

文章编号: 1000-7598(2009)12-3747-06

应力波在非线性和结构面介质中的传播规律

王观石^{1,2}, 李长洪¹, 陈保君³, 李世海³

(1.北京科技大学, 北京 100083; 2.江西理工大学, 赣州 341000; 3.中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 用切线刚度和法线刚度描述结构面特性, 研究结构面初始刚度、频率、法向闭合量与其最大允许闭合量的比值对透射系数的影响。采用基于连续介质的块体离散元程序(CDEM)模拟结构面发生非线性变形条件下块体响应, 研究结果表明, 应力波在岩体中传播是一个传播和块体响应的过程, 结构面的存在影响了应力波传播和响应, 存在一个特征频率能够有效反映结构面刚度变化, 给出了近似计算该特征频率的表达式, 对岩体结构探测具有一定的指导意义。

关键词: 应力波; 结构面; 非线性变形; 频谱分析

中图分类号: TD 235.1

文献标识码: A

Propagation law of stress wave in nonlinear structural surface medium

WANG Guan-shi^{1,2}, LI Chang-hong¹, CHEN Bao-jun³, LI Shi-hai³

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Property of structural surface is described by tangent stiffness and secant stiffness. The effect of initial rigidities of structural surface, frequency of stress wave and the ratio of normal and maximum allowed fracture closure of structural surface on transmission coefficient is studied. Block response of structural surface under nonlinear deformation is simulated by continuous-based discrete element method(CDEM). The results show that the stress wave propagation in rock mass is a process of both wave propagation and block response; the propagation of stress wave and response of stress wave are influenced by structural surface; stiffness variation of structural surface is effectively reflected by characteristic frequency. The computational expressions of characteristic frequency are given. The findings in this paper can be useful to the detection of rock mass structural surface.

Key words: stress wave; structural surface; nonlinear deformation; frequency analysis

1 引言

爆破或振动会在岩体内产生应力波, 岩体中结构面存在将影响应力波传播。应力波在结构面的传播特性是油气勘探、岩体结构探测、岩土工程在动载荷作用下的稳定性分析、提高爆炸能量利用率和改善爆破效果等的共性问题 and 关键问题。因此, 国内外许多学者在这方面做了大量的研究工作^[1]。卢文波^[2]用节理刚度来描述应力波在结构面的传播过程, 得到了透反射系数, 并解释了结构面的低通滤波特性。李夕兵^[3]用摩尔-库仑强度准则来研究应力波在软弱结构面的传播过程, 得到了相应的透反射系数和应力波作用下结构面是否滑移的判据。崔新壮^[4]就裂隙岩体对应力波的衰减规律进行了研究,

认为应力波在裂隙岩体中传播时, 由于裂隙作用会造成局部应力集中、过度破碎和后续传递能量减小, 造成裂隙岩体比均质岩体能量衰减快。高文蛟^[5]研究了爆炸应力波入射一定厚度结构面时的透射系数。鞠杨^[6]运用分形理论研究了应力波在结构面的传播, 得出了节理岩样能量耗散比与节理面分维值变化关系的近似表达式。许年春^[7]进行了节理岩体应力波反演研究。王卫华^[8]研究了非线性条件下节理初始刚度、节理闭合量与允许闭合量的比率以及入射波频率对节理透反射系数的影响。

上述这些研究主要集中在结构面特性对散射系数和能量传递的影响, 对于散射系数和能量传递系数发生变化后, 结构体的振动频谱如何变化研究不多, 其主要原因在于振动频谱非常复杂, 很难找到

收稿日期: 2008-10-09

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(No. 10632100)。

第一作者简介: 王观石, 男, 1977年生, 博士生, 讲师, 主要从事爆破与岩体力学研究方面的工作。E-mail: wgsy010@126.com

非常有效的描述手段，目前主要的描述参数有特征频率和带宽等。大量研究^[9-10]表明结构面变形过程通常是非线性的，大振幅应力波传播或结构面刚度较低时非线性变形表现得更为突出，线性变形是对非线性变形的简化。本文基于连续介质的块体离散元程序 (CDEM) 模拟应力波在结构面的传播过程，该程序有效地模拟了岩体中爆炸波的传播过程，爆破近区岩体内的应力场、位移场、鼓包和爆破漏斗等现象^[11-13]。本文主要研究结构面发生非线性变形时对应力波传播的影响，以及结构体的频谱变化规律。

