

文章编号: 1001-1455(2009)01-0018-05

应力波对滑移弱化断层的动态触发作用*

刘艳¹, 许金余^{1, 2}

(1. 西北工业大学力学与建筑工程学院, 陕西 西安 710072;

2. 空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 将断层简化为满足线性滑移弱化摩擦准则的理想裂纹界面。在考虑初始应力的条件下, 研究了应力波通过两个相互接触的弹性半空间时的透射和反射关系。在此基础上, 得出了应力波扰动断层时的初始滑移条件和不稳定滑移条件, 并分析了断层动态触发与扰动应力波、断层特性和初始状态等因素的关系。当入射角一定时, 入射波频率越高, 所需振幅越大; 断层的临界滑移越大, 断层越稳定, 扰动应力波所需振幅越大。

关键词: 固体力学; 动态触发; 滑移弱化摩擦; 断层; 应力波

中图分类号: O347

国标学科代码: 130·15

文献标志码: A

1 引言

岩体中存在着断层、弱面和软弱夹层等不连续面, 且在正应力、剪应力与摩擦阻力共同作用下处于平衡状态。以往, 人们处理岩体中各种界面与应力波传播的问题时, 多针对界面完好粘结的情况进行分析, 非完全粘结情况也多限于界面力与界面位移间断正比变化的线性模型, 很少涉及断层摩擦接触界面的情况。但事实上, 岩体中的构造结构面的粘结力很少, 有的甚至几乎无粘结力。当爆炸应力波(主要为压应力波)斜入射到这些结构面时, 应力波在结构面上的切向分量增加使系统势能逐步聚集而增加, 当剪切力增大到静摩擦力时, 则导致断层两侧岩体相互滑动, 甚至可能形成不稳定滑移, 触发产生地震。

目前, 已有很多学者对此类问题进行理论分析和数值模拟, 比如李夕兵^[1]给出应力波斜入射到能滑移、有摩擦的软弱结构时, 波势、应力和能流的透、反射关系; 卢文波^[2-3]研究了应力波与节理刚度系数描述的线性滑移岩石界面间的相互作用和考虑界面初始应力条件下应力波在由摩尔库仑强度控制下的透、反射波幅瞬变; G. Quentin 等^[4]从理论上分析了弹性波在无摩擦滑移界面的反射和折射关系; YI Wei-dong^[5]采用有限差分法模拟地震波在单一裂纹和裂纹系中的传播, 并比较显式裂纹模型和等效模型的差异。但这些研究很少考虑断层摩擦对入射应力波在断层面传播的影响。本文中将断层简化为理想裂纹界面, 采用线性滑移弱化摩擦本构模型, 分析在有初始应力条件下, 入射 P 波作用在断层面上时应力波的透、反射关系, 得出断层初始滑移和不稳定滑移的条件, 且对断层动态触发问题进行探讨。

2 线性滑移弱化破坏准则

断层动态触发问题涉及很多因素, 如断层尺寸、初始应力场、外加动态荷载和断层失效准则等, 其中断层破坏准则是影响断层滑移的关键因素之一。本文中采用的线性滑移弱化破坏准则与常见的库仑破坏准则很相似, 当断层面上剪应力大于正应力与摩擦因数之积时(忽略粘结力), 断层发生相对滑移。此表达式为

$$\sigma_s(t) > \mu(\delta)\sigma_N(t) \quad (1)$$

式中: 摩擦因数 $\mu(\delta)$ 是断层相对位移 δ 的函数, 具体关系为^[6]

$$\mu(\delta) = \begin{cases} \mu_S - (\mu_S - \mu_D)\delta/D_C & 0 \leq \delta < D_C \\ \mu_D & \delta \geq D_C \end{cases} \quad (2)$$

* 收稿日期: 2007-05-21; 修回日期: 2009-01-09

作者简介: 刘艳(1980—), 女, 博士研究生。

式中： μ_D 、 μ_S 分别为动、静摩擦因数； D_C 为临界滑移距离。当断层剪应力达到剪切屈服强度时，断层开始滑移，断层摩擦因数随之线性减小，直到断层滑移达到 D_C 。

