

文章编号: 1000-7598 (2010) 11-3487-06

岩体中应力波幅值随时空衰减的关系

王观石^{1,2}, 李长洪², 胡世丽¹, 冯 春³, 李世海³

(1. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083;
3. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

摘 要: 把岩石抽象为 Kelvin-Voigt 黏弹性体, 应用复数理论建立了应力波在岩石中传播时的振动频率和波动频率的关系, 在此基础上, 研究了岩石和含有一组平行结构面的岩体中应力波幅值随时间和随空间衰减的关系。研究表明, 应力波在岩石的传播过程中, 频率是影响应力波幅值衰减的主要因素; 应力波在含有 1 组平行结构面岩体的传播过程中, 由于结构面的存在, 影响了应力波能量的传播, 其幅值随时空衰减系数主要由结构面间距及其反射系数决定, 结构面间距减小和反射系数增加, 幅值随传播距离的衰减系数增加和随时间的衰减系数减小, 而结构面的黏性系数增加, 幅值随传播距离的衰减系数增加, 但随时间的衰减系数变化很小。上述结论对岩体结构探测具有重要的指导意义。

关 键 词: 黏弹性体; 应力波; 衰减系数; 应力波探测

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

A study of time-and spatial-attenuation of stress wave amplitude in rock mass

WANG Guan-shi^{1,2}, LI Chang-hong², HU Shi-li¹, FENG Chun³, LI Shi-hai³

(1. School of Architectural and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China;
2. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The relation between wave frequency and vibration frequency in Kelvin-Voigt viscoelastic medium was studied by applying the plural theory. The time- and spatial-attenuation of wave amplitude was studied in rock and rock mass with a series of parallel interfaces. The study indicated that the attenuation of stress wave amplitude was mainly decided by vibration frequency of stress wave. Stress wave energy was influenced by interface in rock mass with a series of parallel interfaces. And the time- and spatial-attenuation of stress wave amplitude is decided by distance and reflection coefficient of interface. The decrease of distance of interfaces and the increase of reflection coefficient resulted in increase of spatial-attenuation of rock mass and decrease of time-attenuation, while increase of viscosity coefficient led to the increase of spatial-attenuation and almost the same time-attenuation. This study result played an important role in detecting rock mass structure.

Key words: viscoelastic medium; stress wave; attenuation coefficient; detecting of stress wave

1 引 言

应力波在岩体中传播时, 空间各点的振动幅值会随传播距离增加而衰减, 本文简称为空间衰减; 空间每一点的振动幅值又会随时间增加而衰减, 本文简称为时间衰减。造成这两种衰减的原因主要包括物理因素和几何因素两方面, 物理因素主要是由岩体介质的非完全弹性引起的衰减, 也称固有衰减, 其作用的结果是将一部分能量转换成热能而耗散掉。几何因素主要是由于波阵面的扩展、应力波在

结构面的反射、折射等引起振动幅值的衰减, 其作用的结果是改变应力波能量在空间的分布^[1]。

有关物理因素引起的衰减, 文献[2-6]引入复模量及复波速等概念, 研究了黏弹性体的波速及衰减的问题。苑春方^[7]运用脉冲叠加原理, 讨论了地震波在 Kelvin-Voigt 均匀黏弹性介质中的传播速度和衰减, 推导出了地震波的衰减系数和传播速度与介质的密度、弹性模量及黏滞系数之间的精确关系。有关几何因素引起的衰减。文献[8-12]用节理刚度来描述结构面, 研究了应力波在结构面的传播

收稿日期: 2009-09-16

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (No. 10632100)。

第一作者简介: 王观石, 男, 1977 年生, 博士, 讲师, 主要从事爆破与岩体动力学研究方面的工作。E-mail: wgsy010@126.com

过程,得到了单结构面透、反射系数,并解释了结构面的低通滤波特性,在此基础上,还研究了一组平行结构面的透射系数及结构面非线性变形引起的波动现象。由于岩体中存在各种层次的结构,使岩体的力学性能表现为各向异性,文献[13]研究了岩体中波速和衰减的各向异性。

空间衰减和时间衰减都是从某方面反映了介质的力学参数和结构参数,但上述研究主要集中在介质力学参数和岩体结构引起的振动幅值的空间衰减,很少将时间衰减和空间衰减结合起来研究。空间衰减系数多采用空间各点振动幅值拟合来求得,因而空间衰减反映岩体的信息非常有限,由于岩体的多样性及岩体结构的复杂性,导致根据空间衰减来反分析岩体是非常困难的。时间衰减从另一个角度反映岩体的材料及结构,为反分析岩体提供更多的信息,对解决岩体反分析的多解性是一种新思路。

