

浅层地震反射波法勘探设计

李可欣, 周婉彤, 梁 苾

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2023年6月29日; 录用日期: 2023年7月31日; 发布日期: 2023年8月9日

摘 要

随着电子及计算机技术的飞速发展, 浅层地震勘察方法已趋于成熟, 由于具有较强的解决工程地质问题的能力和较高的勘察精度, 其中浅层地震勘察已得到较广泛的应用和发展, 浅层地震探测方法是研究人工在地面激发的地震波, 在地壳表层数百米范围内的传播规律, 用以解决矿产地质、水文及工程地质问题的一种地球物理方法, 其主要方法是浅层折射波和反射波法。其中浅层地震反射波法是当前城市地质勘探的主要方法。本设计以净月区某场地东区地质勘探为例, 通过试验确定了合理的观测系统及仪器设置的一系列参数, 并且通过野外数据采集获得了原始的地震资料数据。通过Vista地震处理软件一步步的地震数据处理, 得到最终的反射波地震剖面, 并对其进行地质解释, 获得了测线范围内地层的空间分布、性质和活动性。

关键词

浅层地震反射波法, 野外数据采集, Vista软件地震数据处理, 地震资料解释

Exploration Design of Shallow Seismic Reflection Wave Method

Kexin Li, Wantong Zhou, Yi Liang

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Jun. 29th, 2023; accepted: Jul. 31st, 2023; published: Aug. 9th, 2023

Abstract

With the rapid development of electronic and computer technology, shallow seismic survey methods have become mature. Because of their strong ability to solve engineering geological problems and high survey accuracy, shallow seismic survey has been widely used and developed. Shal-

low seismic survey methods are geophysical methods to study the propagation law of artificial ground-induced seismic waves within hundreds of meters of the surface layer of the earth's crust and to solve mineral geology, hydrology and engineering geological problems. The main methods are shallow refraction and reflection. Among them, shallow seismic reflection method is currently the main method for urban geological exploration. This design takes the geological exploration in the eastern part of a site in jingyue district as an example, determines a series of parameters of reasonable observation system and instrument settings through experiments, and obtains the original seismic data through field data acquisition. Through step-by-step seismic data processing by Vista seismic processing software, the final reflected wave seismic profile is obtained, and the geological interpretation is carried out to obtain the spatial distribution, nature and activity of strata within the survey line.

Keywords

Shallow Seismic Reflection Wave Method, Field Data Collection, Vista Software Seismic Data Processing, Interpretation of Seismic Data

Copyright © 2023 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

在岩土工程勘察工作中，需要应用工程物探所解决的往往是常规工程地质勘察手段难以解决的较为复杂的工程地质问题，如不规则的灾害性地下目的物(如塌陷区、人工或天然洞穴等)以及复杂地质构造问题[1]。解决上述问题复杂的工程地质问题，一般宜采用综合性工程物探手段予以综合勘察、对比解释，如浅层地震勘察、电法和井中测试等等。随着电子及计算机技术的飞速发展，浅层地震勘察方法已趋于成熟，由于具有较强的解决工程地质问题的能力和较高的勘察精度，其中浅层地震勘察已得到较广泛的应用和发展，浅层地震探测方法是研究人工在地面激发的地震波，在地壳表层数百米范围内的传播规律，用以解决矿产地质、水文及工程地质问题的一种地球物理方法，其主要方法是浅层折射波和反射波法[2][3][4]。地震的基本原理，与普通地震勘探方法基本相同，即：人工在地面激发的地震波向地下深处传播，遇到不同的弹性介质界面，就会发生反射和折射现象，用仪器记录反射和折射的返回地面时间，根据上述时间和接收点与震源的距离关系(时距曲线)加以研究，就可以获得地下相关介质界面的空间分布的资料，即可确定地层的深度、分布、产状要素及构造形态。

