

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.08.007

黏弹性节理岩体的位移不连续模型研究

王志亮^{1,2}, 陈 强², 张 宇^{2,3}

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;

3. 武警后勤学院 建筑工程系, 天津 300162)

摘 要: 选用三参数标准线性固体作为岩石本构, 提出了一种考虑岩体黏弹性的位移不连续模型; 根据一维黏弹性波的特征线法, 推导了节理处质点速度、应力和应变递推公式。首先, 基于分离式霍普金森压杆 (SHPB) 对砂层进行试验, 得到其应力-应变关系, 并换算出砂层节理的法向刚度; 接着, 通过一维强间断黏弹性波的波速公式、高频波衰减系数以及任一频率下的衰减系数, 确定出数值算法中的三参数。最后, 基于自制的摆锤装置, 探讨了一维应力波在节理岩体中的传播规律, 试验中以两根长 1 000 mm、直径为 68.50 mm 的岩杆作为入射和透射杆, 以 3 mm 砂层模拟节理。试验和数值结果吻合度良好, 进一步验证了该方法的可靠性。

关 键 词: 岩石; 黏弹性; 位移不连续模型; 特征线法; 波传播系数

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015)08-2177-07

A displacement discontinuity model for viscoelastic jointed rock mass

WANG Zhi-liang^{1,2}, CHEN Qiang², ZHANG Yu^{2,3}

(1. School of Civil & Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Department of Building Engineering, Logistics University of PAPF, Tianjin 300162, China)

Abstract: A viscoelastic displacement discontinuity model is proposed, in which the rock mass is viewed as a three-parameter standard linear solid. The recurrence formulations of particle velocity, stresses and strains at joint are developed based on the characteristic line method for the 1D viscoelastic wave. The dynamic stress-strain relationship of the sand layer is first determined by the split Hopkinson pressure bar (SHPB), which can be converted to the normal stiffness of joint. Then the three parameters for the standard linear solid are evaluated through the velocity formulation and the high frequency attenuation coefficient along with the arbitrary frequency attenuation coefficient of 1D strong discontinuity viscoelastic wave. Finally, by using two rock bars with a length of 1 000 mm and a diameter of 68.50 mm as the incident and reflected bars, respectively, the propagation of 1D stress wave in jointed rock mass is analyzed based on a homemade pendulum by using 3 mm sand layer as the alternative joint. Good agreement between the experimental and numerical results are demonstrated, showing the reliability of the proposed method.

Keywords: rock; viscoelasticity; displacement discontinuity model; characteristic line method; wave propagation coefficient

1 引 言

岩体中广泛存在着各种尺度的结构面, 如断层、软弱层面、节理等。结构面对岩体的性质具有非常重要的影响, 岩体的各种结构面使岩体具有不连续性、非均质性、各向异性和非线性等性质。应力波透过结构面后其强度降低, 波相和频率成分都会发生变化。在利用位移不连续模型处理应力波透过节

理组的相关问题时, 节理在波动方程中被处理为位移不连续边界条件。而由于应力波的波长一般都大于节理的厚度, 节理的厚度就可以忽略不计。此时节理可看作一根刚度为定值的弹簧。对于节理间的完整岩块, 先前的研究^[1]不考虑岩块对应力波的衰减作用, 将岩块考虑为线弹性体, 认为节理岩体所表现出的黏弹性行为都是由节理造成的。但近期研究表明^[2], 由于岩块中存在着大量的微孔洞和微裂

收稿日期: 2014-03-03

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51174145, No. 51379147); 教育部博士点专项资金 (No. 20120072110024); 中央高校基本科研业务费专项资金。

第一作者简介: 王志亮, 男, 1969 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石动力学方面的研究工作。E-mail: cviewzL@tongji.edu.cn

隙, 应力波透过岩块时, 微裂隙表面由于摩擦、散射等因素使波的能量发生衰减, 这时岩块表现出黏弹性性质。特别是近地表的岩石由于各种风化作用的影响, 对地震波的衰减表现的尤为明显。Ma 等^[3-4]讨论了考虑岩石黏弹性的重要性, 给出了岩石黏弹性对于纵波衰减的影响; 王志亮等^[5]为了选取合适的黏弹性本构来描述节理岩体, 探讨了朱-王-唐模型 (ZWT 模型) 参数的计算方法, 指出利用 ZWT 模型各个构件的物理意义来计算模型参数是一种比较合理的方法; Fan 等^[6]给出了一种波在黏弹性岩石中传播特性的位移不连续模型。虽然这种方法能够反映岩石的真实黏弹性性质, 但由于没有给出有代表性的本构模型, 使计算过程比较复杂, 而且不利于推广。

