

doi: 10.11720/wtyht.2022.2498

李巧灵,张辉,雷晓东,等.综合利用多道瞬态面波和微动探测分析斜坡内部结构[J].物探与化探,2022,46(1):258-267.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.2498

Li Q L,Zhang H,Lei X D,et al.Analysis of internal structure of slope by using multi-channel transient surface wave exploration and microtremor survey [J].Geophysical and Geochemical Exploration,2022,46(1):258-267.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.2498

# 综合利用多道瞬态面波和微动探测 分析斜坡内部结构

李巧灵<sup>1</sup>,张辉<sup>2</sup>,雷晓东<sup>1</sup>,李晨<sup>1</sup>,房浩<sup>3</sup>,关伟<sup>1</sup>,韩宇达<sup>1</sup>,赵旭辰<sup>1</sup>

(1.北京市地质勘察技术院,北京 100120; 2.中国地质科学院,北京 100037; 3.中国地质环境监测院,北京 100081)

**摘要:** 针对杭州部分地区残坡积层厚度薄、地形条件较差的特点,在余杭区鸬鸟镇典型斜坡段,开展了多道瞬态面波和微动探测工作,对这两项技术在斜坡内部结构调查中的适用性和有效性进行分析。分别基于频率—波数(F-K)和空间自相关(SPAC)法提取频散曲线,计算得到速度剖面,进而对表层含角砾粉质黏土、全风化凝灰岩、强风化凝灰岩及中—微风化凝灰岩之间的界面进行了划分。结果表明:面波勘探具有很好的分层性,能有效区分残坡积层覆盖斜坡内部结构;多道瞬态面波和微动探测计算得到的瑞利波相速度变化趋势一致,表层含角砾粉质黏土对应瑞利波相速度小于 300 m/s,全风化凝灰岩对应瑞利波相速度为 300~400 m/s,强风化凝灰岩对应瑞利波相速度为 400~600 m/s,与钻孔资料基本吻合。数据分析还表明,频率小于 15 Hz 时,微动探测空间自相关函数与第一类零阶贝塞尔函数具有很好的拟合关系,高于 15 Hz 时,拟合精度有所降低。

**关键词:** 残坡积层;斜坡结构;微动探测;多道瞬态面波;空间自相关(SPAC);频率—波数法(F-K)

**中图分类号:** P613.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)01-0258-10

## 0 引言

杭州市山地丘陵发育,属亚热带季风性气候,雨量充沛,岩石风化作用强烈,斜坡表面多覆盖有残坡积层,裂隙发育,在雨季极易发生滑坡等地质灾害。这些潜在的不稳定斜坡严重威胁着当地居民的生命财产安全,因此,查明重要斜坡地层结构,有针对性地建立灾害预警预报系统意义重大<sup>[1]</sup>。滑坡体与稳定山体之间存在密度、速度和电性等物性差异,为利用地球物理手段调查斜坡稳定性提供了物性基础。常用的地球物理手段包括地震反射和折射法、面波法、电法及电磁法等。其中面波法包括主动源面波法(多道瞬态面波法)和被动源面波法(微动法)<sup>[2-3]</sup>。

地球物理手段在世界上很多易滑坡地区都取得了成功的应用。李来喜<sup>[4]</sup>利用高密度电法和地震折射层析成像法得到甘肃某地目的位置的物性断面,为主滑动面的确定提供了有效依据;Guénolé Mainsant 等<sup>[5]</sup>通过环境噪声相关技术对瑞士阿尔卑斯山附近某易滑坡地区进行了监测,发现该滑坡体滑动前几天 S 波速度持续性急速降低;Sherrod L 等<sup>[6]</sup>综合利用电阻率成像和探地雷达确定了纽约 Little Porter 山活动滑坡内部冰川形态和基岩界面等结构;Shan 等<sup>[7]</sup>综合利用无线电大地电磁(RMT)、电阻率层析成像(ERT)和高分辨率反射地震确定了瑞士西南部某滑坡体的几何特征和物理性质;吕擎峰等<sup>[8]</sup>基于滑坡体和稳定岩体之间的电阻率和速度差异,利用高密度电法和瑞利面波法确定了滑动面的深度和滑动范围,为滑坡治理提供了依

收稿日期:2020-11-02;修回日期:2021-09-16

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“全国地质灾害数据更新与服务”(DD20190638)

第一作者:李巧灵(1983-),女,高级工程师,从事地震勘探及微动探测技术方面的生产研究工作。Email:liqiaoling959@Foxmail.com

通讯作者:雷晓东(1983-),男,正高级工程师。Email:lei-xiaodong@139.com

据;Petronio L 等<sup>[9]</sup>利用纵波和横波反射地震及面波勘探对意大利东北部的一个滑坡体进行了探测,获得了滑坡体地表至滑动面深度的 2D 地质模型和速度参数;Xu X Q 等<sup>[10]</sup>利用双源面波法(DSSW,即综合利用主动源多道面波分析(MASW)方法和被动源微动探测(MSM),以同时保证大的勘探深度和高的勘探精度)得到四川某滑坡内部地层结构;Wang F 等<sup>[11]</sup>综合利用自电位测量(SP)和微动探测评估了日本某滑坡坝的内部结构以及是否存在管道泄漏。除利用速度信息进行滑坡体内部结构探测外,也可以通过面波信号的频率特征指示土层破损程度和场地共振特性的方位变化<sup>[12-13]</sup>。

综上所述,地球物理探测不仅可以有效探测滑坡体内部结构,对滑坡机理进行评价,还可以对易滑坡地区进行内部结构探测或长期监测,为滑坡灾害预警提供依据。电(磁)法受山区地形影响大,施工效率低,探测浅部地层结构时易受降雨天气影响,故本次选择面波法。在杭州市余杭区鸬鸟镇残坡积层浅覆盖区,选择典型斜坡布设剖面,通过主动源和被动源两者相结合的方法探测斜坡内部结构,并对比分析两种方法的适用性和有效性,为残坡积层覆盖区地质灾害调查技术方法体系建立进行了探索性研究。

