

二维应力场作用下岩体弹性波速与衰减特性研究

赵明阶

(重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 基于岩体在二维应力场作用下的节理变形分析, 运用节理变形对岩体中节理体积率的改变, 建立节理对岩体中弹性波传播影响的等效模型, 从而推导节理岩体在应力场作用下的弹性波传播速度和衰减随应力的变化关系。为检验理论公式的可靠性, 对 2 组含裂缝的石膏模型进行弹性波测试, 试验测试结果表明, 理论计算结果与试验结果具有较好的一致性。

关键词: 岩石力学; 节理岩体; 波速; 衰减

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)01 - 0123 - 08

STUDY ON WAVE VELOCITY AND ATTENUATION OF ROCK MASS IN 2D STRESSES FIELD

ZHAO Mingjie

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

Abstract: The results of elastic wave velocity from site testing of engineering rock masses indicated that elastic wave propagation velocity was influenced by stresses field. In order to study the stresses influence to velocity and attenuation of rock masses, the wave velocity and attenuation properties of rock masses in 2D stresses field were theoretically researched; and the theoretical relationships between elastic wave velocity and attenuation and stresses in jointed rock mass suffering 2D stresses field were proposed. At first, based on the deformation analysis of joints in rock mass under 2D loading, the volume changes of jointed rock mass was derived. Then according to the relationship between wave velocity and volume changes of jointed rock masses, an equivalent model analyzing the propagation of elastic wave in jointed rock mass was developed. The calculating formula of elastic wave velocity and attenuation of rock masses in 2D stresses field were proposed by using the equivalent analyzing model of the elastic wave propagation in jointed rock masses. In order to check the theoretical model and calculating formulae, an experimental research was performed on the samples of gypsum include cracks in the laboratory. The experimental results show that the elastic wave velocity and attenuation change distinctly with stresses in jointed rock mass in 2D uniform stresses field; and the testing results agree well with the theoretical model prediction.

Key words: rock mechanics; jointed rock mass; wave velocity; attenuation

1 引言

岩体中所含节理裂隙的性质不同, 对弹性波速

和衰减特性的影响也不同, 也正式基于这一点, 才使得弹性波测试技术被广泛用于测定岩体的宏观弹性参数、完整性评价以及质量评定等方面^[1, 2]。然而, 岩体的弹性波速除了受到岩体本身结构的影响

收稿日期: 2005 - 12 - 22; **修回日期:** 2006 - 02 - 20

基金项目: 教育部重点科技项目(03113)

作者简介: 赵明阶(1967 -), 男, 博士, 1989年毕业于成都地质学院地球物理专业, 现任教授、重庆交通大学水利水运工程重点实验室主任, 主要从事岩土动力学方面的教学与研究工作。E-mail: m.j.zhao@163.com

外，还受到岩体应力场的显著影响，如李晓昭等^[3]在对岩芯和钻孔波速测试数据的对比中发现，岩芯由于卸荷扰动使得其波速大于钻孔测试波速，造成计算的岩体完整性系数大于 1，据此提出了卸荷扰动的概念；彭苏萍和谢和平^[4]在研究相变岩体的声速特征时的结果表明，相变引起的应力集中区岩体的声波速度明显增加。符文熹等^[5]通过测试数据的拟合获得平均地应力与弹性波速之间存在对数关系。由此可知，在工程岩体的弹性波测试中应当考虑应力场的影响，如果不考虑这种影响，有可能导致岩体波速测试的错误解释。因此，研究岩体弹性波速及衰减与应力场的相关性，对于发展弹性波测试技术理论具有重要的实际意义。

对于岩块在应力作用下的弹性波速和衰减特性研究，国内外已作了大量工作。如 F. Birch^[6]和 G. Simmons^[7]分别研究了应力引起的岩石波速的各向异性特征；C. M. Sayers^[8]运用超声波测试试验研究了砂岩在应力作用下的声速各向异性特征；A. Nur^[9]从岩石中的微裂纹闭合出发研究了岩石在单轴加载条件下等效柔度系数的各向异性特征随应力的变化规律，并利用波动测试来描述波速与应力的关系；N. Mao 和 J. Sweeney^[10]在此基础上将波速随应力的变化关系用一个二次函数来描述，并对多种岩石进行了标定试验；M. J. Zhao 和 D. L. Wu^[11]也曾对各向同性岩石在受荷条件下的声学特性模型进行推导，建立了岩石在加卸载条件下的声速与应力的相关性公式。对于工程岩体，由于本身具有显著不均匀性和各向异性特征，在各向同性假设下的岩石波速与应力关系不再适用于岩体，必须寻求新的方法来推导弹性波波速和衰减系数与应力的相关关系。然而，目前关于岩体应力场对弹性波速和衰减特性影响的理论研究国内外少有报道，特别是在反映岩体各种加卸载的过程中仍未得以解决，从而影响波动测试解决弹性波与岩体力学特性相关的较复杂问题。

本文基于对节理岩体在二维应力场作用下的变形特性的研究^[12]，初步尝试运用节理的变形对岩体中节理体积率的变化，建立节理等效模型，来推导节理岩体在均匀应力场作用下的弹性波传播速度和衰减随应力变化的理论关系，并通过含裂缝的石膏模型弹性波测试试验对理论模型的可靠性进行验证。

