

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2288

# 应力波斜入射对岩体节理端部的影响

费鸿禄, 包士杰, 杨智广

(辽宁工程技术大学 爆破技术研究院, 辽宁 阜新 123000)

**摘 要:** 岩体节理在受到应力波扰动时端部受力会发生不同程度的连续性变化, 为具体分析这种动态变化与应力波入射角度之间的关系, 引用岩石非线性法向本构关系与线性切向本构关系的组合模型以及相应的在 P 波斜入射节理的应力波传播方程, 结合岩石断裂力学中 I、II 型裂纹尖端应力和位移场的相关理论, 得出组合形式下的节理端部应力场和位移场随质点振速变化的计算公式。通过不同入射角的模拟脉冲信号作用对端部应力位移的变化分析: 应力波斜入射节理导致节理端部上、下两侧应力与位移场非对称分布, 随着入射波质点振速的增减变化, 应力集中位置会出现变化; 计算并整理模型中节理端部上、下两侧 0.005 m 位置的数据, 节理法向刚度由入射波质点振速带来的变化直接影响到应力波的透射与反射, 进而会导致端部的应力与位移出现滞后效应; 节理端部横向位移值与入射角度并非单调变化, 而竖向位移会随着入射角的增大呈现下降趋势。

**关 键 词:** 非线性节理; BB 模型; 应力; 滞后效应

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 07-2327-09

## Influence of oblique incidence of stress wave on rock joint ends

FEI Hong-lu, BAO Shi-jie, YANG Zhi-guang

(Institute of Engineering Blasting, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

**Abstract:** When rock joints are disturbed by stress waves, the continuous stresses in joint ends change with various degrees of joints. To analyze the relationship between the dynamic change and the incident angle of stress wave, we introduce a combined model of the nonlinear normal normalised constitutive relation and the linear tangential constitutive relation of rock and the corresponding stress wave propagation equation of oblique incident joints in P wave oblique incidence joint. According to the theory of mode-I and mode-II crack-tip stress in fracture mechanics and the displacement field, a formula is obtained for calculating the stress field and displacement field with the change of the velocity of the joint in the combined form. This study investigates the effect of the simulated pulse signal with different incident angles on the simulation of stress and displacement at the end. Stress and displacement fields at the upper and lower ends of the joint present non-symmetric distribution under the oblique incidence of stress wave. With the increase and decrease of vibration velocity of the incident wave particle point, the position of the stress concentration changes. The data of 0.005 m position at the upper and lower sides of the joint end in the model are calculated, the change of joint normal stiffness bringing by the particle velocity of incident wave directly influences the transmission and reflection of stress wave, which leads to the lag of stress and displacement at the end of the joint. The lateral displacement and the incident angle do not change monotonically, but the vertical displacement decreases with the increase of incidence angle.

**Keywords:** nonlinear rock joint; BB model; stress; lag effect

## 1 引 言

应力波在节理岩体中传播会产生一系列复杂的变化, 这在岩石动力学的相关研究中也是很重要的一个方面。Zhu 等<sup>[1]</sup>利用虚拟波源的方法研究了斜入射波在岩体节理的传播特性, 并通过与传播矩阵法相比较进行了修正, 同时指出等效介质方法的不

可取之处。Che<sup>[2]</sup>、Hamid<sup>[3]</sup>等学者通过数值模拟和试验研究等手段研究了应力波对节理岩体的边坡稳定性影响。Wang 等<sup>[4]</sup>通过对带有节理的岩样施加蠕变荷载, 并利用 CT 与激光扫描技术记录节理位置岩体的变化情况, 对图像进行分析总结出: 断裂岩体的剪应力与节理的最大接触面积和表面粗糙度密切相关。Li 等<sup>[5]</sup>建立了薄层界面填充节理模型, 通

收稿日期: 2016-09-28

第一作者简介: 费鸿禄, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事爆破工程和地下工程方面的科研与教学工作。E-mail: feihonglu@163.com

过反演导出正应力与填充节理闭合量之间的关系,分析了应力波穿过节理时对节理变形的影响。俞缙等<sup>[6]</sup>对非线性法向变形本构模型的改进进行了深入的研究,新模型引入了修正参数,并经过试验验证这种新模型的可应用性。石崇等<sup>[7]</sup>针对平面 SV 波穿过节理进行了理论分析,探究非线性法向变形的节理对平面 SV 波的影响。王观石等<sup>[8]</sup>在对岩体结构面的研究中,将结构面看成是有位移间断的两弹性半空间的接触面,并对参数进行了分析,得出了反映结构面刚度变化的特征频率的近似计算表达式。杨仁树等<sup>[9]</sup>在研究爆炸荷载下不对称 Y 型裂纹扩展规律时,发现分支裂纹尖端动态应力强度因子均值随分支裂纹与应力波夹角增大而减小,为实际工程中该类型裂纹扩展提供了依据。刘婷婷等<sup>[10]</sup>针对不同剪切速率充填节理的剪切特性进行了相关研究,得到了关于剪切速率、法向应力和充填厚度等因素对接力特性影响的结论。在以往的相关研究中往往将研究重心放在了节理法向非线性模型以及宏观的试验和模拟研究上,忽略了应力波对节理产生的破坏作用。而实际上,在应力波作用下,节理两侧的岩体会呈现出位移不连续的现象<sup>[11]</sup>,这样的变形传递到节理尖端会产生应力集中作用。节理尖端应力场的变化可能会导致节理系统的不稳定。裂纹尖端在受到外力而产生变形时,由于明显的应力集中现象超过岩石的动态拉剪强度,会使裂纹沿某一角度开裂<sup>[12]</sup>。此外,应力纵波与横波在透过节理过程中对节理端部受力构成不同的影响。所以应力波斜入射至节理面对节理端部应力场变化的研究具有一定的价值。

