

瑞雷面波勘探技术在第四系分层方面的应用

杜正涛 刘丽敏 程道伟

摘 要 通过对面波勘测原理的介绍,结合太原城区汾河治理美化工程面波勘探实例,简述面波勘探野外工作方法、资料处理及达到的地质效果。

关键词 瞬态面波;付氏变换;功率谱;相位差;频散曲线

THE APPLICATION OF RAYLEIGH SURFACE WAVE EXPLORATION TECHNIQUE TO THE QUATERNARY STRATIFICATION

Du Zhengtao, Liu Limin, Cheng Daowei

(Beijing Surveying and Designing Institute for Water and Electricity, Beijing 100024)

Abstract Based on a description of the principle of surface wave survey exemplified by the surface wave exploration in the harnessing and beautification of Fenhe River, this paper recounts the field work method, data-processing and geological effects of surface wave exploration.

Key words transient state surface wave; Fourier transform; power spectrum; difference of phase; frequency scattering curve

瑞雷面波是由英国学者Rayleigh于1887年首先在研究弹性介质中波动时发现的。随着计算机技术的飞速发展,面波勘探在第四系分层方面发挥着越来越大的作用。面波勘探可分为稳态面波勘探和瞬态面波勘探。瞬态面波勘探激发方式有锤击、落重、炸药等。下面首先从理论上简述瞬态面波勘探原理。

1 原理

1.1 时间域向频率域的转换

瞬态面波勘探法关键是激发所需频率范围内的瞬时激励,采用相适应的检波器,利用地震仪将此信号记录,令此信号为 $X_1(t)$, $X_2(t)$, $X_3(t)$, ..., $X_n(t)$, 其中 n 为道号,再利用傅氏变换将时间域转换成频率域。计算如公式

(1) 所示

$$X_n(f) = \int_{-\infty}^{\infty} X_n(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

1.2 互功率谱和相位差的求取

利用相邻道的频谱可求出 $X_{n-1}(t)$, $X_n(t)$ 的自功率谱

$$S_{nn}(f) = X_n(f) \cdot X_n^*(f) \quad (2)$$

$$S_{(n-1)(n-1)}(f) = X_{(n-1)}(f) \cdot X_{(n-1)}^*(f) \quad (3)$$

其中, $X_n^*(f)$, $X_{(n-1)}^*(f)$ 为 $X_n(f)$, $X_{(n-1)}(f)$ 的复共轭谱, $S_{nn}(f)$, $S_{(n-1)(n-1)}(f)$ 为 $X_n(f)$, $X_{(n-1)}(f)$ 的自功率谱。于是, $X_n(t)$, $X_{(n-1)}(t)$ 的互功率谱为

$$S_{n(n-1)}(f) = X_n(f) \cdot X_{(n-1)}^*(f) = |X_n(f)| \cdot |X_{(n-1)}(f)| e^{i\Delta\Psi(f)} \quad (4)$$

可见互功率谱中的相位谱反映了包含在面波中的相应单频波的相位差。

1.3 瞬态面波记录的质量评价函数

在互功率谱函数中, 并非各频率都是有效的, 关键是看所计算的频段内面波从检波器 n 到检波器 $(n+1)$ 传播时是否有良好的相关性, 也就是说该频段的质量好不好。为此定义相干函数

$$c(f) = \frac{S_{n(n-1)}(f) S_{n(n-1)}^*(f)}{S_{(n-1)(n-1)}(f) S_{nn}(f)} \quad (5)$$

其中 $S_{(n-1)(n-1)}(f)$, $S_{nn}(f)$ 为记录 $X_{(n-1)}(t)$, $X_n(t)$ 的自功率谱, $S_{n(n-1)}(f)$, $S_{n(n-1)}^*(f)$ 为记录 $X_{(n-1)}(t)$, $X_n(t)$ 的互功率谱。

