

何正勤, 潘华, 胡刚, 叶太兰, 宋毅盛, 陈文彬. 2010. 用共偏移距反射法拓展地质剖面的解释深度. 地震学报, 32(2): 224-233.

He Zhengqin, Pan Hua, Hu Gang, Ye Tailan, Song Yisheng, Chen Wenbin. 2010. Extending interpretation depth of geological cross-section using common-offset reflection method. *Acta Seismologica Sinica*, 32(2): 224-233.

用共偏移距反射法拓展地质剖面的解释深度^{*}

何正勤^{*} 潘 华 胡 刚
叶太兰 宋毅盛 陈文彬

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 针对核电工程选址中的能动断层地质调查工作需要, 提出了利用共偏移距浅层地震反射时间剖面来拓展地质剖面解释深度的技术方法, 通过物性和岩性的综合解释来提高对能动断层鉴别及其产状确定的可靠性. 探测试验结果表明该方法是有效可行的. 地质剖面上描述的断裂破碎带在共偏移距时间剖面上反应明显, 二者可以相互印证, 优势互补. 该技术方法可用于类似工程地质调查和第四系覆盖较薄地区的隐伏断层探测.

关键词 浅层地震勘探 共偏移距 能动断层 断裂破碎带 地质剖面

doi: 10.3969/j.issn.0253-3782.2010.02.010 中图分类号: P315.2 文献标识码: A

Extending interpretation depth of geological cross-section using common-offset reflection method

He Zhengqin^{*} Pan Hua Hu Gang Ye Tailan
Song Yisheng Chen Wenbin

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to meet the needs of capable fault geological survey on nuclear power project sites, this paper proposes a technical method of using common-offset shallow seismic reflection profiles to extend the interpretation depth of geological cross-sections. Through comprehensive interpretation of the physical properties and lithology, the identification of capable faults and determination of their attitude can be more reliable. The test results show that the method is effective and feasible. The fracture zones found on geological profiles are also visible on the common-offset shallow seismic reflection profiles. The geological and seismic interpretations may verify each other. The technical approach provided by this paper can be applied to similar engineering geological investigations, and also to buried fault detection in a thin Quaternary covered area.

* 基金项目 地震行业科研专项《核电厂地震安全问题研究(200708003)》、《井地联测 VSP 技术在隐伏活断层上断点确定中的应用(200808007)》共同资助. 中国地震局地球物理研究所论著 10AC1010.

收稿日期 2009-06-18 收到初稿, 2009-11-18 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: hezq@cea-igp.ac.cn

Key words: shallow seismic exploration; common offset; capable fault; fracture zones; geological cross-section

引言

地震勘探是地球物理勘探中的一种重要方法,已在油气、矿产资源及深部结构探测中得到了广泛而有效的应用。“十五”期间,为适应我国城市现代化建设飞速发展的需要,中国地震局负责实施的中国数字地震观测网络项目,完成了京、津、沪等20个城市活断层探测与地震危险性评价工程的建设任务。在项目实施中,为了提高浅层地震勘探在城市强干扰环境下对活断层探测的可靠性,在配备具有高性能先进探测设备的条件下,对活断层探测方法技术进行了一系列的试验探测。在地震波激发震源、数据采集和分析处理方法等方面取得了丰富的经验,使得强干扰背景条件下的数据采集、资料处理与资料分析解释水平都得到了明显提升,取得了一批研究成果。例如,方盛明等(2002)总结了用于活断层探测的各种地球物理方法的特点及适用范围等问题;刘保金等(2002)通过在福州市进行的浅层地震试验,介绍了地震勘探在强干扰背景条件下的野外数据采集方法,并讨论了如何提高地震资料的信噪比和分辨率等问题。

近几年来,浅层地震勘探方法越来越多地在重要工程场址的隐伏断层探测中发挥着重要的作用,如Haberland等(2007)用8条长约1 km的浅层地震勘探剖面,清楚地揭示了Wadi Araba断裂(死海转换带)在深度400 m范围内的产状和空间展布形态;何正勤等(2007)在广东潮汕地区开展核电厂址的能动断层调查中,对于探测上断点埋深50—200 m的断层取得了很好的探测效果。但是在很多情况下,需要探测深度小于50 m的地质构造,由于受到震源附近干扰波的影响,浅层地震勘探方法对很浅深度的探测还存在一些技术上的难题。很多学者曾利用横波反射(Young, Hoyos, 2001,)或折射(Li *et al*, 2001)方法来完成这种超浅层的地震勘探,在场地地质和地球物理条件较好的情况下,能够取得不错的勘探效果。近期有一些利用纵波进行浅表层小尺度高分辨率地震勘探的应用实例,如Jeng等(2007)在台湾车笼埔断裂的开挖剖面上完成了长14.4 m的超浅层反射地震勘探剖面,得到了6 m深度范围的精细结构,结合地质剖面的解释,给出了车笼埔断裂在8 m深度范围内的综合解释剖面图。