本文引用文献[13]中的时域分析新方法和经典的节理非线性法向变形本构模型(BB 模型),对节理端部进行受力分析,得到在应力波作用下该位置应力场变化计算式。

## 2 理论基础

### 2.1 节理法向变形的双曲线模型

节理法向变形的双曲线模型是由 Bandis 等提出<sup>[14]</sup>,目前已被广泛应用于岩体力学和工程当中。对于天然岩体节理,双曲线模型被证明是合理的。定义节理向内侧的闭合量符号为正,法向有效应力-节理闭合本构关系可以表示为

$$d_n = \frac{\sigma_n}{k_{ni} + \sigma_n / d_{\max}} \quad (1)$$

式中:  $d_n$  为节理闭合量;  $\sigma_n$  为法向有效应力;  $d_{\max}$  为节理最大允许闭合量;  $k_{ni}$  为初始应力下节理的法

向刚度。

### 2.2 节理界面的描述

本文采用文献[13]中对节理法向非线性变形与切向线性变形进行组合的模型,如图 1 所示。模型中的  $k_n$  为法向节理刚度,其计算方法为

$$k_n = k_{ni} + \frac{\sigma_n}{d_{\max}} \quad (2)$$

图 1 中  $k_s$  表示切向节理刚度,在该模型中  $k_s$  为常数,表明节理在切向的变形与切应力呈线性关系。

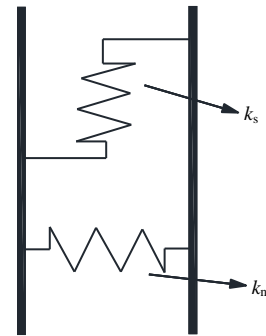


图 1 岩石节理模型  
Fig.1 Model of rock joint

文献[11]针对该模型进行了理论计算,得到入射波、反射波与透射波三者间的迭代关系式为

$$\begin{bmatrix} v_{RP(i)} \\ v_{RS(i)} \end{bmatrix} = -\mathbf{B}^{-1} \mathbf{A} v_{TP(i)} + \mathbf{B}^{-1} \mathbf{C} \begin{bmatrix} v_{TP(i)} \\ v_{TS(i)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$k_n = \frac{\left[ k_{ni} + \sigma_{(i)} / d_{\max} \right]^2}{k_{ni}} = \frac{\left[ k_{ni} + \left( z_p \cos 2\beta \cdot v_{TP(i)} + z_s \sin 2\beta \cdot v_{TS(i)} \right) / d_{\max} \right]^2}{k_{ni}} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} v_{TP(i+1)} \\ v_{TS(i+1)} \end{bmatrix} = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{H}(k_n) \mathbf{D} v_{TP(i)} + \mathbf{G}^{-1} \mathbf{H}(k_n) \mathbf{E} \begin{bmatrix} v_{RP(i)} \\ v_{RS(i)} \end{bmatrix} + \left( \mathbf{G}^{-1} \mathbf{H}(k_n) \mathbf{F} + \mathbf{I} \right) \begin{bmatrix} v_{TP(i)} \\ v_{TS(i)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} z_p \cos 2\beta \\ z_p \cos 2\beta \tan \beta \cot \alpha \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} z_p \cos 2\beta & -z_s \sin 2\beta \\ -z_p \cos 2\beta \tan \beta \cot \alpha & -z_s \cos 2\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} z_p \cos 2\beta & z_s \sin 2\beta \\ z_p \sin 2\beta \tan \beta \cot \alpha & -z_s \cos 2\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \Delta t \cos \alpha \\ k_s \Delta t \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} -\Delta t \cos \alpha & \Delta t \sin \beta \\ k_s \Delta t \sin \alpha & k_s \Delta t \cos \beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} -\Delta t \cos \alpha & -\Delta t \sin \beta \\ -k_s \Delta t \sin \alpha & k_s \Delta t \cos \beta \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} z_p \cos 2\beta & z_s \sin 2\beta \\ z_p \sin 2\beta \tan \beta \cot \alpha & -z_s \cos 2\beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{H}(k_n) = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$z_p = \rho c_p; z_s = \rho c_s \quad (15)$$

式中： $\alpha$  为 P 波入射角、反射角与透射角； $\beta$  为反射 S 波的反射角和透射 S 波的透射角； $\Delta t$  为时间步长； $\sigma$  为节理两界面的正应力值； $v_{IP}$  为入射 P 波质点振速； $v_{RP}$  为反射 P 波质点振速； $v_{TP}$  为透射 P 波质点振速； $v_{RS}$  为反射 S 波质点振速； $v_{TS}$  为透射 S 波质点振速； $c_p$  为 P 波在岩体中的传播速度； $c_s$  为 S 波在岩体中的传播速度。其中反射 S 波的反射角和透射 S 波的透射角  $\beta$  在已知入射角  $\alpha$  的条件下由 Snell 定律计算可得

$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{c_s}{c_p} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}} \quad (16)$$

式中： $\mu$  为完整岩体的泊松比。

综上所述，在已知岩石与节理的相关参数下，通过假定入射 P 波入射角  $\alpha$  即可由式 (3) ~ (16) 计算得到相应的透射与反射 P 波与 S 波的质点振速值。