如果面波在传播过程中是理想的, 则该频段内 $c(f)$ 实部的绝对值应接近 1, $c(f)$ 越小则信号相关性越差, 一般在计算时选 $c(f)$ 大于 0.8 的频段计算速度。

1.4 面波速度的确定

利用公式

$$v_R = \frac{2\pi f \Delta x}{\Delta\Psi} \quad (6)$$

可计算出离散点 f 的面波平均速度, 其中 v_R 为面波平均速度、 f 为频率、 Δx 为相邻道间的距离, $\Delta\Psi$ 为相邻道同一频率函数波传播的相位差。

1.5 深度—速度函数的确定

单频波反映的深度一般选用

$$H = \frac{\lambda}{2} = \frac{1}{2f} v_R \quad (7)$$

对公式 (7) 进行微分可得到

$$dH = -\frac{1}{2f^2} v_R df \quad (8)$$

其中, H 为测试深度, λ 为单频波的波长, f 为所选单频面波的频率, v_R 为界面 H 到地表的面波平均速度, df 为离散点的频率步长, dH 为频率增加 df 而增加的勘探深度。

1.6 层速度的确定

通过深度—速度函数可得出层速度的公式

$$v_{R(n-1),n} = \frac{H_n - H_{n-1}}{\frac{H_n}{v_{Rn}} - \frac{H_{n-1}}{v_{Rn-1}}}$$

(9)

其中， $v_{R(n-1),n}$ 为第n层的层速度， H_n 为第n层的底界面深度， v_{Rn} 为第n层底界面以上的平均速度， H_{n-1} 为第n-1层的底界面深度， v_{Rn-1} 为第n-1层以上的平均速度。

1.7 频散曲线的确定

通过以上分析计算就可得到层厚度—层速度函数（ $H-v_{Ri,n}$ ），并依据速度差异进行分层，就得到了测试点的频散曲线。

2 工程实例

本工程实例为笔者1998年7~8月在太原市城区汾河治理美化工程中完成的瞬态面波测试工作。本次工作的任务是：查明左岸ZK1钻孔至南内环桥之间粘质粉土（或粉质粘土）的连续性及其厚度；查明右岸ZK98钻孔至ZK37钻孔之间的粘质粉土（或粉质粘土）的连续性及其厚度。本文因篇幅所限只介绍左岸的工作。

2.1 测区工程地质概况

根据钻孔资料，本测区测试范围内全部为第四纪地层，从上而下依次为：杂填土，厚度为1~3 m，个别段超过5 m；粘质粉土，此层较薄，厚度为1~2 m，大多数地段尖灭；粉细砂，规模较大，厚度不均，有的地段达10 m，有的地段因沉积环境的改变而尖灭，取而代之的为细砂或粉砂层；粗砂，此层连续性不好，一些钻孔未发现此层；砾砂层，此层厚度变化较大，最厚的地段超过5 m，很多地段尖灭；粘质粉土(或粉质粘土)层，此层就是本次工作要查明的目的层，厚度变化较大，从0.5~20 m，个别地段尖灭；粘土层以下地层较复杂，ZK98钻孔附近为砾砂层，粘质粉土及卵石层，有些地段有(中)粗砂、圆砾等。图1为ZK98钻孔地质剖面示意图。

