

主动源与被动源面波联合勘探在过江通道的应用

周兆城¹, 汤井田^{1,2}

¹中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙

²中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙

收稿日期: 2022年2月14日; 录用日期: 2022年3月8日; 发布日期: 2022年3月16日

摘要

在工程建设中, 不良地质条件会带来各种安全问题, 使得施工难以顺利完成, 同时也会造成经济利益和人民生命财产的损失。为详细查明工程场地的地下各类地质情况, 划分地层及基岩的完整性评价, 预测可能出现的地质问题和提出应对不良地质条件下的施工建议, 本文采用瞬态瑞雷波法与微动法进行工区勘查, 根据面波的频散特性得到地下结构的横波速度剖面, 以较好地达到查明地下地质情况的目的。本文以江苏省南京市某过江隧道地基勘查为例, 采用瞬态瑞雷波法与微动法联合的方式进行勘查, 研究其探测效果。结果表明: 利用面波法提取的特征频率和频散特性, 可以有效地获得地下介质的横波速度图像, 该方法对于地层划分、圈定软弱层具有明显效果, 能将低速异常区域能较好地识别出来, 结合钻孔资料可以较好地进行地下地质解释。

关键词

工程物探, 瞬态瑞雷波法, 微动法, 地层划分

Combined Exploration of Active and Passive Surface Waves in River Crossing Channel

Zhaocheng Zhou¹, Jingtian Tang^{1,2}

¹School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan

²Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Central South University, Ministry of Education, Changsha Hunan

Received: Feb. 14th, 2022; accepted: Mar. 8th, 2022; published: Mar. 16th, 2022

Abstract

In engineering construction, adverse geological conditions can bring various security issue, making

it difficult to complete the construction successfully, and also causing the loss of economic interests and people's lives and properties. By using this method, we can identify the various of subsurface geological conditions at the project site in detail, divide the stratigraphy, evaluate bedrock integrity, predict possible geological problems and propose recommendations for construction under adverse geological conditions. In this paper, the transient Rayleigh wave method and the micro-motion survey method are used to explore the work area, and the S-wave velocity profile of the subsurface structure is obtained according to the dispersion characteristics of the surface wave, in order to achieve the purpose of identifying the subsurface geological conditions well. In this paper, we take the soil investigation of a river crossing tunnel as an example in Nanjing, Jiangsu Province, and combine the transient Rayleigh wave method and micro-motion survey method to analysis its detection effect. The results show that the characteristic frequency and dispersion characteristics extracted by the surface wave method. The method can effectively obtain S-wave velocity profile of the subsurface medium, and it has obvious effects on stratigraphic delineation and trapping of soft layers. It can identify the low-velocity anomalous areas, which can survey subsurface geologic well combined with the drill hole information.

Keywords

Geophysics in Engineering Geology, Transient Rayleigh Wave Method, Microtremor Exploration, Stratigraphical Division

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在各类工程建设过程中, 均需开展地质勘查工作, 对工区地下地质情况进行探查, 为工程施工建设提供参考资料, 以保证其能顺利进行。地下岩溶、断层等不良地质结构发育、地基稳定性差等地质问题则会给施工带来隐患, 借助地球物理方法可为解决该类地质问题提供科学的依据和建议。瑞雷波勘探利用其在地层中传播的频散特性与与介质中传播速度的物性差异等, 并且存在一定规律, 使其可以反映地下的构造特征。瑞雷波勘探能有效查明工区覆盖层厚度以及基岩构造、岩溶发育情况, 其在各类工程建设中发挥着举足轻重的作用。由于各种地球物理方法都存在自身局限性, 在实际工程中需根据该区域的地质条件等选取合适的方法, 此次我们利用瞬态瑞雷波法和微动法联合勘探开展探测, 既满足此次工程建设的需求, 也能对该两种物探方法的有效性进行研究。

