

# 发震时深浅构造相互作用导致横向断层致锁的有限元分析\*

郭星全

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

**摘要** 本文利用三维有限元方法, 研究和计算了大震发生前、发生时、发生后震源断层面与深部同面立接断层之间的相互作用以及发震后促使深部断层发生错动从而对震源区近场横向活动断层致锁的结果, 得到以下结果: (1) 临近大震前震源断层面端部调整单元下方的深部断层有较高的剪应力水平, 造成震时对震源断层面发生底辟作用的条件, 即调整单元区对应的深部断层单元首先满足破裂条件并发生破裂。(2) 震源端部的调整单元和具有蠕滑能力的横向断层对发震断层的传播有止裂作用。(3) 大震时发震断层破裂传播至横向断层时, 不能使该横向断层发生闭锁, 但发震断层破裂错动可导致深部断层作蠕滑剪切传播, 并使与震源断层垂直的近场浅层横向断层扭曲闭锁。同时出现与这一成因有关的测震学指标, 即出现由深部断层控制的直线式小震条带。(4) 震时由于调整单元让位能力有限造成震后震源端部余震发育。

**关键词:** 大震 地震断层 有限元分析 闭锁断层

## 1 前言

我国大陆浅部地质构造复杂, 其中大震震源区端部和一定距离处存在与已发大震构造相垂直的横向构造是一种常见的地质现象。根据文献[1]对某些实际震例的研究, 上述发震震源体端部或一定距离处的横向构造后来大多成为另一次强震的孕育场所, 由孕震时间和震级的关系推算的孕震开始时间与实际地震的发震时间相近。由此提出近场立交模式, 即认为大震发生时可能诱发与其同面立接的深部断层, 发生剪切蠕滑运动, 当这种运动通过横向断层底部时可使横向断层发生扭曲而锁住。这样, 大地震的发生时间就成为与其垂直的横向断层孕震的开始时间了。但是发震断层深部存在的与其相一致的(走向位置)同面立接深部断层是否会被发震断层的巨大错动所诱发并发生传播呢? 当这一深部剪切断层传播时它对大震震源区端部或一定距离处(近场)的横向断层能否产生致锁作用并形成另一次大震呢? 这是需要作进一步证明的。如果上述推断证明成立, 则已发生大震的时间即为上述横向断层的孕震开始时间, 横向断层的位置即为大震发生的地点, 横向断层的构造分段长度可估计震级, 这无疑对大震的地点预报起着重要参考作用。本文试图用近场立交模式和三维有限元计

\* 硕士学位论文(1994年), 指导老师秦保燕。

算,重点研究以下 3 个问题:

(1)大震时震源断层面巨大剪切错动对横向断层的作用(同层动态传播断层与静态共轭断层之间的相互作用)。

(2)大震时震源断层面巨大剪切错动诱发深部同面立接断层发生剪切蠕滑和传播问题(异层同面立接深浅断层之间的相互作用)。

(3)深部断层运动与横向断层之间的相互作用(异层垂直立交的深浅断层之间的相互作用)。

由此证明近场立交模式在横向断层致锁和进行强震参数预报中的意义。

关于板内大震的成因,人们试图用断裂力学的方法予以解释,但我国绝大多数地震为粘滑型,且始破裂点往往位于断层内部。因此断裂力学对解决这种类型的地震成因和预报遇到了困难。有人试图用大地震发震断层的错动致使横向断层断裂作为断层面的凹凸体以解决其致锁问题,但是一个动态传播的断层与不具闭锁条件的横向断层相遇时,它只能传递压力(拉力不能通过横向断层)。因此穿过横向断层的剪应力是很小的,因而从物理原理推断大震的错动不可能对横向活动断层形成致锁<sup>[3]</sup>,从而不能孕育大震。1984 年郭增建、秦保燕在讨论唐山地震的某些前兆现象时,解释了大陆某些地震沿直线迁移很长距离,跨越不同的地质构造单元的原因<sup>[4]</sup>,1985 年郭增建提出了立交模式的观点<sup>[5]</sup>,后来经过深入的研究,遂成为一个把构造力源、地球岩石圈分层结构、深浅构造相互作用等联系起来的大震孕育成因模式,并在大震预报中作了一定的应用,1989 年白超英、秦保燕等利用三维有限元方法模拟了立交模式<sup>[6]</sup>,证明了立交模式存在的客观性。与此同时秦保燕等提出了我国大陆活动断层的锁住指标和解锁指标<sup>[7]</sup>,并得到了对我国大陆地区大震致锁时间与震级的关系式。这一系列工作使得立交模式完善化和实用化。但以往的工作只是考虑板块力源作用下的深浅构造的立交情况(简称远场立交)。1992 年秦保燕提出了近场立交模式<sup>[1]</sup>,即利用大地震作为动力源,由地震时震源断层面上的大幅度错动诱发深部剪切带发生破裂传播,当深部剪切破裂传播经过震源近场区横向断层底部时可导致横向断层被扭曲变形而锁住。这一模式是立交模式的重要补充和发展。