地震勘探主要是研究人工激发的地震(弹性)波在浅层岩、土介质中的传播规律。其传播的动态特征集中反映在两个方面，一是波传播的时间与空间的关系，称为运动学特征；另一是波传播中它的振幅、频率、相位等的变化规律，称为动力学特征。前者是地震波对地下地质体的构造响应，后者则更多地表现出地下地质体的岩性特征，有时亦是地质体结构特征的响应。我们把上述两种特征统称为地震波的波场特征。浅层反射波法是近十多年来随着电子技术的发展及微机数字处理系统的开发和普及才得以迅速发展。浅层反射波法具有相对较高的分辨率，可以采用较小的炮检距进行观测，因而可以采用较短的勘探测线；对资料的数字处理技术要求较高。工程地震勘探的基本任务就是通过研究地震波的波场特征以解决浅部地层和构造的分布，确定岩、土力学参数等工程和水文勘探中所涉及到的地质问题。浅层反射波法是近十多年来随着电子技术的发展及微机数字处理系统的开发和普及才得以迅速发展[5][6]。

2. 浅层地震反射波法勘探原理

2.1. 反射波法基本理论

地震反射波法, 利用地震反射波进行人工地震勘探的方法。是大陆架油气勘探的首要手段。测量结果能较准确地确定界面的深度和形态, 圈定局部构造, 判断地层岩性。运用波的动力学特点进行地震地层学研究, 可从分析地震相入手, 推测沉积环境, 进而阐明油气藏的生储盖组合条件。利用地震反射波进行地质勘探的方法[7]。通常在激发点附近, 即深层折射波的盲区以内接收反射波。在巨厚沉积岩分布的地区, 一般在几公里的深度范围内能有几个到几十个反射界面, 故能详细研究浅、中、深层地质构造。根据反射波的资料, 可求地震波在覆盖层的传播速度和大段地层的层速度, 进而能准确地求得界面的埋藏深度并进行大段的地层对比。充分利用反射波的动力学特点, 可以确定岩性甚至直接找油[8] [9]。反射波法工作方法简单, 生产效率高、效果好。因此, 目前国内外油气田、煤田地震勘探中绝大多数都采用反射波法。由于反射波法一般在激发点附近观测, 受激发时产生的干扰及地表结构的影响较大, 故随时都必须注意消除干扰, 以获取质量良好的反射资料。浅层地震反射波法是地震勘探方法中的一种, 在地表向地下人工激发地震波。当地震波向下传播遇到不同的分界面时, 就会发生反射。反射波的传播路径、振幅和波形随传播介质的结构和弹性性质的不同而变化[10]。根据接收到的反射波旅行时间和速度资料, 可推断解释地层结构和地质构造的形态, 根据反射波的振幅、频率、速度等参数, 可以推断地层性质, 从而达到勘探目的。在浅层地震反射波法中, 来自同一反射面的反射波, 直接受该界面岩性、产状和延伸的稳定性等因素影响。如果这些因素在一定范围内变化不大, 则反射波的波形在地震剖面上表现稳定。该区大范围的塌陷和多条断层使得地下围岩相对正常地层出现明显的不连续和裂隙发育等异常结构。在地震剖面中, 异常结构导致波阻抗的差异, 使得同相轴出现错断和缺失。通过追踪同相轴的这些特征, 可推断出下伏岩层的分布情况[11]。地震波在向下传播时, 在波阻抗界面处发生反射现象, 反射波被检波器采集后, 经主机处理, 可得到反映地质信息的地震剖面。在地震剖面上, 反射波组同相轴在塌陷区和断层破碎带位置表现异常, 比如错断或缺失等特征。通过研究和分析同相轴的时间与空间特征, 从而计算出被探测界面的空间位置等参数, 实现勘察的目的。反射波法在桩基检测上也有涉及, 主要是为了检测混凝土完整性; 推定缺陷类型及位置; 校核桩长; 估计混凝土强度等级。其基本原理是在桩顶进行竖向激振, 弹性波沿着桩身向下传播, 在波阻抗界面或桩身截面积变化部位, 将产生反射波。根据反射信息, 可计算桩身波速, 判断桩身完整性和混凝土强度等级[12]。