2 零应力状态下岩体波速与衰减特性

为了便于在理论上研究岩体弹性波速与衰减系数随应力的变化关系，假设任意 1 组节理在岩体中均匀分布，节理的平均长度为 $2a_0$ ，平均开度为 $2\delta_0$ ，平均间距为 d_0 ，岩桥平均长度为 $2b_0$ ，方位角为 θ (见图 1)。

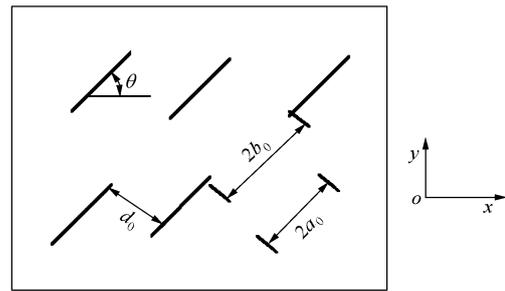


图 1 节理岩体简化模型
Fig.1 Simplified model of jointed rock mass

单一节理所占岩体的面积(对平面问题)为 $2(a_0 + b_0)d_0$ ，1 组节理的面密度可表示为

$$N = \frac{1}{2(a_0 + b_0)d_0} \quad (1)$$

同时，定义节理的形状比参数 α 为

$$\alpha = \delta_0 / a_0 \quad (2)$$

岩体的力学参数由岩块的力学参数和节理的力学参数进行描述：岩块的弹性模量为 E_0 ，泊松比为 ν_0 ，I 型断裂韧度为 K_{IC} ；节理的内摩擦角为 φ ，黏聚力为 c ，这里由于 c 值较小，对节理面的摩擦起主要作用的是参数 φ ，因而在进行岩体的变形特性分析时近似忽略 c 值对岩体变形的影响。

节理岩体在受载过程中，其弹性参数、本构模型均随应力而改变，并非是一个线性过程。要完全从理论上模拟这一个非线性过程是相当复杂的。由于在实际工程中遇到的问题大多可简化为平面应变问题处理，因而这里对二维问题进行理论研究。

如图 2 所示，在平面应变条件下，含 1 组水平节理的岩体本构方程可表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{x'} &= c_{11}\epsilon_{x'} + c_{12}\epsilon_{y'} \\ \sigma_{y'} &= c_{12}\epsilon_{x'} + c_{22}\epsilon_{y'} \\ \tau_{x'y'} &= c_{44}\gamma_{x'y'} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中，

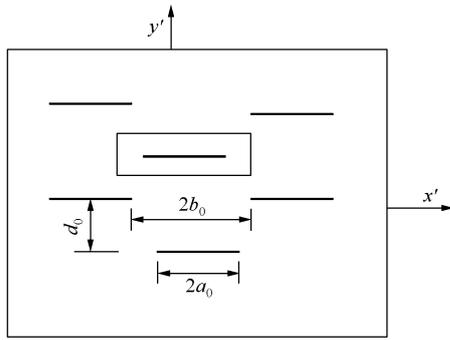


图 2 含 1 组水平节理的岩体
Fig.2 Rock mass with a set of horizontal joints

$$\left. \begin{aligned} c_{11} &= \frac{E_0(E_0 - \nu_0^2 \bar{E}_1)}{(1 + \nu_0)[E_0(1 - \nu_0) - 2\nu_0^2 \bar{E}_1]} \\ c_{22} &= \frac{E_0 \bar{E}_1(1 - \nu_0)}{E_0(1 - \nu_0) - 2\nu_0^2 \bar{E}_1} \\ c_{12} &= \frac{E_0 \bar{E}_1 \nu_0}{E_0(1 - \nu_0) - 2\nu_0^2 \bar{E}_1} \\ c_{44} &= \bar{G}_{12} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

平面裂纹密度参数用 x_h 表示, 且有

$$x_h = \frac{\pi a_0^2}{2(a_0 + b_0)d_0} \quad (5)$$

由平面裂纹密度参数 x_h 可以求得含水平节理岩体的等效弹性参数 \bar{E}_1, \bar{G}_{12} 。

对于含 1 组任意方位的节理岩体, 通过如图 3 所示的坐标变换可求得其等效弹性系数为

$$\bar{C} = A^{-1}C(A^T)^{-1} \quad (6)$$

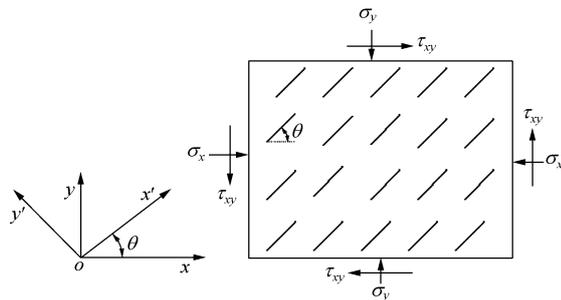


图 3 任意 1 组节理的坐标变换
Fig.3 Rock masses with a set of joints

其中,

$$A = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \sin 2\theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\sin 2\theta \\ -\frac{1}{2} \sin 2\theta & \frac{1}{2} \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

