

# 基于波场等效的节理面刚度参数取值研究<sup>\*</sup>

陈凯华, 石崇, 王芳, 李德杰, 韩珂

(河海大学 a.岩土力学与堤坝工程教育部重点试验室; b.岩土工程科学研究所, 南京 210098)

**摘 要:**节理岩体中的节理面往往有一定厚度,如果采用无厚度的线性节理模型分析,其刚度参数的确定非常困难。通过分析弹性波穿过节理面时的波场效应,建立了基于节理后振动强度相等的波场等效法,用于确定带厚度节理的刚度参数,并分析了各因素对弹性波在节理上传播的影响。结果表明:线性节理面的刚度参数是节理岩体的固有属性,与外界荷载无关,采用波场等效法计算刚度参数可行;在弹性波范围内,这种等效参数与入射波频率、入射角等因素关系不大。该方法可用于有厚度节理面动强度参数的确定与分析,完善现有的节理面刚度取值方法。

**关键词:** 应力波传播;节理面;波场等效;刚度参数

中图分类号: TU459

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2017)02-0357-07

## Study on the Value of Joint Stiffness Parameters Based on Wave Field Equivalence

Chen Kaihua, Shi Chong, Wang Fang, Li Dejie, Han Ke

(a. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering; b. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P.R. China)

**Abstract:** In jointed rock mass, the joint surface always has a certain thickness. It is difficult to determine the stiffness parameters with a linear joint surface model. By studying the wave field generated when the elastic waves penetrating the joint surface, the wave field equivalence method with the same vibration strength after penetration was established. The method can be used to determine the stiffness parameters of joint rock mass with certain thickness, and to analyze the impact of various factors on the propagation of elastic waves on joint surface. Results show that: the stiffness parameters of linear joint plane are the inherent property of joint rock mass which is unrelated to outside load and it is feasible to use wave field equivalence method to calculate stiffness parameters. Within the range of elastic wave, the equivalent parameters have no significant relations with the frequency of incident wave and incident angle. The method can be employed in the determination and analysis of dynamic strength parameters of joint plane and improve.

**Keywords:** transmission of stress wave; joint surface; equivalent of wave field; stiffness parameter

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-04-29(修改稿)

作者简介: 陈凯华(1989-), 男, 江苏南通人, 硕士生, 主要从事岩石力学与工程安全方面的研究工作。

E-mail: chenkaifuasky@163.com

通讯作者: 石崇(1978-), 男, 山东临沂人, 工学博士, 副教授, 主要从事岩石力学与工程安全方面的研究工作。

E-mail: scvictory@hhu.edu.cn

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(973)(2011CB013504); 国家自然科学基金青年基金(51309089); 江苏省基金(BK20130846)联合资助课题

## 0 引言

岩体中孕育着大量的不连续面,包括岩层接触面、断层、节理裂隙等,使得岩体成为一种由结构面和完整岩块组成的复合地质材料,结构面作为传输运动和变形的中介,其力学性质直接影响岩土体的宏观力学行为和稳定性,也决定了应力波传播的动力特性。

节理面是常见的不连续面,其界面性质存在充填与不充填情况,应力波在充填节理面处的传播规律,通常是假设界面上满足连续性条件<sup>[1]</sup>,不考虑两侧岩体的相对变形。Newmark<sup>[2]</sup>根据实际情况假定两界面可存在相对滑移,当应力波入射到这种界面就可能产生界面层相互滑动,提出了节理界面滑移模型,而 Murty<sup>[3]</sup>则认为应力波在穿越不连续面时会与黏结面发生作用,在界面处产生间断位移,但产生的面力仍可以是连续的。Myer<sup>[4]</sup>认为当黏结物充填在不连续界面处时,不连续界面上产生间断的位移,并且产生不连续的速度,变形呈现出非线性特征。根据不连续面变形特征,Zhao 和 Cai<sup>[5]</sup>在不连续面上用非线性法与特征值法相结合的变形模型,研究了波在节理面的传播问题,取得了较为合理的结果。这些研究表明:波场在节理面传播时位移会产生分解,此时不连续的节理面能够起到隔振的作用<sup>[6-9]</sup>。以往的研究多针对于软弱夹层而建立隔振模型<sup>[10]</sup>,而较少研究节理结构面的隔振模型。

