

岩土工程

面波法与折射波法在研究基岩弹性力学性质中的应用

刘国庆^{1,3}, 向晓松^{1,2,3}, 王安书¹, 刘申芬^{1,2}

(1. 河南省有色地质矿产局第五大队, 郑州 450052; 2 中国地质大学, 北京 100083;
3. 北京中色物探有限公司, 北京 100045)

摘要 面波法与折射波法地震勘探能够获得岩体的横波速度和纵波速度, 而且可采用同一地震仪器完成。本文主要阐述面波法频散曲线的分层拟合对整个地层进行速度分层, 确定覆盖层、风化层的厚度以及基岩层界面, 并与折射波法相结合计算出基岩层的弹性力学指标。此外, 对单一采用面波法计算弹性力学指标进行了探讨。

关键词 波速分层 动泊松比 动弹性模量 动剪切模量 单位抗力系数

中图分类号 P631. 4; TU452 **文献标识码** A **文章编号** 10495 - 5331(2008)01 - 0109 - 04

目前, 在隧道、公路、坝区选址等工程地质勘察中经常遇到复杂的山区地形, 除对断裂破碎带等不良地质体进行勘察外, 还需对覆盖层、风化层、基岩层进行速度分层和岩土力学性质的研究。我们常用的面波法和折射波法地震勘探正是基于这种地下连续、均匀的层状介质理论, 而且可采用同一浅层地震仪完成 (只是所使用检波器的频率不同)。面波法勘探主要得到地下各层横波速度及对应深度; 折射波法主要得到地下各层纵波速度及对应深度。采用两者相结合的方法能够得到不同速度层的横波速度和纵波速度, 这为研究基岩的岩土力学性质提供了必要的基础数据。因此采用面波法和折射波法相结合在勘探工作中具有很好可行性和生产效益。

1 方法原理简述

面波法就是瑞雷面波勘探。瑞雷面波是由 P 和 SV 型非均匀平面波叠加而成。点状震源产生的球面波在地表自由面上传播时, 就可能产生瑞雷波, 其振幅随深度增大而迅速减小, 均匀各向同性半空间中形成的瑞雷波不具有频散特性, 其相速度与频率无关。在弹性分层的半空间中, 瑞雷波表现出频散特征, 包含了各个分层界面弹性差异的影响。对于横向均匀的分层地层, 瑞雷波的频散特征比较直观地反映了地表以下 (大约在相当于半个波长的深度范围内) 地层的弹性参数, 特别是剪切波的速度。

基于层状介质中的面波理论, 对面波法的频散曲线进行反演拟合计算出地层的面波速度及相应层深度。面波速度 V_R 与横波速度 V_S 之间具有一定关系, 基本相等。

折射波法就是浅层折射波法地震勘探。在层状介质中存在近似水平的速度分界面, 且满足下层介质波速 V_2 大于上覆介质波速 V_1 的条件, 从点状震源产生的入射波以不同的入射角传播到分界面上。当入射角大于 $\arcsin(V_1/V_2)$ 时, 透射波就以 V_2 的速度在分界面上滑行, 在滑行的过程中所经过的任何一点, 均可看为一个新的点震源, 这样就在上层介质中形成一种新波, 折射波。通过相遇追逐观测系统的采集、分析, 获得纵波速度 V_P 及相应层深度。

通过地震勘探方法研究岩体的弹性力学性质, 在工程地质调查中具有很重要的意义, 如利用弹性参数可以对岩体按强度进行分类, 以指导隧道工程设计与施工等。

在已知岩体密度的条件下, 通过横波速度与纵波速度计算动泊松比、动弹性模量、动剪切模量、单位抗力系数的公式如下:

1、动泊松比:

$$m = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

2、动弹性模量:

$$E_d = N_p^2 \frac{(1+m)(1-2m)}{(1-m)} = 2N_s^2(1+m)$$

[收稿日期] 2006 - 10 - 15; [修订日期] 2006 - 10 - 25。

[第一作者简介] 刘国庆 (1969 年 —), 男, 1991 年毕业于桂林学院大学, 获学士学位, 现主要从事地质物化探研究工作。

3、动剪切模量

$$G_d = \nu_p^1 \frac{(1-2m)}{(1-m)} = \nu_s^2$$

4、单位抗力系数

$$K_0 = \frac{E_d}{100(1+m)} a = \frac{2r \times \nu_s^2}{100} a$$

式中： ν_p - 纵波速度， ν_s - 横波速度； r - 岩土介质的密度； a - 折减系数，取平均值 0.4082。

2 工作前提与地层模型的分析

一般密实的基岩层在地下埋藏较深，要计算基岩层的动泊松比、动弹性模量、动剪切模量和单位抗力系数，首先可以采用面波法和折射波法地震勘探进行波速分层。同时，基岩层为下伏地层，其与上覆的土层、风化层一起满足层状均匀、沿深度增加方向各层的弹性波速度迅速增大的特性。下伏地层的弹性波速度大于上覆地层的弹性波速度的均匀层状介质是面波法和折射波法地震勘探工作的地球物理前提。

