

# 微动测深在改扩建高速大厚度弃土堆边坡勘探中的应用

陈超 孙茂锐 刘路 李星

安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司

**摘要:**在高速公路的改扩建项目中,常规物探方法受限于场地条件、车流干扰等,难以获得良好效果。本文以某改扩建高速弃土堆边坡勘察为例,通过布置微动测深剖面,采用改进的频率-贝塞尔从预处理后的微动信号垂向分量中提取瑞雷波相速度频散曲线,基于最小二乘算法模型反演,获得各测点S波速度结构特征,通过与钻探结果对比,勾画主要地层结构。研究表明,微动测深结合钻探可以有效探测浅部覆盖层厚度和结构,探明弃土堆边坡填土层厚约2.9~51.5m,研究成果为弃土堆边坡的开挖、挡墙的设计施工等提供了科学依据。

**关键词:**微动; AMT; 公路; 弃土堆边坡

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.06.034

## 一、引言

G4211宁芜高速皖苏界至芜湖枢纽段Y6K59+630~Y6K60+400段弃土堆边坡位于原姑山矿弃土区,矿上开采过程中产生大量弃渣就近填埋形成大范围填土,其组分多样,级配差,结构松散,渗透性强,在未查明填土厚度、走势情况下,对边坡稳定性验算造成很大困扰。由于填土较松散,密实度不均,空隙多,其电性特征和波动特征与下伏原始土层及风化层存在差异,因此采用物探方法进行弃渣堆积体分布调查是可行的。但由于现有高速公路车辆通行量大,地表高压电线干扰,加上填土和原土层局部厚度较大,常规的浅层地震和高密度电法等难以获得较好的效果。微动勘探是利用地震检波器接收到微动信号,估算面波相速度,并通过对瑞雷波频散曲线反演,获得浅部地层视横波速度结构的地球物理勘探方法,尤其适用于存在电磁和噪音干扰的环境<sup>[1-4]</sup>。

本文以Y6K59+630~Y6K60+400段弃土堆边坡为研究对象,利用微动测深方法获取该弃土堆边坡的S波速度剖面,结合钻孔确定地层岩性分层和填土的分布,有助于评价弃土堆边坡对公路工程的影响,为高速公路改扩建项目的设计和施工提供了有力支持。

## 二、基本原理

### (一) 微动测深

微动测深法通过提取表征地层物性差异的频散曲线,反演S波速度结构,为地层结构划分提供地球物理依据。提取微动频散曲线的方法很多,包括空间自相关方法、扩展空间自相关方法、微动折射方法、频率-贝塞尔方法、路边被动源法等<sup>[4-9]</sup>,这些处理方法一部分直接对微动信号进行频散分析,而另一部分先对微动信号进行地震干涉运算,再对经验格林函数进行频散分析,各有优势。本文布设L型台阵采集微动信息,用改进-频率贝塞尔方法处理微震数据,结合钻孔资料,探查了浅部覆盖层的厚度及结构,旨在为高速公路改扩建提供地球物理依据,取得了良好的试验效果。

微动测深方法的纵向分辨率与观测半径相关,观测半径越小分辨率越高,因此在满足勘探深度的情况下,最小台阵半径决定了纵向分辨率,二维剖面结果横向分辨率由探测点间距决定。为获取80m深度范围内的可供对比分析的探测结果,通过试验,我们采用点距为5m的L型台阵,共布设GN309微动探测仪20个。实际工作中,先测试台阵中各套仪器一致性,在相位、振幅、相干系数等达到一致性要求后,进行微动数据采集,实测采样频率为250Hz,观测时长30min。

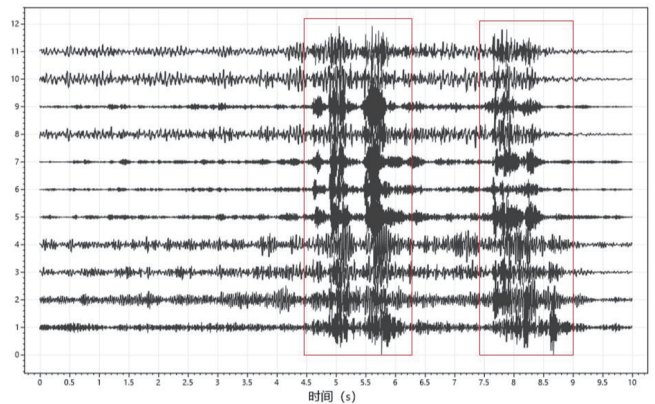


图1 采集到的微动信号

(图中为10ms记录,红框为过车强震动)

