

断裂力学在震源机制分析中几个问题的探讨*

王桂尧

(长沙交通学院岩土工程研究所 长沙 410076)

孙宗硕

(中南工业大学资源开发系 长沙 410083)

摘要 探讨裂纹的扩展是否会导致地震的判断方法,分析等结构面的分布形态对地震序列的影响等方面的问题。

关键词 裂隙岩体, 型断裂, 地震

分类号 O346.1

型裂纹在张开与闭合情况下的不同扩展规律,讨论断层

1 前言

在地壳,特别是上部地壳中,岩石的变形机制处于脆性域,岩石中存在着大量的微裂纹、宏观裂纹、节理面和软弱面及断层等缺陷,因此,把断裂力学的基本概念和理论应用于地震断裂研究是个很吸引人的想法,而且已成为值得注意的研究动向。目前应用断裂力学对地震孕震过程的研究通常有两种途径:一是利用线弹性断裂理论直接对地震的发生过程进行分析,并假定裂纹(断层)是完全闭合的,即 $K = 0$,同时假定裂纹一经开裂便将失稳断裂,并且仅对单一断层的情况进行讨论。二是利用岩石断裂实验观察到的结果对孕震过程和地震序列等行为进行定性的分析,并且所采用的断裂试件大多采用切槽这种特殊的张开型裂纹。由此可提出一些问题:实验条件下的张开裂纹与岩体中的闭合裂纹在断裂过程中的表现是否相同;裂纹扩展是否一定失稳扩展;在多组断层存在的情况下,断层之间的相互作用情况又会如何。这些问题,就是本文试图探讨的问题。

2 裂纹失稳扩展与地震发生条件

地震,不管是前震、主震还是余震,其本质都是岩体裂纹失稳扩展的结果。根据文[1]的分析可知,利用断裂力学判据 $K_{II} = \sqrt{\sigma} = K_{IIC}$ 仅能作为裂纹开始扩展的判据,而扩展后的裂纹是稳定扩展还是失稳扩展,现有岩石断裂理论无法对此作出有效的判断。为使裂纹扩展的稳定性判断成为可能,我们

首先提出裂纹扩展本构曲线这么一个新的概念,并把包含有断层等类型裂纹的岩体,简化为由裂纹和弹性地质体两部分组成的简单模型。

根据文[1]提出的弹性体——断裂带模型,该断裂带可以取得很窄,甚至可以简化为一条数学意义上宽度为零的理想裂纹扩展带,其刚度可认为是无穷大,而弹性体的刚度为 K 。假定有二个尺寸完全相同的同一种类岩石试件,其中一个是不含裂纹的完整弹性岩体,另一个是含有一裂纹长度为 $2a$ 的岩石断裂试件,那么在实验条件下可作出含裂纹岩石试件的载荷——位移曲线(图1(a)所示)及在同一峰值载荷时完整弹性岩石试件的加卸载曲线(图1(b)所示),在此基础上,根据载荷相等,位移叠加的原理可作出仅与裂纹尺寸及材料性质有关的裂纹扩展本构曲线(图1(c)所示),由此作出的曲线以下所围面积即为岩石断裂总能。但若纵坐标用应力变化来表示,那么这一本构曲线以下所围的面积即为该岩石裂纹扩展单位面积所消耗的能量,即断裂能 G_c 。根据线弹性理论,这一断裂能 G_c 为一常数。根据由此确定的裂纹扩展本构曲线 $f(\sigma)$ 及地震台站实际测定的应力变化 σ 与位移变化 u 的关系,可很容易的确定弹性体介质的刚度 $K = \sigma / u$, 根据

$$K + f(\sigma) < 0 \quad (1)$$

这一失稳断裂判据可以较为容易的确定满足条件 $K_{II} = \sqrt{\sigma} = K_{IIC}$ 的岩石裂纹开裂后是否失稳扩展。

注意到地壳岩体中的裂纹(断层)扩展本构曲线并非通过简单的实验就能加以确定,因此如何通过实验方法与相应的理论分析及数值方法相结合推导

1997年2月2日收到初稿,1997年5月22日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目(49272151)。

