

First-Arrival Tomography and Multi-Channel Analysis of Surface Waves Combined Detection Technology for Pebble Layer Roadbed

Zhenning Ma¹, Rongyi Qian¹, Jiwen Xiao^{1,2}

¹Key Laboratory of Underground Information Detection Technology and Instruments, China University of Geoscience (Beijing), Beijing

²China Highway Engineering Consultants Corporation, Beijing

Email: mzn@cugb.edu.cn, rongyiqian@cugb.edu.cn, jiwen_xiao@outlook.com

Received: Oct. 4th, 2019; accepted: Oct. 18th, 2019; published: Oct. 25th, 2019

Abstract

In order to ensure the stability of the roadbed structure, it is necessary to obtain high-precision information on the distribution of bedrock surface. In the area containing the pebble layer, due to the existence of a large number of hard stones, engineering drilling operations are difficult to carry out, and it is difficult to obtain continuous bedrock surface information from the scattered holes. High-resolution seismic detection techniques are often used to obtain comprehensive information on underground structures. In this paper, the problem of detecting the bedrock surface under the cobble layer of a narrow valley is solved. The shallow-layer high-resolution seismic method using the First-arrival Tomography and Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW) is proposed to jointly invert the subsurface rock surface of the narrow valley topography. Three long lines are arranged along the valley, and two short lines are arranged in the vertical direction to obtain the first arrival waves and the surface waves information respectively. The inversion results show that the bedrock surface in the east-west direction of the site is less undulating and nearly identical to the terrain. The burial depth decreases from east to west, with the deepest point being 14 m and the shallowest at 6 m. The bedrock surface in the north-south direction is undulating, the burial depth in the southern part is slightly smaller than that in the north, the deepest part is 12 m, and the shallowest is 9 m.

Keywords

First-Arrival Tomography, Multi-Channel Analysis of Surface Waves, Pebble Layer, Bedrock Surface

卵石层路基初至层析成像和多道面波联合探测技术

马振宁¹, 钱荣毅¹, 肖继文^{1,2}

¹中国地质大学(北京), “地下信息探测技术与仪器”教育部重点实验室, 北京

²中国公路工程咨询集团有限公司, 北京

Email: mzn@cugb.edu.cn, rongyiqian@cugb.edu.cn, jiwen_xiao@outlook.com

收稿日期: 2019年10月4日; 录用日期: 2019年10月18日; 发布日期: 2019年10月25日

摘要

为保证道路路基结构的稳定性, 需要获取高精度的基岩面分布信息。在含有卵石层的区域因存在大量坚硬石块, 工程钻探作业开展困难, 零星布置的钻孔难以获取连续的基岩面信息, 通常采用高分辨率地震探测技术来获取全面的地下结构信息。本文为解决某狭长山谷卵石层路基下基岩面探测问题, 提出应用初至波层析成像和多道面波(MASW)两种浅层高分辨地震方法联合反演狭长山谷地形工区下基岩面深度及分布情况。本次沿山谷走向布置三条长测线, 与之近垂直方向布置两条短测线, 分别获取初至波以及面波信息。反演结果表明, 该场地东西方向基岩面起伏较小, 与地形近乎一致, 埋藏深度由东向西减小, 最深处14 m, 最浅处6 m; 南北方向基岩面起伏较大, 南段埋藏深度略小于北段, 最深处12 m, 最浅处9 m。

关键词

初至层析成像, 多道面波分析, 卵石层, 基岩面

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

在道路施工建设中, 为了保证工程质量和路基结构的稳定性, 需要掌握详实的工程地质信息, 尤其是基岩埋藏深度和空间展布特征。施工单位通常使用工程钻探来确定地层岩性和基岩面深度等信息, 但在类似本文中的含卵石层区域进行工程钻探难度较大, 难以通过工程钻探工作获取连续的基岩面信息。初至层析成像和多道面波方法能反演二维或三维的 P 波或 S 波速度剖面, 这些速度剖面可以用来估计地下介质速度垂向和横向变化, 以及基岩的深度和分布, 进而弥补钻探工作的不足。

地震初至层析成像是一种利用地震初至波走时重建地下介质速度结构的地球物理勘探方法, 通过初至波层析成像反演可以建立近地表速度模型[1]。利用初至层析成像技术在近地表不同地质环境的工程应用中取得了较好效果, 例如机场跑道下基岩探测[2]、场地稳定性监测[3] [4]、隧道勘探[5] [6]、城市活断层探测[7] [8] [9] [10]、覆盖层勘察[11]等。

