

36-40

应用于评价活动断层的地震方法技术

pr42.3

徐明才 高景华 柴明涛 王广科 刘建勋 荣立新

(地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所·廊坊·065000)

以上海市区开展地震调查深埋活断层的实例,讨论了在都市区强干扰条件下开展断层活动性调查的地震方法技术。认为:在对基岩断层的活动性评价中,反射纵波法根据基岩断层是否向上延伸到第四纪 Q_3 地层内,而剪切波分裂法则根据由 Q_3 地层内界面反射横波确定的各向异性。当基岩断层向第四系延伸幅度较大,即第四纪地层内断层落差较大时,可采用反射纵波法;当基岩断层活动引起的第四纪地层内的断层落差较小,反射纵波法不能对其分辨时,可采用剪切波分裂法。

关键词 反射波 剪切波分裂 活动断层

地震勘探, 断层

研究资料表明,活断层产生的变位积累和应力集中是发生天然地震的重要原因。目前,关于活断层的标准尽管众说不一,但比较有代表性的两种标准为:欧美在核电站选址中,把3~5万年以来仍在活动的断层叫活动断层,在地质年代中相当于第四纪 Q_3 上;我国在核电站选址中,把10万年以来仍在活动的断层叫活动断层,在地质年代中相当于第四纪 Q_3 下。本文把到第四纪 Q_3 仍在活动的断层定义为活断层。通常情况下,活断层具有三大标志:即地理标志、地形标志和地质地层标志,其中,地质地层标志即第四纪 Q_3 地层内断层的存在是最可靠的标志,但也是最不易查明的标志。

在通常情况下,或在干扰背景不很强的情况下,地震反射波法能查明基岩断层分布,并根据基岩断层向第四纪地层的延伸,可研究断层的活动性^[1]。由于天然地震是地质灾害中最严重的一种自然灾害,而都市区又是防震减灾的重点地带,采用地震反射波法,查明活动断层通过都市区的位置及断层性质,对市政建设和防震减灾意义重大。

受地震记录分辨率的限制,当基岩断层向第四纪地层延伸幅度较小,即断层落差较小时,地震反射波法难以对其探测。在此情况下,由第四系断层、裂纹/裂隙使地层介质出现各向异性,当剪切波在这种各向异性介质中传播时,出现剪切波分裂。在地震调查中,通过研究 Q_3 地层内界面产生的分裂剪切波,可研究地层的各向异性,继而对断层的活动性进行评价。

本文试图就都市区强干扰条件下开展断层活动性调查的地震反射波法和剪切波分裂法进行讨论,旨在为评价断层活动性提供其方法手段。

1 反射波法

近几年,浅层地震方法技术开始在一些城市应用于地铁、高层建筑、地下隧道等地基的工程地质勘查,探测深度一般在50 m以上。由于探测深度浅、探测范围小,通过选取合适的工作时间和采取一些相应的措施,可避开或减小干扰,取得好的地质效果。但当调查深埋断层(如300 m以上),且探测范围较大时,无论采取什么样的措施,也难以在市区使整条地震测线平静下来或避开地下地面障碍物,因此,地震方法在都市区的应用受到了很大限制。

通过分析研究,我们认为在都市区开展地震勘探,主要干扰有以下几类:

(1)振动干扰:包括人来车往产生的振动和周围工厂、居民区产生的各种振动。

(2)电磁干扰:高空、地下电缆中的电压、电流产生的磁场对检波器接收的有效信号影响很大。

(3)地下管道:市区大部分管道都沿马路铺设。若地震测线布设在较粗的管道(线)上,管道对地震波的传播有屏蔽作用;若布置在较细管道上,当地震波传播到管线时,管线会产生波的绕射和散射,干扰深层反射信号。

(4)坚硬路面:理论模型研究结果表明,柏油路面对地震波的传播影响较小,水泥路面对地震波的传播影响较大;此外,道路经多次分段改造后,表层不均匀性增强。

根据都市区特殊情况,我们认为在都市区采用地震方法调查深埋活断层有以下特点:

(1)震源:地震勘探使用的震源必须是非爆炸震源,也必须能激发出丰富的高频成分,且激发出的信

号频带宽、稳定。

(2)测线布置:由于建筑物密集,地震测线只能沿街道铺设。市区地震测线以多种地物做标记,可解决测量标志难以保留的问题。

(3)仪器设备:由于都市区干扰强、反射信号相对较弱,使用的仪器必须具有动态范围大、抗干扰能力强、分辨率高等特点。

(4)观测系统:由于反射信号的强度随着接收距离的加长而减弱,所以,大道间距和长排列观测系统对接收弱能量信号不利,小道间距和短排列观测系统不但有利于接收有效的反射信号,而且也提高了空间采样密度,有助于准确确定断层的位置。由于在强干扰条件下,得到的记录信噪比较低,水平叠加次数宜高不宜低。

(5)工作频带:为有效地压制低频干扰,仪器记录的低截频要高,频带要宽。

下面结合在上海市区开展地震调查深埋活断层的实例,讨论一下在都市区调查深埋活断层的地震方法技术。

1.1 数据采集

在上海市区进行数据采集使用的震源为夯击震源 WACKER,该震源与抗干扰高分辨率地震数据采集系统 DFSV - Minisiosie 配套使用,可增强有规律的反射波,压制无规律的外界干扰。

该系统压制外界干扰主要采用了两种技术:(1)设置噪声门限,去除强振幅的振动干扰。噪声门限可通过仪器人为设定,仪器自动去掉那些高于噪声门限的外界干扰;(2)仪器对接收到的信号进行适时相关叠加处理,通过大幅度提高叠加次数,达到提高记录信噪比的目的。如在一物理点敲击 1000 次,每道使用 4 个检波器组合接收,采用 12 次覆盖进行施工,则对于同一地下反射点,可形成 48000 ($12 \times 4 \times 1000$) 次叠加,如此高的叠加次数对压制干扰无疑是有益的。

在都市区开展地震调查活断层工作,测线须沿街道或马路布置。若在坚硬路面上使用夯源,需解决夯源与路面的耦合问题。一般情况下,敲击坚硬的路面会产生二次冲击,在不触发安装在夯源底板上激震器的情况下,二次冲击波作为噪声出现,使得记录信噪比降低。为解决这一问题,在夯源底板上固定一块聚乙脂塑料板,大大改善了激发效果。

在市区调查活动断层,检波器频率应适中。由于外界振动干扰的主频为 20 Hz ~ 30 Hz,我们采用自然频率为 40 Hz 的检波器进行接收即有利于压制

外界干扰,又不衰减深层反射信号,效果较好。

在数据采集中,通过反复试验和分析,最后确定的采集参数为: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 Hz ~ 512 Hz,采样率 0.5 ms,记录长度 512 ms。

1.2 数据处理

数据处理的关键是从强干扰背景中提取弱反射信息。在处理前,编辑掉一些不正常的记录道是十分重要的,这样做虽会使水平叠加次数降低,但在此情况下,低覆盖次数的叠加效果往往好于不正常道参与叠加下的高覆盖次数的叠加效果。

一些滤波处理对提高记录信噪比十分有用。在该资料处理中,使用了频率带通滤波,倾角差分滤波和自适应滤波。众所周知,当信号和噪声之间存在有频率和视速度之间的差异时,可使用频率滤波和倾角差分滤波(一种视速度滤波)压制噪声,提高记录信噪比,但当信号和噪声的频率相重叠,又不具有明显的视速度差异时,频率滤波不能有效地衰减干扰,或者说,频率滤波在衰减干扰的同时,也衰减了有效信号。在此情况下,若这种干扰噪声是随机分布的,可使用叠加处理压制无规律的噪声,增强有规律的反射信号;若这种干扰规律较强,且与信号通频带相重叠时(如交流电磁感应产生的规则干扰、机械振动等),使用自适应滤波处理能有效地压制该干扰。图 1 表示了自适应滤波处理消除干扰前(a)后(b)的理论记录,清楚地表明了自适应滤波在压制干扰的同时,几乎不影响与噪声具有相同频带的有效信号。图 1(b)所示记录的初至前,有一未被去除的噪声条带,这是自适应滤波处理时取的参考噪声,在后期处理中,可对此进行切除。