本文把岩石抽象为 Kelvin-Voigt 黏弹性体,研究岩石中应力波幅值随时间和空间衰减两者间的关系;把结构面抽象成相对岩块具有高黏性、低弹性模量、有一定厚度的薄层,在此基础上研究具有一组平行结构面的岩体中应力波幅值随时间和空间衰减的关系。

2 岩石中应力波频率的衰减规律

Kelvin-Voigt 黏弹性体的物理方程为^[2]

$$\sigma = E_V \varepsilon + \eta_V \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (1)$$

式中: σ 为应力; ε 为应变; E_V 为弹性模量; η_V 为黏性系数; t 为时间。

纵波的控制方程:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}; \rho \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} \quad (2)$$

式中: v 为质点振动速度; ρ 为密度。

把式(1)代入式(2)可得 Kelvin-Voigt 体中纵波的控制方程:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E_V \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta_V \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (3)$$

式中: u 为 x 方向的位移。

把岩石抽象为 Kelvin-Voigt 黏弹性体,式(3)就是应力波在岩石中传播时的控制方程。现讨论岩石中某一点振动衰减情况。设质点与震源的距离为 x ,以谐波解试之:

$$u(x, t) = u_0 e^{i(\omega_1 t - k_1 x)} \quad (4)$$

式中: u_0 为振幅; ω_1 为角频率; k_1 为应力波在岩石中的响应波数; i 为虚数单位。把式(4)代入式(3)

可得

$$\rho \omega_1^2 = E_V k_1^2 + i \eta_V k_1^2 \omega_1 \quad (5)$$

这是一个复数关系。如果 k_1 是实数,则 ω_1 必为复数,令

$$\omega_1 = \omega_w + i \alpha_1 \quad (6)$$

式中: ω_w 为波动频率; α_1 为应力波幅值随时间的衰减系数。由于 k_1 是实数,根据波数和频率的关系 $\omega = kC$ (ω 为频率; k 为波数; C 为实波速),即 $\omega_w = k_1 C$ 。 ω_w 是由 k_1 确定的,反映波的传播特性,由此,称 ω_w 为岩石中的波动频率。由于介质的弹性作用力,质点 A (介质中任意一点) 的振动会带动周围其他质点振动,若在波的行进方向有一质点 B ,与质点 A 的距离为一个波长,质点 A 、 B 都有各自的振动频率,如果认为质点 A 的频率是输入频率,则质点 B 的频率是响应频率。为体现质点 A 和 B 间的相互关系,本文称质点 A 的频率为振动频率,质点 B 的频率为波动频率。

把式(6)代入式(4),于是得到岩石中与震源距离为 x 处质点的振动波形:

$$u = u_0 e^{-\alpha_1 t} e^{i(\omega_1 t - k_1 x)} \quad (7)$$

从式(7)可以看出,振幅随时间增加会发生衰减,衰减系数为 α_1 。

把式(6)代入式(5),由复数的实部和虚部分别相等可得

$$\omega_w = k_1 \sqrt{\frac{E_V}{\rho} - \frac{\eta_V^2 k_1^2}{4\rho^2}}; \alpha_1 = \frac{\eta_V k_1^2}{2\rho} \quad (8)$$

由式(8)可以看出,考虑岩石的黏性,即 $\eta_V > 0$,波动频率会发生衰减,质点的振动幅值也发生衰减。

文献[2]给出了 Kelvin-Voigt 体中应力波幅值的空间衰减关系:

$$u = u_0 e^{-\alpha_s x} e^{i(\omega_q t - k_s x)} \quad (9)$$

式中: u_0 为振幅; ω_q 为振动频率; α_s 为振动峰值随空间的衰减系数; k_s 为黏弹性体的空间响应波数。式(9)描述的是应力波峰值与传播距离的关系,该式隐含了一个假设,即应力波在传播过程中频率不变,对于弹性介质,这个假设成立,而在黏弹性介质中,频率会发生衰减,因而有一定的误差。 k_s 和 α_s 的计算如下:

$$k_s^2 = \frac{\rho E_V \omega_q^2}{2(E_V^2 + \eta_V^2 \omega_q^2)} \left(\sqrt{1 + \frac{\eta_V^2 \omega_q^2}{E_V^2}} + 1 \right) \quad (10)$$

$$\alpha_s^2 = \frac{\rho E_V \omega_q^2}{2(E_V^2 + \eta_V^2 \omega_q^2)} \left(\sqrt{1 + \frac{\eta_V^2 \omega_q^2}{E_V^2}} - 1 \right) \quad (11)$$