## 2 近场立交模式简介

文献[1]指出大地震发生时震源断层面上发生了很大幅度的错动,根据三维有限元的计算<sup>[6]</sup>,深部剪切滑移带的剪切位移可以通过层间耦合将其传到浅层,且剪切应变带的位置、走向与深部剪切带相一致。根据这一研究成果,我们认为震时浅层断层面上的巨大错动同样可以通过层间耦合传到深部进而形成与发震断层面同面立接的剪切蠕滑断层,并且发生剪切传播运动。一旦深部蠕滑断层发生了运动,它将首先对大震震源端部及其近场的横向断层发生作用,并使横向断层扭曲而锁住。图 1 中的 F3 为发震断层,F1 为错动时导致的深部剪切蠕滑断层。F2 为位于震源端部或离发震断层一定距离的横向断层。按照组合模式中的应力积累单元和其两端应力调整单元积累和调整之间的协调关系<sup>[8]</sup>,其震源应变场的半径 R 可以根据文献[1]中的位错幅度 D 由公式求得

$$D=10^{0.52M-1.25}(cm) \quad (1)$$

$$R=10^{0.5M-1.4} \quad (2)$$

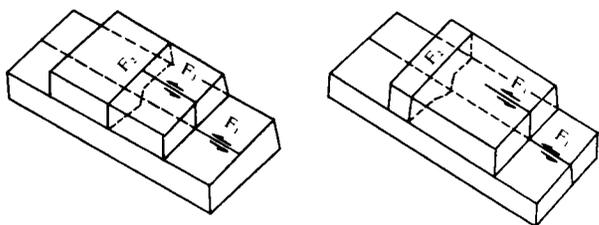


图1 近场立交模式图

Fig. 1 Near-field stereoscopic model.

式中  $M$  为地震震级,  $R$  以  $\text{km}$  为单位。实际上由于岩石圈下层介质偏于塑性, 因此当发震断层的巨大幅度错动传到下岩石圈并引起剪切蠕滑断层传播时, 其传播的距离一般要超过(2)式中的估计值。

根据近场立交模式图, 已发生大震的震源断层面走向以及横向断层的位置和走向均是已知的。

当发震断层与横向断层垂直立交时, 横向断层的孕震开始时间也就已知了。以下计算式可以进行未来大震震级和发震时间的估计。

$$M = 3.3 + 2.1 \lg L \tag{3}$$

$$M = 1.308 \lg T + 5.06 \tag{4}$$

$$t_x = t_0 + T \tag{5}$$

$L$  为横向断层被锁住段的长度(即用构造分段求得的长度), 以  $\text{km}$  为单位。  $T$  为横向断层孕震所需时间, 以年为单位,  $t_0$  为已发大震的时刻,  $t_x$  为未来大震发生的时刻。

### 3 近场立交计算模型

#### 3.1 模型参数和介质参数

图2表示模型1,  $F_3$  的端部与  $F_2$  有一定的距离,  $F_3$  的两端设制了一定范围的调整单元。图3表示模型2,  $F_3$  的端部与  $F_2$  相遇。