面波这类方法发展地比较成熟, 具有快速、经济、施工条件方便等优势, 使得其在浅层地质勘探中获得了广泛应用。其中 1983 年, Stoke 和 Nazarian [1] [2]提出了瞬态面波谱分析法, 通过检波器组成的观测系统观测记录瑞雷波信号, 在从面波信号中提取出频散曲线, 以此来对地下介质情况进行推测。后续学者在此基础上不断进行改进并提出一系列新的方法, 提高了信噪比、工作效率、横向分辨率等等, 使得该方法越来越成熟, 使用范围越来越广泛。1957 年, Aki [3] [4]首次提出了微动的理论, 而在 21 世纪得到了快速的发展, 后续一系列的发展使得微动方法在成像上应用越来越广泛。在瑞雷波信号中, 主动源激发的信号频率高, 浅层分辨能力好, 但探测深度较小; 被动源信号频带通常更宽, 可以探测较深地层, 但由于高频能量弱, 因此浅层分辨能力差。1998 年, 王振东[5] [6]首先提出了主动源与被动源结合的方式, 使其优势互补, 来获得更丰富的地下信息。后续学者[7]-[12]进行了大量研究, 提出了改进的方法, 并在实际应用中得到了验证, 结果表明联合成像的方法极大的提高了勘探最大深度, 取得了很好的效果。

江苏省南京市某地拟建一过江隧道, 遇到地下地质情况不明, 施工条件不确定, 此时要求对施工区域的场地土类别划分、圈定地层中软弱层的埋深及分布范围、地下岩溶、断裂构造的分布情况等, 我们借助于地球物理手段来完成该地质任务。本文通过瞬态瑞雷波法和微动法对工区采集野外数据, 布置线性台阵系统, 主动源采用人工敲击震源采集面波信号, 随后采集天然源面波信号, 获得了两条测线的横波速度剖面图像, 结合钻探资料进行地质解释, 查明了地下的岩土层、岩溶断层等异常体及基岩情况等, 取得了良好的应用效果, 为后续施工建设提供了科学的建议和治理方案。

2. 场地地质与地球物理条件

2.1. 地质概况

南京市位于江苏省西南部, 地处长江中下游, 三面环山一面临水, 本场地位于长江南岸燕子矶公园附近, 地貌为丘陵斜坡。工点位于城市道路两旁和江边小山。工区内地势较平缓, 以平原为主, 最高山峰为紫金山, 最高海拔约 450 m 左右。南京地区大地构造属扬子准地台的下扬子凹陷褶皱带, 褶皱、断裂构造发育。

线路从红山路快速路自南向北依次经过和燕路、幕府山、长江右汊(主航道)后进入八卦洲, 终点为八卦洲浦仪互通, 线路依次穿越长江阶地区、剥蚀丘陵区、长江漫滩与河谷区。长江阶地区地形略有起伏, 地面标高 12~35 m, 剥蚀丘陵区地势起伏较大, 地面标高 20~68 m, 线路下穿幕府山边缘。长江漫滩区, 地势开阔平坦, 地面标高一般 5~6 m。长江内低漫滩区近长江水域附近, 枯水期裸于地表, 丰水期被江水淹没, 地形微向长江倾斜。

沿线地质构造主要处于宁镇弧形褶皱西段, 各类不同期次、不同性质, 不同方向的褶皱, 断裂十分发育, 近场区重要地质构造[13]有: 龙-仓复背斜、幕府山-焦山断裂(F5)、南京-湖熟断裂(F1)、江浦-六合断裂(F3)等, 见下图 1。

根据钻孔揭露及区域地质资料, 测区内主要分为如下几层: 第一层为人工填土, 以建筑垃圾为主; 第二层为第四系沉积土, 为粉质黏土; 第三层为基岩, 成分有灰岩、含砾砂岩及角砾状灰岩等。