波数反映的是应力波传播特性，可以认为 $k_t = k_s$ 。把式 (10) 代入式 (8) 可得到黏弹性体波动频率与振动频率间关系：

$$\omega_w^2 = \frac{E_V^2 \omega_q^2 \left(\sqrt{1 + \frac{\eta_V^2 \omega_q^2}{E_V^2}} + 1 \right)}{2(E_V^2 - \eta_V^2 \omega_q^2)} \left[1 - \frac{\eta_V^2 \omega_q^2}{8(E_V^2 - \eta_V^2 \omega_q^2)} \left(\sqrt{1 + \frac{\eta_V^2 \omega_q^2}{E_V^2}} + 1 \right) \right] \quad (12)$$

由式 (12) 可以看出，如果是弹性体，即黏性系数 $\eta_V=0$ ，则波动频率等于振动频率，即应力波在弹性体中传播时没有频率损失。式 (12) 表明，波动频率 ω_w 是一个关于材料参数，包括密度、弹性模量和黏性系数、空间位置和振动频率 ω_q 的函数，反映了应力波在传播过程中的频率损失，波动频率和振动频率间的关系不直观，考虑黏性时，由式(12) 得到波动频率和振动频率的关系，如图 1、2 所示。

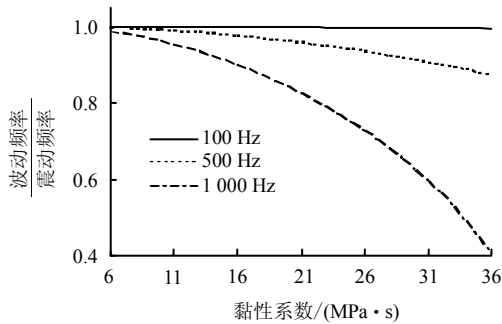


图 1 黏性系数与波动频率和振动频率之比的关系
Fig.1 Relation of viscosity coefficient and the ratio of wave frequency and vibration frequency

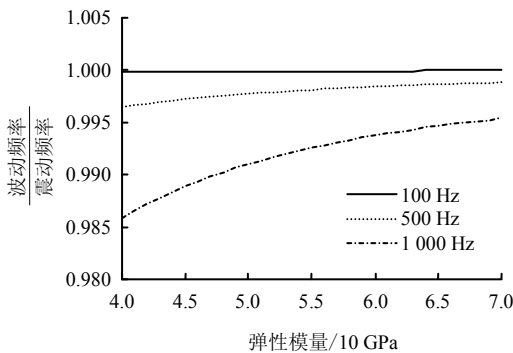


图 2 弹性模量与波动频率和振动频率之比的关系
Fig.2 Relation of elastic modulus and the ratio of wave frequency and vibration frequency

图 1 中的弹性模量 $E_V=40$ GPa，图 2 中的黏性系数 $\eta_V=6$ MPa·s。为讨论方便，定义 $r = \omega_w/\omega_q$ 。从图 1 中可以看出， r 始终小于 1，随着黏性系数的增加， r 减小，频率越大， r 减小得越快，这说明应力波在黏弹黏性体中传播时频率发生衰减，频率越大，衰减得越快。从图 2 中可以看出，随着弹性模量的增加， r 增加，频率越大，增加得越快，这说明应力波在弹性模量大的材料中传播时，频率衰减得慢。比较图 1 和图 2，相对于弹性模量，黏性系数变化引起 r 的变化是主要的。应力波在黏弹性体中传播时，由于高频谐波频率变化大，低频谐波频率变化小，即传播过程中频谱发生变化，这就是导致发生波形变化的原因。

3 岩石中应力波幅值随时空衰减的关系

把式 (10) 代入式 (8) 的第 2 式可得到黏弹性体中某一点振动的时间衰减系数：

$$\alpha_t = \frac{\eta_V E_V \omega_q^2}{4(E_V^2 + \eta_V^2 \omega_q^2)} \left(\sqrt{1 + \frac{\eta_V^2 \omega_q^2}{E_V^2}} + 1 \right) \quad (13)$$

