

# 地面地震和 VSP 联合勘探 在市区活动断裂调查中的应用研究

徐明才<sup>1</sup>, 姜成<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000 ;  
2. 冶金部山东地质勘查局一队, 山东 淄博 255200 )

**摘要** : 在使用地面地震方法查明市区基岩断裂后, 在验证断裂的孔中开展 VSP 测量, 进而评价断层的活动性是一种经济有效的配套方法技术。本文结合在上海市区的工作实例, 表明了地面地震和 VSP 联合勘探在查明市区隐伏活动断裂中的有效性。

**关键词** : 抗干扰地震方法 ; VSP 测量 ; 活动断裂 ; 联合勘探

**中图分类号** : P631.4      **文献标识码** : A      **文章编号** : 1000-8918(2000)03-0184-06

上海市是经济高度发达和人口高度集中的大城市。由于人口与建筑物密集, 有效活动面积狭小, 而且地基为松软土层, 因此如果发生较强地震, 势必造成重大经济损失与人员伤亡。近年来, 环太平洋地区的地震活动有加强的趋势, 1996 年 11 月 9 日, 在上海附近发生了 6.1 级强感地震, 上海市的抗震防灾工作面临新的挑战。近几年, 为在人口与建筑物密集, 干扰背景严重的上海市区查明基岩断裂的分布, 并评价断裂的活动性, 我们对经济有效的弹性波场方法技术进行了试验研究。

通常, 活动断裂是以基岩断裂现代复活运动为基础的地壳现代活动带, 它的最主要特征是自第四纪以来反复活动, 尤其是晚更新世( $Q_3$ )以来活动过<sup>[1]</sup>。伴随该断裂活动常发生地震活动(即通常所说的构造地震)。地质上常根据地质构造形变和地震地质分析鉴定活动断裂; 在地球物理方面, 国内外常采用地震反射技术调查基岩断裂向第四系地层的延伸范围, 从而评价断层的活动性<sup>[2]</sup>。Robbert A. W. 等使用可控震源地震资料, 探测 0.5~5 km 深度范围内的基岩断裂。对由可控震源地震资料解释的基岩断裂, 依次使用小爆炸、地夯、12 口径的震源枪和 22 口径的来复枪、重锤和锤击等震源, 研究断层的近地表特征, 从而达到评价断层活动性的目的<sup>[3]</sup>。

由于上海市区干扰十分严重, 且地表经过多次改造, 常规鉴定或评价上海市区的基岩断裂活动性的方法技术受到了限制。为此, 我们采用了抗干扰地面地震和 VSP(垂直地震剖面)联合勘探的方法技术, 取得了较好的地质效果。

## 1 方法的特点

抗干扰地面地震技术和 VSP 技术在查明基岩断裂分布和评价断裂活动性方面有其各自的长处和不足, 其优缺点相互补充, 为这些方法的联合应用奠定了基础。概括起来抗干扰地面地震技术有以下特点。

1. 该方法使用对地表无破坏作用、对环境无污染的非爆炸震源,且具有较高的探测精度,适合在市区开展工作。

2. 该方法沿测线对地下地质构造连续探测,无需使用钻孔,因此,能够以较低的成本确定基岩断裂的位置,细致划分地层等。

3. 该方法利用了一点多次激发、相位相关叠加技术,通过相位相关叠加处理,能够增强有规律的地下反射波,压制外界无规律的干扰。

该方法的不足之处在于:由于在市区强干扰条件下开展工作,尽管使用了抗干扰地震方法技术,但在最终获得的记录上,干扰噪声依然存在,在有限的频带内进行带通滤波处理虽压制了频带外的噪音,提高了地震记录的信噪比,但却不利于提高地震记录的分辨率,妨碍了对基岩断裂向第四系地层的追踪,从而影响了基岩断裂活动的评价。