由弹性波动理论可求得含 1 组节理岩体在 y 向上的波速 V_{p10} 和 x 向上的波速 V_{p20} :

$$\left. \begin{aligned} V_{p10} &= (\bar{c}_{22} / \bar{\rho})^{1/2} \\ V_{p20} &= (\bar{c}_{11} / \bar{\rho})^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $\bar{\rho}$ 为岩体的密度。设岩块波速 V_{pm} 为

$$V_{pm} = \sqrt{\frac{E_0(1 - \nu_0)}{\rho_0(1 + \nu_0)(1 - 2\nu_0)}} \quad (9)$$

式中: ρ_0 为岩块的密度。 $\bar{\rho}$ 和 ρ_0 比值与岩体中节理的体积率有关, 由式(8), (9)可得

$$\left. \begin{aligned} V_{p10} / V_{pm} &= \left[\frac{c_{22}(1 + \nu_0)(1 - 2\nu_0)}{E_0(1 - \nu_0)(1 - \varepsilon_v^j)} \right]^{1/2} \\ V_{p20} / V_{pm} &= \left[\frac{c_{11}(1 + \nu_0)(1 - 2\nu_0)}{E_0(1 - \nu_0)(1 - \varepsilon_v^j)} \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: ε_v^j 为该组节理的体积率, 可由断裂力学理论^[12]推得, 即

$$\varepsilon_v^j = \frac{2\delta_0}{(a_0 + b_0)d_0} \int_0^{\pi/2} \sin \beta (\sin \theta + \cos \theta) d\eta \quad (11)$$

如果采用波慢度(波速的倒数)表示, 有

$$\left. \begin{aligned} S_{p10} / S_{pm} &= \left[\frac{\bar{c}_{22}(1 + \nu_0)(1 - 2\nu_0)}{E_0(1 - \nu_0)(1 - \varepsilon_v^j)} \right]^{-1/2} \\ S_{p20} / S_{pm} &= \left[\frac{\bar{c}_{11}(1 + \nu_0)(1 - 2\nu_0)}{E_0(1 - \nu_0)(1 - \varepsilon_v^j)} \right]^{-1/2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: S_{p10}, S_{p20} 分别为岩体在 y, x 向上的波慢度; S_{pm} 为岩块的波慢度。

当岩体中含有 n 组节理, 每组节理引起的波慢度改变量可表示为

$$\left. \begin{aligned} \Delta S_{p10}^i / S_{pm} &= S_{p10}^i / S_{pm} - 1 \\ \Delta S_{p20}^i / S_{pm} &= S_{p20}^i / S_{pm} - 1 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

在具有 n 组节理的岩体中超声波传播的慢度为

$$\left. \begin{aligned} S_{p10} / S_{pm} &= 1 + \sum_{i=1}^n (S_{p10}^i / S_{pm} - 1) \\ S_{p20} / S_{pm} &= 1 + \sum_{i=1}^n (S_{p20}^i / S_{pm} - 1) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

波速比和衰减系数比分别为

$$\left. \begin{aligned} V_{p10} / V_{pm} &= (S_{p10} / S_{pm})^{-1} \\ V_{p20} / V_{pm} &= (S_{p20} / S_{pm})^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{p10} / \alpha_{pm} &= (V_{p10} / V_{pm})^3 (1 - \varepsilon_v^J) \\ \alpha_{p20} / \alpha_{pm} &= (V_{p20} / V_{pm})^3 (1 - \varepsilon_v^J) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

3 二维等应力状态下岩体波速与衰减

当岩体受到二维等应力场($\sigma_1 = \sigma_2$)作用时, 岩体中的节理将逐渐闭合, 岩体的等效弹性特性不断增强。如果假设节理岩体受到应力场的作用后岩块的变形是线弹性的, 则岩体中弹性波的传播主要受节理变形闭合的影响, 弹性波速增大, 衰减变弱。这时要计算岩体的弹性波速和衰减系数, 必须分析节理的闭合变形。

3.1 节理的闭合变形分析

因节理岩体本身呈现各向异性, 因而在二维等应力条件下, 岩体仍然表现为原有的各向异性特征。在理论上, 可按照线弹性断裂力学理论推得节理的闭合的体积应变^[12]为

$$\varepsilon_v^{C_0} = \frac{k+1}{4G_0} \frac{2a_0\sigma_2}{(a_0+b_0)d_0} \int_0^{\pi/2} \sin\beta(\sin\theta + \cos\theta)d\eta \quad (17)$$

其中,

$$\beta = \arctan(\tan\eta/\alpha)$$

当 $\sigma_2 \geq \frac{4G_0}{k+1}\alpha$ 时, 理论上节理应当完全闭合;

当 $\sigma_1 = \sigma_2$ 时, 节理将不再产生闭合变形。节理产生的闭合体积应变等于节理的总体积率 ε_v^J , 由式(11)确定。

3.2 闭合变形对波速与衰减影响的等效模型

在等应力状态下, 节理的方位及密度并不发生改变, 改变的节理参数是节理开度和节理长度, 如果令节理形状比为常数, 那么仅改变节理的长度。随着 a_0 的变化, b_0 亦随之变化, 而 d_0 保持原有常数。在这一过程中任一时刻的节理剩余体积率可表示为