浅地表面波技术得以广泛应用得益于 20 世纪 90 年代初, 美国堪萨斯大学开展了面波多道分析方法 (Multichannel Analysis of Surface Waves, MASW) [12] [13] 确定浅地表横波速度的系统研究, 该技术受到浅地表地球物理界的极大关注并得到快速推广应用。多道面波方法以多次覆盖的方式获取面波信息, 通过顺序排列测线上单点的垂向速度结构形成地下二维速度模型[14]。另外, 其横向分辨率与排列长度一致, 因此为保证高分辨率, 布设测线一般较短[15]。目前多道面波分析技术已在滑坡调查[16]、工程场地评价[17] [18] [19]等领域中取得了较好的应用效果。

为了提高地球物理方法在近地表应用的分辨率和可靠度, 联合应用多种方法已经成不二选择。相较于以往单一方法探测基岩面分布的技术, 本文所采用的两种方法结合钻孔联合应用, 不仅可以获得基岩面的埋深和空间展布, 同时也可以得到纵波度和横波速度参数, 更有利于场地评价。本次研究区为狭长的山谷地形, 并沿山谷走向布设了三条长测线, 与之垂直布设两条短测线。综合研究区特征与两种方法优势, 通过初至波层析成像方法高效、高分辨率反演山谷地下速度结构, 并以多道面波方法反演无法获得折射波初至的短测线数据。结合两种方法结果探明研究区内场地基岩面埋深及分布情况。

2. 理论和方法

2.1. 初至层析成像

初至波走时层析成像是指利用初至波双程旅行时和射线路径反演地层纵波速度的成像技术。地震初至波是指震源激发的地震波在地层中传播后, 最先被检波器接收到的地震波。在层析成像法[20]中, 任何一个观测数据都可表示成沿穿过成像区中射线路径的线积分。积分路径是地震射线, 观测数据是地震单炮记录中的初至波走时, 它可表示为:

$$T_j = \int_{ray_j} \frac{1}{V(x)} ds \quad (1)$$

其中, $V(x)$ 是近地表速度分布, ds 是沿射线路径的距离增量, T_j 是该射线的走时, x 是近地表中的位置矢量。我们的目的就是利用初至波走时确定近地表速度分布。在实际介质中, 射线路径随速度分布的变化而变化, 初至时间和速度的关系是非线性的。为了求(1)式, 我们须对其线性化。令

$$V(x) = V_R(x) + \delta V(x) \quad (2)$$

其中, $V_R(x)$ 是背景速度, $\delta V(x)$ 是速度扰动量, 当 $\delta V(x) \ll V_R(x)$ 时, 初至时间的变化和速度扰动量的关系是线性的, (1)式可转换成

$$\delta T_j = \int_{ray_j} \frac{-\delta V(x)}{V_R^2(x)} ds \quad (3)$$

对于一组射线, (3)式可表示成矩阵形式

$$\delta T = A \delta V \quad (4)$$

其中, δT 是实际初至时间和当前模型计算的初至时间之差, δV 是网格节点的速度扰动量, A 是雅可比矩阵, 它包含了观测方式和射线路径的信息, 其元素是 $a_{ik} = \partial T_i / \partial V_k$, 它表示第 i 条射线的走时对第 k 个网格节点的速度偏导数。求解(4)式, 求出速度模型的扰动量。

2.2. 多道面波分析

面波的能量主要集中于距离自由地表约一个波长范围内, 因此勘探深度一般认为是一个波长左右, 频率越低探测深度越大。面波在工程勘察中的应用, 主要利用了面波的频散特性, 即在均匀水平分层介

质中,不同频率的面波以不同的传播速度传播,这就是利用瑞雷面波勘查地层结构的理论基础。频率越低周期越长其传播速度受到越深的介质属性影响,通过测量不同频率的面波速度(即频散曲线)就可以通过一定的反演方法来推断不同深度介质的属性,从而达到探测的目的[21]。瑞雷面波分析方法,按照频散曲线的提取方法不同,主要分为互相关法、表面波谱分析法(SASW)、相位展开法、 τ - p 变换法、Prony法、多道面波分析法(MASW)等。