##### 3.1.1 模型参数

图2和图3中的地质块体长  $600 \text{ km}$ , 宽  $500 \text{ km}$ , 厚  $40 \text{ km}$ , 分为上下两层以模拟岩石圈上下层。在上层存在有两条断层: 发震断层  $F_3$ , 横向活动断层  $F_2$ , 且两断层均为走滑断层,  $F_3$  走向为  $N40^\circ E$ ,  $F_2$  走向为  $S50^\circ E$ , 发震断层的长度是根据公式(3)确定的, 如取  $L = 173 \text{ km}$ ,  $M = 8.0$ , 因此在选取发震断层长度时取  $170 \text{ km}$ , 横向断层的长度为  $220 \text{ km}$ , 厚度为  $2 \text{ km}$ 。

##### 3.1.2 介质参数及边界条件

介质参数的选取参照了蒋伟、宋慧珍<sup>[9]</sup>, 梅世榕<sup>[10]</sup>的研究成果(表1)。

表1 地质模型的各种材料参数表

介 质	弹性模量 $E$ ( $\text{dyne/cm}^2$ )	泊松比 $\gamma$	粘泊带系数 $\eta$
横向活动断层	$1.9 \times 10^{11}$	0.28	$5.0 \times 10^{24}$
上层完整介质	$6.9 \times 10^{11}$	0.25	$1.0 \times 10^{26}$
上层调整单元	$3.9 \times 10^{11}$	0.28	$1.0 \times 10^{24}$
下层介质	$11.0 \times 10^{11}$	0.25	$5.0 \times 10^{24}$

边界条件:在东西方向加最大主压应力  $\sigma_1 = 2.0 \times 10^7 \text{ pas}$ ,而在南北方向加主压应力  $\sigma_2 = 0.80 \times 10^7 \text{ pas}$ .约束条件:在  $Z = -40\text{km}$  处地质块体受法向约束,在  $Z = 0$  表面为自由表面,在两角点 C、A 处约束。

### 3.1.3 单元划分

本文采用粘弹性三维有限元方法,在计算时将地质块体分为三层,一、二层为岩石圈上层,厚度各为 10 km,第三层为岩石圈下层。网格划分及单元编号如图 4 所示,在图 4 所示的模型 1 中选取每层 172 个单元,共 516 个单元,720 个节点。

### 3.2 断层的有限元模拟——劈节点技术<sup>[11][12]</sup>

本文中断层的模拟可分为两类:一是横向断层处理成具有一定厚度的连续介质。二是发震断层 F3、岩石圈下层深断层 F1 采取劈节点技术。在普通有限元方法中,不同单元的公共节点上所分到的节点位移值对每一个单元都是相同的。而劈节点是特殊的节点,在劈节点上的位移由两个单元均分,由此在两单元之间引入位移不连续性。当劈节点位于断层面的一边的单元上时,就会有位移  $\delta^+$ ,当它位于断层另一边时,它又有另一个位移  $\delta^-$ 。断层就是用这种劈节点串的单线来模拟的。

#### 3.2.1 劈节点的刚度矩阵方程

如图 5 所示,设两个 8 节点单元(本程序采用此方法)中间发生错动,设在两个单元的共用节点  $i, j, k, m$  存在劈节点使得第一单元的  $i, j, k, m$  节点存在劈节点位移  $\Delta\delta_i, \Delta\delta_j, \Delta\delta_k, \Delta\delta_m$ ,则另一单元处必存在方向相反大小相等的节点位移。设  $i, j, k, m$  各节点的位移为  $\delta_i, \delta_j, \delta_k, \delta_m$ ,则在第一个单元存在劈节点单元的  $i, j, k, m$  节点处的实际位移将变为:  $\delta_i + \Delta\delta_i, \delta_j + \Delta\delta_j, \delta_k + \Delta\delta_k$  和  $\delta_m + \Delta\delta_m$ ,而在该单元的其它节点的位移仍保持不变,同样在第二单元的  $i, j, k, m$  的实际位移为  $\delta_i - \Delta\delta_i, \delta_j - \Delta\delta_j, \delta_k - \Delta\delta_k, \delta_m - \Delta\delta_m$  等等,另外在无劈节点的节点处位移保持不变。