2 理论公式

卢文波把岩石界面看成是具有位移间断的两弹性半空间的接触面，若假定裂缝两侧岩体为同样岩体及裂缝间不存在破碎带，得出了应力波在结构面处的透射系数^[2]：

$$T_{\text{lin}} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{2K_n}{2K_n + \omega I} \quad (1)$$

式中： T_{lin} 为结构面发生线性变形时的透射系数；系数 A_1 为入射 P 波波幅； A_2 为透射 P 波波幅； K_n 为界面的法向刚度 (Pa/m)； ω 为角频率； I 为波阻抗。

从式 (1) 可知，结构面处的刚度系数会影响应力波传播，刚度系数增加，透射系数增加；频率增加，透射系数减小。对于干性结构面，如果动态应力波幅较小或结构面法向刚度较大时，可以认为结构面处产生线性变形，此时结构面的透射系数如式 (1)。但如果结构面处的动态应力较大时，结构面的刚度很容易发生变化导致非线性变形，尽管现在节理处位移不连续性边界条件是非线性的，波场在结构面前后仍是连续线弹性的，因此，根据微积分思想，对于计算一个给定结构面刚度的透射系数时，式 (1) 仍然可以认为是有效的。当结构面发生非线性变形时，变形计算采用文^[10]提出的模型：

$$d_n = \frac{\sigma_n}{K_{ni} + (\sigma_n / d_{ma})} \quad (2)$$

式中： d_n 为结构面法向闭合量 (m)； K_{ni} 为结构面的初始法向刚度 (Pa/m)； σ_n 为结构面法向静应力 (Pa)； d_{ma} 为结构面最大允许闭合量 (m)。最大闭合量可由下式确定：

$$d_{ma} = d \varepsilon_{\text{max}} \quad (3)$$

式中： d 为结构面厚度； ε_{max} 为结构面破坏时的应变。

根据刚度系数的定义和式 (2) 可以得到非线性变形时结构面法向割线刚度 K_{ns} 和切线刚度 K_{nt} ：

$$K_{ns} = \frac{K_{ni}}{1 - (d_n / d_{ma})} \quad (4)$$

$$K_{nt} = \frac{K_{ni}}{[1 - (d_n / d_{ma})]^2} \quad (5)$$

从式 (3) 和式 (4) 可以看出：结构面法向割线刚度 K_{ns} 和切线刚度 K_{nt} 都是由 $r = d_n / d_{ma}$ 和初始刚度 K_{ni} 确定。由于 $d_n \leq d_{ma}$ ，因此割线刚度 K_{ns} 小于切线刚度 K_{nt} ，从式 (4) 和式 (5) 还可以知道：当 d_n 相对于 d_{ma} 很小时，割线刚度 K_{ns} 和切线刚度 K_{nt} 两者的大小相差很小，当 d_n 接近 d_{ma} 时，两者相差很大。参数研究选择结构面法向初始刚度 K_{ni} 、频率 ω 和结构面法向闭合量与其最大允许闭合量的比值 r 对透射系数的影响，其影响关系如图 1 和图 2 所示，图中 T_s 表示与割线刚度 K_{ns} 对应的透射系数， T_t 表示与切线刚度 K_{nt} 对应的透射系数，材料参数如表 1 所示。

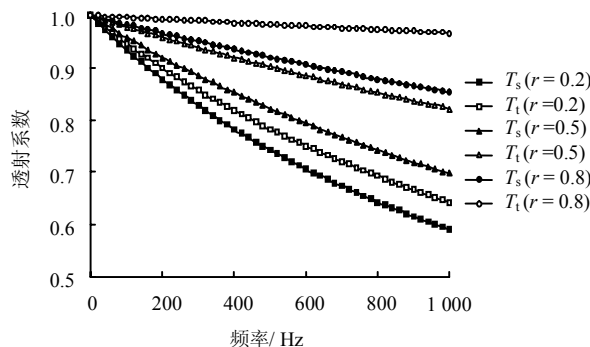


图 1 频率和 r 对透射系数的影响 ($K_{ni} = 5 \text{ GPa/m}$)
Fig.1 Effects of stress wave frequency and r on transmission coefficient from ($K_{ni} = 5 \text{ GPa/m}$)