由于节理面厚度较小,一般只有几毫米至几个厘米,在宏观数值模拟分析时很难构造如此薄的实体单元,因此常忽略其厚度,采用无厚度的线性节理面进行模拟。然而虽然相对厚度较小,但应力波在有厚度节理与无厚度线性节理中的传播机理并不一样,节理面应力波的散射受其刚度参数的影响显著。如何通过合理的刚度参数取值,通过无厚度线性节理面模拟有厚度节理的力学行为,使波动效应与实际有厚度节理的影响一致,是值得深入研究的课题。

本文基于应力波传播原理,分析了无厚度线性节理面上的波动效应,并基于无厚度与有厚度节理后波动效应相匹配原理,探讨了采用线性节理面模拟有厚度节理时节理刚度参数的取值,提出了一种节理刚度参数的波场等效方法,可为数值计算中的节理参数确定提供依据。

## 1 应力波穿越节理面波场

如图1所示,中间为一线性节理面,假定两侧的岩体力学参数一致,则应力波在两侧岩体中的传播特性不会变化。波以某一入射角透射节理面,由于节理面存在不连续变形,导致界面处产生散射现象<sup>[11-12]</sup>,应力波传播路径与波场能量均发生改变,节理面起到了隔振作用。

根据应力波传播的几何学原理<sup>[13]</sup>,如图1所示,透射过线性节理面的波射线只有两条,即透射P波和S波。如,通过A点的波射线路径只有 $O_1A$ 和 $O_2A$ ,其中 $O_1A$ 为透射纵波, $O_2A$ 为透射横波。因此,节理面后A点的位移波场 $\bar{u}$ 可由以上两波场相互叠加。

$$\bar{u} = \bar{u}_s + \bar{u}_p \quad (1)$$

式中: $\bar{u}_p = T_p s_{tp}(\bar{p}_1)$ ,  $\bar{u}_s = T_s s_{ts}(\bar{p}_2)$ ,  $T_p$ 、 $T_s$ 分别为P波透射系数与S波透射系数,它可由节理面 Zoeppritz 方程<sup>[14]</sup>确定; $\bar{p}_1$ 、 $\bar{p}_2$ 分别为透射纵波与横波的偏振方向,与图1中 $O_1A$ 、 $O_2A \perp$ (垂线)相对应。

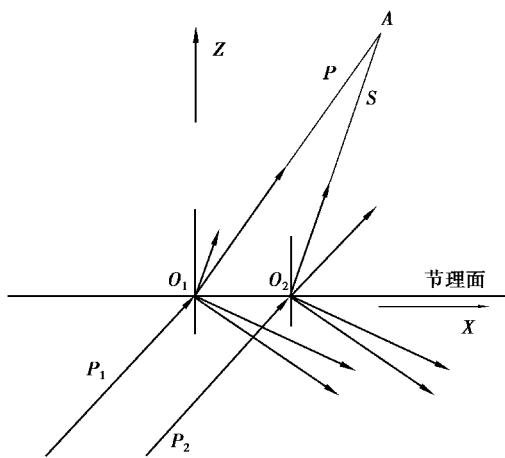


图1 线性节理透射模型

Fig.1 Transmission model of linear interface

假设入射位移波函数为 $f(t)$ ,且入射波束同时入射节理面,则根据射线理论有:

$$S_{tp} = f(t - t_p) \quad (2)$$

$$S_{ts} = f(t - t_s) \quad (3)$$

式中: $t_p$ 为透射纵波经路径 $O_1A$ 传播至A点时的延迟时间; $t_s$ 为透射横波经路径 $O_2A$ 传播至A点时的延迟时间。

为了分析节理面后的波场,岩体动力学参数采用 Miller(1978)所用参数,岩体纵、横波波速分别  $c_d = 3\,365\text{ m/s}$ ,  $c_s = 1\,943\text{ m/s}$ , 介质密度  $\rho = 2\,650$

$\text{kg/m}^3$ 。节理面法向与切向刚度取值为  $K_z = 1 \text{ GPa}$ ,  $K_s = 1 \text{ GPa}$ 。同时,设入射波函数为如式(4)所示的正弦波:

$$f(t) = A_0 \sin(\omega t) \tag{4}$$

式中: $f(t)$ 为位移时程函数; $A_0$ 为振幅; $\omega$ 为振动圆频率,取入射波频率为  $100 \text{ Hz}$ ,纵波,持续时间取两个周期  $t_{\max} = 0.126 \text{ s}$ ;入射角  $\beta_0 = 15^\circ$ 。