在核电厂地震危险性评价中,发震构造和能动断层鉴定是一项非常重要的工作。除了要在第四系覆盖地区进行必要的隐伏断裂勘探外,通常还要在基岩出露区开展断裂的野外地质调查工作。当断裂破碎带穿过人工开挖的剖面和基岩露头的地方时,地质调查工作者根据岩性可以绘制出直观的地质剖面图,作为鉴定发震构造和能动断层的依据。在地质剖面分析工作中,总是期望剖面的尺度尽可能大些,一般通过人工开挖来适当扩展范围。但在很多情况下,由于受到开挖深度的限制,断裂的露头往往是非常局部的,往下部的延伸被覆盖,难以了解断层的总体特征。有些断层在露头上看规模较大、往下无根;而有些断层在露头上看起来规模较小,但可能出露的只是冰山一角。总之,断层在露头上的面貌不一定能反映出其向下延伸的总体特征。本文的研究工作专门针对这个问题,拟在地质剖面的上端或下端布设密点距、高分辨率的超浅层地震勘探测线,由此拓展地质剖面的分析解释尺度,并通过物性和岩性的综合解释来提高对能动断层鉴别和断层产状参数确定的可靠性。

1 共偏移距探测方法简述

在浅层地震勘探中,当目标层深度小于20 m时,常规的多次覆盖方法几乎是无能为力的。近几年来在工程物探中发展起来的瞬态面波勘探和共偏移距反射方法适用于这种很浅尺度的勘探。目前这两种方法在国内外已有许多应用实例(Ivanov *et al*, 2006; 刘保金等, 2006; 杨祥森等, 2007)。面波勘探方法由于受到速度结构反演中的多解性和分辨率的局限,不适用于解决本文所涉及的实际问题。因此,本文只讨论共偏移距方法的基本原理,并结合实例介绍相应的数据采集、处理和资料解释方法。

共偏移距方法是基于共反射点方法中的最佳偏移距技术发展起来的,是反射地震勘探的一个分支。该方法在资料处理中不需要进行动校正处理,避免了动校正对反射波的拉伸、畸变等影响,能充分保留反射波的运动学和动力学特征。因此具有分辨率高、对地下构造的细节再现性好等优点。探地雷达和在浅海及水域地质勘探中所用的声纳技术,都与共偏移距反射方法的原理基本相同。

共偏移距反射方法的观测方式如图1所示。野外数据采集时,每个记录道在相同的偏移距位置用单道接收。例如在 O_1 点激发,在选定的偏移距 S_1 处接收,下一次在 O_2 点激

发, S_2 处接收,重复上述过程便可获得一条完整的共偏移距剖面的波形数据。在数据处理中,通过常规的去噪和提高分辨率处理后,按反射点位置依次排列就得到了能直观反映地下地质构造特征的共偏移距地震反射时间剖面。

为了获得高信噪比和分辨率的共偏移距记录,需要使用多道地震仪在适当长度的扩展排列上完成共炮点试验记录剖面,并通过分析剖面上各种地震波的传播规律,确定能够接收到反映探测目标层有效波的最合适的偏移距,即为最佳偏移距。

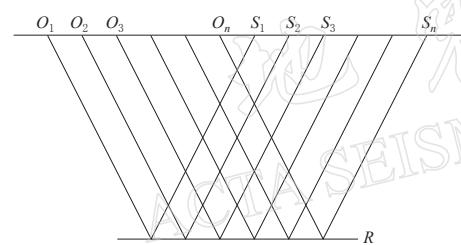
图1 共偏移距反射法观测方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of common-offset reflection

由于最佳偏移距的大小与判断局部异常地质体的范围有直接关系,偏移距越大,实际地质体的尺度在时间剖面上的异常范围就越大。此外,偏移距太大时,较长传播路径上介质的横向非均匀性将影响探测结果的分辨率和对异常地质体判别的可靠性。因此,在避开激发源附近干扰波和有效信号不与非反射干扰波重叠的前提下,应尽量选取较小的偏移距,这样得到的时间剖面才更加逼近自激自收的情况。因此,在共偏移距剖面中确定地质体范围时,应该考虑到偏移距大小这一因素。