本文采用了多道面波分析法(MASW) [12] [17],其原理如下式所示:

$$U(x, \omega) = \int u(x, t) e^{i\omega t} dt \quad (5)$$

将时间域的面波信号 $u(x, t)$ 通过傅立叶变换变换到频率域得到 $U(x, \omega)$, 而 $U(x, \omega)$ 可以表示为相位谱与振幅谱的乘积, 即:

$$U(x, \omega) = e^{-i\Phi t} A(x, \omega) \quad (6)$$

$$\Phi = \omega / c_w \quad (7)$$

其中 ω 角频率, c_w 为角频率对应的相速度。以 $U(x, \omega)$ 做积分变换, 则有:

$$V(\varphi, \omega) = \int_e^{-i\Phi x} [U(x, \omega) / |U(x, \omega)|] dx \quad (8)$$

$$V(\varphi, \omega) = \int_e^{-i(\Phi - \varphi)x} [A(x, \omega) / |A(x, \omega)|] dx \quad (9)$$

因为振幅谱 $A(x, \omega)$ 为实数且为正数, 则当 $\Phi = \varphi$ 时, $V(\varphi, \omega)$ 为极大值, 相对应的就是该频率的相速度最大值。简单的说, MASW 法就是通过傅立叶变换将时间域的面波信号变换到相速度-频率域, 拾取得到基阶与高阶高面频散曲线[17]。

3. 数据采集

施工场地的山谷地形沿着一个方向延伸, 两侧都是较为陡峭的山峰(图 1), 且在地表存在小的地表径流, 山谷两侧有基岩出露。根据场地内已有的三个钻孔信息(图 2), 该处表层介质主要由杂填土, 粉砂, 淤泥和砾石层等较为松散的物质组成。



Figure 1. Construction site environment (Westward)

图 1. 施工场地环境(镜头向西)

考虑到研究区为窄长的山谷地形, 本文的研究区域选取了其中具有代表性的一段。研究区域内沿着

山谷走向布置三条东西方向的长测线(L1, L2, L3), 垂直于山谷走向布置多条短排列测线(本文以 L15、L16 两条为例)。长排列能够接收到多个地层的初至波信息, 因此通过初至层析成像技术反演东西方向的地层速度结构。短排列的长度不足以接收到用于初至波层析成像的信息, 因此采用小道距, 多道面波分析的方法来反演地下结构。研究区内已有三个工程钻孔, 为了使其能够更精确标定地震探测结果, 测线都尽可能跨越钻孔布设, 测线和钻孔位置关系如图 2 所示。

本次探测使用的记录仪为 Geode 地震仪, 震源激发采用铁锤锤击铁垫板的方式, 铁锤质量为 7.8 kg。长测线采集为使得远偏移距有足够清晰的初至波, 每个单炮记录由相同炮点激发的 3 次记录叠加而成, 以提高单炮记录信噪比, 增强远偏移距初至信号能量。短测线未采用多次叠加的采集方式。另外, 为满足面波反演的深度需求, 采用 4.5 Hz 的低频检波器接收地震波中的低频成分, 以求最大限度地保留面波信号。测线具体采集参数详见表 1。

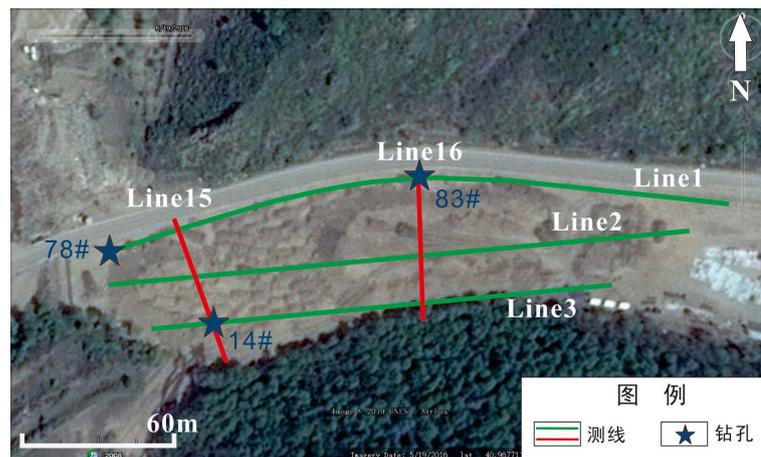


Figure 2. Seismic Lines and boreholes distribution map

图 2. 测线及钻孔分布图

Table 1. L acquisition parameters table

表 1. 测线采集参数表

线号	道间距	道数	测线长度	炮间距
L1	2 m	48	300 m	2 m
L2	2 m	48	280 m	2 m
L3	2 m	48	180 m	2 m
L15	1 m	24	48 m	1 m
L16	1 m	24	44 m	1 m

