

横波技术在工程物探中的应用^{*}

赵成斌, 孙振国, 冷欣荣, 李德庆

(中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 概述了横波勘探的方法技术及应用范围, 指出了横波勘探在工程地震和工程物探工作中的重要性. 根据实际工作需要, 对某些方法所存在的问题提出了改进措施. 介绍了几种方法的应用实例. 实际应用效果显示该方法是比较实用的.

关键词: 地球物理勘探; 横波勘探; 活断层; 瑞利波; 衍射理论

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2001)01-0053-07

0 引言

近些年来, 随着国民经济的迅速发展, 城市建设的速度越来越快, 高层建筑越来越多. 地震安全性评价等工作显得越来越重要. 活动断层勘察及场地类别划分是地震安全性评价工作的重要内容. 活断层勘察主要是确定活动断层的规模、产状及活动年代. 在场地类别的划分中, 由于横波速度是场地软硬程度评价的一个重要指标, 也是重大工程烈度小区划的基础, 因此得到了广泛的应用^[1]. 另外, 随着科学技术的发展, 各种地下资源(如地下水、煤等)的调查任务也越来越多, 同时各种自然灾害的调查(如地下溶洞等)也逐步开展. 目前, 在活动断层勘察及地下资源和自然灾害的调查中, 多采用浅层纵波勘探技术, 它可以有效地解决百米以下的地质问题. 但是, 在活动断层勘察工作中, 有时需要查清在地壳浅部即 0~60 m 深度范围内断层的分布情况, 以确定断层的活动年代; 在场地类别的划分中, 有时需要确定覆盖层($v_s < 500$ m/s 的地层)上部土层的横波速度结构. 对于上述工作, 传统的横波勘探技术由于其分辨率相对较低很难满足要求, 而近年来发展起来的地质雷达虽能解决地表浅层的地质问题, 但在上述深度范围内也无能为力. 为了解决浅层勘探问题, 作者对横波技术在工程物探方面的应用进行了研究, 应用回折波、折射波和反射波剖面及 SP 测井、面波等技术, 在工程物探及横波速度测量方面取得了良好的效果.

1 方法概述及应用范围^[2]

同纵波勘探相似, 根据波在介质中的传播特征横波勘探也可分为直达波、回折波、折射波和反射波勘探等. 横波速度测量一般采用测井方式. 根据所采用的不同测量方式和波传播的不同特征, 钻孔波速测量可分为单孔和跨孔横波测量及 PS 测量和 VSP 测量. 另外, 面波勘探在工程物探中的应用也相当普遍. 在实际工作中究竟选用哪一种方法, 要视需要解决的问题.

收稿日期: 2000-02-28

^{*} 中国地震局地球物理勘探中心科技成果编号: RCEG 20003.

作者简介: 赵成斌(1955-), 男(汉族), 河南永城人, 高级工程师, 现主要从事浅层地震勘探工作.

题、现场条件、要求精度以及现有的仪器设备而定。这些方法都有各自的适用范围和特点,没有一种是全能的。与纵波勘探相比,这些方法在解决近地表的地质问题方面具有明显的优势和较高的精度。

1.1 回折波

对于速度随深度呈线性变化的介质,设 $V(z) = V_0 + Kz = V_0(1 + \beta z)$, (式中 β 为速度增长率), 可以导出相应的回折波时距曲线方程:

$$t = \frac{2}{V_0\beta} \operatorname{sh}^{-1} \left[\frac{\beta x}{2} \right] \quad (1)$$

式中: V_0 为地表波速, β 为速度增长率, x 为炮检距, t 为回折波走时。

由式(1)可以看出, 回折波时距曲线为反双曲正弦曲线。由于回折波时距曲线某一点的视速度 $V^*(x)$ 就是射线回折点的速度, 因此可以利用有限差分正演拟合的方法或利用下述公式对回折波进行反演解释, 计算出地层的垂向速度结构。

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{2}{xV_0} \sqrt{V^{*2}(x) - V_0^2} \\ z &= \frac{1}{\beta} \left[\frac{V^*(x)}{V_0} - 1 \right] \\ V(z) &= V^*(x) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: z 为回折波回折点深度, $V(z)$ 为回折点速度, x 、 β 、 V_0 意义同式(1)。

回折波的应用非常广泛, 它可以为横波折射勘探或反射勘探及工程场地稳定性评价提供覆盖层或低降速带速度资料。在某些覆盖层较厚的地区, 钻孔深度一般难以满足要求, 达不到《建筑抗震设计规范》^[1] 规定的深度, 因此, 测不到坚硬土层 ($v_s \geq 500$ m/s 的土层) 的深度和波速, 但是可以采用回折波的方法测出坚硬土层的深度和波速, 与测井资料结合起来使用, 就可以较好地解决问题。