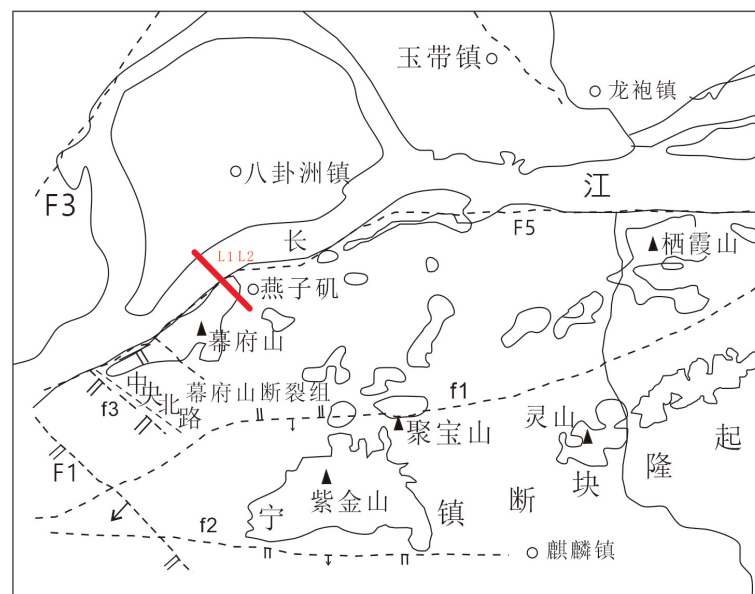


Figure 1. Regional structure map of study area
图 1. 工区构造地质简图

2.2. 地球物理条件

测区内覆盖层与基岩的密度、速度、电性等岩土力学性质存在明显差异, 良好的物性分界为地球物理勘探提供了前提[14] [15], 该地区主要介质物性参数如表 1。

1) 第四系覆盖土层与角砾岩等岩体之间横波速度存在较明显差异。由于地层差异的存在导致在不同测点位置出现不同的频散曲线, 通过对该曲线的反演即可获得地下介质的速度分布情况, 实现介质构造信息的探测;

2) 非密实岩体、松散土体、强风化区、破碎区、软弱区域物性表现为横波低速, 密实土体、完整基岩表现为横波高波速的特征, 两者存在明显的波速, 是瞬态面波法和微动法的地球物理前提。

Table 1. Main medium physical parameters

表 1. 主要介质物性参数

岩性	横波速度 V_s (m/s)	岩性	横波速度 V_s (m/s)
填土	100~200	砂岩	300~1000
黏土	100~300	砾岩	300~1500
粉细砂	200~400	灰岩	500~1500
中粗砂	200~400	溶洞及充填物	300~500

3. 方法原理

3.1. 原理概述

瑞雷波在地下非均匀介质条件下传播时会发生频散现象, 因此我们可通过得到的频散信息来反演出地下的结构分布情况。随着各类工程应用使用的频率越来越高, 专家学者们对勘探计算及数据解释等方面做了大量研究, 瑞雷波勘探法已经变得很成熟, 使用的范围越来越广。瑞雷波勘探法使用分为主动源与被动源两种, 主动源主要采用人工震源(如锤击、炸药、振动器等)来产生瑞雷波, 被动源通过对背景噪音的记录获得瑞雷波信息, 前者频率高探测深度浅, 而后者频率低探测深度大, 因此通过两种结合的方式可充分利用其优势, 来达到理想的应用效果, 以完成相关工程地质任务。

主动源面波法常常使用的是瞬态瑞雷波勘探法, 其在地面通过重锤敲击瞬间产生瑞雷波信号, 将检波器上接收到的信号进行处理, 获得地下横波速度图像。发展迅速和成熟的多道瞬态瑞雷波技术, 观测系统采用多个检波器进行线性排列的组合方式, 震源激发方向与排列方式相平行, 该工作方式可获得高效率的采集, 对采集区域的条件要求也较低。地球上的物质无时无刻不在振动, 通过台阵观测天然振动信号, 来获得丰富的地下结构信息的方法便叫做微动。该方法简捷轻便、高效无损及高精度的优点, 使得其在工程建设中微动勘探方法的使用范围越来越广、频率越来越高。在采集到的面波信号中, 主动源面波信号通常频率较高, 浅层的分辨率高但探测深度小, 被动源面波信号采集到持续存在的背景噪音, 具有较宽的频带范围, 可利用其低频信号来探测深部构造, 但高频信号薄弱, 因此采用主动源与被动源方法结合进行勘探便能实际应用可以大大提升勘探精度, 获得较为理想的地下横波速度剖面图像[16]。

3.2. 频散提取

在面波信号的频散提取中, 分为主动源与被动源提取方法。主动源频散曲线提取主要使用的方法有 $f-k$ 法[17]、 $\tau-p$ 变换法[18]、相移法[19]、拉东变换[20]和倾斜叠加[21]等方法。被动源频散曲线提取主要

使用的方法有空间自相关法(SPAC) [3]及其扩展、频率 - 波数法(F-K) [22]。本文应用的方法是相移法与扩展空间互相关法(ESPAC) [23]分别进行频散曲线的提取, 相移法用于主动源信号的提取, 扩展空间互相关法用于被动源信号的提取, 这里介绍这两种方法的基本原理。