4. 数据处理

长测线采集的地震数据(图 3)利用初至层析成像法处理。本文对地下结构层析成像反演共分为四步: 1) 初至拾取、2) 建立地下速度模型、3) 射线追踪正演、4) 迭代反演。初至拾取采用 SeismicStudio 软件, 其余环节采用 Tomodel 软件。建立速度模型即结合已有的工区地球物理资料, 建立尽量贴合研究区地下真实速度结构的初始速度模型。射线追踪正演则是在初始模型基础上, 布置与实际情况相同的观测系统, 利用射线追踪方法计算出此速度模型下的地震波走时。最后迭代反演是以正演的走时与实际观测值之间的误差值来修改模型速度结构, 进而使得计算的速度模型与研究区地下的速度模型逼近。这里实际数据中, 射线

密度越大的位置层析成像的反演结果精度越高,射线密度如图4所示。本次反演共迭代15次实现模型收敛。

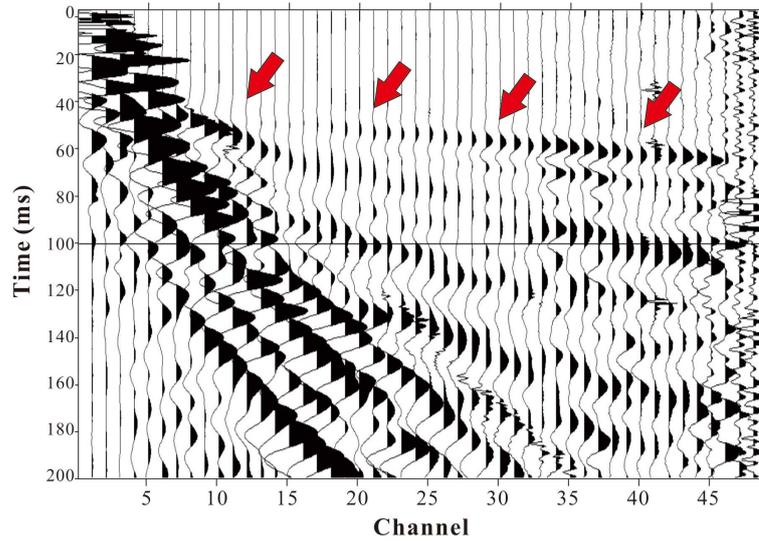


Figure 3. 48-channels seismic record with 2 m spacing
图 3. 2 m 道间距 48 道地震数据

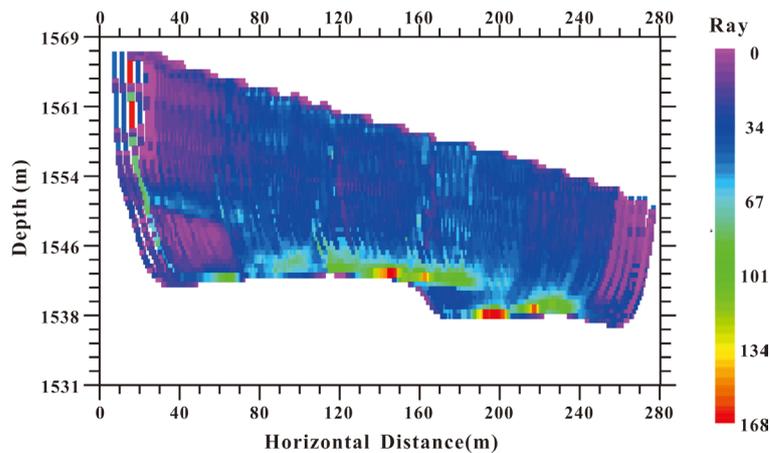


Figure 4. Tomography rays distribution map
图 4. 层析成像射线分布图

短测线地震数据(图5)采用了多道面波分析(MASW)法。MASW法采用了1 m炮间距,1 m道间距,24道的短测线地震数据,具有高信噪比的面波数据(图5)。数据处理反演采用了Seisimager软件。主要步骤包括:

- 1) 时-空域面波提取;
- 2) 面波信号的二维傅氏变换,绘制频率-波数域振幅谱等值线图;
- 3) 提取面波频散数据,绘制频散曲线(图6);
- 4) 绘制速度等值线图。

5. 解释

利用场地内的三个工程钻孔标定两种方法得到的速度结构,对该区域整体的基岩面深度和变化趋势做出解释:

