

# 华北大震序列的断裂系模式 及破裂过程的联合反演

张之立<sup>1)</sup> 邓玉琼<sup>2)</sup> 王成宝<sup>1)</sup> 田 华<sup>1)</sup>

1) 国家地震局地球物理研究所

2) 美国哥伦比亚大学应用地球物理 Aldridge 实验室

## 摘 要

本文从断裂系扩展的角度,研究了华北邢台、渤海、海城和唐山地震序列的发生过程。通过对前震-主震-余震地震活动图象的剖析,我们发现,这些地震序列是由不同长度、不同几何分布的相关断裂系相互作用和扩展的结果。根据地震活动图象和断裂扩展理论,对每个地震序列提出了相应的断裂系模式,并用断裂有限单元法将震源机制、地震活动图象的分期变化和大地形变等观测资料相结合,进行联合反演,再次对断裂系模式的几何和力学参数进行了修正,从而得到各个地震序列破裂过程的最佳结果。同时我们还发现,一个走滑大地震序列临近结束时,地震活动图象的总体轮廓呈现Z形。这是由于断裂系内的拐折扩展分支相互作用和连通成为一体的结果,这种总体Z形的出现,可作为地震序列结束的标志。

**关键词** 华北地震序列;断裂系模式;破裂过程;联合反演;有限单元方法

## 一、引 言

1966年至1976年,华北东部发生了4个七级以上的大地震序列。它们是1966年的邢台地震,1969年的渤海地震,1975年的海城地震和1976年的唐山地震。这些地震发生的时间和地点靠近,说明在成因上有着内在联系<sup>[1]</sup>。对这些地震的研究已有大量文章发表,主要见文献[2—10]及它们列入的文献目录。由于研究这些地震对地震成因和地震预报研究十分重要,故本文拟从断裂系的相互作用和扩展的角度,用震源机制、地震活动和地形变资料进行联合反演的新方法统一地进行研究。

## 二、地震活动性及特点

### 1. 总体破裂图型的一致性

本文第一作者根据地震活动是地震断裂扩展轨迹的原理,对各类地震的余震空间分

1988年7月28日收到本文初稿,1989年2月11日决定采用。

布进行了研究<sup>[11]</sup>, 提出走滑型大地震的余震分布图总体上类似 Z 形展布. 它主要由 3 个部分组成: 中间为主破裂区, 两端是与主破裂区约成  $80^\circ$  的拐折扩展分支区. 拐折扩展区相对主破裂区互为反对称分布并渐弯向区域最大主压应力方向. 由于主破裂区和拐折扩展区之间的因果关系, 对于一个地震序列来说, 主破裂区是必有的, 而拐折扩展区则由于介质不均一等原因可能一端短缺或发生得很晚. 但只要发生, 它们相对主破裂区反对称分布的旋性必然和主破裂区总体剪切错动的旋性相同, 而主破裂区的剪切错动又往往和主震的相同, 因此, 由主震的震源机制即可预测拐折扩展区的展布形式及余震分布的总体图象. 为了检验上述理论, 也为了对华北地震的更深入地研究, 我们在认真核实原有资料和补充大量新资料的基础上, 用统一的计算软件重新计算了  $M_s \geq 6.0$  地震的震源机制解

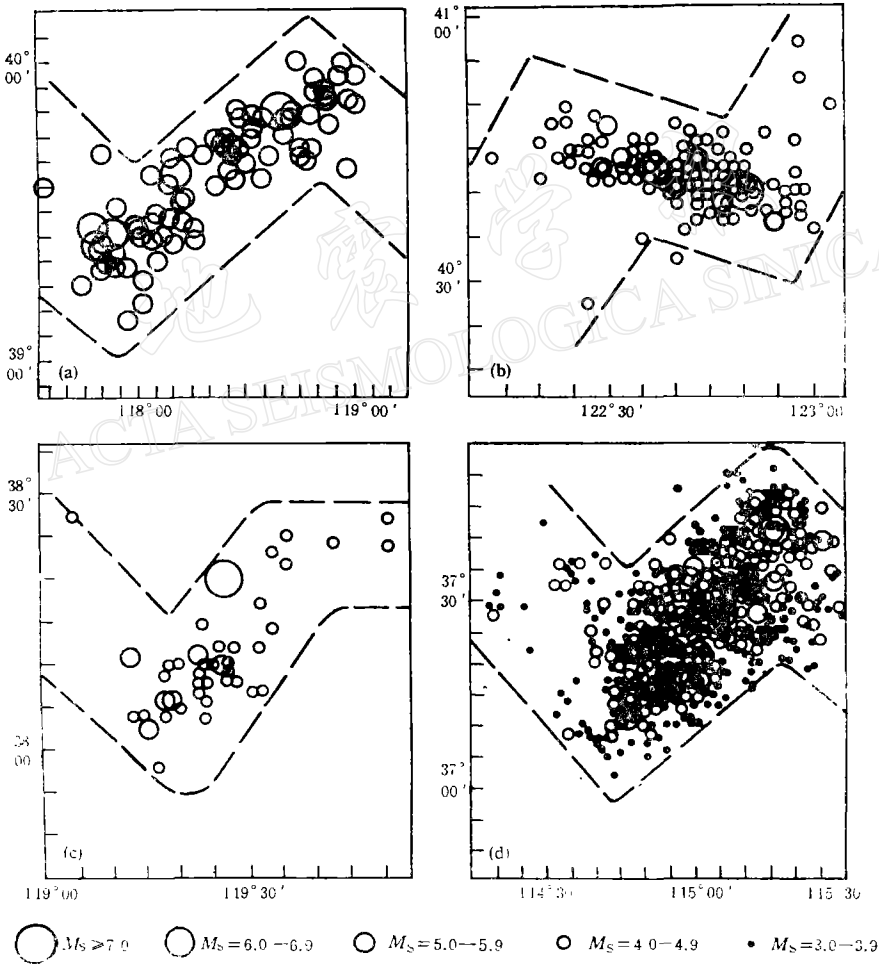


图 1 主震至 1984 年底的余震震中分布图(目录取自文献[12,13]及 1),2))  
(a) 唐山地震 ( $M_L \geq 5.0$ ); (b) 海城地震 ( $M_L \geq 4.0$ );  
(c) 渤海地震 ( $M_L \geq 4.0$ ); (d) 邢台地震 ( $M_L \geq 3.0$ )

1) 山东省地震局编, 渤海地震目录.  
2) 辽宁省地震局编, 辽宁省地震目录.