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^J - \varepsilon_v^{C_0} \quad (18)$$

设等应力场作用后的节理几何参数为 a_1, b_1, d_1 (见图 4), 则有如下关系:

$$(a_0 + b_0)d_0 = (a_1 + b_1)d_1 \quad (19)$$

这表明一个节理所占的面积为一常数, 即节理的面密度不变, 在除 a_0, b_0 外的其他任何参数恒定时, 节理产生闭合变形后的剩余体积率与 a_0 成正比, 因而有

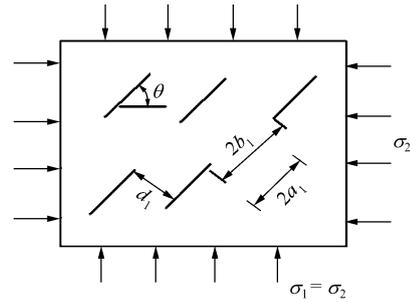


图 4 节理闭合等效模型

Fig.4 Equivalent model of jointed rock masses

$$\frac{\varepsilon_v^J - \varepsilon_v^{C_0}}{\varepsilon_v^J} = \frac{a_1}{a_0} \quad (20)$$

由此可求得

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= a_0(\varepsilon_v^J - \varepsilon_v^{C_0}) / \varepsilon_v^J \\ b_1 &= (a_0 + b_0) - a_1 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

将式(4)中的 a_0, b_0, d_0 替换为 a_1, b_1, d_1 后, 由式(4)~(12)可求得任意等应力状态的波慢度比为

$$\left. \begin{aligned} S_{p1\sigma} / S_{pm} &= \left[\frac{\bar{c}'_{22}(1+\nu_0)(1-2\nu_0)}{E_0(1-\nu_0)(1-\varepsilon_v^J + \varepsilon_v^{C_0})} \right]^{-1/2} \\ S_{p2\sigma} / S_{pm} &= \left[\frac{\bar{c}'_{11}(1+\nu_0)(1-2\nu_0)}{E_0(1-\nu_0)(1-\varepsilon_v^J + \varepsilon_v^{C_0})} \right]^{-1/2} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

式中: $\bar{c}'_{11}, \bar{c}'_{22}$ 均为节理产生闭合变形后, 岩体的等效弹性常数。

由式(12)可得

$$\left. \begin{aligned} S_{p1\sigma} / S_{p10} &= [\bar{c}'_{22}(1-\varepsilon_v^J) / \bar{c}_{22}(1-\varepsilon_v^J + \varepsilon_v^C)]^{-1/2} \\ S_{p2\sigma} / S_{p20} &= [\bar{c}'_{11}(1-\varepsilon_v^J) / \bar{c}_{11}(1-\varepsilon_v^J + \varepsilon_v^C)]^{-1/2} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

波速比和衰减系数比分别为

$$\left. \begin{aligned} V_{p1\sigma} / V_{p10} &= \{ \bar{c}'_{22}(1-\varepsilon_v^J) / [\bar{c}_{22}(1-\varepsilon_v^J + \varepsilon_v^C)] \}^{1/2} \\ V_{p2\sigma} / V_{p20} &= \{ \bar{c}'_{11}(1-\varepsilon_v^J) / [\bar{c}_{11}(1-\varepsilon_v^J + \varepsilon_v^C)] \}^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{p1\sigma} / \alpha_{p10} &= (1 - \varepsilon_v^J + \varepsilon_v^C) / [(1 - \varepsilon_v^J)(V_{p1\sigma} / V_{p10})^3] \\ \alpha_{p2\sigma} / \alpha_{p20} &= (1 - \varepsilon_v^J + \varepsilon_v^C) / [(1 - \varepsilon_v^J)(V_{p2\sigma} / V_{p20})^3] \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

对于 n 组节理, 采用迭加原理不难求得 V_{pi} / V_{pi0} 。

4 二维非等应力状态下的波速与衰减

在二维非等应力状态下, 岩体受到的应力场按照加载路径分为 2 个阶段: 第 1 阶段为 $\sigma_1 = \sigma_2$ 的等应力状态过程, 第 2 阶段为偏应力 $\sigma_1 - \sigma_2$ 单轴受压

过程。按照前述相同假设，岩体中弹性波的传播主要受节理变形的影响，而节理变形包括闭合变形和新生裂纹变形，这种变形的计算仍然可以通过线弹性断裂力学理论来进行推求。以下首先分析节理的闭合变形对波动传播的影响。

由前述研究可知，如果 $\sigma_2 \geq 4G_0\alpha/(k+1)$ ，岩体中的节理在理论上完全闭合，在偏应力 $\sigma_1 - \sigma_2$ 单轴受压过程中节理不再产生闭合位移，否则节理仍将产生闭合变形，这种变形是 $\sigma_1 = \sigma_2$ 的等应力状态下节理的闭合变形的继续，可由下式计算因偏应力 $\sigma_1 - \sigma_2$ 产生的闭合体积应变：

$$\varepsilon_v^C = \varepsilon_1^C + \varepsilon_2^C - \varepsilon_v^{C_0} \quad (26)$$

