

爆炸应力波通过节理裂隙带的衰减规律

王明洋 钱七虎

(南京工程兵工程学院, 210007)

文摘 本文结合实际地质特点, 根据断层与节理裂隙带的几何关系, 运用应力波通过裂隙传播理论, 分析了应力波通过节理裂隙带的衰减规律。

关键词 断层, 节理裂隙, 应力波。

1 前言

爆炸冲击波的能量随其传播距离的增加而衰减。在离开爆心一定的距离上, 岩体中的冲击波便转化为连续应力波, 这里研究应力波在岩体中的传播规律, 主要探讨压力在数千至数万大气压范围内(中远区)应力波峰值的衰减规律以及波的走时和升压时间, 这就必须预先知道岩体的力学性质。天然岩体中有大量节理、裂隙、断层破碎带及软弱夹层等结构面, 这些软弱结构面严重地阻碍着应力波的传播, 加剧了应力波能量的衰减。岩体中各种结构面对应力波传播的影响早已引起国内外研究者的重视。作为此类问题研究的一部分, 本文仅研究应力波通过节理裂隙的衰减规律, 另外不考虑裂隙间相对位移及微破裂而损耗的能量。

节理是岩石中的裂隙, 是没有明显位移的断裂。这里所指的节理带是在发生断层的构造作用中, 在断层两盘错动时引起的派生应力作用下, 断层两侧所发育的节理。国内外已有人从理论和试验上就节理裂隙对岩体性质的影响做了一些工作。Seinov 和 Chevkin^[1]早就指出, 应力波的衰减取决于裂隙的数量、宽度以及充填物的波阻抗。对于裂隙长度比裂隙间距为小的非贯穿裂隙的理论研究是 60 年代开展的, 有代表性的是 J. B. Walsh^[2~4]的工作。对于裂隙长度比间距大得多的贯穿裂隙, 可用弹性波在平面界面上的透反射分析方法来研究^[5~6]。考虑到应力波斜入射岩体节理裂隙, 有可能产生滑移这一事实, 尚嘉兰、郭汉彦^[7]及李夕兵等^[8]在贯穿裂隙讨论中引用库仑摩擦边界条件, 给出了有摩擦滑移条件下爆炸波通过节理裂隙带的透反射关系。对于裂隙中可能有填充物的情况, 由张奇^[9]的研究表明, 由于 $\Delta r/\lambda$ 趋近于零 (Δr 为裂隙宽, λ 为应力波波长), 填充物介质的力学性质对应力波传播影响没有作用。在试验研究方面, I. P. Dzebam 等人进行了一系列模型试验和现场观测, 试验结果与 Knopoff 计算出的平面 P 波及 S 波穿过无限介质中无限薄的润滑裂缝的传播系数基本吻合^[10]。平面波通过裂隙传播理论计算的结果与现场观测很吻合^[5]。近年来, 借助于断裂力学、损伤力学和离散单元法研究节理裂隙岩体的变形及破坏在国内外已形成一种趋势^[11~14]。从研究的情况看, 这些方法, 特别是对动力问题的分析尚未成熟, 有待深入研究。本文结合实际的地质特征, 根据断层与节理带的几何关系, 运用文献^[7]的方法分析应力波通过节理裂隙带的衰减规律。

2 基本关系

2.1 缓倾角断层与节理带的几何关系

自然界中发育有各种不同类型的断裂构造。假定爆炸地冲击垂直地面传播，这时应力波对断层的入射角实际上等于缓倾角断层面的倾角（如图1）。断层派生应力场引起两组剪节理 S_1 和 S_2 （如图2）。 S_1 节理组与断层面呈大角度相交或垂直于断层面，另一组节理 S_2 与断层面小角度相交，交角为该岩石内摩擦角的一半（一般不超过 15° ）^[15]。

