

# 共轭发震构造间相互作用的有限元分析\*

杨仕升 秦保燕

(国家地震局兰州地震研究所)

## 摘 要

本文根据震源组合模式,利用有限元方法模拟计算,研究了共轭发震构造间的相互作用,结果如下:(1)当共轭断层的内角为压区且断层交汇区存在一定尺度的调整单元时,只有一条断层发震,另一条断层并不发震。(2)当共轭断层的内角为拉区且断层交汇区无调整单元或调整单元足够小时,由于两条共轭断层联通而发生一次大地震。(3)当共轭断层的交汇区的内角为拉区且断层交汇区有适当尺度的调整单元时,所发生的地震一般为双主震型,即两条断层均发震。其交汇区调整单元愈小,二次主震的间隔时间愈短。此外,本文还计算和讨论了调整单元尺度与初始破裂区位置的关系。

关键词:共轭构造;调整单元;始破裂区;有限元模拟

## 一、前言

共轭地震是很重要的一种地震类型。特别是在板块内部,这类地震较为常见。近年来,地震的共轭破裂现象引起了一些研究者的注意<sup>(1,2,3,4)</sup>。本文在前人研究的基础上利用计算机进行三维有限元数值模拟计算,研究在不同应力场条件下及不同的破裂时刻共轭断层间相互作用的细节,以便提出较为定量的结果,为预报这种类型的地震提供依据。

主余震型地震的发震构造的共轭现象与发生双震型地震的共轭构造有本质区别,本文研究的共轭构造属于后者。

## 二、共轭发震构造及其研究现状

共轭发震构造是指在同一应力场作用下,基本同时生成、旋性相反的一组断层组合。其中两条断层的断层面相互垂直或近于垂直,且主压应力的方向与断层面走向的夹角约为 $45^\circ$ ,并位于同一孕震层内。在我国大陆地区,共轭构造很普遍,在这样的构造上重新积累能量发生共轭地震,是一种很重要的地震类型。

\* 地震联合基金资助项目。杨仕升为兰州地震研究所89级研究生,现在广西地震办公室工作,本文为其硕士学位论文。

对一些无断层的地区即完整脆性介质区,地震断层往往以共轭断层为主。这是因为在脆性介质中当一断层传播时,断层端部的动态拉应力区会诱发张破裂,其方向与主破裂面方向近于垂直。一旦这种断层产生,主断裂传播将停止。

李四光教授把共轭的剪切构造称为棋盘格式构造,张文佑教授称其为“X”型构造体系,并且指出地球表面广泛分布着“X”型共轭剪切断层构造体系,主要分为两组:一组是北北东和北西西方向,另一组是北东东和北北西方向,其它断裂皆由这两组断裂牵就而发展形成。

张四昌研究了我国11次共轭大地震<sup>[7]</sup>,认为共轭地震可以分为两类:一类为双主震序列共轭地震,另一类是单主震序列共轭地震。水平或接近水平的动力条件是形成共轭地震的主要因素。两个方向的共轭剪破裂出现的时间常常有先后差别。共轭断层的活动控制了强震序列孕育、爆发、衰减的整个进程,两条断层相互抑制,互为闭锁。

美国学者章光月等根据我国海城、唐山和松潘地震的前兆、地震序列和地质构造资料,提出了地震孕育和发生过程中,不仅主震断层面有明显的活动,与之共轭的另一组断层面也有重要作用。另外,程式、刘正荣等也根据我国的具体震例探讨了共轭地震问题。

不少研究者认为,对共轭地震的研究,其重要的内容就是对共轭断层间相互作用的研究。关于断层间相互作用问题,郭增建、秦保燕曾于1984年提出了断层间相互作用的判别准则,即平行同旋减震、平行异旋加震、底震垂减、垂震底继。其中后两个判别准则主要用于共轭断层。

1983年郭增建、秦保燕讨论了对张构造和对压构造对发震的影响,这两类构造也属于共轭构造<sup>[8]</sup>。他们指出,对张构造由于垂断层对未来发震断层起到引张作用,从而使断层面的正压力减小,使之易于发震;而对压构造则起相反作用,垂断层的震前运动使未来发震断层面的正压力提高,从而起推迟发震的作用,且一旦发震,则其强度较高。

1992年秦保燕等研究了发震构造类型和震型的关系<sup>[9]</sup>,结合震例和应力场的研究,得到了共轭构造内角为拉区者易发生双震的结果,而内角为压区的共轭型双震尚未见到震例。

综合前人的研究结果,共轭断层可分为两类:一类为同一孕震层内二条断层相互垂直形成共轭;另一种类型为深部断层与浅部断层垂直共轭。关于后一种,立交模式已有较详细的讨论。本文将在前人研究的基础上,进一步讨论第一种共轭断层类型,研究在共轭断层区发生不同类型地震的物理机制,从而为大震后的强余震预报提供依据。

### 三、共轭发震构造的物理模型及计算模型

1973年郭增建、秦保燕等提出了震源组合模式。在这个模式中,积累单元就是岩石强度较高或两地块体间断层面上连接较牢固或是粘接较紧密的地段。当断层两侧地块体产生相对运动时,在积累单元会表现出强大的阻力,因此,在那里会产生弹性剪切变形,并积累巨大应力,从而发生大地震。在大地震发生之前,震源断层面两盘错动的前缘区,必然要有容纳错动的岩石的位置(即让位)和使断层错动传播停止的条件,该区称为

