

岩体声波穿透信号数字处理

——快速富氏分析、希尔伯特变换、相关分析应用——

唐 大 荣

(地质矿产部水文地质工程地质技术方法研究队, 保定)

提 要

本文论述了岩体声波穿透信号的数字处理方法及原理。用快速富氏分析提取信号振幅谱及相位谱, 用希尔伯特变换提取包络、瞬时频率和相位, 并在此基础上定量评价岩体吸收衰减特性。笔者提出用相关分析方法提取岩体声波信号的横波及纵波速度, 这就为计算岩体动弹性模量、泊桑比等一系列动力学参数提供了可靠数据。最后简单介绍了声波穿透信号及人工合成声波记录数字处理实例。

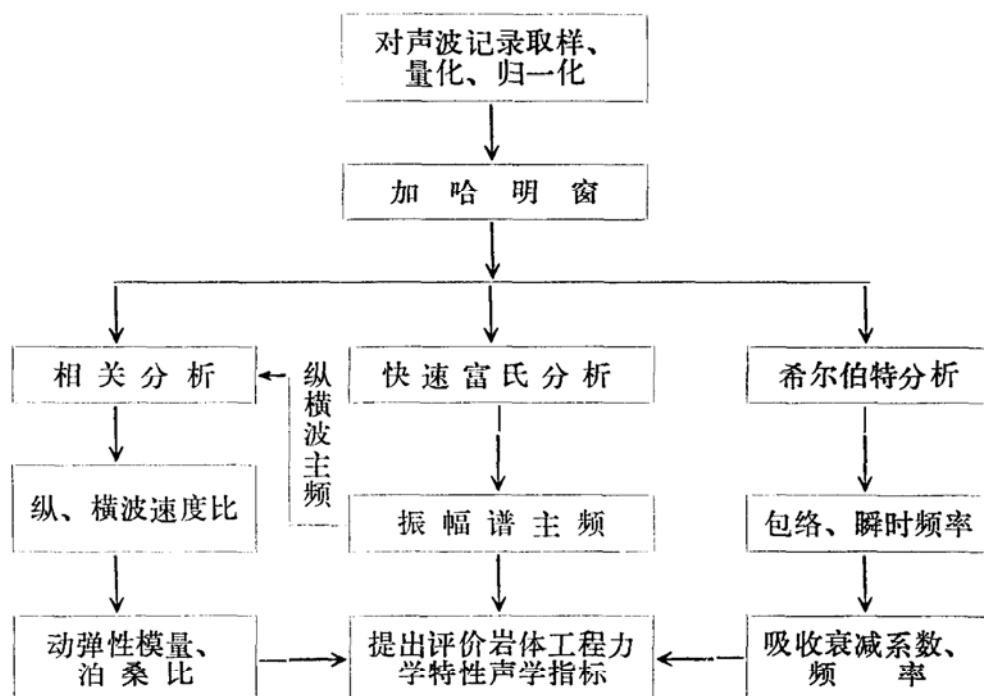
一、前 言

目前, 广泛采用声波穿透测试方法研究岩体工程力学特性及评价岩体稳定性。

如果将岩体视为传播声波信号的通道, 则穿透岩体后的声波信号, 受岩体通道作用, 携带有对声波吸收衰减及纵、横波速度等信息。从声波记录中提取尽可能多的有关传输通道(岩体)特征的信息, 是提高声波探测工程地质效果的关键。

信号数字处理是一种提取信息卓有成效的技术, 本文将用这一技术尝试处理岩体声波探测信号。全部处理可归结于下:

声 波 穿 透 信 号 数 字 处 理 流 程



用快速富氏分析及希尔伯特(Hilbert)变换提取振幅谱、包络、瞬时频率等信息,并用于评价岩体对不同频率声波的吸收衰减特性。

二、声波记录数字化

由于目前均使用照相方式记录连续波形,故数字处理前必须对波形采样、量化,将波形转换成离散的数字序列。

本文以波形上最小的 $10\mu\text{s}$ 时标为采样间隔(即 $\Delta = 10\mu\text{s}$),用光谱分析阅读器将波形放大后手工采样,最后用归一化方法将全部样值换算成均值为零、标准差为1的样值。在作各种数字处理前采用哈明(Hamming)窗对样值加权处理。

$$W(t) = \begin{cases} (0.54 + 0.46\cos\pi t)/T & 0 \leq t \leq T \\ 0 & |t| > T \end{cases} \quad (1)$$