本文在采用简化的 ZWT 本构模型 (即三参数标准线性固体) 作为岩石黏弹性模型的基础上, 提出了一种黏弹性节理岩体的位移不连续模型, 并推导了该模型的递推公式。然后, 基于分离式霍普金森压杆与自制的摆锤装置, 开展了节理砂层的压缩试验以及一维节理岩体中的应力波传播试验, 并把试验结果与本文所提出的黏弹性节理岩体位移不连续模型算法结果进行对比。研究表明, 黏弹性节理岩体的位移不连续模型算法的计算结果与试验结果吻合较好, 从而验证了该模型的可靠性。

2 黏弹性节理岩体模型

2.1 岩体的黏弹性本构模型

研究表明^[5], ZWT 本构模型由于在一定频率范围能得到一个较为稳定的品质因子值, 较适合于描述岩石的黏弹性力学行为。对于作用时间较短 ($1 \sim 10^2 \mu\text{s}$) 的应力波, ZWT 模型可以简化为三参数标准线性固体^[7], 见图 1, 其本构方程为

$$E_2\sigma + \eta_2\dot{\sigma} = E_2E_a\varepsilon + (E_2 + E_a)\eta_2\dot{\varepsilon} \quad (1)$$

式中: E_2 、 η_2 和 E_a 分别为标准线性固体的三参数。 E_2 为高频麦克斯韦体 (Maxwell) 的弹簧常数; η_2 为高频麦克斯韦体黏性系数; E_a 为并联弹簧的弹性系数; σ 为岩石的应力; $\dot{\sigma}$ 为应力对时间的导数; ε 为岩石的应变; $\dot{\varepsilon}$ 为加载应变率, 即应变对时间的导数。

对于一维细长杆中黏弹性波的传播可采用文献 [8] 中特征线法进行求解。对于三参数黏弹性固体, 通过其物理平面上任意一点有 3 条特征线, 其方程为

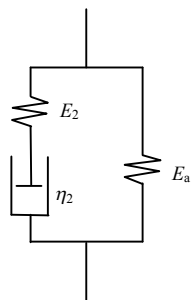


图 1 三参数标准线性固体

Fig.1 Three-parameter standard linear solid

$$\frac{dx}{dt} = \pm \sqrt{\frac{E_a + E_2}{\rho_0}} = \pm C_v \quad (2)$$

$$dx = 0 \quad (3)$$

而其相应的相容方程为

$$dv = \pm \frac{1}{\rho_0 C_v} d\sigma \pm \frac{\sigma - E_a \varepsilon}{\rho_0 C_v \theta_2} dt \quad (4)$$

$$d\varepsilon - \frac{d\sigma}{E_a + E_2} - \frac{\sigma - E_a \varepsilon}{(E_a + E_2)\theta_2} dt = 0 \quad (5)$$

式中: x 为波传播距离; v 为波传播的速度; ρ_0 为波在传播介质中的密度; C_v 为强间断波波速; θ_2 为麦克斯韦体的松弛时间, $\theta_2 = \frac{\eta_2}{E_2}$ 。因此, 在知道

杆件的边界条件和初始状态后, 就可利用沿特征线的有限差分法来计算任意时刻点的状态。

对于黏弹性材料, 不同频率的波在其中的衰减并不相同, 为了表述岩石中不同频率的波的衰减随频率的变化, 利用文献 [9-10] 所提出的波传播系数法计算三参数标准固体模型的参数。

对于一维杆件, 假设其密度为 ρ_0 , 复模量为 $E^*(\omega)$, 则在频域其波动控制方程为

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \gamma^2 \right) \varepsilon(x, \omega) = 0 \quad (6)$$

式中: γ 为波传播系数, $\gamma^2 = -\frac{\rho_0 \omega^2}{E^*(\omega)}$; ω 为角频率。

式 (6) 的解为

$$\varepsilon(x, \omega) = P(\omega)e^{-\gamma x} + Q(\omega)e^{\gamma x} \quad (7)$$

$$\sigma(x, \omega) = -\frac{\rho_0 \omega^2}{\gamma^2} [P(\omega)e^{-\gamma x} + Q(\omega)e^{\gamma x}] \quad (8)$$

