

斜坡破坏过程的断裂力学分析

李永益

(中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所)

提 要 本文运用断裂力学的原理和方法,分析了斜坡破坏过程中后缘开裂、滑动面的形成和结构面连通的机理,以及破坏中所遵循的轨迹。通过模拟实验、数值分析和应用,证明断裂力学方法是一种分析斜坡破坏机理的有效方法。

关键词 断裂力学 斜坡破坏 断裂角 不连续面

在斜坡稳定性研究中,斜坡破坏的力学过程一直是人们最关心的问题之一。为解决这一问题,许多力学方法已引入斜坡稳定性研究中,目前使用的主要有莫尔库仑强度理论与连续介质力学等。这些方法尽管在斜坡稳定性研究中发挥着重要的作用,但也存在着某些不足。这主要表现在:1. 未能全面考虑斜坡破坏的产生、发展及其所遵循的几何轨迹,无法对斜坡破坏过程作出合理的定量评价;2. 只考虑了剪切破坏或摩擦滑移,忽视了其他破坏形式;3. 难以解释坡体岩土声发射现象等。

现运用断裂力学的原理和方法,进一步从力学角度来研究斜坡破坏过程。

无论是滑动面的形成、后缘开裂的发展,或者是不连续结构面的连通,都涉及到破坏面的形成、发展及其所遵循的几何轨迹。而断裂力学正是研究这类现象的一门学科。

一、基 本 理 论

在断裂力学中,根据裂纹面的位移方式,将裂纹分为三类,即张开型、滑移型和平面剪切型。根据斜坡应力分析,各类不连续面很难属于上述任一类型,并处于组合应力场内,故断裂力学中称其为混合型裂纹。

双向应力条件下不连续面受力和开裂如图1所示。图1中不连续面与最大压应力 σ_1 方向成 β 角,与开裂方向成 γ 角。

混合型裂纹尖端附近的应力极分量(图2)

$$\sigma_r = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \left[K_1(3 - \cos \theta) \cos \frac{\theta}{2} + K_2(3 \cos \theta - 1) \sin \frac{\theta}{2} \right],$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_1(1 + \cos \theta) + 3K_2 \sin \theta \right],$$

* 中国科学院青年奖励基金资助项目(部分成果)。

$$\tau_{\theta} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} [K_1 \sin \theta + K_2 (3 \cos \theta - 1)], \quad (1)$$

式中 K_1, K_2 分别表征裂纹在纯拉条件和纯剪条件下的应力强度因子,两者与裂纹形状、加载方式、外荷大小有关; θ 为裂纹展布方向与径向应力间的夹角; r 为裂纹尖端至应力单元间的距离。

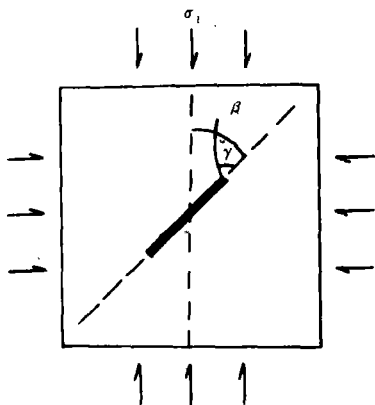


图1 双向侧压应力条件下结构面

Fig. 1 Structure plane under bilateral stress condition

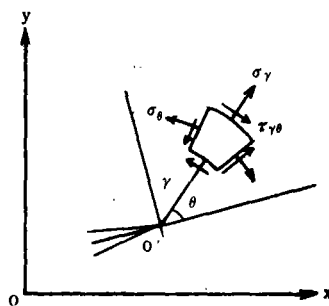


图2 裂纹尖端坐标系

Fig. 2 Coordinate system of fissure end

O' 为裂纹尖端

不连续面的扩展是斜坡破坏研究的一个主要内容,对此不但要用式(1)描述应力场,而且还要有相应的断裂准则。

最常用的断裂准则为最大拉应力 $\sigma_{\theta \text{最大}}$ 准则。该准则认为:

1. 裂纹沿与 $\sigma_{\theta \text{最大}}$ 垂直的方向 θ_0 (断裂角) 扩展,其关系需满足

$$K_1 \sin \theta_0 + K_2 (3 \cos \theta_0 - 1) = 0. \quad (2)$$

2. 当 $\sigma_{\theta \text{最大}}$ 达到材料的拉应力临界值 σ_c 时,裂纹开始扩展。 σ_c 是与材料力学特性有关的断裂力学参数

$$\sigma_c = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta_0}{2} [K_1 \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_2 \sin \theta_0]. \quad (3)$$

由式(2)可知, θ_0 大小与材料力学特性无关,而主要取决于 K_1 和 K_2 大小(图3)。鉴于结构面受力对称,图3的曲线仅画出一半,即属 $K_2/K_1 > 0, \theta_0 \leq 0$ 的那一半。由图3可知,在 K_2/K_1 值较小时, θ_0 变化非常快,受 K_2 值的影响很大;当 K_2/K_1 值继续增大时, θ_0 变化渐慢,最后大体趋于稳定。

二、斜坡破坏过程中常见的断裂扩展模式

根据斜坡破坏的断裂力学特征,把斜坡破坏过程中常见的断裂扩展模式概括为:类半无限边界边裂扩展,单个结构面扩展和复合结构面扩展。

(一) 类半无限边界边裂的扩展

它针对的是斜坡破坏过程中的后缘开裂(图4, α 为坡角, β 为拉裂缝尖端与水平面间的夹角)。当 α 为 90° 时, 斜坡直立; 当 β 为 90° 且不随开裂改变时, 拉裂缝直立。黄文熙认为, 后缘开裂对斜坡破坏有很大影响, 防止后缘拉裂在高土石坝中是一个很重要的问题^[1]。有人曾对后缘开裂的形成和发展作过力学解释, 他们认为, 抵抗力矩在滑动土体中产生拉应力, 从而形成拉力裂缝^[2]。这种解释只是定性的, 未能表达弧形拉裂所遵循的轨迹及开裂的力学本质。

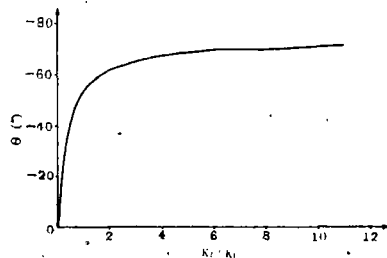


图3 断裂角 θ_0 与应力强度因子比 K_2/K_1 的关系曲线

Fig. 3 Relationship curve of θ_0 and K_2/K_1

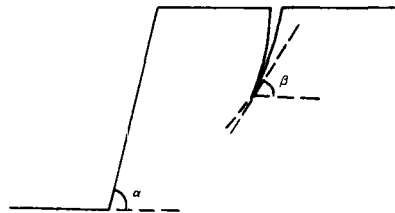


图4 后缘开裂模式

Fig. 4 Model of top cracking

由于断裂力学主要研究的是裂纹的初始扩展方向, 而很少研究整个扩展过程, 加之裂纹的扩展又是个复杂的非线性问题, 这就给裂纹扩展的计算和模拟带来了一定的困难。对后缘开裂的形成和发展, 现主要用反演法来分析它的力学规律, 后文的应用部分将对具体实例的有限元计算加以解释。在后缘开裂的力学机理研究中, 最关心的是后缘开裂的形成、发展及其所遵循的几何轨迹或后缘开裂面的形状, 即 σ_0 , θ_0 及其变化规律的问题。

当 $K_2=0$ 时, $\theta_0=0$, 拉裂沿原裂缝方向扩展, 随着 K_2 值的增大, 拉裂面曲率亦增大。这种情况符合大量的斜坡有限元计算结果, 即在坡顶最大压应力方向呈垂直, 在坡内则向坡面方向偏转, 而开裂正是沿最大压应力方向发展的。不同的是, 随着开裂的发展, 斜坡内应力场要随之调整, 后缘开裂缝端应力状态也要改变。从后缘开裂的整体看, 随着拉裂面的发展, 剪切成分增大, 拉裂面曲率也增大, 拉裂面形状更接近渐近线。

(二) 单个结构面的扩展(见图1)