### (二) 数据处理

本文采用改进-频率贝塞尔方法提取瑞雷波频散曲线<sup>[10]</sup>。式(1)为外传波场正方向速度扫描的能量谱和内传波场反方向速度扫描能量谱的和,也是改进频率贝塞尔变换方法进行多模式面波频散能量分析的核心公式。改进-频率贝塞尔方法的 $E(\omega, k)$ 实际为频率贝塞尔方法中真实面波能量的一部分,但可以避免后者的“交叉”假频,频散计算流程见图2。

$$E(\omega, k) = -\int_0^{\infty} [iG_{\pm}(r, \omega)H_0^{(2)}(kr) + (iG_{\pm}(r, \omega))^* H_0^{(1)}(kr)] r dr \quad (1)$$

式中,  $E(\omega, k)$ 为改进-频率贝塞尔方法提取的多阶瑞雷波的频散能量;  $G_{\pm}(r, \omega)$ 垂向分量频率域格林函数;  $\omega$ 为角频率;  $r$ 为垂向分量台站对间的距离;  $i$ 是虚数单位;  $k$ 为波数;  $H_0^{(1)}(x)$ 和 $H_0^{(2)}(x)$ 分别是第一类和第二类零阶汉克尔函数。

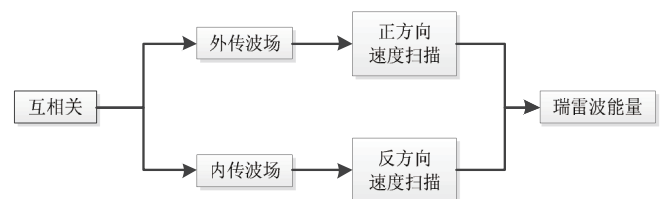


图2 频散计算流程图

### (三) 数据处理结果

采用上述方法从实测微动数据中提取频散曲线，图3为测线一（见图4）某微动测点提取的频散曲线。频散曲线呈现出随相速度随频率升高而降低，说明该测点下方波速总体呈现随深度增加而增大的趋势。但频散曲线不光滑，这与地层介质结构复杂、岩性不均匀以及高速公路强干扰等有关。

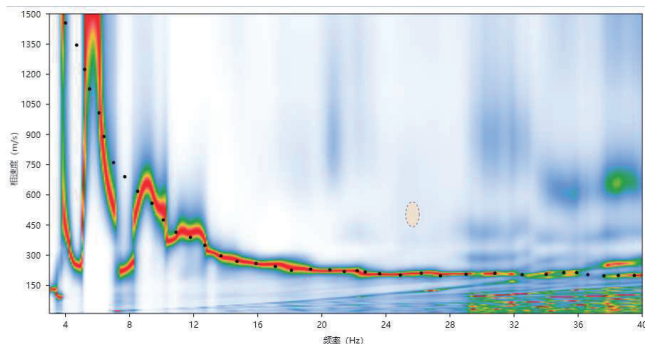


图3 频散能量图

### 三、应用实例

待勘察弃土堆边坡位于安徽省马鞍山市当涂县年陡镇境内。设计路线方案为右侧分离新建，挖方起止桩号为Y6K59+630~Y6K60+400，开挖长度约800m。初拟Y6K59+630~Y6K59+800段采用削平边坡，Y6K59+800~Y6K60+400段采用放坡开挖及挡墙支挡，拟采用工程地质调绘、钻探、微动测深等手段对该边坡进行了综合勘探，意在查明该边坡范围内的工程地质条件，为施工图设计提供了必要的地质依据及设计参数。

#### (一) 地形地貌

边坡区位于沿江丘陵平原区，微地貌位于河漫滩和丘陵结合部位。路线通过地段原为河漫滩，地形平坦，标高6m左右。右侧原为丘陵，地形起伏较大，因矿产开采形成标高-90m的矿坑，后因姑山矿排土回填，形成顶标高60m左右的台阶状岗地。路线由台阶状岗地东侧坡脚处经过。现状边坡局部见有坡面溜塌，但未见整体滑

动迹象，自然边坡基本稳定。

#### (二) 地层岩性

本次钻探表明，在勘探所达深度范围内，上覆土层主要为人工填土（ $Q_4^{mc}$ ），第四系全新统冲积层（ $Q_4^{al}$ ），下伏基岩为侏罗系上统安山岩。现将各层简单分述如下：