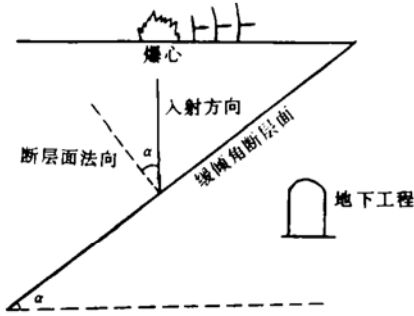


图1 地面爆炸情况下应力波入射角与断层面的关系

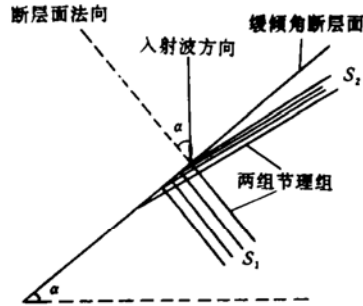


图2 节理组与断层面的几何关系

按照缓倾角断层定义，它是指倾角小于 45° 的哪一类断层。另外，从隔振效应方面考虑，断层面的倾角不得小于内摩擦角，否则断层两侧会因无相对运动而不会对应力波产生明显的衰减作用。岩石的内摩擦角本文仅考虑 $20^\circ \sim 30^\circ$ 范围，所以缓倾角断层的倾角应取 $30^\circ \sim 45^\circ$ 的范围内。根据图2的几何关系，可以求得应力波对节理组的入射角范围。对于 S_1 节理组垂直于断层面的情况，入射角 θ_1 在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 范围内；对于 S_2 节理组，入射角 θ_1 在 $15^\circ \sim 30^\circ$ 范围内。由文献[7]的研究，这个范围对于实际的节理带并不太影响应力波的传播，因此，本文将 S_2 节理组对应力波传播的影响不予考虑。于是，问题就归结为应力波斜入射于一组几条平行闭合裂隙。

2.2 摩擦滑移条件下的透反射关系

平面压应力波斜入射多条平行闭合裂隙，只考虑压应力波在裂隙间的透射与反射影响（如图3），得到纵波经过 n 条平行闭合裂隙后的透射系数^[7]为

$$M = [(n-1) \frac{1-B^2(K'+1)}{1-B^2} - (n-2)] A^n \quad (1)$$

对应的上升时间为

$$\Delta t_k = 2 \frac{b}{c_1} K' \cos \theta_1 \quad (2)$$

式(1)，式(2)中 A 和 B 分别为入射纵波 P 的透、反射系数； K' 为标志着影响透射波的入射波范围和透射的上升阶数； b 为两条裂隙垂直间距； c_1 为纵波波速。由波动方程及界面上的边界条件（除垂直位移和应力连续外，还要考虑界面两侧的剪力分别等于各自的正应力与摩擦系数之积）可解得系数 A ， B 为

$$A = \frac{A_2}{P} = \frac{\text{ctg} 2\beta + \text{tg} \varphi}{\text{ctg} 2\beta + K^2 \frac{\sin 2\theta_1}{\cos 2\beta}} \quad (3)$$

$$B = \frac{A_1}{P} = \frac{K^2 \frac{\sin 2\theta_1}{\cos 2\beta} - \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{ctg} 2\beta + K^2 \frac{\sin 2\theta_1}{\cos 2\beta}} \quad (4)$$

式 (3), (4) 中, $K = (\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)})^{\frac{1}{2}}$; μ 为泊松比。由 Snell 定律可以确定 β , 即