2 野外数据采集实例

本次数据采集试验场地位于广东潮汕平原南部的惠来县东铺林场附近。在乌屿核电项目的地质调查中,发现在修建惠来—田心公路时开挖出的高约4 m的边坡剖面上有一个宽1—2 m的断裂破碎带(见图6所示的照片),但该断裂向下延伸的宽度、倾角等情况单靠地面看到的地质剖面难以确定,本文试图利用共偏移距浅层地震反射时间剖面来延拓地质剖面解释深度。通过现场踏勘,探测测线布设在边坡剖面上部的平台上,测线走向与地质剖面平行。数据采集设备选用的是德国DMT公司制造的Summit遥测数字地震仪,为了最



大限度地获得高分辨率的地震剖面,在正式的数据采集前进行了一系列对比试验。

2.1 激发震源和检波器的观测效果试验

在浅层地震勘探中,要想提高分辨率首先必须要采集到频带宽、主频高的地震信号。因此,选用能激发出宽频带高频地震波的震源和具有接收高频信号能力的检波器,是获得高分辨率地震信息的基本保障。

为了得到浅部地层结构的高分辨率图像,应当选用小能量的激发源。为此我们在现场用12磅和4磅铁锤进行了敲击的对比试验(野外试验场景和单炮记录分别见图2和图4)。试验结果表明,4磅铁锤快速轻敲激发的地震波频率明显高于前者,有效波的信噪比也大大提高。

目前,在浅层地震勘探中常用的检波器主要有40Hz,60Hz和100Hz三种。本次试验首先考虑使用100Hz的高频速度型检波器接收地震波,因为该检波器在数据采集时既可压制低频干扰,又可拓宽地震记录的高频上限。最近,西安石油大学研制出一种新型陆用压电加速度型检波器,为了对比这两种检波器与100Hz高频速度型检波器的接收效果,我们对二者进行了对比试验。图3是同一次敲击在排列上记录的波形和对应的频谱。图3a中第1道是加速度型检波器的记录,第2—5道是速度型的波形图;图3b和图3c分别是第1道和第2道的频谱。可以看出,这两种检波器记录波形的一致性很好,频带宽度相近,100Hz速度型检波器



图2 野外数据采集场景
Fig. 2 Field data acquisition

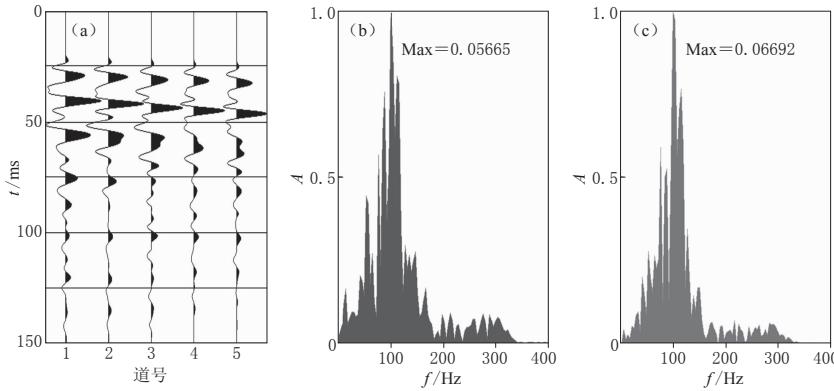


图3 速度型和加速度型检波器接收效果对比

(a) 共炮集波形; (b) 加速度振幅谱; (c) 速度振幅谱

Fig. 3 Comparison between velocity-type and acceleration-type record

(a) common shot gather; (b) acceleration spectra; (c) velocity spectra

在 150 Hz 以上高频段的能量更强一些。考虑到频带宽度和稳定性等因素，本次试验选用了 100 Hz 高频速度型检波器。

2.2 观测系统试验

在共偏移距地震反射波勘探中，最佳偏移距的选取是关系到探测成败的重要问题。为了提高揭示浅部地层横向变化的分辨能力，在避开干扰波的前提下，应尽量选取较小偏移距。

因此正式开始数据采集前必须在具有代表性的测段进行扩展排列试验，并根据实际记录的波场特征选取最佳偏移距。由于单道地震记录无法获得地震波速度，扩展排列试验记录还可用来求取地震波速度，以便解释时间剖面上反射波组的界面埋深。

