试,分析表面波谱能量随传播距离和波长(频率)的变化,可预估洞穴的埋深及范围^[47,50-52]。

(3) 边坡稳定性监测。滑坡体与滑动面下部的岩(土)之间一般有一些波速差异,或者滑坡体与滑动面之间存在破碎带。通过面波测试可以找出波速差异的分界面,进而划定可能滑坡体存在的区域,重点对这些区域进行监测。

1.6 表面波测试存在的主要问题

表面波测试是以获取面波模态频散曲线为目标,然后,基于平面或柱面瑞利波在水平分层、层内介质均匀传播理论,对频散曲线进行正、反演计算,得到分层剖面参数^[14,53,54]。然而,无论是主动振源还是被动振源,以下几方面因素会影响测试结果,进而影响测试数据的分析方法。

1) 直达体波 对主动振源来说,在距振源较近的近场(传播距离相对波长较小),直达体波影响尤为明显,在某些分层情况下,体波在表面波场能量较大,因而,表面质点响应并不完全与瑞利波对应。

2) 近场非平稳瑞利波 即使不考虑体波的影响,近场瑞利波表观相速度随传播距离变化,自由状态下分层介质中平面或柱面瑞利波传播理论用于实测频散数据分析会带来较大误差。

3) 信噪比 由于波阵面的几何扩散,随着波传播距离增加,波的能量不断减少,即波的几

何衰减,不同模态几何衰减可以不同。在介质的阻尼作用下,波的能量也会衰减,即波的材料衰减。一般情况下,高频波的材料衰减快于低频波。距振源较远的位置,虽然表面波场较平稳(即表面波相速度不随传播距离变化),体波影响较小,但在几何及材料衰减影响下,高频波信噪比不高。

4) 激振方式 在瞬态激振的情况下,振源谱能量分布与落锤重量、锤垫半径及锤与地表接触刚度有关,落锤重量越大,低频区域能量越大,反之,能量分布在高频区域。锤重会影响不同频率区域信号信噪比。

5) 分析模型 表面波测试得到的频散数据与测试方法有关,频散数据分析模型要视测试方法而定:

(1) 若测试能得到在某些频率区域高阶模态频散数据,在分析剖面参数时,可基于平面或柱面面波在分层传播理论将理论频散数据与测试频散数据进行匹配分析。

(2) 若测试得到的是有效相速度曲线,则需建立理论有效相速度曲线与模态相速度间关系模型,然后对理论和测试的有效相速度进行匹配分析,得到剖面参数。

1.7 表面波测试进展

1.7.1 瑞利波提取

为了从复杂的信号中提供有效的瑞利波成分,有些学者采用多波的方法来提取瑞利波,即利用多测点记录信号上不同类型波的走时差异构筑比较合适的观测窗口消除直达波及一些周边的反射波干扰。然而,若面波的响应在观测窗口内没有结束,切除信号会人为改变这些面波的响应,改变了面波谱能量分布,从而在频域分析引入一定误差。如果在观测窗口内有干扰信号与瑞利波叠加,是无法切除的。一些学者试图通过极化滤波方法、扩充的 Prony 法以及 τ - P 法来分离波场,提取瑞利波^[55]。

李锦飞^[56]于 1998 年提出瑞利波勘探的多分量观测方法,根据瑞利波与其他波极化特性的差异,对记录信号进行极化滤波处理,压制纵、横波及干扰波,保留瑞利面波,改善勘探效果,无疑,这种方法对瑞利波测试和分析是一大改进。然而在分层黏性介质中,不同模态叠加后质点轨迹及极化方向是很复杂,它并不像在均匀介质是椭圆形轨迹,特别是在振源近场,瑞利波传播很复杂,设计滤波函数是相当困难的。该方法对传感器各分量相频、幅频特性要求很高,实验难度较大。

1.7.2 数据筛选

根据近场影响范围理论及数值分析结果,按一定方式布置测点、振源;对测试数据进行相干分析及依据一定的准则对频散数据筛选。通过这些手段可消除近场及信噪比对测试结果的影响,获取瑞利波频散数据。

对信号进行相干分析,并根据相干值(凝聚函数)对信号频率成分进行筛选。相干值高的频率成分来自同一振源,而相干值低的频率成分则可能是随机干扰。由于同一波源不同类型的波有其各自的相干性,因此,相干法虽然能去除一些随机噪声的影响,但对体波及各种转换波起不到很好的压制作用。来自同一振源的直达波、非测线方向干扰源产生的波以及四周边

界反射波是无法筛选。

为了降低体波的影响,得到平稳瑞利波频散数据,Heisey、Nazarian 和 Stokoe、Woods、Tokimatsu、Roësset、Sanchez-Salinero 等人^[54]根据具体的研究对象提出了相应的数据筛选准则。然而在分层介质中,波场中体波能量与分层状态有关,此外,波场中的高阶模态影响也与分层状态有关,很难有一个统一的筛选准则。