调整单元。调整单元可能是蠕滑的断层段,可能是断层带上岩石很破碎或是岩石强度较低的形状不规则的区域(如断裂交汇处的岩石破碎区、塑性区、热异常区和多液区等)。在调整单元,当其两侧地壳块体发生相对运动时,表现出的阻力较小,因此,断层两侧岩体可以相对地缓慢运动。由于它不积累巨大的应力,所以不发生大地震。

早年瑞德(Reid, 1910年)提出的弹性回跳理论指出断层错动而发生地震,但未讨论断层端部的问题。后来的弹性位错理论也只是对断层错动引起的应力场变化进行了数学计算,并未讨论震源孕育的问题。而模拟实验则因样品的尺度太小,破裂时整个样品均被贯通,故也不可能讨论断层端部问题。然而地球的物质是连续的,断层端部的问题是相当重要的,它涉及到地震的孕育和发生、地震断裂传播和终止,以及地震预报问题。郭增建、秦保燕等的震源组合模式无疑是比较合理的,故本文以震源组合模式作为共轭发震构造物理模型的基础。即根据震源组合模式将共轭断层作为应力积累单元,在其端部引入了调整单元。

一般认为,形成地震的机制大致可分为两类。一类是完整岩体的脆性破裂,另一类是地壳中原有断层面上的突然的剪切运动。后一类破裂方式相当于力学上的所谓“粘滑”运动。“粘滑”是摩擦滑动中的重要现象。1966年布雷斯等认为“粘滑”可能是一种浅源构造地震的机制。按文献[6]给出的地壳深度、围岩和岩石强度资料,可粗略计算出在地壳上部5—25km深度有利于断层的“粘滑”运动。所以在本文的物理模型中,考虑的是共轭断层的“粘滑”错动,并把共轭断层设置在地壳上部。

我国大多数地震的最大压力轴 $\sigma_1$ 和最小压力轴 $\sigma_3$ 位于水平面内,断层面近于直立。这也是本文建立物理模型的依据之一。

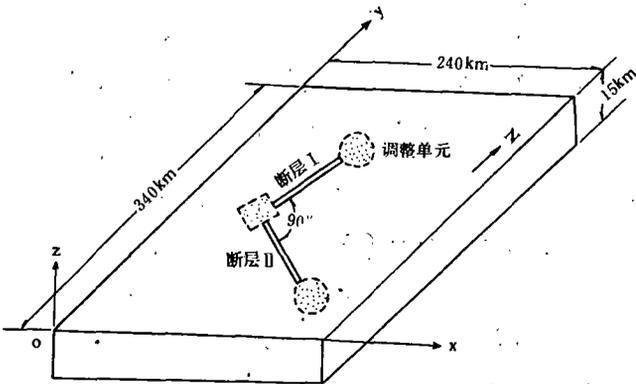


图1 三维有限元模拟计算的地块模型

Fig. 1 The block model for simulation calculation of three D finite element method

如图1所示,取地块模型长340km,宽240km,厚为15km。在其内设有共轭的两条夹角为90°的直立断层,且断层端部均有调整单元。断层I走向为N50°E,断层II走向为S40°E。在Z=-15km的面上,地块受法向约束,Z=0的表面为自由面。在地块的角点加X、Y方向的位移为零的约束。在X=0, X=240km面上及在Y=0, Y=340km面上,作用的主应力的数量级为 $10^8 \text{ dyn/cm}^2$ 。断层宽度取为2km。根据郭增建、秦保燕(1965年)建立的公式

$$M = 3.3 + 2.1 \lg L(\text{km}) \quad (1)$$

取 $M=7.3$ ,得到断层长度 $L=80\text{km}$ 。根据共轭断层的特点,I、II断层长度均取为80km。根据公式

$$E = V_p^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu) / (1 - \nu) \quad (2)$$

取密度  $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$ ，平均纵波速度  $V_p = 6.0 \text{ km/s}$ ，泊松比  $\nu = 0.25$ ，计算得  $E = 8.1 \times 10^{11} \text{ dyn/cm}^2$ 。该值即为地块模型中断层周围的完整介质的弹性模量的取值。其它参数的选取综合了文献〔9〕、〔10〕、〔11〕的研究结果。详见表1。

表1 地块模型的各种材料参数值

参 数	弹性模量 E (dyn/cm <sup>2</sup> )	泊松比 $\nu$	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	粘滞系数 $\eta$ (泊)
断层 I、II	$5.0 \times 10^{11}$	0.30	2.5	$5.0 \times 10^{24}$
完整介质	$8.1 \times 10^{11}$	0.25	2.7	$1.0 \times 10^{25}$
调整单元	$5.0 \times 10^{10}$	0.35	2.0	$5.0 \times 10^{23}$