### 3 节理端部受力计算

#### 3.1 应力强度因子

应力波在穿过岩体节理这一过程时，造成两侧的位移不连续并不是发生在节理端部。由于端部的几何形态相对复杂，节理面间距极小且周围都是均匀连续介质，应力波在该位置传播时，系统刚度较大且受力面极小，所以这一部分可以忽略应力波的作用。

依据位移不连续方法，节理面两侧岩体受力大小相等，但由于节理位置的刚度低于岩体的缘故，会导致两侧位移不连续，但这一观点在节理的端部不成立。节理端部裂纹间距极小且靠近弹性连续介质，刚度相对节理中部要大很多。一般情况下，应力波的传播方向与节理走向均会存在一定的夹角，也就是应力波斜入射到节理面，不仅会出现透射与反射，还会出现波形转换。所以，左右界面上分布

着不同方向与大小的应力作用，随着两界面应力不断变化，节理尖端的应力场也会随之改变。为了解这种变化情况，建立力学模型如图 2 所示。

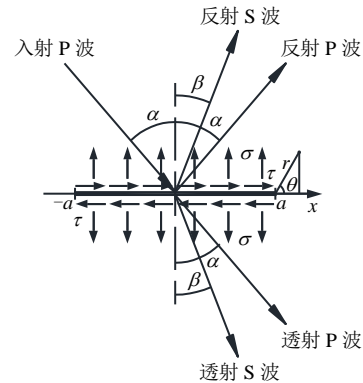


图 2 节理力学模型

Fig.2 Mechanical model of joint

当入射 P 波斜入射至长度为  $2a$  的岩体节理处，出现应力波透射与反射的情形，此时节理上下两界面会产生切向应力  $\tau$  与法向应力  $\sigma$ ，可以获得上述节理受力情况的应力强度因子<sup>[15]</sup>：

$$K_I = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \sigma \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} dx \quad (17)$$

$$K_{II} = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \tau \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} dx \quad (18)$$

式中： $K_I$ 、 $K_{II}$  分别为 I、II 型裂纹的应力强度因子。由式 (17)、(18) 可以看出当切向应力  $\tau$  与法向应力  $\sigma$  均为常数时，应力强度因子的大小仅与节理长度有关，图 3 的曲线描述了在单位应力作用下二者之间的关系。从图中可以发现，应力强度因子  $K_I$  随节理长度的增长呈现出非线性增长的趋势，但曲线的斜率在逐渐减小，说明这种增速在变缓。

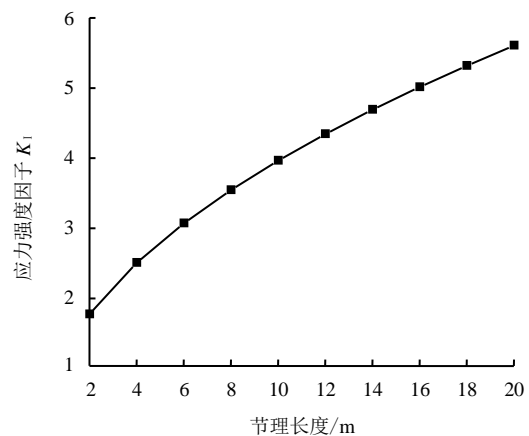


图 3 应力强度因子随节理长度变化曲线

Fig.3 Relationship between stress intensity factor and joint length

### 3.2 应力计算公式

岩石断裂力学在研究裂纹受力问题中将裂纹分为 I 型（张开型）、II 型（滑开型）和 III 型（撕开型）<sup>[16]</sup>。根据图 2 所示的节理面受力情况可以判定，本文的研究内容归结为 I 型和 II 型的组合形式。需要说明的是，本文不考虑应力波的入射角超过临界角时的全反射现象，仅计算入射角在临界范围内的情况；假设节理区域外的完整岩体为完全弹性介质；在应力计算中，当节理两侧的正应力方向与图示方向相反，即对节理产生压应力时对节理端部的应力影响忽略不计，此时仅切向应力对端部产生影响，同 II 型裂纹端部受力相同。断裂力学在解决端部受力问题时，采用了 Westergaard 函数分别计算出两种类型裂纹的应力场与位移场表达形式<sup>[17]</sup>，I 型裂纹尖端应力场和位移场计算表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xI} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yI} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{xyI} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} u_I &= \frac{2(1+\mu)K_I}{4E_a} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[ (2\kappa-1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] \\ w_I &= \frac{2(1+\mu)K_I}{4E_a} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[ (2\kappa+1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

II 型裂纹尖端应力场和位移场计算表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xII} &= \frac{-K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left( 2 + \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yII} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \\ \tau_{xyII} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{II} &= \frac{2(1+\mu)K_{II}}{4E_a} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[ (2\kappa+3) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ w_{II} &= -\frac{2(1+\mu)K_{II}}{4E_a} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[ (2\kappa-3) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

式中： $E_a$  为岩石的动弹性模量； $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$  为节理端部应力分量； $u$ 、 $w$  为节理端部的位移分量； $r$ 、 $\theta$  分别为以节理右端点为原点的极径和极角，本文研究平面应变问题，参数  $\kappa=3-4\mu$ 。

此外，引用文献[13]中节理右界面应力值的表达式，并根据透射质点振速变化写成迭代形式：

$$\sigma_{(i)} = z_p \cos 2\beta \cdot v_{TP(i)} + z_s \sin 2\beta \cdot v_{TS(i)} \quad (23)$$

$$\tau_{(i)} = z_p \sin 2\beta \cdot \cot \alpha \cdot v_{TP(i)} - z_s \cos 2\beta \cdot v_{TS(i)} \quad (24)$$