图 4 是在本场地分别用 12 磅(图 4a)和 4 磅(图 4b)手锤激发得到的零偏移距扩展排列记录(道距 0.3 m, 36 道接收)。可以看出，图 4a 中能量强的低频面波干扰有效反射波的区域大，图 4b 相对较小，在第 6—10 道之间时间为 15 ms 和 30 ms 左右的反射波刚好避开了震源附近的干扰波和能量较强的面波，因此选用 1.8 m(第 7 道)为最佳偏移距。

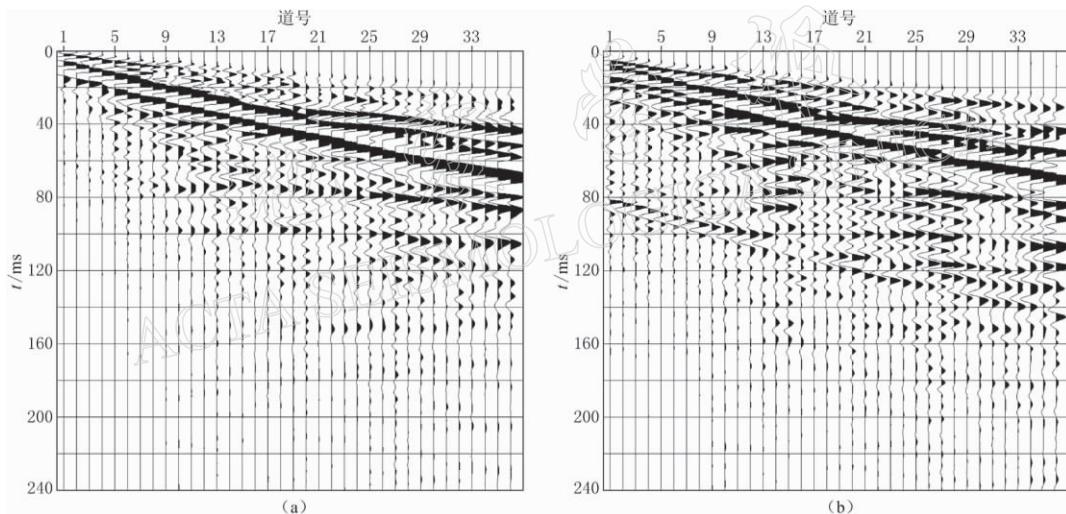


图 4 零偏移距扩展排列记录。(a) 12 磅手锤震源；(b) 4 磅手锤震源

Fig. 4 Records of zero-offset extension array

(a) 12 pound sledgehammer source; (b) 4 pound sledgehammer source

通过上述的震源、检波器和观测系统试验，结合本次试验的探测目标，主要考虑了充分利用地表附近地层的反射信息，最大限度地提高分辨率和信噪比，以及尽量避免数据处理过程中的失真这三方面的因素。在本次试验的正式数据采集中，用 4 磅小铁锤小能量激发，100 Hz 高频速度型检波器按 1.8 m 的等偏移距观测系统接收，炮间距和测点间距均为 0.6 m，采样率 0.25 ms，记录长度为 256 ms。

3 数据处理

3.1 反射波与面波的波场分离

由于共偏移距反射资料不需要进行动校正和叠加等处理，其数据处理比常规的共反射点多次覆盖方法要简单得多。在一般情况下，只需要将野外采集的数据解编、定义观测系统和常规去噪处理后按反射点位置排序即可得到共偏移距时间剖面。但为了探测浅表部的

地层细结构,本次试验采用的检波点距和偏移距都很小,震源附近的多种干扰波尤其是面波的干扰仍然较强,因此有效反射波与强能量面波的波场分离是本次数据处理工作中的重中之重。针对本次采集数据的特点,除了进行随机噪音吸收-带通滤波等常规处理外,还着重进行了频率-波数($f-k$)滤波处理。通过合理选择基本参数,取得了很好的波场分离效果,同时为共偏移距剖面的时-深转换提供了速度参数。

为了取得较好的波场分离效果,首先分析了共炮记录中各种波组的频带、速度等基本特征。从图4可以看出,面波与反射波的显著差异是频率低、能量强、速度慢。因此,如果通过对面波特征的数值分析,获得反映面波传播特性的定量物理参数,就能把面波从记录中去除。为此进行了面波的频散特性分析。