2.2. 地震测线布置要求

地震测线的布设必须考虑地质任务、干扰波与有效波特点、地表施工条件等诸多因素。具体来讲, 有两个基本要求: 一是测线应为直线, 保证所反映的构造形态比较真实; 二是测线应该垂直构造走向, 其目的是更加真实地反映构造形态, 为绘制构造图提供方便。

2.3. 观测系统的图示方法

按照激发点和接收点相对位置的关系, 可把测线分为纵测线和非纵测线两种。这里主要介绍纵测线观测系统[13]。观测系统一般用图示法表示, 下面以反射波法观测系统为例加以说明。

地下界面除存在断层等情况外通常是连续的, 因此要了解连续的界面形态就要在有一定长度的测线上使用连续观测系统, 进行连续的观测。最简单的一次覆盖连续观测系统如图 1 所示。

O1 激发, O1O2 接收, 追踪 A1R1 间的反射界面; O2 激发, 仍在 O1O2 接收, 追踪 A2R1 间的反射界面; O2 激发, O2O3 接收, 追踪 A2R2 间的反射界面。然后 O2O3 排列不动, 激发点移至 O3, 则接收到

的是 R2A3 间的反射界面。这样不断地移动接收点和激发点位置,就可以连续追踪界面 R。这种简单连续观测系统的优点是激发点与接收点靠近,野外施工方便,不受折射波的干扰,还可减少有效波之间的干涉;缺点是近激发点的几道常受爆炸后的声波和面波的干扰。地震勘探中的观测系统可用综合平面法来表示。综合平面法可以在平面图上表示激发点和接收点的相对位置关系,以及观测到的地下界面段。这种图示法的优点是:在复杂情况下,要表示的观测内容也是明确的。它是观测系统图法中最简单的一种,在二维地震勘探生产中大多采用它。

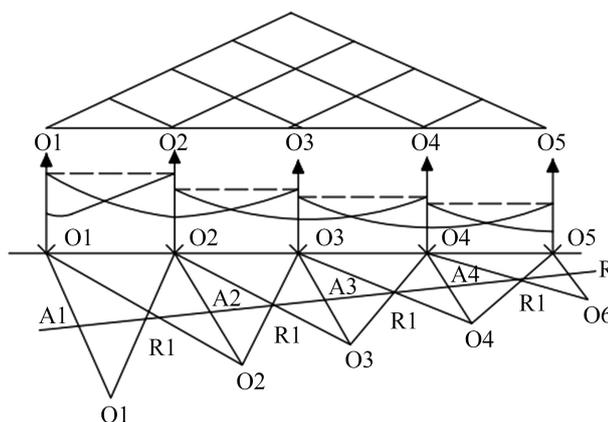


Figure 1. One-time coverage of the observing system
图 1. 一次覆盖观测系统

观测系统的表示方法如图 2 所示,把分布在测线上的激发点 O1, O2, O3, ……按一定比例尺标在水平直线上,然后从激发点向两侧作与测线成 45°的斜线,组成坐标网。当在测线上某点激发而在某一地段接收时,可将测线上的接收地段投影到通过激发点的 45°线上,用这段投影来表示观测排列。即当在 O1 激发、O1O2 之间接收,可用线段 O1A 表示;若在 O1 激发、O2O3 之间接收,可用线段 AB 表示。同理, O2 激发、O1O2 之间接收,可用 O2A 表示。至于观测段反映的界面(只要界面是水平的),把观测段向水平线段作投影便得到所反映的界面, O1O, 便是观测段 O1A 所对应的地下界面位置。