引入量纲一弱化参数 β ，定义为

$$\beta = (\mu_S - \mu_D) S_N L / (2GD_C) \tag{3}$$

式中： L 为断层长度， S_N 为断层面上正应力， $G = \rho c^2$ 为刚度模量。C. Dascalu 等^[7]对断层进行稳定性分析，得出动态问题中反应断层不稳定性第一特征值 β_0 。断层行为由 β 和 β_0 的相对量决定，当 $\beta < \beta_0$ 时，断层是稳定的；反之，当 $\beta > \beta_0$ 时，断层是不稳定的，可以被触发。

3 应力波在断层面上的反射和折射

将断层简化为理想的裂纹，考虑两个相互接触的半无限弹性空间 I 和 II，材料参数分别为 λ 、 μ 、 ρ 、 c 和 $\bar{\lambda}$ 、 $\bar{\mu}$ 、 $\bar{\rho}$ 、 \bar{c} 。在初始压应力 σ_0 和剪应力 τ_0 的作用下，以线性弱化滑移摩擦准则接触。并假设 $\tau_0/\sigma_0 < \mu_S$ ，此时两个半空间没有初始滑动。

假设只有介质 I 中有振幅为 A_1 的 P 波及振幅为 B_1 的 SV 波入射到分界面上，此时入射和反射情形如图 1 所示，则两种介质中波的势函数可设为^[8]

$$\phi = A_1 e^{ik(x+p_1z-ct)} + A_2 e^{ik(x-p_1z-ct)}, \quad \psi = B_1 e^{ik(x+p_2z-ct)} + B_2 e^{ik(x-p_2z-ct)} \quad z < 0 \tag{4}$$

$$\bar{\phi} = \bar{A}_1 e^{ik(x+\bar{p}_1z-ct)}, \quad \bar{\psi} = \bar{B}_1 e^{ik(x+\bar{p}_2z-ct)} \quad z > 0 \tag{5}$$

式中： $p_1^2 = c^2/c_1^2 - 1$ ， $p_2^2 = c^2/c_2^2 - 1$ ， $\bar{p}_1^2 = c^2/\bar{c}_1^2 - 1$ ， $\bar{p}_2^2 = c^2/\bar{c}_2^2 - 1$ 。

图 1 中， θ_1 、 θ_2 、 $\bar{\theta}_1$ 及 $\bar{\theta}_2$ 分别表示相应的入射角、反射角及折射角。根据斯奈尔准则，有

$$c = \frac{c_1}{\sin\theta_1} = \frac{c_2}{\sin\theta_2} = \frac{\bar{c}_1}{\sin\bar{\theta}_1} = \frac{\bar{c}_2}{\sin\bar{\theta}_2}$$

式中： c_1 、 c_2 和 \bar{c}_1 、 \bar{c}_2 分别为两侧岩体 I 和 II 中的 P 波与 SV 波的波速。

设外加压力 σ_0 很大，界面不会出现局部被拉开的现象。断层界面采用线性滑移弱化摩擦本构模型，忽略其粘结力，则两侧岩体在初始滑移和滑移过程中应力和位移分量满足如下条件

$$\begin{aligned} |u_x(\text{I}) - u_x(\text{II})| &= \delta, & u_z(\text{II}) &= u_z(\text{I}), & \sigma_{zz}(\text{I}) &= \sigma_{zz}(\text{II}), \\ \sigma_{xz}(\text{I}) &= \sigma_{xz}(\text{II}), & \sigma_{xz}(\text{I}) + \tau_0 &= \mu(\delta)(\sigma_{zz}(\text{I}) + \sigma_0) \end{aligned} \tag{6}$$

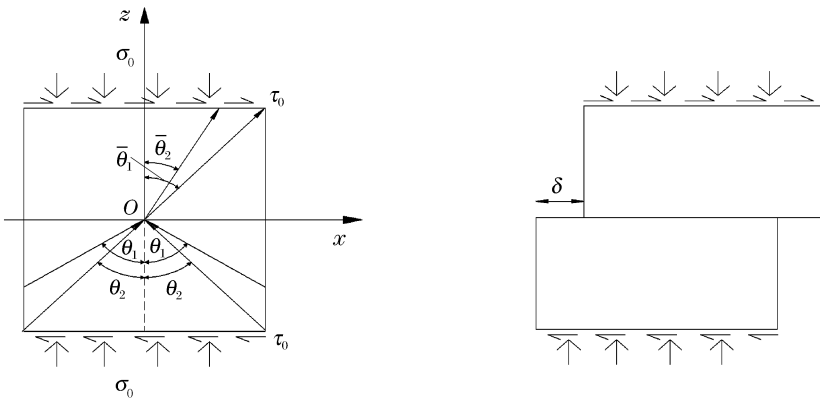


图 1 P 波和 SV 波在断层面上的透射和反射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the reflection and transmission of P and S waves