式中: $P(\omega)$ 和 $Q(\omega)$ 分别为沿 x 轴正向和负向传播的波引起的轴向应变的 Fourier 变换, 则可知 $e^{-\gamma x}$ 和

$e^{\gamma x}$ 是反映波的衰减的项。

波传播系数 $\gamma(\omega)$ 和衰减系数 $\alpha(\omega)$ 及相速度 $c(\omega)$ 关系为

$$\gamma(\omega) = \alpha(\omega) + i \frac{\omega}{c(\omega)} \quad (9)$$

求出岩杆中波传播系数 $\gamma(\omega)$ 后, 其实部 $\alpha(\omega)$ 即为衰减系数与角频率间关系, 利用一维强间断黏弹性波的波速、高频波衰减系数以及任一频率下的衰减系数可列出 3 个方程, 如此就可得三参数标准线性固体三参数值。

2.2 节理的位移不连续模型

岩体节理采用位移不连续模型, 即应力波透过节理时, 节理两侧应力保持连续, 而位移不连续, 且节理两侧位移差等于节理两侧应力与节理刚度的比值。设节理的刚度为 k , 节理两侧物理量用上标区分, “+”表示节理左侧量, “-”表示节理右侧量, 则位移不连续模型表达为

$$\sigma^+ = \sigma^- = \sigma \quad (10)$$

$$u^+ - u^- = \sigma / k \quad (11)$$

式中: σ^+ 和 σ^- 分别为节理左、右侧岩体的应力; u^+ 、 u^- 分别为节理右、左侧岩体的位移。由于在波动方程中不出现质点位移量, 则可将式 (11) 两侧对时间求导数, 得

$$v^+(x_i, t_j) - v^-(x_i, t_j) = \frac{\partial \sigma(x_i, t_j)}{\partial t} \frac{1}{k} \quad (12)$$

若时间间隔 Δt 很小, 可用差分代替微分:

$$v^+(x_i, t_j) - v^-(x_i, t_j) = \frac{\sigma(x_i, t_j) - \sigma(x_i, t_{j-1})}{\Delta t} \frac{1}{k} \quad (13)$$

2.3 质点速度、应力和应变的递推公式

计算简图如图 2 所示, 假设已知 t_{j-1} 时刻杆的状态, 要推导 t_j 时刻节点 M_2 、 N_2 点的状态。

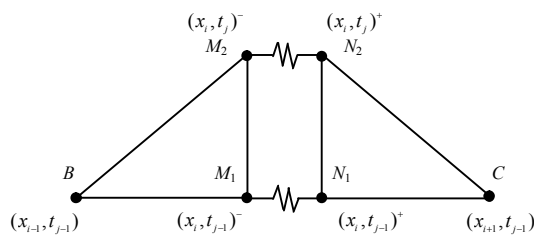


图 2 节理岩体应力波传播计算示意图
Fig.2 Calculation diagram of wave propagation in jointed rock mass

由右行特征线 BM_2 和 M_1M_2 可得

$$v^+(x_i, t_j) - v(x_{i-1}, t_{j-1}) = \frac{1}{\rho_0 C_v} [\sigma(x_i, t_j) - \sigma(x_{i-1}, t_{j-1})] - \frac{E_a \varepsilon(x_{i-1}, t_{j-1}) - \sigma(x_{i-1}, t_{j-1})}{\rho_0 C_v \theta_2} \Delta t \quad (14)$$

$$\varepsilon^-(x_i, t_j) - \varepsilon^-(x_i, t_{j-1}) = \frac{\sigma(x_i, t_j) - \sigma(x_i, t_{j-1})}{E_a + E_2} + \frac{E_a \varepsilon^-(x_i, t_{j-1}) - \sigma(x_i, t_{j-1})}{(E_a + E_2) \theta_2} \Delta t \quad (15)$$

