

# 多道瞬态面波技术在港口工程勘察中的应用

谭 再 坤

(中交一航院 天津 300222)

**摘要** 介绍多道瞬态面波法勘探的基本原理, 以及该技术应用于港口工程勘察中解决岩土层的划分、地基土工程特性的分析、抗震设计参数的提供、地基加固效果的评价等一系列问题。

**关键词** 港工勘察 多道瞬态面波 频散曲线 弹性波

中图分类号: P631.4

文献标识码: B

文章编号: 1004-9592(2001)03-0053-03

多道瞬态面波技术(以下简称面波法)是近十几年才发展起来的一项应用于岩土勘察的测试新技术。面波由地震产生时可对建筑物产生极大的危害, 在人工地震勘探中它则是一种很强的干扰波, 所以人们主要是根据它的这一特点, 采取不同的方法来减小它的危害或消除它的影响。利用面波所具有的频散特性和传播速度与岩土物理力学性质的相关性解决众多的岩土工程问题。

## 1 多道瞬态面波法勘探原理

### 1.1 面波的概念及特性

面波(对于炸药震源或冲击振源, 面波主要是指瑞雷面波)是在弹性分界面处由于波的干涉而产生, 并且沿界面传播, 波动现象主要集中在界面附近的一种弹性波。它具有以下几个方面的特性:

1) 面波在传播时, 是横波与纵波在界面(主要在地表)附近的复合振动质点在波传播方向的垂直平面内振动, 振幅随深度呈指数函数急剧衰减, 质点的振动轨迹为逆时针方向转动的椭圆, 传播速度略小于横波。

2) 面波的水平 and 垂直振幅从弹性介质的表面向内部呈指数衰减, 大部分能量损失在  $1/2$  波长的深度范围内, 这说明面波某一波长的波速主要与深度小于  $1/2$  波长的地层物性有关, 波长不同, 穿透深度也不同。

3) 在多层介质中, 面波具有明显的频散特性。面波沿地面表层传播, 影响表层的深度约为一个波长, 因此同一波长的面波的传播反映了地质条件在水平方向的变化情况, 不同波长的面波的传播特性反映

着不同深度的地质情况。

前两种特性为面波法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。

### 1.2 频散曲线的作用及其主要影响因素

面波在多层介质中所产生的相关速度(或称面波传播速度用  $V_R$  表示)随频率(用  $f$  表示)或波长而变化的现象称为面波的频散, 表示面波的  $V_R$  与  $f$  关系曲线称为面波的频散曲线。面波法勘探的直接成果是面波的频散曲线。频散曲线的特征及其变化与地质条件, 如岩土层的厚度、密实度等密切相联系。根据频散曲线可以对勘探成果做出符合客观实际的地质解释。

影响面波频散曲线变化的主要是面波传播速度  $V_R$ , 而岩土体中的矿物成分、岩土体结构、密实度、孔隙度又是决定传播速度  $V_R$  的重要因素。岩体中含水饱和度一般对  $V_R$  影响不大, 而在土体中, 土体的含水饱和度对  $V_R$  则影响较大。介质的横波传播速度( $V_S$ )的变化对  $V_R$  值影响亦较大, 而纵波传播速度( $V_P$ )的变化对  $V_R$  值影响则较小。另外, 界面的深度对  $V_R$ - $f$  曲线形态没有影响, 只是随深度的增加, 曲线的拐点向低频方向移动。在层状介质中, 当层厚度一定时, 相邻两层介质的  $V_R$  变化不影响  $V_R$ - $f$  曲线形态, 但对  $V_R$ - $f$  曲线拐点处的梯度有较大的影响。

### 1.3 面波法用于勘探的基本原理

面波沿地面表层传播, 表层的厚度约为一个波长, 因此, 同一波长面波的传播特性反映了地质条件在水平方向上的变化情况, 不同波长面波的传播特性反映着不同深度的地质情况。在地面上沿波的传

收稿日期: 2000-11-24



播方向,以一定的道间距  $\Delta X$  设置  $N+1$  个检波器,就可以检测到面波在  $N \cdot \Delta X$  长度范围内的传播过程。设面波的频率为  $f_i$ ,相邻检波器记录的面波的时间差为  $\Delta t$ (或相位差为  $\Delta \varphi$ ),则相邻道  $\Delta X$  长度内面波的传播速度为:

$$V_R = \Delta X / \Delta t \text{ 或 } V_R = 2\pi \cdot f_i \cdot \Delta X / \Delta \varphi$$