3.2.1. 相移法

相移法是由 Park 等人[7]在 1998 年提出, 其原理是将面波信号通过傅里叶变换后, 在频率域上进行倾斜叠加, 最后提取出频散能量曲线的方法。假设采集到的面波炮集记录为 $U(x, w)$, 通过傅里叶变换得到频谱为:

$$U(x, w) = \int u(x, t) e^{iwt} dt \quad (1)$$

频谱 $U(x, w)$ 也可以写为振幅谱与相位谱的乘积, 即:

$$U(x, w) = P(x, w) A(x, w) \quad (2)$$

(2)式中, $P(x, w)$ 表示相位谱; $A(x, w)$ 表示振幅谱。

相位谱 $P(x, w)$ 包含了面波法的传播信息, 而振幅谱 $A(x, w)$ 包含了面波信号的振幅衰减和球面扩散等信息, 这些频率分量被相互分开。将上式写成如下形式:

$$U(x, w) = e^{-i\Phi x} A(x, w) \quad (3)$$

其中, $\Phi = \omega/V_\omega$, ω 为圆频率, V_ω 为频率分量 ω 对应的相速度。

对(3)式作积分, 得:

$$V(w, \phi) = \int e^{i\phi x} \left[\frac{U(x, w)}{|U(x, w)|} \right] dx = \int e^{-i(\Phi - \phi)x} \left[\frac{A(x, w)}{|A(x, w)|} \right] dx \quad (4)$$

由(4)式中所示的积分可以看做, 处于某一频率的波场经过相位移动和归一化的振幅后沿炮检距方向进行叠加。当给定的一个频率 ω , 若满足下式

$$\phi = \Phi = w/c_w \quad (5)$$

则出现极大值。而由此, 位于谱上的极大值点就可以确定该极大值点对应的相速度。将谱按通过坐标变换即可得到 f - V 频散能量图像。

3.2.2. 空间自相关法及其扩展

早期, 在各类物探方法中, 人们都将各类天然微弱振动作为噪声去除, 直到后期人们才发现从微动中提取出微动信号的方法。空间自相关法(SPAC)是由 Aki [3]在 1957 年首次提出, 其假设在平稳随机的波场下, 可从各种天然振动中提取出面波频散曲线。该方法的原理是, 确定一组微动信号接收点, 将其按圆形排列的方式布置, 其中一点位于排列的中心, 其他接收点按等角度位于在圆周上, 假设中心点 $C(0,0)$ 与圆周上任意一接收点 $X(r, \theta)$ 收到角频率为 ω 的面波信号分布为 $u(0,0, \omega, t)$, $u(r, \theta, \omega, t)$, 于是其中的空间自相关函数为:

$$\phi = u(0, 0, w, t) u(r, \theta, w) d\theta \quad (6)$$

空间自相关系数则定义为空间自相关函数所在方向上的平均, 即

$$\rho(r, w) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \Phi(r, \theta, w) d\theta \quad (7)$$

上式的积分结果可表示为:

$$\rho(r, \omega) = J_0(\omega r/v(\omega)) \quad (8)$$

式中, $J_0(x)$ 是第一类零阶贝塞尔函数, $v(\omega)$ 为面波相速度。

由此推出, 空间自相关系数是面波相速度和频率的函数, 通过拟合计算的空间自相关系数 $\rho(r, \omega)$, 即可得到面波的相速度。

由于 SPAC 法要求采用圆形规则台阵, 这极大地限制了野外实际工作的地下条件, 并不普遍适用。于是冈田广基于空间自相关法提出了一种新的方法, 可较好地运用于非规则台阵, 该方法称为扩展的空间自相关法(ESPAC) [12]。这种方法能方便运用于野外施工, 提高勘探深度, 缩短资料处理时间, 让该方法广泛运用与成熟起来, 本文在微动信号处理中使用的便是该方法。