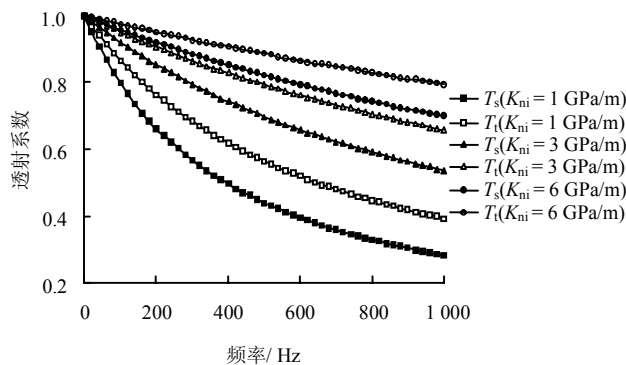


图 2 频率及结构面法向初始刚度 K_{ni} 对透射系数的影响 ($r=0.4$)
Fig.2 Effects of normal initial rigidities of structural surface K_{ni} and frequency on transmission coefficient ($r=0.4$)

从图 1 和图 2 可以看出：透射系数 T_s 和 T_t 都随频率 ω 成负指数衰减，随比值 r 增加而增加，随初始刚度 K_{ni} 增加而增加；在相同的频率 ω 和相同比值 r 条件下， $T_s > T_t$ ；在相同的频率 ω 和初始刚度 K_{ni} 条件下， $T_s > T_t$ ； T_s 和 T_t 两者差异随频率 ω 增加而增大，随比值 r 增加而增大。

3 块体离散元数值计算方法

3.1 离散元计算模型

考虑长为 6 m 的混凝土柱体，其横截面尺寸为 0.4 m×0.4 m，网格划分是 2×2×30，在 $y=2$ m 处有一结构面，如图 3 所示。结构面处的节点用弹簧连接，混凝土柱两端为自由边界，在 $y=0$ 的截面形心加一载荷如图 4 所示。

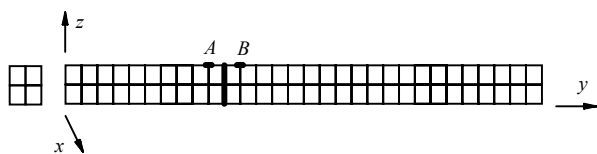


图 3 网格划分及结构面位置

Fig.3 Finite element mesh and the position of structural surface

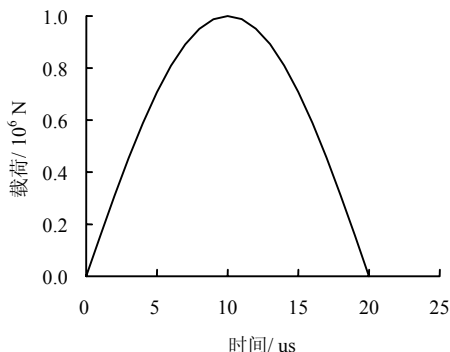


图 4 动态载荷图

Fig.4 Sketch of dynamic loads

3.2 计算方案

(1) 单元视为弹性块体，根据该单元节点的位移和单元刚度计算单元变形产生的力。

(2) 改进块体离散元，在计算连续问题时，先把块体单元质量离散到 8 个节点，再将相邻块体相同坐标的点看作连续点，其质量融合，点上所受的内力、外力合并，由牛顿运动定律确定节点的运动。这样就能保证在任意一个计算时步里节点具有相同的加速度、速度和位移，在计算连续问题时，离散元计算的结果和有限元计算的结果完全一样，这样的点称之为混合点。在数学上，等价于单刚合并成为总刚，然后用动态松弛法求解。

(3) 计算非连续变形时，结构面两侧的块体单元之间设置虚拟的法向弹簧和切向弹簧，通过节点间的弹簧变形量来计算单元之间相互作用的法向力及切向力。

(4) 结构面发生非线性变形时，接触刚度取切线刚度 K_{nt} 。

3.3 用混合点计算连续问题的步骤

- (1) 读入几何网格、材料参数；
- (2) 每个单元（块体）求解单刚，把单元的质量离散到 8 个角点上；
- (3) 相同几何坐标的点，质量合并；
- (4) 用动态松弛法求解。

