

节理岩体应力波反演模型研究

许年春¹, 赵明阶², 吴德伦¹

(1.重庆大学 土木工程学院 重庆 400045; 2.重庆交通大学 河海学院 重庆 400074)

摘要:通过分析垂直节理面入射应力波的传播过程,得出节理界面产生的各次回波波形函数表达式,确定波源处的振动组合,从而建立以该振动信号分析为基础的反演节理特征的模型。该模型不仅能反演出节理的一些基本特征,包括:节理的位置、节理内充填物的波阻抗、品质因子、以及节理宽度与波速比值,而且还能反演出节理另一侧岩石的波阻抗,这一成果无疑将扩大应力波在节理岩体测试中的应用范围。

关键词:节理岩体;应力波;反演模型;信号分析

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study on stress wave inverse model for jointed rock masses

Xu Nian-chun¹, Zhao Ming-jie², Wu De-lun¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Through analyzing the propagation process of stress wave in the vertical direction at the joint, the expression of a series of echoes generated at the joint are achieved; then the combined vibration at the initial wave source is determined; finally a inverse model to detect the joint's characters based on signal process of the vibration is given. Utilizing this inverse model we can detect the joint's location, characteristic impedance, quality factor and the ratio of its width to its velocity for stress wave; furthermore, the characteristic impedance of the rock located at the other side of the joint can also be detected. This conclusion would absolutely enhance the application of stress wave in detecting jointed rock masses.

Key words: jointed rock masses; stress wave; inverse model; signal processing

1 引言

岩体由完整岩石和诸如断层、节理、层面等不连续面两部分组成,狭义的节理是指岩石中的裂隙,是没有明显位移的断层,广义的节理则是各种裂隙、断层、层面、弱面的统称^[1,2]。按其尺寸大小,岩体中的节理可分为微裂隙、大尺度平面节理。大尺度平面节理是指相对波长而言,其伸展尺寸较大、厚度较小的一类节理,这类节理在节理岩体的大多数问题中居支配控制地位^[4],本文要讨论的就是这一类。

应力波在节理处要发生反射和透射,节理导致岩体应力波振幅衰减和传播速度减小,应力波衰减和速度变化程度与节理开裂、充填与否、充填物的性质以及充填夹层的厚度等因素有关。

已知节理性状研究应力波在岩体中传播特性属于波动的正问题,而通过节理岩体应力波测定信号来确定岩体及其节理特征的研究则称为应力波反演(反问题)。前者研究成果较多,是当前岩石破碎、爆破、爆破优化以及结构抗震设计理论基础^[1-6],后者主要表现在应力波检测方面,例如桩基完整性、桩基承载力、锚杆体完整性、锚固体抗拔力、灌浆效果和隧道衬砌检测等^[7-10],但理论成果尚显得不足,而且在岩体应力波检测中主要是通过反演传播速度来判断岩体的质量,如文献[11]中采用地震波层析成像技术(CT)得到了三峡工程永久船闸边坡岩体地质概化模型,文献[12]中通过声波CT对某路堤高24m的混凝土拉筋挡墙墙后填土的密实性、均匀性作检测,文献[13]中运用不同方向上的弹性波速值来确定正交各向异性岩体的裂隙张量。也有

在地震波 CT 中引入振幅衰减层析成像,以振幅衰减作为反映岩石受后期破坏形成的破碎带、软弱结构面发育程度的指标,如文献[14],文献[15]提出可通过透射超声波谱的形状来反映岩石的完整程度,文献[16]中通过透射法分别测出岩块和含节理岩体中声波的传播速度,进而反演出厚度已知的节理的法向刚度,文献[17]运用断裂力学的理论建立了岩石在单轴压缩条件下,轴向弹性波速与单轴压力的理论关系,运用信息理论方法建立了岩石细观力学参数的波动反演模型。

如何采用应力波信息来定量反演岩体中某一节理的多个特征(位置、厚度、刚度、力学参数等),同时避免像地震波 CT 测试那种密集对射、对测试条件要求苛刻、测试成本高的情况,是一个具有很大实用价值的课题,目前这方面的成果还没查阅到相关文献报道。