测量范围  $N \cdot \Delta X$  内的平均波速为:

$$V_R = \frac{N \cdot \Delta X}{\sum_{i=1}^N \Delta t_i} \text{ 或 } V_R = \frac{2\pi \cdot f_i \cdot N \cdot \Delta X}{\sum_{i=1}^N \Delta \varphi_i}$$

在同一地段测量出一系列频率的  $V_R$  值,就可以得到一条  $V_R - f$  曲线。通过对频散曲线进行反演解释,可得到地下某一深度范围内的地质情况和不同深度的面波传播速度  $V_R$  值。另一方面,  $V_R$  值的大小与介质的物理特性有关,据此可对某些岩土的物理性质做出评价。

## 2 数据采集及资料整理

我院于 1999 年引进北京水电物探研究所生产的国家重点新产品 SW S-1G 型多波列数字图像工程勘探与工程检测仪,在沿海港口中开展了大量的面波勘探和应用,并不断改进野外采集方法和探索其应用范围。

面波勘探的数据采集是由 SW S-1G 型仪器直接完成。采集时弹性波以数据形式存储到仪器中,将实测数据分成若干个数据段,求各数据段不同频率的  $F-K$  功率谱,取平均值然后用平滑窗进行平滑处理。在不同频率的功率谱上求出不同的相速度  $V_R$ ,得到一条实测的相速度频散曲线。

考虑到场地地层的不均匀性,为减少斜坡反射的干扰,使面波资料能真实反映出地层垂直变化的情况,我们在进行野外测试时,先根据已有的地质资料作对比,找出在这一工作场区的最佳工作参数:最佳检波器频率、偏移距及采样点间隔等,然后才进行大面积探测。据之计算各频率条件下面波的传播速度,确定面波的时间—空间窗口,在频率—波数域内提取面波,进行频散分析并形成频散曲线。根据层数和各层速度的变化做出定性解释,然后确定各层厚度,计算各层的剪切波传播速度,并对获得的结果进行反演拟合,再根据这些资料绘制成物探地质解释剖面图。

## 3 面波法勘探在港口工程中的应用

### 3.1 岩土工程勘察

利用实测的面波频散曲线,可以得到各岩土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;地层中存在低速带反映了地下存有软弱夹层,面波勘探可方便地划分出该软弱层的埋深及范围。

#### 1) 地层的划分

根据实测频散曲线的变化规律,进行地层的划分。确切地说,面波法是按介质面波波速的变化来划分地层或者说是按土的物理力学性质来划分地层,它不同于钻探按土的地质成因、颗粒级配及流、塑限来划分地层。当不同的地层波速有足够的差异时,面波的分层和钻探分层基本是一致的。反之,当相邻层的波速差异很小,面波就无法将其分开,只能作为一层来解释。一般情况下,不同的地层具有可分辨的波速差异,如从软、流塑状的淤泥质类土过渡到硬塑状的粘性土,它的  $V_R$  可以从 80~250 m/s,松散的砂层过渡到极密实的砂层,  $V_R$  可以从 150~300 m/s。按目前面波的分辨率,各类土中按“软、硬”和“松、密”程度划分成 3~4 个等级,即分辨 40~50 m/s 的波速差异精度是足够的。但在无钻孔资料对比时,无法分辨硬塑状粘性土层或是中密~密实状的砂层。

#### 2) 分析评价地基土的工程地质特性

除可以直接用所测的面波  $V_R$  来分析土的工程地质特性,描述地层的软、硬外,还可以利用面波波速  $V_R$  与标准贯入击数  $N_{63.5}$ 、十字板剪切强度  $C_u$ 、变形模量  $E_s$  及地基土的承载力  $[R]$  等物理力学参数建立相关关系,来分析评价地基土的工程地质特性。我们根据深圳盐田港中港区的部分资料进行了统计分析,得出如下的相关关系式:

$$V_R = 81.3 N_{63.5}^{0.36} \text{ (适用于粘性土)}$$

粘性土层:

$$[R] = 1.45 V_R - 80, \quad E_s = 0.075 V_R - 2.78$$

砂土层:

$$[R] = 1.65 V_R - 120, \quad E_s = 0.14 V_R - 10.40$$

式中:  $N_{63.5}$  为标准贯入击数,  $[R]$  为地基土容许承载力(kPa),  $E_s$  为变形模量(MPa)。

### 3.2 为抗震设计提供参数

根据面波探测所得到的地基土的剪切波波速值,可按规范划分场地土类别、场地类型,进行饱和砂土层的液化判别及研究软土地基的震陷性等。

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等于土体承受的压力,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。反映在波速上,波速越低越易液化。根据场地内饱和砂土的埋深、地下水位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。