将式 (23)、(24) 分别代入式 (17)、(18) 中得到由质点振速表示的应力强度因子，为简化公式将式中关于裂纹长度的积分部分定义为  $L = \int_{-a}^a \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} dx$ 。

$$K_I = \frac{L}{\sqrt{\pi a}} (z_p \cos 2\beta \cdot v_{TP(i)} + z_s \sin 2\beta \cdot v_{TS(i)}) \quad (25)$$

$$K_{II} = \frac{L}{\sqrt{\pi a}} (z_p \sin 2\beta \cdot \tan \beta \cdot \cot \alpha \cdot v_{TP(i)} - z_s \cos 2\beta \cdot v_{TS(i)}) \quad (26)$$

将式 (25)、(26) 分别代入式 (18) 和式 (20) 中，并将二者相加得到法向应力与切向应力共同作用在节理表面时的节理端部应力分量的表达式：

$$\begin{bmatrix} \sigma_{x(i)} \\ \sigma_{y(i)} \\ \tau_{xy(i)} \end{bmatrix} = \frac{L}{\pi\sqrt{2ar}} \mathbf{MG} \begin{bmatrix} v_{TP(i)} \\ v_{TS(i)} \end{bmatrix} \quad (27)$$

其中：

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) & -\sin \frac{\theta}{2} \left( 2 + \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) & \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \\ \cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} & \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \end{bmatrix} \quad (28)$$

同理，可得节理端部位移分量的表达式

$$\begin{bmatrix} u_{(i)} \\ w_{(i)} \end{bmatrix} = \frac{(1+\mu)L}{2E_a\pi} \cdot \sqrt{\frac{r}{2a}} \cdot \mathbf{NG} \begin{bmatrix} v_{TP(i)} \\ v_{TS(i)} \end{bmatrix} \quad (29)$$

其中：

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} (2\kappa-1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} & (2\kappa+3) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \\ (2\kappa+1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} & -(2\kappa-3) \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \end{bmatrix} \quad (30)$$

## 4 节理端部应力位移分析

分析节理端部应力位移变化情况需要设定一个入射应力波函数，为更接近爆破震动或地震波函数的剧烈震荡性特征，本文选用  $\delta$  函数的辅助函数作为输入波形<sup>[18]</sup>，通过改变函数中的参数值  $\lambda$  来实现质点振速的变化。图 4 是一种  $\delta$  函数的辅助函数表达式及函数图像，为达到计算精度在对称轴  $t=b$  两

侧计算区间内选择 2 500 个时间段。

$$f(t-b) = \frac{1}{\pi} \frac{\lambda}{(t-b)^2 + \lambda^2} \quad (31)$$

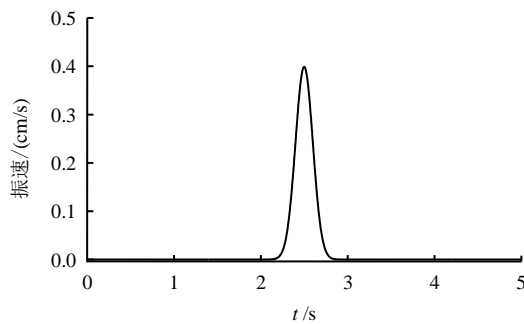


图4 函数图像

Fig.4 Function image

本文旨在研究节理端部应力与位移变化情况, 相应的岩石参数取用统一的参数值, 包括岩石密度  $\rho=2\ 600\text{ kg/m}^3$ , 动弹性模量  $E_a=25\text{ GPa}$ , 泊松比  $\mu=0.25$ , 相应的纵波传播速度  $c_p=4\ 803.8\text{ m/s}$ , 横波传播速度  $c_s=1\ 961\text{ m/s}$ 。为观察某一时刻节理端部应力分布的特点, 定义一条  $a=1\text{ m}$ , 宽度  $d=0.001\text{ m}$  的岩体节理, 入射波函数选用式 (31) 的形式。图 5 中的两幅图分别表示质点振速等大反向的两入射波分别穿过节理后产生的波形转换后的质点振速时程曲线。

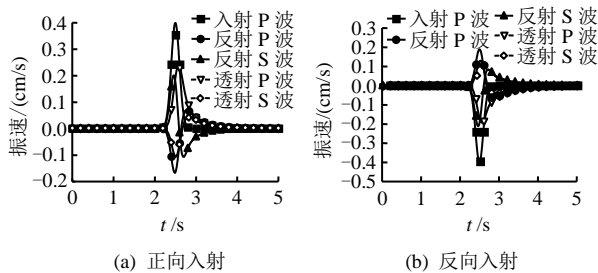


图5 两种入射波与相应的透射波和反射波

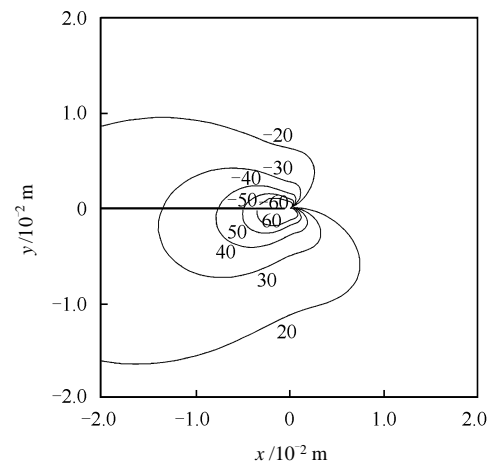
Fig.5 Two cases of transmitted and reflected waves for incident wave