由于节理岩体反演问题的复杂性,作为理论探讨,本文通过分析单节理垂直入射应力波的传播过程,得出节理界面产生的各次回波波形函数表达式,确定波源处的振动组合,从而建立以该振动信号分析为基础的反演节理特征的模型。

2 应力波在节理处的传播过程

如图 1 所示,节理左侧点 $x=0$ 处波源发出的应力波入射到节理处,在节理的两界面,将发生反射和透射。当为垂直入射时:界面 A 处反射波沿入射波相反方向向左传播,透射波沿入射波方向向右传播过节理充填物,在界面 B 再次发生反射和透射,

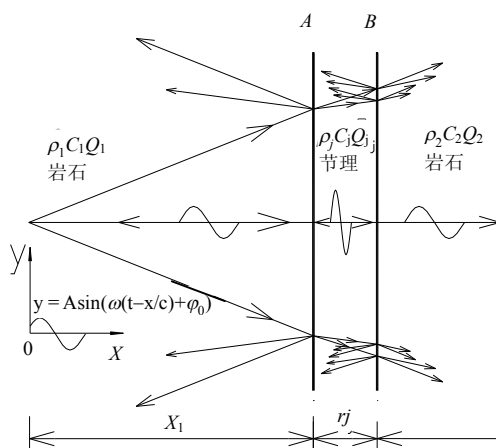


图 1 应力波在节理处的传播示意图

Fig.1 A sketch of stress wave propagates at the joint

其透射波传入节理右侧岩石,其反射波在节理内向左传播,当到达界面 A 时,再次发生反射和透射,透射波向左正对波源点传播,反射波再向右传播至

界面 B ……,如此反复进行,各反射波、透射波与入射波均在同一直线,该直线与节理界面的两交点成为各反射波、透射波的固定波源点。当为斜入射时,当入射应力波是 P 波(纵波)或 SV 波(竖向剪切波)时,界面 A 处将产生四种沿不同方向传播的波,其中两个为反射波,另外两个为透射波,两个透射波传播到界面 B ,又各自产生四种波,产生的反射波又传向界面 A ……,当入射应力波为 SH 波(水平剪切波)时,因不产生转换 P 波,在界面处只产生一个反射波和一个透射波,但同 P 波与 SV 波情况,各反射波、透射波均不共线,且没有固定的波源点。

3 节理界面产生的各次回波

由上节的分析可知,斜入射与垂直入射相比,仅是入射角的不同(垂直入射时入射角为 90°),却使应力波的传播研究变得复杂。下面分析说明采用垂直节理面入射应力波作为反演信号源也能较全面地反演出节理特征。

由波源发出垂直于节理面的入射波,经节理两侧界面的反射和透射,将不断有次生应力波沿入射应力波相反方向返回到波源点,本文称其为回波。

根据 Fourier 原理,任何形式的应力波都可分解为不同频率、不同初相位正弦波组合,考虑波源发出的垂直节理面方向传播的正弦波(P 波或 S 波),称其为原波,其垂直(当为 P 波时)或平行(当为 S 波时)于波前的位移表达式为:

$$y(x,t) = A \sin(\omega(t-x/c_1) + \phi_0) \quad (1)$$

式中: A 为波幅; ω 为角频率; t 为时间; x 为质点位置坐标; c_1 为波在节理左侧岩石中的传播速度; ϕ_0 表初相位。

为了后面表达简单起见,先定义几个系数:

$$\begin{aligned} n_{1j} &= \frac{|\rho_1 c_1 - \rho_j c_j|}{\rho_1 c_1 + \rho_j c_j} & n_{2j} &= \frac{|\rho_2 c_2 - \rho_j c_j|}{\rho_2 c_2 + \rho_j c_j} \\ m_{1j} &= \frac{2\rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_j c_j} & m_{j1} &= \frac{2\rho_j c_j}{\rho_1 c_1 + \rho_j c_j} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: n_{1j} 为节理左侧岩石与节理间的反射系数; n_{2j} 为节理右侧岩石与节理间的反射系数; m_{1j} 为应力波由节理左侧岩石向节理内入射时的透射系数; m_{j1} 为应力波由节理内向节理左侧岩石入射时的透射系数; ρ_1 、 c_1 为节理左侧岩石的密度与波在其中的传播速度; ρ_j 、 c_j 为节理充填介质的密度与波在其中的传播速度; ρ_2 、 c_2 为节理右侧岩石的密度与波在其中的传播速度。 $t=x_1/c_1$ 时刻,原波传播至