1.2 折射波

对于一个水平折射层, 设界面以上速度为 V_1 , 下面速度为 V_2 , 厚度为 h , 通过 Snell 定律可以导出如下的折射波时距曲线方程:

$$t = \frac{x}{V_2} + t_{01} \quad (3)$$

式中: x 为炮检距, t 为折射波走时, V_2 为第二层速度, 截距时间 $t_{01} = \frac{2z \cos i}{V_1}$, 其中 $i = \sin^{-1} \left[\frac{V_1}{V_2} \right]$, V_1 为第一层速度, z 为第一层厚度。

由式(3)可以看出, 折射波时距曲线为直线。由于折射波一般出现在初至区, 因此比较容易辨认。而对于出现在续至区的折射波, 则可根据其同相轴为直线的特征加以识别。

折射波在横波勘探中也相当重要。由于横波波长短, 分辨率高, 对于那些覆盖层较薄、基岩埋藏较浅的地区, 采用横波折射勘探可以提高分辨率, 解决基岩面的埋深等问题。也可结合横波反射勘探, 为反射勘探的资料解释提供速度参数。

1.3 反射波

对于二维水平层状均匀介质, 设界面深度为 h , 上部介质速度为 V , 可以导出相应的反射波时距曲线方程:

$$\left. \begin{aligned} t^2 &= \frac{x^2}{V^2} + t_0^2 \\ t_0 &= \frac{2h}{V} \\ \Delta t_n &= t - t_0 \approx \frac{x^2}{2V^2 t_0} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: t 为反射波走时, x 为炮检距, V 为第一层速度, h 为第一层厚度, t_0 为法线反射时间, Δt_n 为正常时差。

从式(4)可以看出, 该方程为双曲线方程。其原始记录若经正常时差校正后, 则形成能直观地反映反射界面形态的法线反射时间(t_0)剖面。根据反射波的这一特点, 在实际工作中常采用多次覆盖的技术, 以提高资料处理和解释的精度, 达到抗干扰的目的。由于反射波分辨率高, 因此常用来解决近地表(几十米以内)的地质问题(如古河道、隐伏砂丘、地下溶洞等), 在此深度范围内它优于纵波反射勘探。

1.4 PS 测井

PS 测井是 P 波、S 波速度测井的简称。由于它能够可靠地原位测定地层的纵波速度和横波速度, 进而算出工程设计上十分有用的各种动态参数, 因此该方法广泛应用于地质调查。特别是近年来在城市高层建筑的地震安全性评价工作中, 工程场地横波速度资料所起的作用越来越重要, PS 速度测井的应用也日益广泛。

PS 测井分为单孔和跨孔 2 种方法。由于跨孔法成孔费用较高, 较少使用。而单孔法成孔费用较低, 较常使用。

单孔法测井一般采用检层法, 即地面激发井中接收的工作方法。激发方式多采用地面水平敲击木板激发 SH 波。为了保证获取资料的可靠性和完整性, 常采用三分向井下检波器或 5 个方向的检波器接收。在资料处理时根据不同的精度要求可以采用不同的方法, 常用的有 3 种方法: (1) 直射法: 为原始检层法的波速计算方法, 假定从激发点到接收点的连线(射线)为一直线。(2) 折射线法: 假定激发点到接收点的连线(射线)为一折线。(3) 波前重建法^[3]: 应用波前重建的理论进行计算。在上述 3 种方法中, 直射法精度较低, 折射线法次之, 波前重建法精度较高。

1.5 垂直地震剖面技术

垂直地震剖面技术也称 VSP 测井^[4], 可分为零偏移 VSP 和偏移 VSP2 种。零偏移 VSP 的测量方法与 PS 测井相似, 也是在井口附近地表设置震源, 在钻孔内设置检波器, 接收人工地震波记录。不同的是, PS 测井仅利用初至波到时求钻孔近旁地层的速度结构, 零偏移 VSP 法则在利用初至波的同时, 还利用续至波, 不仅得到钻孔近旁地层的速度结构, 还能得到钻孔所在位置的合成反射波记录。因为这个合成反射波与钻孔的地质界面、物性界面可以做到一一对应, 所以它是对反射时间剖面进行地质解释的重要数据。

偏移 VSP 是零偏移 VSP 的推广。它与零偏移 VSP 法不同的是, 零偏移 VSP 法的震源位于井口附近, 入射波射线近似垂直于地层界面; 而偏移 VSP 法的震源偏离井口, 入射波射线不垂直于地层界面。