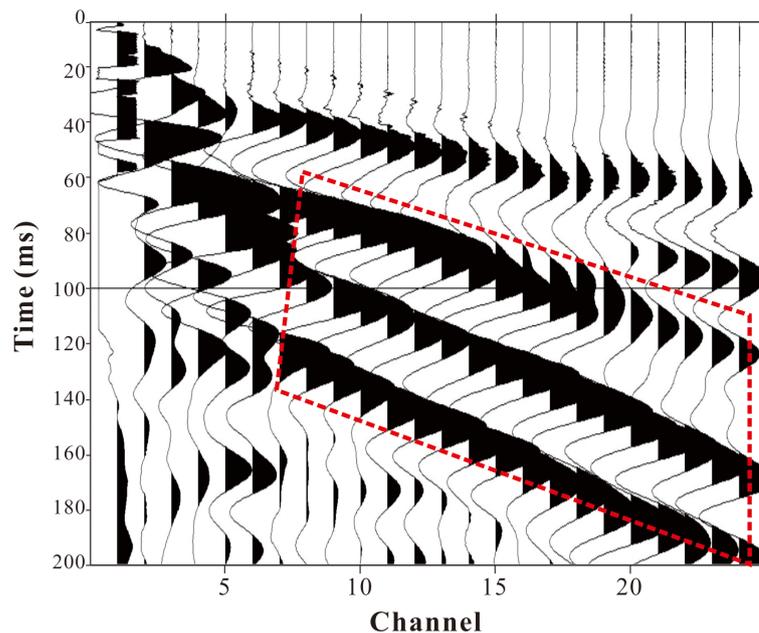


Figure 5. 24-channels seismic record with 1 m spacing

图 5. 1 m 道间距 24 道地震数据

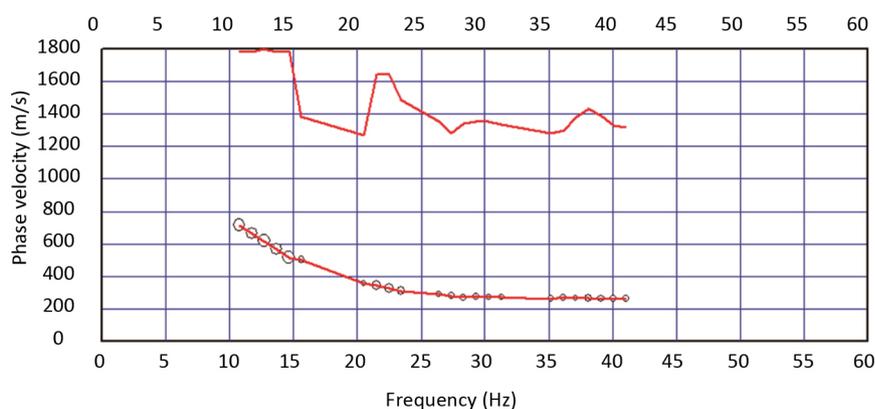


Figure 6. Surface wave dispersion curve

图 6. 面波频散曲线

通过与工程钻探结果的对比, 将速度值为 2100 m/s 的速度等值线解释为基岩面。L1 穿过了 78 号和 83 号两个工程钻孔, 结合钻孔信息可以确定 L1 东段基岩面深度约为 13~14 m, 西段为 9~10 m (图 7(a)); L2 没有穿过钻孔, 因此根据 L1 提供的基岩面速度进行解释, L2 基岩面深度变化较小, 整体深度约 9~10 m (图 7(b)); L3 穿过了 14 号钻孔, 西段基岩面埋深较浅, 约为 6 m, 向东逐渐变深, 能达到 9~10 m (图 7(c))。东西方向是山谷的延伸方向, 东西向的基岩面整体深度变化不大, 基岩界面起伏较小, 覆盖层与基岩的速度分界面比较明显, 初至层析法给出的基岩面和钻孔中的基岩面吻合比较好。

根据 14 号和 83 号钻孔信息, 将多道面波分析得到的速度模型中速度值为 550~600 m/s 的等值线解释为基岩面。L15 的基岩面由南向北有逐渐变深的趋势(8~12 m), 中段有明显的起伏(图 8(a)); L16 指示的基岩面深度总体在 10 m 左右, 值得注意的是, 在 L16 的面波速度剖面中, 出现了三个低值异常区域, 基岩面在这三处可能有明显变化, 施工过程中应注意这三处(图 8(b))。南北方向测线较短, 基岩面起伏变化相较东西方向更大。