对两图进行比较, 入射 P 波质点振速在数值等大但方向相反的情况下, 反射波波形在两幅图中保持一致, 而透射波波形不尽相同, 所以入射波质点振速的方向会对节理两侧的应力值产生不同的影响。由于岩体节理端部一般表现为受拉破坏<sup>[19]</sup>, 所以拉剪破坏会更大程度上对节理造成破坏, 本文在计算节理端部应力时会采用质点振速为反向的情况作为入射波。

#### 4.1 节理端部应力分析

假设  $\sigma=1.5\text{ MPa}$ ,  $\tau=2.5\text{ MPa}$  代表该时刻节理

两侧的应力值, 将  $\sigma$  和  $\tau$  分别代入式 (23)、(24) 中, 再将结果代入到公式 (27) 中, 得到关于节理界面的应力和节理端部的应力关系, 代入岩石和节理参数后, 以  $10\text{ MPa}$  为梯度设定应力值, 在  $\theta$  为  $0\sim 2\pi$  的变化区间内计算相应的  $r$  值并在极坐标中绘制  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  和  $\tau_{xy}$  的等值线图, 如图 6 所示, 图中坐标以节理右端点为坐标原点, 两条正交刻度线均表示平面内距离原点的半径范围。



综合以上 3 幅图, 直观上体现出了在这种受力情况下节理端部应力场的不对称特征, 就图 6(a)而言, 节理上侧应力为拉应力, 根据应力数值随着距离节理端的梯度变化显示, 上侧的应力等值线分布更密集, 这说明上侧应力集中明显, 且表现为拉应力, 破坏也更可能出现在这一区域。图 6(b)显示的是节理端部纵向应力等值线图, 从图中看出, 压应力分布区域和数值很小, 此时不会对岩石材料产生破坏作用, 应力集中出现在右下位置。图 6(c)中对切应力场的描述可以看出这种不均匀性, 应力分布复杂, 在近端部的右侧和右下位置受剪切力集中。但是节理界面两侧的质点振速是时刻发生变化的, 最大的受力位置也会时刻改变。尽管从应力等值线图中可以对节理端部的应力场分布情况有一个直观的认识, 鉴于应力波作用在节理过程是连续性的行为, 对整个过程体现出的不对称与连续变化尚不能通过等值线图来分析。图 7、8 分别是距离节理端点

均为 0.005 m 的上、下两个位置点上应力值在改变入射角度情况下随时间变化曲线图。

图 7(a)和图 8(a)比较可以发现, 上、下两位置点的  $\sigma_x$  值变化趋势截然相反, 前者主要表现为拉应力, 数值上相对后者要大, 而节理下侧点表现为压应力。二者相同之处是应力峰值最大的曲线分别是 30°入射角和 50°入射角时, 当入射角较大或者较小时, 对  $\sigma_x$  值的影响程度均有限, 此外应力峰值均出现在 2.5 s 后的同一时间点, 也就是入射波峰值点后的短时间内。观察图 7(a)还可以发现在入射角达到 70°时, 应力曲线在 3 s 前后出现一段正值, 这说明出现了短暂的横向压应力, 这是由于当入射角增大时, 波形转换过程中应力的横向分量增大, 导致在对节理端部受力影响更为明显的是水平剪力  $\tau$ 。当  $\tau$  值增大时, 图 6(a)中的这种不对称特征会更加明显, 只是挤压到上部的拉应力区缩小, 这也就是下侧出现压应力的原因。

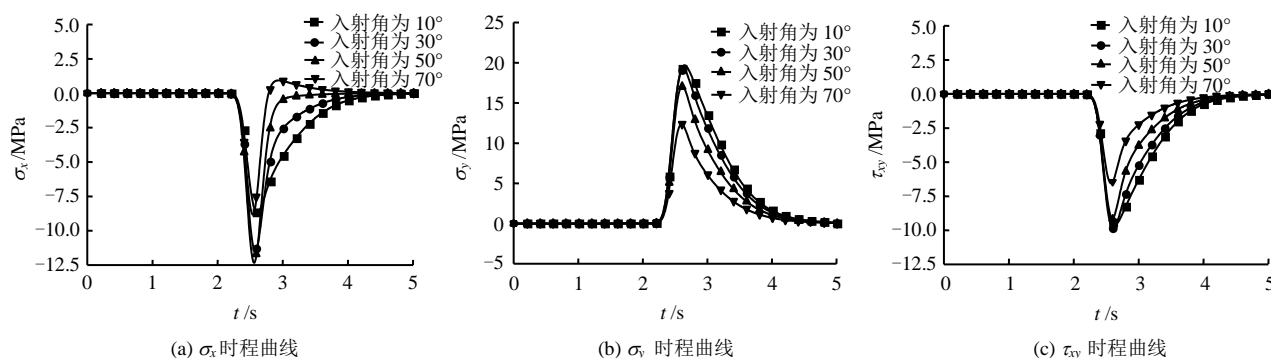


图 7 节理端部上侧点应力分量时程曲线

Fig.7 The duration traces of stress component for the upper point at the end of joint