A 界面, 发生反射与透射产生的反射波称为 0 次回波, 其表达式为

$$y(x,t) = A \exp(-\alpha_1 x_1) n_{1j} \sin(\omega(t - \frac{x_1}{c_1} - \frac{x-x_1}{c_1}) + \varphi_0) \quad (3)$$

产生的透射波(1Tj 波)为:

$$y(x,t) = A \exp(-\alpha_1 x_1) m_{1j} \sin(\omega(t - \frac{x_1}{c_1} - \frac{x-x_1}{c_1}) + \varphi_0) \quad (4)$$

式中: x_1 表界面 A 的坐标; α_1 为应力波在节理左侧岩石中的传播衰减系数:

$$\alpha_1 = \omega/(2c_1 Q_1) \quad (5)$$

式中 Q_1 为品质因子, 是一个与波的频率无关的、描述波传播过程中能量衰减剧烈程度的量。

$t=x_1/c_1+r_j/c_j$ 时刻, 1Tj 波传播至 B 界面, 发生反射与透射, 产生的反射波(1TjRj 波)表达式为

$$y(x,t) = A \exp(-\alpha_1 x_1 - \alpha_j r_j) m_{1j} n_{2j} \sin(\omega(t - x_1/c_1 - r_j/c_j + (x-x_1-r_j)/c_j) + \varphi_0 + \pi) \quad (6)$$

式中: α_j 为应力波在节理充填介质中的传播衰减系数, 其定义同 α_1 (对应节理品质因子 Q_j); r_j 为节理的厚度; π 表应力波由波阻抗小的介质传入波阻抗大的介质时反射波的半波损失。

$t=x_1/c_1+2r_j/c_j$ 时刻, 1TjRj 波传播至 A 界面, 发生反射与透射, 产生的透射波称为一次回波, 其表达式为

$$y(x,t) = A \exp(-\alpha_1 x_1 - 2\alpha_j r_j) m_{1j} n_{2j} m_{j1} \sin(\omega(t - x_1/c_1 - 2r_j/c_j + (x-x_1)/c_1) + \varphi_0 + \pi) \quad (7)$$

产生的反射波(1TjRjRj 波)表达式为

$$y(x,t) = A \exp(-\alpha_1 x_1 - 2\alpha_j r_j) m_{1j} n_{2j} n_{1j} \sin(\omega(t - x_1/c_1 - 2r_j/c_j - (x-x_1)/c_j) + \varphi_0) \quad (8)$$

$t=x_1/c_1+3r_j/c_j$ 时刻, 1TjRjRj 波传播至 B 界面, 发生反射与透射, 产生的反射波(1TjRjRjRj 波)表达式为:

$$y(x,t) = A \exp(-\alpha_1 x_1 - 3\alpha_j r_j) m_{1j} n_{2j} n_{1j} n_{2j} \sin(\omega(t - x_1/c_1 - 3r_j/c_j + (x-x_1-r_j)/c_j) + \varphi_0) \quad (9)$$

$t=x_1/c_1+4r_j/c_j$ 时刻, 1TjRjRjRj 波传播至 A 界面, 发生反射与透射, 产生的透射波称为二次回波, 其表达式为

$$y(x,t) = A \exp(-\alpha_1 x_1 - 4\alpha_j r_j) m_{1j} n_{2j} n_{1j} n_{2j} m_{j1} \sin(\omega(t - x_1/c_1 - 4r_j/c_j - (x-x_1)/c_1) + \varphi_0 + \pi) \quad (10)$$

同理可推导出 3 次、4 次、……回波表达式,

它们在 A 界面产生的时间差值均为 $2r_j/c_j$ 。

4 波源处的振动组合

波源位于临空界面上, $t=0$ 时刻, 仅有原波, 其引起的波源处振动表达式为

$$y(0,t) = A \exp(-st) \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (11)$$