式中 T 为时窗宽度。

三、岩体吸收衰减信息的提取

作为声波信号传播通道的岩体是非理想弹性介质,对信号有着吸收衰减作用。

节理裂隙发育、质地软弱、力学强度较低的岩体,对声波有强烈的吸收衰减作用。

岩体的吸收衰减使信号频谱、包络、瞬时频率均发生变化,而研究这些变化可以对吸收衰减作出定量的描述。

快速富氏分析和希尔伯特变换是研究这些变化的方法,下面仅作简要介绍。

(一)快速富氏分析

设给定信号 $\{S(i)\}$, $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$, 采样间隔为 Δ ,

则

$$F(k) = \Delta \sum_{i=0}^{n-1} S(i) e^{-j2\pi i k / n} \quad (2)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, n-1$$

式中 $j = \sqrt{-1}$ 。

$F(k)$ 称为信号 $\{S(i)\}$ 的频谱。

将式(2)表示为

$$F(k) = |A(k)| e^{j\theta(k)} \quad (3)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, n-1$$

则 $|A(k)|$ 称为振幅谱, $\theta(k)$ 称为相位谱。

本文作富氏分析时,最大样点数 n 取为1024,并用快速富氏变换运算。

图1是在山东黄岛地下油库76Ⅶ8, 9, 10测点上所测信号的快速富氏变换(FFT)

结果。

从图1(b)振幅谱可知,该信号有两个主频:16.38kc, 18.72kc, 它们与直达纵波及横波对应。图1(a)信号尾部振动相应于7.18kc左右的谱成分,但振幅谱数值低,已不是优势波了。

通过此实例不难看出用富氏分析将时间域信号变换成频率域,会对信号分辨及分析带来好处。

(二)希尔伯特变换

目前用换能器接收到的声信号仅是质点动能的变化,将声信号作希尔伯特变换则可求得质点位能的变化。

设声信号的样值是 $\{S(i)\}$, $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$, 用 $\tilde{S}(i)$ 表示其希尔伯特变换,则有

$$\tilde{S}(i) = \sum_{k=0}^{n-1} S(k)h(i-k) \quad (4)$$

式中 $h(k)$ ——希尔伯特滤波因子,

$$h(k) = 1/\pi k\Delta; \quad (5)$$

Δ ——取样间隔。

信号包络 $e(i)$ 、瞬时相位 $\theta(i)$ 、瞬时频率 $\mu(i)$ 可分别用下式计算:

$$e(i) = [S^2(i) + \tilde{S}^2(i)]^{1/2}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (6)$$

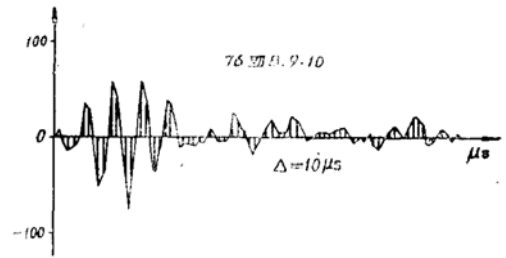
$$\theta(i) = \arctg \tilde{S}(i)/S(i), \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (7)$$

$$\mu(i) = [\theta(i) - \theta(i-1)] / 2\pi\Delta, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (8)$$

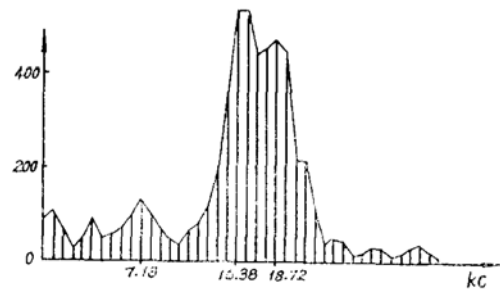
为减小截断误差影响,应使希尔伯特滤波因子通过哈明窗。在进行计算时应注意: $\tilde{S}(i)$ 样值相对于 $S(i)$ 样值需错动1/2采样间隔。