与地面地震相比,VSP 具有以下特点。

1. VSP 是通过观测波场在垂直方向的分布来研究地质剖面垂向变化的,因此,波的运动学和动力学特征更明显、更直接、更灵敏。

2. 由于 VSP 是在井孔中紧靠地质界面附近观测,因而记录到的与界面有关的地震子波更单纯,并能把获得的地震波场与地下地质界面密切地联系起来。

3. 在 VSP 调查中,观测到的地震记录受外界和地表干扰较小,且不受低速带的影响,因此,地震记录的分辨率显著提高,可对基岩断裂向第四系地层内的延伸进行可靠追踪。

然而,该方法是以钻孔为工作媒体的,通常情况下,钻孔费用较高。此外,VSP 也仅能对钻孔周围的地层及构造进行探测,探测范围较小。在地面地震工作后,为验证地震工作的可靠性和精度,通常要打一些验证孔。以该验证孔为媒体,开展 VSP 调查,进而评价基岩断裂的活动性,开辟地面地震和 VSP 联合勘探的新途经。

## 2 方法技术

在地面地震和 VSP 联合调查中,首先需使用地面地震技术确定地下断裂构造的位置,然后对其探测结果进行钻探验证,在验证孔内开展 VSP 调查。根据地面地震和 VSP 调查结果进行综合解释,能够达到联合勘探、并对断层的活动性进行评价的目的。

### 2.1 抗干扰地面地震技术

在闹市区开展反射地震调查需采用抗干扰地震勘探系统。该地震勘探系统的工作基于这样一个基本前提:在一定的时间内(如 3 min)依次激发地震波,检波器接收到的地下界面反射波是有规律的,而外界干扰背景是随机的。通过相位相关叠加,增强有规律的反射波,压制无规律的外界干扰。理论上,无论外界干扰多么严重,只要这种干扰是杂乱无章的,通过多次相位相关叠加,都能达到压制干扰、增强有效波的目的,只不过随着外界干扰程度的加重,相关叠加的次数也应随之增加而已。

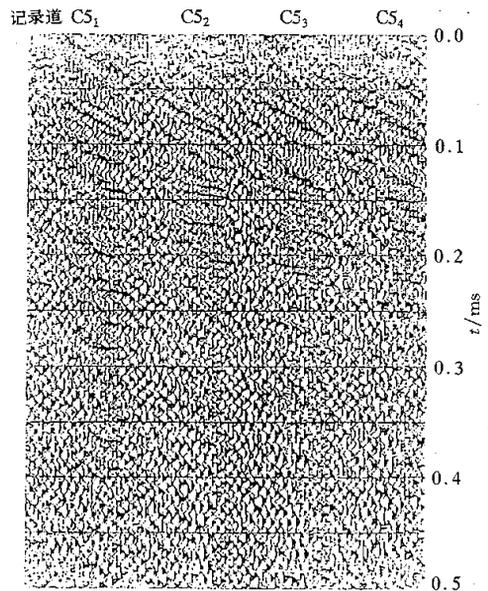


图 1 共炮集记录

对于较强幅度的外界干扰,该系统采用设置噪声门限的方法去除强振幅干扰。图 1 表示了**在强干扰条件下获得的共炮集记录,显然,尽管干扰背景很强,但有效波在该记录上反映较清楚。**

对于有规律的规则交流电干扰,使用多次相位相关叠加技术不能有效抑制,需在数据采集中,采用加 50 Hz 陷波器的方法进行抑制。实际上,在强干扰条件下,即使在数据采集中加 50 Hz 陷波器,有时在地震记录上还会出现高频正弦干扰波。有资料表明,该高频规则干扰为输电网中的电源变压器在饱和磁化过程中的 3 次谐波。理论上为衰减这种规则干扰,可采取远离输电线或使地震测线垂直于输电线布设。然而,市区的各种电缆电线纵横交错,为在不影响解决地质问题的前提下,使选取的地震测线避开高压输电线的干扰是很困难的。对这类干扰,应在资料处理过程中,采用自适应滤波处理进行压制。图 2 表示了自适应滤波处理对合成理论记录的处理效果。显然,该处理结果很好地压制了地震记录上的规则干扰。