式中: s 为波源质点阻尼自由振动衰减系数, 其大小与临空界面形状、波源位置及 ω 、 Q_1 等有关。

$t=2x_1/c_1$ 时刻, 0 次回波至, 并立即在临空界面上发生反射, 反射系数为 1, 故其引起波源处的振动表达式为

$$y(0,t) = 2A \exp(-s(t-2x_1/c_1)) \exp(-2\alpha_1 x_1) n_{1j} \sin(\omega(t-2x_1/c_1) + \varphi_0) \quad (12)$$

同理, $t=2x_1/c_1+2r_j/c_j$ 时刻, 一次回波至, 其引起波源处振动的表达式为

$$y(0,t) = 2A \exp(-s(t-2x_1/c_1-2r_j/c_j)) \exp(-2\alpha_1 x_1 - 2\alpha_j r_j) m_{1j} n_{2j} m_{j1} \sin(\omega(t-2x_1/c_1-2r_j/c_j) + \varphi_0 + \pi) \quad (13)$$

$t=2x_1/c_1+4r_j/c_j$ 时刻, 2 次回波至, 其引起波源处的振动表达式为

$$y(0,t) = 2A \exp(-s(t-2x_1/c_1-4r_j/c_j)) \exp(-2\alpha_1 x_1 - 4\alpha_j r_j) m_{1j} n_{2j} n_{1j} n_{2j} m_{j1} \sin(\omega(t-2x_1/c_1-4r_j/c_j) + \varphi_0 + \pi) \quad (14)$$

因节理充填物的衰减作用和节理两界面的多次反射透射, 3 次以后的各次回波引起波源处的振动幅度很小, 不易被精确测得, 且不被用于后面的反演计算, 故不作研究。

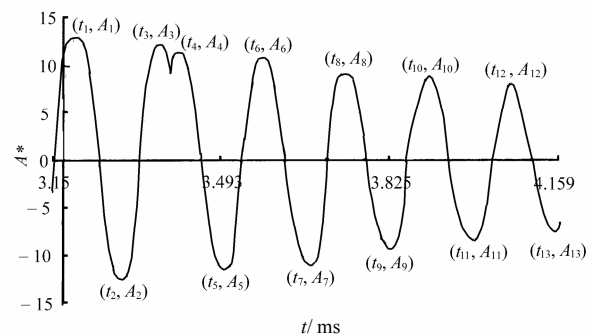


图 2 模拟出的波源处振动曲线($\omega=37693$ rad/s)

Fig.2 The simulated vibration curve at the wave source

波源处的振动组合即为原波与 0 次、1 次、2 次回波引起的振动之和, 0 次以后的各次回波到达

波源处的时间差值均为 $2r_j/c_j$, 在振动曲线上应表现为相同时间间隔的抖动。

图 2 为根据以上理论模拟波源处在 3.16~4.16 ms 时间区间的振动曲线图, 模型采用的参数值为 $s=235.58\text{s}^{-1}$, $x_1=3.395\text{ m}$, $r_j=0.05\text{ m}$, $\rho_1=\rho_2=2.4\text{ g/cm}^3$, $c_1=c_2=2000\text{ m/s}$, $c_j=300\text{ m/s}$, $\rho_j=1.5\text{ g/cm}^3$, $Q_j=15$, $Q_1=80$, $\omega=37693\text{ rad/s}$, $A=20$, $\varphi_0=0$ 。

5 反演节理特征

5.1 反演依据与目标

在波源处放置测试仪与信号采集仪, 就可测出波源处的振动曲线, 通过信号分析或选取特定通道的传感器可得到某一频率振动曲线。

振动衰减系数 s 可直接由振动曲线得到, 因其大小不影响参数反演结果, 本文以后将不再提及。节理左侧岩石的密度与波在其中的传播速度 ρ_1 、 c_1 、品质因子 Q_1 可视为已知量, 需通过反演得到的量为 x_1 、 ρ_j 、 c_j 、 Q_j 、 r_j 。

节理右侧岩石的密度与波在其中的传播速度 ρ_2 、 c_2 是以组合的形式 $\rho_2 c_2$ 出现, 因不能提供测试面, 大多数情况下不易测得, 看作未知量。

需要指出的是, 波源处的振动为半空间内各个方向的振动合成, 反演所用的原波只是引起某一个方向上(垂直节理面方向)的振动, 因此, 传感器不能直接测出原波的振幅极值 A , A 亦为未知量, 在模拟振动曲线时也是令波源处起始时刻测得振幅为 A 的某一大于 1 的倍数。