由于透射后波场由透射 P 波与透射 S 波构成,根据 A 点与节理面的距离不同,透射 P 波与透射 S 波的延时也各不相同,图 2 绘出了距离节理面  $100 \text{ m}$  处透射波位移场与入射波场的位移时程曲线。该图表明,由于透过节理面的波场相互干涉,传播距离与波速的不同使各波场到达的延迟时间不同。与入射波相比,透射 P 波与透射 S 波的合成波振幅有所减少,持续时间增加。不同的延迟时间使合成波在达到尾段时波形有畸变现象。

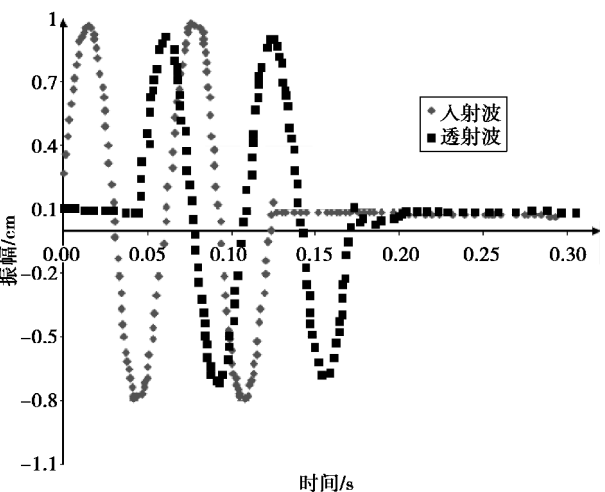


图 2 垂向距离  $100 \text{ m}$  时波形图

Fig.2 Waveform at normal distance  $100 \text{ m}$  from the joint

节理面上波的衰减是由于不连续位移造成的。对于线性模型,法向刚度增加,透射纵波系数亦增加,而切向刚度变化下透射纵波系数基本保持不变,这表明切向位移对透射纵波的振幅影响甚小。如图 3 所示,与节理面垂直距离不同的点由于波传播路径的不同,两个方向的合振幅与输入波相比并非保持为常数。法向与切向刚度对 S 波透射系数均有影响,二者的规律基本一致,切向(或法向)刚度增加,透射 S 波的振幅均有所减少,逐步逼近于零。当法向与切向刚度均接近零时,S 波透射系数为零,此时节理面是断开的,不会产生转换 S 波。

由于有厚度节理面与无厚度节理面后方均存在波场的改变,而线性节理面的散射主要取决于刚

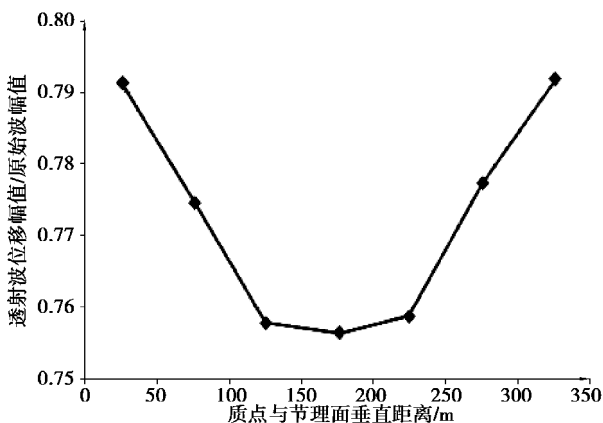


图 3 透射波与入射波振幅比随垂直距离变化  
Fig. 3 Amplitude ratio of transmission wave and incident wave with different normal distance