在资料处理中,发现表层不均匀性对地震反射波的同相叠加影响较大。在常规地震资料处理中,由低速带引起的表层不均匀可通过开展地震小折射调查,求取表层静校正量。但在市区强干扰条件下,由于各种外界干扰严重,无法准确拾取初至,因而,采用地震小折射调查也难以准确求取表层静校正量。为在资料处理中使地震反射波能够同相叠加,经过反复试验,采用图 2 所示的处理方法处理市区地震资料,取得了较好效果。

在该资料处理中,一些常规处理也是必须的,如动校正、自动剩余静校正和叠加等。此外,还采用了一些其它的处理技术,如多道反褶积、K-L 非线性处理和去时差同相叠加等。处理结果表明,这些处

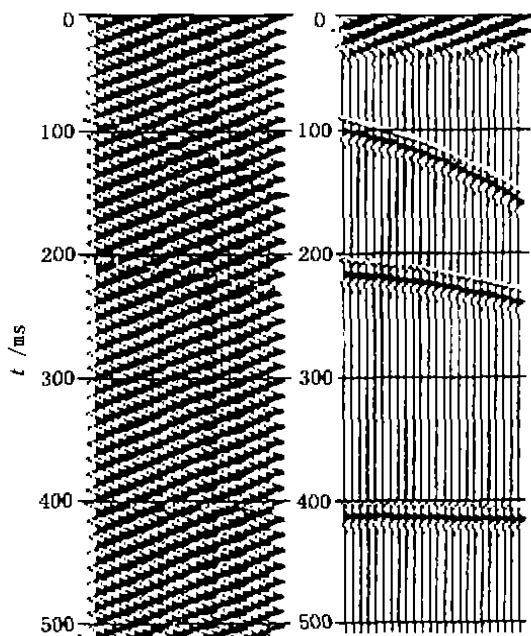


图 1 自适应滤波前(a)后(b)的理论记录

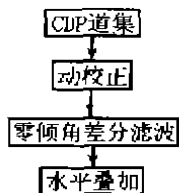


图 2 一种同相叠加的处理方法

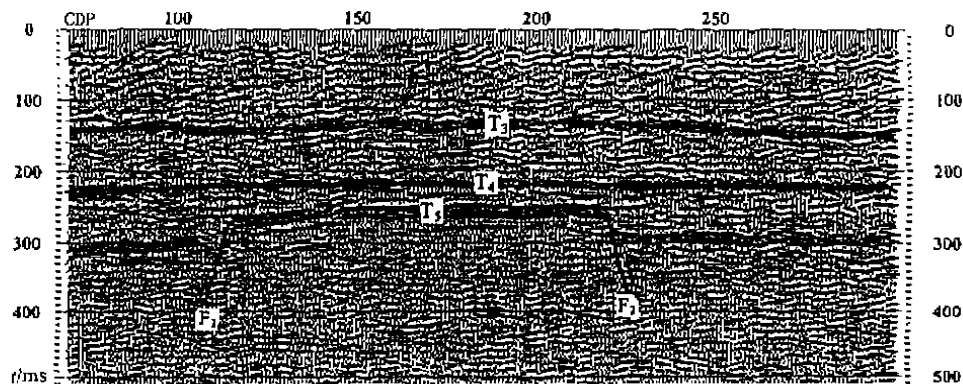


图 3 死断层在地震时间剖面上的反映

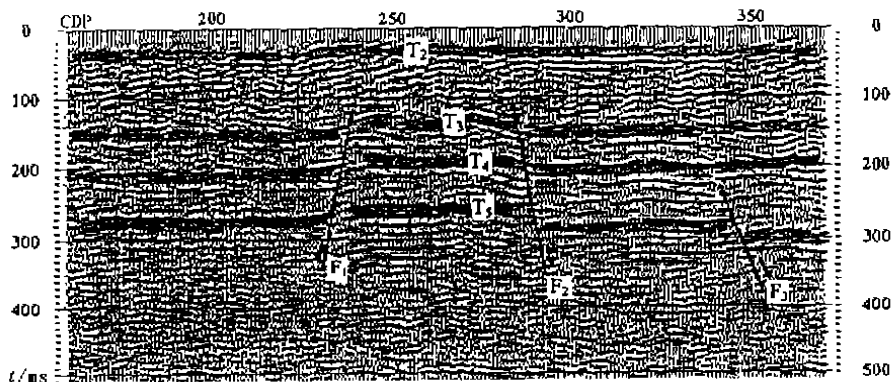


图 4 活断层在地震时间剖面上的反映

理对提高记录信噪比也是非常有效的。

1.3 资料解释

受表层不均匀性和市区严重噪音的影响,尽管在数据采集和资料处理中采取了一些相应措施,但最终用于地质解释的地震时间剖面的质量仍在某些地段信噪比较低。在这种情况下,对地震波组的对比解释应遵循“等厚”原则,依据反射波组的延伸趋势进行解释,即认为在第四纪地层内部某有限范围内,地层在横向上的沉积是连续的,同一地层厚度在横向上变化不大。

通常情况下,基岩反射波能量较强,在基岩反射波以上,第四系内部界面反射丰富,在基岩反射波以下,由花岗岩体内部地层产生的反射零乱,由此特征,可较容易地解释基岩反射波。

同常规地震资料解释一样,在对市区地震资料解释时,判断断层的主要依据是反射波组发生错断,或反射波强相位发生转换等。在时深转换中,用于时深转换的速度需根据叠加速度和由钻孔揭示的地层深度及反射波组时间反算的平均速度求取。