在进行计算时，采用的混凝土的材料参数见表 1。

弹性模量 E / Pa	泊松比 μ	密度 $\rho / (\text{g/cm}^3)$	刚度阻尼 β	结构面最大允许 闭合量/mm
3.0×10^{10}	0.25	2.5	10^{-5}	0.3

4 计算结果及分析

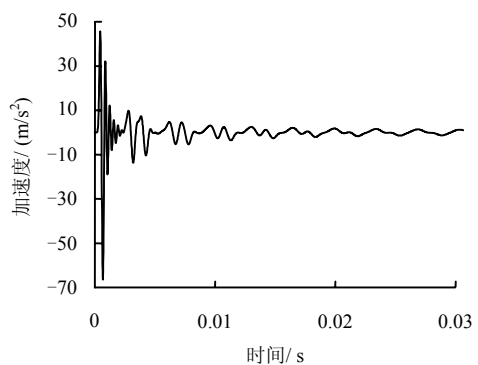
采用动态松弛迭代法计算，时步 $\Delta t = 10^{-6}$ s，共计算 0.05 s，按采样率为 10 kHz 分别输出 A 点（ $y = 1.8$ m）和 B 点（ $y = 2.2$ m）y 方向的加速度值，对其进行频谱分析，得到加速度频谱图如图 5 所示。从频谱图读出前 3 个特征频率，分别为： $f_{A1} = 291$ Hz、 $f_{A2} = 556$ Hz、 $f_{A3} = 856$ Hz； $f_{B1} = 292$ Hz、 $f_{B2} = 561$ Hz、 $f_{B3} = 851$ Hz。在简单条件下，振动信号的第一主频 f_1 满足：

$$c = 2lf_1 \tag{6}$$

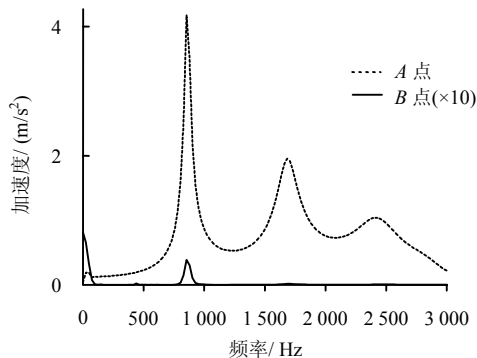
式中： c 为波速； l 为两结构面（或自由边界）间的岩体长度。

A 点和 B 点的 3 个特征频率都能体现块体的 3 个轴向特征长度。除了 3 个特征频率，频域上还有高谐波分量，这些高谐波分量基本上都是第一特征频率的整数倍，这与文献[14]研究得到的高谐波分量和特征频率的关系是一致的。

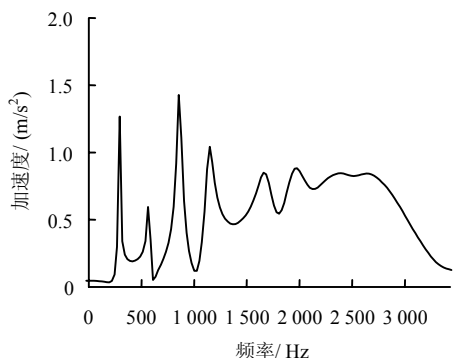
图 6 比较了结构面初始刚度对滤波的影响。对比图 6(a)、(b)和(c)可以看出：当初始刚度为 $K_{ni} = 10$ MPa/m 时（B 点的加速度幅值放大了 10 倍），A 点有 3 个特征频率，B 点有 1 个特征频率；当初始刚度为 $K_{ni} = 10$ GPa/m 时，A 点有 4 个特征频率，B 点有 5 个特征频率；当初始刚度为 $K_{ni} = 10^3$ GPa/m 时，A 点和 B 点都是 6 个特征频率，从而说明了结