作者 王桂尧 简介:男,35岁,博士,1985年毕业于中南工业大学采矿系采矿工程专业,现为副教授,主要从事岩土工程方面的教学与科研工作。

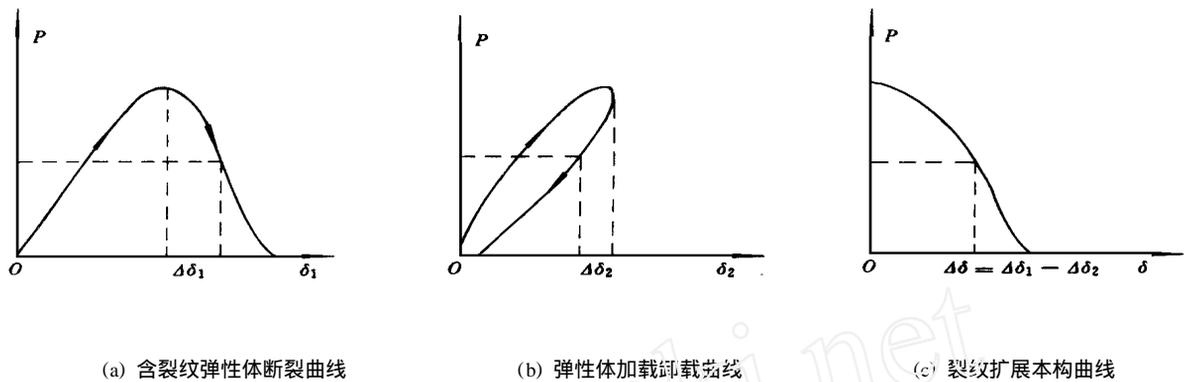


图 1 裂纹扩展本构曲线作法原理图

Fig. 1 Drawing principle diagram for crack propagation curves

出具体断层的裂纹扩展本构曲线就显得极为重要，由于裂纹扩展本构曲线是一个极为重要的新概念，因此，我们正在辟专题加以进一步的研究。另一方面，通过地震台站对断层面上的滑动位移和邻近地质体应力变化情况的测定，可以作出地壳岩体断层的裂纹扩展本构曲线。

诚然，一些地学家认为，构造应力不会由于一次大震的发生而有明显的改变，所以说在孕震过程中构造应力基本保持不变。根据这一思想，弹性体的刚度相当于 $K = d / d = 0$ ，那么失稳判据式(1)在应力达峰值后恒为成立，即裂纹一经起裂并将失稳扩展，这是断裂力学的基本思想，也是目前为止应用断裂力学原理分析地震问题时的基本假定。

注意到由应力-位移表示的裂纹扩展本构曲线所围的面积为常数 G_c ，则根据线弹性断裂理论，由断裂判据 $K_{II} = (\sigma - \sigma_f) \sqrt{a} = K_{IIC}$ 确定的裂纹起裂的临界应力值 $(\sigma - \sigma_f)$ (σ_f 为残余强度) 显然与裂纹长度 a 的平方根成反比，即裂纹越长则应力 $(\sigma - \sigma_f)$ 越小，而要保持 $(\sigma - \sigma_f) \sim \sqrt{a}$ 曲线下的面积为常数，则长裂纹 $(\sigma - \sigma_f) \sim \sqrt{a}$ 曲线的斜率绝对值必然要小于短裂纹本构曲线的斜率，在此条件下，由于弹性岩体的刚度保持不变，则裂纹将由较短裂纹的失稳扩展转变为长裂纹的稳定扩展甚至止裂。也许这正是裂纹不会无限扩展直至把地球一劈为二，而是扩展至一定长度后即止裂的一个重要原因。

然而这一条件仅是对裂纹尺寸比其 FPZ(断裂过程区)大得多的情况下才是有效的，当岩石的 FPZ 尺寸与裂纹长度具有同一量级时，则根据文[1]的分析，裂纹的扩展将是稳定的，即只有满足一定条件

的裂纹才有可能发生失稳断裂。由此可见，只有在某一临界范围 $a_i < a < a_m$ 的裂纹才有可能失稳断裂，其中 a_i 为裂纹失稳扩展的最小长度，而 a_m 则是裂纹失稳扩展的止裂长度。当在某一地区构造应力的变化情况已经探明的条件下，这样的临界尺寸显然是可以确定的。若该地区的断层尺寸及分布规律已经探明，则可以由此确定该断层是否会发生地震及某次大震后是否仍有发生余震的可能。因此提出这样一个裂纹尺寸的失稳判据无疑具有很现实的意义，但这一问题还有待更进一步的探索。