对于左行特征线 CN_2 和 N_1N_2 , 又可得

$$v^+(x_i, t_j) - v(x_{i+1}, t_{j-1}) = -\frac{1}{\rho_0 C_v} [\sigma(x_i, t_j) - \sigma(x_{i+1}, t_{j-1})] + \frac{E_a \varepsilon(x_{i+1}, t_{j-1}) - \sigma(x_{i+1}, t_{j-1})}{\rho_0 C_v \theta_2} \Delta t \quad (16)$$

$$\varepsilon^+(x_i, t_j) - \varepsilon^+(x_i, t_{j-1}) = \frac{\sigma(x_i, t_j) - \sigma(x_i, t_{j-1})}{E_a + E_2} + \frac{E_a \varepsilon^+(x_i, t_{j-1}) - \sigma(x_i, t_{j-1})}{(E_a + E_2) \theta_2} \Delta t \quad (17)$$

联立式 (14) ~ (17) 就可推出 $\sigma(x_i, t_j)$ 、 $v^-(x_i, t_j)$ 、 $v^+(x_i, t_j)$ 、 $\varepsilon^-(x_i, t_j)$ 、 $\varepsilon^+(x_i, t_j)$ 具体值求解式。

为简化表述, 令:

$$F(x_i, t_j) = \frac{E_a \varepsilon(x_i, t_j) - \sigma(x_i, t_j)}{\rho_0 C_v \theta_2} \quad (18)$$

则计算结果为

$$v^-(x_i, t_j) = \frac{k \Delta t}{2k \Delta t + \rho_0 C_v} (A - B - C + D) \quad (19)$$

$$v^+(x_i, t_j) = \frac{k \Delta t + \rho_0 C_v}{k \Delta t} v^-(x_i, t_j) + C - D \quad (20)$$

$$\sigma(x_i, t_j) = k \Delta t (v^+(x_i, t_j) - v^-(x_i, t_j)) + \sigma(x_i, t_{j-1}) \quad (21)$$

$$\varepsilon^-(x_i, t_j) = \frac{F(x_i, t_{j-1}) \Delta t + [\sigma(x_i, t_j) - \sigma(x_i, t_{j-1})]}{E_a + E_2} + \varepsilon^-(x_i, t_{j-1}) \quad (22)$$

$$\varepsilon^+(x_i, t_j) = \frac{F(x_i, t_{j-1}) \Delta t + [\sigma(x_i, t_j) - \sigma(x_i, t_{j-1})]}{E_a + E_2} + \varepsilon^+(x_i, t_{j-1}) \quad (23)$$

其中, 式 (19)、(20) 为质点速度递推公式, 式 (21) 为应力递推公式, 式 (22)、(23) 为应变递推公式。参数 A 、 B 、 C 和 D 的表达式分别为

$$A = \frac{\sigma(x_{i+1}, t_{j-1}) - \sigma(x_{i-1}, t_{j-1})}{\rho_0 C_v} \quad (24)$$

$$B = -[v(x_{i-1}, t_{j-1}) + v(x_{i+1}, t_{j-1})] + \frac{[F(x_{i+1}, t_{j-1}) - F(x_{i-1}, t_{j-1})] \Delta t}{\rho_0 C_v} \quad (25)$$

$$C = \frac{\sigma(x_{i-1}, t_{j-1}) - \sigma(x_i, t_{j-1})}{k \Delta t} \quad (26)$$

$$D = \frac{\rho_0 C_v v(x_{i-1}, t_{j-1}) + F(x_{i-1}, t_{j-1}) \Delta t}{k \Delta t} \quad (27)$$

3 试验与数值结果对比分析

3.1 试验方案

为了验证本文计算方法的正确性, 共进行了 4 组一维应力波透过节理岩体的试验。试件的基本物理参数如表 1 所示, 试验设置如图 3、4 所示, 其中 l 为入射杆和透射杆的长度, S 为节理的间距, χ 为节理间岩石上应变片与其左端的距离。若入射和透射杆中间夹有多个短杆就可以模拟多种节理的情形。图中 M 、 N 、 O 、 P 和 Q 表示应变片的位置, 用来记录岩杆的应变信号。以两根直径为 68.50 mm、长度为 1 000 mm 的岩杆分别作为入射和透射杆, 在入射与透射杆间分别放置长为 1 000、500、250 mm 的岩杆模拟节理的间距, 还可通过在入射和透射杆之间放入多根岩杆来模拟多个节理间距。由于自然条件下的节理中通常存在砂、黏土等各种填充物, 所以试验中近似地采用在岩杆中放置 3 mm 厚砂层来等代岩体中节理^[5]。