## 1 方法原理

面波是体波与自由界面或分层介质的弹性分界面相互作用产生的一种弹性波,满足物理上的自由边界条件<sup>[14]</sup>。在层状介质中,瑞利面波的速度是频率的函数,随频率变化而变化。在不同介质分界面处,频散曲线会出现拐点、斜率变化、频散点疏密变化等特征,该特性是瑞利波勘探的理论基础。20 世纪 50 年代,Haskell 利用矩阵计算了瑞利面波在层状介质中的频散曲线,成为天然面波在探测地层内部结构和人工面波在工程勘察等方面的基础;后来又陆续发展了 Schwab-Knopoff 法、 $\delta$  矩阵法、Abo-Zena 法等。20 世纪 80 年代,面波勘探被引入中国,取得了很大的发展。肖柏勋、李庆春、刘庆华等分析了瑞利面波勘探技术应用情况及面波分析常用方法的优缺点<sup>[14-16]</sup>。主动源面波勘探从稳态到瞬态再到多道面波勘探,在方法应用和仪器研发等方面都有了很大的进步<sup>[16-17]</sup>,主要用于工程勘察方面。被动源面波勘探也称作微动和环境随机振动,早期主要是利用长周期信号研究地壳结构等深部信息和用于地热资源勘查等方面<sup>[18-19]</sup>,近年来,许多学者在利

用微动探测进行城市地质和环境地质调查等方面做了大量研究<sup>[20-24]</sup>。

### 1.1 多道瞬态面波

瞬态面波法通过锤击、落重乃至炸药震源,产生一定频率范围的瑞利波,再通过振幅谱和相位谱分析把记录中不同频率的瑞利波分离出来,从而得到频散曲线。目前常用的是多道瞬态面波法。多道瞬态面波在工程场地勘察和滑坡等地质灾害调查方面有广泛的应用,如:识别溶洞以及回填土和膨胀土等土层分类<sup>[25]</sup>;划分斜坡结构;探测滑坡体内部 S 波速度结构,确定滑坡体岩土分层、软弱带和滑动面,为滑坡体稳定性评价提供依据等<sup>[24,26-27]</sup>。

多道瞬态面波一般采用单边或双边激发、多道拾震器线性排列接收。数据处理多采用频率—波数法<sup>[17]</sup>,该方法通过傅里叶变换,将时间—空间域记录信号转换到频率—波数域处理。某排列原始记录信号用  $f(x, t)$  表示,傅里叶变换后有:

$$F(\omega, k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, t) \exp(-i\omega t + ikx) dt dx, \quad (1)$$

式中: $k$  为波数, $\omega$  为角频率, $x$  为拾震器到震源的距离, $t$  为时间。由于接收的地震信号中,瑞利波能量占比大于 60%,根据  $F(\omega, k)$  能量谱上极大值对应的频率—波数对,就可以根据式(2)求取频率—相速度对:

$$v_R = \frac{f}{k}. \quad (2)$$

### 1.2 微动探测

微动探测不需要震源,分为单台和阵列 2 种方式。单台微动又称为地脉动,主要利用单台三分量拾震器接收信号,通过微动信号的频率振幅特征分析进行场地评价等。阵列微动则是利用多台拾震器按照不同的采集阵列同时接收信号,经处理提取频散曲线,反演得到不同深度的地层结构信息。近年来,微动探测在地质灾害调查方面也取得了很好的应用效果,如:探测地铁沿线的孤石;探测煤矿陷落柱等地质异常体<sup>[20-21]</sup>;探测深部隐伏岩溶覆盖层结构<sup>[22]</sup>;反演滑坡体 3D 模型,利用 H/V 计算场地主频,为滑坡稳定性评价提供参考等<sup>[28-29]</sup>。

微动探测频散曲线提取方法主要有空间自相关法(SPAC)、拓展空间自相关法(ESPAC)、频率—波数法(F-K)等<sup>[22]</sup>。SPAC 法是用中心点与各半径圆周上各拾震器采集的信号进行相关,再进行方位平均,得到空间平均相关函数,最后经 Hankel 转换,得到其功率谱表达式<sup>[30]</sup>,记作:

$$\overline{\theta(r)} = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty h(\omega) J_0 \left[ \frac{\omega r}{c(\omega)} \right] d\omega, \quad (3)$$

其中： $c(\omega)$  是相速度； $h(\omega)$  是信号垂直分量功率谱； $\omega$  是角频率； $r$  是中心拾震器到圆周拾震器之间的距离，即半径； $J_0$  是第一类零阶贝塞尔函数。通过中心频率为  $\omega_0$  的窄带滤波器，则有：

$$\overline{\theta(r)} = J_0 \left[ \frac{\omega_0 r}{c(\omega_0)} \right]. \quad (4)$$

已知频率  $f$  和空间平均相关函数，就可以根据零阶贝塞尔函数宗量  $J_0^{-1}[\overline{\theta(r)}]$ ，由方程(5)求得相应的相速度  $c(f)$ ：

$$c(f) = 2\pi f \frac{r}{J_0^{-1}[\overline{\theta(r)}]}. \quad (5)$$

## 2 研究区概况

研究区位于杭州市余杭区西北部鸬鸟镇全城坞村附近(图1)。该地区植被发育,以竹林为主,地形坡度多在  $20^\circ \sim 35^\circ$  之间;残积和残坡积层广泛分布于山体顶部、斜坡及坡麓表部,岩性主要为含砾石黏性土及碎石土层等,厚  $0.2 \sim 2.5$  m。