图2是信号 $S(t) = e^{-0.01t} \cos(2\pi ft)$, $f = 20\text{kc}$, 以 $5\mu\text{s}$ 间隔取样,在DJS-6机上作希尔伯特变换的结果。

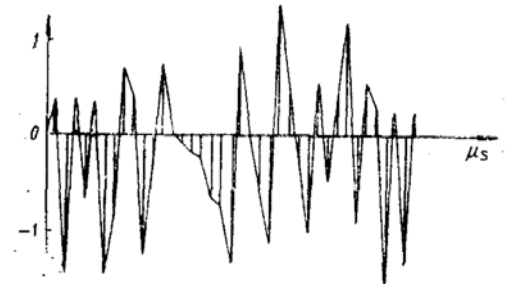
该信号频率是20kc, 振幅呈指数衰减,从图2(c)可知,用希尔伯特变换提取的瞬时



(a) 信号



(b) 振幅谱



(c) 相位谱

图1 黄岛地下油库实测信号的FFT计算结果

频率为19.9kc, 包络为指数衰减曲线, 证明本文使用的希尔伯特变换程序是正确的。

图3是黄岛76Ⅷ14, 15, 16测点上所测信号的希尔伯特变换。

从图3(b)可知, 0~200 μ s包络面积与直达纵波能量成正比, 而此时段内瞬时频率平均值为20kc。200~400 μ s包络面积与直达横波能量成正比, 相应频率平均值为18kc, 因而, 可利用希尔伯特变换来研究岩体对不同频率的声波吸收衰减特性。