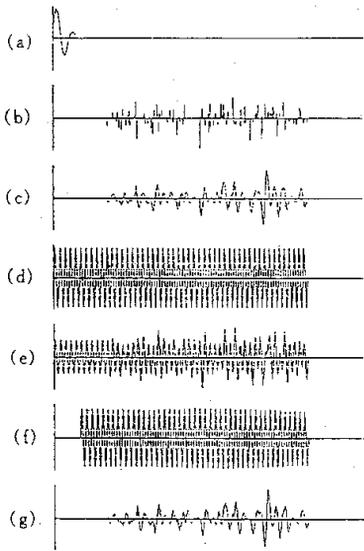


图 2 合成记录的自适应滤波处理

- a—地震子波; b—反射系数; c—合成地震记录;
- d—周期性干扰; e—含周期性干扰的地震记录; f—据 e 估计出的干扰波; g—自适应滤波后的结果

### 2.2 VSP 技术

在市区 VSP 测量中,相对于地面地震而言,外界干扰问题相对较小。在野外数据采集**中,当孔中仪器距地表较近时,外界干扰问题较为严重,在这种情况下,使用大功率能量震源,可有效地增强有效信号,压制干扰噪声,提高地震记录的信噪比。另一方面,在 VSP 测量中,VSP 震源激发的频谱宽,激发的震源子波重复性好,且能量可调、安全、高效。大功率电火花震源是较为理想的 VSP 震源。**

在 VSP 测量中,若测量目的仅仅是为了研究井旁地质构造和评价基岩断裂的活动性,可使用单分量纵波井中仪器接收。为提高工作效率,最好使用多道井中仪器接收,这样可大大减少震源的激发次数。

当然,单道井中仪器也能完成 VSP 测井工作,只不过激发的物理点数是使用多道井中仪器接收时激发物理点数的  $n$  倍(其中  $n$  为多道井中仪器的道数)。实际上,当使用大功率电火花震源在浅孔中激发时,随着激发次数的增加,激发孔周围介质将受到不同程度的破坏,使激发出的地震子波一致性受到影响。一种解决办法是把电火花震源放在一充满盐水的橡胶皮带内(如废弃的汽车内胎)进行激发,这样做可较好地保持每次激发地震子波的一致性。

## 3 实例分析

### 3.1 工作条件

在上海市区开展浅层地震调查中曾发现多处断裂,遗憾的是由于上海市区建筑物十分密集,寸土寸金,要找出一块能打钻验证这些断裂并对其活动性进行评价的地方很困难。地面地震测线全部是沿道路边施工的,但验证钻孔则不能布置在道路边。经过踏勘和协商,只能在距

地震测线约 100 m 的旧房改造区找到了一处可供打钻的地方(图 3)。

由于各种条件限制,布置的测线较稀,且地面地震方法揭示的大部分基岩断裂落差小。因此,对于地震剖面上发现的断层,难以据仅有的一两条地震剖面确定其确切走向。当验证孔距地震测线较远时,也很难恰好使验证孔揭示断层的存在。在此情况下,在验证孔中开展非零偏移距 VSP 测量对查明孔周围的地质构造,特别是第四系地层内基岩断裂的延伸是十分必要的。由地震探测结果可知,测区基岩埋深约 260 m,基岩以上为第四系地层,沉积岩性为一套海陆交互相沉积。各地层界面之间波阻抗差异较小。