#### 四、共轭发震构造的有限单元法数值模拟

1. 有限单元法及计算模型的单元划分  
 本文采用粘弹性三维有限单元法，把地块模型分割为178个六面体基本单元，共382

个节点(图2)，计算单元内高斯点的应力数值<sup>〔12〕</sup>。

为了提高计算结果的精度，在断层附近将剖分单元加密。考虑到目前地应力、应变相对观测是以水平分量为主，故本文着重讨论应力场在水平层上的分布情况。

#### 2. 共轭断层发震的数值模拟方法

在程序设计中，用间断面模拟断层。由于地震是断层两盘突然发生剪切滑动的结果，因此在发震时刻，在与断层面相应的节点上给定位移边界条件，位移大小为实际地震错距的一半。

根据郭增建、秦保燕等(1973年)建立的震级与断层错动幅度的关系式

$$\Delta U = 10^{0.52M - 1.25} (\text{cm}) \quad (3)$$

取  $M = 7.3$ ，计算得最大错距  $\Delta U \approx 352 \text{ cm}$ 。其它单元按等差级数递减。取断层的摩擦系数  $\mu_0 = 0.60$ 。为了表述方便，本文规定了一个判据参数  $G$ ，

$$G = \mu \sigma_N - \mu_0 \sigma_N = \tau - \mu_0 \sigma_N \quad (4)$$

式中  $\mu = \tau / \sigma_N$ ，为实际计算得到的断层摩擦系数， $\mu_0 = 0.60$ ， $\sigma_N$  为实际计算所得的断层有效压应力值， $\tau$  为实际计算所得断层的有效剪应力值。

当  $G \geq 0$  时， $\tau \geq \mu_0 \sigma_N$ ，发生剪破裂；

当  $G < 0$  时， $\tau < \mu_0 \sigma_N$ ，不发生剪破裂。

由于本文是着重分析水平面内的情况，所以垂直于断层的压应力  $\sigma_N$  和平行于断层方向的剪应力  $\tau$  通过下面的公式求得：

$$\begin{aligned} \sigma_N &= l^2 \sigma_x + m^2 \sigma_y + 2lm\tau_{xy} \\ \tau &= lm(\sigma_y - \sigma_x) + (l^2 - m^2)\tau_{xy} \end{aligned}$$

#### 3. 数值模拟的几种典型的模型

(1) 模型 A：在地块模型边界南北两侧施加水平构造力  $\sigma_1$ ，东西方向上施加水平构造力  $\sigma_3$ ，且有  $|\sigma_1| > |\sigma_3|$ ，如图7所示。

(2) 模型 E：在地块模型东西边界施加水平构造力  $\sigma_1$ ，在南北边界施加水平构造力  $\sigma_3$ ，且

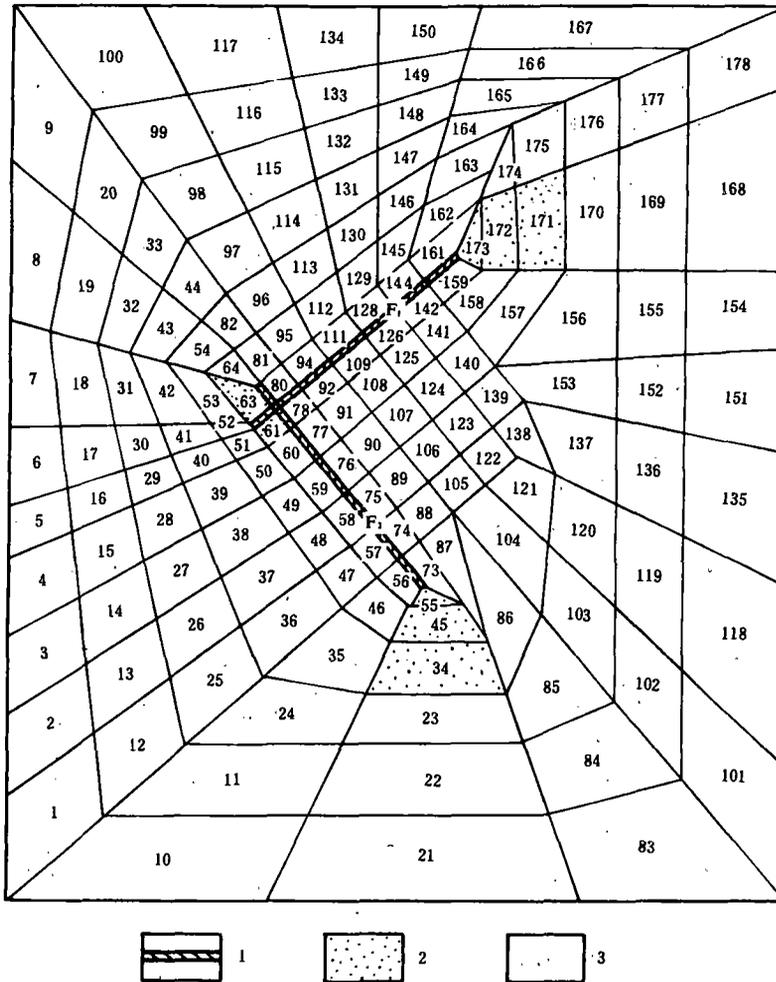


图2 地块模型的有限单元划分

1. 断层; 2. 调整单元; 3. 完整介质

Fig. 2 Dividing finite elements of the block model

有  $|\sigma_1| > |\sigma_3|$ , 如图4所示。

(3) 模型H: 地块模型不变, 但扩大共轭断层相遇处的调整单元尺度, 使共轭断层 I、II 都缩短为 64km (图3)。据公式(1)和(3)计算得  $M=7.1$  级;  $\Delta U=276.69\text{cm}$ 。