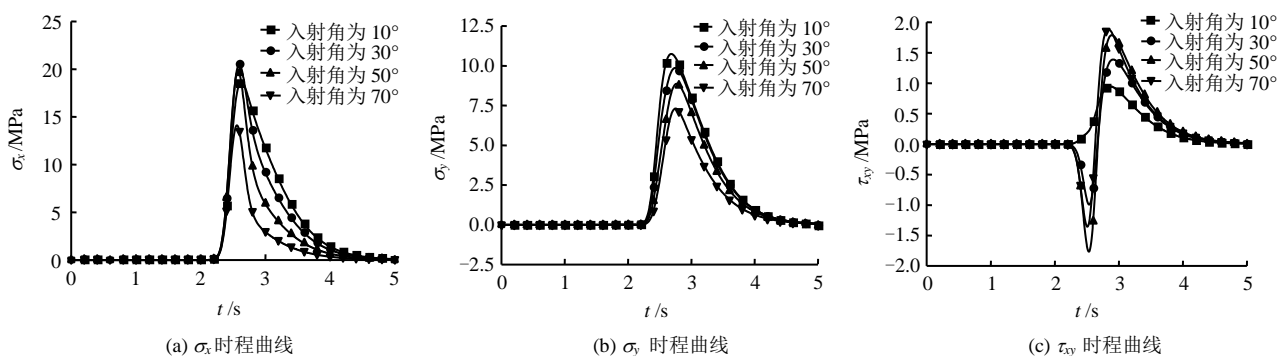


图 8 节理端部下侧点应力分量时程曲线

Fig.8 Duration traces of stress component for the lower point at the end of joint

图 7(b)和图 8(b)是  $\sigma_y$  随时间变化情况, 两个位置的  $\sigma_y$  值变化趋势基本一致, 且均表现为压应力, 随入射角度增加应力值显著下降, 上侧点的应力值是下侧点应力值的大约二倍关系。

对表示  $\tau_{xy}$  随时间变化情况的图 7(c)和图 8(c)进

行分析, 上侧点  $\tau_{xy}$  值变化趋势同入射波变化基本一致, 随着入射角增大应力值显著下降, 应力值相比于下侧点大很多。节理端部下侧点  $\tau_{xy}$  值随入射角不同出现不同程度的波动, 当入射角为 30°~70°的 3 条曲线均出现应力值符号改变, 也就是剪应力方向

发生变化。

综合图 7、8 中的 6 幅图还可以发现, 应力峰值均出现在 2.5 s 后, 而入射波质点振速的峰值是在 2.5 s 时刻, 且衰减速率较之入射波要小, 出现这种滞后现象说明节理在张开过程中节理刚度逐渐达到相对稳定的值, 而切向刚度值是一固定常数, 所以在应力上升的初始阶段起主要作用的是 S 波, 因此, 应力曲线的走势也同应力波波形基本一致, 这一阶段的 P 波能量主要积聚在节理内部, 当法向刚度上升后, 透射波质点振速也逐渐上升, 此时 S 波能量下降, P 波开始对节理端部的应力值起支配作用。随着两种波的质点振速均下降, 但节理变形还没有完全恢复, 透射波质点振速下降会相对滞后, 在二者的共同作用下端部应力便会如图中曲线所表现出的变化趋势, 与应力值前段陡增过程相比, 应力值下降过程要舒缓平滑, 持续时间更长。

应力变化曲线体现出了应力值变化相对于入射波质点振速的滞后现象, 节理端部应力值由峰值恢复到原有应力状态过程中经历的时间较其增长过程明显大出许多。这一过程中, 节理法向刚度变化缓慢, 节理张开较大, 如果此时有其他入射波作用, 根据入射波质点振速的方向不同可能会产生波形叠加或抵消。在应力值变小的这段时间, 节理端部应力场受 S 波与 P 波共同作用, 由于二者的此消彼长, 导致端部应力场呈现出逐渐变化, 应力积聚在节理端部的时间越久, 一旦应力值超过岩石抗拉强度, 这就会提供端部开裂的时间。应力作用时间越长, 端部的开裂就会越明显。

#### 4.2 节理端部位移分析

将图 9(a)、图 10(a)与图 7(a)、图 8(a)比较, 两点的横向位移值与应力值变化具有很大程度上的相似, 产生的横向位移方向相反, 下侧点位移较上侧点位移要高出 1 倍。在滞后性方面, 随着入射角度增大位移滞后效应减弱, 除此之外, 横向位移值与入射角度之间并没有形成明显的关联。但能够发现的一点是, 入射角为 70°时, 上下两点的位移值均是 4 种情况中最小的, 当入射角度增大的过程中, 切向应力增大法向应力逐渐下降, 但横向位移值却出现了下降, 这说明法向应力对节理端部上下两侧的横向位移变化也存在较大影响。入射角的变化对竖向位移的影响非常直观, 同法向应力的变化随入射角改变的情形基本一致。