表 1  $M_s \geq 6.0$  地震的震源机制解(下半球)

| 地点 | 发震时间<br>(年·月·日) | 震中位置   |         | 震级<br>( $M_s$ ) | 震源深度<br>(km) | 破裂面(°) |       |      |       | 辅助面(°) |      |       | P轴(°) |      | T轴(°) |      | B轴(°) |      | 破裂长度<br>(Km) |
|----|-----------------|--------|---------|-----------------|--------------|--------|-------|------|-------|--------|------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|--------------|
|    |                 | 纬度     | 经度      |                 |              | 走向     | 倾向    | 倾角   | 走向    | 倾向     | 倾角   | 走向    | 方位    | 倾角   | 方位    | 倾角   | 方位    | 倾角   |              |
| 邢台 | 1966.3.8        | 37°21' | 114°55' | 6.8             | 10           | 30.5   | 120.5 | 75.1 | 119.5 | 29.5   | 86.2 | 254   | 254   | 13   | 346   | 7.4  | 105   | 75   | 40           |
| 邢台 | 1966.3.22       | 37°30' | 115°05' | 6.7             | 9            | 24     | 294   | 74.3 | 118.5 | 28.5   | 74.5 | 71.3  | 71.3  | 0    | 161.3 | 22.5 | 341.3 | 67.5 | 22           |
| 邢台 | 1966.3.22       | 37°32' | 115°03' | 7.2             | 9            | 25     | 295   | 79   | 119   | 29     | 70.6 | 253   | 253   | 5.7  | 160.2 | 21.7 | 357   | 67.5 | 40           |
| 邢台 | 1966.3.26       | 37°41' | 115°16' | 6.2             | 15           | 290    | 20    | 74   | 26    | 116    | 76   | 68    | 68    | 26   | 337   | 3    | 242   | 64   | 20           |
| 邢台 | 1966.3.29       | 37°21' | 115°02' | 6.0             | 25           | 40     | 130   | 78   | 144   | 234    | 63   | 284   | 284   | 1.2  | 183   | 30   | 21    | 47   | 18           |
| 渤海 | 1969.7.18       | 38°20' | 119°27' | 7.4             | 30           | 17     | 107   | 68.5 | 121.6 | 211.6  | 56.8 | 71.5  | 71.5  | 7.4  | 335   | 40.3 | 170   | 48.8 | 46           |
| 海城 | 1975.2.4        | 40°39' | 122°48' | 7.3             | 12           | 280    | 10    | 75.5 | 13    | 103    | 77   | 237   | 237   | 20   | 146   | 1    | 70    | 85   | 50           |
| 营口 | 1978.5.18       | 40°42' | 122°36' | 6.0             | 13           | 297    | 27    | 83   | 27.5  | 117.5  | 85   | 162   | 162   | 1.5  | 252   | 8.3  | 62    | 82   | 30           |
| 唐山 | 1976.7.28       | 39°38' | 118°11' | 7.8             | 11           | 29.8   | 299.8 | 86.3 | 120.2 | 30.2   | 83.5 | 255   | 255   | 1.9  | 165   | 7.2  | 0     | 82.5 | 82           |
| 唐山 | 1976.7.28       | 39°27' | 117°47' | 6.2             | 19           | 161.4  | 71.4  | 72.3 | 63.5  | 333.5  | 66.6 | 111.5 | 111.5 | 3.7  | 203.6 | 29.7 | 15    | 60   | 25           |
| 唐山 | 1976.7.28       | 39°50' | 118°39' | 7.1             | 10           | 29     | 299   | 79.5 | 121   | 31     | 79.5 | 75    | 75    | 0    | 165   | 15   | 345   | 75   | 45           |
| 唐山 | 1976.11.15      | 39°24' | 117°42' | 6.9             | 17           | 150    | 60    | 63.8 | 60    | 150    | 90   | 288   | 288   | 18.2 | 192   | 18.2 | 60    | 63.8 | 40           |
| 唐山 | 1977.5.12       | 39°23' | 117°48' | 6.2             | 18           | 150.1  | 60.1  | 83   | 59.9  | 329.9  | 88   | 285.2 | 285.2 | 3.7  | 194.8 | 6.5  | 45    | 82.5 | 30           |

(见表 1)。结果指出,这些地震都是在北东东向区域主压应力作用下发生的。按照余震分布图型的预测理论,北北东向主破裂的地震应有右旋反对称分布的拐折扩展区,北西西向主破裂的地震应有左旋反对称分布的拐折扩展区。为了比较,图 1 是华北 4 个大地震序列从主震发生截至 1984 年底的余震震中分布图。尽管不同的地震序列,拐折扩展区出现的早晚不同,但余震分布总体图型完全符合理论所预测的。

## 2. 主震前的地震活动性

由于唐山地震没有直接前震,仅研究其余 3 个地震。这 3 个地震序列的震前地震活动虽然密集程度不同,但活动趋势基本相同。早期都是形成半径约为 100km (包括未来主震)的圆弧形围空区,随后转为与主破裂方向成  $80^\circ$  左右的窄条区,临震前则集中于主破裂周围。本文着重讨论有丰富震前地震活动资料的海城地震。不言而喻,从断裂扩展的观点,我们感兴趣的是形成条带后的震前地震活动。海城主震的前一年的地震活动主要由两部分组成,一是以盖县、熊岳震群为主的北北东向的小震条带,另一是北西西向分布的本溪震群。这两条小震条带排列成八字形。由地质构造可知,前者相应于北北东向的金州—海城断裂的活动段,后者相应于北北东向的析木河断裂带东北端的拐折扩展区。金州—海城断裂和析木河断裂组成顺向排列的雁行断裂系,该雁行断裂系相邻端的拐折扩展连通区,正是后来海城地震序列发生的地区。此外,海城主震的东南还有一条与未来主破裂偏离约  $20^\circ$  的大洋河断裂。沿着北西向大洋河断裂,主震前也曾有零星小震发生。这 3 条断裂的活动使主震区的介质逐渐弱化和破碎,最终导致  $M_s = 7.3$  地震沿北西西向发生左旋剪切错动,并与东南端的大洋河断裂相贯通。