在临界状态时, 模型 A、E、H 的边界条件见表 2。

## 五、模拟结果

### 1. 始破裂区域与共轭断层端部的调整单元的关系

数值模拟步骤：

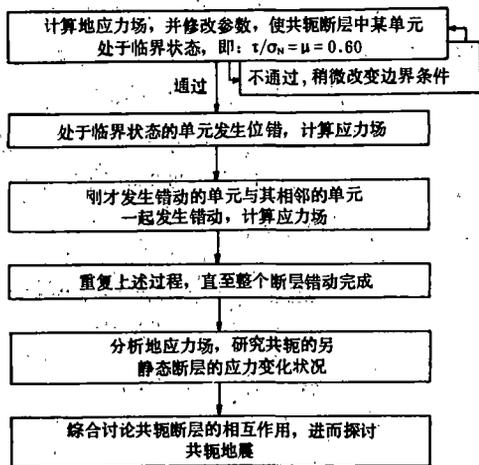


表 2 在临界状态,各个模型的边界外力和位移数值

模型名称	$\sigma_1$ (达因/厘米 <sup>2</sup> )	$\sigma_3$ (达因/厘米 <sup>2</sup> )	位移(厘米)
A	$0.96 \times 10^8$	$0.45 \times 10^8$	0
E	$1.01 \times 10^8$	$0.51 \times 10^8$	0
H	$1.03 \times 10^8$	$0.45 \times 10^8$	0

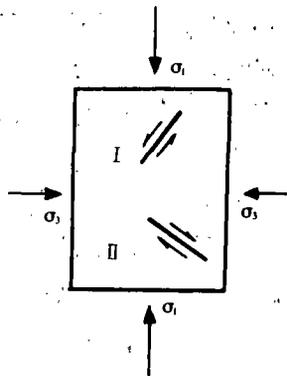


图 3 模型 H,扩大调整单元后,在构造应力作用下的共轭断层

Fig. 3 Model H, the conjugate faults by the action of the tectonic stress after extending adjustment units

在给模型加上边界条件后,比较各单元中的  $\mu$  值,如果有某一单元的  $\mu$  值达到了 0.60, 即有  $\tau = \mu_0 \sigma_n$ , 则该单元就达到了错动的临界状态, 本文称该单元

为始破裂区域。

在模型 A 中, 当主压应力  $\sigma_1$  作用方向为南北向时, 其始破裂区域位于 110 单元(表 4)。在模型 E 中, 当主压应力  $\sigma_1$  作用方向为东西向时, 始破裂区位于 68 单元处(表 6)。

表 3 主压应力为南北向时(模型 A), 调整单元变化对 I 断层中各单元的有效剪应力  $\tau$  的影响

单元	$\tau \times 10^8$ 达因/厘米 <sup>2</sup>	状态 临界时	缩小调整 单元尺度	去掉断层两 端调整单元
93	0.3518	0.3593	0.3190	
110	0.3735	0.2761	0.3081	
127	0.3566	0.3246	0.2995	
143	0.3301	0.3025	0.3011	
160	0.5505	0.3532	0.2508	

表 4 主压应力方向为南北向时(模型 A), 调整单元变化对 I 断层中各单元的  $\mu$  值的影响

单元	$\mu$ 值	状态 临界时	缩小调整 单元尺度	去掉 I 断层两 端调整单元
93	0.4602	0.5681	0.5994	
110	0.6002	0.5609	0.5351	
127	0.5405	0.5112	0.5056	
143	0.5250	0.4935	0.4721	
160	0.3660	0.3568	0.3853	

缩小共轭断层两端调整单元尺度, 计算结果如表 3 和表 4、表 5 和表 6 所示。始破裂区向断层端部迁移。当去掉断层端部的调整单元即把调整单元换成完整岩石介质时, 始破裂区迁

移到共轭断层的端部,亦即对模型 A,此时始破裂区为 93 单元;而对模型 E,始破裂区为 69 单元。说明调整单元对始破裂区域的位置有影响。仔细地比较表 3 和表 5 中同一断层内各单元的有效剪应力  $\tau$ ,可以发现,对模型 A,临界时始破裂区为 110 单元,此时断层端部 160 单元的有效剪应力  $\tau$  值最大,其次为始破裂区的 110 单元;当缩小断层两端的调整单元或去掉断层两端的调整单元时,由表 4 可知, $\mu$  值最大的单元为 93 单元,此时断层中有效剪应力  $\tau$  值也最大。对于模型 E,通过比较也有上述类似的现象。因此,可以推断,调整单元的引入,可能改变了共轭断层端部的有效剪应力  $\tau$ ,从而改变了始破裂区的位置。

表 5 主压应力方向为东西向时(模型 E),调整单元变化对断层 II 中各单元的有效剪应力  $\tau$  的影响

单元	$\tau \times 10^8$ 达因/厘米 <sup>2</sup>	状态		
		临界时	缩小调整 单元尺度	去掉断层 II 两 端调整单元
65		0.4360	0.5010	0.2677
66		0.4117	0.3914	0.3218
67		0.4201	0.3983	0.3480
68		0.4490	0.3633	0.3787
69		0.4345	0.5301	0.3832