3 张开与闭合裂纹扩展的不同特点

3.1 主要实验事实

图 2 所示为湘南大理岩直剪断裂试验的实验结果(该试验由湖南水利水电勘测设计院周群力高工完成，试件尺寸 200 mm × 200 mm × 60 mm)。当预制裂纹为具有一定宽度的切口时，切口端部总是首先以初裂角 θ_0 扩展张拉裂纹，并最终导致试件的凹形张拉断裂(图 2(a)所示)。然而用三点弯曲预制的闭合裂纹试件，在同样加载条件下，岩石试件中不再出现 θ_0 型裂纹的斜向凹形扩展，而是直接沿原切口方向剪断(图 2(c)所示)。但是在三点弯曲预制闭合裂纹前，若在预裂位置预切一浅槽，则尽管在浅槽前方已预裂了一较长的闭合裂纹，但在实验过程中，浅槽的前下方仍然不可避免地出现以初裂角 θ_0 开裂的斜向扩展裂纹(图 2(b)所示)。

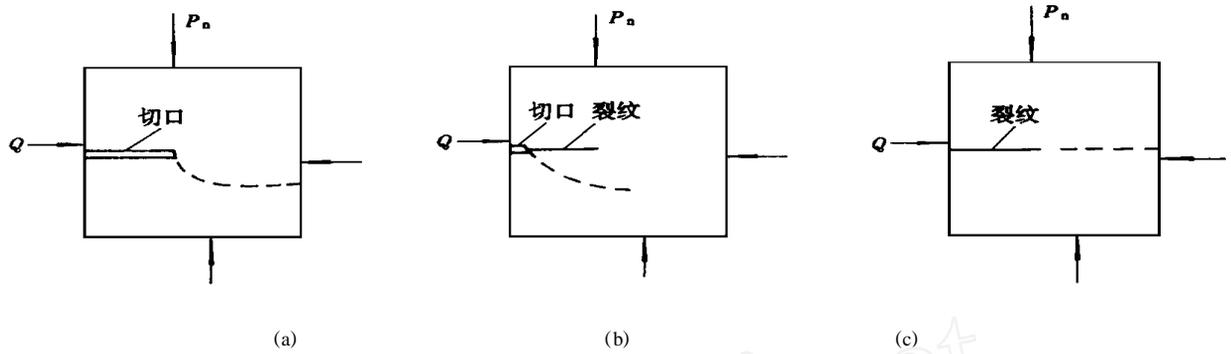


图 2 直剪仪压剪试验裂纹扩展轨迹示意图

Fig. 2 Schematic diagram for crack propagation path in direct shear test

3.2 理论分析和讨论

对于压剪载荷作用下的张开裂纹,若在裂纹扩展前,裂纹仍是张开的,则裂纹端部的周向应力为

$$= \frac{K_I}{\sqrt{2}} \frac{1}{r} \cos \frac{\alpha}{2} (1 + \cos \alpha) - \frac{K_{II}}{\sqrt{2}} \frac{3}{r} \sin \alpha \cos \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

式中: $K_I = -\frac{1}{\sqrt{2}} \sigma \sqrt{r}$, $K_{II} = \frac{3}{2} \sigma \sqrt{a}$,

则由最大周向应力确定的应力强度因子为

$$K_I^k = \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma \sqrt{r} \cos \frac{\alpha}{2} (1 + \cos \alpha) - \frac{3}{2} \sigma \sin \alpha \cos \frac{\alpha}{2} K_{II} \quad (3)$$

与型断裂韧度 K_{Ic} 相对应,用有效剪应力表示的张开裂纹型应力强度因子为

$$K_{II}^k = (\sigma - \mu_n) \sqrt{a} \quad (4)$$

对完全闭合裂纹,由文[2]的光弹研究认为, $K_I = 0$,则由闭合裂纹应力场确定的最大应力强度因子为

$$K_I^b = -\frac{3}{2} \sin \alpha \cos \frac{\alpha}{2} (\sigma - \mu_n) \sqrt{a} = 1.15 (\sigma - \mu_n) \sqrt{a} \quad (5)$$