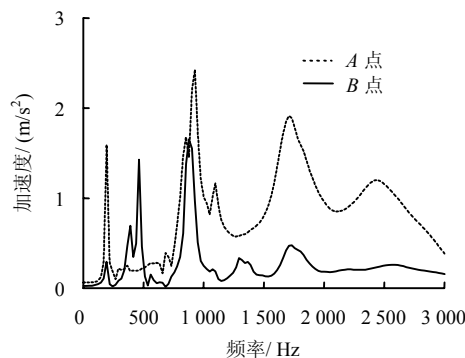
(a) A点($K_{ni} = 10^3$ GPa / m)



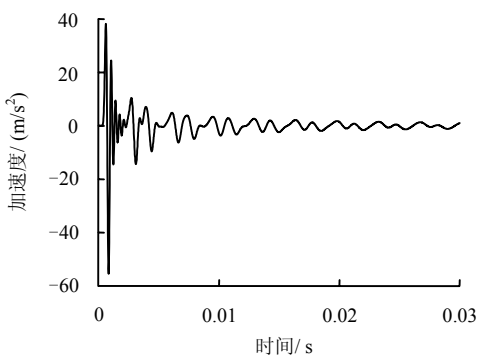
(a) $K_{ni} = 10$ MPa/m



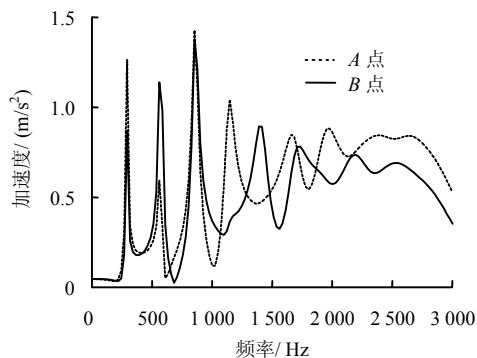
(b) A点($K_{ni} = 10^3$ GPa / m)



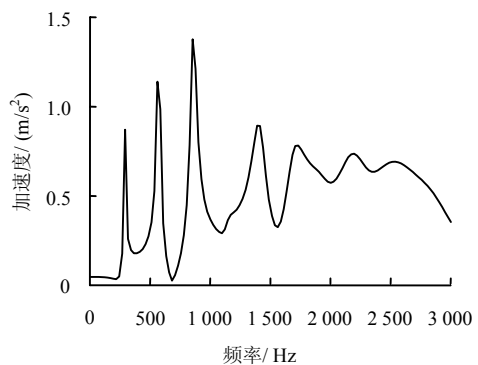
(b) $K_{ni} = 10$ GPa/m



(c) B点($K_{ni} = 10^3$ GPa / m)



(c) $K_{ni} = 10^3$ GPa/m



(d) B点($K_{ni} = 10^3$ GPa/m)

图5 结构面两侧的振动波形及其频谱

Fig.5 Vibration wave and frequency spectrum on both sides of structural surface

图6 结构面初始刚度 K_{ni} 与测点频谱的关系

Fig.6 The relation between initial rigidities of structural surface K_{ni} and frequency spectrum of measuring point

构面的存在, 不仅影响了块体响应, 也影响应力波的传播。响应主要体现在: 当初始刚度较低时, 结构体响应频谱较简单, 特征频率的个数较少, 随结构面初始刚度增加, 透射系数增加, 结构体响应频谱变得更复杂, 特征频率的个数增加, 高谐波也更为突出。根据上述分析, 结构面对应力波传播的影响主要体现在: 当结构面刚度较低时, 结构面的透射系数小, 随着结构面刚度增加, 结构面的透射系数增加; 当初始刚度较低时, 结构面对高频应力波具有很强的滤波能力, 对低频应力波影响很小, 随初始刚度增加, 应力波通过结构面的频带宽度会增加。由初始刚度对结构体响应和应力波传播的影响