图 9(b)和图 10(b)反映了竖向位移值随时间变化情况, 入射角的变化对竖向位移的影响非常直观, 同法向应力的变化随入射角改变的情形基本一致。

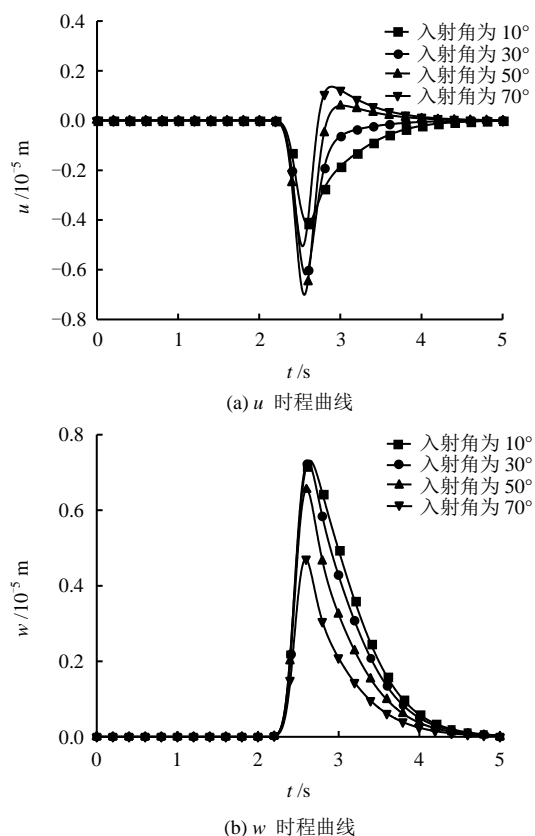


图 9 节理端部上侧点位移分量时程曲线  
Fig.9 Duration traces of displacement component for the upper point at the end of joint

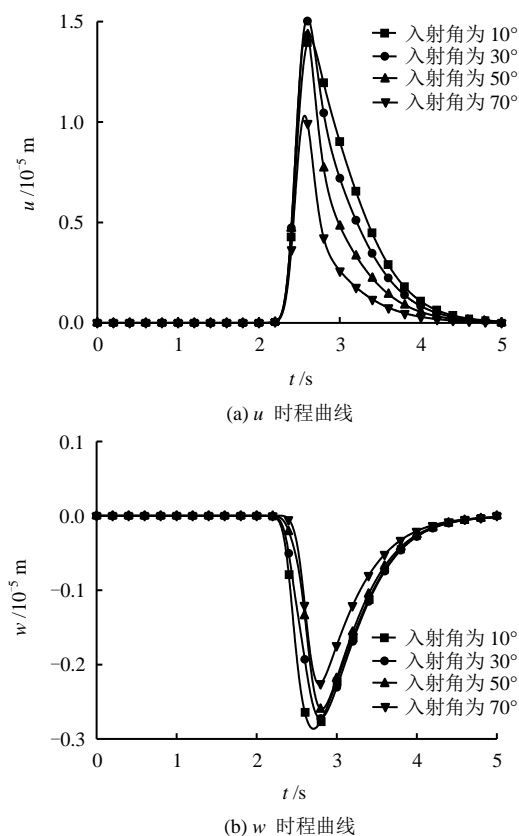


图 10 节理端部下侧点位移分量时程曲线  
Fig.10 Duration traces of displacement component for the lower point at the end of joint



综上所述,从位移变化的角度来分析,节理端部上、下两侧点横向位移会受到法向应力与切向应力共同影响,当入射角度过大或过小时,作用在节理两侧的切向与法向应力会出现单极化,横向位移此时会下降;竖向位移的影响因素更多的来自法向应力作用,所以入射角度较小时会有较大的竖向位移产生。

## 5 结 论

(1) 应力波穿过节理过程会产生波形转换,采用岩石非线性法向本构关系与线性切向本构关系的组合模型,节理端部受力变化与入射波质点振速相比会出现滞后现象,应力下降过程较增长过程更缓慢。

(2) 节理端部的横向位移与应力波入射角度并非单调变化,过大或过小的入射角度在节理端部引起的横向位移均会降低,这说明节理端部的横向位移受两个方向的应力分量的影响都很明显,这与主要受法向应力分量影响产生的竖向位移存在明显不同。

## 参 考 文 献

- [1] ZHU J B, ZHAO J. Obliquely incident wave propagation across rock joints with virtual wave source method[J]. **Journal of Applied Geophysics**, 2013, 88: 23—30. 567
- [2] CHE Ai-lan, YANG Hong-kai, WANG Bin, et al. Wave propagations through jointed rock masses and their effects on the stability of slopes[J]. **Engineering Geology**, 2016, 201: 45—56.
- [3] HAMID REZA MOHAMMADI AZIZABADIA, HAMID MANSOURI, OLIVIER FOUCHÉ. Coupling of two methods, waveform superposition and numerical, to model blast vibration effect on slope stability in jointed rock masses[J]. **Computers and Geotechnics**, 2014, 61: 42—49.
- [4] WANG Jin-an, WANG Yu-xi, CAO Qiu-ju, et al. Behavior of microcontacts in rock joints under direct shear creep loading[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2015, 78: 217—229.
- [5] LI J C, WU W, LI H B, et al. A thin-layer interface model for wave propagation through filled rock joints[J]. **Journal of Applied Geophysics**, 2013, 91: 31—38.
- [6] 俞缙, 赵晓豹, 赵维炳, 等. 改进的岩石节理弹性非线性法向变形本构模型研究[J]. **岩土工程学报**, 2008, 30(9): 1316—1321.
- [7] YU Jin, ZHAO Xiao-bao, ZHAO Wei-bing, et al. Improved nonlinear elastic constitutive model for normal deformation of rock fractures[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(9): 1316—1321.
- [8] 石崇, 徐卫亚, 周家文, 等. 节理面非线性变形对 SV 波透反射性能影响[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, (增刊 1): 2661—2668.
- [9] SHI Chong, XU Wei-ya, ZHOU Jia-wen, et al. Effect of nonlinear deformation at joint interface on transmission and reflection[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.1): 2661—2668.
- [10] 王观石, 李长洪, 陈保君, 等. 应力波在非线性结构面介质中的传播规律[J]. **岩土力学**, 2009, 12: 3747—3752.
- [11] WANG Guan-shi, LI Chang-hong, CHEN Bao-jun, et al. Propagation law of stress wave in nonlinear structural surface medium[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 12: 3747—3752.
- [12] 杨仁树, 苏洪, 龚悦, 等. 爆炸荷载下不对称 Y 型裂纹扩展规律的试验研究[J]. **岩土力学**, 2017, 38(8): 2175—2181.
- [13] YANG Ren-shu, SU Hong, GONG Yue, et al. Study on the regularity of asymmetric Y-shaped cracks propagation under blast loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(8): 2175—2181.
- [14] 刘婷婷, 李建春, 李海波, 等. 剪切速率对平直充填节理的剪切力学特性影响研究[J]. **岩土力学**, 2017, 38(7): 1967—1973.
- [15] LIU Ting-ting, LI Jian-chun, LI Hai-bo, et al. Influence of shearing velocity on shear mechanical properties of planar filled joints[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(7): 1967—1973.
- [16] 李业学, 范建辉, 李铮. 岩体节理对应力波传播规律影响的研究进展[J]. **湖北文理学院学报**, 2015, 36(11): 10—14+22.
- [17] LI Ye-xue, FAN Jian-hui, LI Zheng. Research progress of influence of rock joint on propagation rule of stress wave[J]. **Journal of Hubei University of Arts and Science**, 2015, 36(11): 10—14+22.
- [18] 刘再华, 解德, 王元汉, 等. 工程断裂动力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.
- [19] LIU Zai-hua, XIE De, WANG Yuan-han, et al. Engineering fracture dynamic mechanics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press,