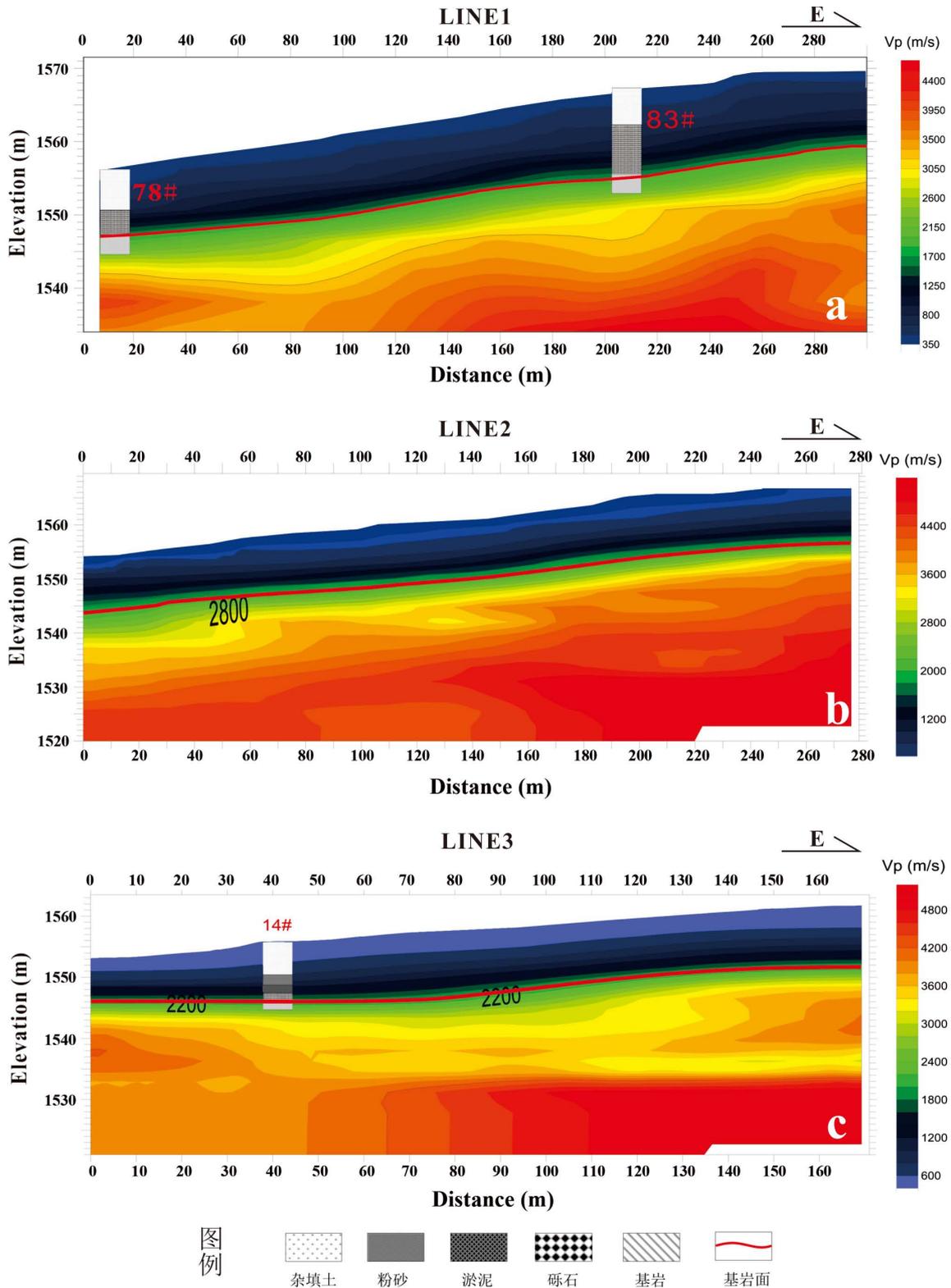


Figure 7. Tomography P-wave velocity profile and bedrock surface interpretation: (a) L1 velocity profile and bedrock surface interpretation; (b) L2 velocity profile and bedrock surface interpretation; (c) L3 velocity profile and bedrock surface interpretation