(1) 当 $\sigma_1 < \sigma_{1c}$ 时，有

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1^C &= \frac{k+1}{4G_0} \frac{a_0}{(a_0+b_0)d_0} \int_0^{\pi/2} [(\sin\theta \cos\beta + 2\cos\beta \sin\theta)\sigma_1 - \sin\theta \cos\beta \sigma_2] d\eta \\ \varepsilon_2^C &= -\frac{k+1}{4G_0} \frac{a_0}{(a_0+b_0)d_0} \int_0^{\pi/2} [-\cos\theta \cos\beta \sigma_1 + (\cos\theta \cos\beta - 2\sin\theta \sin\beta)\sigma_2] d\eta \end{aligned} \right\} \quad (27a)$$

(2) 当 $\sigma_1 \geq \sigma_{1c}$ 时，有

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1^C &= \frac{k+1}{4G_0} \frac{a_0}{(a_0+b_0)d_0} \int_0^{\pi/2} [(\sin\theta \cos\beta + 2\cos\theta \sin\beta)\sigma_{1c} - \sin\theta \cos\beta \sigma_{2c}] d\eta \\ \varepsilon_2^C &= -\frac{k+1}{4G_0} \frac{a_0}{(a_0+b_0)d_0} \int_0^{\pi/2} [-\cos\theta \cos\beta \sigma_{1c} + (\cos\theta \cos\beta - 2\sin\theta \sin\beta)\sigma_{2c}] d\eta \end{aligned} \right\} \quad (27b)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1c} &= \left(\frac{4G_0}{k+1} \alpha - \sigma_2 \sin^2\theta \right) / \cos^2\theta \\ \sigma_{2c} &= \sigma_2 \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

由式(21)可得等效节理参数：

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= a_0 \varepsilon_v^C / \varepsilon_v^J \\ b_1 &= (a_0 + b_0) - a_1 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

按照式(21)~(25)相同的推导方法可求得一组或多组节理的闭合变形引起的波慢度改变量：

$$\Delta S_{p1}^C / S_{pm}, \quad \Delta S_{p2}^C / S_{pm}, \quad \Delta S_{p1}^C / S_{p10}, \quad \Delta S_{p2}^C / S_{p20}。$$

在偏应力 $\sigma_1 - \sigma_2$ 的单轴受压过程中，除了节理的闭合变形外，还存在着节理的扩展变形，因节理扩展产生的次生裂纹沿最大主应力方向，每 1 条原生节理在其两端产生 2 个长度为 L 的次生裂纹，为此将节理扩展引起的波速变化等效为 1 组垂直张开节理引起的波速改变，则获得等效裂纹模型如图 5 所示。

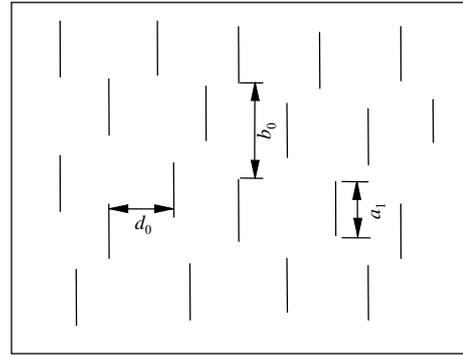


图 5 节理扩展对波动影响的等效模型

Fig.5 Equivalent model of fractured joints

等效裂纹长度为

$$a_1 = a_0 \varepsilon_v^f / \varepsilon_v^J \quad (30)$$

式中： $\varepsilon_v^f = \varepsilon_1^f + 2\varepsilon_2^f$ ， ε_1^f ， ε_2^f 为次生裂纹引起的应变，可由断裂力学建立等效裂纹模型^[12]求得，即

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1^f &= \frac{L^2}{2(a_0+b_0)d_0} \cot(\theta+\gamma) \\ \varepsilon_2^f &= -\frac{L^2}{2(a_0+b_0)d_0} \cot(\theta+\varphi) [\cos\theta \sin(\theta+\gamma) / y(F, \sigma_1, \theta) - 1] \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

式中： γ ， F 和 y 可分别表示为

$$\gamma = \arcsin[y(F, \sigma_1, \theta)]$$

$$F = (\sigma_1 - \sigma_{1c}) \cos\theta (\sin\theta - \cos\theta \tan\varphi) -$$

$$(\sigma_2 - \sigma_{2c}) \sin\theta (\cos\theta + \sin\theta \tan\varphi)$$

$$A^2 y + (1 - A^2) y^2 - 2By + B^2 = 0$$

$$B = \left(1 - \frac{\sigma_1}{E_0} \right) c$$

$$A = F/E_0$$

等效裂纹密度参数可表示为

$$x_{ev} = \frac{\pi a_1^2}{2(a_0 + b_0)d_0} \quad (32)$$

由 x_{ev} 可求得含垂直节理岩体的等效参数 \bar{E}_1 , \bar{G}_{12} , 由此可求得等效裂纹模型(见图 5)的波慢度比, 即

$$\left. \begin{aligned} S_{p1}^C / S_{pm} &= \left[\frac{(1-2\nu_0)(E_0 - \nu_0^2 \bar{E}_1)}{(1-\nu_0)[E_0(1-\nu_0) - 2\nu_0^2 \bar{E}_1](1-\varepsilon_v^f)} \right]^{-1/2} \\ S_{p2}^C / S_{pm} &= \left[\frac{\bar{E}_1(1+\nu_0)(1-2\nu_0)}{[E_0(1-\nu_0) - 2\nu_0^2 \bar{E}_1](1-\varepsilon_v^f)} \right]^{-1/2} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