因此，在采用面波法和折射波法地震勘探进行波速分层和计算岩土力学参数时建立以下地层模型：

- 1、波速较低的第四系覆盖层；
- 2、波速较高的风化层；
- 3、波速最高的基岩层。

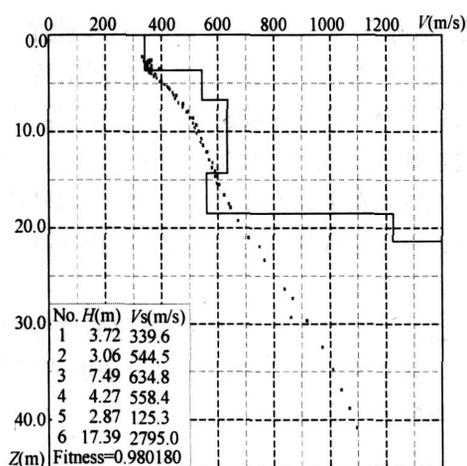


图 1 面波频散曲线拟合解释图

此外，由于地质介质的复杂性，测准波速，特别是横波速度，是不容易的事情，采用面波法能够较好地解决这一问题。采用面波法进行速度分层可以查明覆盖层、风化层厚度，最重要的是确定密实基岩上界面的位置及包括基岩层在内的不同速度地层的横波速度和纵波速度。

3 工程实例

北京至承德拟建高速公路隧道位于复杂的山区地形中，上覆地层为第四系覆盖层，下伏基岩地层为花岗岩层。除已采用钻探勘察外，再采用面波法和折射波法地震勘探相结合，对工作区地层进行波速分层，查明第四系覆盖层和风化基岩层的厚度，并通过基岩层的横波波速和纵波波速计算岩土力学参数，为公路隧道的设计、施工提供依据。

整个工作区的基岩主要为中远古代 (P_tL) 花岗岩，粗粒状、斑状斜长花岗岩，斑状钾长花岗岩等，斑状结构。部分地段有岩石出露，冲沟及表层为第四系松散堆积物，地表出露的岩层严重风化。

面波法和折射波法在同一测点布置排列，沿隧道中轴线布置测点。面波法采用 4Hz 低频检波器，折射波法采用 100Hz 高频检波器，锤击震源。通过对面波法频散曲线的解释拟合进行波速分层，获得第四系覆盖层、风化基岩层、基岩层等不同波速层的厚度和对应的横波速度；通过对折射波法时距曲线采用 0 法求得折射界面，利用差数时距曲线法解释计算分别取得地下地层的纵波速度和对应的深度。

4 波速分层的结果

通过面波法频散曲线的拟合，获得各层的横波速度及层厚度。面波频散曲线拟合解释图见图 1。由图 1 可以看出第一层波速较低，波速为 340m/s，符合第四系覆盖层的波速特征；第二层波速为 544m/s，基本符合强风化层的波速特征，也可能为第四系卵石混合土层，经与附近的钻孔对比发现为卵石混合土层；第三层至第四层波速分别为 634m/s、558m/s，波速稍高，推断为强风化层；第五层波速为 1225m/s，推断为弱风化层；第六层波速迅速增大，达到 2795m/s，应为未风化或微风化的密实基岩层。

综合测线方向上各面波点频散曲线的拟合结果可以对工作区地层进行分层，并与钻探勘察结果相结合形成横波速度 - 地质剖面图 (见图 2)。通过各测点波速分层与钻探勘察的结果的结合对比，各地质层在横波速度上具有以下特征：