$$K_{II}^b = (\sigma - \mu_n) \sqrt{a} \quad (6)$$

比较式(4)和式(6)发现,张开裂纹与闭合裂纹的型应力强度因子大小完全相同,但比较式(3)和式(5)则发现张开裂纹的 K_I^k 与岩石的内摩擦系数无关,而闭合裂纹的 K_I^b 则与摩擦系数 μ 的大小密切相关,例如令 $\alpha = 2\alpha_n$,则由式(3)确定的张开裂纹最大应力强度因子 $K_I^k = 2.195 \sqrt{a}$,而当 $\mu = 0$ 时, $K_I^b = 2 \sqrt{a}$,对本文介绍的湘南大理岩 $\mu = 1.23$,则 $K_I^b = 0.77 \sqrt{a}$ 。由此可见,张开裂纹的型应力强度因子明显大于闭合裂纹的应力强度因子,

并且这一差值随着岩石内摩擦系数的增加而增大。对湖南大理岩而言,张开裂纹与闭合裂纹应力强度因子的比值 $K_I^k / K_I^b = 3$,在此条件下,显然张开裂纹比闭合裂纹更易发生裂纹的张拉扩展。

在实验过程中,尽管切口前端已预裂了一闭合裂纹,但由于这一闭合裂纹的形成,在压剪载荷的作用下,并不会对切口前下方拉应力区的应力奇异性造成太大的影响,即切口仍然具有接近于式(3)的应力强度因子 K_I^k 值,因此裂纹仍然从切口端部张拉扩展。

由此可见,张开的剪切裂纹和闭合型的剪切裂纹在压剪断裂过程中会有截然不同的表现,而目前的压剪断裂实验通常都使用预先切口的张开型裂纹,因此,在分析实验结果时,必须注意张开型裂纹与闭合裂纹两种不同形式的差异。

4 单一裂纹在压剪应力作用下的扩展特点

在地壳岩体中普遍存在高围压的作用,因此岩体的裂纹(断层)通常处于闭合状态。为使问题简化,仅分析裂纹完全闭合的情况。

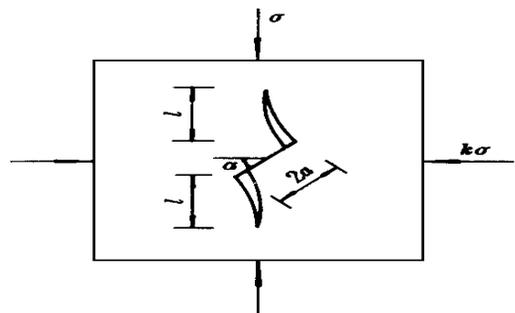


图 3 斜裂纹扩展示意图

Fig. 3 Schematic diagram for angled crack propagation

图 3 所示翼状扩展裂纹尖端的应力强度因子为^[3]

$$K_I^{wing} = -\frac{3}{4} \left(\sin \frac{\alpha}{2} + \sin \frac{3\alpha}{2} \right) (\sigma - \mu_n) \cdot \sqrt{\frac{l}{2} (\sqrt{2a+l} - \sqrt{l})} - \sqrt{\frac{l}{2}} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } & \sigma = \frac{1}{2} (1+k) \sigma_1 + \frac{1}{2} (1-k) \sigma_3 \cos 2(\alpha + \beta) \\ & = \frac{1}{2} (1-k) \sigma_3 \sin 2\alpha \end{aligned}$$

$$\sigma_n = \frac{1}{2} (1+k) \sigma_1 - \frac{1}{2} (1-k) \sigma_3 \cos 2\alpha$$

k 为侧压系数。

由于斜裂纹端部的 II 型应力强度因子 $K_{II} = (\sigma - \mu_n) \sqrt{a}$ ，而最大周向应力的强度因子为 $K_{I_{max}} = 1.157(\sigma - \mu_n) \sqrt{a}$ ，即斜裂纹端部的 II 型应力强度因子略大于 I 型应力强度因子，同时岩石材料的 $K_{I_{lc}}$ 为 K_{IIc} 的数倍，因此在压剪载荷作用下的裂纹岩体总是首先发生 I 型开裂，但由于 K_I^{wing} 是随着裂纹的扩展而减小，即具有随载荷的增加而稳定扩展的特征。因此在某一有限的岩体空间内若没有相邻断层或结构面的作用，则裂纹的张拉扩展必将转化为剪切裂纹的失稳扩展 ($k + f(\alpha) < 0$ 时) 而引发地震，在此条件下，大震前必有明显的甚至是持续的以张性破裂为特征的声发射事件。