## 三、地震序列的主破裂过程

虽然图 1 表明华北的 4 个地震序列的总体破裂图型是相似的,即都呈现 Z 形。但仔细比较则会发现,它们的主破裂部分是不同的,这是因为不同的地震序列是由不同的断裂系发生相互作用和扩展的结果。断裂系中断裂的数目、长度和几何排列均会对地震序列的主破裂过程、地震序列的结构和持续时间带来巨大影响。因此,本文仍需重点剖析每个地震序列的主破裂过程。我们首先根据各时期的余震分布,应用扩展过程的拐折点方法<sup>[4]</sup>,对各个地震序列分别进行剖析。各时期的余震分布见图 2。

**1. 唐山地震** 本文第一作者对它的破裂过程曾做过多次分析<sup>[15-17]</sup>,本文仅就最新结果<sup>[17]</sup>简述之。由扩展过程的拐折点方法,并根据震源机制和余震分期活动,认为  $M_s = 7.8$  地震是发生在北  $30^\circ$  东,长 82km 的唐山地震断裂上。 $M_s = 7.1$  地震是发生在北  $29^\circ$  东,长 45km 的滦县—芦龙断裂上。由于这个非等长的顺向雁行断裂系的相互作用和扩展,使得唐山地震序列的余震区分为明显的 5 个部分,并由北北东和北西西两个方向相间而成,见图 2(a)。它西南端的拐折扩展区因恰好与北西向的蓟运河深断裂的部分相吻合,所以其余 3 个  $M_s = 6.0$  以上的强余震均发生在该区。

**2. 海城地震** 根据扩展过程的拐折点方法,由图 2(c)-(1) 测得  $M_s = 7.3$  地震的破裂长度  $L = 50 \pm 5\text{km}$ ,破裂方向为北  $80^\circ$  西。由 2(c)-(2) 测得 1978 年发生的  $M_s = 6.0$  地震的破裂长度  $L = 30 \pm 5\text{km}$ ,破裂方向为北  $63^\circ$  西。1976 年以后常有少量  $M_s <$

4.0 的小震沿着与  $M_s = 7.3$  地震方向偏离约  $20^\circ$  的大洋河断裂发生 (见图 2(c)-(3)), 这显示大洋河断裂活动的增强。通过分期余震活动图象的转折点方法的分析可以认为, 海城地震序列是图 2(c)-(3) 所示的 3 条断裂发生剪切错动和相互作用的结果。  $M_s = 6.0$  地震发生得很晚, 以及它和  $M_s = 7.3$  地震在震中位置、破裂方向和破裂长度的明显差距, 余震区西北端的转折扩展区的明显增宽, 均说明  $M_s = 6.0$  地震是发生在另一分支断裂上。显然, 从断裂系扩展的角度, 同一断裂只是非同一断裂的简单近似。因此, 对于海城地震, 我们仍采用更合理更精确的 3 条断裂系模式。图 2(c)-(4) 是  $M_s = 6.0$  地震

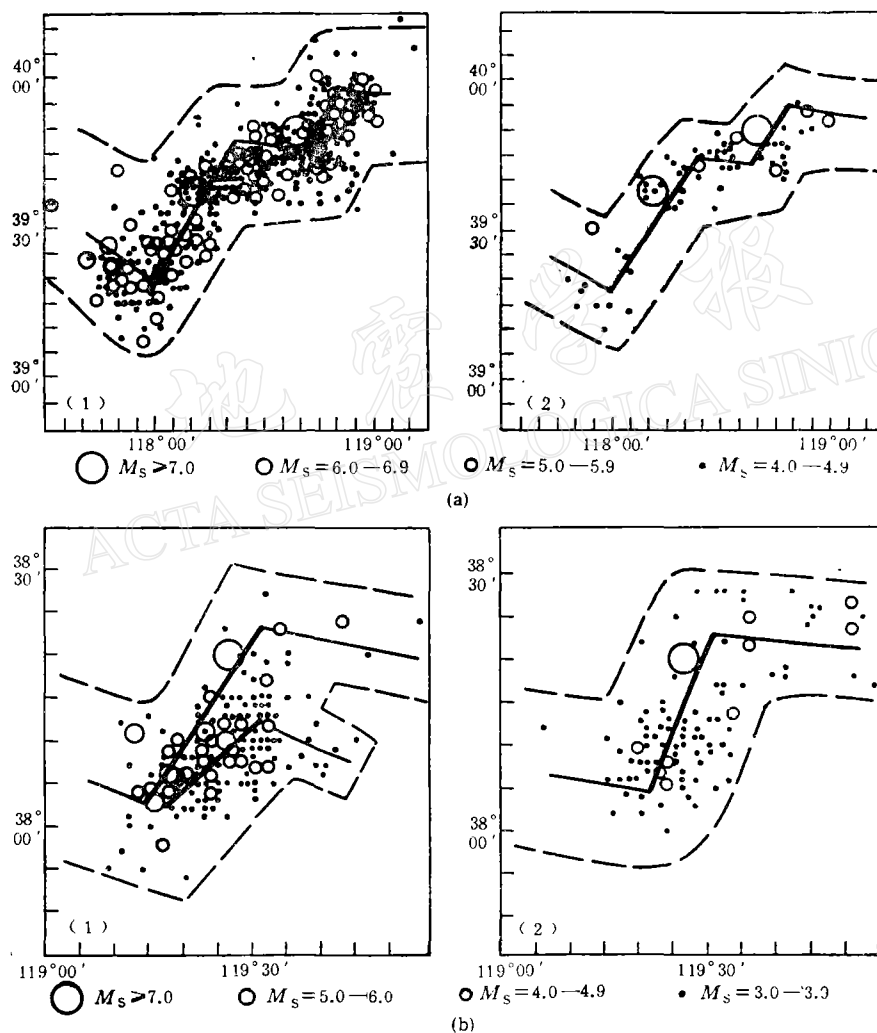


图 2 华北 4 个地震序列各个时期的余震分布

- (a)——唐山地震[(1) 1976 年  $M_s = 7.8$  地震至 1984 年底, (2) 1978 至 1984 年底];  
 (b)——渤海地震[(1) 1969 年  $M_s = 7.4$  地震至 1970 年底, (2) 1971 年至 1984 年底];  
 (c)——海城地震[(1) 1975 年  $M_s = 7.3$  地震至 1975 年底, (2) 1978 年全年, (3)  $H_s = 7.3$  级地震至 1984 年底, (4) 1978 年  $M_s = 6.0$  级地震至 1984 年底];  
 (d)——邢台地震[(1) 1966 年 3 月 1 日至 18 日, (2) 3 月 22 日  $M_s = 6.7$  地震至 3 月 29 日  $M_s = 6.0$  地震, (3) 3 月 8 日  $M_s = 6.8$  地震至 1984 年底, (4) 1973 年至 1984 年底].