图 7. 层析成像纵波速度剖面及基岩面解释：(a) L1 速度剖面及基岩面解释；(b) L2 速度剖面及基岩面解释；(c) L3 速度剖面及基岩面解释

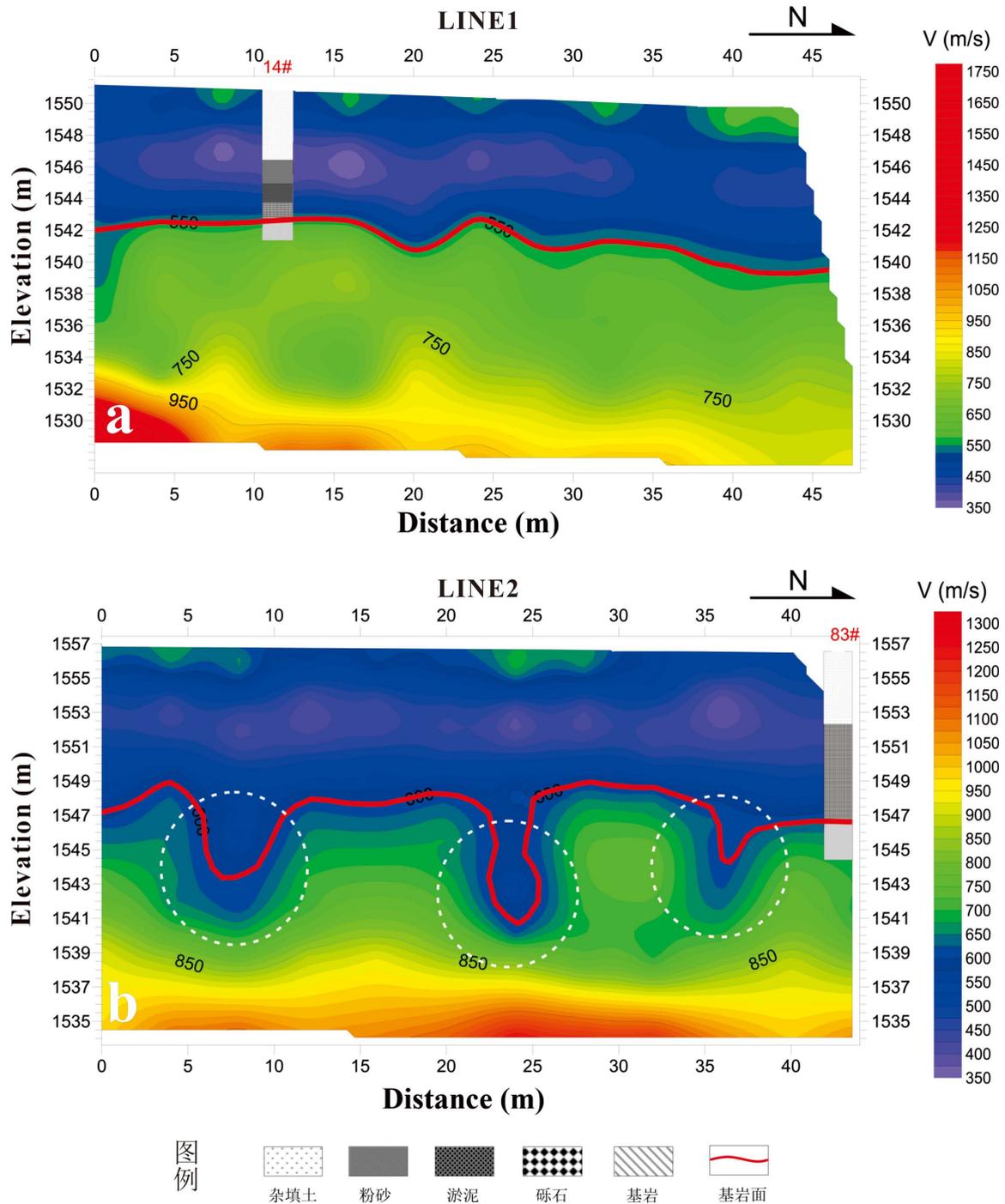


Figure 8. Surface wave velocity profile and bedrock surface interpretation obtained by Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW): (a) L15 velocity profile and bedrock surface interpretation; (b) L16 surface wave velocity profile and bedrock surface interpretation, the white dotted circle shows the abnormal area