表 1 岩石试件基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of rock specimens

试件编号	直径 / mm	长度 / mm	质量 / kg	密度 /(g/cm ³)
R-1-1	68.36	989.5	9.5	2.62
R-1-3	68.36	989.6	9.5	2.63
R-1-4	68.40	987.4	9.5	2.62
R-2-3	68.02	503.6	4.8	2.62
R-3-1	68.41	250.4	2.4	2.62
R-3-2	68.49	252.1	2.4	2.62

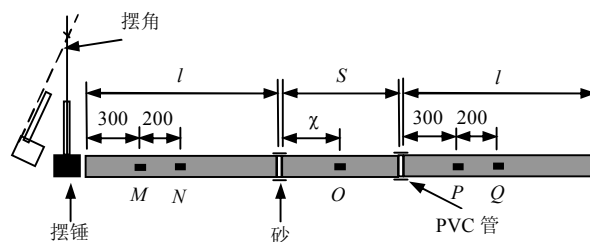


图 3 试验设置示意图 (单位: mm)

Fig.3 Schematic of experiment setup (unit: mm)



(a) 试验装置与岩杆



(b) 节理砂层

图 4 岩杆装置及节理细图

Fig.4 Rock bar setup and sand joint

本试验选用的激励装置是自制的摆锤, 摆锤的长度决定波长, 通过调整摆锤的摆角可以模拟不同强度的波。共进行了 4 组不同试验: 包括 3 组 2 条节理的工况 (节理间距分别为 1 000、500、250 mm) 和 1 组 3 条节理的工况 (节理间距为 250 mm), 其中节理的间距 S 是通过两根长岩杆中夹不同长度的短岩杆来实现的。具体试验工况设置如表 2 所示。

表 2 不同试验工况

Table 2 Different experiment cases

工况	岩杆顺序	砂厚 / mm	χ / mm
1	R-1-1, R-1-3, R-1-4	3	300
2	R-1-1, R-2-3, R-1-4	3	250
3	R-1-1, R-3-2, R-1-4	3	125
4	R-1-1, R-3-2, R-1-3, R-1-4	3	125

3.2 位移不连续模型参数的确定

由递推式 (19) ~ (23) 可知, 位移不连续模型主要由 4 个参数确定: 节理的刚度 k ; 岩体黏弹性本构 3 参数。一旦确定了这些参数, 就可以得到波在岩体中传播的应力、应变和速度随时间的递推关系, 下面将分别确定这几个参数。

3.2.1 节理法向刚度的确定

文中采用节理面的法向刚度来表征节理的刚度, 节理的法向刚度为节理的法向应力与法向变形的比值, 可表示为^[11]

$$k_n = \frac{\partial \sigma_n}{\partial \Delta x_n} = \frac{1}{\delta} \frac{\partial \sigma_n}{\partial \varepsilon_n} \quad (28)$$

式中: k_n 为节理的法向刚度; σ_n 为节理的法向应力; Δx_n 为节理的法向变形; δ 为节理的法向长度; ε_n 为节理的法向应变。

本次试验是采用 3 mm 厚砂层来模拟节理, 所以节理的刚度即为砂层刚度。研究表明, 钢杆强度高, 可看作弹性介质^[12], 试验采用 74 mm 钢杆对砂层进行冲压试验, 得到砂层的应力-应变关系, 不同弹速下的试验结果如图 5 所示, 由图可以看出, 砂层在不同弹速下其应力-应变关系的初始段基本重合, 应变率效应不明显, 所以对于不同应力水平, 在数值计算中可采用对初始段的斜率除以节理的法向长度来表征节理的法向刚度。

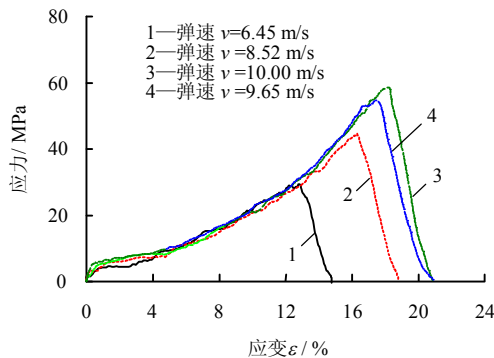


图 5 砂层的应力-应变关系曲线
Fig.5 Stress-strain curves of sand layer

3.2.2 黏弹性本构三参数的确定

具体试验设置如图 6 所示, 在 $x=0$ 处应变片分别测出不重叠的入射波 $\varepsilon_1(t)$ 和反射波 $\varepsilon_2(t)$, 并求其 Fourier 变换形式 $\varepsilon_1(\omega)$ 和 $\varepsilon_2(\omega)$, 则 $P(\omega) = \varepsilon_1(\omega)$, $Q(\omega) = \varepsilon_2(\omega)$, 由于最左端为自由端 $x=d$ 处, 其应力为 0, 则有

$$G(\omega) = \frac{\varepsilon_2(\omega)}{\varepsilon_1(\omega)} = e^{-\gamma 2d} \quad (29)$$