- 1996.
- [13] 宋林, 闫玉湛, 韩八晓, 等. 非线性变形节理中纵波传播特性的理论研究[J]. 应用力学学报, 2012, 29(2): 133—140+236.
- SONG Lin, YAN Yu-zhan, HAN Ba-xiao, et al. Theoretical research into the wave propagation of P-wave across rock joint with nonlinear deformation[J]. **Chinese Journal of Applied Mechanics**, 2012, 29(2): 133—140+236.
- [14] BANDIS S C, LUMSDEN A C, BARTON N R. Fundamentals of rock joint deformation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1983, 20(6): 249—268.
- [15] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- China aviation academy. Stress intensity factor[M]. Beijing: Science Press, 1981.
- [16] 李世愚, 和泰名, 尹祥础, 等. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
- LI Shi-yu, HE Tai-ming, YIN Xiang-chu, et al. Introduction of rock fracture mechanics[M]. Hefei: University of Science & Technology China Press, 2010.
- [17] 程新, 赵树山. 断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- CHENG Jin, ZHAO Shu-shan. Rock fracture mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [18] 顾樵. 数学物理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- GU Qiao. Mathematical physical method[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [19] 张凤鹏, 彭建宇, 范光华, 等. 不同静应力和节理条件下岩体爆破破岩机制研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 1839—1846+1913.
- ZHANG Feng-peng, PENG Jian-yu, FAN Guang-hua, et al. Mechanisms of blasting-induced rock fractures under different static stress and joint properties conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(7): 1839—1846+1913.

#### 上接第 2326 页

- [7] 范垚垚, 郭晓航, 邓指军, 等. 正上方加卸载对盾构隧道变形的影响分析[J]. 施工技术, 2014, 43(7): 107—109.
- FAN Yao-yao, GUO Xiao-hang, DENG Zhi-jun, et al. Deformation analysis of shield tunnel with loading and unloading above[J]. **Construction Technology**, 2014, 43(7): 107—109.
- [8] 徐长节, 王伊丽, 徐莞蕾, 等. 新建工程基坑开挖及结构施工对既建下卧隧道的影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3201—3209.
- XU Chang-jie, WANG Yi-li, XU Yuan-lei, et al. Effect of foundation pit excavation and structural construction of new engineering on existing underlying tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(11): 3201—3209.
- [9] 李国龙, 袁长丰, 黄海滨, 等. 高层建筑全过程施工对临近既有隧道影响的数值模拟分析[J]. 施工技术, 2016, (1): 77—81.
- LI Guo-long, YUAN Chang-feng, HUANG Hai-bin, et al. Numerical simulation analysis of the impact caused by the whole process construction of high-rise building upon the adjacent tunnel[J]. **Construction Technology**, 2016, (1): 77—81.
- [10] KUSUI A, VILLAESCUSA E, FUNATSU T. Mechanical behaviour of scaled-down unsupported tunnel walls in hard rock under high stress[J]. **Tunnelling & Underground Space Technology**, 2016, 60: 30—40.
- [11] LEUNG C, MEGUID M A. An experimental study of the effect of local contact loss on the earth pressure distribution on existing tunnel linings[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2011, 26(1): 139—145.
- [12] PRASAD S K, TOWHATA I. Shaking table tests in earth quake geotechnical engineering[J]. **Current Science**, 2004, 87(10): 1398—1404.
- [13] 林皋, 朱彤, 林蓓. 结构动力模型试验的相似技巧[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(1): 1—8.
- LIN Gao, ZHU Tong, LIN Bei. Similarity technique for dynamic structural model test[J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2000, 40(1): 1—8.
- [14] 王海波, 徐明, 宋二祥. 基于硬化土模型的小应变本构模型研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 39—43.
- WANG Hai-bo, XU Ming, SONG Er-xiang. Small strain constitutive model based on hardening soil model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(1): 39—43.