为一般起见,我们讨论任一个存在有劈节点的单元  $e$ ,该单元为 8 节点单元,每节点有 3 个分量(x、y、z),则共有 24 个位移分量,通常我们假设 8 个节点都存在有劈节点,则 24 个位移分量为  $\delta_1 + \Delta\delta_1, \dots, \delta_{24} + \Delta\delta_{24}$ ,若某点(或某分量)的劈节点位移为零,即  $\Delta\delta_n = 0$ ,则  $\delta = \delta_n$ ,这样该单元的单元刚度矩阵为  $[k^e][\delta + \Delta\delta] = [F^e]$

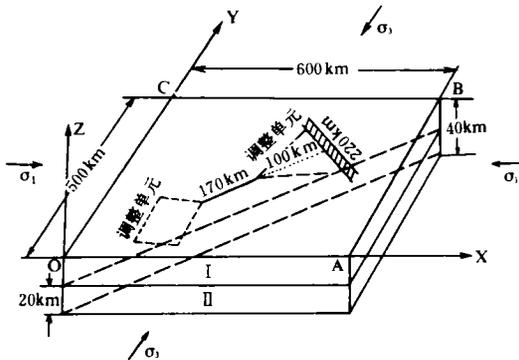


图 2 模型 1 地质块体计算模型  
Fig. 2 Calculating model of geological mass in model 1.

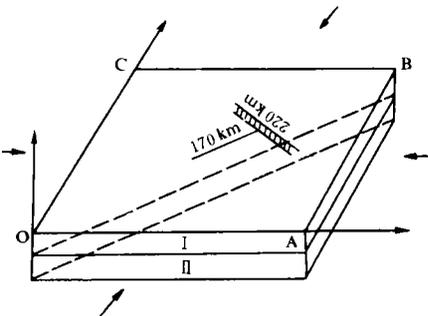


图 3 模型 2 地质块体计算模型  
Fig. 3 Calculating model of geological mass in model 2.

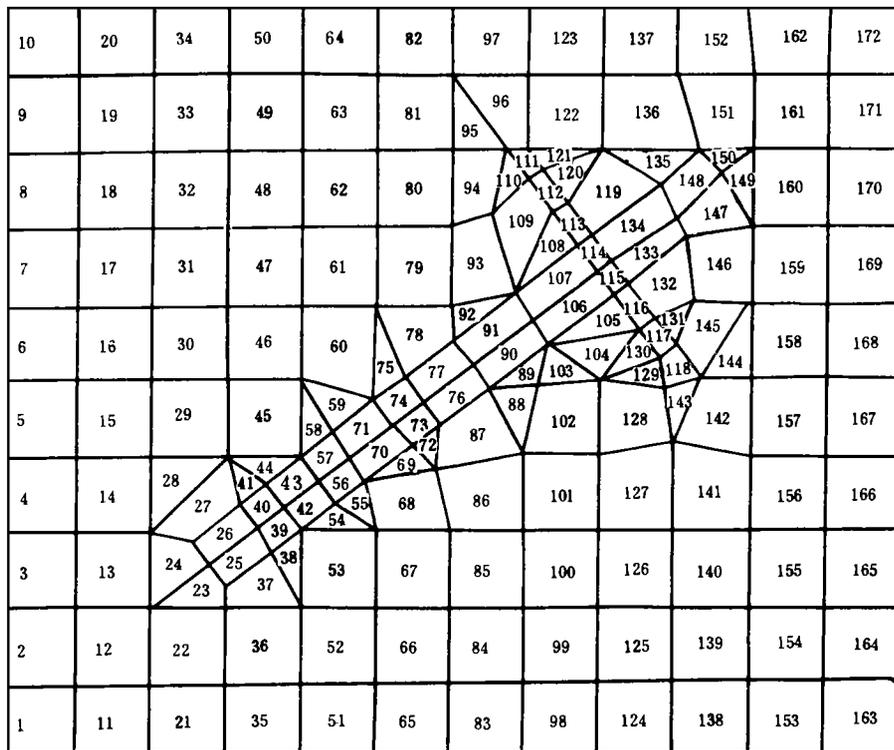


图 4 模型 1 单元编号

Fig. 4 Serial numbers of units in model 1.