在资料的应用方面, 零偏移 VSP 法提供的是垂直地基速度层的人工地震波, 以查明地基的速度结构为目的; 而偏移 VSP 法得到的实际上是一种将检波器置于钻孔中接收到的反射波, 为的是对钻孔附近的的速度结构进行高精度的探测。在实际应用中, 利用垂直地震剖面技术

不仅可以测量工程场地地下的纵波、横波速度结构,为建筑的抗震设计提供参数,而且还可以探测井孔附近的地质分层情况,并结合钻孔资料、浅层纵波、横波反射勘探等资料,对场地地层的结构和构造做出高精度的定量解释。

1.6 面波

面波法主要用于近地表的地基勘探^[5],特别在道路工程中应用较为普遍。它的测量对象是瑞利波或勒夫波的传播速度,常以瑞利波为主。此法的主要优点是测试技术简便,可由瑞利波速度换算得到横波速度。另外,利用面波的频散,可以研究软弱地基的振动特性。

根据瑞利波仅在地表附近传播的特点,利用波动方程和相应的边界条件则可导出 P 波、S 波和瑞利波速度与泊松比 σ 的关系:

$$f(V_R) = \left(\frac{V_R}{V_S}\right)^6 - 8\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^4 + \left[24 - 16\frac{V_S^2}{V_P^2}\right]\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2 - 16\left[1 - \frac{V_S^2}{V_P^2}\right] = 0 \quad (5)$$

式中: V_P 、 V_S 和 V_R 分别为 P 波、S 波和瑞利波速度。

由式(5)可以算出,当 $\sigma = 0.2$ 时, $V_R = 0.911 V_S$; 当 $\sigma = 0.3$ 时, $V_R = 0.928 V_S$; 当 $\sigma = 0.4$ 时, $V_R = 0.942 V_S$; 当 $\sigma \approx 0.5$ 时, $V_R \approx 0.955 V_S$ 。因此当泊松比 σ 趋于 0.5 时,瑞利波速与 S 波速趋于同一数值。在一般情况下,岩石的泊松比为 0.25 左右,土的泊松比约为 0.45~0.49,因此对于土质地基,可以认为其瑞利波速度和横波速度近似相等,横波速度可以用瑞利波速度来代替。

由于瑞利面波的质点自地表向下是以椭圆的形式振动的,并且随着深度的增加质点的振动幅度迅速衰减,当在半个瑞利波长的深度时,瑞利波的大部分能量已经损失,也就是说,瑞利波的大部分能量损失在二分之一波长的深度内。这一事实说明,瑞利波某一波长的波速主要与深度小于二分之一波长的地层物性有关,因此可以利用某一波长的瑞利波速来表征二分之一波长深度范围内地层的平均瑞利波速。在实际应用时,当测出了某一深度范围内的平均瑞利波速后,可换算出相应的平均横波速度和各层的横波速度值,这就是面波勘探的基础。

2 应用实例

近些年来,根据实际工作的需要,作者在工程场地横波速度测量、横波勘探及面波勘探方面开展了大量的研究和应用工作,取得了比较好的应用效果。下面介绍几个应用实例。

2.1 PS 测井实例

图1为某工程场地 PS 速度测井 S 波分量地震记录图。在数据采集过程中,为了突出横波,压制纵波,提高记录的信噪比,采用了双向敲击的激发方式,获得了正、反 2 个方向的水平敲击记录。在数据处理过程中,首先应用相应的资料处理软件绘制出如图 1 所示的记录图,然后利用地震波运动学和动力学特征,可以从记录图中准确地识别出纵波和横波震相。

从图 1 中可以看出,由于采用了横波震源,使得记录中纵波能力较弱,几乎分辨不出来;横波能力较强,起跳点清晰,便于拾取,保证了横波初至到时拾取的准确性,同时也为资料的处理和解释及横波速度参数的计算奠定了良好的基础。

在速度反演计算过程中,由于直射法精度较低,一般很少采用。常采用折射线法和波前重建法进行计算。波前重建法是以惠更斯原理、费马原理等地震波衍射理论为基础的,其计算精度高,速度快,能够获得比较满意的结果。

2.2 回折波实例

图2为某工程场地回折波剖面的地震记录图。由于在数据采集过程中采用了双向水平敲

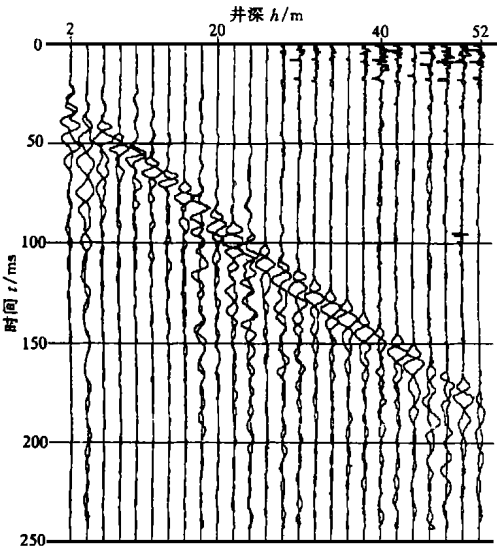


图 1 PS 测井原始记录图

Fig. 1 Raw seismic record by PS logging.