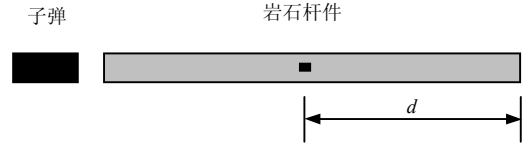


图 6 传播系数测试示意图
Fig.6 Sketch of experimental determination of propagation coefficient

根据式 (29) 可以得到不同频率下波传播系数 $\gamma(\omega)$, 并进而求得黏弹性杆的衰减系数 $\alpha(\omega)$

$$\alpha(\omega) = -\frac{\ln(r_G)}{2d} \quad (30)$$

式中: r_G 为 $G(\omega)$ 的模。

SHPB 试验中, 子弹产生入射波, 它不是一个单频波, 是多种频率波的组合, 它的频率成分是由波 Fourier 变换后的频谱来决定的。图 7 为岩石衰减系数与波频率间关系曲线, 其中横坐标频率 $f = \omega/2\pi$, 取高频衰减系数 $\alpha_a = 1.52 \text{ m}^{-1}$, $\alpha_{f=10 \text{ kHz}} = 1.29 \text{ m}^{-1}$ 。同时, 为了测量岩杆的一维波速, 在岩杆距打击端 300 mm 处额外贴了一组应变片, 通过测量初至波峰到达 300 mm 处和 500 mm 处应变片的时间差, 就可求出岩杆中强间断波的波速 $C_v = 3063 \text{ m/s}$ 。根据 α_a 、 $\alpha_{f=10 \text{ kHz}}$ 和 C_v 的值可以列出 3 个方程^[13-15], 求得

$$\left. \begin{aligned} E_a &= 17.714 \text{ GPa} \\ E_2 &= 6.8665 \text{ GPa} \\ \theta_2 &= 30 \mu\text{s} \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

再根据 $\eta_2 = E_2 \theta_2$, 可以得到三参数标准线性固体的三参数 E_a 、 E_2 和 η_2 的值。分别把节理刚度 k_n 和三参数值代入式 (19) ~ (23) 可以得到应力、速度和应变随时间的变化关系。

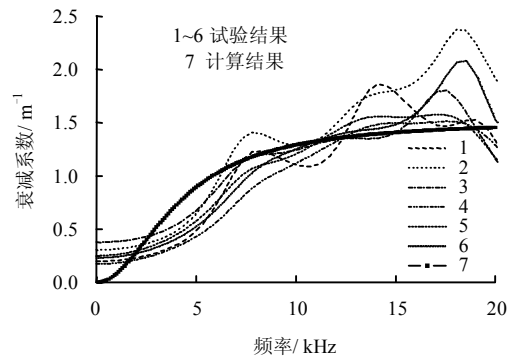


图 7 岩石衰减系数与波频率关系曲线
Fig.7 Relationships between rock attenuation coefficient and wave frequency

图7中6条细虚线为试验结果,黑色粗线为由式(9)、(29)和(31)所求得的衰减系数,可见由三参数标准线性固体所得出的不同频率下的衰减系数与实测值吻合较好。

3.3 试验对比及数值分析

一维节理岩体中应力波的传播试验结果如图8虚线所示,从图中可看出:

(1) 应力波透射过节理后,其强度会明显降低,且透过第1个节理强度降低的程度明显要高于透过其后节理强度降低的程度。

(2) 应力波在透过节理后其波长变长,这表明,低频波相对于高频波更容易透过节理,这也能部分解释应力波更易透过后面的节理。

(3) 4种情形下透射杆中透射波的波形都比较相似,只是强度有所差别。

数值结果如图8粗实线。在模拟计算中,节理刚度由式(28)和图5确定,标准线性固体参数值由式(31)确定。从图8(c)、(d)中可看出,试验中第2根杆出现了拉伸波,但数值模拟中未体现这种现象,这是由于砂层不能承受拉应力,当应力波透过节理后,砂层与岩石间发生了脱离,压缩波可以反射成拉伸波;而在数值模拟中是采用弹簧来模拟节理,相邻的两个岩石端面一直存在作用力,所以无法反射出明显的拉伸波。由于原位岩体一般都存在有水平地应力,加上应力波透过节理岩体时岩体变形较小,节理两侧一般都不会张开,所以采用弹簧模拟节理在实际中是可行的。总体而言,数值递推算法得到的黏弹性岩石中应力波的传播规律与试验结果吻合较好,从而证明了黏弹性节理岩体的位移不连续模型的可靠性。

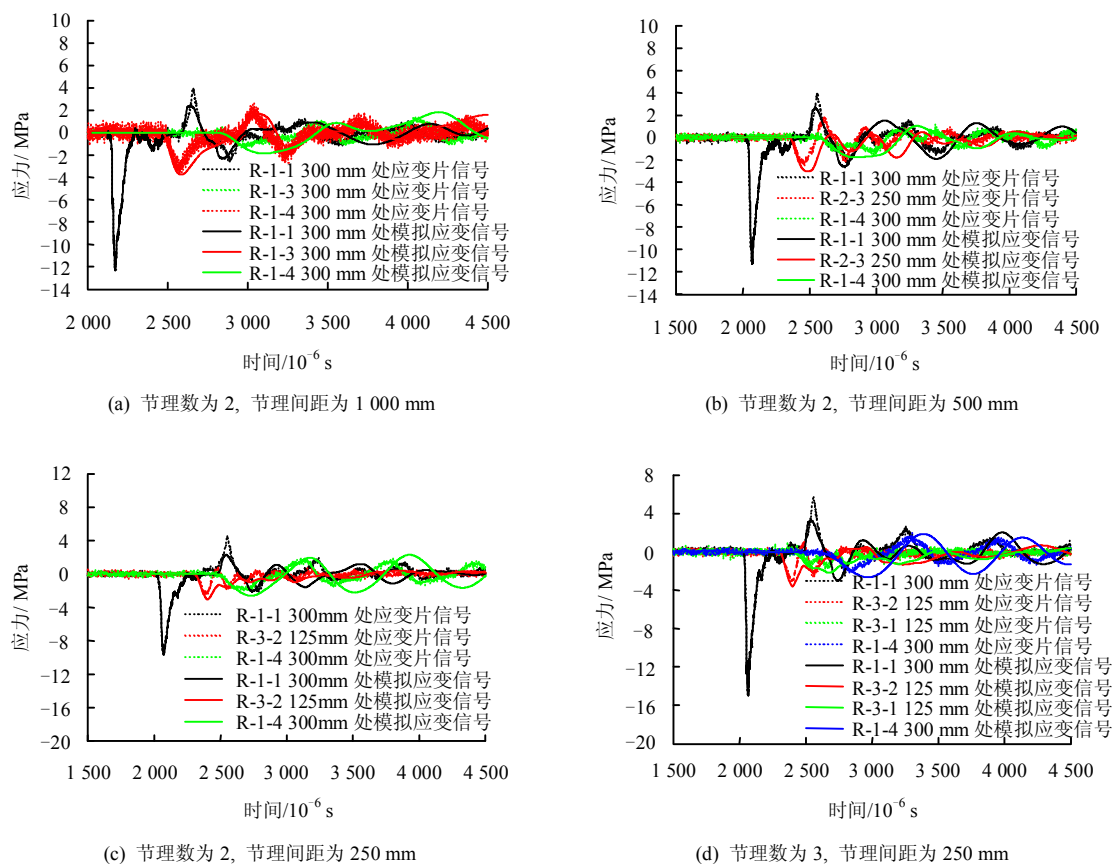


图8 节理岩体中应力波传播试验及数值模拟结果
Fig.8 Experimental and numerical results of wave propagation in jointed rock

4 结论

(1) 当应力波作用时间短时,采用三参数标准线性固体来模拟岩石动力学行为是比较合适的,能较好地反应不同频率波在岩石中衰减系数,且利用一维杆件中波的传播系数来确定三参数标准线性固