从共炮点记录中看到面波的传播速度明显小于纵波(图5a),在较大偏移距测段根据到时容易与初至纵波分开。但由于频散的关系,随着偏移距的增加,面波的干扰区域逐渐增大,有效反射波几乎全被面波淹没,而且在频段上也有重叠现象,从运动学特征上很难将二者分离。在这种情况下,我们采用了在频率-波数($f-k$)域进行二维傅里叶变换的分析方法。首先选取面波出现区域(见图5a中红色四边形框内的区域)进行 $f-k$ 变换,将其中的波数 k 转换为速度 v 输出,得到面波速度随频率变化的关系;再根据能量最大值的分布提取面波的相速度频散曲线(图5b)。利用这些参数通过 $f-k$ 滤波处理很容易把面波滤除。

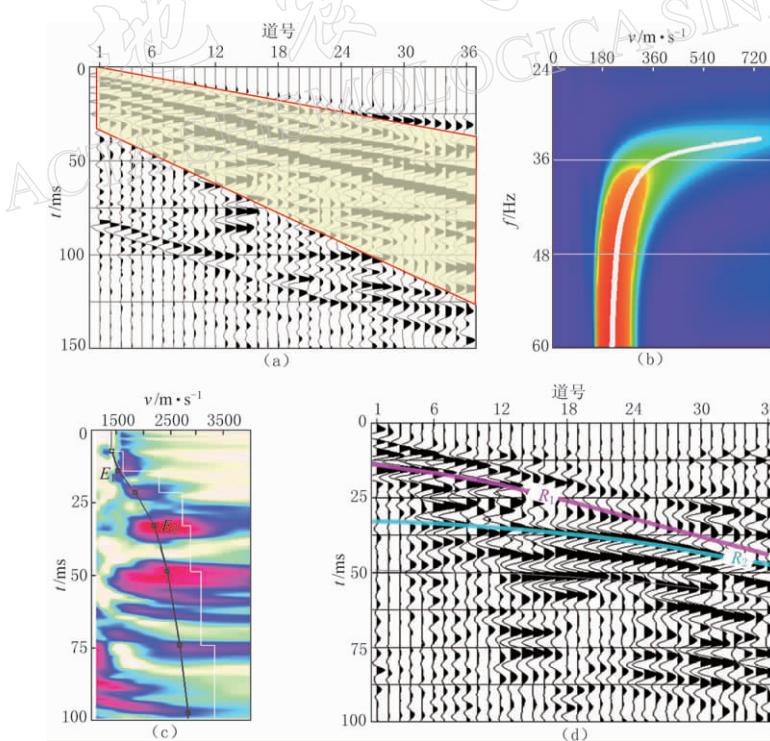


图5 速度分析与波场分离效果图

(a) 原始炮集; (b) $f-v$ 频谱; (c) 波场分离后的速度谱; (d) 波场分离后的炮集

Fig. 5 Velocity analysis and wave field effective separation

(a) Raw shot gather; (b) $f-v$ spectrum; (c) velocity spectrum after the wave field separation; (d) shot gather after the wave field separation

图 5d 是按上述方法将图 5a 波场分离后得到的波形, 可以清楚地看到有两组较强的反射波组 R_1 和 R_2 , 在原始波形中这两个波组被淹没在面波之中(图 5a). 但在去除面波后分离出的波场中, 其能量大大加强, 以优势波组出现, 说明这种先定量分析干扰波的特性后再进行波场分离的去噪效果是很好的.

3.2 速度分析

地震波的传播速度是地震勘探数据处理中最基础、最重要的参数之一, 通过速度分析获取的速度参数对于正常时差校正、剩余静校正、共深度点叠加、叠后偏移及时—深转换等都至关重要. 因此在地震反射勘探资料处理中, 速度分析是很重要的基础性工作. 目前, 用于浅层地震反射资料的速度分析主要有速度扫描和速度谱分析两种方法, 速度分析的基本原理和参数选取方法见王辉和丁志峰(2006)文章. 对于共偏移距地震反射波勘探资料, 只能根据扩展排列试验记录通过速度谱分析求取地震波速度, 从而确定共偏移距剖面上反射界面的埋深. 虽然速度谱分析通常是用共反射点道集来做的, 但在本实例中, 由于道距小、排列短, 反射界面近似水平, 因此可以对共炮道集通过速度谱分析来确定速度.

图 5d 是通过 $f-k$ 滤波处理滤除面波后得到的扩展排列波形, 图 5c 是其对应的速度谱图像. 由能量团 E_1 , E_2 确定的速度结构计算出的反射波理论时距曲线(见图 5d 中的紫红色和蓝色曲线)与两组较强的反射波组 R_1 和 R_2 所示的到时非常吻合, 说明由此确定的速度结构是合理的.