在此还必须注意到侧压力对 I 型裂纹张拉扩展的抑制作用，例如假定 $\alpha = 45^\circ$ ， $\mu = 0.5$ ， $k = 0$ 时，则裂纹扩展长度 $l = a/8$ 时所施加的主应力 σ_1 与刚开裂时的主应力 σ_0 之比值 $\sigma_1/\sigma_0 = 1.96$ ；但侧压力系数 $k = 0.2$ 时，裂纹扩展同样长度时， $\sigma_1/\sigma_0 = 3.68$ ，这标志着张拉裂纹稳定扩展至 $a/8$ 长度时，作用于斜裂纹上的有效剪应力或 K_{II} 值增加了数倍，若此时 $K_{II} = K_{IIc}$ ，则斜裂纹将发生剪切断裂，并且这一趋势是随着侧压力的增加而增加的，因此在有较大侧压力作用下的地下岩体，由 I 型裂纹张拉扩展引发的声发射频度是随着侧压力的增加而减弱甚至消失的。

必须指出，由于岩体的水蚀弱化等原因而使岩体的 K_{IIc} 下降至裂纹面的应力强度因子 K_{II} 值并满足失稳断裂条件 $k + f(\alpha) < 0$ 时，则岩体必将剪断并引发地震。

5 多裂纹岩体的断裂特点

若在某一长度为 $2a$ 的主裂纹附近同时存在长度为 $2c$ 的短裂纹，两者距离为 d (图 4 所示)，则主裂

纹端部的应力强度因子为^[4]

$$\begin{aligned} \text{性} & \left\{ \begin{array}{l} K_I^{MA} \\ K_{II}^{MA} \\ K_{III}^{MA} \end{array} \right. = \left\{ \begin{array}{l} K_I \\ K_{II} \\ K_{III} \end{array} \right. + \left[\frac{c}{8d} \right]^2 \cdot \text{的应} \\ \text{但由} & \left\{ \begin{array}{l} K_I^{MA} \\ K_{II}^{MA} \\ K_{III}^{MA} \end{array} \right. \text{合裂} K_{III} \text{，显} \\ \text{分析} & \left[\begin{array}{lll} A_{11}(\alpha, \beta) & A_{12}(\alpha, \beta) & A_{13}(\alpha, \beta) \\ A_{21}(\alpha, \beta) & A_{22}(\alpha, \beta) & A_{23}(\alpha, \beta) \\ A_{31}(\alpha, \beta) & A_{32}(\alpha, \beta) & A_{33}(\alpha, \beta) \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} K_I \\ K_{II} \\ K_{III} \end{array} \right. \end{aligned} \quad (8)$$

式中： K_I ， K_{II} ， K_{III} 为不存在相邻裂纹时，主裂纹的应力强度因子； $A_{11}(\alpha, \beta) = 2\cos(2\alpha + \beta) + 4\cos(2\alpha - \beta) + 8\cos 2(\alpha - \beta) - 6\cos(2\alpha - 3\beta) - 8\cos(2\alpha - 4\beta) - 3\cos 3\beta + 8\cos 2\beta + 11\cos \beta$ ； $A_{12}(\alpha, \beta) = -6\sin(2\alpha + \beta) - 8\sin(2\alpha - \beta) + 6\sin(2\alpha - 3\beta) - 8\sin(2\alpha - 4\beta) + 9\sin 3\beta - 8\sin 2\beta + 5\sin \beta$ ； $A_{13}(\alpha, \beta) = A_{31}(\alpha, \beta) = 0$ ； $A_{21}(\alpha, \beta) = -2\sin(2\alpha + \beta) - 6\sin(2\alpha - 3\beta) - 8\sin(2\alpha - 4\beta) + 3\sin 3\beta - 8\sin 2\beta - 9\sin \beta$ ； $A_{22}(\alpha, \beta) = -6\cos(2\alpha + \beta) - 4\cos(2\alpha - \beta) + 8\cos(2\alpha - 2\beta) - 6\cos(2\alpha - 3\beta) + 8\cos(2\alpha - 4\beta) + 9\cos 3\beta - 8\cos 2\beta + 15\cos \beta$ ； $A_{23}(\alpha, \beta) = A_{32}(\alpha, \beta) = 0$ ； $A_{33}(\alpha, \beta) = 8\cos(\alpha - \frac{\beta}{2})\cos(\alpha - \frac{3\beta}{2})$ 。