第一层：覆盖层，横波速度最低，在 184 ~ 545m/s 之间，层厚在 0 ~ 11.3m 之间。其中夹杂有卵石混合土夹层，横波速度为 500m/s 左右。

第二层：强风化层，横波速度稍高，波速为 422 ~ 1152m/s，层厚在 3.3 ~ 11.7m 之间。

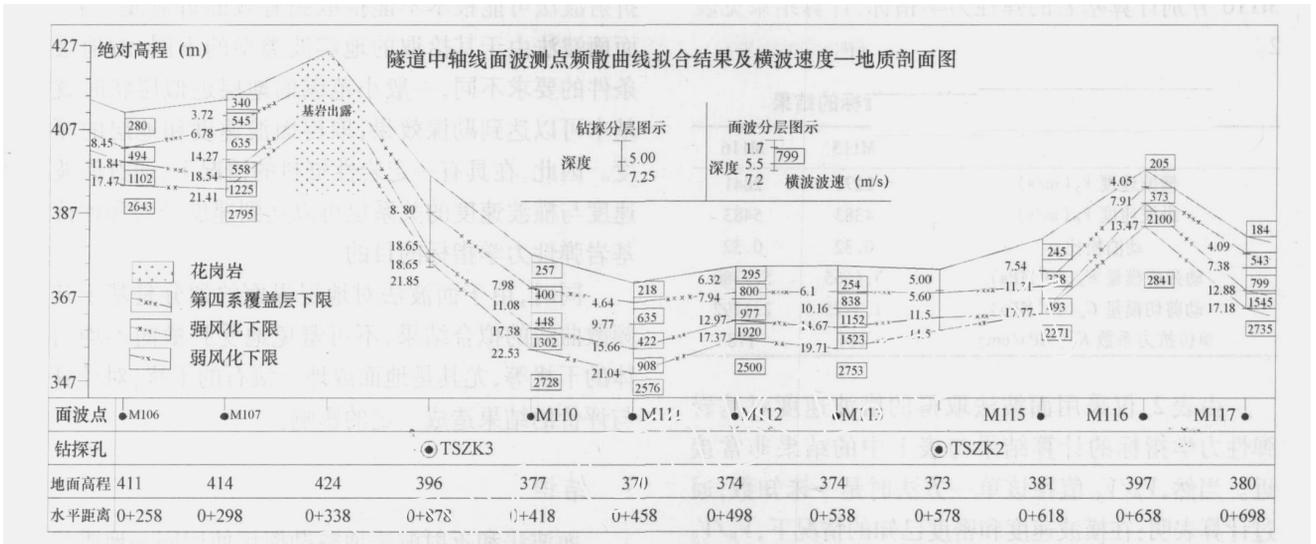


图 2 隧道中轴线面波测点频散曲线拟合结果及横波速度 - 地质剖面图

第三层:弱风化层,横波速度较高,波速在 908 ~ 2100m/s 之间,层厚在 0 ~ 5.6m 之间。

第四层:密实花岗岩层,横波速度最高,波速为 2271 ~ 2841m/s。

通过以上分析可以发现,除覆盖层中夹有波速较高一些的卵石混合土层外,强风化层与弱风化层在波速上存在一定的重合,这说明风化层的地质界线不是很明显,其中存在一定程度的交互,推断受地形、环境等方面的影响风化作用具有一定的不均匀性,这对强风化层和弱风化层的划分产生一定的误差。

由图 2,第四系覆盖层较为均匀,与测线上的钻孔资料具有较好的一致性;由于风化程度的差异,如

强风化层、弱风化层的波速差异较大,弱风化层的厚度较小等原因,部分测点的划分值得商榷。因此,为保证下一步对基岩弹性力学性质研究的准确性,对密实花岗岩层的划分进行了保守处理,即波速稍低的岩层不作为密实基岩层。这与钻孔资料中密实基岩的界面具有较好的一致性。

5 基岩弹性力学指标的计算

通过折射波法地震勘探获得纵波波速,纵波波速与横波速度相结合,在已知基岩密度的情况下就能够计算基岩的弹性力学指标。测区 M107 ~ M117 测点位置的基岩横波速度、纵波速度及弹性力学指标的计算结果见表 1。

表 1 面波法和折射波法计算基岩弹性力学指标的结果

测点	纵波速度 V_p (m/s)	横波速度 V_s (m/s)	动泊松比 μ	动弹性模量 E_d (10^4 MPa)	动剪切模量 G_d (10^4 MPa)	单位抗力系数 K_0 (MPa/cm)	密度 (g/cm^3)
M106	5000	2643	0.31	4.9269	1.8861	154	2.7
M107	5500	2795	0.33	5.5934	2.1092	172	2.7
M110	5200	2728	0.31	5.2650	2.0093	164	2.7
M111	5000	2576	0.32	4.7276	1.7917	146	2.7
M112	4600	2500	0.29	4.3551	1.6875	138	2.7
M113	5100	2753	0.29	5.2975	2.0463	167	2.7
M115	4800	2271	0.36	3.7759	1.3925	114	2.7
M116	5600	2841	0.33	5.7825	2.1792	178	2.7
M117	5200	2735	0.31	5.2866	2.0197	165	2.7

由表 1,可以看出基岩纵波速度在 4600 ~ 5600m/s 之间,各测点的 V_p/V_s 值在 1.8 ~ 2.1 之间。而且,由公式 $\mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{V_p^2 + V_s^2}$ 可以看出在知道基岩密度和动泊松比的情况下仅需要准确测定基岩的横波速度就可以对基岩的弹性力学指标进行计算。这样仅