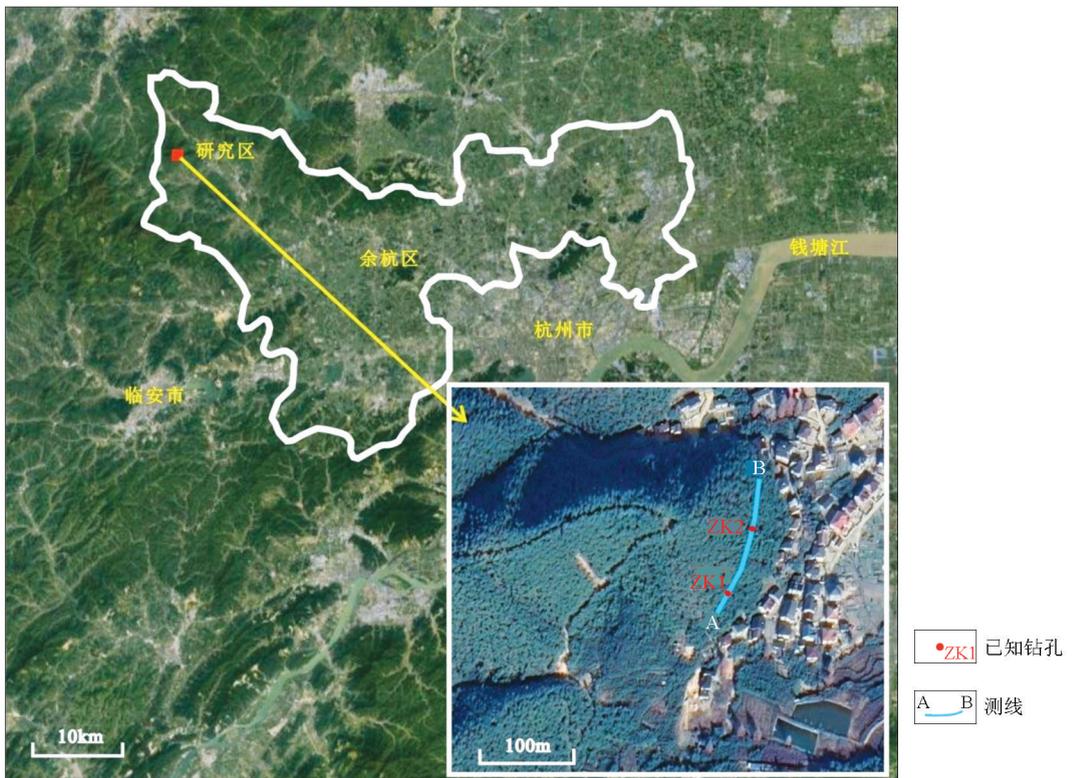


图1 研究区地形地貌

Fig.1 Surface wave field data acquisition location

研究区典型斜坡东侧,坡底紧邻房屋,曾做过地质灾害工程处理。从现场踏勘情况看,该区山坡较陡,与房屋紧邻且残坡积层易滑脱,仍有发生地质灾害的可能。2019年9月6日强降雨过程中,该区域附近发生过2处崩塌、1处滑坡和1处山洪,是重点地质灾害调查区域,故选为本次方法分析的典型斜坡。研究区整个斜坡单元植被茂密,多为竹林,工程地质分层从上到下依次为表层耕植土、全风化层、强风化层和完整基岩。本次在典型斜坡上顺着高程等值线方向布设综合测线 AB,同时进行多道瞬态面波和微动探测(见图1)。

## 3 数据采集

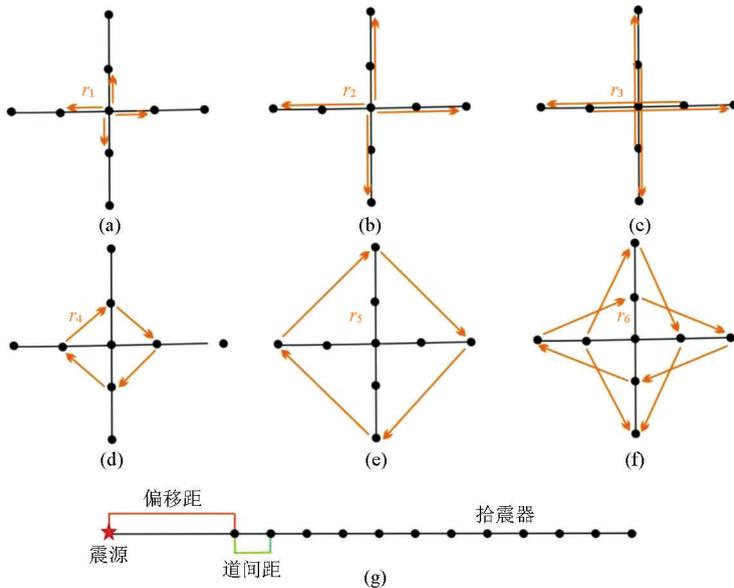
为了方便进行数据对比分析,在典型斜坡上布设了综合测量剖面 AB,走向 NNE,测线总长约 145 m,微动探测 11 点,多道瞬态面波 33 点。

已有资料表明,微动探测采集阵列中的嵌套三角形和圆形阵列频散能量集中度更高,L型和直线型阵列频散能量具有方向性<sup>[31]</sup>。十字阵列可以看作一种特殊的圆形阵列,即4点圆形阵列。十字阵列布设方便,工作效率高,尤其适用于有植被覆盖区

域的小半径数据采集。10 台拾震器的十字阵列,主要有 6 种半径组合方式,如图 2a~f 所示。若各拾震器以  $r$  为距离等间隔排列,则各组合的半径分别为:  
 $r_1=r, r_2=2r, r_3=3r, r_4=\sqrt{2}r, r_5=2\sqrt{2}r, r_6=\sqrt{5}r$ 。本次微动探测采用北京市水电物探研究所生产的 WD-1

智能微动勘探仪,拾震器主频为 2 Hz,十字阵列, $r=2\text{ m}$ ,观测时长根据具体情况而定,不少于 30 min,以得到稳定的频散曲线。如果采集环境存在噪声干扰,适当延长采集时间或避开干扰时段。

多道瞬态面波一般采用单边或双边激发、多道



a~f—微动十字阵列半径组合示意;g—瞬态面波单端放炮多道采集排列示意

a~f—radius combination diagram of microtremor cross array;g—transient surface wave array with single shot and multi-trace acquisition arrangement

图 2 面波数据采集排列示意

Fig.2 Surface wave field data acquisition array diagram

拾震器线性排列接收,图 2g 为单边激发,12 道接收的等间距线性排列示意。采集参数根据地质任务给出,并根据现场试验适当调整。检波器频率选择根据勘察深度要求,利用  $f=v/\lambda$  和  $h\approx\lambda/2$  估算,其中  $f$  为检波器频率, $v$  为地层面波速度, $\lambda$  为波长, $h$  为探测地层的深度。检波器固有频率越高对低频部分的压制越强,在满足分辨率的情况下,应尽量采用固有频率较低的拾震器<sup>[24]</sup>。偏移距的大小需考虑炮检距和震源弹塑带的范围,偏移距过小,干扰波能量强,偏移距过大,远道有效波能量弱;因此,偏移距选择应根据现场试验确定,目的是在数据处理时直达波、反射波和瑞利波能够有效分离<sup>[32]</sup>。本次主动源瞬态面波采用北京市水电物探研究所生产的 SWS-6A 工程勘探与工程检测系统,使用人工锤击的震源激发方式,并在激震点铺设垫板,单边激发,拾震器主频为 4 Hz,24 道采集,道间距 1 m,最小偏移距 5 m,全排列滚动。