5.2 反演步骤与原理

因 0 次回波具有较大的振幅, 其初至时刻 t_s 通常可由振动曲线直接观察出, 如图 2 所模拟的波源处振动曲线, 由图可明显判断出 0 次回波初至时刻为 $t_s=3.395$, 这样可建立方程一:

$$2x_1/c_1 = t_s \quad (15)$$

由上式即可解出 x_1 值。

为表达方便起见, 以下介绍反演过程时主要以图 2 的模拟振动曲线说明。不考虑 0 次回波时, t_5 时刻波源处的振幅 A_{t_5} 可由插值法计算:

$$A_{t_5} = A_3 + (t_5 - t_3)(A_3 - A_1)/(t_3 - t_1) \quad (16)$$

式(16)中用到的振幅(如 A_{t_5} 、 A_3 、 A_1 等)均是指振幅的绝对值, 以下同。

0 次回波引起的振动初相位为 $-\omega t_s + \varphi_0$, 与波源处原振动的相位差 $\Delta\varphi_0$ 为 ωt_s , 即为 0 次回波与原波的相位差, 这是因为 0 次回波到来之前, 波源处各个方向的振动由同一扰力产生, 同一频率的振动

在各个方向上应具有相同的初相位。而 t_5 时刻合成波的振幅为 A_5 , 根据向量的相加法则, t_5 时刻零次回波引起的振幅 $A_{t_5}^{(0)}$:

$$A_{t_5}^{(0)} = \frac{2A_5 \cos(\pi - \Delta\varphi_0) \pm D}{2}$$

其中 (17)

$$D = \sqrt{(-2A_5 \cos(\pi - \Delta\varphi_0))^2 - 4((A_5)^2 - (A_5)^2)}$$

可根据结果的合理性对式中“ $\pm$ ”号作取舍。

而合成波的相位为 φ_{00} :

$$\varphi_{00} = \arctan\left(\frac{A_{t_5} \sin(\varphi_0) + A_{t_5}^{(0)} \sin(\varphi_0 - \omega t_s)}{A_{t_5} \cos(\varphi_0) + A_{t_5}^{(0)} \cos(\varphi_0 - \omega t_s)}\right) \quad (18)$$

在 $A_{t_5}^{(0)}$ 基础上考虑振动衰减可求出 $A^{(0)}$, 同样按时间插值:

$$A^{(0)} = A_{t_5}^{(0)} - (t_5 - t_s)(A_3 - A_1)/(t_3 - t_1) \quad (19)$$

结合式(12)可得到第 2 个方程:

$$2A \exp(-2\alpha_1 x_1) n_{1j} = A^{(0)} \quad (20)$$

因 1 次、2 次回波引起的振动幅度明显小于 0 次回波, 根据某一振动曲线可能难以判断出它们各自初至时刻。如图 2 的模拟振动曲线, 根据振幅的不均匀变化性只能判断 1 次回波的初至时刻位于 $t_7 \sim t_8$ 时间段, 2 次回波的初至时刻位于 $t_{11} \sim t_{12}$ 时间段, 据此建立以下方程:

$$t_7 \leq 2r_j/c_j + t_s \leq t_8 \quad t_{11} \leq 4r_j/c_j + t_s \leq t_{12} \quad (21)$$

据此可求出 $2r_j/c_j$ 的大小在 0.296 9~0.336 0 ms 之间, 采用 Hilbert 变换的复信号分析法可提高求解精度, 限于篇幅, 在此不作详细介绍, 直接给出 $2r_j/c_j$ 的准确值为 0.333 3 ms, $2r_j/c_j$ 值的求解精度对后面反演节理其他参数的影响程度与所选用的频率值有关, 当选用的频率较小时, 对 $2r_j/c_j$ 值的求解精度要求要低些。

1 次回波引起的振动初相位为 $-\omega t_s - \omega 2r_j/c_j + \varphi_0 + \pi$, 2 次回波引起的振动初相位为 $-\omega t_s - \omega 4r_j/c_j + \varphi_0 + \pi$, 按照计算 $A^{(0)}$ 、 φ_{00} 同样的原理, 根据振动曲线图数据, 可依次计算出 1 次回波引起的振幅极值 $A^{(1)}$ 、合成波(原波+0 波+1 次回波)相位 φ_{11} 、2 次回波引起的振幅极值 $A^{(2)}$ 。