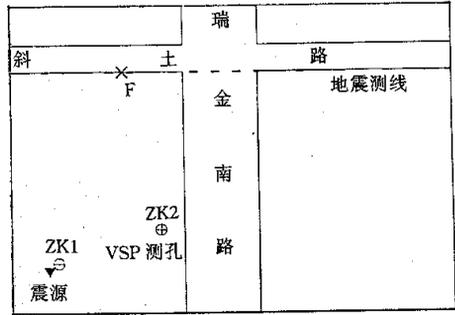


图 3 钻孔位置示意

### 3.2 工作方法

在地面地震数据采集中,使用的震源为夯击震源 WACKER,数据采集系统为抗干扰高分辨率地震数据采集系统 DFSV—Minisocie。在数据采集中,使用的参数为:最小炮检距 30 m,最大炮检距 260 m,道间距 10 m,24 道接收,12 次覆盖。使用的记录参数为:仪器通频带 90~512 Hz,采样率 0.5 ms,记录长度 512 ms,仪器加 50 Hz 陷波器。在市区地震调查中,外界振动干扰的主频为 20~30 Hz,因此,采用自然频率为 40 Hz 的检波器接收。

数据处理的关键是从强干扰背景中提取弱反射信号,采用的主要手段是提高地震记录的信噪比,同时也兼顾地震记录的分辨率。经处理和简单解释后的验证孔附近的一段地震时间剖面如图 4 所示。

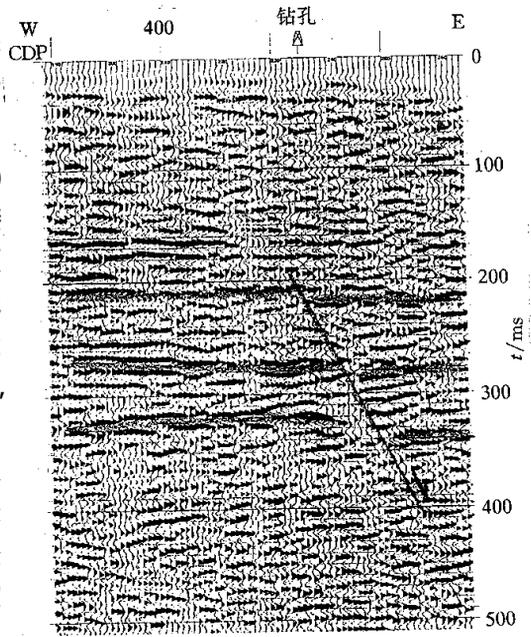


图 4 钻孔附近的反射地震时间剖面

VSP 测量孔与激发孔和地震测线之间的平面关系如图 3 所示。测区各种干扰噪声十分严重,为在如此强背景的干扰下,获取高质量的 VSP 测井结果,采用了能量可以调节的电火花震源,该震源最大释放能量 4 万 J。井中仪器为 12 道单分量井下仪器,仪器自然频率 30 Hz,记录仪器为轻便信号增强型数字地震仪 ES-2401。

在数据采集中,采用非零偏 VSP 技术。受施工场地限制,井源距 80 m。在井中使用 2 m 道间距,测井范围从井底到近地表,每次激发,采用 12 道接收器接收,有效地提高了工作效率。在每个物理点完成后,井中仪器提升 20 m,与上次深度重叠 4 m(即重复 2 道观测),以监测同一接收深度处的接收器在相邻两次激发(井中仪器不同深度)后接收地震信号的一致性。在数据处理中,对于相邻两次激发,不同深度的井中仪器在同一接收深度处接收到的一致性较好的

信号,进行垂直叠加处理,进而增强有效信号。为与地面地震相对比,采用了与地震时间剖面相同的记录长度 512 ms。

工程 VSP 资料处理的关键是分离上、下行波场。由于在 VSP 勘查中,采用的道间距较小,因而,相邻两道地震波的时差较小,对较小时差的 VSP 记录进行上、下行波分离难度较大,文献 [4] 对该问题进行了讨论。图 5 为经过上、下行波分离后的上行波记录。