4 初始滑移条件

应力波斜入射到断层结构面时，在结构面上的切向分量增加使系统势能逐步聚集而增加，当剪切力增大到静摩擦力时，将导致断层两侧岩体相互滑动。对应于初始滑移点的临界状态，相对位移 $\delta = 0$ ，由式(2)可知此时摩擦因数为 μ_S 。将波的势函数表达式(4)、(5)带入式(6)，可得用拉梅势表示的方程组

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial z} \right| = \delta = 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial z} - \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial x} \\ \mu \left(2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \right) = \bar{\mu} \left(2 \frac{\partial^2 \bar{\phi}}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial x^2} \right) \\ \lambda \nabla^2 \phi + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} \right) = \bar{\lambda} \nabla^2 \bar{\phi} + 2\bar{\mu} \left(\frac{\partial^2 \bar{\phi}}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial x \partial z} \right) \\ \mu \left(2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \right) + \tau_0 = \mu(\delta)_{\delta=0} \left(\lambda \nabla^2 \phi + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} \right) + \sigma_0 \right) \end{array} \right. \quad (7)$$

爆炸应力波入射到断层界面上时,主要为压应力波。因此本文中取 $B_1=0$ 对应于单纯压应力波入射的情形,将关系式 $\lambda/\mu=c_1^2/c_2^2-2$ 和 $\bar{\lambda}/\bar{\mu}=\bar{c}_1^2/\bar{c}_2^2-2$ 带入方程组(7),可得到入射 P 波临界振幅

$$A_{1,cr} = \frac{(\mu_S \sigma_0 - \tau_0) d}{2k^2 \bar{\mu} [(\mu_S \bar{p}_2^2 - \mu_S - 2\bar{p}_1)(b_2 + b_4) + (\bar{p}_2^2 - 1 - 2\mu_S \bar{p}_1)(a_2 + a_4)]} \quad (8)$$

且满足

$$(\mu_S \bar{p}_2^2 - \mu_S - 2\bar{p}_1)(b_2 + b_4) + (\bar{p}_2^2 - 1 - 2\mu_S \bar{p}_1)(a_2 + a_4) > 0 \quad (9)$$

式中: $d = (a_1 + a_3)(b_2 + b_4) - (a_2 + a_4)(b_1 + b_3)$, $a_1 = \frac{2\mu - \bar{\mu}(1 - \bar{p}_2^2)}{\mu(1 + p_2^2)}$, $b_1 = \frac{2(\mu - \bar{\mu})\bar{p}_2}{\mu(1 + p_2^2)}$,
 $a_2 = \frac{-\mu(1 - p_2^2) + \bar{\mu}(1 - \bar{p}_2^2)}{\mu(1 + p_2^2)p_2}$, $b_2 = \frac{2\bar{\mu}\bar{p}_2 - \mu(1 - p_2^2)\bar{p}_2}{\mu(1 + p_2^2)p_2}$, $a_3 = \frac{2\bar{\mu}\bar{p}_1 - \mu(1 - p_2^2)\bar{p}_1}{\mu(1 + p_2^2)p_1}$,
 $b_3 = \frac{\mu(1 - p_2^2) - \mu(1 - \bar{p}_2^2)}{\mu(1 + p_2^2)p_1}$, $a_4 = \frac{-2\bar{\mu}\bar{p}_1 + 2\bar{\mu}\bar{p}_1}{\mu(1 + p_2^2)}$, $b_4 = \frac{2\mu - \bar{\mu}(1 - \bar{p}_2^2)}{\mu(1 + p_2^2)}$ 。