结合式(13)、(14)可列出以下两方程:

$$2A \exp(-2\alpha_1 x_1 - 2\alpha_j r_j) m_{1j} n_{2j} m_{j1} = A^{(1)} \quad (22)$$

$$A^{(2)}/A^{(1)} = n_{2j} n_{1j} \exp(-2\alpha_j r_j) \quad (23)$$

根据 2 个不同频率 ω_e 、 ω_j 的振动曲线, 求出各自的 0 次回波引起的振幅极值 $A^{(0)}(\omega_e)$ 、 $A^{(0)}(\omega_j)$, 1

次回波引起的振幅极值 $A^{(1)}(\omega_e)$ 、 $A^{(1)}(\omega_f)$ ，由式 (12) 可知，0 次回波引起的振幅极值的比值满足：

$$\frac{A^{(0)}(\omega_e)}{A^{(0)}(\omega_f)} = \frac{A(\omega_e)}{A(\omega_f)} \exp(-2 \frac{\omega_e - \omega_f}{2c_1 Q_1} x_1) \quad (24)$$

式中 $A(\omega_e)/A(\omega_f)$ 为原波中两种频率成分的振幅比值。

由式 (13) 可知，1 次回波引起的振幅极值的比值满足：

$$\frac{A^{(1)}(\omega_e)}{A^{(1)}(\omega_f)} = \frac{A(\omega_e)}{A(\omega_f)} \exp(-2 \frac{\omega_e - \omega_f}{2c_1 Q_1} x_1 - 2 \frac{\omega_e - \omega_f}{2c_j Q_j} r_j) \quad (25)$$

式 (24)、(25) 结合可得到最后一个所需的方程：

$$\frac{A^{(1)}(\omega_e)}{A^{(1)}(\omega_f)} = \frac{A^{(0)}(\omega_e)}{A^{(0)}(\omega_f)} \exp(-2 \frac{\omega_e - \omega_f}{2c_j Q_j} r_j) \quad (26)$$

因波源处各个方向的振动由同一扰力产生，可认为在起始时刻各个方向上的振动具有相似的频域振幅谱（振幅大小不等但分布形式相同）， $A(\omega_e)/A(\omega_f)$ 的大小可通过对传感器测出的振动时域记录作时频变换后得到。这样当节理左侧岩石 Q_1 或 c_1 在波的传播路径上有一定的不均匀性时，可通过式 (24) 来求得 $c_1 Q_1$ 。

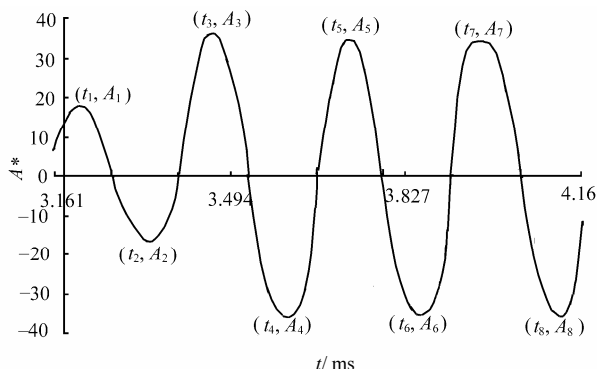


图 3 模拟出的波源处振动曲线($\omega=24\ 000\ \text{rad/s}$)

Fig.3 The simulated vibration curve at the wave source

5.3 理论模型的反演结果

对上节选取的理论模型作反演，已知参数值为 $\rho_1 = 2.4\ \text{g/cm}^3$, $c_1 = 2000\ \text{m/s}$, $Q_1 = 80$ ，图 2 为选取 $\omega = 37693\ \text{rad/s}$ 时得到的模拟振动曲线，由 5.2 节知，要得到反演参数值，至少需选取两个不同频率值，图 3 为选取 $\omega = 24000\ \text{rad/s}$ 时得到的模拟振动曲线。 x_1 、 r_j/c_j 的值已在前面反演得到，其余参数的反演结果如表 1 所示，由表可见，尽管是理论模型的反演， $\rho_2 c_2$ 、 Q_j 的反演结果与原采用参数值还是有一