#### 4 数据处理分析

瑞利面波频散曲线提取的常用方法有空间自相

关法 (SPAC)、表面波谱法 (SASW)、频率—波数法 (F-K)、 $\tau$ - $p$  变换法、相位展开法等<sup>[15-22]</sup>。本次多道瞬态面波选用 F-K 法,微动探测选用 SPAC 法。剖面资料处理需先按常规面波勘探方法对野外采集的资料进行单点处理。多道瞬态面波单点数据处理流程一般为:切除干扰波—拾取面波—频率波数域谱分析—提取频散曲线—反演<sup>[26]</sup>;F-K 域分析时,可通过二维滤波突出基阶面波能量,确认基阶面波频散曲线。微动探测单点数据处理流程一般为:数据预处理—计算空间相关系数—第一类零阶贝塞尔函数拟合—提取频散曲线—反演;采用最小二乘法进行贝塞尔函数拟合,不能呈现第一类零阶贝塞尔曲线形态的自相关系数曲线应舍弃,以免影响最终频散曲线的求取精度<sup>[23]</sup>。图 3 为微动探测数据 W02 部分频率点的贝塞尔函数拟合,从图中可以看出,频率低于 15 Hz 时,各半径相关系数与第一类零阶贝塞尔函数具有很好的拟合关系,误差小于 0.01;频率高于 15 Hz 的拟合精度有所降低,推测是因为高频信号随机性强且易受噪声影响。

图 4 为部分微动测点与同位置多道瞬态面波测点频散曲线对比。从图中可以看出,2 条频散曲线

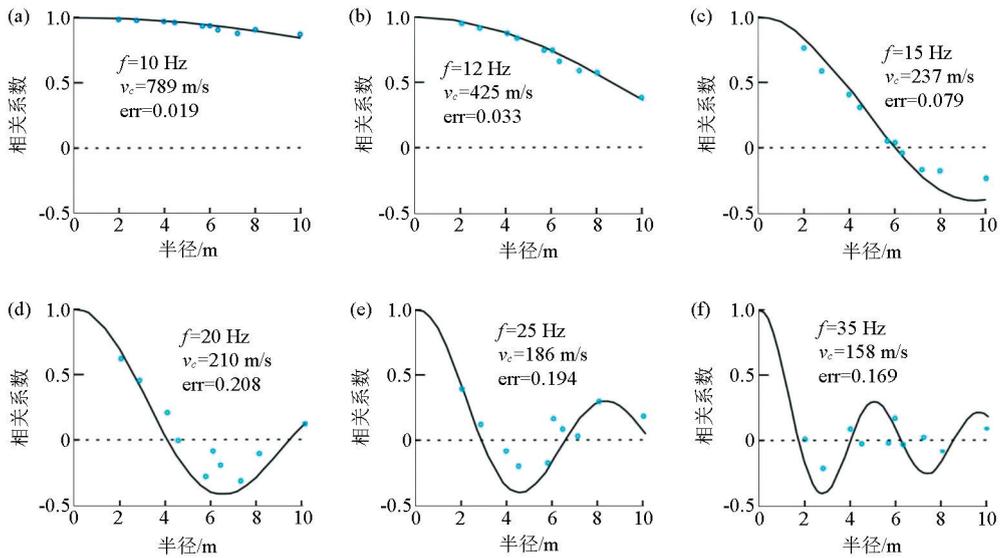


图3 W02 微动探测点贝塞尔函数拟合

Fig.3 Bessel function fitting of microtremor survey point W02

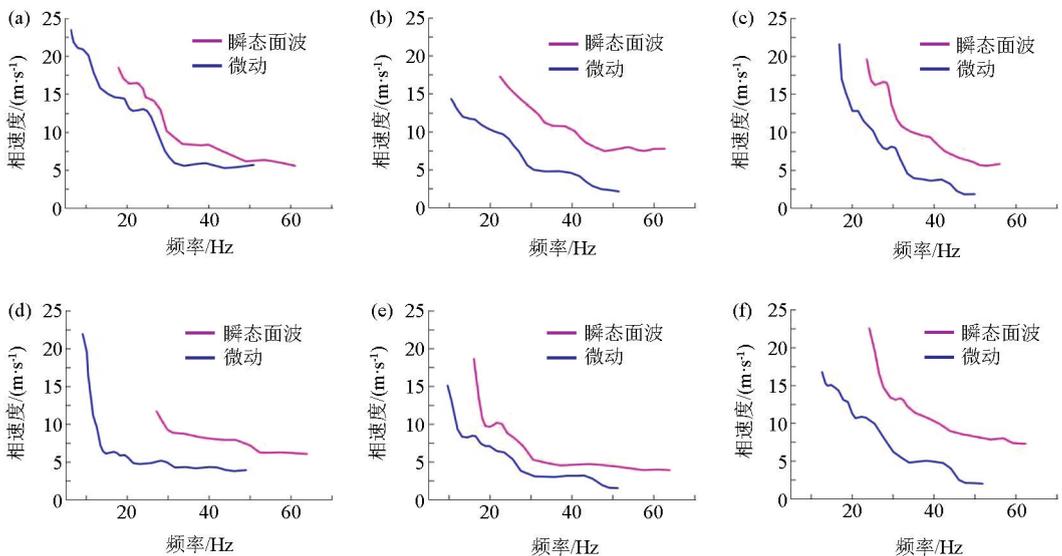


图4 部分微动测点与对应多道瞬态面波测点频散曲线对比

Fig.4 Dispersion curves of microtremor survey and transient surface wave exploration at the same location

总体形态相似,但多道瞬态面波频散曲线相同相速度对应频率整体较微动探测高。如果直接利用半波长经验公式进行深度转换,则会出现相同深度多道瞬态面波探测相速度高于微动探测的情况,故需结合钻孔数据,对深度转换系数进行拟合。具体拟合公式为  $H = \alpha V / 2f$ ; 式中,  $H$  为勘探深度,  $V$  为相速度,  $f$  为频率,  $\alpha$  为校正系数。本次微动探测深度校正系数为 0.5, 瞬态面波校正系数为 1。