由式 (11)、(13) 可以看出，影响时间衰减和空间衰减的因素有弹性模量、黏性系数和振动频率。时间衰减系数的量纲为 T^{-1} ，空间衰减系数的量纲为 L^{-1} ，二者的量纲不一致，而且两者在数量上相差 3~4 个数量级，为了便于比较，选择某一工况的衰减系数为参考值，其他工况的衰减系数与该工况的衰减系数之比作为比较量，本文称之为衰减系数比，幅值随时间和空间的衰减系数比与频率、黏性系数和弹性模量的关系如图 3~5 所示。参考工况：密度 $\rho=2\ 500$ kg/m³，弹性模量 $E_V=40$ GPa，黏性系数 $\eta_V=60$ MPa·s，振动频率 $\omega_q=100$ Hz，此时幅值随时间的衰减系数为 $7.4\ s^{-1}$ ，幅值随空间的衰减系数为 $1.85 \times 10^{-3}\ m^{-1}$ 。图 3 为振动频率与幅值随时空衰减的关系 ($\eta_V=60$ MPa·s, $E_V=40$ GPa)，从图中可以看出，无论是幅值随空间衰减还是随时间衰减，高频谐波都比低频谐波衰减快，频率越大，幅值随时间的衰减系数比随空间的衰减系数变化的越大。图 4 为黏性系数与幅值随时空衰减的关系 ($\omega_q = 800$ Hz, $E_V=40$ GPa)。从图中可以看出，黏性系数增大，使时间衰减系数和空间衰减系数增大，与黏性系数可以近似为线性关系。图 5 为弹性模量与幅值随时空衰减的关系 ($\eta_V=60$ MPa·s, $\omega=800$ Hz)，从图中可以看出，弹性模量增大时，幅值随时空的衰减系数都减小，这是由于弹性模量增大导致能量传播速度增大引起的。结合图 3~5，同时考虑到岩石的材

料参数变化范围和应力波是连续谱的特点,可以认为应力波频率是影响其幅值衰减的最主要因素。

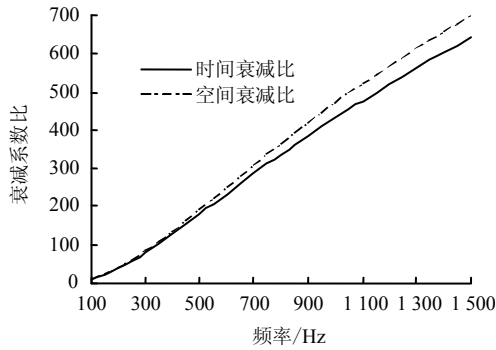


图 3 频率与时空衰减的关系
Fig.3 Relation of frequency and time- and spatial-attenuation

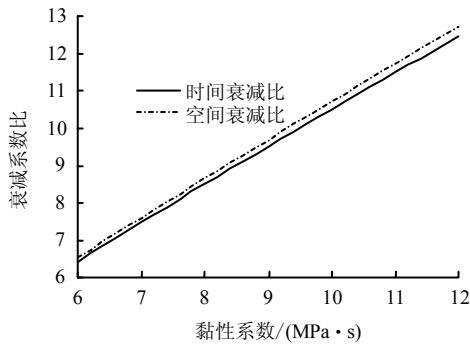


图 4 黏性系数与时空衰减的关系
Fig.4 Relation of viscosity coefficient and time- and spatial- attenuation

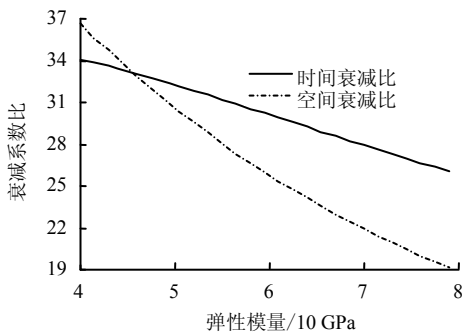


图 5 弹性模量与时空衰减的关系
Fig.5 Relation of elastic modulus and time- and spatial- attenuation

4 含 1 组平行结构面岩体中的时空衰减规律

岩体是由岩块和分割岩块的不连续面或结构面组成的地质体,应力波在岩体结构面处会产生反射、透射和波形分裂,影响应力波能量传播,岩体结构越复杂,应力波能量传播也越复杂,即使是对于含 1 组平行结构面的岩体也很难给出其解析表达式,