4 剖面分析与资料解释

经过上述的数据处理后得到的共偏移距反射时间剖面见图 6c 所示, 横坐标是每次激发时炮点到检波点的中点位置, 也就是每个等偏移距反射点的坐标, 相邻反射点的间距等于炮点间距, 即 0.6 m. 图 6b 是本探测区中间测段的场景照片, 为了尽量使照片变形较小, 以便在资料解释中与地质剖面对比, 拍摄地点选择在与地质剖面高度大致相当的位置, 并事先在地质剖面上标注了供标定长度用的控制点. 在图 6b 和图 6c 中, 横向比例尺是相同的. 图 6a 是图 6b 中蓝色方框内图像的局部放大.

该场区的地质调查结果表明东铺林场断裂的延伸约 2 km, 在地貌上没有新活动的迹象. 该断裂在晚侏罗世粗粒花岗岩中发育了一条宽约 2 m 的玢岩脉(见图 6 中的黄色曲线 A_1 与 A_4 之间的区域), 断裂(A_2 与 A_3 之间)伴随玢岩脉发育并切穿该玢岩脉. 破碎带上窄下宽, 上部宽约 40 cm, 底部可达 80 cm, 主要为花岗岩的碎裂, 只在局部面上可见有很薄的碎粉岩, 破碎带伴随有褐铁矿化. 在东铺林场断裂出露处的地质剖面(图 6a)中, 黄色曲线 A_1-A_4 之间是玢岩脉的范围, 红色直线 A_2-A_3 之间是碎裂花岗岩, A_1-A_4 东西两侧是晚侏罗世粗粒强风化花岗岩.

在图 6c 所示的共偏移距反射时间剖面中, 可以看到两个明显的反射波组(R_1 和 R_2), 二者在玢岩脉对应的位置都出现了同相轴错乱、中断、弱反射区等波组异常特征. 在时间剖面上, R_1 波组的异常区宽度为 3.6 m, 在时间 10—20 ms、水平距离 16.2—21 m 之间, R_1 波组的同相轴紊乱, 相邻道相位相反. 40 ms 附近的 R_2 波组在 R_1 波组异常段中部出现同相轴突然终断和反射的空白区. 这种上界面清晰、下部无界面的现象反映出老断层带胶结好, 具有均质性的特点, 说明断裂带与两侧围岩的物性明显不同.