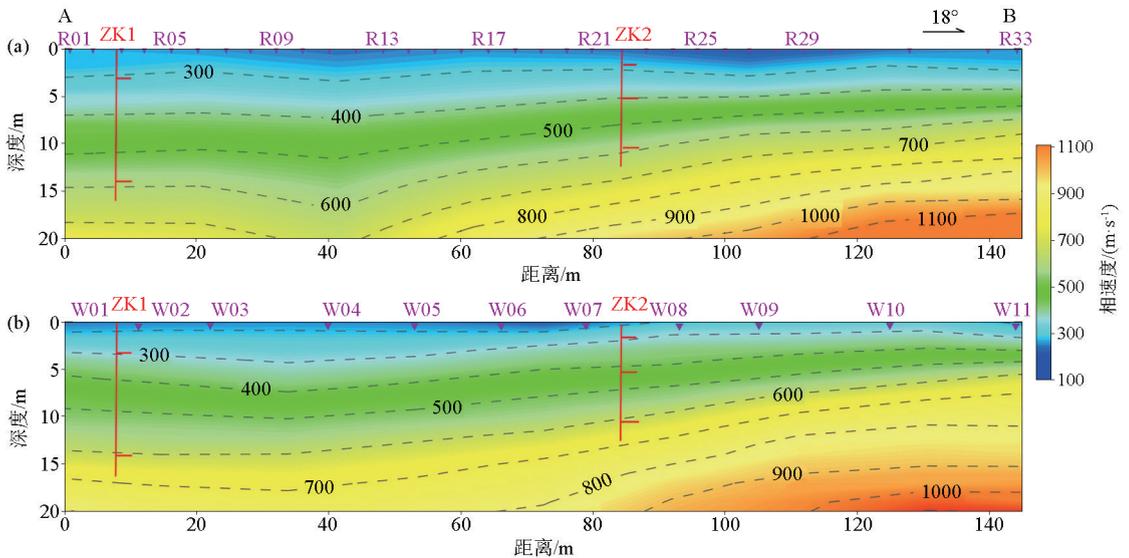
根据拟合后的转换系数,可以把频散曲线从频率域转换到深度域,直接插值得到相速度等值线剖面,如图 5 所示。剖面走向 NE 约 18°,过两个已知

钻孔 ZK1 和 ZK2, 钻孔数据详见表 1。ZK1 终孔深度为 16 m, 终孔岩性为中风化花岗岩, 未对全风化和强风化岩进行划分。ZK2 终孔深度 12.5 m, 终孔岩性为中风化凝灰岩。除 ZK1 外, 在该斜坡其他位置搜集的钻孔资料揭露的基岩岩性皆为凝灰岩, 故后续解释中基岩岩性统称为凝灰岩。图 5a 为多道瞬态面波探测瑞利波相速度等值线剖面, 1~30 号点为等间距排列, 间隔 4 m, 30~32 号点之间由于施工环境限制, 间隔调整为 12 m。从图中可以看出, 完整基岩面埋深总体趋势为南深北浅。图 5b 为微动探测瑞利波相速度等值线剖面, 共 11 个点, 尽量以

10 m 的点距布设。由于微动每个单点都需要多台拾震器按阵列形态和半径组合布设采集,对采集地面环境有一定要求,阵列内场地高程变化应尽量平缓,故部分点距稍有变化。从图中可以看出,多道瞬态面波与微动探测得到的瑞利波相速度变化趋势具有很好的—致性。含角砾粉质黏土和全风化凝灰岩之间的界面对应的瑞利波相速度约为 300 m/s,强风化和中风化凝灰岩之间的界面对应的瑞利波相速度约为 600 m/s,2 个钻孔资料 1 个划分有强风化层,1 个没有区分,仅参考 ZK2 数据认为强风化层顶界面对应瑞利波相速度约为 400 m/s。

表 1 研究区钻孔资料统计  
Table 1 Statistics table of borehole data in the research area

钻孔	岩性层	底界面深度/m	厚度/m
ZK1	含角砾粉质黏土	3.3	3.3
	全风化花岗岩	14	10.7
	中风化花岗岩	—	—
ZK2	含角砾粉质黏土	1.5	1.5
	全风化凝灰岩	5	3.5
	强风化凝灰岩	10.5	4.5
	中风化凝灰岩	—	—



a—多道瞬态面波探测瑞利波相速度等值线断面;b—微动探测瑞利波相速度等值线断面

a—phase velocity profile of transient surface wave exploration;b—phase velocity profile of microtremor survey

图 5 AB 测线瑞利波相速度等值线断面

Fig.5 Phase velocity profile of AB line

综上所述,多道瞬态面波和微动探测具有很好的分层性,能有效探测残坡积层覆盖斜坡的内部结构。

除直接将频散曲线转换到深度域进行分析外,也可以根据拐点、斜率、频散点疏密以及不收敛段的起始拐点等特征确定初始模型,经反演计算 S 波速度结构。为避免反演过程中初始模型设置等人为因素的影响,更客观地反映地层的岩性及构造变化,也可以直接根据经验公式计算视 S 波速度。视 S 波速度剖面可以突出显示具有较大速度差异的界面,通常也对应地质分界面<sup>[21,23]</sup>。图 6 为 AB 测线视 S 波速度剖面。由于多道瞬态面波点距更小,测点更密,能更好地反映地层横向变化细节,故本次视 S 波速度等值线剖面是基于多道瞬态面波数据计算的。从图中可以看出,斜坡沿 AB 测线横向变化较大,含角砾粉质黏土厚度变化范围 0~4 m,全风化凝灰岩厚度变化范围 1.5~6 m,强风化凝灰岩厚度变化为 2~

20 m。总的来说,测线北部基岩完整性较好,南部风化层较厚,R09~R13 点之间的中风化界面以上岩层厚度最厚,超过 20 m。

## 5 讨论

瑞利波的频散特性和在介质中的传播速度与岩土介质的物理力学性质有关,同一波长的面波特性反映地层在水平方向上的变化,不同波长的面波特性反映地层介质在垂直方向上的变化<sup>[24]</sup>。当岩土层介质较为均匀时,瑞利波的相速度随深度的加大而线性增加;存在不同介质分界面时,频散曲线会出现拐点、斜率变化、频散点疏密变化等特征,由此可推断地下岩性变化的分界面<sup>[17]</sup>。主动源与被动源面波联合勘探通常是将主动源的高频信息与被动源的低频信息进行拼接,以兼顾浅层和深部探测效