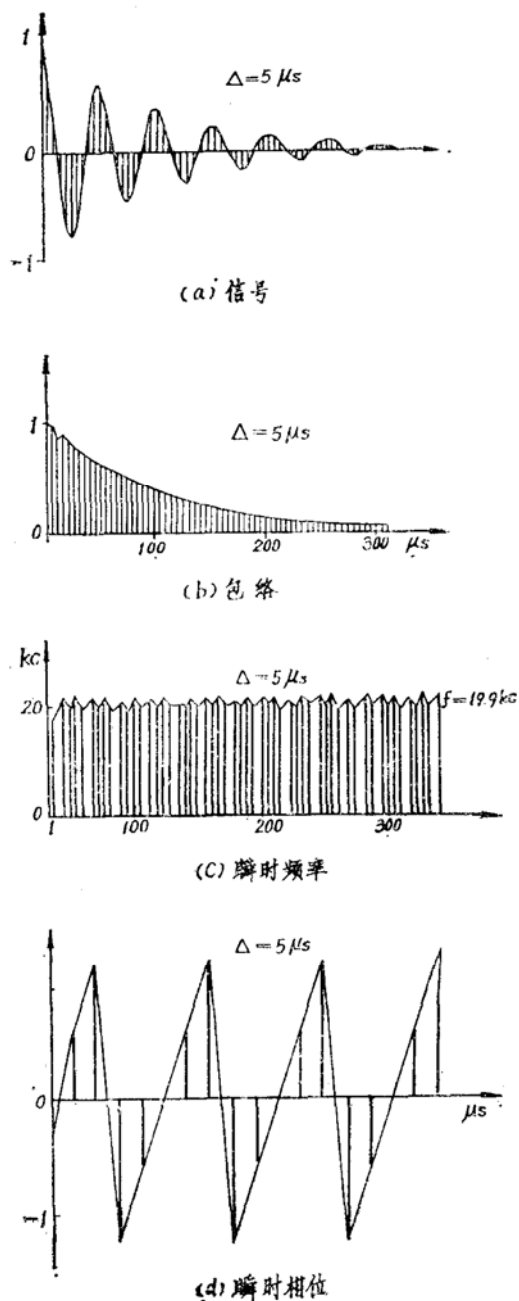


图2 理论模型 $S(t) = e^{-0.01t} \cos(2\pi ft)$, $f = 20\text{kc}$ 的希尔伯特变换

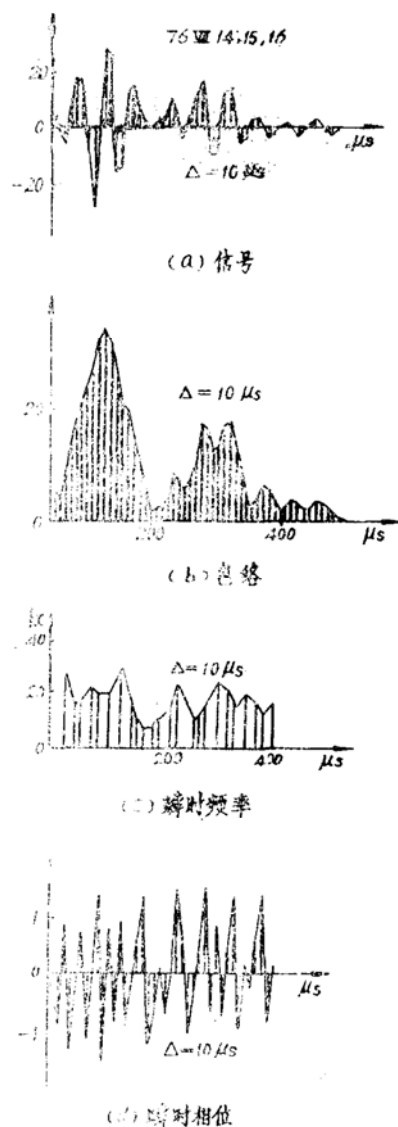


图3 黄岛实测信号的希尔伯特变换

(三)岩体吸收衰减定量研究

声波能量与包络面积成正比。

设 R_1 点信号包络 $e_1(i)$, $i = 0, 1, 2, \dots, k$; R_2 点包络 $e_2(i)$, $i = 0, 1, 2, \dots, k$; R_1, R_2 点之间距离为 D ; A_1 和 A_2 是包络所围的面积。

定义岩体吸收衰减系数为 α , 并以每米衰减的分贝数作为单位, 用符号db/m表示。

$$\alpha = 20 \log(A_1/A_2)/D \quad (9)$$

$$\text{又} \quad A_1 = \sum_{i=1}^k e_1(i)$$

$$A_2 = \sum_{i=1}^k e_2(i)$$

$$\therefore \alpha = 20 \log \left[\sum_{i=1}^k e_1(i) / \sum_{i=1}^k e_2(i) \right] / D \quad (10)$$

将与包络相应时段内的瞬时频率平均值作为与此吸收衰减系数 α 相应的频率。

图4为黄岛实测声波资料用希尔伯特变换求得的吸收衰减系数 α 及相应的频率。

图4上图中的 a, b 表示测点II 10~13及II 23~28接收到的信号直达纵波包络。II 10~13与发射换能器距离是1.236 m, II 23~28与发射换能器距离为2.140 m, 两测点间距离为0.804 m。根据式(10)可算出此段岩体吸收系数 α 为-1.55 db/m, 相应瞬时频率平均值是19.21 kc; 同样图4中图和下图各表示II 11~15与III 17~21测点间和I 21, I 15测点间的岩体吸收衰减系数及相应的频率值。

应当指出, 在选取计算吸收衰减系数的包络范围时, 尽可能去除次生波(直达横波及短途反射波)与直达波干涉对包络影响。如图4中的下图 b , 测点I 15的包络局部受到次生波的干涉, 因而计算出 α 值的可信程度要相应降低。