当入射振幅 $A_1 > A_{1,cr}$ 和式(8)共同满足时,断层出现滑移,并且可知引起岩体相互滑移的入射波临界振幅与入射频率、岩石界面初始正应力和剪应力、两侧岩体的弹性参数等因素有关。当界面两侧岩体特性完全相同,式(8)、(9)可分别化简为

$$A_{1,cr} = \frac{\mu_S \sigma_0 - \tau_0}{k^2 \mu (\mu_S p_2^2 - \mu_S - 2p_1)} \quad (10)$$

$$\mu_S p_2^2 - \mu_S - 2p_1 > 0 \quad (11)$$

简化问题的临界振幅计算结果与文献[4]的结果完全一致,即引起界面两侧岩体相互滑动的入射波波幅与其频率密切相关:频率越高,所需的幅值越大。

5 不稳定滑移条件

为简化计算,继续假设两侧岩体相同。当滑动摩擦因数刚开始下降到动态滑动摩擦因数时,由公式(2)可知,此时两侧岩体相对滑移距离 $\delta = D_C$ 。将方程组(7)中第 1 式的 $\delta=0$ 改为 $\delta=D_C$ 和第 5 式中的 $\mu(\delta)_{\delta=0}$ 改为 $\mu(\delta)_{\delta=D_C}$,则求得

$$D_C = \frac{2p_2(p_2^2 + 1)[(\mu_D \sigma_0 - \tau_0)/(\mu k^2) - (\mu_D p_2^2 - 2p_1 - \mu_D)A_1]}{(p_2^2 - 1)^2 + 4p_1 p_2} \quad (12)$$

将式(12)带入式(3),可求出断层不稳定滑移时,临界滑移距离 D_C 与弱化参数 β_0 的关系为

$$\frac{(\mu_S - \mu_D)S_N L}{2G\beta_0} > \frac{2p_2(p_2^2 + 1)[(\mu_D \sigma_0 - \tau_0)/(\mu k^2) - (\mu_D p_2^2 - 2p_1 - \mu_D)A_1]}{(p_2^2 - 1)^2 + 4p_1 p_2} \quad (13)$$

对式(13)进行变换,可得到

$$A_1 > \frac{2p_2(p_2^2 + 1)(\mu_D \sigma_0 - \tau_0)/(\mu k^2) - \frac{(\mu_S - \mu_D)S_N L}{2G\beta_0} [(p_2^2 - 1)^2 + 4p_1 p_2]}{2p_2(p_2^2 + 1)(\mu_D p_2^2 - 2p_1 - \mu_D)} \quad (14)$$

且满足

$$\mu_D p_2^2 - 2p_1 - \mu_D > 0 \tag{15}$$

当入射波振幅和入射角度满足式(14)、(15)时,断层处于不稳定滑移状态。根据滑移弱化破裂准则,当断层面的剪切应力超过物体抗剪强度时,断层面两侧岩体发生相对位移。由此可知,断层面开始滑移,扰动波的反射应力增大,围压降低,抗剪强度降低,有利于断层滑动;随着滑移的增加,抗剪强度也降低,在其他条件不变的情况下,滑移速度将增加,断层出现不稳定滑动,产生地震。

6 算 例

为了给出具体的计算结果和方便讨论,考虑一个特例,设两相互接触的弹性半空间具有相同的弹性性质,其材料参数 $c_1 = 5.2 \text{ km/s}$, $c_2 = 3.0 \text{ km/s}$, $\lambda = 1126 \text{ MPa}$, $\mu = 562 \text{ MPa}$, 入射角度为 45° , 断层静态摩擦因数 $\mu_s = 0.75$, 动态摩擦因数 $\mu_D = 0.65$, 初始正应力 $\sigma_0 = 100 \text{ MPa}$, 初始剪应力 $\tau_0 = 66 \text{ MPa}$ 。分析入射波使断层产生初始滑移的条件和 $D_C = 0.8, 1.2, 2.0$ 时入射波能够触发断层不稳定滑移的条件。

计算结果如图 2 所示,入射波对断层的触发与断层自身特性有关。当 $D_C = 0.8, 1.2, 2.0$ 时,所需入射波的振幅也随之增加,且当入射波的波数增加时,入射波振幅减小。当 D_C 值一定时,波数越大,所需入射波振幅越小。