在混合应力场条件下, 单个结构面开裂的主要特点是: 1. 裂纹的增长从原始结构面两端开始; 2. 初始开裂方向与原始结构面方向不一致, 偏转了一个很大的角度; 3. 结构面的扩展轨迹是一条曲线, 扩展开始后很快转为与最大压应力平行的方向。在垂直结构面方向上, 受单向均布正应力 σ 和整个结构面受均布剪应力 τ 时, 单个结构面的应力强度因子为

$$\begin{aligned} K_1 &= \sigma \sqrt{\pi a}, \\ K_2 &= \tau \sqrt{\pi a}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 a 为 $1/2$ 结构面长。

(三) 复合结构面的扩展

实际上, 斜坡的单个结构面是很少的, 往往是多个结构面的复合。当任意两个结构面

相当接近时,或多个结构面呈一定关系和一定距离分布时,各结构面间应力相互干涉,这反映在各结构面的应力强度因子的变化上。为分析结构面间的相互影响,现讨论复合结构面应力强度因子(主要是 K_2)的变化^[3]。

1. 共线结构面

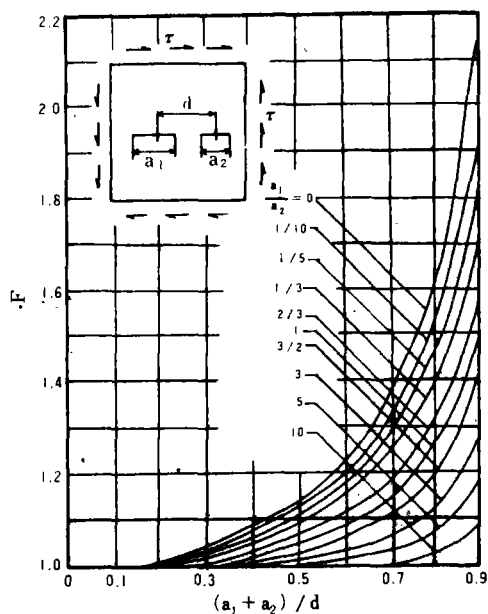


图5 共线结构面的 F 值

Fig. 5 F function curve of co-linear structure planes

a₁. 左边结构面长; a₂. 右边结构面长;
d. 左右两结构面中点间距

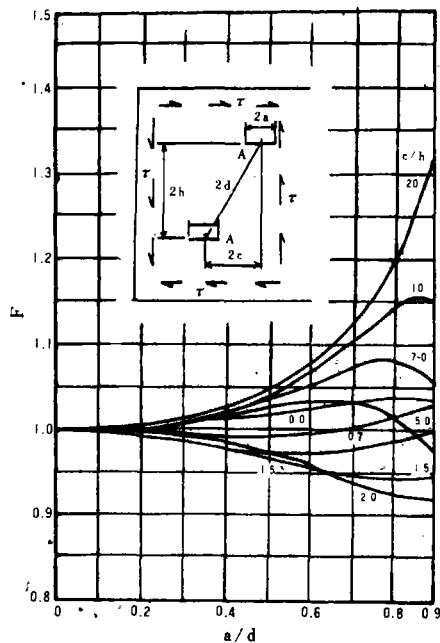


图6 雁行结构面的 F 值

Fig. 6 F function curve of echelon structure planes

2a. 结构面长; 2c. 两结构面中点间水平距离; 2d. 两结构面中点连线长; 2h. 两结构面垂向距离

这类结构面主要是斜坡内的表生结构面和构造结构面。两条不等长共线结构面中之一的左边一个结构面(图5)内侧尖端的应力强度因子

$$K_2 = F\tau\sqrt{\pi a}, \quad (5)$$

式中 F 为共线结构面与单个结构面的应力强度因子比,从图5得出。由图5可知,当两个结构面接近时, F 值随之上升。当 $(a_1 + a_2)/d$ 的关系确定后,左边结构面越长, F 值越大。 K_1 的变化情况类似于 K_2 的变化情况。

2. 雁行结构面

该类结构面常构成岩质阶梯状滑坡的滑动面。其受力情况及比例参数 F 见图6。结构面尖端A的应力强度因子 K_2 如式(5)。

由图6可知,随着结构面本身的加长和结构面间距的缩短,应力强度因子的影响增大。但当 c/h 值较小时, F 值却递减,这说明两相邻裂缝尖端的应力性质相反(一张一压)。当 $a/d < 0.1$ 时,各结构面间的相互影响消失。