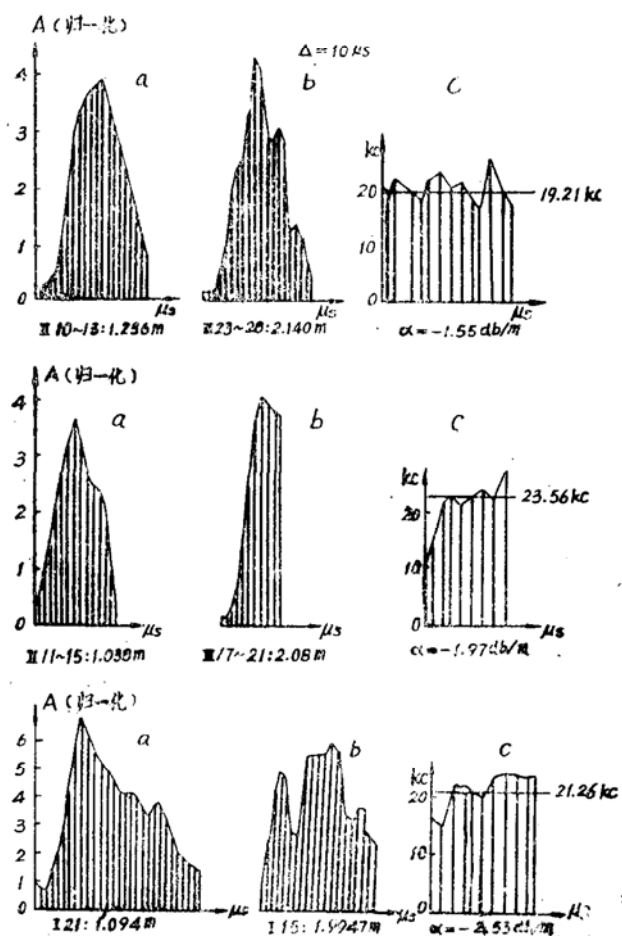


图4 用希尔伯特变换求得的吸收衰减系数 α 及相应的频率

实践表明,比较完整岩体直达波受次生波干涉并不严重,能提取出用于计算岩体吸收衰减系数的较理想包络。对较破碎岩体,由于次生波发育,往往造成直达波受到严重干涉,这时选取计算吸收衰减系数的包络范围,就带有主观臆断或经验的成分。

四、岩体纵、横波传播时间提取

(一)相关分析原理

用一般激发方式总是在岩体中诱发出纵波和横波。在同一接收点上,横波的主频率要低于纵波主频率,受岩体吸收衰减比纵波强。

相关分析在于,如果已知纵、横波主频,则可分别用频率为此主频的正弦振动与信号相关,求得相邻两接收点相关函数极值点时差,即分别为此距离的纵、横波传播时间。

信号 $\{S(i)\}$, $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ 和正弦振动 $\sin(2\pi ft)$ 相关函数计算公式是

$$\phi(i) = \sum_{k=0}^{n-1} S(k) \sin[2\pi f(i+k)\Delta] \quad (11)$$

$$i = -(n-1), \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, (n-1)$$

(二)实 例

为检验相关分析原理及程序正确性,首先对人工合成记录进行相关分析。

设横波用符号 SS 表示,

$$SS = 10^{-(\alpha_s/20)} \cos[2\pi f_s(t - x/V_s)] \quad (12)$$

纵波用符号 SP 表示,

$$SP = 10^{-(\alpha_p/20)} \cos[2\pi f_p(t - x/V_p)] \quad (13)$$

式中 x ——距离;

f_p, f_s ——纵、横波频率;

V_p, V_s ——纵、横波速度;

α_p, α_s ——纵、横波吸收衰减系数。

图5是纵波、横波在与振源距分别为, 0 m, 0.2 m, 0.4 m, 0.6 m, 0.8 m处合成结果。

计算参数取为

$$\begin{aligned} f_p &= 15 \text{ kc}, & f_s &= 10 \text{ kc}; \\ \alpha_p &= 1 \text{ db/m}, & \alpha_s &= 2 \text{ db/m}; \\ V_p &= 5000 \text{ m/s}, & V_s &= 2000 \text{ m/s}. \end{aligned}$$