由次生等效裂纹引起的波慢度改变量为

$$\left. \begin{aligned} \Delta S_{p1}^f / S_{pm} &= S_{p1}^f / S_{pm} - 1 \\ \Delta S_{p2}^f / S_{pm} &= S_{p2}^f / S_{pm} - 1 \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

将式(12)代入式(34)可得 $\Delta S_{p1}^f / S_{p10}$, $\Delta S_{p2}^f / S_{p20}$ 。若存在多组节理, 则对式(34)求和即可。由上述分析可得在偏应力 $\sigma_1 - \sigma_2$ 的加载过程中岩体的波慢度比, 即

$$\left. \begin{aligned} S_{p1} / S_{p10} &= S_{p1\sigma} / S_{p10} - \Delta S_{p1}^C / S_{p10} + \Delta S_{p1}^f / S_{p10} \\ S_{p2} / S_{p20} &= S_{p2\sigma} / S_{p20} - \Delta S_{p2}^C / S_{p20} + \Delta S_{p2}^f / S_{p20} \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

相应的波速比及衰减系数比分别为

$$\left. \begin{aligned} V_{p1} / V_{p10} &= (S_{p1\sigma} / S_{p10} - \Delta S_{p1}^C / S_{p10} + \Delta S_{p1}^f / S_{p10})^{-1} \\ V_{p2} / V_{p20} &= (S_{p2\sigma} / S_{p20} - \Delta S_{p2}^C / S_{p20} + \Delta S_{p2}^f / S_{p20})^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{p1} / \alpha_{p10} &= (1 - \varepsilon_v^j) / (1 - \varepsilon_v^j + \varepsilon_v^f + \varepsilon_v^C + \varepsilon_v^0) (V_{p10} / V_{p1})^3 \\ \alpha_{p2} / \alpha_{p20} &= (1 - \varepsilon_v^j) / (1 - \varepsilon_v^j + \varepsilon_v^f + \varepsilon_v^C + \varepsilon_v^0) (V_{p20} / V_{p2})^3 \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

5 岩体波动传播的试验研究

为了验证上述理论模型的可行性, 采用含人工裂缝的石膏模型模拟节理岩体进行波动传播。该项试验主要进行模型试件双轴加卸荷条件下的波动测试, 石膏模型的尺寸采用 10 cm × 10 cm × 10 cm, 配合比为: $m_{石膏} : m_{水} = 1 : 0.3$ 。采用柠檬酸作为缓凝剂, 其比例为 0.3%。石膏模型裂缝分布如图 6 所示。2 种裂缝分布的石膏模型试件共 24 个。

模型 I 的裂缝参数^[12]: $a_0 = 2.5$ cm, $b_0 = 2.5$ cm, $d_0 = 3.0$ cm, $\theta = 45^\circ$; 模型 II 的裂缝参数: $a_0 = 2.5$ cm, $b_0 = 2.5$ cm, $d_0 = 4.0$ cm, $\theta = 45^\circ$; 完整石膏

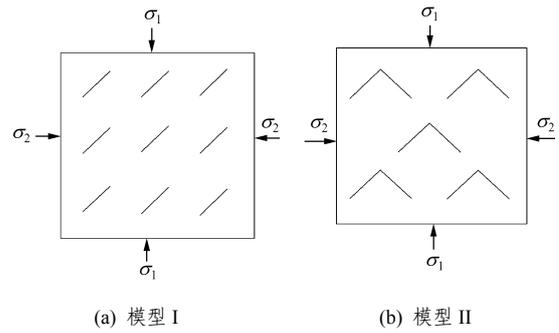


图 6 石膏模型裂缝分布图
Fig.6 Distribution of cracks in gypsum samples

模型参数: $E = 1\ 846$ MPa, $\nu = 0.21$, $\phi_j = 10^\circ$, $K_{IC} = 0.05$ MPa · m^{1/2}; 裂缝形状比参数为 8.41×10^{-4} 。

表 1 给出了模型 I 和 II 各向异性特征参数, 从表中可以看出, 模型 I 和 II 在 x , y , z 三个方向的纵波波速和衰减系数具有明显的各向异性特征, 由于 2 种模型的裂缝方位为 45° , 因而在 x , y 方向的参数相差甚小。

表 1 模型 I 和 II 各向异性特征参数

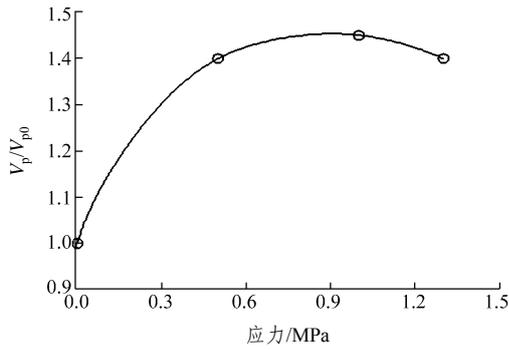
Table 1 Velocity and attenuation parameters of models I and II