3. 等长平行结构面

此类结构面常出现在层状岩层和类似平行结构面(破裂面)组合中。其受力情况及比例参数 F 见图 7。结构面尖端应力强度因子 K_2 亦如式(5)。

由图 7 可见,结构面越长,间距越小, F 值越大;随着结构面的增多,应力强度因子的影响增大。这种情况也适用于其他复合结构面。

由上可见,结构面的增多,常导致应力强度因子的增大,更易达到断裂韧度 K_0 。因而当斜坡中拥有众多结构面时,斜坡更易遭到破坏。

图 8 为模拟实验所得的复合结构面扩展和连通的图式,其中有共线结构面、雁行结构面及任意结构面。模拟中采用的是光测弹性实验,应力分布由应力条纹分布所确定,结构面的扩展方式用应力条纹展布方向与断裂角 θ_0 的关系^[4],以及结构面实际扩展和连通来确定。

对共线结构面来说,两相邻结构面端部应力发生融合,除靠近结构面端部可区分出各结构面产生的应力条纹外,其余应力条纹为两结构面所共有。两相邻结构面越靠近,所共有的应力条纹级数越高,扩展时只有很短的并与原结构面成较大角度的开裂;当应力增大时,两相邻结构面沿共线方向贯通(图 8-a)。

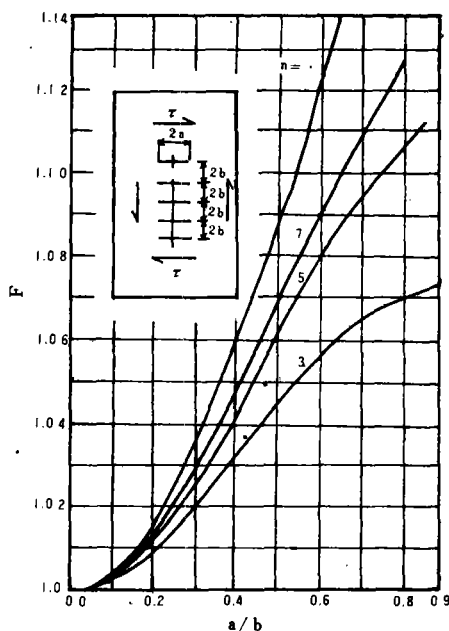


图 7 等长平行结构面的 F 值

Fig. 7 F function curve of parallel and equal-length structure planes

2b. 结构面间距; 2a. 结构面长; n. 结构面个数

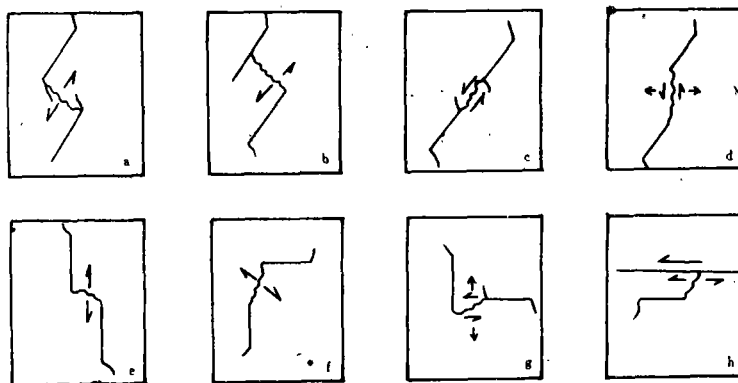


图 8 复合结构面扩展方式

Fig. 8 Ways of development for compound structure planes

雁行结构面的扩展和连通方式有三种:1. 若 $c = a$ (图 8-b), 应力场便呈现偏置对称融合, 即两相邻结构面端部内侧各自一半的应力条纹融为一体。结构面扩展时, 开裂相向增长, 最后连通而拉断。2. 若 $c < a$ (图 8-c), 应力场融合则不明显。以实际斜坡为依据的

模拟实验结果表明,靠下部的结构面近垂向扩展,最后与靠上部结构面连通。3. 若 $c > a$ (图 8-d), 应力场就沿两相邻结构面端部融合, 最后呈剪张式连通。