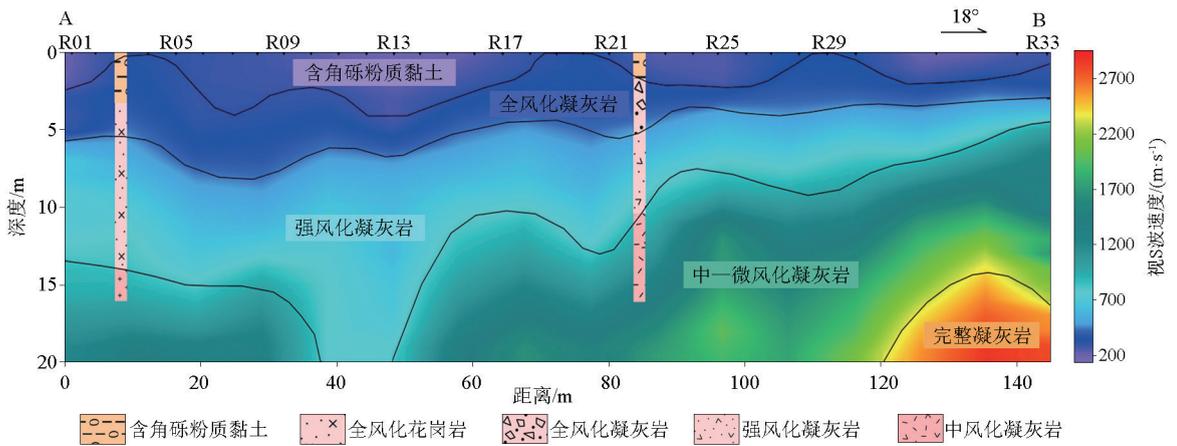


图6 AB测线视S波速度等值线断面

Fig.6 Apparent S-wave velocity profile of AB line

果<sup>[10,31]</sup>。本次是综合利用主动源(多道瞬态面波)和被动源(微动探测)勘探形成综合剖面,对比分析两者在残坡积层覆盖斜坡内部结构探测中的应用效果,结果表明两者得到的瑞利波相速度在整体趋势上具有很好的一致性,且各岩土层相速度范围与庄师柳等在佛山飞鹅岭探测滑坡体内部结构总结的数据有较好的对应,即:坡积层和全风化层对应面波速度为40~300 m/s;强风化层对应面波速度为300~600 m/s;中风化层对应面波速度为600~1200 m/s;微风化层对应面波速度高于1200 m/s<sup>[26]</sup>。

与钻探等方法相比,面波勘探误差主要来源于反演、介质横向变化以及波速分界面与介质分界面的对应性等<sup>[9,15]</sup>,为了降低误差,可从提高反演精度和复杂地质条件下精确成像等方面进行尝试。在反演S波速度结构时,可根据实际情况选择合适的算法,如瑞利面波反演常用的Thromson-Haskell法,是基于平面波理论导出相邻两界面的传递矩阵公式,在高频计算时会出现数值溢出和精度降低的现象;Schwab-Knopoff法可以避免高频计算时精度降低,具有快速稳定的特点;Abo-Zena法避免了高频数据的不稳定性,且对存在低速夹层的介质分析很有效<sup>[15]</sup>。除了反演算法的选择外,还可以综合利用高阶面波和H/V谱比特征进行联合反演,以减少反演的多解性<sup>[33]</sup>。为避免反演带来的多解性,也可以避免反演过程,直接由剖面上各点面波频散曲线计算得到剖面,直观地反映地层弹性结构特征,或者根据经验公式计算视S波速度,为划分地层内部结构提供客观依据<sup>[20-24]</sup>。多道瞬态面波和微动探测求取的都是采集阵列下方介质的平均速度,当介质物性参数横向变化剧烈时,会影响探测效果。尹晓菲等基于波场分离技术提出一种方法,利用相位扫描互

相关获取任意两道间的面波走时,在此基础上求取频散曲线<sup>[34]</sup>,并认为该方法可提高浅地表面波勘探水平分辨率,但该方法抗干扰能力值得商榷。对于倾斜界面、复杂地形以及物性参数横向变化剧烈等复杂介质情况,瑞利面波的传播特征还有待进一步研究<sup>[15]</sup>。

主动源面波勘探对浅部分辨率较好,但很难采集到低频信号;锤击震源的勘探深度通常在25m左右,被动源面波在提取低频信号方面具有很好的优势。传统的空间自相关法(SPAC)对采集阵列和场地有较高的要求,不少学者提出了改进的方法,如扩展空间自相关法和背景噪声互相关技术(NCF)等。本文采用的十字阵列较常用的嵌套三角阵列施工效率更高,适用范围更广,尤其是在沿城市道路或在有茂密植被覆盖的场地施工时,优势更为明显。NCF对拾震器数量和布置没有要求,尽量保证射线分布均匀即可。在相同拾震器数量下,能更好地覆盖探测区域,降低三维面波勘探成本<sup>[35]</sup>。环境噪声成像技术目前多用于分析地壳上地幔结构和地震灾害调查中<sup>[36-37]</sup>。除了以面波为有效信号的面波勘探技术外,传统地震勘探也不再只把面波当作噪声去除,而是加以利用,解决复杂地表静校正和近地表结构等问题<sup>[16,38]</sup>。

综上所述,面波勘探在地层内部结构调查中有很好的应用效果,但也有很多方面需要进一步研究,例如:当介质具有较强的各向异性,如何提高面波探测的精度;如何减少S波速度结构反演的多解性,提高反演精度;对于微动信号微弱的区域,如何有效提取面波频散信息;如何去除体波和其他面波的干扰;如何有效识别复杂地质情况下面波发育特征等。

## 6 结论

1) 面波勘探具有很好的分层性,能有效区分残坡积层覆盖斜坡内部结构。本次选取的典型斜坡内部结构沿 AB 测线横向变化较大,测线北部基岩完整性较好,南部风化层较厚。含角砾粉质黏土厚度变化范围为 0~4 m,全风化凝灰岩厚度变化范围为 1.5~6 m,强风化凝灰岩厚度变化范围为 2~20 m。

2) 面波勘探在深度转换时多采用半波长经验公式,具有一定的误差,需结合研究区钻孔等已有资料进行校正。多道瞬态面波和微动探测的转换系数不一定相同。

3) 多道瞬态面波和微动探测计算得到的瑞利波相速度变化趋势具有较好的一致性。表层含角砾粉质黏土和全风化凝灰岩分界面对应的瑞利波相速度约为 300 m/s,全风化凝灰岩与强风化凝灰岩分界面对应的瑞利波相速度约为 400 m/s,强风化凝灰岩与中风化凝灰岩分界面对应的瑞利波相速度约为 600 m/s,与钻孔资料基本吻合。

4) 微动探测空间自相关函数与第一类零阶贝塞尔函数拟合关系中,频率低于 15 Hz 时,各半径相关系数与第一类零阶贝塞尔函数具有很好的拟合关系,误差小于 0.01,高于 15 Hz 时,拟合精度有所降低。推测是因为高频信号随机性强,且易受噪声影响。

## 参考文献 (References):

[1] 詹良通,李鹤,陈云敏,等.东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强—历时曲线的影响因素分析[J].岩土力学,2012,33(3):872-880.  
Zhan L T, Li H, Chen Y M, et al. Parametric analyses of intensity-duration curve for predicting rainfall-induced landslides in residual soil slope in southeastern coastal areas of China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 872-880.