### 3.3 效果分析

从图 5 可以看出,消去下行波后的记录信噪比较高,上行反射波非常明显。图中的纵坐标为检波器深度。根据上、下行波的交点可确定该反射层在钻孔处的深度,如图中 A、B、C、D、E 点所示,正是利用这种关系把 VSP 地震记录与地面地震剖面图有机地结合起来。从图 6 中可看出这些反射层对应钻孔柱状图的位置。图 6a 是对应的 VSP-CDP 转换剖面,为更精确解释井旁的地质构造,在  $x$  方向选用的叠加面  $\Delta x$  为 1 m。为使 VSP 叠加结果与地面

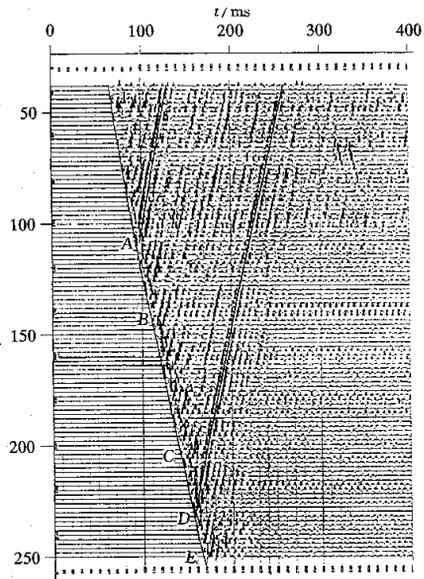


图 5 消去下行波的上行波记录

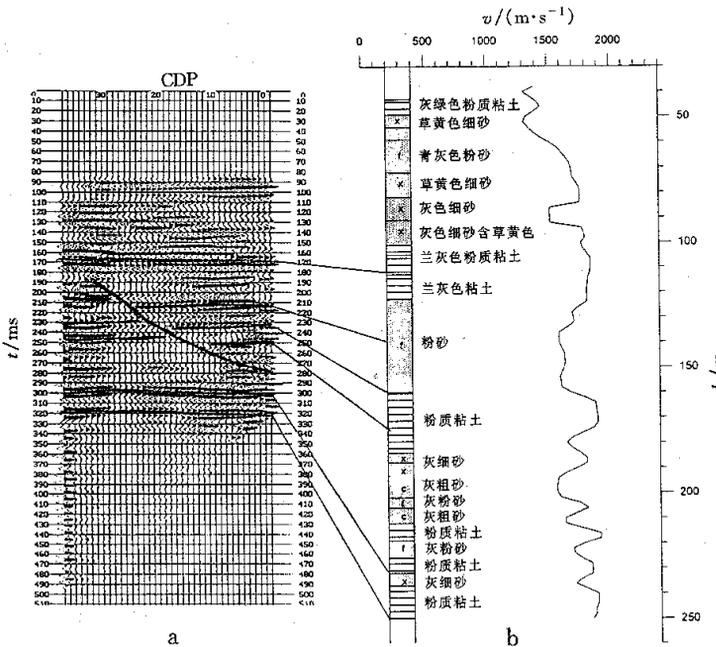


图 6 VSP-CDP 转换剖面、钻孔柱状图及层速度对比

a—VSP-CDP 转换剖面; b—钻孔柱状图和层速度对比图; c—粗砂; f—粉砂; x—细砂

地震叠加剖面更好地对比,应把 VSP-CDP 变换结果嵌入地面地震叠加剖面中,但因钻孔距地

震测线有一定距离,且断层走向并非垂直于地震测线,所以只能相对进行比较,把图 6a 与图 4 所示的地面地震时间剖面对比后可看出几个反射层的时间是一致的。在 VSP-CDP 转换剖面上约 210 ms 处的反射波对应在图 6b 所示钻孔柱状图上粉砂地层内部。在相邻孔中的相应深度处有厚约 2 m 的灰中砂地层,该反射波应是该地层的反映。在 VSP 测孔中,该灰中砂地层的岩芯没有取出来。由此表明,钻探过程中岩芯打丢问题在 VSP 测量剖面上得到了补偿。仔细分析 VSP 结果,在覆盖范围内基岩反射同相轴连续性较好,但其上 2 个反射同相轴有错断,可认为断层通过了第四系地层,而基岩未发生错断,或者,基岩断裂在 VSP 覆盖范围以外。在 140 ms 以上第四系地层内反射波连续性较好,可认为该断层未错断该反射层。据地质资料可知,该断层中断于第四系地层  $Q_2$  上,其活动性偏弱。从图 6b 中的钻孔柱状图与层速度曲线看出,层速度曲线很好地反映了各地层岩性的速度差异,粘土层的速度明显高于砂层的速度。

#### 4 结论

通过抗干扰地面地震和 VSP 方法技术在上海市区的联合勘查工作,可得出以下结论。

1. 抗干扰地面地震技术可查明强干扰条件下市区隐伏断裂的分布。
2. 在验证断裂的孔中,开展 VSP 测量,可研究验证孔周围断裂构造及地层的分布。VSP 测量结果还可对地震反射时间剖面进行标定,以提高地面地震时间剖面的解释精度。
3. 在地面地震方法查明隐伏断裂的条件下,利用验证孔开展 VSP 测量是一种有效研究市区复杂条件下基岩断裂活动性的配套方法技术。

在地震危险性分析与基本裂度研究中,常使用 P、S 波速度计算地面地震运动反应谱。若在 VSP 测量中,使用多道(或单道)三分量井中仪器进行观测,不仅能研究井旁地质构造,标定地震反射时间剖面,而且可提供一套用于地层地震反应计算的 P、S 波速度。