击的方式, 所产生的纵波能量较弱, 横波能量较强, 信噪比较高. 从图中可以看出, 在该图上横波回折波主要由 3 组横波震相组成. A 为直达横波. 它是沿地面传播的横波. 在近激发点为横波初至波, 能量较强, 速度较低. 远离激发点后能量逐渐减弱, 并从初至区逐渐过渡到续至区. B 为浅层第一组横波折射波. 该波组在 20 ~ 50 m 范围内为横波初至波; 50 m 以后逐渐过渡到续至区; 在 60 m 以前能量相对较弱; 60 m 之后能量相对较强. 该波组的视速度比横直达波高, 比第二组横折射波低. C 为第二组横折射波. 该波组在 50 m 以前为横波续至波, 50 m 以后为横波初至波. 在 100 m 以前能量相对较弱, 在 100 m 以后能量相对较强. 该波组视速度高于前 2 组波.

回折波速度的反演计算, 对于速度随深度的增加而逐渐增大的介质, 采用前面所述的反演公式一般可得到较好的结果. 但是对于那些速度不

遵循这一变化规律的介质计算误差就较大, 因此不能采用这一方法进行计算. 但可以采用正演拟合的方法进行计算, 即假定一理论模型, 逐渐修改理论模型使理论走时与实测走时达到最佳拟合.

2.3 反射波实例

图 3 为某工程场地横波反射波 t_0 时间剖面图. 根据该场地周围地质钻探结果, 在场地附近存在一条古河道. 古河道的埋深约为 20 ~ 30 m, 并且有可能从场地内通过. 为了查清古河道通过场地的位置、埋藏深度及其形态, 为未来建筑物的布局及设计提供资料, 采用了高分辨率浅层反射地震勘探的方法. 由于古河道埋藏深度较浅, 若用纵波勘探难以满足要求, 因此选用了横波多次覆盖的方法. 为了提高激发频率, 拓宽激发频带宽度, 采用锤击的方法, 获得了高主频、宽频带的横波地震记录. 原始地震记录经各种抗干扰措施、静校正、动校正、叠加等处理后, 就得到了如图 3 所示的相当于自激自收的反射波 t_0 时间剖面图.

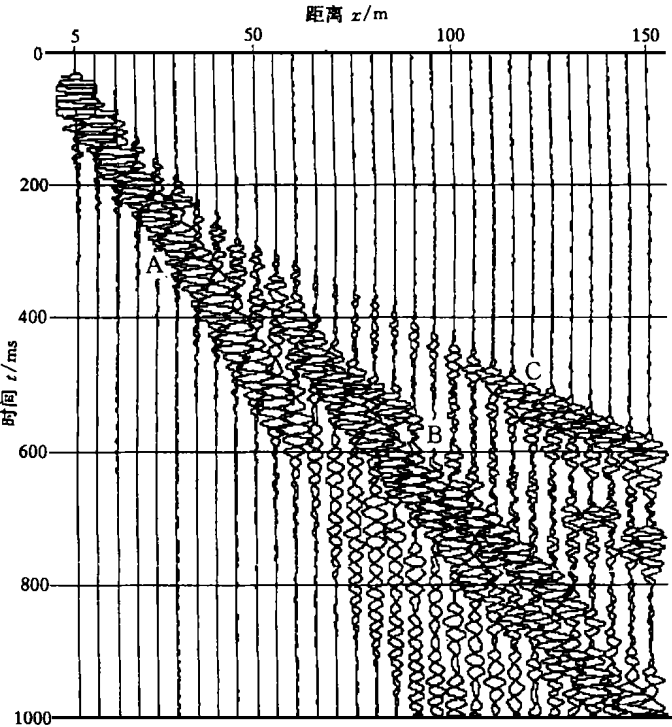


图 2 回折波原始记录图

Fig. 2 Raw seismic record by diving wave exploration.