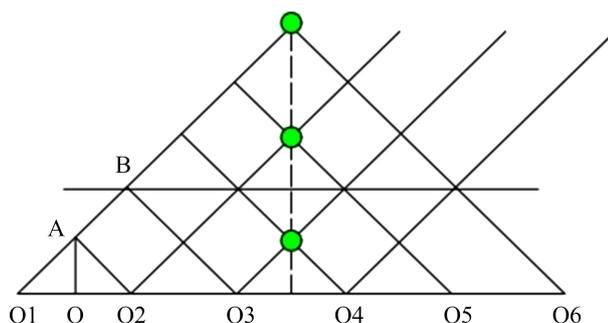


Figure 2. Comprehensive planar method
图 2. 综合平面法

3. 反射波法野外数据采集

设备为 Geopen-miniseis24 工程地震仪, Geopen-miniseis24 综合工程探测仪是一款内置锂离子电池,具有 24 个高精度记录道的综合地震探测系统。该系统内置高性能计算机用于进行数据采集系统的管理以及

数据理,同时保留了计算机所有功能。Miniseis24 综合工程探测系统采用 $\Delta\Sigma 24$ 位高精度、高速模数转换器,仪器具有最小 25 微秒的采样间隔和 131 dB 的动态范围。Miniseis24 设备轻便(主机整体仅重 4.5 kg)、全中文界面操作简单,可广泛地应用工程地质勘察、堤防隐患探测以及地质调查等领域。Geopen-miniseis24 工程地震仪由 Geopen 公司生产,采取 Windows 系统,界面友好操作简单。

本文所采用的锤击震源,由激震锤和震板组成。激震锤锤击地面上的震板产生弹性波振动,通过不同的锤击方式可以产生不同的地震波。优点是方便、经济、安全、高频性能较好并且频带较宽。缺点是虽然单次激发能量较小,受到扰波的影响。但是多次激发可使有效信号增强,有利于多次垂直叠加,提高信噪比。



Figure 3. Tapping the source
图 3. 敲击震源

此次试验我们采用的是多次覆盖观测系统,单边激发,每炮 120 道接收,共 20 炮,道间距为 25 m,炮检距为 25 m,偏移距为 25 m,叠加次数 10 次,如图 3,我们所采用的震源为锤击震源,为了减少锤击时地表形变引起的能量损耗,在锤击点上铺一块与铁锤重量相当的铁片。铺设大线按要求布置检波器,连接好设备、进行野外数据采集。

4. 应用成果

在图 4、图 5 中可以看出初至波之前存在较多的干扰源信号,因此我们要做一个初至切除。初至切除的目的是避免把非折射波的能量(如直达波、浅层初至折射波以及反射波到达前的各种干扰波)与浅层反射波叠加在一起,避免在后续处理中这些干扰波被增强,因此必须要进行初至拾取,并且将初至之前的部分予以切除,如图 6 所示。