对完全闭合的裂纹 $K_I = 0$ ，若不考虑 K_{III} 的作用，则应力集中最严重时，即 $\sigma = \sigma_0 = 0$ 时，主裂纹的应力强度因子为

$$K_{II}^{MA} = \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{c}{d} \right)^2 \right] K_{II} = (\sigma - \mu_n) \left(1 + \frac{c^2}{4d^2} \right) \quad (9)$$

由上式可见，当 c/d 值达到一定值时，则两裂纹的相互影响导致了裂纹端部很高的应力集中，当 $K_{II}^{MA} = K_{IIc}$ 时，则裂纹将沿两裂纹间的岩桥发生剪切断裂，若这一断裂是失稳型的，则地震也就由此发生。

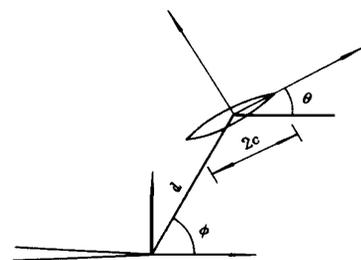


图 4 两裂纹所处位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram for two different situated cracks

若岩桥剪断形成的裂纹长度 $(a + c + d)$ 及构造应力场满足 $K_{II} = (\sigma - \mu_n) \sqrt{(a + c + d)} = K_{IIc}$

及当 $K + f(\sigma) < 0$ 时, 则岩桥发生失稳剪断而引发强震, 在此条件下主震前没有前震, 但若上式不满足时, 则岩桥剪断仅有可能导致前震或蠕动, 而不会立即引发强震, 在此随着水蚀弱化及应力腐蚀等方面的作用, 将使裂纹面的摩擦系数明显低于新鲜断裂面的摩擦系数, 因此主震的孕育过程既是应力场的重新聚集过程, 同时也是断层面摩擦系数减小, 有效剪应力增加的过程。

6 结 论

(1) 岩体失稳断裂导致地震的必要条件是同时满足裂纹开裂判据 $K_{II} = K_{IIc}$ 及裂纹失稳扩展判据 $K + f(\sigma) < 0$, 同时满足这两个判据的断层有临界开裂与临界止裂两个长度。

(2) 张开型的剪切裂纹比闭合型的剪切裂纹更易发生张拉扩展, 并且这种趋势随着岩石内摩擦系数的增大而增加。

(3) 在单向压应力或较小侧压力的作用下, 岩体中的 I 型裂纹总是首先发生张拉扩展, 但当岩体中的侧压力系数达到某一临界值时, 则 II 型裂纹将直接发生剪切断裂, 从而在地震上表现为不同的前兆现象。

(4) 多裂纹岩体的裂纹扩展受到相邻裂纹的长度、方向等因素的影响, 当与相邻裂纹的间距达到某一临界值时, 裂纹端部由于很高的应力集中而导致剪切断裂或导致地震, 随着多裂纹岩体裂纹长度和方位的不同将产生不同的地震序列。

参 考 文 献

- 1 王桂尧. 岩石 I 型(剪切)断裂及工程应用的研究[博士学位论文]. 长沙: 中南工业大学, 1996
- 2 王建华, 宋锦良. 受压剪应力作用闭合裂纹的光弹性研究. 地震学报, 1990, 12(2): 204 ~ 211
- 3 Paul S S. Crack extension under compressive loading. Engng. Fract. Mech., 1984, 20(3): 463 ~ 473
- 4 Meguid S A. Main crack-microcrack interaction under mode I, II, III loadings. Int. J. Mech., 1991, 33(5): 351 ~ 359

EXPLORATION FOR SOME PROBLEMS IN FRACTURE MECHANICS ANALYSIS OF EARTHQUAKE MECHANISM

Wang Guiyao¹ Sun Zongqi²

¹ Changsha Communications University, Changsha 410076)

² Central South University of Technology, Changsha 410083)

Abstract The different crack propagation behaviors for open or closed model crack are analysed theoretically and experimentally. Meanwhile, the problems of whether crack propagation will cause earthquake and how the structure plane distribution influences earthquake series are investigated.

Key words crack rockmass, model fracture, earthquake