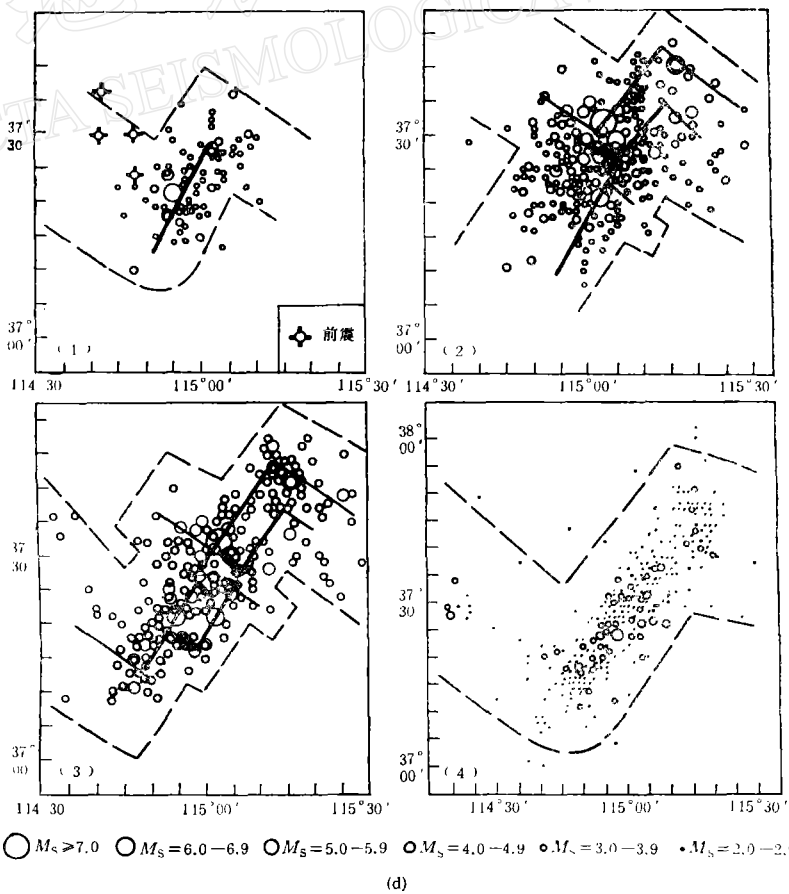
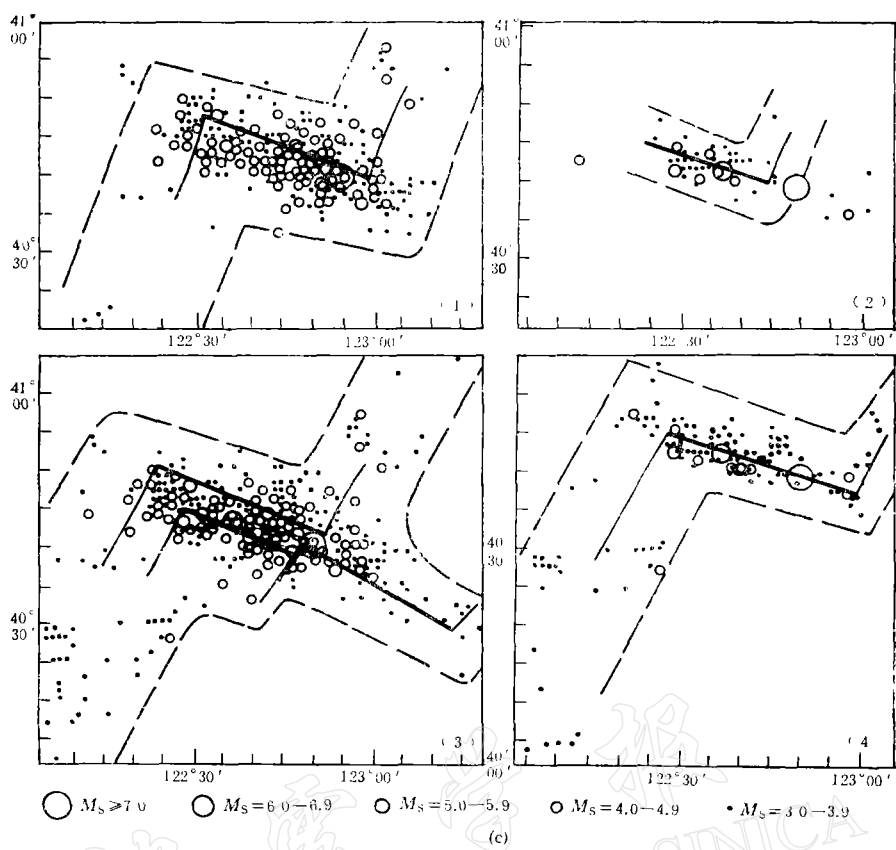


图 2 续

后至 1984 年底的余震分布,说明此时期 3 条断裂已联成一个整体。

**3. 渤海地震** 不同时期的余震分布[图 2(b)]表明,1971 年前的余震分布是东北端宽于西南端,且东北端出现了两个拐折扩展区。因此,我们用不同长度的两条非平行断裂来模拟。根据余震活动和震源机制结果,用拐折点方法判断,  $M_s=7.4$  地震是发生在北  $17^\circ$  东,长  $46\pm 5\text{km}$  的断裂上。而  $M_s=5.5$  和  $5.1$  的强余震是发生在北  $40^\circ$  东,总长为  $27\pm 5\text{km}$  的断裂上。该两断裂在西南端有共同的拐折扩展区,而东北端则有各自的拐折扩展区。图 2(b)-(2) 表明,1971 年以后两断裂联为一体。