度参数,如果能令应力波穿越节理面后的波场一致,则可以近似的用无厚度线性节理模拟有厚度节理问题。

## 2 节理刚度确定的波场等效法

根据线性节理弹性波的散射原理,节理面散射系数与节理刚度有关,因此,非线性节理面波动效应首先需要获取节理面切向刚度、法向刚度、节理面的粘聚力、内摩擦角和抗拉强度指标。其中动法向与切向刚度是衡量动荷载作用下发生法向和切向位移的指标,很难通过试验方法获取到,即使获取到也难以考虑应力状态、非线性状态、动应变率的影响。对于多条节理情况,一般是采用下式对节理面的法向刚度  $k_n$  和切向刚度  $k_s$  进行估计<sup>[14]</sup>:

$$K_n = \frac{E_m E_r}{d(E_r - E_m)} \tag{5}$$

$$K_s = \frac{G_m G_r}{d(G_m - G_r)} \tag{6}$$

式中: $E_m, E_r$  分别为岩体和完整岩石的弹性模量; $d$  是结构面间距; $G_m, G_r$  分别是岩体和完整岩石的剪切模量。

但实际上,节理面的力学参数尺寸效应很突出,小尺寸试样的尺寸试验结构与实际偏差较大,一般实际值应该小于小尺寸的试样值。在上述计算式采用节理面刚度时,实践中并不一定都能得出要求的已知参数,对估计的节理面刚度是否正确也缺乏判断依据,而过低的节理刚度可能导致计算收敛时间增长。根据经验<sup>[15]</sup>,在离散元计算中,刚度的下限值一般满足如下要求:

$$100 \left( \frac{K + 1.33G}{\Delta d_{\min}} \right) \geq K_n; K_s \geq 0.1 \left( \frac{K + 1.33G}{\Delta d_{\min}} \right) \tag{7}$$

式中: $\Delta d_{\min}$ 表示结构面法向方向上与结构面相临的岩体单元尺寸; $K, G$ 为岩体的变形模量和剪切模量。

Barton 等<sup>[15]</sup>曾经对不同情况的节理面刚度特征进行研究,发现节理面刚度具有明显的尺寸效应,长度每增加一个数量级,节理面刚度就降低一个数量级;围岩增高时节理面刚度会明显增加;含岩桥的不连续面可比完全充填弱面刚度高两个数量级。

对于大量分布的小尺度节理,难以计算每一条结构面的动力效应,采用上述方法计算节理岩体的等效刚度是可行的。但对于大尺度的节理,尤其是有充填厚度的节理,若不考虑弹性波的传播因素就会引起较大的误差。本文在波场动响应等效基础上,对大尺度的结构面动刚度的计算,提出了波场等效法,其结果具有很好的稳定性。

2.1 模型验证与岩体力学参数

由于大部分节理为充填的薄层,在数值模拟中采用薄层单元模拟时由于单元形状的畸形易造成结果失真,从而造成沿节理结构面的应力、变形不合理,在进行数值计算时应该尽量避免。弹性波弱面效应表明,充填节理与线性节理均会造成弹性波场的分解,而线性节理面的散射正是由于节理面刚

度的差异造成的。因此,只要调整线性节理面法向与切向刚度的数值,使透射波场与充填节理面透射波场最优化逼近,就可以得出线性节理面的刚度参数,以此反演出线性节理面的动刚度参数。

采用充填节理模型的网格应该尽量加密以防止单元畸形,造成计算工作量巨大;同时又不能因尺寸太小改变了波的传播规律。综合两种效应,数值模型取 10 m×10 m 的正方体,其几何模型如图 4 所示。入射波采用正弦谐振速度波,振幅为 0.2 m/s,入射频率为 1 Hz。

表 1 计算采用的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters in calculation

	弹性模量/ GPa	泊松比	粘聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
完整岩体	10	0.25	2	42
充填介质	0.1	0.30	0.02	14
线性节理面			0.02	14

其中,完整岩体采用线弹性模型,节理面采用库仑滑移模型,节理充填厚度取 10 cm,与水平向倾角  $\alpha=36.5^\circ$ 。采用的参数如表 1 所示。