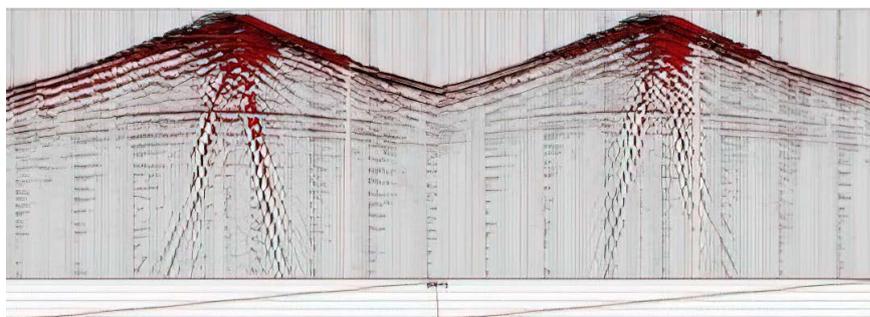


Figure 4. Effect after preliminary removal of bad sectors
图 4. 初步剔除坏道后的效果图

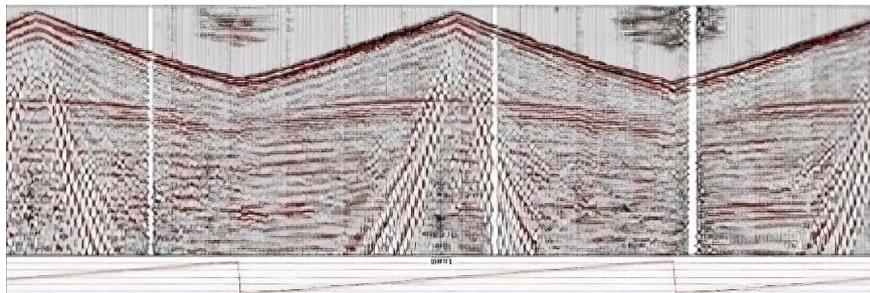


Figure 5. Equalization effect diagram

图 5. 道均衡效果图

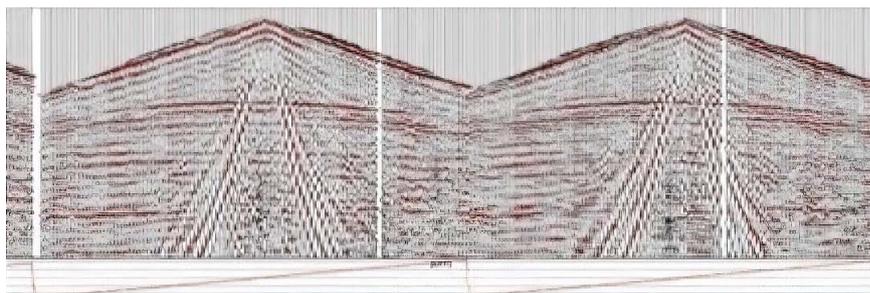


Figure 6. Renderings from the beginning to after resection

图 6. 初至切除后的效果图

滤波是将信号中特定波段频率滤除的操作，是抑制和防止干扰的一项重要措施。是根据观察某一随机过程的结果，对另一与之有关的随机过程进行估计的概率理论与方法。所以对数据进行一维滤波处理。处理结果如图 7 所示。

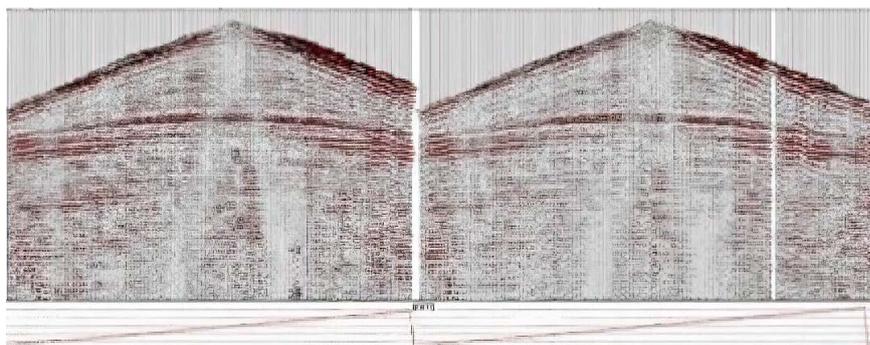


Figure 7. One-dimensional filtered spectrum information

图 7. 一维滤波后的频谱信息

在地震勘探中，有时有效波和干扰波的频谱成分十分接近甚至重合，这时无法利用频率滤波压制干扰，需要利用有效波和干扰波在其他方面的差异来进行滤波。如果有效波和干扰波在视速度分布方面有差异，则可进行视速度滤波。这种滤波要同时对若干道进行计算才能得到输出，因此是一种二维滤波。如图 8 所示。

为了便于叠加和计算速度谱，应按观测系统抽取各个共中心点道集放在一起。这个过程实际上也是一种资料的重排，不过不是针对单个采样点，而是以一道为一个单位进行重排，称为抽道集或共中心选择。如图 9 就是抽道集后的效果图。