**4. 邢台地震** 根据分期余震活动[图 2(d)]并参考震源机制(表 1),用扩展过程的拐折点方法,得到  $M_s=6.8, 6.7, 7.2, 6.2, 6.0$  地震的破裂长度分别为 40, 22, 46, 20 和 18km,破裂方向分别为北  $30.5^\circ$  东,北  $30^\circ$  东,北  $19^\circ$  东,北  $70^\circ$  西和北  $40^\circ$  东。因此,邢台地震序列是由 5 条断裂系相互作用和扩展而成。其中北  $70^\circ$  西的断裂恰好与邢台地震破裂区东北端的拐折扩展区相吻合,所以着重分析属于主破裂部分的其余 4 条北东向断裂,分别称之为断裂 1,2,3,4。断裂 1 上发生 6.8 级地震后,使得与它成顺向雁行排列的断裂 2 受到触发,发生了  $M_s=6.7$  地震。同时,与断裂 1 近似共线排列的断裂 3 在断裂 1 和 2 的共同作用下发生了  $M_s=7.2$  地震。由于  $M_s=7.2$  地震对断裂 1 和 3 共线断裂的贯通及断裂 2 和 3 平行断裂的连通,使震源区周围介质发生较大面积的破碎。因此,一天之内即发生 10 个 5 级和多个 4 级地震。3 月 29 日的  $M_s=6.0$  地震是发生在与断裂 1 近于平行的断裂 4 上。这 4 条断裂系的扩展和相互作用逐步形成形状较为复杂的余震图型[图 2(d)-(3)]。图 2(d)-(4) 则由复杂变为简单的类似单断裂的扩展图型,说明此时期 4 条断裂已逐步联通成为一体。

四、模拟地震序列破裂过程的断裂系力学模式和计算方法

上述分析表明,一个大地震序列往往是邻近多条断裂活动引起多个震源先后发生破裂的结果。因此,用单断裂的力学模式来描写过于粗糙,必须提出相应的断裂系的力学模式。由上述用扩展过程的拐折点方法得到的断裂系模式见图 3。对于区域主压应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  作用下,每条断裂上引起的有效剪应力  $\tau_{ei}$  和法向应力  $\sigma_{ni}$  为:

$$\tau_{ei} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha_i - f_i \sigma_{ni}, \quad \sigma_{ni} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha_i, \quad i = 1, 2 \cdots m \quad (1)$$

其中,  $\alpha_i$  是断裂走向和最大主压应力  $\sigma_1$  之间的夹角,  $f_i$  是摩擦系数,  $m$  是断裂系内断裂的数目。这些断裂系模式由于断裂的几何排列的不规则和断裂长度的不均一,用解析法求解是困难的。所以,本文采用弹塑性断裂有限单元法<sup>[18-20]</sup>求解,以得到上述各断裂系模式的位移场、应力场、应力强度因子和应变能的分布。单元形式采用易于拟合复杂几何形状的等参元,其中有为了拟合尖端奇异性的裂尖元,以及变结点的高次等参元和过渡元。按照有限元的虚功表达式:

$$\int_V \delta \epsilon^T \sigma dV - \int_V \delta \mathbf{u}^T \mathbf{b} dV - \int_{S_t} \delta \mathbf{u}^T \mathbf{t} dS = 0 \quad (2)$$

容易得到每一节点  $i$  的方程式如下:

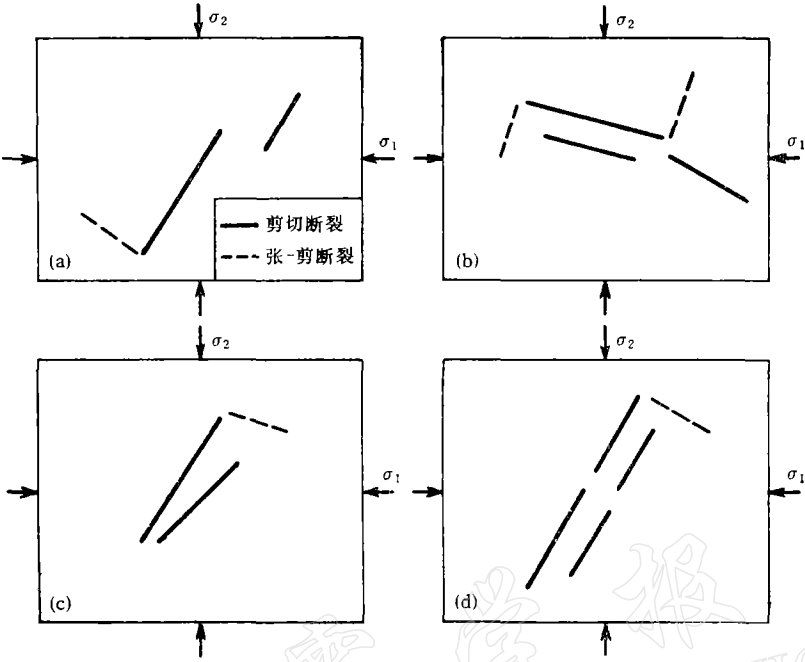


图 3 华北地震序列的断裂系模式  
(a) 唐山地震; (b) 海城地震; (c) 渤海地震; (d) 邢台地震

$$\int_V \mathbf{B}_i^T \boldsymbol{\sigma} dV - \int_V \mathbf{N}_i^T \mathbf{b} dV - \int_{S_i} \mathbf{N}_i^T \mathbf{t} dS = 0 \tag{3}$$

其中  $\boldsymbol{\sigma}$  是应力,  $\mathbf{b}$  是体力,  $\mathbf{t}$  是边界表面力向量,  $\mathbf{B}_i$  是总体应变-位移矩阵,  $\mathbf{N}_i$  是总体形函数矩阵,  $V$  是所考虑的域,  $S_i$  是有表面力作用的边界部分. 对于有  $P$  个结点的单元, 单元位移  $\mathbf{u}_e$ , 单元应变  $\boldsymbol{\epsilon}_e$ , 单元应力  $\boldsymbol{\sigma}_e$  和单元体积  $dV_e$  分别表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_e &= \sum_{i=1}^P \mathbf{N}_{ie} \mathbf{d}_{ie}, \quad \boldsymbol{\epsilon}_e = \sum_{i=1}^P \mathbf{B}_{ie} \mathbf{d}_{ie}, \\ \boldsymbol{\sigma}_e &= \mathbf{D}_e \boldsymbol{\epsilon}_e, \quad dV_e = h_e \text{Det} \mathbf{J}_e d\xi d\eta \end{aligned} \tag{4}$$