定的误差， $\rho_2 c_2$ 的反演误差由 Q_j 的反演误差引起，而 Q_j 的反演误差主要是由选取 $\omega = 376\ 93\ \text{rad/s}$ 时根据振动曲线反演出的 $A^{(1)}$ 有一定的误差引起 ($A^{(1)}$ 值应为 3.071 5)，这是因为在采用向量运算法分解出各次回波时，会出现累积误差，当频率选取得小时，累积误差的影响要弱些。

表 1 理论模型的反演结果表

Table 1 the results of inverse study for theoretic model

反演流程	图 2 振动曲线 $\omega=37\ 693\ \text{rad/s}$	图 3 振动曲线 $\omega=24\ 000\ \text{rad/s}$
已知	$\rho_1=2.4\ \text{g/cm}^3$, $c_1=2000\ \text{m/s}$, $Q_1=80$	
已反演	$t_s=3.395$, $x_1=3.395\ \text{m}$, $2r_j/c_j=0.3333\ \text{ms}$	
曲线数据	$(t_1, A_1)=(3.2075, 12.7602)$	$(t_1, A_1)=(3.2069, 16.8134)$
	$(t_3, A_3)=(3.3742, 12.2688)$	$(t_2, A_2)=(3.3378, 16.4865)$
	$(t_5, A_5)=(3.4940, 11.0229)$	$(t_3, A_3)=(3.4646, 35.7048)$
反演结果	$A^{(0)}=14.8846$	$A^{(0)}=19.9220$
曲线数据	$\phi_{00}=-1.371$	$\phi_{00}=0.1107$
	$(t_7, A_7)=(3.6607, 10.5984)$	$(t_4, A_4)=(3.5955, 35.0106)$
	$(t_9, A_9)=(3.8222, 8.7552)$	$(t_6, A_6)=(3.8512, 34.2760)$
反演结果	$A^{(1)}=3.0455$	$A^{(1)}=4.7896$
式(26)求解	$\phi_{11}=-1.095$	$\phi_{11}=0.2481$
曲线数据	$Q_j=14.2$	
	$(t_{11}, A_{11})=(3.988\ 9, 8.4181)$	$(t_7, A_7)=(3.982\ 1, 33.6096)$
	$(t_{13}, A_{13})=(4.150\ 4, 7.7337)$	$(t_8, A_8)=(4.113\ 0, 35.3086)$
反演结果	$A^{(2)}=2.5031$	$A^{(2)}=1.3439$
联立式(20)、(22)、(23)求解	$A=20.04$, $\rho_2 c_2=4934.2$, $\rho_j c_j=455.8$	$A=20.03$, $\rho_2 c_2=5100.1$, $\rho_j c_j=452.8$

6 结 论

(1) 根据应力波反射原理，应用本文提出的反演模型，不仅能反演出节理的基本特征，包括：节理的位置、节理内充填物的波阻抗、品质因子、以及节理宽度与波速比值，而且还能反演出节理另一侧岩石的波阻抗，另外，当入射侧岩石品质因子或波在其中的传播速度沿波的传播路径有一定的不均匀性时，模型也有很好的考虑，这一成果无疑将扩大应力波在节理岩体反演中的应用范围。

(2) 本文从理论上提出了节理多参数反演的思路，在实际应用中还有一些问题需要解决，主要是如何采用应力波事先判断节理方位，以选取垂直于节理面的接发方向，如何更精确地从振动时域记录分离出某一频率的振动曲线，以及在现场试验时如何接收到最理想的信号，这都是下一步研究的重点。

参 考 文 献

- [1] 王明洋, 钱七虎. 爆炸应力波通过节理裂隙带的衰减规律[J]. 岩土工程学报. 1995, 17(5): 42—46.
Wang Ming-yang, Qian Qi-hu. Attenuation law of