为此,本文采用数值模拟的手段研究含 1 组平行结构面岩体中应力波幅值随时空衰减的关系。把结构面抽象成相对于岩块具有高黏性、低弹性模量、有一定厚度的薄层,岩块与结构面是致密黏结的,结构面两侧的位移和应力都是连续的,但材料参数不连续。按照波动理论,应力波在结构面的透、反射系数是由波阻抗(一维问题的波阻抗 $Z = \sqrt{\rho E}$) 来确定。一般来说,岩体中结构面和岩块的密度相差很小,由此认为结构面的透、反射系数是主要由弹性模量变化所引起的,确定研究在给定结构面厚度条件下,研究结构面的弹性模量、阻尼和间距对岩体中应力波幅值随时空衰减的影响。

4.1 计算模型及参数

计算模型为长 40 m、横截面尺寸为 0.4 m×0.4 m 的岩体柱,两端为无反射边界,岩体柱的轴向为 y 方向,网格划分是 2×2×200,结构面在岩体中均匀分布,第 1 个结构面在 y =3 m 处。结构面厚度为 0.2 m,在 y =0 的截面形心加一载荷,如图 6 所示。岩块的材料参数为:弹性模量 $E_v=40$ GPa,密度 $\rho=2\ 500$ kg/m³,泊松比 $\mu=0.25$ 。结构面的密度 $\rho=2\ 500$ kg/m³ 和泊松比 $\mu=0.25$ 。采用 CDEM 程序^[11]计算输出 y =4、7、10、14、17、25、32 m 处的加速度。

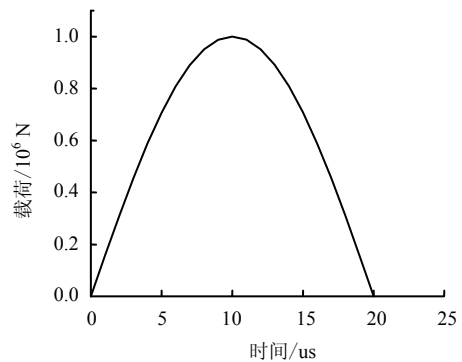


图 6 动态载荷图
Fig.6 Sketch of dynamic loads

4.2 结构面的间距和弹模对时空衰减的影响

笔者认为,岩体中密度变化很小,结构面的透、反射系数主要是由弹性模量变化引起的。岩块和结构面的黏性系数 $\eta_v = 6$ MPa·s,改变结构面的弹性模量和间距,计算得到空间各点的振动波形,画出各点加速度首峰值与到震源距离的曲线,用 e 指数进行拟合得到首峰值的空间衰减系数,衰减系数与弹性模量的关系如图 7 所示。用 e 指数拟合求得震源距离为 4、14、25 m 处的加速度幅值随时间的衰减系数,衰减系数与结构面弹性模量的关系如图 8 所示。

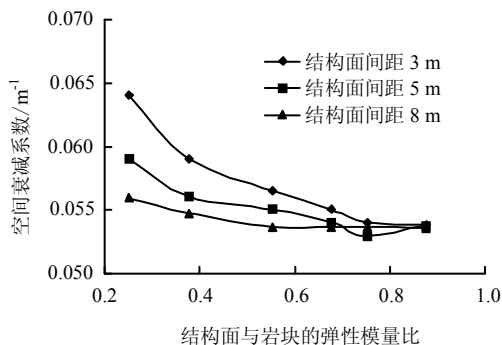


图 7 结构面弹性模量与空间衰减的关系
Fig.7 Relations of elastic modulus of interface and spatial attenuation

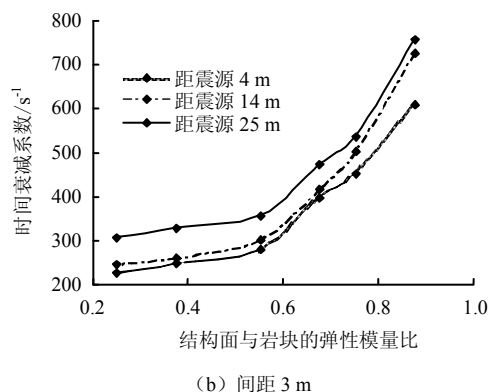
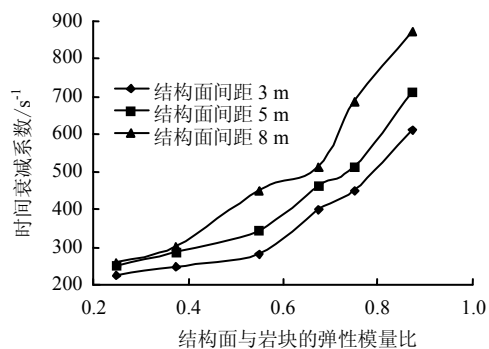