1.4 地质效果分析

在测区复杂条件下,采用抗干扰地震方法技术,得到的地震时间剖面如图 3、图 4 所示。对该时间剖面进行解释,能够对断层活动性进行评价。

图 3 表示了在市沿某街道得到的一段地震时间剖面,用粗实线标出了断层位置及产状, T_3 表示基岩顶界面反射,清楚地反映了基岩断层 F_1 和 F_2 ,断层落差约 25 m,但基岩上面的第四纪地层内的反射波组却连续得很好,无明显错断迹象,因此,能够表明该断层为死断层或休眠断层,也就是说,自第四纪以来,该断层没有发生过明显的活动。

图 4 表示了另外一段地震时间剖面,图中标出了断层位置,并用 $T_2 \sim T_4$ 标出了第四纪地层内的界面反射波, T_3 为基岩顶界面反射波,该反射波能量较强,且连续性好。分析图 4 可知, F_1 和 F_2 断层错断基岩后,向第四纪地层内延伸,使得 T_4 、 T_3 反射波组发生明显错断。

根据测区地震地质和构造情况分析^[2],认为 T_3 反射波为第四纪 Q_3 地层内的物性界面产生的,由此,认为 F_1 和 F_2 断层为活断层。 F_3 断层仅使 T_3 基岩反射波发生了错断, T_3 、 T_4 波并未发生错断。因此,认为 F_3 断层为非活动断层。

在图 4 所示的地震时间剖面上,浅层反射波信噪比较低,妨碍了对断层向更浅深度界面的追踪,这与采用的工作方法有关。为研究在较浅深度深埋断层的向上延伸,进而研究断层的最后活动年代,可针对某一深度界面,采用相应的方法技术,如采用高频震源、较小的道间距和较短的排列长度等进行专门研究^[3]。

在一些地震剖面中,还常见到这样一种情况,即第四系的界面反射波发生了错断,而基岩界面反射波却连续得很好,未发生类似于图 3、图 4 的错断。对此情况,我们认为该错断是在第四纪地层沉积后,由局部重力塌陷引起的,而与活动断层无关。

综上所述,认为根据地震时间剖面评价断层的活动性首先是确定在基岩内是否存在有断层,即基岩界面反射波是否错断,若基岩反射波同相轴错断,且该断层向上延伸到第四纪 Q_3 地层内,可评价该断层为活动断层。