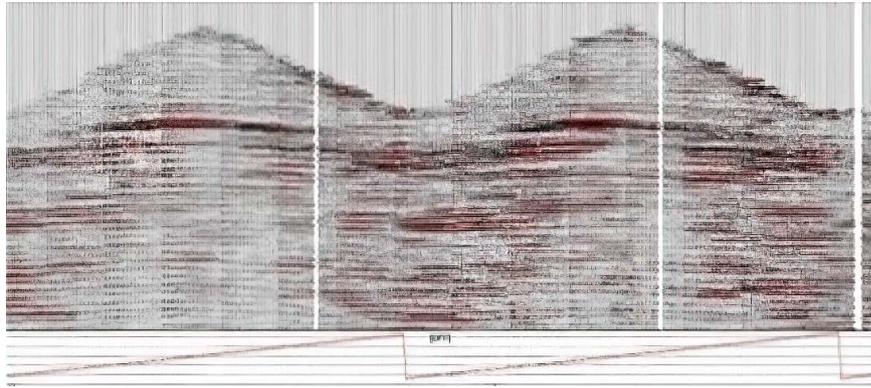


Figure 8. Effect after two-dimensional filtering
图 8. 二维滤波后的频谱信息

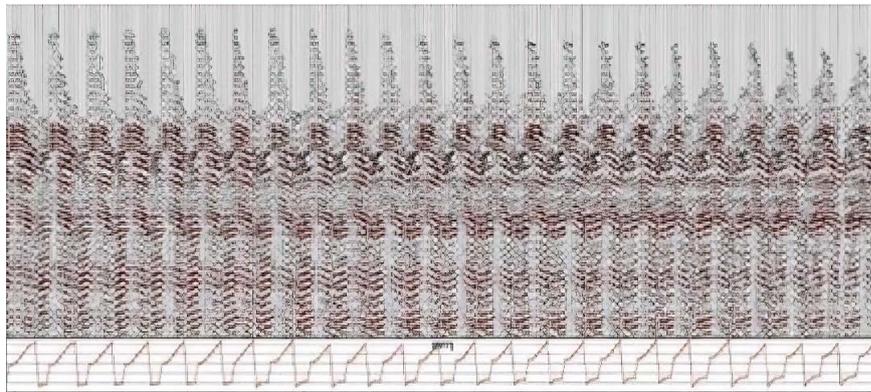


Figure 9. Effect after extraction set
图 9. 抽道集后的效果图

CMP 道集又称共中心点道集，当地震数据置完道头以后，每个地震道的 CMP 号、线号、炮间距等各种信息就已经存在了，因此，分选就是利用道头信息，按照要求将地震道排列到一起。即将共炮点道集 CSP 转换为共中心点道集 CMP。CMP 道集经过动校正后，就可以将道集内各道求和，形成叠加道。如图 10 所示。