图 8 结构面弹性模量与时间衰减的关系
Fig.8 Relations of elastic modulus of interface and time attenuation

从图 7 可以看出，随结构面与块体的弹性模量比趋近于 1，应力波幅值随空间的衰减系数减小；结构面间距减小，衰减系数增大。从图 8 可以看出，随结构面与块体的弹性模量比趋近于 1，应力波幅值随时间的衰减系数增大；结构面间距减小，时间衰减系数减小；在相同结构面间距和结构面与块体的弹性模量比的条件下，距震源距离越远，衰减系数越大。结合图 7、8 可以得到结论，结构面与块体的弹性模量比及其间距对岩体中应力波幅值随时间衰减和空间衰减的影响是相反的，由于结构面的存在会产生反射波，使部分能量向震源方向“回流”，

从而使空间衰减系数增加，而结构面内侧的质点得到了多次“激震”和更多能量，从而表现为衰减系数减小，结构面的存在，“阻止”能量向外传播，影响了应力波能量在岩体中的分布。

4.3 结构面的间距和阻尼对时空衰减的影响

岩块和结构面的弹性模量 $E_V=40$ GPa，改变结构面的阻尼和间距，计算得到空间各点的振动波形，用 e 指数拟合得到应力波幅值随时空的衰减系数。图 9 为结构面阻尼与空间衰减系数的关系，图 10 为结构面阻尼与空间各点振动幅值随时间衰减的关系。从图 9 可以看出，随着结构面与块体的阻尼之比增大，空间衰减系数增大；结构面间距减小，衰减系数增大。图 10(a)表明，距震源越远，时间衰减系数越大，图 10(b)显示，结构面的阻尼和间距变化对空间各点的时间衰减系数影响很小。

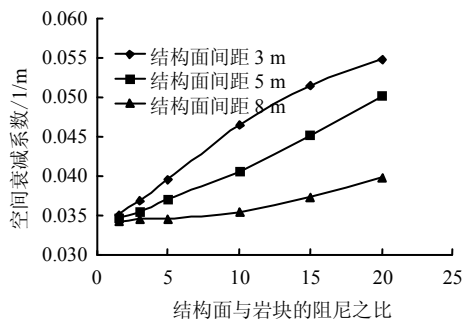


图 9 结构面阻尼与空间衰减的关系
Fig.9 Relations of damping of interface and spatial attenuation

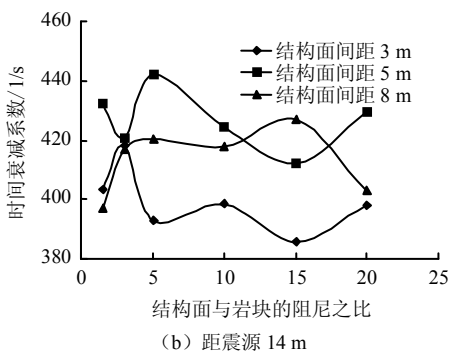
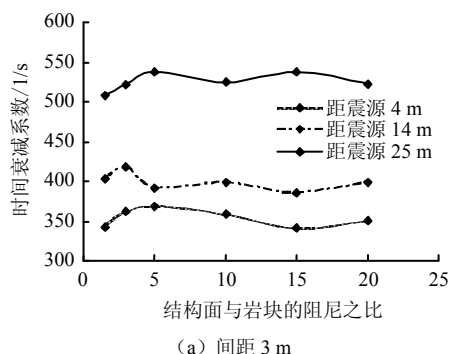


图 10 结构面阻尼与时间衰减的关系
Fig.10 Relations of elastic modulus of interface and time attenuation

5 结 论

(1) 把岩石抽象为 Kelvin-Voigt 黏弹性体, 运用复数理论建立了岩石中波动频率和振动频率的关系。讨论波动频率和振动频率之比 r 与黏性系数及弹性模量的关系, r 始终小于 1, 表明应力波在黏弹性介质传播过程中发生频率衰减; 黏性系数增加, r 减小, 频率越大, r 减小得越快; 弹性模量增加, r 增加, 频率越大, 增加得越快。相对于弹性模量, 黏性系数是引起频率衰减的主要因素。