式中,  $\mathbf{d}_{ie}$  是结点变量向量,  $\text{Det} \mathbf{J}_e$  是雅可毕行列式,  $\xi$  和  $\eta$  是局部坐标.  $h_e$  是系数, 对于平面应力情形为板厚, 对于平面应变情形等于 1. 将(4)式代入(3)式, 得到单元  $e$  对(3)式各项的贡献:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^P \mathbf{K}_{ij} \mathbf{d}_{je} &= \int_{V_e} \mathbf{B}_{ie}^T \mathbf{D}_e \left( \sum_{j=1}^P \mathbf{B}_{je} \mathbf{d}_{je} \right) dV \\ \mathbf{f}_{Bi} &= \int_{V_e} \mathbf{N}_{ie}^T \mathbf{b}_e dV \\ \mathbf{f}_{Ti} &= \int_{S_{ie}} \mathbf{N}_{ie}^T \mathbf{t}_e dS \end{aligned} \tag{5}$$

$\mathbf{K}_{ij}$  为单元刚度矩阵的子矩阵,  $\mathbf{f}_{Bi}$  和  $\mathbf{f}_{Ti}$  分别为单元体力和边界表面力在结点  $i$  的荷载向量. 由于它们具有统一形式的积分格式:

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(\xi, \eta) d\xi d\eta \tag{6}$$



采用计算精度较高的高斯求积法<sup>[18]</sup>是方便的。集合系统网格中各个单元的贡献，即可形成总刚矩阵和总体荷载向量的联立方程组，简写成：

$$Kd = F \tag{7}$$

为了节省计算机内存，我们采用同时集合同时消元的波前法进行求解，从而得到系统各结点的位移、应力和应变能等参量。同时根据裂尖及邻近裂尖的位移和插值位移，按照(8)式和(9)式计算各断裂端的应力强度因子  $K_I$  和  $K_{II}$ 。由(10)式计算能量释放率  $G$ 。

$$K_I \left\{ \begin{matrix} (2\phi - 1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \\ (2\phi + 1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \end{matrix} \right\} = 4\mu \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \left\{ \begin{matrix} u \\ v \end{matrix} \right\} \tag{8}$$

$$K_{II} \left\{ \begin{matrix} -(2\phi + 3) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \\ (2\phi - 3) \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \end{matrix} \right\} = 4\mu \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \frac{1}{1 - f_i \tan \alpha_i} \left\{ \begin{matrix} u \\ v \end{matrix} \right\} \tag{9}$$

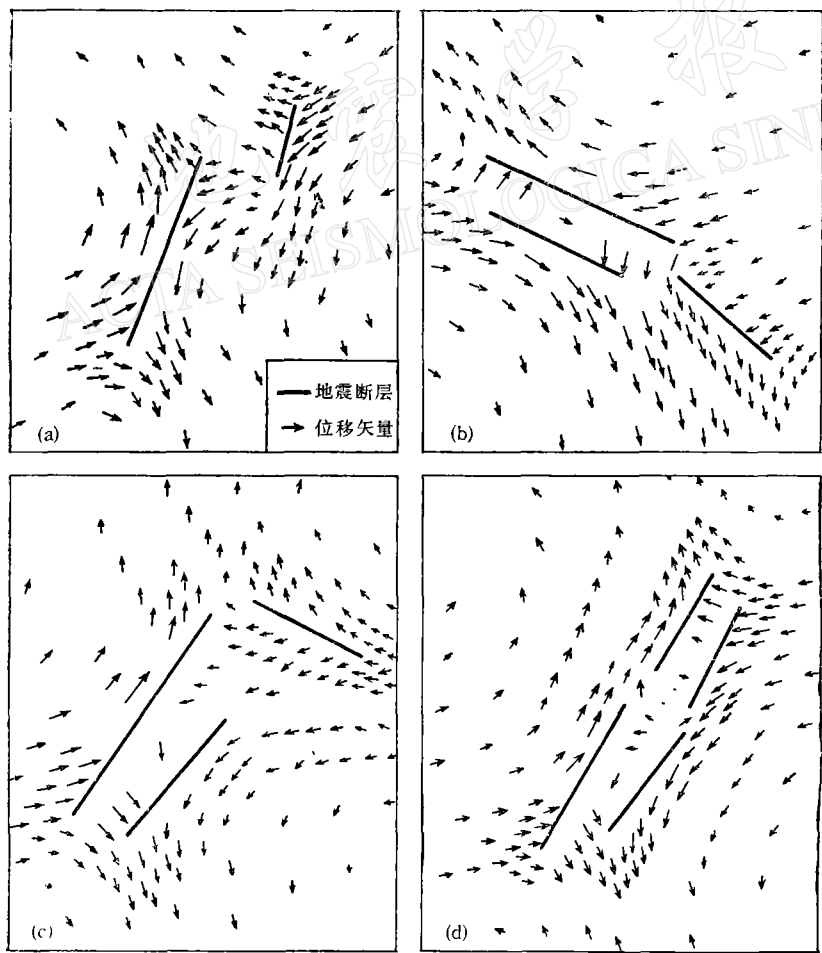


图4 计算的理论位移矢量分布图  
(a) 唐山地震；(b) 海城地震；(c) 渤海地震；(d) 邢台地震

$$G = (K_I^2 + K_{II}^2) \frac{\phi + 1}{8\mu}. \tag{10}$$

其中

$$\phi = \begin{cases} 3 - 4\nu & (\text{平面应变}) \\ 3 - \nu & (\text{平面应力}) \end{cases} \tag{11}$$

$u, v$  和  $r$  是沿从裂尖辐射线上各点的位移和径向距离,  $\theta$  是极角, 计算应力强度因子时采用沿  $\theta = \pm 180^\circ$  两个辐射方向计算结果的平均值.  $\mu$  是弹性常数,  $\nu$  是泊松比,  $f_i$  是摩擦系数,  $\alpha_i$  是断裂走向和最大主压应力的夹角. 对于图 3 的断裂系模式, 按上述方法计算得到的应力强度因子和能量释放率的比值结果列于表 2. 对于大多数情形, 应力强度因子  $K_{II}$  的大小顺序和能量释放率  $G$  的相一致. 但对一些情形, 由于断裂系之间的相互作用, 使有的断裂端产生了较大的应力强度因子  $K_I$ , 从而使该端的能量释放率增大, 使大小顺序改变. 通过对比, 我们发现, 强震发生的时间顺序与能量释放率  $G$  的大小顺序相同. 此外, 我们还计算了各断裂系模式的位移、应变和应力场. 位移矢量分布图, 平均应力场等值线图 and 应变能等值线图, 分别见图 4, 图 5 和图 6. 通过与已有的观测资料进行比较,