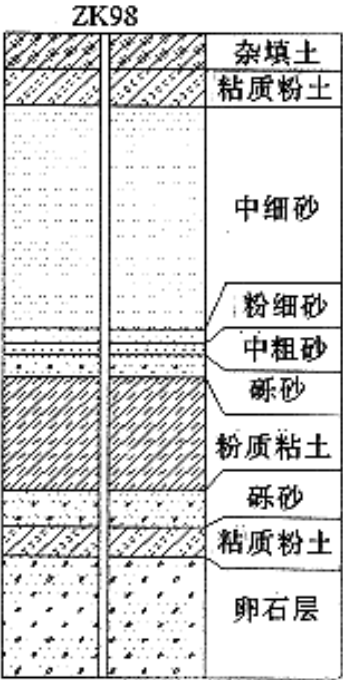


图1 测区地质剖面示意

2.2 野外工作方法与技术

2.2.1 测线布置

为满足任务要求共布置了3条测线 W_1, W_2, W_3 ，其中 W_3 长度为5 950 m。

2.2.2 试验工作

依据任务要求，为了较为准确地查明深部目的层及浅部各地层层厚与埋深，首先进行了以下试验工作：面波频率(主频)及频带宽度的选取；震源的激发方式和能量选取；道间距及偏移距的选取。

2.2.3 工作方法

本次工作仪器采用浮点放大地震仪(1210F改造型)，便携式微机数据采集。经过试验，采用8 Hz低频检波器接收，炸药震源激发，面波点距一般为48 m(在有桥梁、排水沟等影响测试的地段适当进行了调整)，检波器间距4.0 m。野外测试工作布置详见图2。

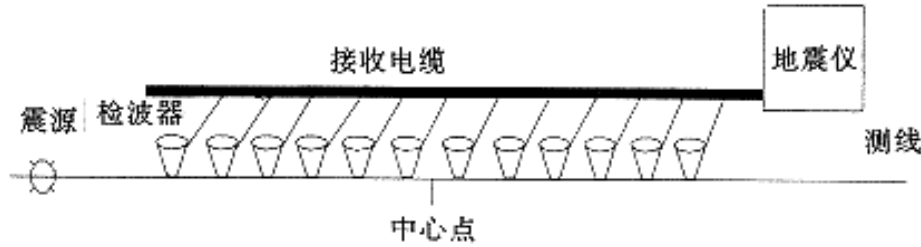


图2 野外工作激发、接收示意

2.4 数据资料整理与成果分析

2.4.1 数据资料整理与计算

资料处理程序见图3所示，首先对野外采集的记录(图4)进行频率—速度分析，选取面波记录时间窗口，计算出f-k变换色谱图(图5)，再利用光标在f-k变换色谱图上选取最大能量谱的频率—速度点，计算出测试点的频散曲线，再对频散曲线进行曲线拟合，反演求出各层速度、厚度，绘制出频散曲线成果图并打印(图6)。图中 v_{rmax} 为最大反演面波速度， F_b 为反演面波频带， H_n 为反演地质层厚， v_s 为反演面波层速度， $Z(L_r)$ 深度坐标单位m， $v_s(v_r)$ 速度坐标单位m/s，Fit为拟合度。本次工作依据任务要求只对粘土以上分层，故 L_{rmax} ， v_{rmax} 所反映数据并不是实际所拟合的最大深度、最大速度。