表 6 主压应力方向为东西向时(模型 E),调整单元变化对断层 II 中各单元的  $\mu$  值的影响

单元	$\mu$ 值	状态		
		临界时	缩小调整 单元尺度	去掉断层 II 两 端调整单元
65		0.4699	0.4640	0.2475
66		0.5977	0.5809	0.4840
67		0.5788	0.5642	0.5235
68		0.5998	0.5631	0.5409
69		0.4474	0.5934	0.5944

表 7 在临界状态,模型 A 中共轭断层 I 各单元的  $\bar{\sigma}$  和  $\tau_{max}$  值

单元 应力值	单元				
	93	110	127	143	160
$\bar{\sigma}(\times 10^8)$ 达因/厘米 <sup>2</sup>	0.41777	0.37698	0.41001	0.39726	0.87084
$\tau_{max}(\times 10^8)$ 达因/厘米 <sup>2</sup>	0.41403	0.39329	0.38144	0.37173	0.69220

表 8 在临界状态,模型 E 中共轭断层 II 各单元的  $\bar{\sigma}$  和  $\tau_{max}$  值

单元 应力值	单元				
	65	66	67	68	69
$\bar{\sigma}(\times 10^8)$ 达因/厘米 <sup>2</sup>	0.85019	0.45304	0.46063	0.47911	0.54390
$\tau_{max}(\times 10^8)$ 达因/厘米 <sup>2</sup>	0.73096	0.43374	0.43698	0.46543	0.50821

在 A 模型中,断层 I 端部的 93 单元和 160 单元平均应力  $\bar{\sigma}$  和最大剪应力  $\tau_{max}$  值,较断层 I 中间的 110、127、143 单元大(表 7);同样地,在 E 模型中,断层 II 端部的 69 单元和 65 单元的平均应力  $\bar{\sigma}$  和最大剪应力  $\tau_{max}$  值,较断层中间的 66、67、68 单元大。

2. 共轭断层所夹的内角区域为压区时,当其中一条断层发震时,其破裂的传播对另一静止断层的影响

为了计算共轭断层中一断层动态传播时,另一静态断层面上各种应力值的增量,本文采用断层传播过程中不同时刻、不同位移值情况下的静态应力场来代替动态应力场。以模型 E 为例。

在与断层 II 相应的节点上给定位移边界条件。假定位错从 68 单元开始,向两侧传播,第

一次位错的节点位移值为 29.3cm。第二次错动为 67、68、69 单元，节点位移为 39.06cm。第三次错动为 66、67、68、69 单元，节点位移为 48.82cm。第四次错动为 65、66、67、68、69 单元，节点位移为 58.58cm。

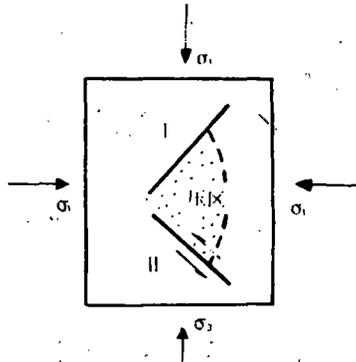


图 4 模型 E, 断层 II 作左旋错动  
Fig. 4 Model E, fault II moves in left lateral slip

在模型 E 中，当断层 II 作左旋错动时（图 4），共轭断层所夹的区域成为压区。为了讨论方便，本文取破裂速度  $v=2\text{km/s}$ ，已知每个断层单元长 16km，则随着断层 II 的破裂，静止断层 I 的压应力、剪应力和  $\tau/\sigma_N$  值随时间的变化如图 5 所示。由图 5 可以看出，断层 I 中的 93 单元和 110 单元的  $\sigma_N$  增大相当明显，其它单元的  $\sigma_N$  值也在增大，有效剪应力  $\tau$  变化不大， $\tau/\sigma_N$  值则减小， $\tau < \mu_0 \sigma_N$ ，则  $G < 0$ 。这表明，阻碍断层运动的摩擦强度大于驱使断层运动的剪应力，从而抑制了断层 I 两盘的相对运动，地震不易发生。

为了更直观地显示动态传播断层对静态断层的作用，本文给出了在断层 II 破裂传播的各个时刻，压区中有效压应力  $\sigma_N$  的变化范围（如图 6 所示）。从图 6 可知，随着断层 II 的破裂，压区中的  $\sigma_N$  值增大，压区的范围也增大，断层 I 中各单元的压应力值也不断增大，从而使其摩擦强度增大而不易于发生错动。

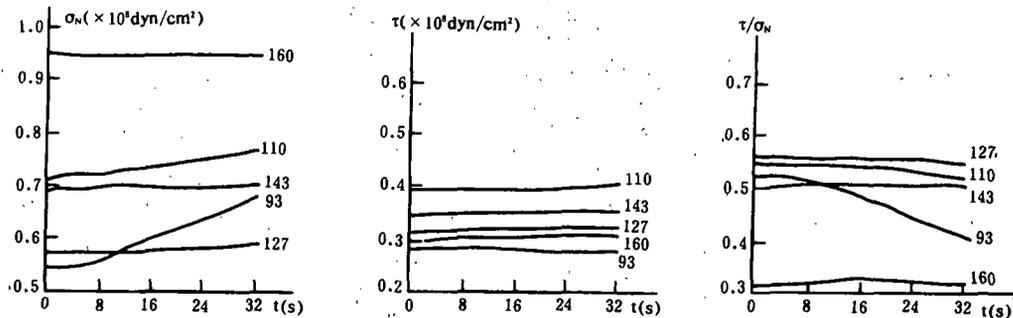


图 5 模型 E, 断层 II 破裂时  $\sigma_N$ 、 $\tau$  和  $\tau/\sigma_N$  值随破裂时间的变化  
(图中曲线端部的数字为静态断层 I 中各单元编号)