2 剪切波分裂法

2.1 理论基础

在各向异性介质中,平行于裂隙面的水平偏振分量的速度 $V_{S_1} = \sqrt{\mu/\rho}$ (快速剪切波 S_1),平行于裂隙面法线的偏振分量的速度 $V_{S_2} = \sqrt{\mu(1-\epsilon)/\rho}$ (慢速剪切波 S_2), μ 为 Lamé 弹性常数, ρ 为介质密度, $\epsilon = Na^3/V$ 为裂隙密度, N 是体积 V 中的裂隙数

目, a 为裂隙面“半径”^[4]。由此可知,只有当地层介质为各向异性,存在裂隙时, $V_{S_1} \neq V_{S_2}$,反之,当地层介质为各向同性,不存在裂隙时, $\epsilon = 0$,这时 $V_{S_1} = V_{S_2}$ 。因此,通过研究 S_1 和 S_2 之间的速度差异是使用剪切波分裂研究介质各向异性,继而对断层活动性进行评价的出发点。

地下断裂活动可引起沿最大压应力方向的裂隙扩张,沿最小应力方向的裂隙缩闭,形成沿压应力方向优势排列的直立平行裂隙系,产生有效的各向异性。Crampin(1978)指出,该各向异性可使地震剪切波分裂,而剪切波分裂是各向异性的最重要特征。通过各向异性介质而分裂的剪切波再进入各向同性介质时,其分裂特性被保留下来,因此,剪切波分裂是确认存在各向异性的有效依据。在剪切波分裂研究中,通过研究第四纪地层内某一深度界面产生剪切波的各向异性,可研究地下断裂的活动性。

2.2 方法技术

为识别和解释第四纪覆盖层内砂、粉砂地层内剪切波分裂的有效性,继而对地震活动引起的第四系构造形变进行研究^[6],采集了四种不同激发—接收方式的共深度点反射数据,即由横向源—横向接收器(SH—SH)、径向源—横向接收器(SV—SH)、横向源—径向接收器(SH—SV)和径向源—径向接收器(SV—SV) 4 种方式得到的反射记录,测线长 75 m,方向 $N85^\circ W$ 。在数据采集中,使用 5.4 kg 锤击源和 10 kg 的钢工字梁激发及单分量的 30 Hz 水平检波器接收,使用 ES—2401 增强型地震仪的极性反转和叠加的特性记录数据。从由四种激发—接收方式得到的地震记录可知,SH—SV 和 SV—SH 方式得到的反射剪切波能量强于 SH—SH 和 SV—SV 方式得到的反射剪切波能量。

为确认剪切波分裂,使用了 Alford 旋转,以使 SH—SH 和 SV—SV 方式获得的反射能量最大和使 SH—SV 和 SV—SH 方式获得的反射能量最小。在对地震记录顺时针旋转 40° 后,增强了 SH—SH 和 SV—SV 方式得到的反射记录能量。根据用于叠加目的反射层的速度($S_1 = 205$ m/s 和 $S_2 = 185$ m/s),把 SH—SH 和 SV—SV 方式极化波分别与 S_1 (快)和 S_2 (慢)对应起来,在旋转处理后, S_1 剖面方向为 $N35^\circ W$, S_2 剖面方向为 $N55^\circ E$ 。

2.3 资料解释

为更有效地表明 S_1 和 S_2 两剪切波极化间的时移或动态闭合差,把 S_1 和 S_2 剖面拼接显示在一起

(图 5), 在双程时间 375 ms 处, 对应于 35m 深度处的第四纪始新世顶界面产生的反射波时间处, 图 5 所示剖面显示有 8 ms 的闭合差(图中箭头指出了该闭合差), 使用该时移数据, 估算测区的平均方向各向异性约 2%。