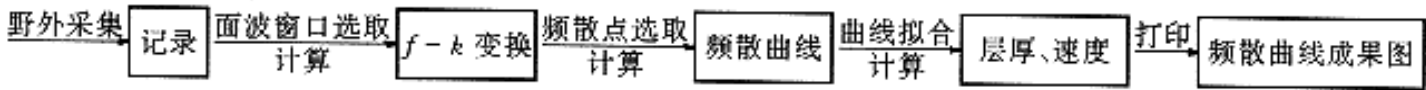


图3 资料处理流程

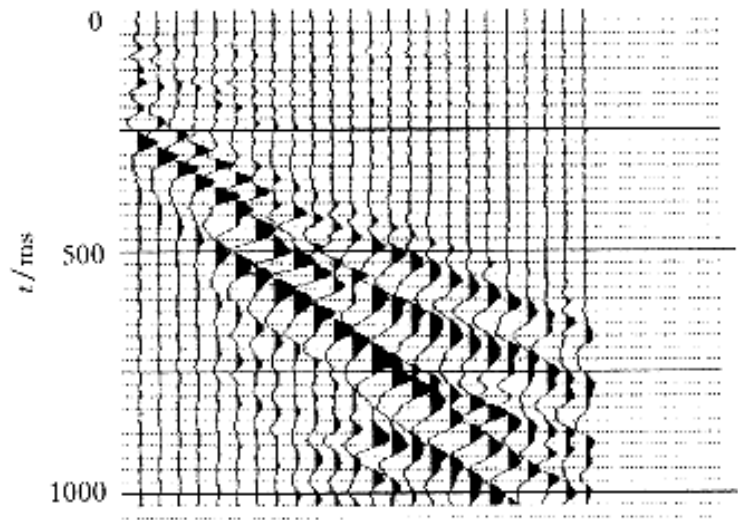


图4 野外采集的记录



图5 f-k变换能量谱

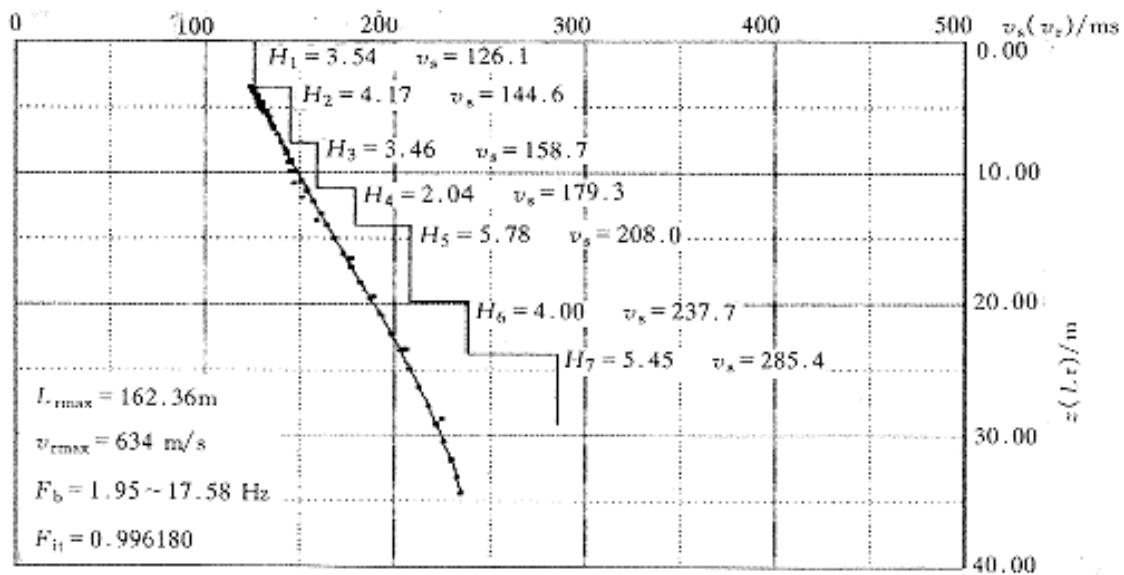


图6 频散曲线成果

2.4.2 物探测试成果剖面图的绘制

将频散曲线成果图中的速度、层厚按照中心点在测线上相应位置标到剖面图上，把相邻测点同一速度层用平滑曲线连接起来，然后再把物探解释的物性层添上地质图例，就完成了物探成果解释剖面图的绘制工作。图7为左岸ZK1钻孔至南内环桥之间物探成果解释剖面图。此图为原图水平1 5000、垂直1 300比例缩小而成，测线长度5 959 m，最下一层为按任务要求查明的粉质粘土（或粘质粉土）。