体参数过程简单、概念清晰。

(2) 考虑岩石黏弹性的位移不连续模型能够比较好地模拟应力波在节理岩体中的传播过程,数值结果与试验数据吻合度高,从而进一步证明了岩石的黏弹性特性是不可忽略的。

(3) 应力波透过节理岩体时,不同频率波的透

射能力是不一样的,节理岩体对应力波相当于一个低通滤波器。值得一提的是,由于实际砂层不能承受拉应力,而数值模拟中采用弹簧模拟节理,节理处是能承受拉应力的,故导致结果存在一些偏差。

参考文献

- [1] 陈颢,黄庭芳,刘恩儒.岩石物理学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2009.
- [2] 赵闯,岩石黏弹性质的试验研究[D].合肥:中国科学技术大学,2011.
- [3] FAN L F, REN F, MA G W. Effect of micro-defects and macro-joints on stress wave propagation in rock mass[C]//ISRM 12th International Congress on Rock Mechanics. Beijing: [s. n.], 2011.
- [4] FAN L F, REN F, MA G W. Analysis of longitudinal stress wave propagation through viscoelastic rock mass[C]//ISRM International Symposium 2010 & 6th Asian Rock Mechanics Symposium. New Delhi, India: [s. n.], 2010.
- [5] 王志亮,陈强.岩体品质因子与动态黏弹性本构[J].同济大学学报(自然科学版),2014,(5):3345—3383.
WANG Zhi-liang, CHEN Qiang. Quality factor and dynamic viscoelastic model of rock mass[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2014, (5): 3345—3383.
- [6] FAN L F, REN F, MA G W. An extended displacement discontinuity method for analysis of stress wave propagation in viscoelastic rock mass[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2011, 3(1): 73—81.
- [7] 孙成禹,印兴耀.三参数常Q黏弹性模型构造方法研究[J].地震学报,2007,4(4):348—357.
- [8] SUN Cheng-yu, YIN Xing-yao. Construction of constant-Q viscoelastic model with parameters[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2007, 4(4): 348—357.
- [9] 王礼立.应力波基础(2版)[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [10] BACON C. An experimental method for considering dispersion and attenuation in a viscoelastic Hopkinson bar[J]. *Experimental Mechanics*, 1998, 38(4): 242—249.
- [11] 郭历伦.黏弹性杆中波传播的数值模拟和试验研究[D].北京:中国工程物理研究院,2005.
- [12] FAN L F, YI XW, MA G W. Numerical manifold method(NMM) of stress wave propagation through fractured rock mass[J]. *International Journal of Applied Mechanics*, 2013, 5(2): 1—20.
- [13] 韦晓乾.应力波在节理岩体中传播模型试验研究[D].南宁:广西大学,2007.
- [14] WU W, ZHU J B, ZHAO J. Dynamic response of a rock fracture filled with viscoelastic materials[J]. *Engineering Geology*, 2013, 160: 1—7.
- [15] LI J C, MA G W. Experimental study of stress wave propagation across a filled rock joint[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(3): 471—478.
- [16] 王礼立,PLUVINAGE G, LABIBES K. 冲击载荷下高聚物动态本构关系对黏弹性波传播特性的影响[J].宁波大学学报,1995,8(3):30—57.
- [17] WANG Li-li, PLUVINAGE G, LABIBES K. The influence of dynamic constitutive relations of polymers at impact loading on the viscoelastic wave propagation character[J]. *Journal of Ningbo University*, 1995, 8(3): 30—57.
- [18] YAN Shu-wang, HOU Jin-fang, LIU Run. Research on geotechnical properties and environmental effect of mixture of soda waste and fly ash[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(12): 2305—2308.
- [19] 王芳,徐竹清,严丽雪,等.碱渣土工试验方法及其工程土特性研究[J].岩土工程学报,2007,29(8):1211—1214.
WANG Fang, XU Zhu-qing, YAN Li-xue, et al. Study on test methods and geotechnical properties of soda residue[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(8): 1211—1214.
- [20] BERESTA P, BERGUESA J, BROUARDA B, et al. A salt cavern abandonment test[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38:357—368.
- [21] 王清,王凤艳,肖树芳.土微观结构特征的定量研究及其在工程应用的新观点[J].成都理工学院学报,2001,28(2):148—153.
WANG Qing, WANG Feng-yan, XIAO Shu-fang. A quantitative study of the microstructure characteristics of soil and its applications to the engineering[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2001, 28(2): 148—153.

上接第2176页