任意结构面的情况较复杂,总的表现为两相邻结构面连通。各结构面都根据自身所处的应力场,而沿与结构面方向成较大角度扩展。扩展过程中,若进入拉应力区,则迅速发展;如进入压应力区,则减缓发展速度或停止(图 8-e—h)。

三、应 用

(一)后缘开裂与滑动面

为弄清后缘开裂缝端应力分布情况和扩展规律,曾用有限元数值法,模拟了甘肃省东乡县洒勒山原始斜坡开裂后应力分布状况。模拟结果表明,在后缘开裂深度达到 90 米时,开裂缝端为拉应力区,其分布与实际滑动面分布相吻合,这说明此时后缘裂缝仍处于拉裂扩展状态。模拟后缘开裂后,在斜坡中部和下部还形成了两个拉应力区,两者的边界与两个次级实际滑动面相一致。结合相似模拟实验究其原因,后缘开裂后斜坡下部压应

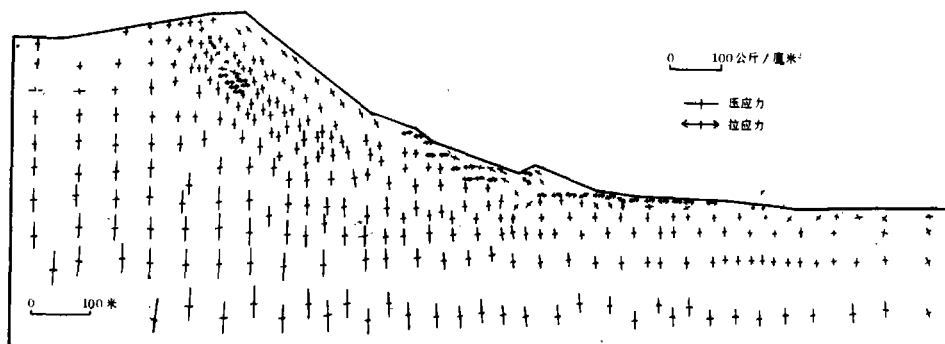


图 9 洒勒山原始斜坡后缘开裂后应力分布

Fig. 9 Stress distribution after slope failure

力增大,坡面两拐点处应力集中(图 9)。后缘开裂缝端应力变化的情况是,沿滑动面方向缝端拉应力最大,远离缝端拉应力减小,最后转变为压应力。这样的缝端应力集中符合断裂力学原理(附表)。

附表 后缘开裂前后的缝端应力(吨/米²)

Table The stress of top cracking end before and after slope failure (t/m²)

单元 序号	完整斜坡			开裂深度 90 米		
	σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_x	σ_y	τ_{xy}
407	86.69	176.82	-4.21	-20.73	98.38	14.62
408	83.55	187.45	-6.15	-7.32	138.78	18.69
409	81.97	199.26	-8.96	-1.35	181.14	17.94
410	78.92	207.39	-10.55	-0.30	204.18	13.55
411	77.76	216.93	-13.15	0.71	220.52	8.33
412	76.22	225.80	-13.63	10.94	223.78	3.58

注: σ_x , τ_y , τ_{xy} 分别为直角坐标中的正应力分量和剪应力分量。

贵州省乌江渡水库左岸,正处于破坏中的黄崖不稳定岩坡断裂力学特征也十分明显:除了多个大规模后缘拉裂面外,在斜坡内部还形成了复合型断裂组合。大黄崖主要表现为三组雁行断裂组合,而小黄崖则表现为一组近乎平行断裂组合^[5]。

在解决后缘开裂问题中,需确定坡面开裂位置。就断裂力学观点而论,开裂应发生在坡面上最大拉应力部位。这可称为后缘开裂的最大拉应力选择性。次级拉裂面常发生在坡面上的凹点处,这主要由应力集中所造成。有时坡面开裂也可能由滑动面形状所决定。