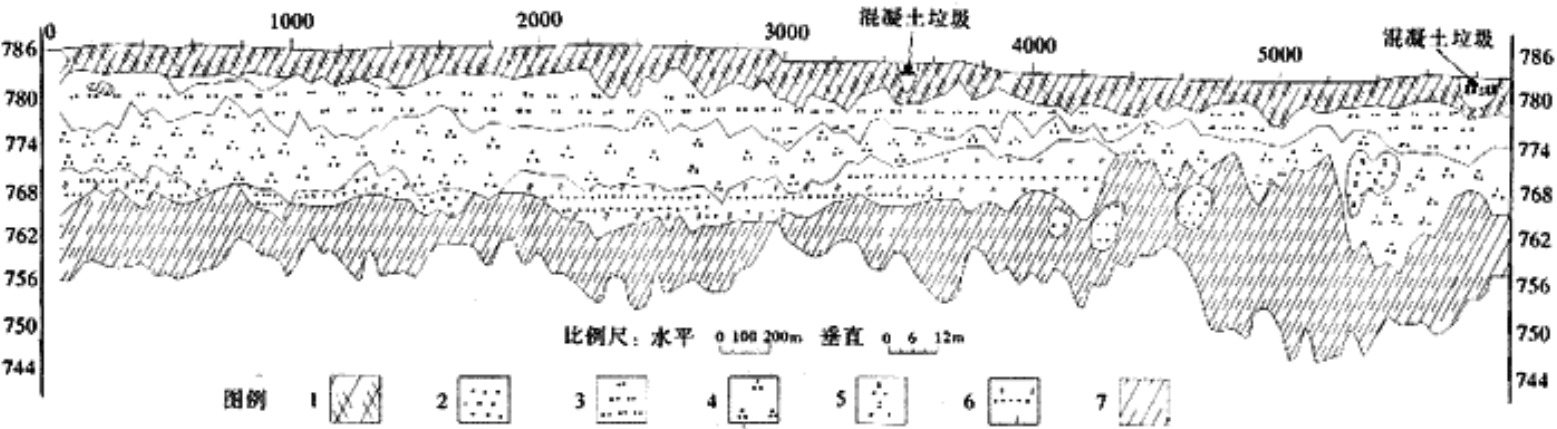


图7 太原市城区汾河治理美化工程W₃线物探面波测试结果剖面

1—杂填土；2—砂粉土；3—粉质细砂；4—中砂；5—中粗砂；6—粗砂；7—粉质粘土或粘质粉土

2.5 结论与建议

通过与钻孔资料对比，物探解释成果与钻孔资料基本吻合。值得注意的地方有：W₃线ZK46孔附近，粘土层尖灭，由于物探测试点距为48 m，且只有一个测试点无粘质粉土或粉质粘土层，也就是有近100 m范围内无粘土资料，有待进一步详查。

需要说明的是物探成果剖面图是由速度即依据面波速度确定的物性层分层绘制而成的，其与地质层位有的地方可能不大一致，有些物性层为地质多层的混合层，属正常情况。

3 结束语

从以上实例可以看出：瞬态面波勘探在第四纪分层方面有着明显的优势，它可以解决常规地震方法无法解决的问题，如速度倒转、薄层等问题；由于面波速度接近于横波速度，测试精度高；同稳态瑞雷面波相比，有着设备简单、工作效率高、应用范围广等优点。成本低，经济效益高。因此，瞬态面波勘探有着广阔的前景。

本次工作软件采用核工业部地质研究院梅汝吾教授编制的SWS面波处理程序，并对笔者提出的问题给予了悉心指导，在此再次表示感谢。

作者简介：杜正涛，男，1964年2月出生于河北乐亭,1987年毕业于武汉地质学院物探系，获学士学位，曾参加“国家七*五课题浅层反射”课题的研究工作，现在北京水电勘测设计研究院任工程师，从事物探工作，发表论文4篇。

作者单位：北京水电勘测设计研究院，北京 100024

参考文献

1 关小平,黄嘉正.瑞雷面波法勘探.北京：中国地质大学出版社，1994

2 王兴泰主编.工程与环境物探新方法新技术.北京：地质出版社，1996

3 严寿民.瞬态瑞雷波勘探方法.物探与化探,1992,16(2):113 ~ 119

1998年10月19日收稿，同年12月15日收修改稿。