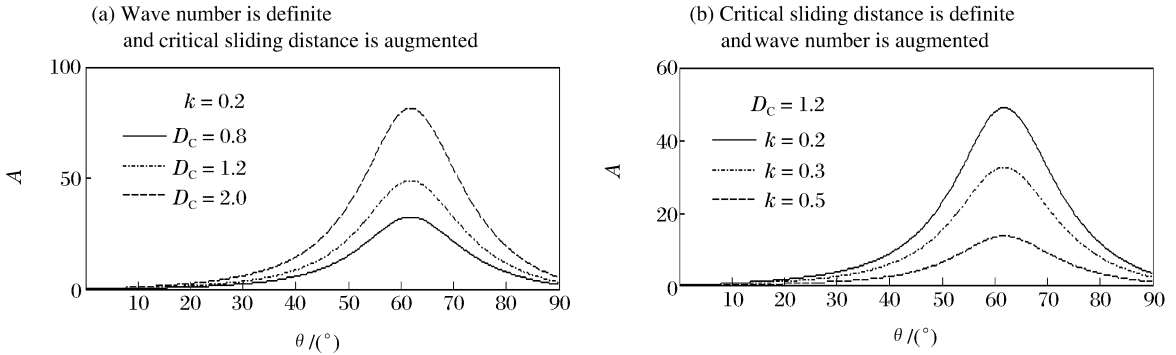


图 2 入射波触发断层时在两种不同的情况下入射角与振幅的关系

Fig. 2 Relationship between amplitude and incident angle in the two different cases

7 结 论

首先将断层面抽象为理想裂纹,并采用线性滑移弱化本构模型,分析 P 波入射时其反射和透射规律,并得出断层初始滑移和不稳定滑移发生的条件。初始滑移时入射波的幅值与入射频率、初始应力状态、静态摩擦因数、两侧岩体特性等因素有关,且频率越大,所需振幅也越大;触发断层不稳定滑移时,扰动入射波除了和上述因素有关外,还与动态摩擦因数和断层特性等因素有关。此外,还通过算例分析给定入射角情况下,入射波触发断层不稳定滑移的振幅、频率和临界滑移距离之间的关系,这一计算结果与观察到的现象一致。可见,当满足一定条件时,扰动波会使原本在无扰动情况下尚未达到滑移条件的断层提前发生滑移,当滑移继续传播,甚至可以触发断层不稳定滑动,导致地震的发生。

参考文献：

[1] 李夕兵. 论岩体软弱结构面对应力波传播的影响[J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(4): 334-342.
 LI Xi-bing. Influence of the structural weakness planes in rock mass on the propagation of stress wave[J]. Explosion and Shock Waves, 1993, 13(4): 334-342.

[2] 卢文波, 陶振宇. 界面摩擦滑动引起的透反射波幅瞬变研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1996, 29(6): 35-39.
 LU Wen-bo, TAO Zhen-yu. A sudden variation of transmitted and reflected wave amplitude during frictional sliding between two interface[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1996, 29(6): 35-39.

- [3] 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.
- [4] Grimal Q, Naili S, Watzky A. On the transmission of transient elastodynamic waves at a frictionless contact interface: application to a weakly coupled bimaterial[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41(2): 459-480.
- [5] YI Wei-dong. Numerical investigation of seismic wave propagation in fracture systems[D]. Berkeley: University of California, 1999.
- [6] Voisin C. Dynamic triggering of earthquakes: The linear slip-dependent friction case[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(17): 3357-3360.
- [7] Dasalu C, Ionescu I R, Campillo M. Fault finiteness and initiation of dynamic shear instability[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 177(3-4): 163-176.
- [8] 胡德绥. 弹性波动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 206-208.

Dynamic triggering of stress wave to fault with linear slip-weakening friction

LIU Yan^{1*}, XU Jin-yu^{1,2}

(1. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

2. Engineering Institute, Air Force Engineering University,
Xi'an 710078, Shaanxi, China)

Abstract: The paper characterizes the fault zone as an idealized interface with linear slip-weakening friction and investigates reflection and transmission of stress wave across two elastic half-spaces on the condition that the initial stress state of rock interface is taken into account. On this basis, the conditions of initial slip and unstable slip are revealed, and the occurrence of dynamic triggering is analyzed which depends on the balance between the incident wave and intrinsic mechanics of fault. The example shows that when the angle of incidence is given, the higher the frequency is, the larger the needed amplitude is.

Key words: solid mechanics; dynamic triggering; slip-weakening friction; fault; stress wave

* Corresponding author; LIU Yan
Telephone: 86-10-66711409

E-mail address: liuyan9771@mail.nwpu.edu.cn