上述试验研究工作是在上海地震局刘昌森研究员和上海浦江勘查技术工程公司沈薇英总经理等有关专家大力协助下完成的。上海地震局为该项目实施提供了经费支持和有利的施工条件,在此深表谢意。

#### 参考文献:

- [1] 上海市地震局编. 上海地区地震危险性分析与基本烈度复核 [M]. 北京:地震出版社,1992
- [2] 徐明才,高景华,柴铭涛,等. 地震方法在断层活动性评价中的应用研究 [J]. 地震学报,1998,20(3)
- [3] Robert A, Williams Jack K odum, Thomas L Pratt et al. Seismic surveys assess earthquake hazard in the New Madrid area [J]. The Leading Edge, 1995, 30~34
- [4] 徐明才,高景华,柴铭涛. VSP 技术在工程勘查中的应用研究 [J]. 物探与化探,1998,22(6):401~407

## THE APPLICATION OF SURFACE SEISMIC REFLECTION AND VSP JOINT PROSPECTING TO THE INVESTIGATION OF ACTIVE FAULTS IN SHANGHAI CITY

Xu Mingcai<sup>1</sup> Jiang Cheng<sup>2</sup>

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000;

2. No. 1 Party, Shandong Bureau of Geological Exploration of Metallurgical Ministry, Zibo 255200)

万方数据

(下转 202 页)

( 上接 189 页 )

**Abstract** :The VSP survey in the drill holes verified the bedrock faults detected by surface seismic reflection method. With a practical prospecting example , this paper shows the effectiveness of surface seismic reflection and VSP joint exploration in finding hidden active faults in Shanghai.

**Key words** :anti-interference seismic method ; VSP( vertical seismic profile ) survey ; active fault ; joint exploration.

作者简介 :徐明才( 1955 - ) ,男 ,1982 年毕业于长春地质学院地震勘探专业 ,1991 年获中国地质大学( 北京 ) 硕士学位。现任国土资源部地球物理地球化学勘查研究所工程勘查部主任 ,教授级高级工程师 ,主要从事复杂条件下的地震方法技术研究和勘查工作。

万方数据