4. 联合勘探实例

4.1. 测线布置

本次野外工作测线采用线性排列布置, 沿测线布置多个长度相等的接收排列, 各个接收排列的检波器间距相等, 选取合适的偏移距使用重锤进行敲击产生人工震源, 在采集到合适主动源数据后, 在原位置进行微动面波数据的采集, 以主被动结合的方式完成野外数据采集。数据采集系统使用国科(重庆) EvS-4 城市浅层地质成像系统, 该系统将地震面波法、微动台阵法和微动谱比法三个方法在外业数据采集和信息处理上进行了有机融合, 取长补短, 提高了工资效率和数据质量。本次作业采用 12 道 12 Hz 检波器进行线性排列(如图 2), 道间距为 5 米, 采样间隔为 4 ms。主动源面波采用重锤激发, 偏移距为 10 m, 被动源采集时间为 20 分钟。此次共布置 2 条测线: 测线 L1、测线 L2。

4.2. 工作流程

- ①数据采集: 布置多道检波器排列, 使用主动源面波方法在排列前方激发地震波, 最小偏移距 10 米, 主动源面波数据采集后, 保持排列不动, 继续采集微动背景噪声;
- ②速度分析: 通过主动源与被动源面波数据的综合处理得到局部区域内的速度分布情况;
- ③预处理: 在进行频散计算之前需要剔除短时干扰(如过往车辆)的影响, 需要有效识别出短时干扰, 超过阈值的部分视为干扰被舍弃, 低于阈值的部分视为稳态信号被采用;
- ④频散计算: 在采集的数据中筛选稳定的数据段提取出曲线;
- ⑤反演: 基于主动源面波和被动源面波数据, 采用高信噪比者优先原则, 对排列内的频散曲线建模与反演, 从而获得各测点下的地层结构分布。

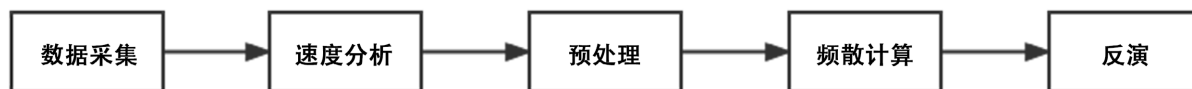


Figure 2. Block diagram of Microtremor observation array

图 2. 野外观测系统示意图

数据采集时主动源一般采用线性排列方式, 而被动源排列方式有圆型、十字型、L 型、线性以及不规则排列等台阵观测方式, 此次工作结合实际场地情况以提高工作效率, 我们均采用线性排列进行数据采集。频散计算是实际工作中最为关键的一步, 即从采集的数据信号中提取出频散曲线, 需选取合适的方法和合适的数据段可得到较为理想的结果, 此次工作我们采用的是相移法与 ESPAC 法分别进行频散提取。面波的反演就是对地下岩土体的物理力学性质和地下构造做出合理解释, 通过对频散曲线的反演得到的地下地层模型, 包括横波速度和层厚等信息, 这是实际工作的需要, 也是面波勘探的重要的一环,

这也是面波勘探的最终目的。面波勘探的反演方法主要有局部线性优化和非线性全局优化等两类方法, 这里我们采用的是最小二乘局部线性优化方法获得地下横波速度剖面。

4.3. 结果分析

在现场实际条件下, 由于岩层压实、含水程度不同会造成差异, 故在不同地点的横波速度存在差异, 本文利用已知钻孔结果对岩土层进行标定, 结合横波速度剖面特点, 来确定岩土界面的横向变化, 进行岩土层划分[24] [25] [26]。

图3、图4分别为该段L1测线和L2测线反演横波速度图像。由图中横波速度图像可知, 探测区域内地层层状特征明显, 由浅至深速度变化趋势明显从小变大。本次联合面波勘探有效解释深度约为90米, 根据横波速度分布范围, 可以把测区内覆盖层及以下相邻地层大概分为3层, 自上而下, 随深度增加横波波速逐渐增大。从图1中可知, 第1层为人工填土层, 主要由建筑垃圾、混合粘性土等组成, 埋深约在地上10 m到0 m左右, 横波速度范围在130 m/s以内; 第2层为粉质黏土夹粉土, 埋深大概在0 m到地下30米左右横波速度范围在; 第3层为基岩, 主要由灰岩含砾砂岩, 角砾岩等组成。测线L1平面图中隧道洞附近有两处波速低速异常区, 分别为测线0~20米处和测线70~95米处, 推测为岩石破碎带。从图2中可知, 第1层为人工填土层, 主要由建筑垃圾、混合粘性土等组成, 埋深约在地上10 m到0 m左右, 横波速度范围在130 m/s以内; 第2层为粉质黏土夹粉土, 埋深大概在0 m到地下30米左右横波速度范围在; 第3层为基岩, 主要由灰岩含砾砂岩, 角砾岩等组成。测线2平面图中隧道洞附近有两处波速低速异常区, 分别为测线0~20米处和测线70~95米处, 推测为岩石破碎带。未见明显低速异常, 即判断不存在断层、岩溶等不良地质情况, 完成该物探工作后与钻孔资料对比分析, 与实际地下情况大致吻合。