Fig. 5 Model E,  $\sigma_N$ ,  $\tau$  and  $\tau/\sigma_N$  change with time when fault II ruptures

由于静止断层 I 受到挤压，所以积累了更大的能量，一旦发生地震，其震级将更大。因此静止的断层可以是未来的地震危险区。

### 3. 共轭断层所夹区域为拉区时，其中一条断层发震后对另一静态断层的影响

对于模型 A，由于所施加的最大主压应力方向为南北向，故断层 I 发生如图 7 所示的左旋走滑错动。

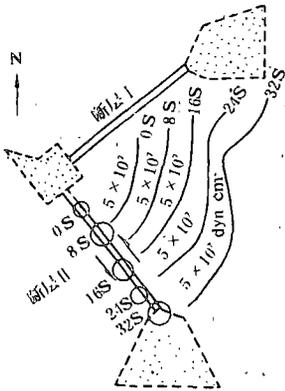


图 6

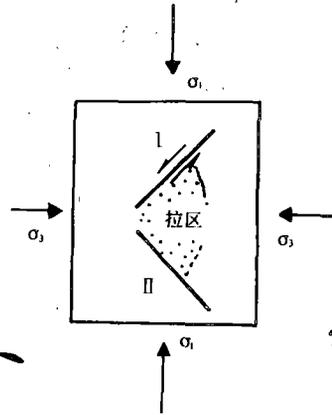


图 7 模型 A, 断层 I 作左旋错动

Fig. 7 Model A, fault I moves in left lateral slip

(1) 断层交汇区没有调整单元

关于这种情况,以模型 A 为例进行讨论。对该模型的边界条件稍作调整,即  $\sigma_1 = 1.0 \times 10^8 \text{ dyn/cm}^2$ ,  $\sigma_3 = 0.46 \times 10^8 \text{ dyn/cm}^2$ , 边界位移仍然为 0。表 9 列出了断层 I 各单元的  $\tau/\sigma_N$  值。

表 9 共轭断层交汇区没有调整单元, 临界时断层 I 中的各单元的  $\tau/\sigma_N$  值

单元	93	110	127	143	160
$\tau/\sigma_N$	0.6004	0.5460	0.5114	0.4914	0.3564

从表 9 可以看出,断层 I 从 93 单元开始作左旋错动。在其错动过程中断层 II 各单元的  $\sigma_N$ ,  $\tau$  和  $\tau/\sigma_N$  值见表 10。

表 10 共轭断层交汇区没有调整单元,共轭断层 II 中各单元的计算结果

计算结果 单元	断层 I 临界破裂时			断层 I 破裂完成时		
	$\sigma_N$	$\tau$	$\tau/\sigma_N$	$\sigma$	$\tau$	$\tau/\sigma_N$
65	0.4988	0.1584	0.3176	0.4890	0.1510	0.3070
66	0.5658	0.2232	0.3945	0.5453	0.2109	0.3868
67	0.4958	0.2609	0.5262	0.4537	0.2413	0.5318
68	0.4747	0.2652	0.5585	0.4356	0.2461	0.5651
69	0.4449	0.2267	0.5095	0.1547	0.1578	1.0200

从表 10 可以看出,在断层 I 破裂开始及破裂完成时断层 II 中各单元的  $\sigma_N$ 、 $\tau$  值都逐渐减小,但  $\sigma_N$  减小幅度远大于  $\tau$ ,且断层 II 中 69 单元的变化最为明显。当断层 I 破裂完成时,断层 II 中 69 单元的  $\tau/\sigma_N$  的值是 1.020,远超过了临界值 0.60。显然,断层 II 中 69 单元在断层 I 破裂还未完成时其  $\tau/\sigma_N$  值已达临界值 0.60,即满足  $\tau \geq 0.6\sigma_N$ 。所以可以认为,当共轭断层的内角为拉区,且断层交汇区无调整单元时,随着其中一条断层的破裂,另一条断层上的应力变化剧烈并发生破裂,这样导致两条断层破裂连通而形成一次大地震。

#### (2) 断层交汇区有调整单元(图 2)

由表 3 可知,在模型 A 中断层 I 的始破裂区是 110 单元。当断层 I 作如图 7 所示的左旋错动时,其与断层 II 所夹的内角区域为拉区。随着断层 I 的破裂,断层 II 的压应力  $\sigma_N$  减小,剪应力  $\tau$  也稍有减小,但幅度很小。其中以两个断层端部相遇处的 69 单元  $\sigma_N$  变化最大,其次是 68 单元,再则是 67 单元;69 单元的  $\tau/\sigma_N$  值变化也最大。断层 I 破裂完成时,断层 II 的  $\tau/\sigma_N$  值变化也最大。断层 I 破裂完成时,断层 II  $\tau/\sigma_N$  值最大为 0.6429(图 8),略大于临界值,即满足  $G > 0, \tau > \mu_0\sigma_N$ ,因此,易于破裂。