### 3.3 地基加固处理效果评价

面波法评价软土地基加固效果,主要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。该法适用于挤密或振冲碎石桩、灰土桩、渣土桩、强夯以及化学处理等构成的复合地基的加固。

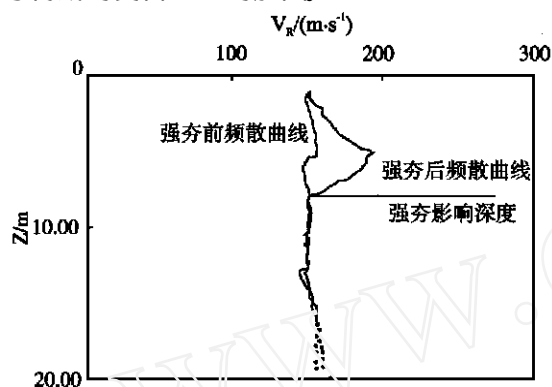


图 1 面波法检测强夯地基成果

对复合地基强度的检验,以往常用载荷试验、动力触探、静力触探、钻探等,这些方法虽然均能不同程度的取得较满意的结果,但均需耗费较多的人力、财力和时间;动力、静力触探得到的资料有时离散度较大,在评价承载力方面可靠程度亦较差。面波法能较准确通过实测  $V_R$  值,计算出复合地基承载力,并

评价垂直和水平方向地基的均匀性。

图 1 是面波技术在青岛港 8 号码头  $30\text{万 m}^2$  堆场区强夯检测中的应用,两条频散曲线分别表示强夯前、强夯后的波速变化情况,从图中可以看出:强夯的影响深度约为  $8.00\text{ m}$ ,强度提高最大的地方约在  $5.20\text{ m}$  的位置。

### 3.4 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、泊松比以及土的标准贯入击数密切相关。通过建立地区性参数间的相关关系式,再用实测资料的反演拟合解释,得到岩土层的横波速度,进而计算出该地区其它的物理力学参数。

### 3.5 其它方面的应用

面波法用于岩土工程除以上几个方面的应用外,还可有效地用于基岩的完整性评价,滑坡调查,堤坝危险性预测,桩基入土深度探测等,另外面波法还可用于探测地下空洞、隐性淤泥包的埋深和范围以及对公路、机场跑道质量进行无损检测等等。面波法勘探在经济效益、社会效益方面也具有较好优势,能够为工程项目争取时间,为建设单位节省资金。随着面波勘探研究的不断深入,其应用必将得以继续完善和发展。

### 参考文献

- 1 王振东. 浅层地震勘探应用技术. 北京:地质出版社, 1994
- 2 杨成林. 瑞雷波勘探. 北京:地质出版社, 1993
- 3 林万顺. 多道瞬态面波技术在水利及岩土工程勘察中的应用. 工程勘察, 2000, 4
- 4 贾贵智. 浅论瑞雷波法勘探原理及其应用. 西部探矿工程, 1997, 7

## 港工技术 (季刊) 1964 年创刊

总第 148 期

2001 年 第 3 期

2001 年 9 月出版

刊号: ISSN 1004-9592 (国际标准刊号)  
CN 12-1220/U (国内统一刊号)

广告经营许可证: 1201034000016 号

印刷: 天津市云海科贸开发公司印刷厂

主 办: 中交第一航务工程勘察设计院

编 辑: 《港工技术》编辑部

天津市大沽南路 1472 号

邮政编码: 300222

电话: (022) 28341931

传真: (022) 28341925

主 编: 毕梦雄

出 版: 天津港湾工程咨询公司

发 行: 《港工技术》编辑部

公开发行 定价: 6.00 元