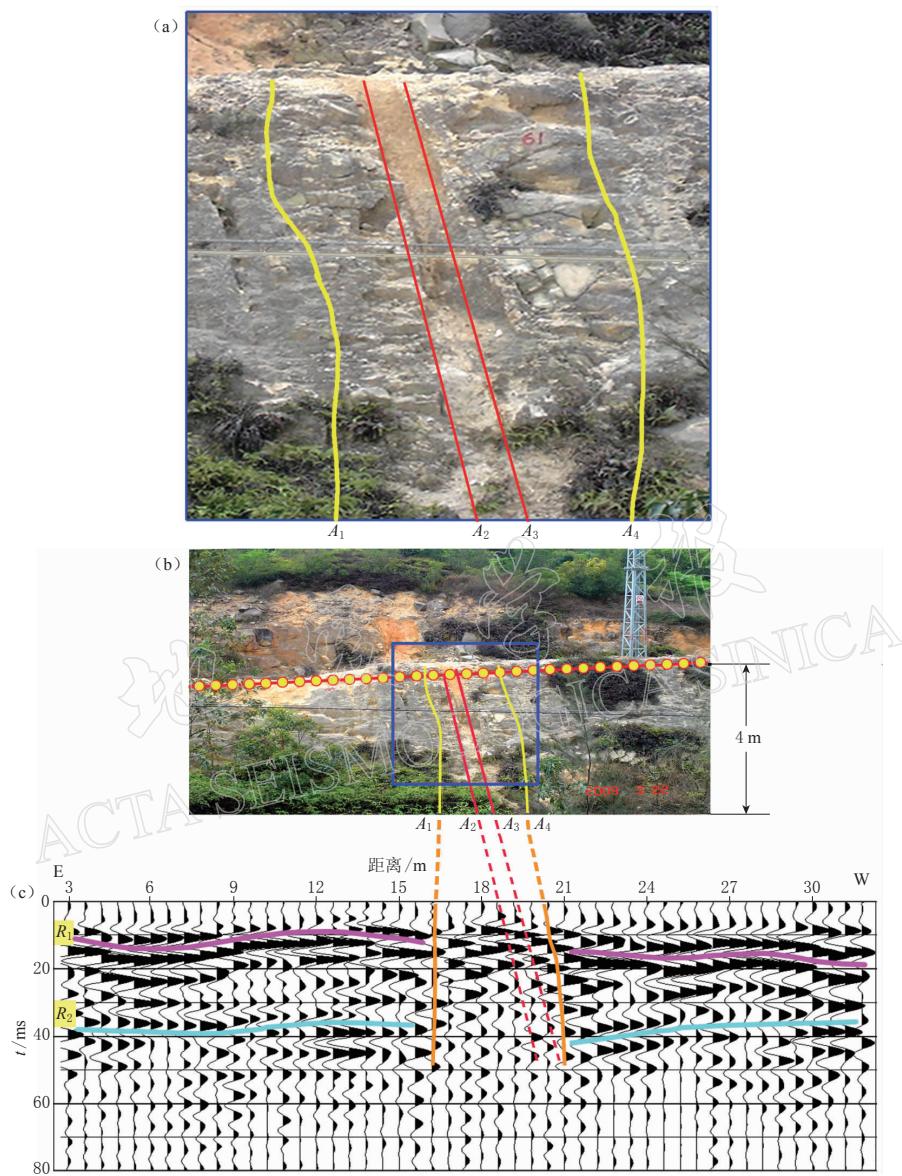


图 6 测线位置与共偏移距时间剖面图

(a) 破碎带; (b) 地质剖面; (c) 共偏移距剖面

Fig. 6 Position of the survey line and common-offset time section

(a) fracture zones; (b) geological cross-section; (c) common-offset section

值得注意的是,在时间剖面上 A_1 — A_4 之间的异常区内,尽管相邻道的反射波相位错乱,但其传播时间却比两侧较短,说明这个范围内介质的波速高于两侧。通过比对,该异常区与地面看到的地质剖面上的玢岩脉位置和尺度基本一致,这种高速特征与浅成岩中斑状结构的玢岩脉的物性是吻合的。时间剖面上异常区的形状和尺度都与开挖剖面所看到的情况很相似。说明用本文所述的方法探测地表近的小尺度地质异常体是有效和可行的。图 7 是根据开挖看到的岩性剖面(见图中上部蓝色线框所围成的区域)与共偏移距反射解释剖

面绘制出的综合解释剖面图。图中 R_1 和 R_2 是共偏移距反射面上的两个反射界面，推断是风化花岗岩中因风化程度不同而造成的物性差异界面。强风化花岗岩与中微风化花岗岩之间的物性差异较大，所以 R_1 反射波组比其下部的 R_2 波组的能量要强得多。 R_1 和 R_2 界面的埋深分别为 7 m 和 25 m 左右。在断裂破碎带东西两侧，均无明显错动，说明这些基岩内部的界面是在破裂发生后形成的，只与风化有关，而不是地层界面。由此可以判定该断层是不活动的老断层。

本次探测试验结果表明，浅部的地质剖面能够为较深的反射地震剖面的岩性解释提供标定性依据，而反映更大深度范围地层物性差异的时间剖面可大大拓展地质解释剖面的深度。从图 7 可以看到，通过共偏移距反射方法的实施，使地质剖面的分析解释深度从原来的 4 m 向下延伸到了 25 m。这种地质与地球物理手段的有机结合，不仅可以优势互补，拓展反映异常地质体特征的剖析空间，而且在岩性和物性的双重控制下，提高了对断裂鉴定的可靠性。本项工作丰富了解释信息，可以克服在露头附近没有新地层覆盖情况下对活动性解释带来的困难。