$$\sin \beta = K \sin \theta_1 \quad (5)$$

因此, 在给定 μ 及 φ 的情况下, 就可以计算出透反射系数。其它符号意义见图 4。

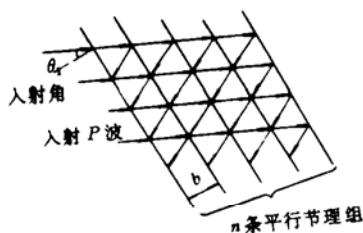


图 3 压应力波 (P 波) 斜入射于 n 条平行闭合裂隙, 裂隙间反射、透射的纵波对透射系数 M 的影响

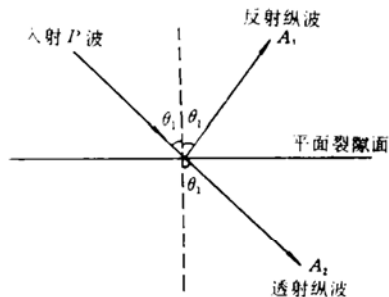


图 4 压应力波 P 斜入射于平面裂隙的反射纵波 A_1 和透射纵波 A_2

又由于各应力分量比值与透、反射系数之间存在如下关系:

$$\sigma_t = M \cdot \sigma_i \quad (6)$$

$$\sigma_r = (1 - M) \cdot \sigma_i \quad (7)$$

式 (6), 式 (7) 中 σ_i 为入射应力; σ_t, σ_r 分别为透射波正应力和反射波正应力, 因此, 求得透、反射系数后, 也就相应求出了各波应力分量的比值。

3 数值分析

如前所述, 根据实际地质特征及缓倾角断层的要求, 应力波对节理组的入射角一般在 $45^\circ \sim 60^\circ$, 摩擦角一般在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 。对于第二类岩石的 K 值, 一般在 $0.55 \sim 0.60$ 。节理裂隙的间距视密集程度而异, 本文取 $b = 0.2\text{m} \sim 0.5\text{m}$ 之间的平均值; n 取 $4 \sim 6$ 条。

式 (3), 式 (4) 的计算结果示于图 5 中, 计算时取泊松比 $\mu = 0.21$ 。从图 5 中可以看出, 式 (3), 式 (4) 成立的条件是波在平行于裂隙面的平面上引起的剪应力等于或大于裂隙面上的摩擦阻力时, 裂隙面对波的传播起阻碍作用, 这个条件可表示为

$$\frac{K \cdot \sin 2\theta_1}{\cos 2\beta} \geq \operatorname{tg} \varphi \quad (8)$$

式 (8) 的关系示于图 6 中, 由图 6 可知, 对于一定的摩擦角, 压应力波的入射角在一个确定的范围内裂隙才影响波的传播, 即式 (8) 才成立。在此范围之外, 裂隙不起作用, 波可完全透射。对于固定的泊松比, φ 越大, 入射角 θ_1 的范围越小; 当 $\varphi \geq \varphi^*$ 时, 无论 θ_1 是多少, 裂隙都不再起作用。这也可以理解为, 若式 (8) 得以满足, 两侧裂隙便将产生相对滑移, 结构面上必然吸收一部分能量以补偿相对滑动所需要的能量, 这意味着波在结构面上的透、反射必将伴有部分能量耗损。