图 8. 多道面波分析法面波速度剖面及基岩面解释：(a) L15 速度剖面及基岩面解释；(b) L16 面波速度剖面及基岩面解释，白色虚线圆圈所示为速度异常区域

6. 结论

面对含卵石层区域难以开展工程钻探的困境，本文在某山谷含卵石层区域联合应用初至层析成像法

和多道面波法完成了道路路基的基岩面探测工作,这两种方法目前都已经比较成熟,在本次勘探中也取得了不错的效果。根据场地需求,联合应用多种非侵入性的浅地表地球物理方法不仅能够增强结果解译的准确度,也能获得多种物性参数,是解决工程场地探测问题的好方案。

山谷地形相较于其他区域,一般是沿着一个方向延伸的狭长场地,且地表变化复杂,在方法选取上要更有针对性。初至层析法要达到足够的勘探深度,需要有较长的排列保证大偏移距原始资料质量,适合沿着山谷走向的长测线。瞬态瑞雷波法对排列长度要求不高,但是在追索层位时连续性不如初至层析法,效率相较于初至层析法更低,适合垂直于山谷走向的短测线。

此外,在测线布置过程中,要尽可能多的利用钻孔信息。本例中测线交点位于钻孔处,充分利用了钻孔提供的高精度单点信息,对速度界面起到了良好的标定作用,使解释结果更加可靠。

基金项目

感谢“地下信息探测技术与仪器”实验室的同学们在数据处理上提供的帮助!感谢北方卓越勘测公司在数据采集中提供的支持!

参考文献

- [1] Rawlinson, N., Pozgay, S., Fishwick, S., *et al.* (2010) Seismic Tomography: A Window into Deep Earth. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **178**, 101-135. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2009.10.002>
- [2] Higuera-Diaz, I.C., Carpenter, P.J. and Thompson, M.D. (2007) Identification of Buried Sinkholes Using Refraction Tomography at Ft. Campbell Army Airfield, Kentucky. *Environmental Geology*, **53**, 805-812. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0693-y>
- [3] Hickey, C.J. and Duddu, L. (2007) Seismic Refraction Tomography of a Small Earth Dam. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **122**, 3061. <https://doi.org/10.1121/1.2942918>
- [4] 刘雅琼. 面波折射波综合反演精细结构探测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [5] 李永铭, 黄易, 谭天元. 层析成像技术在隧道勘探中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(3): 367-370.
- [6] 徐书兵, 张晓培, 蔡伟嘉. 地震折射层析和高密度电法在隧道勘察中的应用[J]. 路基工程, 2019(1): 163-167.
- [7] Yilmaz, O., Eser, M., Berilgen, M., *et al.* (2006) A Case Study of Seismic Zonation in Municipal Areas. *Geophysics*, **25**, 319-330. <https://doi.org/10.1190/1.2184100>
- [8] 秦晶晶, 袁洪克, 何银娟, 等. 层析成像技术在城市活断层探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(5): 393-398.
- [9] 邓小娟, 鄯少英, 左莹, 等. 利用浅层反射地震资料中的面波与初至波研究剖面浅部结构[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(4): 425-431.
- [10] 王立会, 梁久亮, 彭刘亚. 初至波层析成像技术在隐伏断裂探测中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2015, 24(1): 29-36.
- [11] 李小伟, 纪银刚, 邱松, 等. 地震 CT 与折射波法在第四系覆盖层厚度勘察中的应用[J]. 工程勘察, 2018, 46(5): 73-78.
- [12] Park, C.B., Miller, R.D. and Xia, J. (1999) Multichannel Analysis of Surface Waves. *Leading Edge*, **18**, 800-808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- [13] Xia, J., Cakir, R., Miller, R.D., *et al.* (1999) Estimation of Near-Surface Shear-Wave Velocity by Inversion of Love Waves. *Geophysics*, **64**, 1390-1395. <https://doi.org/10.1190/1.1444578>
- [14] 夏江海, 高玲利, 潘雨迪, 等. 高频面波方法的若干新进展[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2591-2605.
- [15] 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): 210-225.
- [16] 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(3): 1367-1372.
- [17] 李凯. 面波勘探技术在工程勘察中的应用进展[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(1): 97-104.
- [18] 林承灏, 张平松, 郭立全, 等. 利用多道面波勘探技术调查路基岩溶地质条件[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(5):

595-599.

- [19] 李彦恒, 王靖, 冯利, 等. 被动源面波法和初至层析成像法在深基坑工程勘察中的综合运用[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(6): 808-816.
- [20] 张明辉, 刘有山, 侯爵, 等. 近地表地震层析成像方法综述[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(1): 48-63.
- [21] 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.