可以判断：应力波在岩体传播过程中，造成振幅和 高频谐波衰减的主要原因是低刚度结构面。

改变初始刚度进行数值计算，对 B 点的振动波形进行频谱分析得到：第一特征频率 f_{k1} 的大小会随初始刚度增加而增大，当初始刚度 $K_{ni} = 10^2$ MPa/m 时，有一峰值较小的特征频率 $f_{k1} = 68$ Hz；当初始刚度 $K_{ni} = 10$ GPa/m 时，第一特征频率 $f_{k1} = 192$ Hz；当初始刚度为 $K_{ni} = 10^3$ GPa/m 时， $f_{k1} = 290$ Hz。还计算得到了无结构面时的特征频率 $f_1 = 292$ Hz，可以认为，初始刚度为 $K_{ni} = 10^3$ GPa/m 时的特征频率 f_{k1} 与 f_1 大小基本相同。考虑到研究岩体力学问题时，一般关心频率低于 100 Hz 的振动，结合岩体材料参数取 $\omega l = 10^8$ ，特征频率比 f_{k1}/f_1 和透射系数 A_2/A_1 随结构面初始刚度的对数而变化的曲线如图 7，由于刚度变化范围大，在图中对刚度采用取对数处理。从该图可以看出：透射系数和特征频率变化有很好的相关性，其相互关系可以理解为：接触刚度变化引起透射系数变化，透射系数变化又会引起特征频率的变化。根据上述分析得到：特征频率与块体尺寸并不是一种简单的对应关系，结构面刚度也是影响特征频率的一个因素，如果结构面刚度能够作为描述结构整体性的一个指标的话，则该指标可以通过频率来反映，为测试提供了便利。结合式 (6) 对数值模拟的结果进行拟合得到：

$$f_{k1} = \frac{cK_{ni}}{l(2K_{ni} + 1.4 \times 10^8)} \quad (7)$$

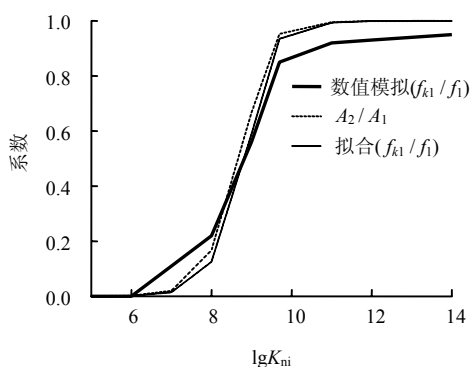


图 7 f_{k1}/f_1 和 A_2/A_1 随接触刚度的曲线

Fig.7 The curves of f_{k1}/f_1 and A_2/A_1 versus contact stiffness

数值计算时，把试块的右边界看成是自由边界，使问题更简单，式 (7) 也是在这种条件下得出的，如果右边界是岩体结构面时，即同时存在反射和透射，计算出振动波形会更复杂，频谱更丰富，反映试块整体的频率也会降低。实际岩体中结构面众多，透射系数各异，因此，振动频率和结构面参数的

关系还有待于进一步研究。

5 结 论

把结构面看成是具有位移间断的两弹性半空间的接触面，采用结构面刚度描述结构面特性。分析了结构面初始刚度 K_{ni} 、频率 ω 和结构面法向闭合量与其最大允许闭合量的比值 r 对透射系数的影响。采用 CDEM 有效模拟应力波在结构面的传播过程，研究了结构面发生线性变形时结构面的频率传播特性，以及结构面初始刚度变化时结构体的频谱变化规律。结果表明：

(1) 透射系数 T_s 和 T_t 都随频率 ω 成负指数衰减，随比值 r 增加而增加，随初始刚度 K_{ni} 增加而增加；在相同的频率 ω 和相同比值 r 条件下， $T_s > T_t$ ；在相同的频率 ω 和初始刚度 K_{ni} 条件下， $T_s > T_t$ ； T_s 和 T_t 两者差异随频率 ω 增加而增大，随比值 r 增加而增大。

(2) 应力波传播不仅是一个传播过程，还是一个块体响应过程，结构面的存在，不仅影响传播过程，还影响块体的响应。结构面会改变应力波能量在频域上的分布和发生波形畸变，初始刚度可以有效地描述这个变化过程。当初始刚度较低时，响应较简单，高谐波分量不明显，特征频率主要是反映块体自身的几何尺寸；当初始刚度较高时，两侧频谱图变得更复杂，高谐波分量也增多。结构面初始刚度不仅影响透射系数，还影响透射波频带宽度，初始刚度增加，透射系数和透射波频带宽度都增加。由此认为：应力波在岩体传播过程中，造成振幅和 高频谐波衰减的主要原因是低刚度结构面。