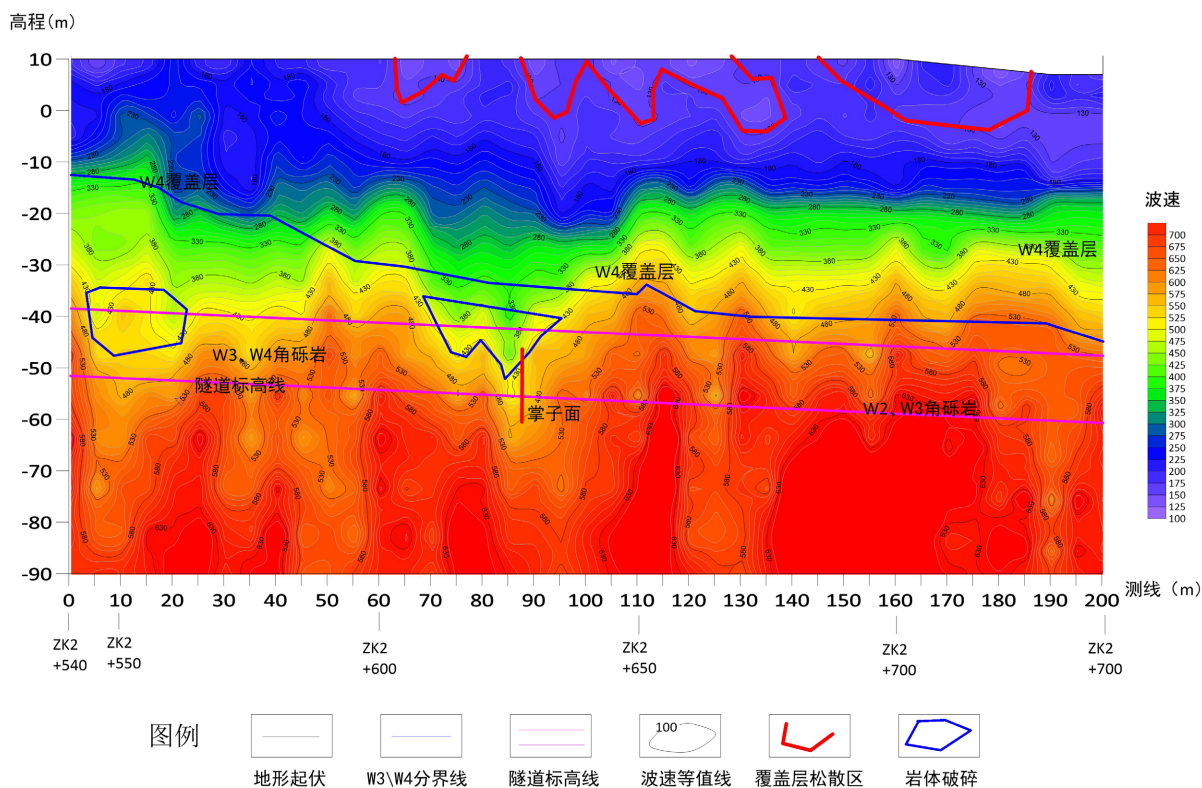


Figure 3. Line L1 Profile of S-wave velocity

图3. L1 测线横波速度图像

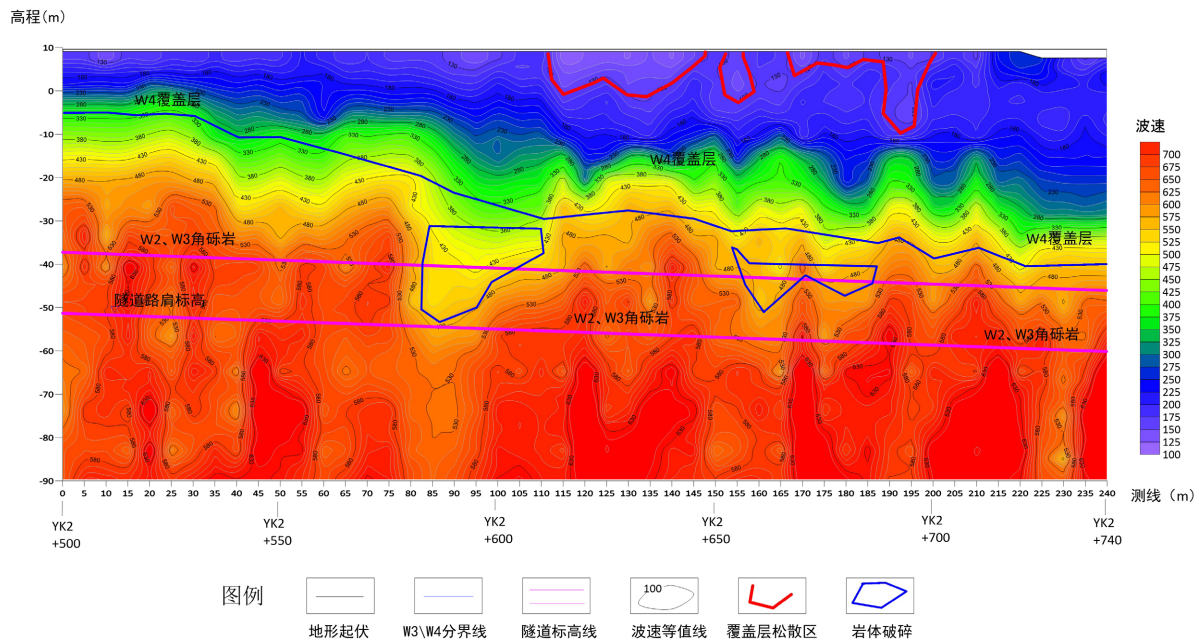


Figure 4. Line L2 Profile of S-wave velocity

图 4. L2 测线横波速度图像

5. 结论

通过上述分析和讨论, 得出如下结论:

1) 面波法方便快捷, 应用于工程中地下介质探测效果良好, 且方法成熟应用广泛, 具有较大的经济成本优势, 在城市各类工程应用中很有前景。

2) 主被动源面波法相结合勘探可很好地完成互补运用于工程中, 主动源面波法具有的高频优势可对浅层完成精确探测, 而被动源面波法具有的低频优势可对较大深度区域进行探测, 两者结合使用可大大提高勘探精度与分辨率, 与钻孔资料进行对比分析, 可为后续施工建设提供科学依据与建议。

3) 瑞雷面波法对于划分地层, 查明岩溶、断层等不良地质体, 场地稳定性评价等方面十分有效, 且通过实例证明该方法行之有效, 可推广使用。

目前, 面波法发展迅速并广泛应用于多个领域, 在工程应用中也非常成熟, 而主被动源面波联合勘探也逐渐兴起, 在国内外应用越来越广泛。在此过程中, 还存在频散能量不均衡导致分辨率不高, 一些检波器获得的信号不足等问题, 还亟待学者们的深入研究与应用。

参考文献

- [1] Stoke, K.H.I. and Nazarian S. (1983) Effectiveness of Ground Improvement from Spectral Analysis of Surface Waves. *Proceedings 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Helsinki, 23-26 May 1983, 31-38.
- [2] Nazarian, S., Stokoe II, K.H. and Hudson, W R. (1983) Use of Spectral Analysis of Surface Waves Method for Determination of Moduli and Thicknesses of Pavement Systems. *Transport Research Record*, **930**, 38-45.
- [3] Aki, K. (1957) Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves with Special Reference to Microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University*, **35**, 415-457.
- [4] Aki, K. and Richards, P.G. (1980) *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. W.H. Freeman and Company, New York.
- [5] 王振东. 双源面波勘探构想[J]. 中国地质, 1998(4): 47-48.