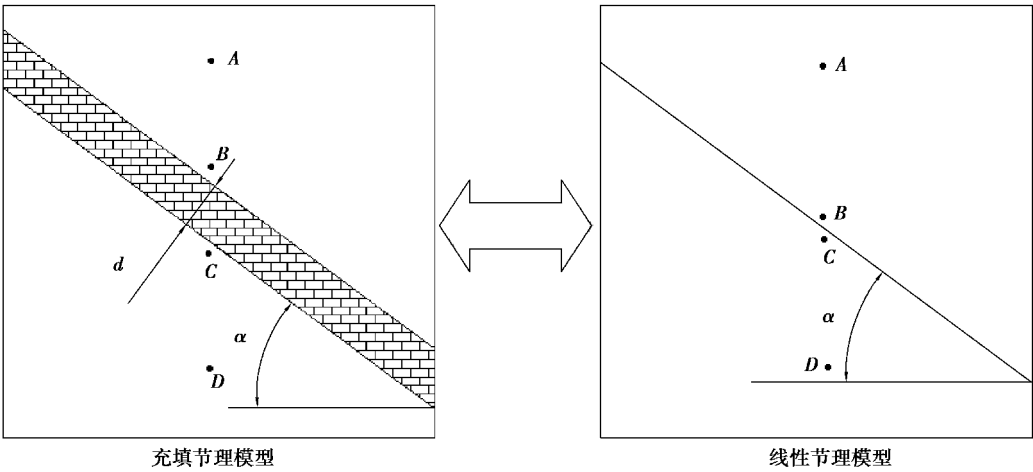


图 4 节理模型波场等效图  
Fig. 4 Wave field equivalence of joint model

2.2 线性节理刚度等效模拟

根据弹性波理论,充填节理与线性节理均会造成波场的分解,产生波的相互叠加。因此,波场等效的原理为:线性节理造成透、反射波场的振动合速度(或位移、加速度)与充填节理造成的合速度波场一致(可分水平、垂直方向)。图 4 和图 5

为分别采用充填节理与线性节理模型计算得到的各点应力波,不同法向与切向刚度下充填节理的速度分量变化如图 7 和图 8 所示。由于线性节理的散射是由节理面刚度决定的,通过波场等效就可以计算出节理面的刚度参数。



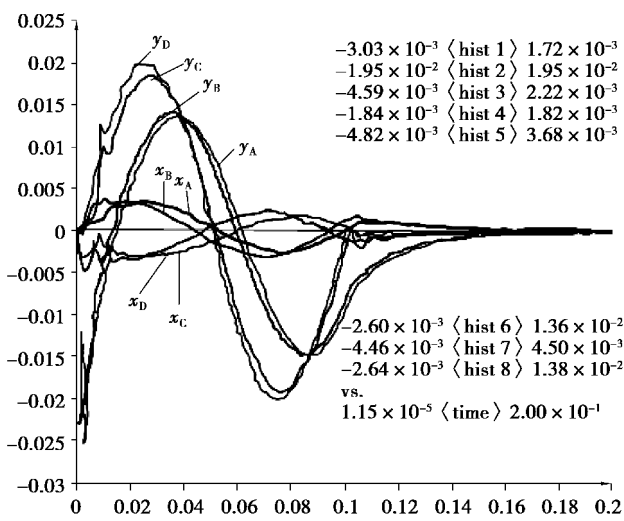


图5 充填节理各点振动波形  
Fig.5 Typical waveforms of filling joint

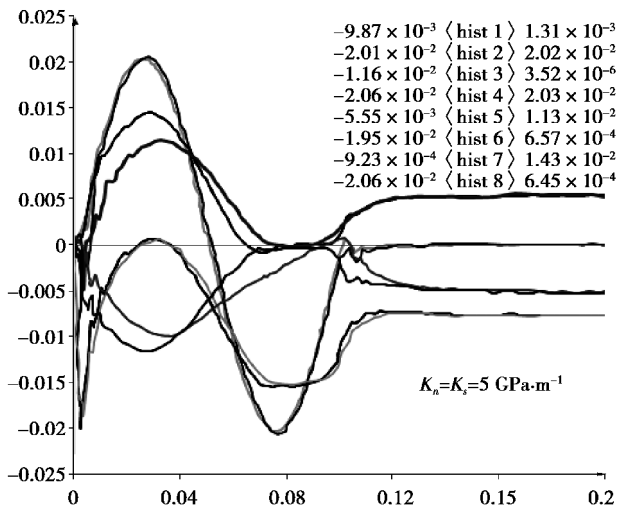


图6 线性节理各点振动波形  
Fig.6 Typical waveform of linear joint

表2 相同刚度不同强度参数下各波场速度分量  
Table 2 Velocity of each wave field with the same stiffness and different joint strength