模型	纵波波速/(m · s ⁻¹)			衰减系数/(dB · cm ⁻¹)		
	x	y	z	x	y	z
I	862	896	1 298	79.8	82.4	24.6
II	831	887	1 243	84.9	85.6	28.9

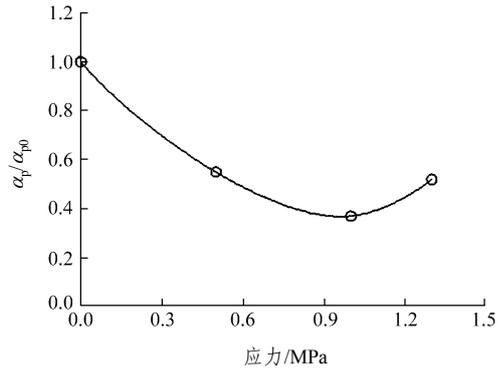
试验时, 在每级荷载下对裂缝穿透方向的荷载进行调整使得该方向上的变形基本保持稳定不变后, 再进行数据采集。图 7~10 给出了模型 I 和 II 的单轴与双向加载试验结果。

在单轴加载过程中, 模型 I 和 II 的波速比及衰减系数比均有明显的变化; 在加载初期, 波速比升高, 衰减系数比减小, 表明节理的闭合使得模型刚度增大; 当试件接近破坏时, 波速开始下降, 衰减系数增大, 表明节理的扩展使得模型的刚度发生劣化。

在双轴加载过程中, 当模型接近破坏时, 波速明显下降, 衰减明显增大。由于围压效应, 在加载初始阶段, 波速比和衰减系数比没有明显的变化。由理论计算获得的声学参数在加载初始阶段没有变化且在纵横向上相同, 说明模型中的节理已完全闭合, 而试验结果却显示出波速比有微弱的增加, 衰



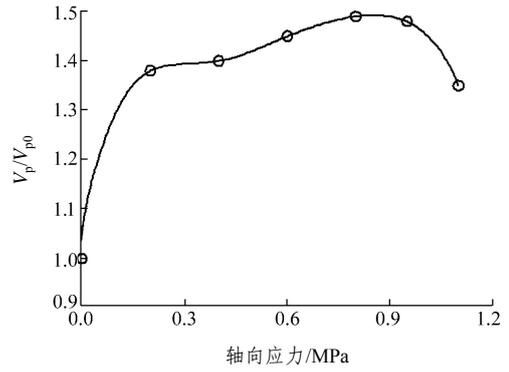
(a) 波速比 - 应力关系曲线



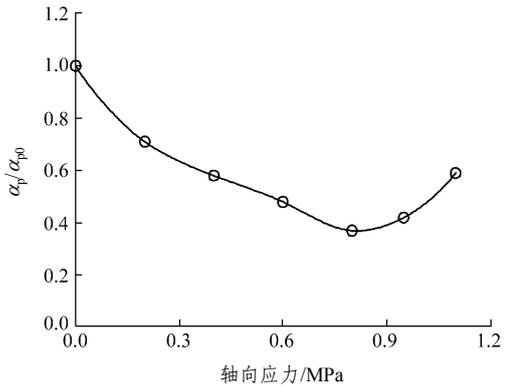
(b) 衰减系数比 - 应力关系

图 7 模型 I 的单轴加载试验结果

Fig.7 Testing results of model I(uniaxial compression)



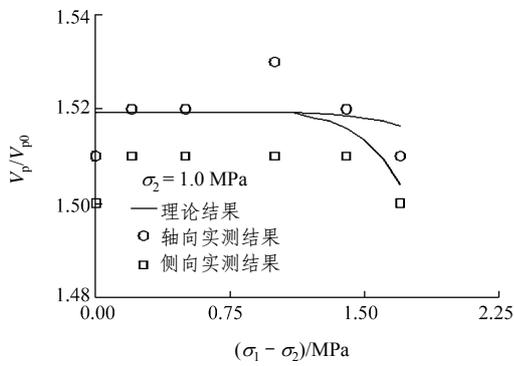
(a) 波速比 - 轴向应力关系曲线



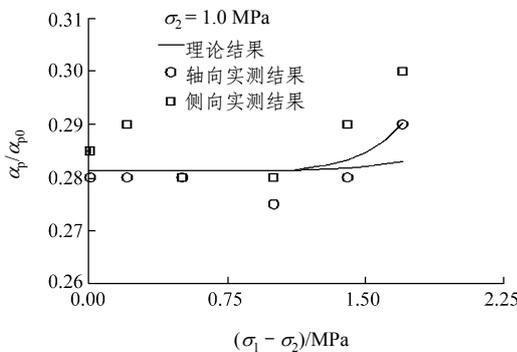
(b) 衰减系数比 - 轴向应力关系

图 9 模型 II 的单轴加载试验结果

Fig.9 Testing results of model II(uniaxial compression)