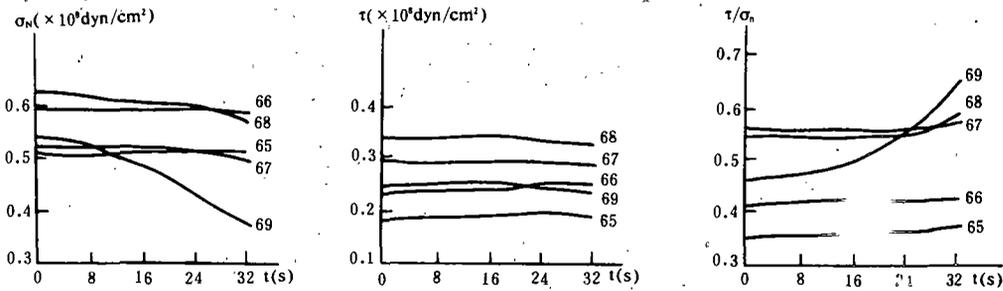


图 8. 模型 A, 断层 I 破裂时,  $\sigma_N$ 、 $\tau$  和  $\tau/\sigma_N$  值随破裂时间的变化  
(图中曲线端部的数字为静态断层 II 中各单元编号)

Fig. 8 Model A,  $\sigma_N$ ,  $\tau$  and  $\tau/\sigma_N$  change with time when fault I ruptures

动态断层 I 的破裂对静态断层 II 的作用,是通过拉区中的压应力  $\sigma_N$  的不断减小来实施的。图 9 表明,随着断层 I 的破裂,拉区的范围在扩大,拉区中压应力  $\sigma_N$  值减小的范围也在扩大,对断层 II 的压应力  $\sigma_N$  值在不断减小,从而使该断层的摩擦强度减小而易于发生地震。

如果不考虑断层间摩擦系数之差异,则可以认为两条断层破裂连通,从而发生一次地震,如 1515 年 6 月 17 日在滇西北地区发生的永胜 8 级地震。如果考虑到介质的差异或断层面凹凸粗糙程度之不同,从而存在摩擦系数的差异,那么,可能是两条断层先后发震,但间隔是很短的。

4. 共轭断层端部调整单元的大小是决定第一主震与第二主震时间间隔的一个重要因素以模型 A 为例。将共轭断层端部的调整单元扩大,即由 30km 增大到 50km,则两条断层

长度由原来的 80km 缩小到 64km(图 10)。加边界条件(表 2)后,断层 I 从始破裂区 143 单元处开始破裂(即左旋错动),见表 11。在与断层 I 相应的节点上给定位移边界条件,计算结果列于表 12 中。

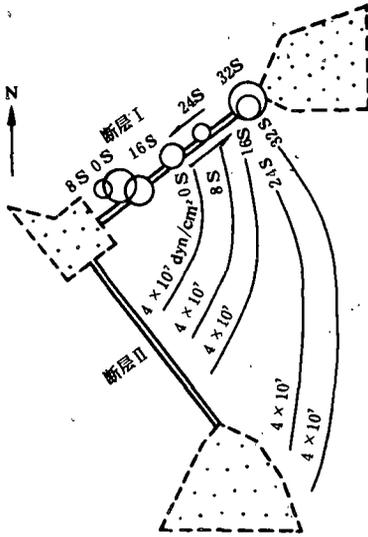


图 9 随着断层 I 的破裂,拉区中  $\sigma_N$  值变化情况

Fig. 9 The change of  $\sigma_N$  in tensile stress region extends with the rupture of fault I

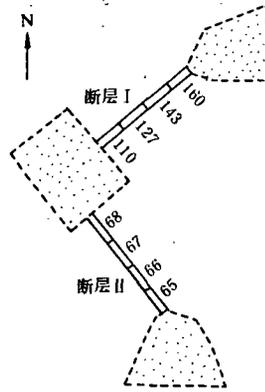


图 10 共轭断层交汇区的调整单元扩大后,  $\sigma_N$  的变化情况

Fig. 10 change of  $\sigma_N$  after extending the region of adjustment unit in the intersection zone of conjugate faults

表 11 扩大调整单元后,临界破裂时断层 I 上的压应力、剪应力及  $\tau/\sigma_N$  值

模型	110			127			143			160		
	$\sigma_N$	$\tau$	$\tau/\sigma_N$									
H 模型	0.7475	0.2854	0.3818	0.7460	0.4397	0.5894	0.7247	0.4344	0.5994	1.7100	0.6817	0.3987

注: ( $\tau, \sigma_N$  单位为  $10^8 \text{dyn/cm}^2$ )

表 12 断层 II 中各单元的计算结果

单元号	断层 I 临界破裂时			断层 I 破裂完成时		
	$\sigma_N$	$\tau$	$\tau/\sigma_N$	$\sigma_N$	$\tau$	$\tau/\sigma_N$
65	0.5486	0.2795	0.5094	0.5393	0.2809	0.5207
66	0.6959	0.3331	0.4786	0.6788	0.3295	0.4854
67	0.4174	0.3233	0.4726	0.6482	0.3183	0.4912
68	0.4174	0.1903	0.4559	0.3467	0.1924	0.5550

注: ( $\tau, \sigma_N$  单位为  $10^8 \text{dyn/cm}^2$ )