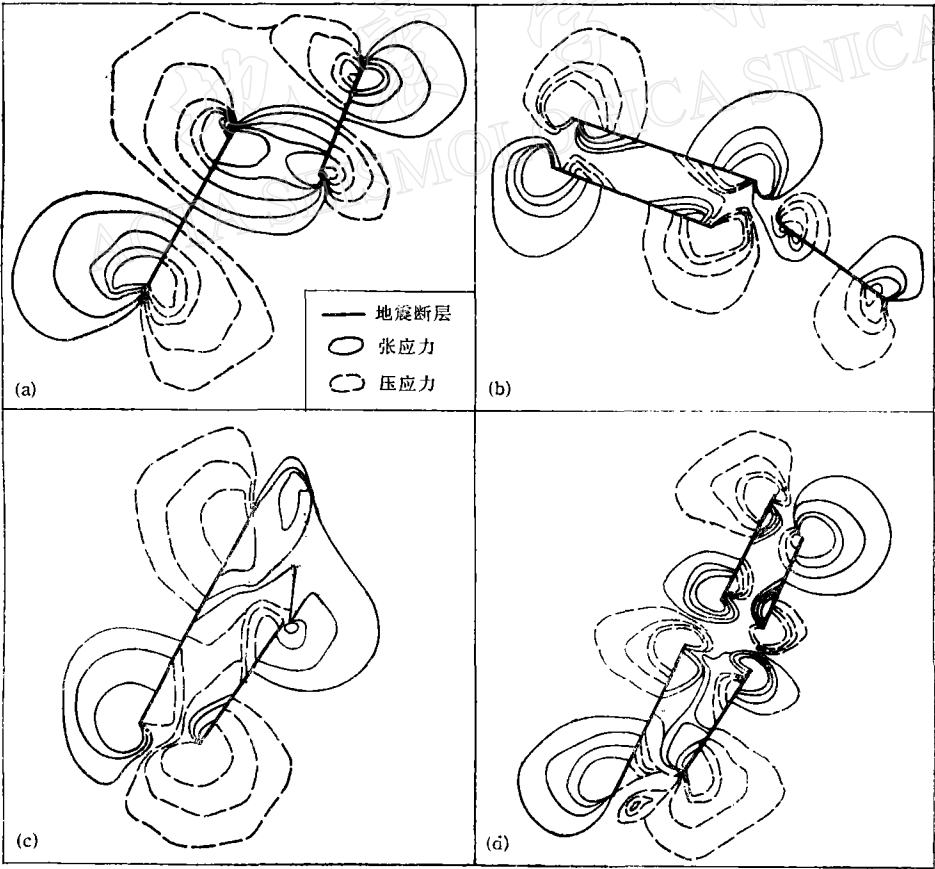


图 5 计算的平均应力场等值线分布图  
(a) 唐山地震; (b) 海城地震; (c) 渤海地震; (d) 邢台地震

表 2 应力强度因子和能量释放率的比值

| 地震序列 | $K_{II}/K_I^A$ |      |      |      |      |      |      |      | $G/G^A$ |      |      |      |      |      |      |      |
|------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|---------|------|------|------|------|------|------|------|
|      | A              | B    | C    | D    | E    | F    | G    | H    | A       | B    | C    | D    | E    | F    | G    | H    |
| 唐山地震 | 1.0            | 1.09 | 0.77 | 0.76 |      |      |      |      | 1.0     | 1.31 | 0.55 | 0.5  |      |      |      |      |
| 海城地震 | 1.0            | 0.96 | 0.80 | 0.72 | 0.82 | 0.88 |      |      | 1.0     | 1.05 | 0.65 | 0.51 | 0.98 | 0.77 |      |      |
| 渤海地震 | 1.0            | 1.15 | 0.06 | 0.02 | 0.66 | 0.62 |      |      | 1.0     | 1.27 | 0.43 | 0.14 | 0.64 | 0.40 |      |      |
| 邢台地震 | 1.0            | 1.01 | 0.90 | 0.82 | 0.74 | 0.84 | 0.89 | 0.82 | 1.0     | 1.02 | 0.85 | 0.73 | 0.55 | 0.82 | 0.80 | 0.72 |

我们发现,对于有丰富大地形变观测资料的唐山和邢台地震,计算的理论水平位移矢量分布与观测结果总体上拟合得较好,尤其是近场拟合得很好。对于没有足够大地形变观测资料的渤海和海城地震,计算的理论应变能等值线分布与观测的烈度分布图有很好的相似性,尤其是内圈图形更为相象。计算的平均应力场中的张应力和压应力的分布与余震分布图型能较好的对应。这说明本文提出的断裂系模式,研究方法和计算结果对模拟华北 4 大地震序列的破裂过程是适用的。实际上,本文采用的是由多种观测资料联合反演大地震孕育和发生过程及地震效应的方法,限于篇幅,将另文讨论。