并且,纵波取成时宽 $500\mu\text{s}$ 正弦段,横波取成时宽 $370\mu\text{s}$ 正弦段。

图6是对不同接收距离合成记录FFT计算结果。

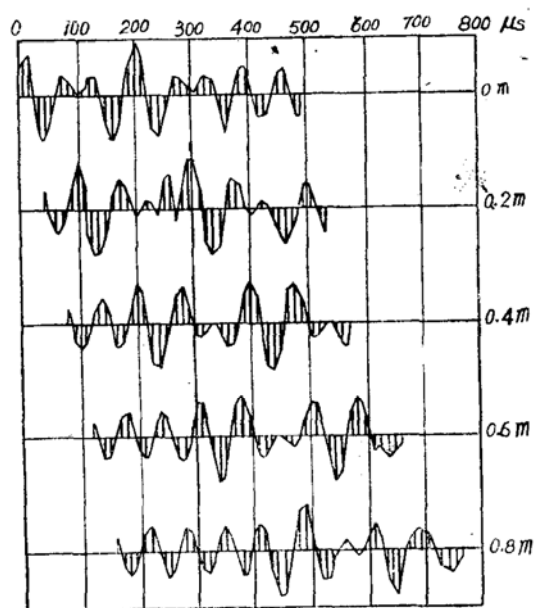


图5 直达纵波及横波的合成记录

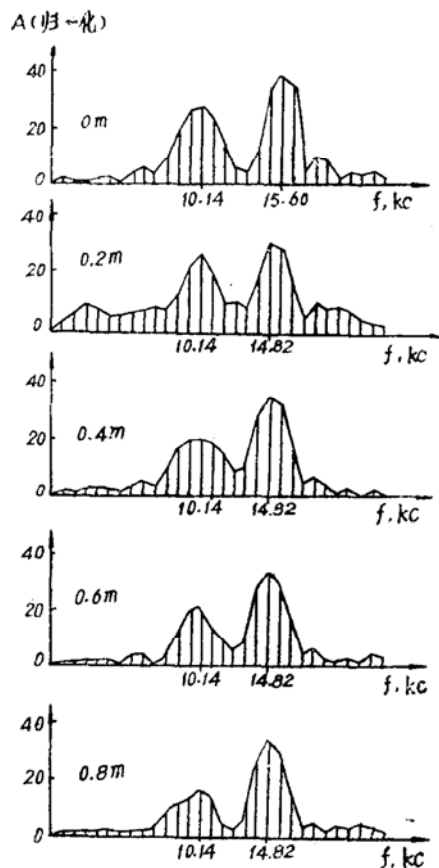


图6 合成记录FFT振幅谱

图7和图8分别表示合成记录与15kc及10kc正弦波相关系数,如果将0m处相关系数极值点取为时间起点,可以直接从图7、图8上读出0.2m, 0.4m, 0.6m, 0.8m处相关系数极值点上的时间。

图9是根据不同接收距离上相关系数时差及接收点距离绘制的时距曲线,从而求得纵、横波的速度,这些均与所设数值一致,证明相关分析提取纵、横波速度是可行的。

应当说明的是,本文选取10μs采样间隔,时间分辨率即为10μs,在测时精度上可有±10μs误差。

这种影响可从图7和图8中看出。图7中相邻点之间相关时差均为30μs,与正确时差40μs相差10μs,系统地丢失一个取样间隔,因此在计算图9时距曲线时,作了10μs补差。同样现象也可在图8中看出, 0~0.2m相关时差为110μs,比正确值100μs多了一个取样间隔, 0.2~0.4m相关时差为90μs,比正确时差少了一个取样间隔。