(3) 当结构面初始刚度发生变化时，存在一特征频率随刚度增加而增大，特征频率的变化与透射系数变化有很好的相关性，当刚度 $K_{ni} = 10^3$ GPa/m 时，这一特征频率与无结构面时大小相同，给出了近似计算该特征频率的的表达式，该表达式是在两个块体和一维条件下得出的，若用于其它条件时需做进一步研究。结构体的特征频率能反映初始刚度，如果结构面初始刚度能够有效反映结构体的整体性，那么结构体的特征频率也就能扔效反映结构体的整体性，这为岩体结构探测提出新思路。

参 考 文 献

- [1] 王鲁明, 赵坚, 华安增, 等. 节理岩体中应力波传播规律研究的进展[J]. 岩土力学, 2003, 24(Supp.): 602—610.
- WANG Lu-ming, ZHAO Jian, HUA An-zeng, et al. The

- progress in study of regularity of a stress wave propagation in the jointed rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.): 602—610.
- [2] 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.
- [3] 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 surfaces in rock mass on the propagation of stress waves[J]. **Explosion and Shock Waves**, 1993, 13(4): 334—342.
- [4] 崔新壮, 陈士海, 刘德成. 在裂隙岩体中传播的应力波的衰减机理[J]. 工程爆破, 1999, 5(1): 18—21.
CUI Xin-zhuang, CHEN Shi-hai, LIU De-cheng. Attenuation mechanism of stress wave propagating in crack rock mass[J]. **Engineering Blasting**, 1999, 5(1): 18—21.
- [5] 高文蛟. 爆炸应力波入射一定厚度结构面时透射系数分析[J]. 矿冶工程, 2001, 21(1): 16—18.
GAO Wen-jiao. Analysis of transmission coefficient of blasting stress wave entering structural face of certain depth[J]. **Mining and Metallurgical Engineering**, 2001, 21(1): 16—18.
- [6] 鞠杨, 李业学, 谢和平, 等. 节理岩石的应力波动与能量耗散[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2426—2434.
JU Yang, LI Ye-xue, XIE He-ping, et al. Stress wave propagation and energy dissipation in jointed rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2426—2434.
- [7] BANDIS S C, LUMSDEN A C, BARTON N R. Fundamentals of rock fracture deformation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1983, 20(6): 249—268.
- [8] 许年春, 赵明阶, 吴德伦. 节理岩体应力波反演模型研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2705—2710.
XU Nian-chun, ZHAO Ming-jie, WU De-lun. Study on stress wave inverse model for jointed rock masses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(12): 2705—2710.
- [9] 王卫华, 李夕兵, 左宇军. 非线性法向变形节理对弹性纵波传播的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1218—1225.
WANG Wei-hua, LI Xi-bing, ZUO Yu-jun. Effects of single joint with nonlinear normal deformation on P-wave propagation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(6): 1218—1225.
- [10] BARTON N, BANDIS S. deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1985, 22(3): 121—140.
- [11] BANDIS S C, LUMSDEN A C, BARTON N R. Fundamentals of rock fracture deformation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1983, 20(6): 249—268.
- [12] 郭易圆, 李世海. 离散元法在节理岩体爆破振动分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增2): 2408—2412.
GUO Yi-yuan, LI Shi-hai. Application of DEM in vibration analysis of jointed rock mass under blasting loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(Supp. 2): 2408—2412.
- [13] 郭易圆, 李世海, 柳春图. 三维离散元法在岩体爆破过程研究中的应用[J]. 爆破, 2000, 17(增 1): 19—23.
GUO Yi-yun, LI Shi-hai, LIU Chun-tu. Application of three dimensional discrete component method in the process of rock blasting[J]. **Blasting**, 2000, 17(Supp.1): 19—23.
- [14] 田振农, 李世海. 三维离散元不同尺度结构面计算方法及其在岩土爆破中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 3009—3016.
TIAN Zhen-nong, LI Shi-hai. Calculation method of structural surfaces with different scales by DEM and its application to blasting in geotechnical engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.1): 3009—3016.
- [15] 赵坚, 蔡军刚, 赵晓豹, 等. 弹性纵波在具有非线性法向变形本构关系的节理处的传播特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 9—17.
ZHAO Jian, CAI Jun-gang, ZHAO Xiao-bao et al. Transmisslon of elastic P-waves across single fracture with nonlinear normal deformamtion behavior[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(1): 9—17.