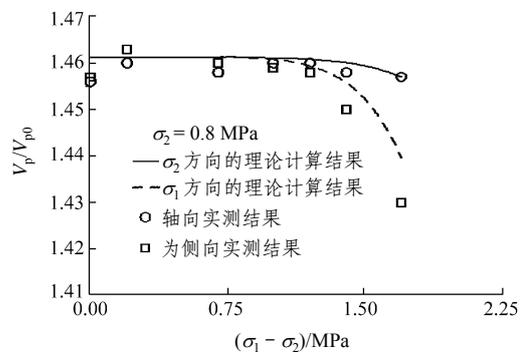
(a) 波速比 - 偏应力关系曲线



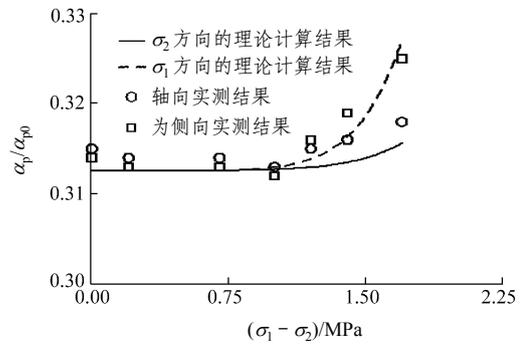
(b) 衰减系数比 - 偏应力关系

图 8 模型 I 的双向加载试验结果

Fig.8 Testing results of model I(biaxial compression)



(a) 波速比 - 偏应力关系曲线



(b) 衰减系数比 - 偏应力关系

图 10 模型 II 的双向加载试验结果

Fig.10 Testing results of model II(biaxial compression)

减系数比有微弱的降低, 这表明节理岩体在受荷条件下, 除宏观节理发生变形外, 仍存在部分微裂隙的变形; 对于实测参数在纵横向上的差异可能是由于模型裂缝分布的不均匀性引起。

6 结 论

本文初步尝试了基于节理的变形对岩体中节理体积率的改变建立节理等效模型, 从而推导了节理岩体在均匀应力场作用下的弹性波传播速度和衰减随应力的变化关系。同时, 运用这种等效模型, 为了检验理论公式的可靠性, 对 2 组含裂缝的石膏模型进行了弹性波测试, 试验测试结果表明, 理论计算结果与试验结果具有较好的一致性。

参考文献(References):

- [1] 李张明, 张建清. 三峡工程永久船闸高边坡岩体弹性波测试研究[J]. 长江科学院院报, 2000, 17(1): 35 - 38.(LI Zhangming, ZHANG Jianqing. Study on rock mass elastic wave in high slope area of TGP's Permanent Ship Lock[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000, 17(1): 35 - 38.(in Chinese))
- [2] 王宏图, 李晓红, 杨春和, 等. 准各向同性裂隙岩体中有效动弹性参数与弹性波速的关系研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 873 - 876.(WANG Hongtu, LI Xiaohong, YANG Chunhe, et al. The influence of cracks on the propagation properties of elastic waves in quasi-isotropic cracked rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 873 - 876.(in Chinese))
- [3] 李晓昭, 安英杰, 俞 缙, 等. 岩芯卸荷扰动的声学反应与卸荷敏感岩体[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 2 086 - 2 092.(LI Xiaozhao, AN Yingjie, YU Jin, et al. Acoustic responses to rock core unloading-disturbance and unloading-sensitive rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(12): 2 086 - 2 092.(in Chinese))
- [4] 彭苏萍, 谢和平. 沉积相变岩体声波速度特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 831 - 2 837.(PENG Suping, XIE Heping. Experimental study on velocity characteristics of lithofacies transition rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 831 - 2 837.(in Chinese))
- [5] 符文熹, 尚岳全, 孙红月, 等. 岩体变形参数渐变取值模型及工程应用[J]. 工程地质学报, 2002, 10(2): 198 - 203.(FU Wenxi, SHANG Yuequan, SUN Hongyue, et al. Application of progressively changing rock mass deformation parameters to rock mass engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(2): 198 - 203.(in Chinese))
- [6] BIRCH F. The velocity of compressional wave in rocks to 10 kilobars[J]. Journal of Geophysical Research, 1960, 65(5): 1 083 - 1 102.
- [7] SIMMONS G. Velocity of shear waves in Rocks to 10 kilobars[J]. Journal of Geophysical Research, 1964, 69(6): 1 123 - 1 130.
- [8] SAYERS C M. Stress-induced ultrasonic anisotropy in Berea sandstone[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstracts, 1990, 27(5): 429 - 436.
- [9] NUR A. Effects of stress on velocity anisotropy in rocks with cracks[J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76(8): 2 022 - 2 034.
- [10] MAO N, SWEENEY J. Using a sonic technique to estimate in-situ stresses[J]. Rock Mechanics in Productivity and Protection, 1982, 18: 167 - 175.
- [11] ZHAO M J, WU D L. The ultrasonic properties of brittle rocks with microcracks under uniaxial compression[C]// Proceedings in Mining Science and Safety Technology. Beijing: Science Press, 2002: 197 - 205.
- [12] 赵明阶, 徐 蓉. 裂隙岩体在受荷条件下的变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 465 - 470.(ZHAO Mingjie, XU Rong. Research on deformation character of cracked rock mass under loading and unloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 465 - 470.(in Chinese))