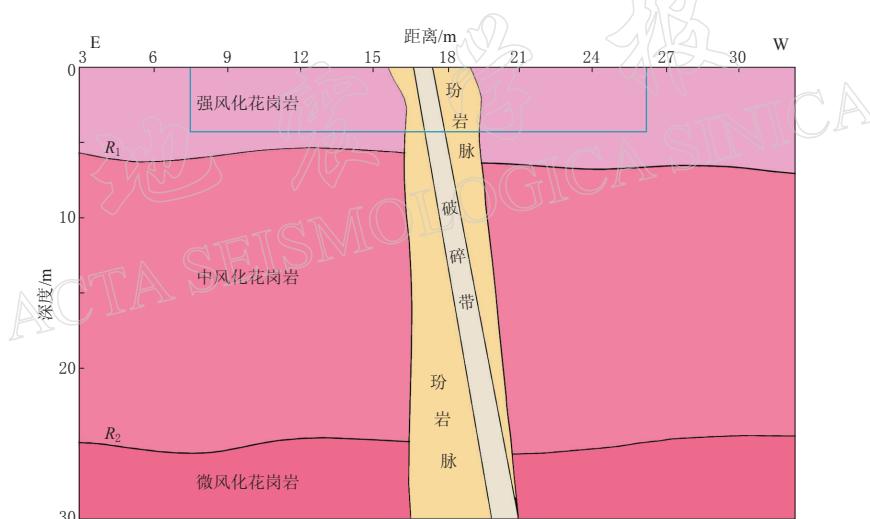


图 7 综合解释剖面图
Fig. 7 Integrated interpretation of profiles

5 讨论与结论

为了探测浅表部的地层细结构，本文在常规浅层反射地震勘探的盲区内，通过小能量激发，单只高频检波器和小偏移距接收的工作方法，获得了信噪比较高的共偏移距时间剖面。数据处理中先用 $f-k$ 方法分析占有优势能量的强干扰面波的频散特性，并用由此获得的基本参数采用 $f-k$ 滤波进行波场分离处理，取得了很好的波场分离效果。

通过对共偏移距地震反射波法基本原理的分析和与地质剖面的对比解释表明，该方法在场地狭窄、探测目标体埋深很浅、异常地质体尺度较小的条件下，可以获得常规多次覆盖地震反射波方法盲区内的高分辨率反射图像。由于该方法不需要进行动校正和水平叠加等处理就能得到共偏移距反射波时间剖面，从而避免了动校正处理对浅层反射波的拉伸和畸变影响，能够较好地保留有效反射信息的原有特征。小能量激发、高频检波器小偏移距

接收能够提取到主频更高、频带更宽的反射波信息,使分辨率进一步提高。此外,由于共偏移距地震反射法的每个记录道采用的偏移距相同,因此不存在不同偏移距记录上的反射波相位畸变问题。上述特点是该方法能够提高分辨率的重要原因。

虽然共偏移距反射方法在浅表分辨率和勘测的可靠性方面具有一定的优势,但对于反射界面较多的情况下,只能对其中部分反射界面的再现性好,而且对界面深度的确定还存在困难。此外,由于没有进行水平叠加,该方法的抗干扰能力较弱,所以只适用于人为干扰小的场地条件。

参 考 文 献

- 方盛明,张先康,刘保金,徐锡伟,白登海,姬继法. 2002. 探测大城市活断层的地球物理方法[J]. 地震地质, **24**(4): 607-613.
- 何正勤,陈宇坤,叶太兰,王向东,王辉,贾辉. 2007. 浅层地震勘探在沿海地区隐伏断层探测中的应用[J]. 地震地质, **29**(2): 363-372.
- 刘保金,张先康,方盛明,朱金芳,黄昭,黄宗林,赵成斌,段永红,王善雄,郑德刚. 2002. 城市活断层探测的高分辨率浅层地震数据采集技术[J]. 地震地质, **24**(4): 524-532.
- 刘保金,姬继法,徐朝繁,袁洪克,廖旭,白云,万波. 2006. 共偏移距地震反射波方法用于城市活断层探测[J]. 地震地质, **28**(3): 411-418.
- 王辉,丁志峰. 2006. 浅层地震勘探资料处理中的速度分析参数选取[J]. 地震地质, **28**(4): 597-603.
- 杨祥森,林昀,崔德海. 2007. 地震映像法在铁路隧道隐伏岩溶勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, **4**(5): 470-474.
- Haberland C, Maercklin N, Kesten D, Ryberg T, Janssen Ch, Agnon A, Weber M, Schulze A, Qabbani I, El-Kelani R. 2007. Shallow architecture of the Wadi Araba fault (Dead Sea Transform) from high-resolution seismic investigations [J]. *Tectonophysics*, **432**: 37-50.
- Ivanov J, Miller R D, Lacombe P, Johnson C D, Lane J W. 2006. Delineating a shallow fault zone and dipping bedrock strata using multichannel analysis of surface waves with a land streamer[J]. *Geophysics*, **71**(5): A39-A42.
- Jeng Y, Chen C S, Yu H M, Jeng A S, Tang C Y, Lin M J. 2007. Ultrashallow seismic experiment on a trenched section of the Chelunpu fault zone, Taiwan[J]. *Tectonophysics*, **443**: 255-270.
- Li Y G, Chester F M, Vidale J E. 2001. Shallow seismic profiling of the exhumed punchbowl fault zone, Southern California[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **91**(6): 1820-1830.
- Young R A, Hoyos J. 2001. Near-surface, SH-wave surveys in unconsolidated, alluvial sediments[J]. *The Leading Edge*, **20**(9): 936-948.