图10, 11, 12是对黄岛地区实测资料进行快速富氏分析及相关分析的结果,以及根据这些结果求得的纵、横波速度。

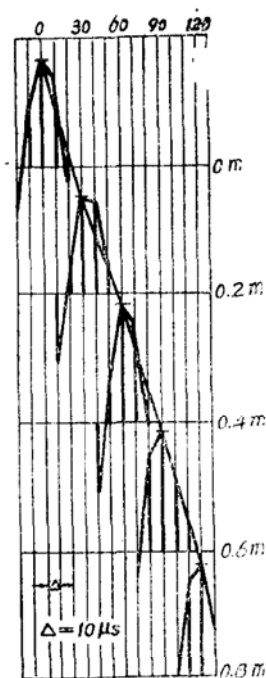


图7 合成记录与15kc正弦波相关系数

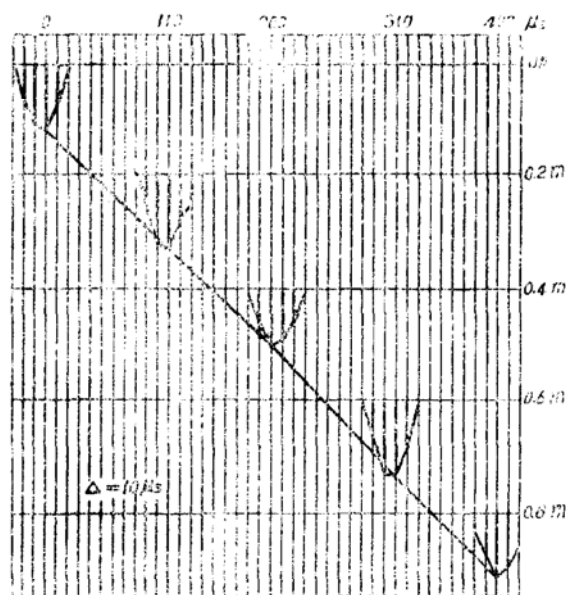


图8 合成记录与10kc正弦波相关系数

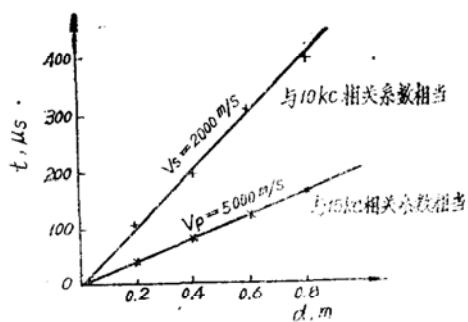


图9 根据15kc, 10kc相关系数时差求得的时距曲线及纵、横波速度

从图10可知, 19.89kc相关时差为280 μ s, 相应横波速度为3228m/s, 23.79kc相关时差为170 μ s, 纵波速度为5318m/s, 纵、横波速度比 $V_p/V_s = 1.65$ 。野外测得的纵波时差为167.5 μ s, 与相关分析求得的纵波时差170 μ s相当接近。

图11中, 18.72kc相关时差300 μ s, 横波速度3003m/s, 22.23kc相关时差180 μ s(实测纵波时差170 μ s), 相应纵波速度为5056m/s, 纵、横波速度比 $V_p/V_s = 1.68$ 。