①填土：杂色，松散~中密，主要由碎石、角砾和黏性土组成，碎石一般为强风化凝灰岩、硅化粗安岩、砂岩、铁质硅质胶结岩块等，呈棱角形~次棱角形，粒径大小不等，一般为2.0~6.0cm，大者可达18.0cm，含量一般为50~70%，层厚一般2.9~51.5m，局部未揭穿，属于I级松土。

②老覆盖层：包括层厚1.6~3.3m的粉质黏土、层厚4.1~29.6m的粉砂、层厚3.3~9.1m的粉土、层厚6.2m的中砂、层厚3.5~9.6m的粉质黏土以及层厚2.9m的碎石土等。

③强风化安山岩：深灰色、灰绿色，矿物成分主要为长石、石英、角闪石，细晶质斑状结构，块状构造，硅质胶结，裂隙发育，裂隙中充填有铁矿物，岩石破碎呈2~5厘米大小的碎石状，见硅化、褐铁矿化现象，层厚3.1m，未揭穿。属于IV级软石。

为查明填土和老覆盖层厚度，公布置测线三条，其中沿路线方向布置测线一、垂直路线方向布置测线二和测线三（见图4）。

#### (三) 视S波速度剖面解释

测线一（见图5）天然源面波视横波速度值接近由浅入深逐渐增大，结合地质资料判定，填土底界视S速度值多为250~300m/s；老覆盖层视S速度值多为300~400m/s；强风化安山岩的视S速度值大于400m/s。借此地层视S速度值规律对测线二和测线三进行分层解译，局部填土厚度超50m，解译结果与钻孔吻合（如图6中CZK-1）。结果表明，利用微动测深探查大厚度弃土堆边坡的地质结构特征取得了较好的效果，证明了该方法在强干扰的高速公路改扩建勘察项目中的可行性和有效性。