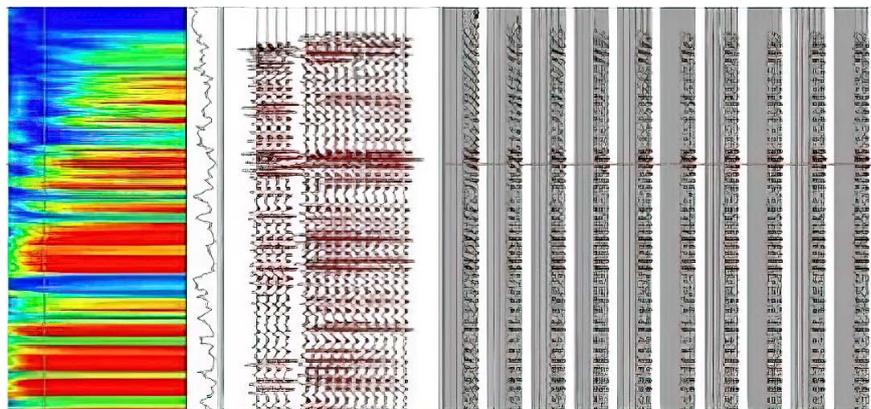


Figure 10. Speed pick-up map
图 10. 速度拾取图谱

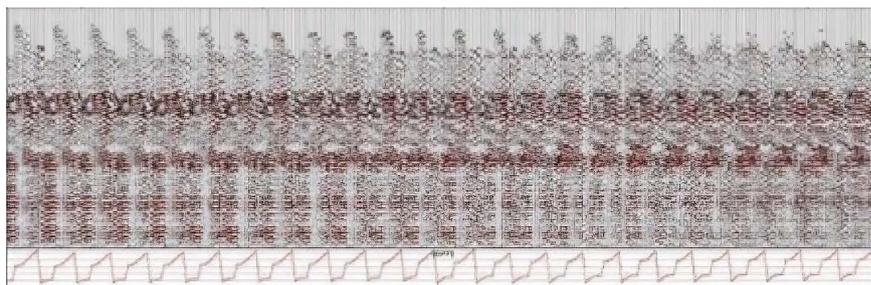


Figure 11. Effect after dynamic correction
图 11. 动校正后的效果图

地震波速度是地震资料处理和解释中非常重要的参数，例如动校正需要均方根速度、偏移处理需要偏移速度、静校正需要表层模型速度。如图 11 就是进行动校正后的效果图。此外，速度是代表岩性特征的重要标志，在岩性解释、油气预测中以及时深转换方面，速度也起着非常重要的作用。从地震记录中求取速度统称为速度分析，针对不同速度求取又不同的速度分析，即是相同类型的速度求取也有多种不同的分析方法，本实验中主要使用叠加速度分析。

5. 地震反射层位的地层学解释

野外地震资料经过数字处理后，可以得到多种地震信息，这些地震信息主要以时间剖面的形式显示出来。目前使用最广泛的时间剖面有两种，一是水平叠加时间剖面，简称水平剖面；二是叠加偏移时间剖面，简称偏移剖面。这两种剖面野外地震资料经过数字处理后，可以得到多种地震信息，这些地震信息主要以时间剖面的形式显示出来。目前使用最广泛的时间剖面有两种，一是水平叠加时间剖面，简称水平剖面；二是叠加偏移时间剖面，简称偏移剖面。这两种剖面是地震地质解释的基础。一般情况下，在进行构造解释时，偏移剖面识别地下构造形态比较直观清晰，但在速度资料较差的地区，水平剖面可能比偏移剖面质量更好一些。在复杂构造地区整个解释工作期间要有效地利用这两种剖面。层序地层和岩性解释中使用较多的是偏移剖面。其中反射代表岩性分界面是不确切的。岩性纵、横向是渐变化的。岩性界面与地质时代界面不是等同概念，岩性分界面不是引起地震反射主要因素。不整合面往往是一个明显的波阻抗界面。沉积岩相的变化会引起反射波形和连续性的变化。

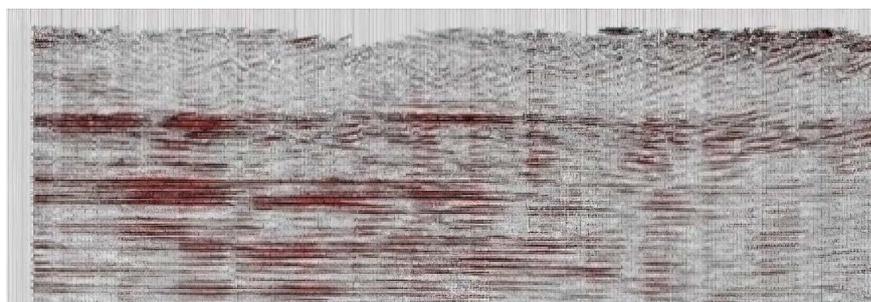


Figure 12. Geological interpretation of seismic profile
图 12. 地震剖面地质解释

基于上述的一系列理论知识对实验所得地震剖面进行简单的地质解释，从图 12 中可以看出在七百米的位置处存在反射层，在右侧部分出现了同相轴不连续的情况。对其进行分析可能是地层本身存在着一些破碎构造，断层等情况。也有可能是数据采集和数据处理过程中的一些干扰和操作不当所产生的。但