在图12中用相关分析求得的纵波时差为170 μ s, 实测时差是167.5 μ s, 纵、横波速度比 $V_p/V_s = 1.70$ 。

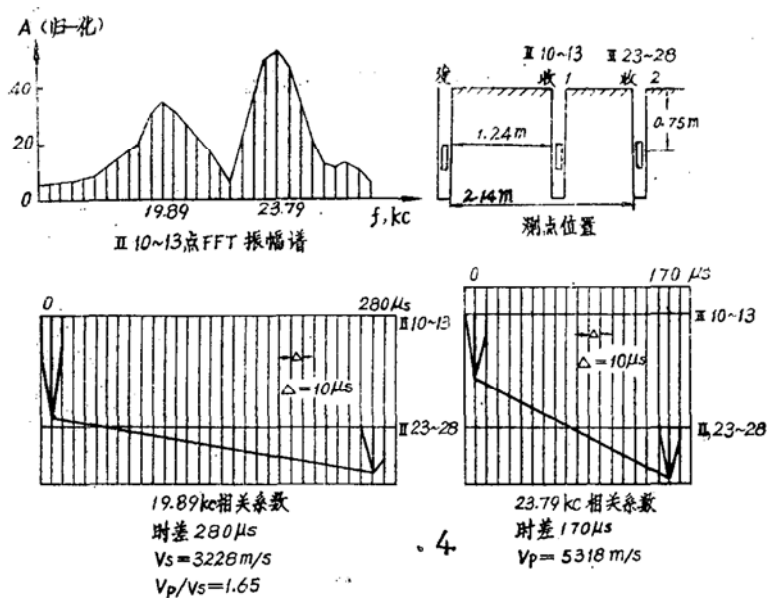


图10 黄岛地区实测信号FFT及相关分析

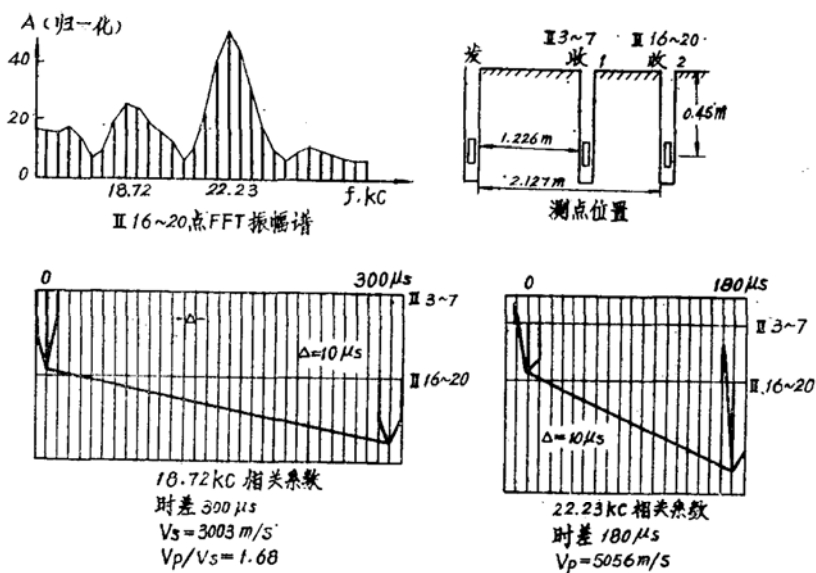


图11 黄岛地区实测资料FFT及相关分析

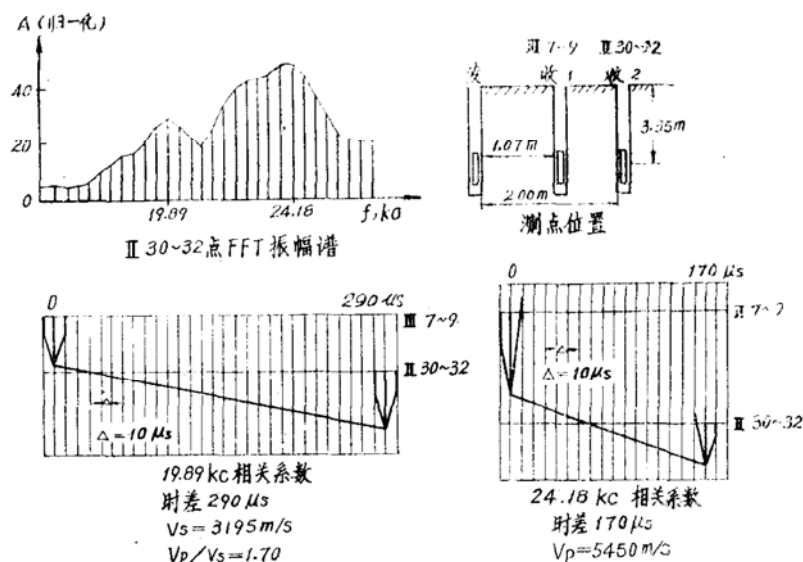


图12 黄岛地区实测资料FFT及相关分析

结 语

本文所论述的数字处理方法,能提取蕴含于穿透信号中的全部信息。

用相关分析法求得的只是相速度。波传播速度一般系指群速度,当介质不存在波散时,相速度等于群速度,而岩体在通常赋存条件下,波散现象并不显著。

拟建议:在用相关分析提取波速时,相邻接收点距离不要超过1倍波长。

本文引用的野外记录均系我队原声波组测试资料,在此向参加黄岛测试工作的有关同志谨致谢意。

崔李丽同志参加了本文全部数据的计算机处理。

参 考 文 献

- [1] 唐大荣、张文梁, 声波探测数字技术原理, 第二次全国岩体声波探测技术座谈会, 1976年9月。
- [2] Dohr, G. and Janle, H., Improvements in the Observation of Shear Wave, Geophysical Prospecting, Vol. 28, 1980, pp. 208~220.
- [3] Scarascia, S., Colombi, B. and Cassinis, R., Some Experiments on Transverse Wave, Geophysical Prospecting, Vol. 24, 1976, pp. 549~568.
- [4] Erickson, E. L., Miller, D. E. and Waters, K. H., Shear-wave Recording Using Continuous Signal Method, Part II, Geophysics, Vol. 33, 1968, pp. 240~254.

The Numerical Process of the Sound Signal Through Rock

Tang Da-rong

(Research Team of Hydrogeology and Engineering Geology
Techniques, Ministry of Geology, Baoding)

Abstract

The purpose of this paper is to describe both method and principle, which applied to the numerical analysis of the sound signal through rock.

Based on FFT of records, correlation analysis was then used for the calculation of both longitudinal wave and transverse wave velocities. Signal envelope obtained by Hilbert-transform of records was used for calculation of absorption coefficient of rock. The actual application of these numerical procedures are described, and some records obtained using both the "crosshole" field technique and synthetic method show that the suggested procedures are satisfactory to the identification of transverse wave and to the determination of absorption coefficient in rock.