采用面波勘探技术就能完成计算。 V_p/V_s 值确定的情况下就可以采用横波速度来计算基岩的弹性力学指标。动泊松比与 V_p/V_s 值的平方具有一定相关性。该测区 V_p/V_s 取平均值 1.93。以下利用面波勘探的最小横波速度点 M115 和最大横波速度点

M116分别计算基岩的弹性力学指标,计算结果见表2。

表2 面波法计算基岩弹性力学指标的结果

	M115	M116
横波速度 V_S (m/s)	2271	2841
纵波速度 V_P (m/s)	4383	5483
动泊松比 μ	0.32	0.32
动弹性模量 E_d (10^4 MPa)	3.6665	5.7380
动剪切模量 G_d (10^4 MPa)	1.3925	2.1792
单位抗力系数 K_0 (MPa/cm)	114	178

由表2,仅采用面波法取得的横波速度对基岩弹性力学指标的计算结果与表1中的结果非常接近。当然, V_P/V_S 值在该单一方法时是一未知数,通过计算表明:在横波速度和密度已知的情况下, V_P/V_S 值在10%范围内变化时,动泊松比在0.25~0.36之间变化,动弹性模量的变化幅度在95%~103%之间,动剪切模量和单位抗力系数不受 V_P/V_S 值变化的影响而保持不变。因此,采用面波法获得基岩的横波速度计算基岩弹性力学指标的方法具有进一步实践和研究的空间。

6 方法运用的局限性分析

面波法和折射波法都是建立在层状均匀、波速递增的地球物理模型的基础上的,对于基岩层上方的第四系覆盖层、风化层的划分与弹性力学指标的计算具有较好的运用条件。

但当地层模型中遇到地质条件发生变化,如构造破碎带、地质蚀变带等,基岩岩性或速度界面发生较大变化时,方法的运用具有一定的局限性,尤其是

折射波法可能根本不能拾取到有效的折射波界面。而面波法由于其拾取的地震波类型的不同,对地层条件的要求不同,一般小范围的地层近似层状时就基本可以达到勘探效果,取得面波速度和地层的厚度。因此,在具有一定岩性资料的情况下,通过面波速度与横波速度的关系也可以达到速度分层和评价基岩弹性力学指标的目的。

同时,由于面波法对地层界面的划分是基于其频散曲线的拟合结果,不可避免地受到横向不均匀体的干扰等,尤其是地面或地下滚石的干扰,对计算与评价的结果造成一定的影响。

7 结语

面波法和折射波法地震勘探仅使用同一地震仪器,能够进行波速分层,划分覆盖层及风化层厚度,确定基岩界面,分别获得不同地层的横波速度和纵波速度,计算基岩的弹性力学指标。同时也提出了采用单一面波法计算基岩弹性力学指标的可能性。

[参考文献]

- [1] 杨成林. 瑞雷波勘探 [M]. 北京:地质出版社,1993.
- [2] 宋先海,肖柏勋,余才盛,等. 瞬态瑞雷波反演横波的 SVD 算法及其应用 [J]. 地质与勘探,2004(1):93-96.
- [3] 何樵登. 地震勘探原理和方法 [M]. 北京:地质出版社,1986.
- [4] 钟清,杨辟元,孟小红,等. 浅谈瑞雷波工程勘探的装置问题 [J]. 地质与勘探,2004(增刊):207-210.
- [5] 耿光旭,李华平,刘金川. 用瑞雷波法探测水库坝堤质量 [J]. 地质与勘探,2005(增刊):103-105.
- [6] 胡广韬,杨文远. 工程地质学 [M]. 北京:地质出版社,1997.
- [7] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册. 北京:中国建筑工业出版社,1992.

SURFACE - WAVE AND REFRACTIVE - WAVE SURVEY APPLICATION FOR STUDYING ELASTIC PROPERTY OF BASE ROCK

LU Guo - qing^{1,3}, XIANg Xiao - song^{1,2,3}, WANG AN - shu¹, LU Shen - fen^{1,2}

(1. Henan Non - Ferrous Metals Geological Survey Department, 5th crew, Zhengzhou 450042;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Beijing ZhongSe Geophysics Co Ltd, Beijing 100045)

Abstract: S - wave and P - wave velocity of terrane can be obtained with surface - wave survey and refractive - wave survey. They can be accomplished by only using a seismograph. The paper describes how distinguish velocity layer by frequency scattering curve fitting method to determine thickness of overburden layer and weathered layer and base - rock interface. Elastic parameter can be calculated by combing refractive - wave survey. In addition, the paper presents also method of calculating elastic parameter with single surface - wave survey.

Key words: velocity layer, dynamical poisson ratio, dynamial elastic module, dynamial shear EM, units resistance coefficient