[2] 刘彦华,熊章强,方根显,等.综合物探方法在泰井高速公路滑坡调查中的应用[J].工程地球物理学报,2007,4(4):295-298.  
Liu Y H, Xiong Z Q, Fang G X, et al. Application of integrated geophysical method in the Landslide of Taihe-Jinggangshan Expressway [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2007, 4(4): 295-298.

[3] 徐兴倩,苏立君,梁双庆.地球物理方法探测滑坡体结构特征研究现状综述[J].地球物理学进展,2015,30(3):473-482.  
Xu X Q, Su L J, Liang S Q. A review of geophysical detection methods of landslide structure characteristics [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(3): 473-482.

[4] 李来喜.物探在多次巨型滑坡勘察中的应用[J].工程地球物

理学报,2009,6(5):575-579.

Li L X. Application of geophysical prospecting to multiple and super landslide investigation [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(5): 575-579.

- [5] Mainsant G, Larose E, Brönnimann C, et al. Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide: Toward failure prediction [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2012, 117: 1-12.
- [6] Sherrod L, Schlosser K, Kozłowski A, et al. Geophysical characterization of the Keene Valley Landslide in New York State [J]. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 2014, 19(3): 139-155.
- [7] Shan C L, Bastani M, Malehmir A, et al. Integrated 2D modeling and interpretation of geophysical and geotechnical data to delineate quick clays at a landslide site in southwest Sweden [J]. Geophysics, 2014, 79(4): EN61-EN75.
- [8] 吕擎峰,卜思敏,王生新,等.综合物探法在滑坡稳定性评价中的应用研究[J].岩土工程学报,2015,37(s1):142-147.  
Lyu Q F, Bo S M, Wang S X, et al. Application of comprehensive geophysical prospecting method in stability evaluation of landslide [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(s1): 142-147.
- [9] Petronio L, Jacopo B, Giorgio C. Reflection seismic and surface wave analysis on complex heterogeneous media: The case of mount toe landslide In the vajont valley [J]. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 2013(6): 593-598.
- [10] Xu X Q, Su L J, Zhang G D, et al. Analysis on shear wave velocity structure of a gravel landslide based on dual-source surface wave method [J]. Landslides, 2017, 14(3): 1127-1137.
- [11] Wang F, Okeke C U, Kogure T, et al. Assessing the internal structure of landslide dams subject to possible piping erosion by means of microtremor chain array and self-potential surveys [J]. Engineering Geology, 2018, 234: 11-26.
- [12] Dwa D W, Ria A A, Widya U. Application of microtremor HVSR method for assessing site effect in residual soil slope [J]. International Journal of Basic & Applied Science, 2011, 11(4): 100-105.
- [13] Gaudio V D, Wasowski J, Lee C T. Inferring seismic response of landslide-prone slopes from microtremor study [G]. Margottini C, Canuti P, Sassa K, eds. Landslide Science and Practice, Springer, Berlin, Heidelberg, 2013: 199-209.
- [14] 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.  
Liu Q H, Lu L Y, Wang K M. Review on the active and passive surface wave exploration method for the near-surface structure [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(6): 2906-2922.
- [15] 肖柏勋,李长征.瑞雷面波勘探技术研究述评[J].工程地球物理学报,2004,1(1):38-47.  
Xiao B X, Li C Z. Review of rayleigh prospecting technology research [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004, 1(1): 38-47.
- [16] 李庆春,邵广周,刘金兰,等.瑞雷面波勘探的过去、现在和未来[J].地球科学与环境学报,2006,28(3):74-77.  
Li Q C, Shao G Z, Liu J L, et al. Past, present and future of Ray-