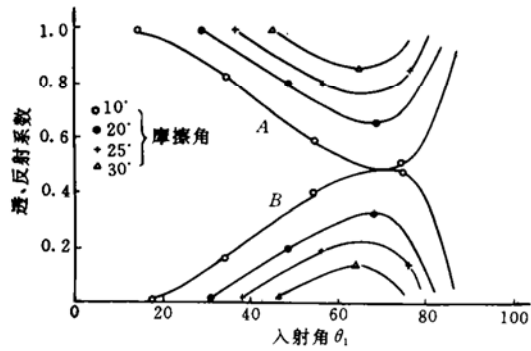


图5 不同摩擦角的纵波透、反射系数

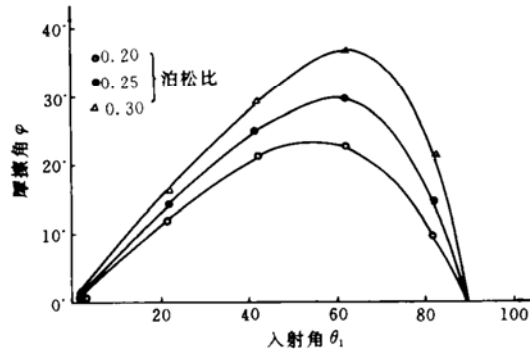


图6 由摩擦角确定式(8)给定入射角的值域

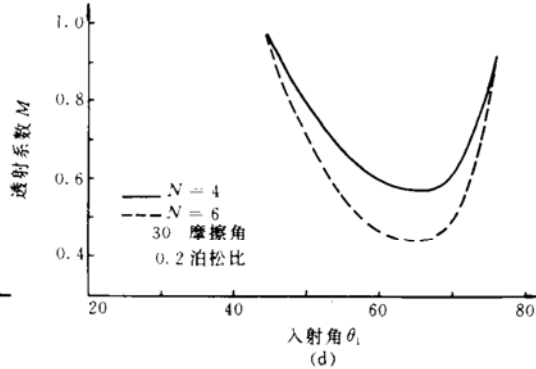
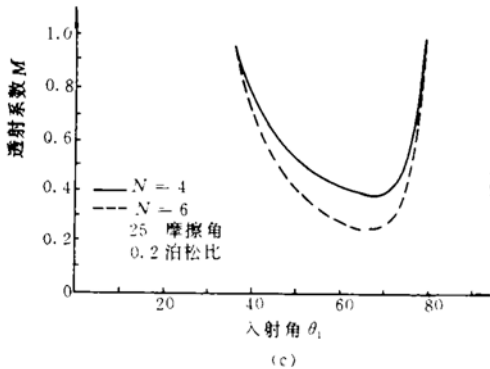
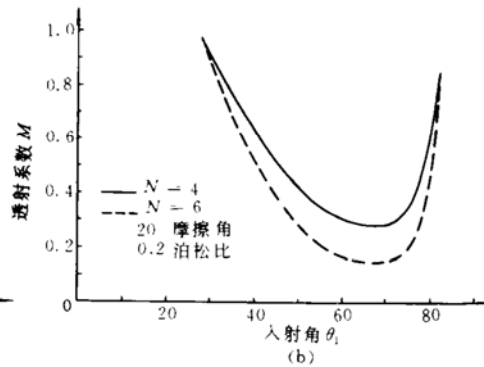
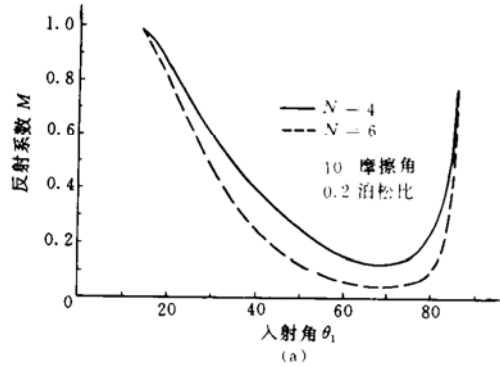


图7 不同摩擦角和不同裂隙条数的系数M

图7是对固定泊松比 $\mu = 0.20$ ，摩擦角 φ 分别为 10° ， 20° ， 25° ， 30° ，裂隙条数 $n = 4$ (实线) 及 $n = 6$ (虚线) 情况下，透射系数 M 与入射角 θ_1 的关系图。从图中可以看出，裂隙条数越多，波的透射系数越小，既能量耗损越多，说明断层节理带越密集对耗能越有效。对于一定的泊松比，一定的摩擦角，均存在一个最佳的入射角。例如图7(d)中，对于裂隙条数为4，若断层倾角 $\alpha = 30^\circ$ (即 $\theta_1 = 60^\circ$) 时，则透射系数 $M = 0.59$ ；若 $\alpha = 45^\circ$ (即 $\theta_1 = 45^\circ$) 时，则 $M = 0.92$ ，这说明在满足式(8)条件下，缓倾角断层的倾角越缓越好。