状态	$c/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$	$V_{hc}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$V_{vc}$	$V_{hb}$	$V_{vb}$
充填模型			3.00	18.2	4.48	13.8
线性节理	0.020	24	3.77	18.5	3.91	12.9
线性节理	0.028	24	3.75	18.3	3.91	13.5
线性节理	0.032	24	3.73	18.2	3.91	13.7
线性节理	0.036	24	3.73	18.1	3.91	13.8
非线性	0.02	14	6.36	19.6	7.56	10.8
非线性	0.00	14	8.12	19.7	9.78	10.6
非线性	0.02	0	9.74	20.0	11.7	9.51

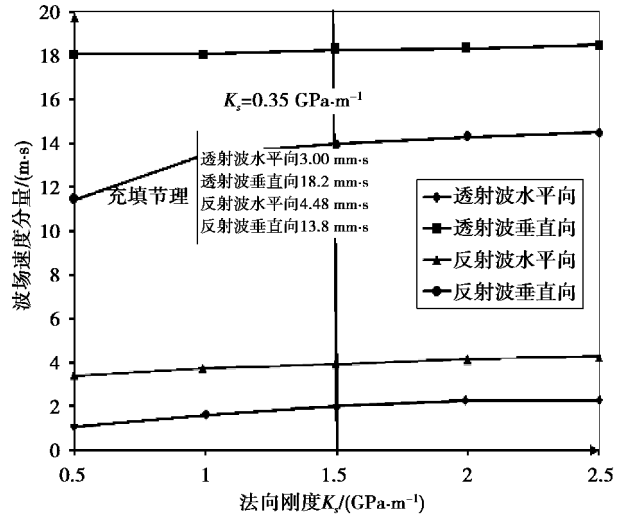


图7 法向刚度变化下透反射波场变化  
Fig.7 Scattering waveform amplitudes under different normal stiffness

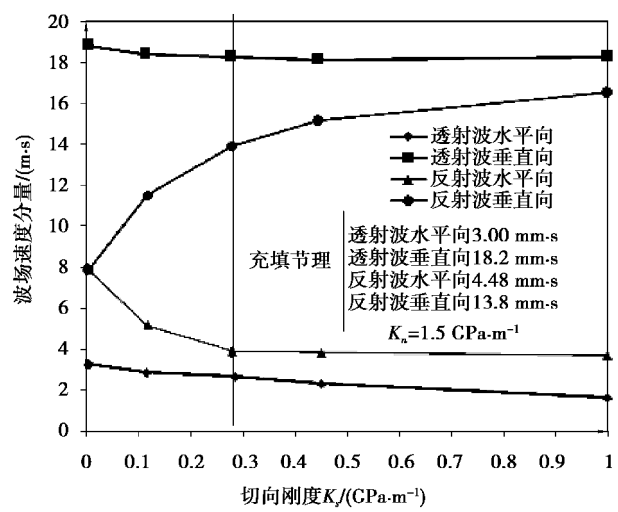


图8 切向刚度变化下透反射波场变化  
Fig.8 Scattering waveform amplitudes under different tangential stiffness

表3 不同强度参数下最优等效节理面刚度  
Table 3 Optimal equivalent joint stiffness of different joint strength

序列参数	粘聚力 $c/\text{MPa}$	摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	$K_n/(\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1})$	$K_s/(\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1})$
1	0.024	42	1.5	0.35
2	0.024	36	1.5	0.35
3	0.024	30	1.5	0.35
4	0.024	24	2.0	0.4