由于本次设计没有相应的地质资料和钻井资料作为参考和标定, 故还需要后续结合其他资料或者结合其他地球物理勘探方法进行联合反演才能进行更为精确的解释和岩性解释。

6. 结论

本文运用浅层地震反射波法勘探技术对场地的工程地质状况信息进行数据处理, 其主要内容包括对浅层地震勘探反射波法研究现状的了解, 对地震反射波法的勘探原理进行了进一步的了解, 将地震勘探数据所用的数据处理方法进行了深层次的学习, 熟练操作数据处理软件 Vista, 对其各种功能和参数的调整做到熟稔于心。对实际的数据进行了一次完整的数据处理流程。包括从最开始的导入数据、道均衡处理、初至切除、到后来的频谱分析、一维滤波、二维滤波、观测系统的设置、抽道集、速度分析、速度拾取、动校正对得到的地震剖面进行进一步的地质解释。包括此次实验过程中采用的观测系统为多次覆盖观测系统、野外采集所用的仪器为 Geopen-miniseis24 工程地震仪、以及激发方式运用的是人工震源中锤击震源的, 采集到的数据格式导入 Vista 软件的格式为 SEG-Y 格式等。

结合实验中采集的实际数据及相应的处理和解释结果, 通过针对野外积极调研, 在撰写文章的过程中和其他学者进行理论研究和探讨; 更深层次熟悉了地震勘探中的浅层地震反射波法, 对其前期的踏勘、数据采集、数据处理等流程也有了新的认识和理解, 并为今后进一步的学术学习及创新能力的培养提供有利条件。从学科背景知识角度, 通过此次文章的撰写中对大量相关文献的阅读, 我对地学中地球物理的学科思维、主要研究目标以及研究思路有了初步认识, 为后续的地球科学学习也奠定了基础。

参考文献

- [1] 侯卫生, 刘江平. 工程地震勘探新进展[J]. 勘探地球物理进展, 2002, 25(6): 59-64.
- [2] 李万伦, 田黔宁, 刘素芳, 等. 城市浅层地震勘探技术进展[J]. 物探与化探, 2018, 42(4): 653-661.
- [3] 袁明德. 工程地震勘探技术的进展[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(4): 847-852.
- [4] 彭超. 浅层地震反射波法和高密度电法在石膏矿采空区勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(4): 481-485.
- [5] 刘桂梅, 夏训银, 王身龙, 等. 浅层地震勘探在保定市隐伏活断层探测中的应用[J]. 勘察科学技术, 2014(3): 58-61.
- [6] 聂碧波. 浅层地震勘探在城市活断层探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(1): 15-21.
- [7] 孙洪星, 康永华, 耿德庸, 等. 煤层采空区浅层地震法探测效果[J]. 工程勘察, 1998(4): 68-70.
- [8] Khan, M.A. (1999) Geophysical Exploration. *Mining Magazine*, **181**, 16-22.
- [9] 林宁. 浅层地震勘探在城市活断层探测中的应用[J]. 石化技术, 2019, 26(6): 208, 211.
- [10] 孙海霄. 反射波地震勘探[J]. 少年科学, 2014(13): 38-39.
- [11] 山东电力工程咨询院有限公司. 浅层地震多波联合勘探方法[P]. 中国专利, 2019110632566. 2020-01-14.
- [12] Li, G.H., Feng, J.G., Zhao, S.H., et al. (2012) Application of Crosswell Seismic Technology in the Fine Reservoir Description. *Advanced Materials Research*, **2074**, 1955-1959.
- [13] Li, S.Q., Zhang, H., Tao, Z.F. (2014) Design about Automatic Vehicles Following System for Field Vibrator Motorcade. *Advanced Materials Research*, **2912**, 2654-2659.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.860-863.2654>