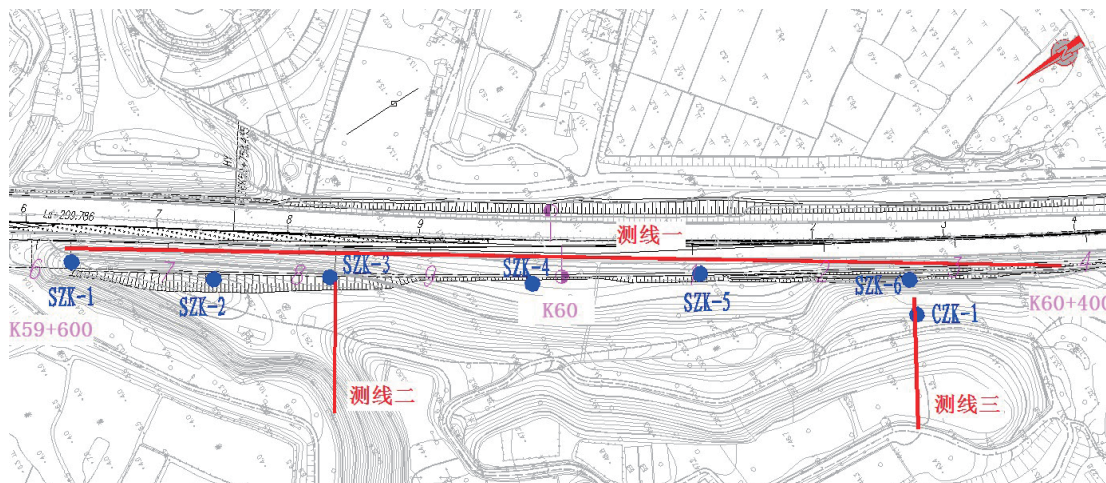


图4 微动测线布置图

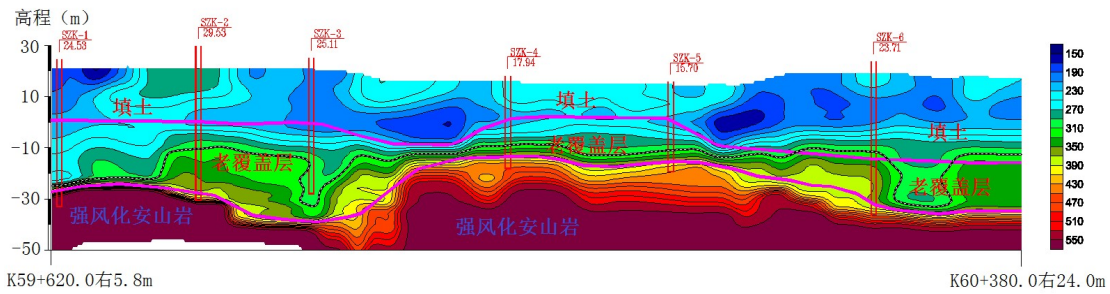


图5 测线一视S波速度剖面

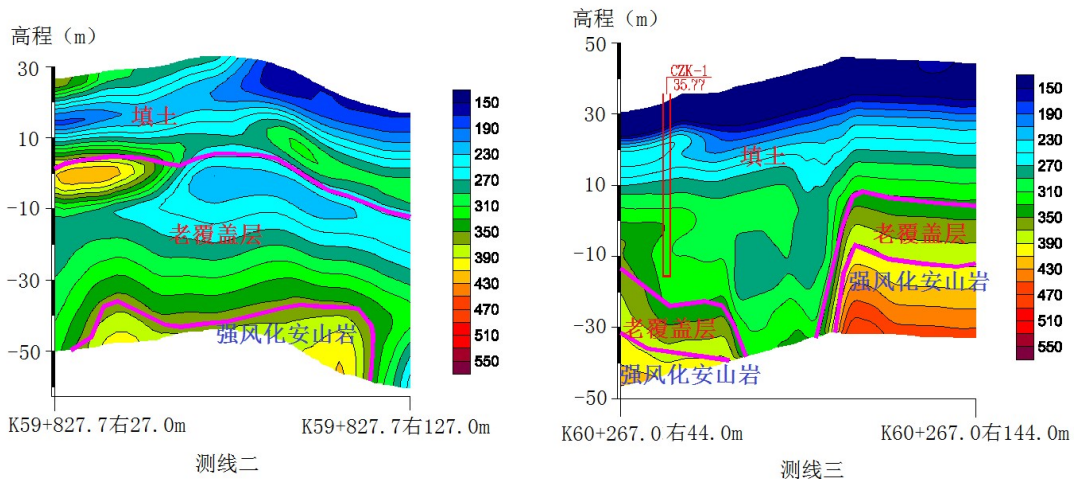


图6 测线二和测线三视S波速度剖面

#### 四、结论

(1) L型采集装置和改进-频率贝塞尔方法能有效提取强干扰高速公路边微动信号的频散曲线。

(2) 采用微动测深方法研究弃土堆边坡的填土分布及发育规律, 结果表明, 填土视S速度值多小于250~300m/s, 老覆盖层视S速度值多为300~400m/s, 强风化安山岩的视S速度值大于400m/s, 存在显著差异。结合钻探成果, 微动测深探查大厚度弃土堆边坡的地质结构特征取得了较好的效果。

(3) 在强干扰的高速公路改扩建项目中, 常规物探手段受限, 利用少量钻孔结果作标定, 采用微动视S波速度剖面划分地层结构是可行有效的。

#### 参考文献

[1]董忠级, 张吉宏, 刘云祯, 等. 2020. 微动勘探技术在尾矿堆积坝勘察评价中的应用研究[J]. 工程勘察, (9): 76-82.

[2]李雪燕, 陈晓非, 杨振涛, 等. 2020. 城市微动高阶面波在浅层勘探中的应用: 以苏州河地区为例[J]. 地球物理学报, 63(1): 247-255.

[3]陶鹏飞, 尹奇峰, 倪圣军, 等. 基于微动调查方法的尾矿库安全监测. 地球物理学进展[J]. 2021(06): 1-10.

[4]Xia, J., Miller, R. D., Xu, Y., Luo, Y., Chen, C., Liu, J., Ivanov, J., Zeng, C., 2009. High-frequency Rayleigh-Wave method. Journal of

Earth Science, 20(3), 563-579.

[5]Aki, K., 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. Bulletin of the Earthquake Research Institute, 35(3), 415-456.

[6]Park, C. B., Miller, R. D., 2008. Roadside Passive Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 13(1), 1-11.

[7]Chapman, C. H., 1978. A new method for computing synthetic seismograms. Geophysical Journal International, 54(3), 481-518.

[8]Louie, J. N., 2001. Faster, Better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor Arrays. Bulletin of the Seismological Society of America, 91(2), 347-364.

[9]Okada, H., 2003. The Microtremor Survey Method, Geophys. Monogr. No. 12, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK.

[10]席超强. 2021. 被动源面波频散分析中“交叉”假频成因与压制研究[D]. 浙江: 浙江大学

作者简介: 陈超, 男, 1989年生, 硕士研究生, 2014年毕业于中国矿业大学(北京)地球探测与信息技术专业, 主要从事工程勘察与工程检测方面的研究工作。