在强度参数一定条件下,变化刚度参数,可得

到如图 9 所示波场等效残差变化图。变化不同强度则得到如表 2 所示的相同刚度不同强度参数下的波场等效速度分量对比,及表 3 不同强度参数下最优的节理面刚度值。

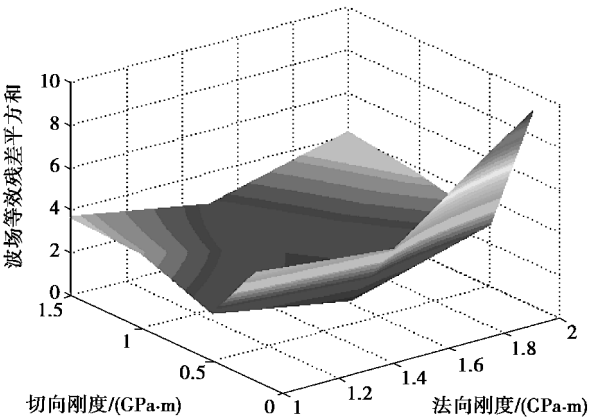


图 9 波场等效残差平方和

Fig.9 Equivalence residual square sum of wave field

这种等效基于弹性力学理论,其准确性受节理面强度参数控制,在计算中为去除非线性波的影响,节理面的强度参数需要给予足够高的强度或者降低输入的载荷强度即可。

3 影响因素分析

3.1 节理面倾角

由弹性波的传播可知,结构面的波动效应与入射角度有关,不同的入射角同样可造成节理面刚度参数的差异。为了对比倾角不同节理面波场等效参数的变化,分别计算垂直向节理的刚度参数与倾斜节理情况,结果如图 10 所示。根据平面波理论,波垂直入射时仅产生同类反射波和同类透射波,而垂直入射 P 波的透反射仅与节理法向刚度  $K_n$  有关,垂直入射 SV 波仅与节理面切向刚度  $K_s$  有关,因此必须借助 P 波和 SV 波入射情况方能等效出节理面的刚度参数。

根据波场误差最小原理进行反演可得到垂直节理的刚度参数为  $K_n = 1.3 \text{ GPa/m}$ ,  $WK_s = 0.3 \text{ GPa/m}$ ,这与有限元计算得到的波场非常接近。由于结构面倾角不同,波场分解后的强度与倾角成正比,倾角越大,反演算出的节理刚度参数略大,但变化的幅度较小。

3.2 相对充填厚度

由于软弱充填介质的物理力学参数较弱,弹性波的衰减与夹层厚度成正比,充填越厚则波的衰减程度越大,此时得到的节理刚度参数必然越小。另

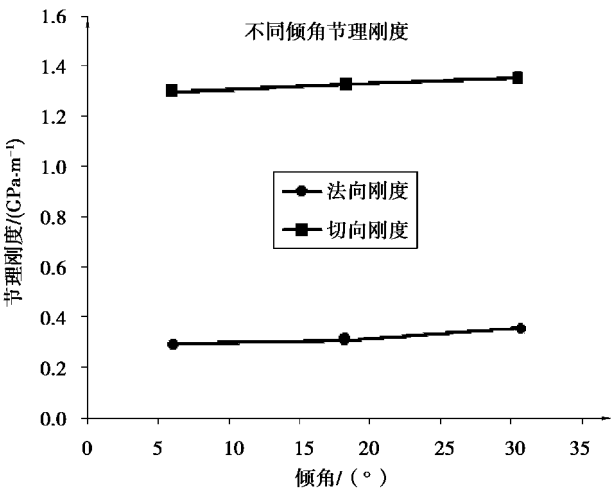


图 10 不同入射角等效节理面刚度

Fig.10 Equivalent stiffness under different slope angles

一方面,软弱介质的厚度对不同频率的波具有选择性,一般认为充填节理的透射性与充填相对厚度有关(夹层厚度与入射波场之比)。

$$\xi = d/\lambda = d\omega/C$$

式中: $\xi$  为相对厚度; $d$  为夹层实际厚度; $\lambda$  为波长; $\omega$  为入射波的圆频率; $C$  为波速。通过调整入射波的频率即可模拟不同相对厚度的影响。波在充填介质中的传播速度  $c_p = 241.2 \text{ m/s}$ ,  $c_s = 111.8 \text{ m/s}$ 。计算出不同相对充填厚度下等效节理动刚度,如图 11 所示。

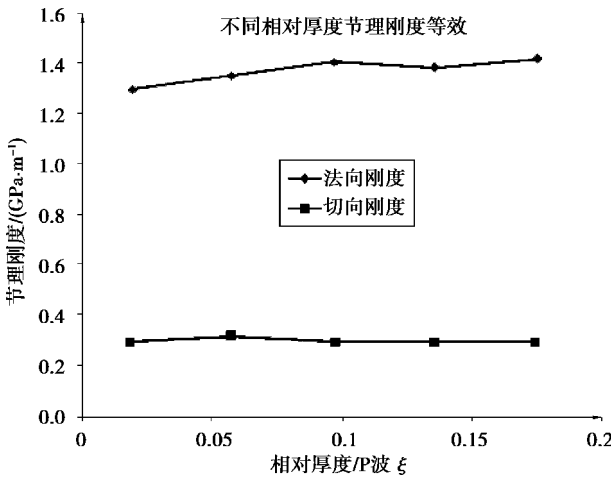


图 11 不同相对充填厚度下等效刚度

Fig.11 Equivalent stiffness under different relative filling thickness

结果表明,等效刚度的计算与输入波的频率、相对充填厚度变化关联性很小,仅是取决于充填介质的性质。因此可以判断,线性节理面的刚度参数是节理岩体的固有属性,与外界荷载无关,采用波场等效法计算刚度参数是可行的。