- explosive wave propagation in cracks[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995,17(5):42—46.
- [2] Y K Wu, Propagation Characteristics of Blast-induced Shock Waves in Jointed Rock Mass[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 1998,(17): 407—412.
- [3] 崔新壮, 陈士海, 刘德成. 在裂隙岩体中传播的应力波的衰减机理[J]. 工程爆破. 1999,5(1): 18—21.
- CUI Xinzhang, CHEN Shihai. Attenuation Mechanism of Stress Wave Propagating in Crack Rock Mass[J]. **Engineering Blasting**, 1999,5(1): 18—22.
- [4] 王鲁明, 赵坚, 华安增, 等. 节理岩体中应力波传播规律研究的进展[J]. 岩土力学. 2003,24(Supp.): 602—610.
- WANG Lu-ming, ZHAO Jian, HUA An-zeng, et al. The Progress in Study of Regularity of a Stress Wave Propagation in the Jointed Rock Mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003,24(Supp.): 602—610.
- [5] Barry H.G. Brady, Dynamic Behavior of Rock[A]. Dynamics/Rock Excavation[C]. [s.l.];[s.n], 1995.
- [6] 卢文波. 应力波与可滑移岩石界面间的相互作用研究[J]. 岩土力学. 1996.17(3): 71—75.
- Lu Wenbo. A Study on Interaction Between Stress Wave and Slipping Rock Interface[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1996.17(3): 71—75.
- [7] 王靖涛. 桩基应力波检测理论及工程应用[M]北京: 地震出版社. 1999.
- [8] 朱国维, 彭苏萍, 王怀秀. 高频应力波检测锚固密实状况的试验研究[J]. 岩土力学. 2002. 23(6): 787—791.
- ZHU Guo-wei, PENG Su-ping, Wang Huai-xiu. Test research on grouted density inspection of bolts using high frequency stress wave[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002.23(6): 787—791.
- [9] 施建新. 岩体灌浆检测方法及其适用性评价[J]. 水文地质工程地质. 2002. 4: 70-73.(SHI Jian-xin. The detection methods of rock mass grouting and applicability evaluation[J]. **Hydrological Geology and Engineering Geology**, 2002. 4: 70—73.
- [10] 邱海涛, 赵永贵, 谭卓英, 等. 声波无损检测技术在南昆铁路隧道检测中的应用[J]. 广西地质. 2002.15(3): 75—78.
- [11] 李张明, 练继建, 戚蓝. 地震波动层析成像技术探测复杂岩体结构应用研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2004.23(1): 107-111.
- LI Zhang-ming, LIAN Ji-jian, Qi Lan. Study on detection of complex rock structure by CT technique of seismic wave[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004.23(1): 107—111.
- [12] 吴俊, 应松, 李苍松. 路基挡墙背后回填质量声波检测新技术[J]. 路基工程. 2003 增刊: 29—31.
- [13] 赵明阶, 徐蓉. 用弹性波速计算正交各向异性岩体的裂隙张量[J]. 重庆建筑大学学报. 1999.21(2): 42-48.
- ZHAO Ming-jie, XU Rong. A calculating method for the crack tensor of the orthotropic rock mass by the elastic wave velocity[J]. **Journal of Chongqing Jianzhu University**. 1999, 21(2): 42—48.
- [14] 简文彬, 吴振祥, 邓鼎兴. 某地下工程围岩的声波频谱特性[J]. 岩土力学. 2003.24(supp.): 623-626.
- JIAN Wen-bin, WU Zheng-xiang, DENG Ding-xing. On the character of frequency spectrum for an underground engineering wall rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003,24(Supp.): 623—626.
- [15] 尹向宝. 超声波检测技术在岩体物性测试中的应用[J]. 煤炭技术. 2003.22(10): 89—90.
- YIN Xiang-bao. Application of the ultrasonic detection technology in the rock body thing test[J]. **Coal Technology**. 2003.22(10): 89—90.
- [16] 李宁, 韩烜, 陈蕴生. 岩体节理刚度系数的现场声波测试[J]. 应用力学学报. 1998.15(3): 119—123.
- LI Ning, HAN Xuan, CHEN Yun-sheng. Test the stiffness coefficient for a rock mass joint using acoustic wave on spot[J]. **Chinese Journal of Applied Mechanics**. 1998.15(3): 119—123.
- [17] 吴德伦, 赵明阶. 岩石细观力学参数的反演研究[J]. 岩石力学与工程学报. 1996.15: 433—439.
- WU De-lun, ZHAO Ming-jie. An Inverse Study on Micromechanical Parameters of Rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**. 1996.15: 433—439.