式(1)，式(2)的计算结果示于图8中，计算时入射波为阶跃波，入射角 $\theta_1 = 60^\circ$ 。图中可以看出，入射波变成了阶梯波。随着 K' 增加，透射系数 M 趋于一个上界。

4 结 论

(1) 在泊松比及摩擦角所确定的人射角范围内, 裂隙影响波的传播。

(2) 纵波阶跃波经过两条以上平行闭合裂隙后出现上升时间 $\Delta t_{\text{升}}$, 它随入射角的增大而减小, 与纵波通过裂隙间距的时间同量级。若只考虑裂隙间的反射、透射纵波, 则透射波成为阶梯波。

(3) 断层裂隙带越破碎 (即 n 越大), 耗能越大。断层面倾角在满足式 (8) 条件下, 越缓耗能越大, 同是上升时间 $\Delta t_{\text{升}}$ 也越大。

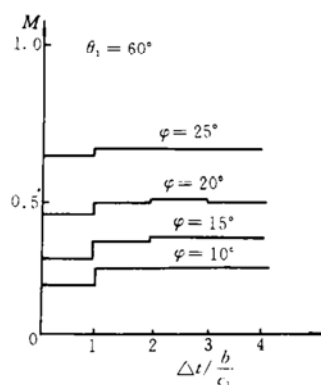


图8 压应力波经过4条裂隙后 M 随时间的变化

参 考 文 献

- 1 钱七虎等. 与隔振效应有关的断层动力学研究报告 1. 工程兵工程学院内部报告. 1991, 21~26.
- 2 Walsh J B. The Effect of Cracks on the Compressibility of Rock. J G R, 1965, 70: 381~389.
- 3 Walsh J B. The Effect of Cracks on the Uniaxial Elastic Compression of Rocks, J G R, 1965, 70: 389~411.
- 4 Jaeger J C, Cook N G W. Fundamental of Rock Mechanics, 1976.
- 5 莱茵哈特. 固体中的应力瞬变, 杨善元译. 北京: 煤炭工业出版社, 1981.
- 6 Miller R K. An Approximate Method of Analysis of the Transimisson of Elastic Waves through a Frictional Boundary. J Appl Mech, Transactions of ASME Serries E 1977, 44 (4): 652~656.
- 7 尚嘉兰, 郭汉彦. 岩体裂隙对应力波传播的影响. 防护工程学术交流会议论文集, 1979, 91~98.
- 8 李夕兵, 赖海辉, 古德生. 爆炸应力波斜入射岩体软弱结构面的透、反射关系和滑移准则. 中国有色金属学报, 1992, 9~14.
- 9 张 奇. 应力波在节理处的传递过程. 岩土工程学报, 1986, 8 (6): 99~105.
- 10 钱七虎等. 与隔振效应有关的断层动力学研究报告 2. 工程兵工程学院内部报告, 1992, 17~20
- 11 Margolin L G. Int Journ of Fracture. 1983, 22: 65~79
- 12 周维恒, 杨延毅. 节理岩体的损伤断裂模型及验证. 岩石力学与工程学报, 1991, 10: 43~54.
- 13 Zdenek P. Bazant. Why Continue Damage is Nonocal Micromechanics Arguments. ASCE 1991, 117 (5).
- 14 凌建明. 节理岩体损伤力学的理论与试验研究. 同济大学 [博士学位论文], 1992.
- 15 徐开札. 构造地质学. 北京: 地质出版社, 1983.

Attenuation Law of Explosive Wave Propagation in Cracks

Wang Ming - yang Qian Qi - hu

(Nanjing Engineering Institute)

Abstract In this paper, the theory of stress wave propagation is used to analysis the attenuation law of stress wave propagation in cracks according to the geological characteristics and geometrical relation of fault zone and cracks.

Key words fault, crack zone, stress wave.