对主要由结构面控制的滑动面来说,滑动面形状较易确定,而对非结构面控制的滑动面来说,滑动面形状一般认为是圆弧形或渐近线形。失稳斜坡的破坏过程通常表现为:下部塑性变形,中部锁固剪断,后缘开裂。后缘开裂前文已述。锁固剪切段,随拉裂的发展,拉裂缝端处于斜坡深部。当拉裂面向坡面或坡脚方向偏转时,拉裂缝尖端所受到的压应力增大,斜坡对拉裂缝会产生止裂效应,但后缘开裂缝端的荷载却增大,由此产生与实际滑动面成一定夹角的裂隙带。当裂隙带强度逐渐下降后,裂隙带便贯通,进而发生整体滑动。这样的滑动面主要由三个部分(即后缘开裂带、坡脚塑性区 and 中部剪断带)组成,一般地说,滑动面形状就呈现渐近线形。

(二)阶梯状滑动面的滑坡

用软材料光测弹性法可模拟斜坡破坏后呈现阶梯状滑动面的情况。斜坡坡度为 60° , 结构面倾角为 30° 。结构面呈阶梯状分布,属雁行结构面组合。各结构面间应力相互干涉或应力强度因子影响能满足式(5)中的 F 值。模拟实验结果表明,结构面缝端应力干涉明显,与理论分析结果相吻合。模拟实验过程中构造了图 8-a—d 四种复合结构面,两相邻结构面的扩展和连通符合断裂力学规律。

在斜坡破坏过程中,除上述这些斜坡破坏的断裂力学现象外,还有一些表生现象或次生现象(如地表裂缝的拉宽和坡体岩土声发射等)。这些现象也具有斜坡破坏的断裂力学特征。坡体岩土声发射是坡体断裂破坏过程的反映。岩土声发射的监测也逐渐成为确定斜坡破坏程度的一个重要因素。由于岩土声发射是岩土体破坏或断裂所反映出来的,因此这也从另一个侧面说明了用断裂力学研究斜坡破坏的必要性。

综上所述,可归纳为如下几点。

1. 根据斜坡破坏的特征,可把斜坡破坏过程中的断裂力学现象,分为宏观特征明显的和宏观特征不明显的两种。运用断裂力学理论能研究斜坡后缘开裂的形成、发展及其所遵循的几何轨迹。

2. 斜坡破坏过程中常见的断裂扩展模式为,类半无限边界边裂扩展、单个结构面扩展和复合结构面扩展。利用其可对后缘开裂、滑动面形成以及结构面连通等进行定量分析。

3. 实际应用证明,运用断裂力学的原理和方法,不仅可克服连续介质力学在斜坡破坏研究中的不足,而且还能定量评价斜坡的破坏过程,此外还可对斜坡破坏过程中的坡体岩土声发射作出合理解释。

参 考 文 献

- (1) 黄文熙, 1983, 土的工程性质, 水利电力出版社, 第 317 页。
(2) Hasegawa H., Ikeuri M., 1964, On the Tensile Strength Test of Disturbed Soils. Rheology and Soil Mechanics, IUTAM Symposium, Grenoble.
(3) 中国航空研究院, 1981, 应力强度因子手册, 科学出版社, 第 1—63 页。
(4) 北川英夫等, 1976, き裂の応力拡大係数と破壊条件の光弾性解析, 非破壊検査, 25(8), 第 466—472 页。
(5) 刘家应, 1984, 黄崖不稳定岩坡位移观测资料的分析研究, 大坝观测与土工测试, (2), 第 9—21 页。

FRACTURE MECHANICS ANALYSIS ON THE PROCESS
OF SLOPE FAILURE

Li Yongyi

(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences
& Ministry of Water Conservancy)

Abstract

The present methods of mechanical analysis on slope stability are unable to consider the process and geometric locus of slope failure. So fracture mechanics is applied to study slope failure and to evaluate slope stability.

The slope failures are assumed for a process of fracture mechanics in which discontinuous planes are produced or developed. With finite element and photoelastic stress analyses, following contents are discussed: the cracking and development of the cracks on the top of slopes, the shape of sliding surface, the linkup of various structure planes inside slopes, and the relationship between fracture mechanics and rock sound radiation of slope.

The research results show that the curvature of top cracking increases from top to inside of a slope, the shape of sliding surface of a landslide is more similar to an asymptote, and the linkup of structure planes also coincides with the fracture mechanics. Besides those, using fracture mechanics, people can reasonably explain the sound radiation in a rupturing slope.

Key words fracture mechanics, slope failure, fracture angle, discontinuous plane