1.7.3 高阶模态

在分层介质中,瑞利波有多个模态。当分层剖面刚度自上而下递增时,瑞利波基阶模态在波场中占主导地位,互谱分析得到的有效相速度接近于基阶模态相速度,依据分层介质中面波理论由基阶模态频散数据可反演出地层参数。在反常分层状态下,高阶模态的影响是较大的,互谱分析计算高阶模态相速度时会利用其他低阶次模态产生的相位差,得到的有效相速度不同于模态相速度,它不仅与波场中各阶模态的相速度有关而且还与模态能量大小有关^[57,58]。在平稳随机波场中,有效相速度是各阶模态的相速度加权平均,加权系数与模态水平、竖向位移振幅等有关^[9,59]。在主动振源产生的波场中,表面波有效相速度随传播距离变化,基于相速度是同相位点的传播速度,Rix 得到有效相速度表达式^[7]。由于高阶模态瑞利波穿透较深,它对土层参数较敏感,也就是说,在分层参数改变的情况下,低阶次模态的频散变化可能不大,而高阶次模态的频散变化较大。结合高阶模态频散曲线有助于降低反分析解的不确定性,提高分析精度^[14]。

为了从两点测试信号互谱分析得到面波模态相速度,Al-Hunaidi^[60]尝试用具有不同中心频率的窄带对测试信号滤波,滤波后的包络线认为是对应不同模态。由于理想的窄带滤波是不存在的,Kim 和 Park^[61]用简谐子波变换来代替 Al-Humaidi 窄带滤波。

对多点表面波测试方法,为了能得到模态频散曲线,Gabriel 等^[62]、Al-Hunaildi^[63]及 Park 等人^[12]曾用二维傅里变换的方法得到 $f-k$ 域能量谱,不同极值点对应于不同模态。 $f-k$ 分析方法是根据谱最大值及极值来识别模态的,要求有足够多的测点、足够大的空间观测窗口。

第 2 章 曲线坐标下弹性基本理论

2.1 正交坐标系

分析弹性波传播的某些特定的问题时,应用正交曲线坐标常带来数学处理上的简化。如果适当地选择曲线坐标系,使物体界面上的某一坐标为常数,问题就能大为简化。例如,对于在无限介质中半径为 a 的球形空腔发射的波,空腔表面的受力条件在球坐标系中可简单地表示为 $r = a$ 限定。

如图 2-1 所示,设有一坐标系为 $x_i (i = 1, 2, 3)$ 的直角坐标系,物体在未变形前的图形——初始态图形中的某一确定点 P ,在某一时刻 t , P 点的坐标用 $x_i (i = 1, 2, 3)$ 表示。在稍后的某一瞬间 $t + \Delta t$, 物体的图形发生变化,产生变形,在初始态图形中的 P 点移至变形态图形中的 Q 点。用一个新曲线坐标 q_i

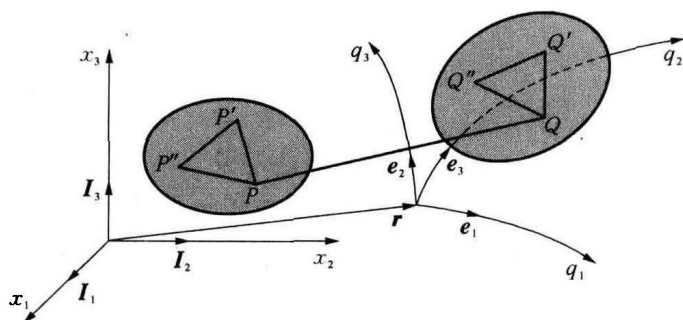


图 2-1 正交坐标系

($i = 1, 2, 3$) 观测变形后的图形, Q 点的坐标位置可以用 q_i 表示。曲线坐标 q_i 是直角坐标系 x_i 的函数。空间任何一点即可以用直角坐标 x_i 表示也可用曲线坐标 q_i 表示。

曲线坐标 q_i 可写成

$$q_i = q_i(x_1, x_2, x_3) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2-1)$$

其反变换为

$$x_i = x_i(q_1, q_2, q_3) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2-2)$$

在直角坐标系中任一点 $x_i (i = 1, 2, 3)$ 矢径为

$$\mathbf{r} = x_i \mathbf{I}_i \quad (2-3)$$

这里 $\mathbf{I}_i (i = 1, 2, 3)$ 表示直角坐标系中坐标轴正方向的单位矢量。该点在曲线坐标 q_i 中的切向量为

$$\mathbf{r}_i = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q_i} = \frac{\partial x_1}{\partial q_i} \mathbf{I}_1 + \frac{\partial x_2}{\partial q_i} \mathbf{I}_2 + \frac{\partial x_3}{\partial q_i} \mathbf{I}_3 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2-4)$$

$\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$ 在一点上构成三个活动标架。若切向量相互正交, 即

$$\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{r}_j = 0 \quad (i \neq j) \quad (2-5)$$