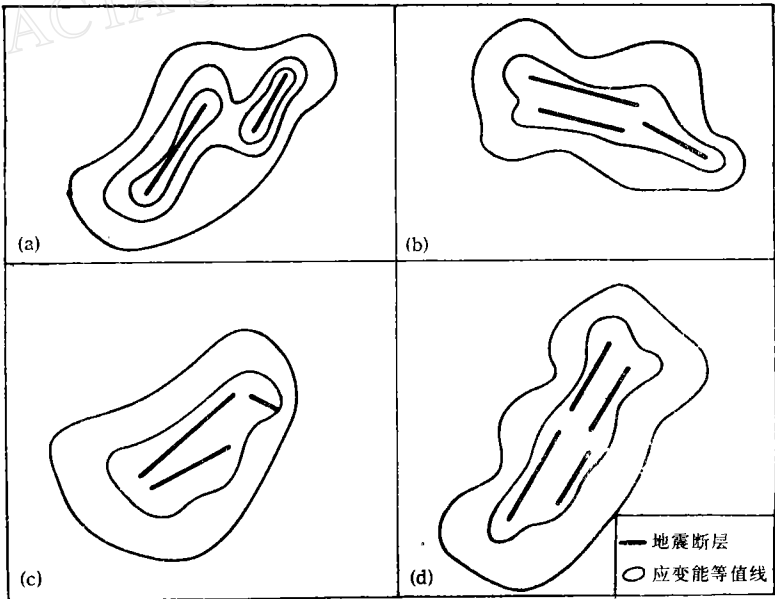


图 6 计算的应变能等值线分布图  
(a) 唐山地震; (b) 海城地震; (c) 渤海地震; (d) 邢台地震

## 五、结 论

上述结果表明,七级以上的大震序列往往是由多条不同长度、不同几何分布的相关断裂系相互作用和扩展的结果。这些断裂系一般是典型断裂系,如雁行、平行、共线和八字形断裂系的部分组合。因此,典型断裂系的扩展理论<sup>[4,21]</sup>仍然适用并可做为非均匀断裂系扩展过程研究的基础。实际上,大震序列的发生过程是断裂系活动和扩展的结果。断裂系各转折扩展分支的形成和相互连通,最终使断裂连成一个整体 Z 形(图 1)而停止它们的快速扩展。这个整体 Z 形实际上是若干小 Z 形的组合和连接,而每个小 Z 形是断裂系中每条断裂扩展的结果。大震序列的发生过程是各个小 Z 形形成和连成一个整体 Z 形的过程,这可由不同时期地震序列的空间活动图形观测得到(图 2)。总体 Z 形的形成是一个地震序列结束的标志,也就是说震源区内地震活动的频度和强度大大减弱的时刻已经到来。我们还发现,每个地震序列形成总体 Z 形所经历的时间长度是不同的,这与断裂的多少、空间分布和介质性质有关。

本研究系地震科学联合基金会资助项目。

## 参 考 文 献

- [1] 张之立,1989. 渤海陆缘地震的力学特征和成因. 地球物理学报, **32**,4,470—477.
- [2] 国家地震局唐山地震编辑组,1982. 一九七六年唐山地震,1—458. 地震出版社.
- [3] 朱凤鸣、吴戈,1982. 一九七五年海城地震,1—200. 地震出版社.
- [4] 河北省地震局,1986. 一九六六年邢台地震,1—307. 地震出版社.
- [5] 马宗晋、傅征祥,1982. 一九六六一一九七六中国九大地震,1—216. 地震出版社.
- [6] 魏光兴、季同仁、李秉铎,1984. 海城地震序列及其特征. 地震地质, **6**,1,21—29.
- [7] 顾浩鼎、陈运泰、高祥林、赵毅,1976. 1975 年 2 月 4 日辽宁省海城地震的震源机制. 地球物理学报, **19**, 4, 270—284.
- [8] 陈运泰、黄立人、林邦慧、刘妙龙、王新华,1979. 用大地测量资料反演 1976 年唐山地震的位错模式. 地球物理学报, **22**,3,201—216.
- [9] 李荣安、于军,1985. 海城地震双向构造活动的研究. 地震学报, **7**,4,385—396.
- [10] 徐果明、苏锋,1988. 地表松软层对断层位错位移场的影响及其反演问题. 地球物理学报, **31**,3, 281—293.
- [11] 张之立、刘新美,1982. 三维断裂扩展方向的理论分析和余震分布图象的预报. 地球物理学报, **25**,增刊,569—581.
- [12] 河北省地震局,1986. 邢台地震目录,1—400. 地震出版社.
- [13] 河北省地震局,1980. 唐山地震目录,1—600. 地震出版社.
- [14] 张之立、方兴,1988. 研究地震破裂过程的一种新的方法及其应用. 地震学报, **10**,1—10.
- [15] 张之立、李钦祖、谷继成、杨懋源、刘万琴,1980. 唐山地震的破裂过程及其力学分析. 地震学报, **2**,111—129.
- [16] 张之立,1984. 唐山地震破裂过程的三维分析. 地震学报, **6**,22—28.
- [17] 张之立、王成宝、方兴,1989. 唐山地震破裂过程的雁行断裂模式及理论和试验的模拟. 地震学报, **11**,291—302.
- [18] Zienkiewicz, O. C., 1977. The Finite element method, 3rd Edition 1—187. McGraw-Hill, London.
- [19] Barsoum, R. S., 1976. On the use of isoparametric finite elements in linear fracture mechanics. *Int. J. Num. Meth. Engng.*, **10**, 1, 25—37.
- [20] Hibbitt, H. D., 1977. Some properties of singular isoparametric elements. *Int. J. Num. Meth. Engng.*, **11**, 1, 180—184.
- [21] 张之立、方兴,1987. 断裂构造体系的形成和扩展过程的力学分析及应用. 中国科学, B 辑, **11**: 1212—1224.

## FRACTURE SYSTEM MODELS OF EARTHQUAKE SEQUENCES OF $M_s \geq 7.0$ IN NORTH CHINA AND SYNTHETIC INV- ERSION OF FRACTURE PROCESSES

ZHANG ZHILI<sup>1)</sup>, TENG YU-CHIUNG<sup>2)</sup>, WANG CHENGBAO<sup>1)</sup> and TIAN HUA<sup>1)</sup>

1) *Institute of Geophysics, State Seismological Bureau*

2) *Aldridge Laboratory of Applied Geophysics, Columbia University, New York, U. S. A.*

### Abstract

Four large earthquake sequences of  $M_s \geq 7.0$  occurred in North China during 1966—1976. They are the Xingtai earthquake of 1966, Bohai earthquake of 1969, Haicheng earthquake of 1975 and Tangshan earthquake of 1976. The occurrence processes of these earthquakes are studied from the view point of fracture system propagation in this paper. In terms of the analyses of their activity patterns of foreshock-mainshock-aftershock, it is found that the occurrence of each earthquake sequence is the results from the propagation of the associated fracture system in which the length and geometric distribution of fractures may be different. Based on the theory of fracture propagation, four mechanical models of fracture systems suited to each earthquake sequence respectively are presented. The geometric and mechanical parameters of these models are corrected once more by means of the synthetic inversion for the data of focal mechanism solutions, variations of aftershock activity patterns during different periods and geodetic deformation using the fracture finite element method. Then, the best solutions modelling the fracture processes of the four earthquake sequence are selected. It is also found that the pattern of aftershock distribution of a large strike-slip earthquake sequence always show a Z-shape as a whole due to the propagation and combination of fracture branches when an earthquake sequence is at its final stage. It can be a mark to recognize the termination time of an earthquake sequence.