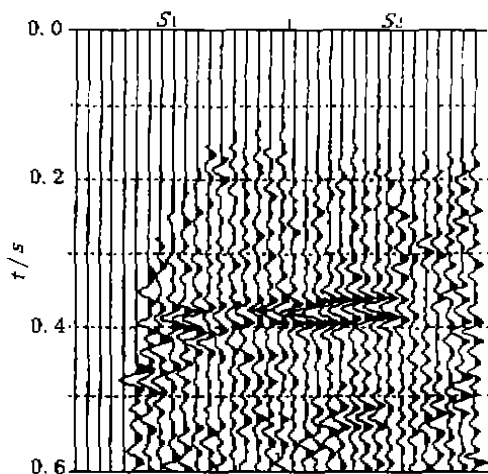


图 5 S_1 和 S_2 的拼接剖面

根据 S_1 和 S_2 地震剖面确定的方向各向异性, 结合测区地震地质情况, 认为该方向各向异性与第四纪地层内断裂、裂纹和裂隙有关。也就是说, 该各向异性与测区同期地震活动引起的新构造形变有关, 从而, 对测区深埋断裂的活动性进行了评价。

3 结论

通过对地震方法在调查断层活动性中的应用研究, 可得出以下结论:

1) 地震反射波法调查深埋断层活动性是根据地震时间剖面上的基岩断层向第四纪地层内的延伸情况而确定的。在都市区强干扰条件下, 为获得有效的地震时间剖面, 以下地震方法技术是必要的。

(1) 采用非爆炸的夯源和与之相配套的数据采集系统是获取深层(如 300 m 以上)有效反射信号的保证;

(2) 震源和检波器更好地与大地耦合可减少震源产生的二次冲击及检波器高频输出畸变对地震记录的影响, 有利于提高记录信噪比;

(3) 大幅度提高垂直和水平叠加次数, 采用较高频率的检波器及较高截止频率的滤波器有利于压制外界干扰;

(4) 都市区地震资料处理的关键是提高地震记录的信噪比。

2) 剪切波分裂法评价深埋断层活动性的依据是剪切波各向异性。在某深度处, 地层的各向异性可通过该深度界面产生的快、慢反射剪切波的速度差异估算。通过研究地下介质的各向异性, 可研究天然地震活动引起的第四系构造形变, 进而评价断层的活动性。

参考文献

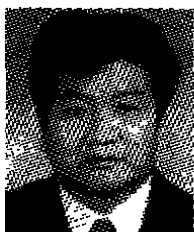
- 1 王庆海, 徐明才. 抗干扰高分辨率浅层地震勘探. 北京: 地质出版社, 1991
- 2 上海市地震局. 上海地区地震危险性分析与基本震度复核. 北京: 地震出版社, 1992. 19 ~ 72
- 3 Robert A Williams et al. Seismic survey assess earthquake hazard in the New Madrid area. The Leading Edge, 1995. 30 ~ 34
- 4 Crampin S. An introduction to wave propagation in anisotropic media. Geophys J R Astr Soc., 1984, 76: 17 ~ 18
- 5 Crampin S. Seismic wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic. Geophys J R Astr Soc., 1978, 3: 467 ~ 496
- 6 James B. Harris. Shear-wave splitting in Quaternary sediments: Neotectonic implications in the New Madrid Seismic zone. Geophysics, 1996, 61: 1871 ~ 1882

SEISMIC TECHNIQUE APPLIED TO ACTIVE FAULT ASSESSMENT

Xu Mingcai, Gao Jinghua, Cai Mingtao, Wang Guangke, Lu Jianxun, Rong Lixin

Seismic technique plays an important role in active fault assessment. The P-wave reflection and shear wave splitting methods are used in using seismic technique for active fault assessment. The P-wave reflection method is based on the fact that whether the fault of bedrock extends up to Quaternary strata Q_3 or not. The shear wave splitting method is based on anisotropy of Quaternary strata Q_3 determined by transverse wave. The P-wave reflection method can be adopted when large scale fault extend up to Quaternary strata, whereas, the shear wave splitting method can be adopted.

Key words reflection, shear wave splitting, active fault



第一作者简介:

徐明才 男, 1955 年生。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。现任地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所工程勘查部主任, 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。

通讯地址: 河北省廊坊市金光道 84 号 地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所 邮政编码: 065000