- [6] 王振东. 微动的空间自相关法及其实用技术[J]. 物探与化探, 1986, 10(2): 123-133.
- [7] Park, C.B., Miller, R.D., Ryden, N. and Ivanov, J. (2005) Combined Use of Active and Passive Surface Waves. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, **10**, 323-334. <https://doi.org/10.2113/JEEG10.3.323>
- [8] Park C.B. and Miller, R.D. (2008) Roadside Passive Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **13**, 1-11. <https://doi.org/10.2113/JEEG13.1.1>
- [9] Park, C.B., Miller, R.D., Xia J., *et al.* (2007) Multichannel Analysis of Surface (MASW)-Active and Passive Methods. *Leading Edge*, **26**, 60-64. <https://doi.org/10.1190/1.2431832>
- [10] 王建文, 孙秀容, 王宏科, 夏学礼, 崔若飞. 双源面波地震勘探在煤层采空区探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(4): 403-407.
- [11] Zor, E., Ozalaybey, S., Karaaslan, A., *et al.* (2010) Shear Wave Velocity Structure of the Izmit Bay Area (Turkey) Estimated from Active-Passive Array Surface Wave and Single-Station Microtremor Methods. *Geophysical Journal International*, **182**, 1603-1618. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04710.x>
- [12] Lin, J., Luo, Y. and Xu, H. (2016) Combined Use of Active and Passive Surface Waves for the S-Wave Velocity Structure Delineation Beneath the Balikun Basin, China. *7th International Conference on Environmental and Engineering Geophysics*, Beijing, 26-29 June 2016, 258-261. <https://doi.org/10.2991/iceeg-16.2016.70>
- [13] 邵勇, 阎长虹, 马庆华. 南京地铁3号线岩溶地质问题分析[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(4): 40-42+47.
- [14] 王均, 刘磊, 张岳, 孙进忠, 王文轩, 李高, 等. 贵阳地铁车站基坑岩溶多道瞬态瑞雷波探测及工程验证[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(6): 2588-2596.
- [15] 卓启亮, 于强. 微动探测方法在城市工程地质勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2020, 17(5): 658-664.
- [16] 刘庆华, 鲁来玉, 王凯明. 主动源和被动源面波浅勘方法综述[J]. 地球物理学进展. 2015, 30(6): 2906-2922.
- [17] Gabriels, P., Snieder, R. and Nolet, G. (1987) *In Situ* Measurements of Shear Wave Velocity in Sediments with High Mode Rayleigh Waves. *Geophysical Prospecting*, **35**, 187-196. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1987.tb00812.x>
- [18] 宋先海, 肖柏勋, 顾汉明, 刘江平. 用改进的 τ - p 变换算法提取瞬态瑞雷波频散曲线[J]. 物探与化探, 2003, 27(4): 292-295.
- [19] Park, C.B., Miller, R.D. and Xia, J.H. (1998) Imaging Dispersion Curves of Surface Waves on Multi-Channel Record. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts. Expanded Abstracts*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 1377-1380. <https://doi.org/10.1190/1.1820161>
- [20] Beylkin, G. (1987) Discrete Radon Transform. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, **35**, 162-179. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1987.1165108>
- [21] Xia, J.H., Xu, Y.X. and Miller, R.D. (2007) Generating an Image of Dispersive Energy by Frequency Decomposition and Slant Stacking. *Pure and Applied Geophysics*, **164**, 941-956. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0204-9>
- [22] Capon, J. (1969) High Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis. *Geophysics*, **34**, 21-38.
- [23] Ling, S. and Okada, H. (1993) An Extended Use of the Spatial Auto-Correlation Method for the Estimation of Structure Using Microtremors. Society of Exploration Geophysicists of Japan, Tokyo, 44-48.
- [24] 丰赟, 沙椿. 面波联合勘探在深厚覆盖层地区应用实例分析[J]. 物探与化探, 2018, 42(2): 392-397.
- [25] 乔高乾, 徐佩芬, 龙刚, 凌甦群. 微动剖面探测法在城市轨道交通勘察中的应用及效果: 以广州地铁十号线为例[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(20): 8582-8591.
- [26] 张伟, 甘伏平, 梁东辉, 韩凯, 刘伟. 多道瞬态面波法与微动法联合推断岩溶塌陷区覆盖层的结构和厚度分布[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 272-279.