(2) 岩石的弹性模量和黏性系数增大都会引起应力波幅值的时空衰减系数增加, 但黏性系数是引起应力波幅值随时空衰减的主要因素, 弹性模量和时间衰减系数的关系可以近似为线性关系, 而黏性系数与空间衰减系数的关系可以近似为指数关系。无论是空间衰减还是时间衰减, 高频谐波都比低频谐波衰减快; 空间衰减比时间衰减受频率更大。

(3) 结构面的存在, 影响了应力波能量在岩体中的传播, 使部分能量向震源方向“回流”, 因而结构面间距减小和反射系数增加都会使空间衰减系数增加, 而结构面内侧的质点得到了多次“激震”和更多能量, 引起时间衰减系数减小。应力波幅值随空间的衰减系数能反映结构面的弹性模量(阻抗)和阻尼变化, 而随时间的衰减系数只能反映弹性模量(或阻抗)的变化。

参 考 文 献

- [1] 刘建华, 胥颐, 郝天珧. 地震波衰减的物理机制研究[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(1): 1—7.
LIU Jian-hua, XU Yi, HAO Tian-ya. Study on physical mechanism of the seismic wave attenuation[J]. **Progress in Geophysics**, 2004, 19(1): 1—7.
- [2] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [3] 杜启振, 杨慧珠. 线性黏弹性各向异性介质速度频散和衰减特征研究[J]. 物理学报, 2002, 51(9): 2101—2108.
DU Qi-zhen, YANG Hui-zhu. Velocity dispersion and attenuation anisotropic linear viscoelastic media[J]. **Acta Physica Sinica**, 2002, 51(9): 2101—2108.
- [4] CAUSSE E, MITTET R, URSIN B. Preconditioning of full-waveform inversion in viscoacoustic media[J]. **Geophysics**, 1999, 64(1): 130—145.
- [5] WANG Hua-zhong, ZHANG Li-bin, Ma Zai-tian. Seismic wave imaging in visco-acoustic media[J]. **Science in China, Ser A**, 2004, 47(Supp. 1): 146—154.
- [6] 刘孝敏, 胡时胜, 陈智. 黏弹性 Hopkinson 压杆中波的衰减和弥散[J]. 固体力学学报, 2002, 23(1): 81—86.
LIU Xiao-min, HU Shi-sheng, CHEN Zhi. The wave propagation attenuation and dispersion in a viscoelastic Hopkinson pressure bar[J]. **ACTA Mechanica Sinica**, 2002, 23(1): 81—86.
- [7] 苑春方, 彭苏萍, 张中杰, 等. Kelvin-Voigt 均匀黏弹性介质中传播的地震波[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35(10): 957—962.
YUAN Chun-fang, PENG Su-ping, ZHANG Zhong-jie, et al. Seismic wave propagation in Kelvin-Voigt homogeneous viscoelastic medium[J]. **Science China Earth Sciences**, 2005, 35(10): 957—962.
- [8] 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): 70—75.
LU Wen-bo. A study on interaction between stress wave and slipping rock interface[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1996, 17(3): 70—75.
- [9] CAI J G, ZHAO J. Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock masses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, (37): 661—682.
- [10] 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(增刊): 602—606.
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—606.
- [11] 田振农, 李世海, 肖南. 应力波在一维节理岩体中传播规律的试验研究与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 2687—2693.
TIAN Zhen-nong, LI Shi-hai, XIAO Nan, et al. Experimental studies and numerical simulation of stress wave propagation in one-dimensional rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.1): 2687—2693.
- [12] 张秀丽, 焦玉勇, 刘泉声. 节理对爆炸波传播影响的数值研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 717—721.
ZHANG Xiu-li, JIAO Yu-yong, LIU Quan-sheng, et al. Numerical study on effect of joints on blasting wave propagation in rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(3): 717—721.
- [13] 刘财, 郭智奇, 杨宝俊, 等. 黏弹各向异性介质中波的反射与透射问题分析[J]. 地球物理学报, 2007, 50(4): 1216—1224.
LIU Cai, GUO Zhi-qi, YANG Bao-jun et al. Analysis of reflection and transmission problems of waves in viscoelastic anisotropic media[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2007, 50(4): 1216—1224.