## 4 结论

(1)采用库仑滑移模型对线性节理面与充填弱面的透射场进行模拟,发现二者有相似的弱面波动效应。在缺少试验资料的情况下,根据弹性波传播理论可以等效计算节理面的动刚度参数。

(2)由于结构面倾角不同,波场分解后的强度与倾角成正比,倾角越大,反演算出的节理刚度参数越大,但变化的幅度较小。

(3)线性节理面的刚度参数是节理岩体的固有属性,与外界荷载无关,采用波场等效法计算刚度参数是可行的。在弹性波范围内,这种等效参数与入射波频率、入射角等因素关系不大。

(4)节理面刚度取值是岩石力学中的难点,动力作用下的刚度取值更为不易,本文中建立的方法基于弹性波动力学,用波场等效方法可对动刚度取值提供依据。

## 参考文献(References)

- [1] Schoenberg M. Transmission and reflection of plane wave at an elastic viscoelastic interface[J]. *Geophys Journal of the Royal Astronomical society*, 2010, 25(1-3): 35-47.
- [2] Newmark N M. Tests and analysis of composite beams with incomplete interaction[J]. *Proceeding of the Society Experimental Stress Analysis*, 1950, 9(1): 75-92.
- [3] Murty G S. A theoretical model for the attenuation and dispersion of stonely waves at the loosely bonded interface of elastic hald space[J]. *Physics of the Earth & planetary Interiors*. 1975, 11(1): 65-79.
- [4] Myer L R, Pyrak-Nolte L J, Cook N G W. Effects of single fracture on seismic wave propagation [A]// *Proceedings of ISRM Symposium on Rock Joints* [C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1990: 467-473.
- [5] Zhao J, Cai J G. Transmission of elastic P-waves across single fractures with a nonlinear normal deformational behavior[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2001, 34(1): 3-22.
- [6] 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(4): 661-682.
- [7] Frazer L N. SH propagation in rocks with planar fractures[J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 122(1): 33-62.
- [8] Pyrak-Nolte L J. Seismic visibility of fractures [D]. Department of Materials Science and Mineral Engineering, University of California, Berkeley, CA, 1988.
- [9] Pyrak-Nolte L J, Myer L R, Cook N G W. Anisotropy in Seismic velocities and amplitudes from multiple parallel fractures[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(11): 345-358.
- [10] 范留明, 闫娜, 李宁. 薄弹性软弱夹层的动力响应模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(1): 88-92. (Fan Liuming, Yan Na, Li Ning. Dynamic response model for thin soft interlayer[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(1): 88-92. (in Chinese))
- [11] 邵炜, 金峰, 王光纶. 用于接触面模拟的非线性薄层单元[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1999, 39(2): 34-38. (Shao Wei, Jin Feng, Wang Guanglun. Using genetic algorithm to realize optimization of cutting parameter real time in workplace [J]. *Journal of Tsinghua of Tsinghua University (Science and Technology)*, 1999, 39(2): 34-38. (in Chinese))
- [12] 石崇, 徐卫亚, 周家文. 二维波穿过非线性节理面的透射性能研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(8): 1645-1652. (Shi Chong, Xu Weiya, Zhou Jiawen. Research on transmission behaviors of nonlinear joints with 2D wave propagation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(8): 1645-1652. (in Chinese))
- [13] 石崇, 徐卫亚, 周家文, 等. 节理面透射模型及其隔振性能研究[J]. *岩土力学*, 2009, 3(3): 729-734. (Shi Chong, Xu Weiya, Zhou Jiawen, et al. Transmission model of joint interface and its performance of vibration isolation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 3(3): 729-734. (in Chinese))
- [14] Cundall P A. The measurement and analysis of acceleration in rock slopes[D]. Dissertation: University of London, Imperial College of Science and Technology, 1971.
- [15] Batron N R, Bandis S, Bakhtar K. Strength-deformation and conductivity coupling of rock joints [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1985, 22(3): 121-140.