计算结果表明,在断层 I 破裂过程中,静止的断层 II 内各个单元的压应力  $\sigma_N$  减小,其中 68 单元的  $\sigma_N$  减小的幅度最大,  $\tau/\sigma_N$  值从 0.4559 增大到 0.5550。此时断层中有效剪应力  $\tau$  并没有减小(临界时  $\tau=0.1903 \times 10^8 \text{dyn/cm}^2$ , I 破裂完成时  $\tau=0.1924 \times 10^8 \text{dyn/cm}^2$ ),但阻碍断层错动的摩擦强度却由于压应力  $\sigma_N$  的减小而减小了,可见第二主震是有可能发生的,但尚需一定的时间来积累应力才达到临震状态。积累应力的时间便是共轭地震的两个主震之间的间隔时间。

## 六、结论

通过对模拟计算结果的处理和分析,可以得出以下几点结论:

1. 共轭断层区的发震类型有 3 种。一种为单震型,即仅有一条断层发震;第二种也为单震型,两条共轭断层破裂贯通,形成一次主震;第三种为双主震型,两条断层均发生一次主震。这三种地震类型与区域应力场方向及共轭断层交汇区是否存在调整单元有关。

当共轭断层的内角为压区且断层交汇区存在调整单元时,则当其中一断层发震后,由于破裂的传播增加了对另一断层的正压力,从而使该断层的摩擦阻力增大,不易发震。

当共轭断层的内角为拉区,且断层交汇区无调整单元时,地震始破裂区位于交汇区附近,破裂一旦发生可导致两条断层贯通而发生一次大地震。

当共轭断层的内角为拉区,且断层交汇区有适当尺度的调整单元时,则地震一般为双主震型。交汇区调整单元愈小,共轭型二次主震间的时间间隔愈短。

对于交叉型构造,本文未进行计算,但情况是类似的,其较大地震的数目可增加到 4 次,如马边震群。

2. 共轭断层发震构造中始破裂点的位置,取决于调整单元的尺度,调整单元愈小,始破裂点愈靠近共轭断层的交汇区。

3. 共轭断层交汇区调整单元区愈大,双震之间的间隔时间愈长。

尽管本文对共轭发震构造的相互作用进行了定量的讨论,但对于实际问题仍然是定性的,这是因为实际的共轭发震构造的介质性质、破坏极限、交汇区调整单元的介质性质和尺度等均可能与本文计算数据有一定出入。因此,拟通过震例总结和震源环境构造细节的研究获得进一步的指标。

由于计算工作量大,本文仅计算了不同应力场作用下一种类型的共轭发震构造间相互作用情况。对于弧型构造、拐折型构造、平直型构造、交叉型和网型构造均未进行计算,对此尚需另作研究。

## 参考文献

- [1] 章光月等,在地震孕育和发生过程中共轭断层活动的作用,地震地质, Vol. 2, No. 1, 1980.
- [2] 张四昌,华北地区的地震分布图象与共轭孕震构造,华北地震科学, Vol. 3, No. 2, 1985.
- [3] 刘正荣等,龙陵共轭地震群的特征,地震研究, No. 2, 1978.
- [4] 程式,对某些双震型强震成因机制的初步探讨,地震研究, Vol. 6, No. 1, 1983.

- (5)郭增建、秦保燕,地震成因和地震预报,地震出版社,1991.
- (6)郭增建、秦保燕,震源物理,地震出版社,1979.
- (7)张四昌,中国大陆共轭地震构造,中国地震,Vol. 7, No. 2, 1991.
- (8)秦保燕等,发震构造类型与震型预测,西北地震学报,Vol. 14, No. 1, 1992.
- (9)Mai Yang and M. N. TOKSOZ, Time-dependent deformation and stress relaxation after strike slip earthquake, J. Geophys. Res., 1981.
- (10)王仁等,华北地区地震迁移规律的数学模拟,地震学报,Vol. 2, No. 1, 1980.
- (11)蒋伟、宋惠珍,北京及邻区地震迁移的粘弹性有限元模拟,地震学报,Vol. 9, 增刊, 1987.
- (12)殷有泉,有限单元方法及其在地质中的应用,地震出版社,1987.

## THE FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE INTERACTION BETWEEN CONJUGATE SEISMOGENIC STRUCTURES

Yang Shisheng, Qin Baoyan

(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, China)

### Abstract

On the basis of the combination model of source, the interaction between conjugate seismogenic structures is calculated and modeled by using the finite element method. It gives the results as follows:

1. The single main shock type. One fault moves and the other fault does not move, so the single main shock type is formed when the internal angle region of conjugate faults is located in compressive stress region and there exists the adjustment unit of adequate size in the intersection region of conjugate faults.

2. The conjugate single main shock type. Two conjugate faults join together and a great earthquake occurs when the internal angle region of conjugate faults is located in tensile stress region and there is not the adjustment unit or the adjustment unit is little enough.

3. The double main shock type. The double main shock type is usually formed when the internal angle region of conjugate faults is located in tensile stress region and there exists the adjustment unit of adequate size in the intersection region of conjugate faults, the smaller the adjustment unit in the intersection region of conjugate faults is, the shorter the time interval between two major shocks is.

Furthermore, this paper also calculates and discusses the relation between the adjustment unit size and the location of initial fracture region in conjugate faults.

Key Words: conjugate structure, adjustment unit, initial fracture region, finite element