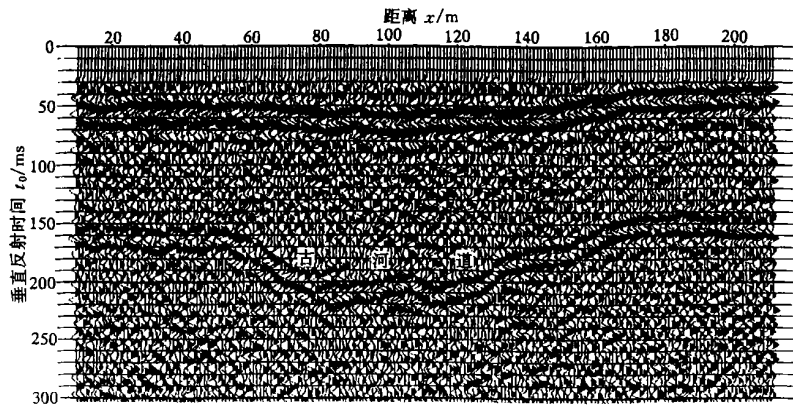


图 3 横波 t_0 时间剖面图

Fig.3 The t_0 -time profile for shear wave.

从图中可以看出,沿测线地下地层成层性较好,在 0~300 ms 的范围内主要存在 2 组反射震相,其中第一组(40 ms 左右)为第四系内部地层的反射波,连续性较好,相对起伏变化不大,表明该地层基本呈水平展布,二端略高而中间(80~150 m 范围)略低.第二组(140~220 ms)为古河道及二岸附近地层的反射波,连续性较好,但相对起伏变化较大.该组波的起伏形态充分反映了古河道的横断面形态.从图中古河道的形态可以看出,古河道的底部埋深为 28 m 左右,视宽度约为 130 m,是一条范围较大的古河道.另外,从第一组震相还可以看出,在古河道的上方,因为古河道的存在,在后来的地层沉积过程中,造成了上面沉积地层的不均匀沉降,从而导致了第一组震相所代表的古河道上方的地层界面向下弯曲,形成了略低于二端的下凹形态.

3 讨论

横波速度在工程物探及场地地震安全性评价工作中应用日益广泛,在场地地基评价中所起的作用也越来越重要,但是在横波速度的测量及应用过程中还存在某些不足之处.

(1) 在场地类别评价中,覆盖层($v_s < 500$ m/s 以上的地层)厚度是其中的一个重要参数.但在实际工作中,往往由于地质情况不明或经费等因素,至使钻孔深度较浅,钻不到覆盖层底部,因此采用 PS 测井的方法测不到覆盖层厚度,满足不了要求.在这种情况下,就可以采用横波回折波、折射波,甚至反射波等方法来解决这一问题,测出钻孔以下地层的横波速度,以达到预期的目的.

(2) 在速度的反演计算过程中,由于通常采用的计算方法比较简单,例如检层法中速度的计算方法及折射波的几种反演计算方法,所计算出的结果精度较低.特别是当遇到复杂的地质条件时,所得结果更是难以满足要求.因此,应采用比较先进的正演或反演计算方法(例如基于衍射理论的波前重建法),提高计算精度,以便获得可靠的结果.

[参考文献]

- [1] 中华人民共和国原城乡建设环境保护部. 建筑抗震设计规范[M] . 北京: 中国建筑工业出版社, 1989. 11—13.
- [2] 赵成斌, 刘保金. 浅层地震勘探在工程勘察中的应用[J] . 华北地震科学, 1998, 16(2): 1—5.
- [3] 赵成斌, 许云, 乌达巴拉. 地震波走时和射线的有限差分计算[J] . 华北地震科学, 1995, 13(4): 41—46.
- [4] 王振东. 浅层地震勘探应用技术[M] . 北京: 地质出版社, 1988. 226—242.
- [5] 首培杰, 刘曾武, 朱镜清. 地震波在工程中的应用[M] . 北京: 地质出版社, 1982. 34—40.

APPLICATION OF SHEAR WAVE TECHNOLOGY IN ENGINEERING
GEOPHYSICAL EXPLORATION

ZHAO Cheng-bin, SUN Zhen-guo, LENG Xin-rong, Li De-qing
(*Research Center of Exploration Geophysics, CSB, Zhengzhou 450002, China*)

Abstract: The methods, technology and the applied range of shear wave exploration are summarized. The importance of shear wave exploration in engineering seismology and engineering geophysics is pointed out. According to need of actual works, some improvement measures are proposed for the problems of some methods. The applied effects of various methods are introduced through actual examples. The results show that the methods are practical and effective in the exploration.

Key words: Geophysical exploration; Shear wave exploration; Active fault; Rayleigh wave; Diffraction theory