- leigh surface wave exploration [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2006, 28(3): 74 - 77.
- [17] 刘云祯, 王振东. 瞬态面波法的数据采集处理系统及其应用实例[J]. *物探与化探*, 1996, 20(1): 28 - 34.  
Liu Y Z, Wang Z D. Data collection and processing system of transient surface wave method and examples of its application [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1996, 20(1): 28 - 34.
- [18] 冉伟彦, 王振东. 长波微动法及其新进展[J]. *物探与化探*, 1994, 18(1): 28 - 34.  
Ran W Y, Wang Z D. The long-wave microtremors method and its advances [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1994, 18(1): 28 - 34.
- [19] 何正勤, 丁志峰, 贾辉, 等. 用微动中的面波信息探测地壳浅部的速度结构[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(2): 170 - 176.  
He Z Q, Ding Z F, Jia H, et al. To determine the velocity structure of shallow crust with surface wave information in microtremors [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(2): 170 - 176.
- [20] 徐佩芬, 李传金, 凌魁群, 等. 利用微动勘察方法探测煤矿陷落柱[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(7): 1923 - 1930.  
Xu P F, Li C J, Ling S Q, et al. Mapping collapsed columns in coal mines utilizing microtremor survey methods [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(7): 1923 - 1930.
- [21] 徐佩芬, 侍文, 凌魁群, 等. 二维微动剖面探测“孤石”: 以深圳地铁7号线为例[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(6): 2120 - 2128.  
Xu P F, Shi W, Ling S Q, et al. Mapping spherically weathered “boulders” using 2D microtremor profiling method: A case study along subway line 7 in Shenzhen [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(6): 2120 - 2128.
- [22] 李巧灵, 雷晓东, 李晨, 等. 微动测深法探测厚覆盖层结构——以北京城市副中心为例[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(4): 1635 - 1643.  
Li Q L, Lei X D, Li C, et al. Exploring thick overburden structure by microtremor survey: A case study in the subsidiary administrative center [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(4): 1635 - 1643.
- [23] 李巧灵, 雷晓东, 杨勇, 等. 北京西郊玉泉山地区岩溶水强径流路径地球物理分析[J]. *中国地质*, 2019, 46(2): 346 - 358.  
Li Q L, Lei X D, Yang Y, et al. A study of flow path in Yuquanshan area of western Beijing based on integrated geophysical technology [J]. *Geology in China*, 2019, 46(2): 346 - 358.
- [24] 许新刚, 岳建华, 李娟娟, 等. 面波勘查技术及在滑坡地质调查中的应用研究[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(3): 1367 - 1372.  
Xu X G, Yue J H, Li J J, et al. Surface wave exploration technique and its application in landslide geology survey [J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(3): 1367 - 1372.
- [25] 崔建文, 乔森. 瞬态面波勘探技术在工程地质中的应用[J]. *岩土工程学报*, 1996, 18(3): 35 - 40.  
Cui J W, Qiao S. Application of transient Rayleigh surface wave prospecting method to engineering geology [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 18(3): 35 - 40.
- [26] 庄师柳. 瞬态面波法在滑坡勘察中的应用效果[J]. *华南地震*, 2010, 30(3): 116 - 122.  
Zhuang S L. Applications of the transient surface wave method in landslide investigation [J]. *South China Journal of Seismology*, 2010, 30(3): 116 - 122.
- [27] Wang G, Furuya G, Doi I, et al. Investigation on the internal structure of Higashi-Takezawa landslide dam using surface wave method and microtremor array measurements [J]. *Journal of the Japan Landslide Society*, 2015, 52(5): 233 - 238.
- [28] Yoshiya O. Application of surface wave and micro-tremor survey in landslide investigation in the Three Gorges reservoir area [J]. *Landslides and Engineered Slopes*, 2008, S1: 307 - 312.
- [29] Renalier F, Jongmans D, Campillo M, et al. Shear wave velocity imaging of the Avignonet landslide (France) using ambient noise cross correlation [J]. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2010, 115(F3): 1 - 14.
- [30] Aki K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors [J]. *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.*, 1957, 35: 415 - 456.
- [31] 李娜, 何正勤, 叶太兰, 等. 天然源面波勘探台阵对比试验[J]. *地震学报*, 2015, 37(2): 323 - 334.  
Li N, He Z Q, Ye T L, et al. Test for comparison of array layout in natural source surface wave exploration [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2015, 37(2): 323 - 334.
- [32] 黄真萍, 朱鹏超, 胡艳. 主动源与被动源面波勘探方法对比分析与应用[J]. *路基工程*, 2015(1): 15 - 19.  
Huang Z P, Zhu P C, Hu Y. Comparison and application of active and passive surface wave methods [J]. *Subgrade Engineering*, 2015(1): 15 - 19.
- [33] Lin F C, Schmandt B, Tsai V C. Joint inversion of Rayleigh wave phase velocity and ellipticity using USArray: Constraining velocity and density structure in the upper crust [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(12): 1 - 7.
- [34] 尹晓菲, 胥鸿睿, 夏江海, 等. 一种基于层析成像技术提高浅地表面波勘探水平分辨率的方法[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(6): 2380 - 2395.  
Yin X F, Xu H R, Xia J H, et al. A travel-time tomography method for improving horizontal resolution of high-frequency surface-wave exploration [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(6): 2380 - 2395.
- [35] Renalier F, Jongmans D, Campillo M, et al. Shear wave velocity imaging of the Avignonet landslide (France) using ambient noise cross correlation [J]. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2010, 115(F3): 1 - 14.
- [36] 刘启元, 李昱, 陈九辉, 等. 汶川 Ms8.0 地震: 地壳上地幔 S 波速度结构的初步研究[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(2): 309 - 319.  
Liu Q Y, Li Y, Chen J H, et al. Wenchuan Ms8.0 earthquake: Preliminary study of the S-wave velocity structure of the crust and upper mantle [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(2): 309 - 319.
- [37] 何正勤, 叶太兰, 丁志峰. 华北东北部的面波相速度层析成像研究[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(5): 109 - 118.  
He Z Q, Ye T L, Ding Z F. Surface wave tomography for the phase velocity in the northeastern part of North China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(5): 109 - 118.
- [38] 曾校丰, 钱荣毅, 邓新生, 等. 油气反射波地震勘探记录中面波

信息的提取[J].物探与化探,2001,25(6):443-446.

Zeng X F, Qian R Y, Deng X S, et al. The extraction of surface wave information from the record of oil-gas reflection wave seismic

exploration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2001, 25(6):443-446.

## Analyses of internal structure of slopes using multi-channel transient surface wave exploration and microtremor survey

LI Qiao-Ling<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>, LEI Xiao-Dong<sup>1</sup>, LI Chen<sup>1</sup>, FANG Hao<sup>3</sup>, GUAN Wei<sup>1</sup>,  
HAN Yu-Da<sup>1</sup>, ZHAO Xu-Chen<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Geo-exploration Technology, Beijing 100120, China; 2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

**Abstract:** According to the characteristics of thin eluvium and poor topographic conditions in research area, this paper analyzes the suitability and effectiveness of multi-channel transient surface wave and microtremor survey technology in investigating slope internal structure of the typical slope in Luniao Town, Yuhang District, Hangzhou City. The dispersion curve is extracted using frequency-wave number (F-K) and spatial autocorrelation method (SPAC). Based the velocity profile, the surface silty clay with breccia, completely weathered tuff, strongly weathered tuff and medium-slightly weathered tuff is interpreted. The results show that the surface wave exploration can effectively distinguish the internal structure of slope covered by thin eluvium. Both multi-channel transient surface wave and microtremor survey have a high accuracy in depth interpretation of the interface between strongly weathered and medium-slightly weathered tuff, which is well consistent with the borehole data, and there is a little bit of error in depth interpretation of the interface between surface silty clay with breccia and completely weathered tuff. The data analysis also shows that the fitting relationship between spatial autocorrelation function and Bessel function  $J_0$  is good when frequency less than 15 Hz, and the accuracy lose when it is higher than 15 Hz. Furthermore, the microtremor survey velocity is generally lower than the multi-channel transient surface waves exploration velocity.

**Key words:** eluvium and deluvium; slope structure; microtremor survey; multi-channel transient surface wave; spatial autocorrelation (SPAC); frequency wave number (F-K)

( 本文编辑:叶佩)