展开为

$$\begin{bmatrix} K_{11}^e & K_{12}^e & \dots & K_{1,24}^e \\ K_{21}^e & K_{22}^e & \dots & K_{2,24}^e \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ K_{24,1}^e & K_{24,2}^e & \dots & K_{24,24}^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 + \Delta \delta_1 \\ \delta_2 + \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_{24} + \Delta \delta_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1^e \\ F_2^e \\ \vdots \\ F_{24}^e \end{bmatrix}$$

$K_{ij}$  ( $i=1,24; j=1,24$ ) 为单元刚度矩阵的分量

$F_j$  ( $j=1,24$ ) 为单元各节点载荷向量

上式可以改写为

$$\begin{bmatrix} F_1^e - \sum_{q=1}^{24} K_{1q} \Delta \delta q \\ F_2^e - \sum_{q=1}^{24} K_{2q} \Delta \delta q \\ \vdots \\ F_{24}^e - \sum_{q=1}^{24} K_{24q} \Delta \delta q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1^{1e} \\ F_2^{1e} \\ \vdots \\ F_{24}^{1e} \end{bmatrix}$$

该式推算结果表明,对于存在劈节点的单元可以不改变单元刚度矩阵,也不需要改变位移分量,只要修改荷载量,即可得到新的单元刚度矩阵方程

$$[K^e][\delta^e] = [F^{1e}]$$

$F^{1c}$  为修改后的荷载量。

### 3.2.2 荷载量的计算

由前所述荷载的计算可简单写为

$$F_i^{1c} = F_i^c - \sum_{q=1}^{24} K_{1q} \Delta \delta q$$

### 3.2.3 总刚度的组集和节点位移的求得

将各单元刚度矩阵(包括有劈节点的单元和无劈节点的单元)组集可得总刚度矩阵和总荷载量:

$$[K] = \sum_{c=1}^{Mc} K^c \quad [F] = \sum_{c=1}^{Mc} F^{1c}$$

其中  $\sum$  的实质就是把每个单元的贡献加到  $[K]$  和  $[F]$  的合适位置,  $Mc$  为单元总个数。

解方程组  $[K][\delta] = [F]$ , 可求出各节点位移  $\delta_i (i=1, \dots, M)$ ,  $M$  为总节点数。

### 3.2.4 单元应力的计算

求出各节点位移后可进一步计算单元应力

$$[\delta^e] = [D]^e B^e(x_i^e) (\delta^e + \Delta \delta^e) \quad [12]$$

$$\Delta \delta^e = \{ \Delta \delta_p^e \}$$

$$\Delta \delta_p^e = \begin{cases} \Delta \delta_i (X_i^e) & \text{存在劈节点的单元} \\ 0 & \text{不存在劈节点的单元} \end{cases}$$

上述劈节点技术对于不连续位移引入连续介质问题的有限元计算提出了一个简单有效的方法, 由于劈节点方法不修改刚度矩阵只修改荷载向量, 对于蠕变的断层和固定位移的断层可以无需修改刚度矩阵而进行模拟计算。这个方法被用于模拟地震过程和发震后的非弹性松弛, 并不影响粘弹松弛计算的稳定性。

### 3.3 断层破裂判定准则

Coulomb—Navie 破裂准则被广泛地应用到断层破裂的判定上, 该准则指临界剪应力依赖于作用在剪切面上的正应力, 它可以表示成各种形式的线性关系式, 最常用的表达式如下:

$$|\tau| = c_0 + \mu \sigma_n \quad (6)$$

式中  $\mu$  为内摩擦系数,  $c_0$  为岩石的内聚力,  $\sigma$  为越过弱面的正应力(约定压为正),  $|\tau|$  为抗剪强度。该式的意义是当弱面上的剪应力达到抗剪强度  $|\tau|$  时, 则在该弱面上发生剪切破裂。

本文在具体判定中采取以下方式<sup>[12]</sup>

$$\Delta S = |(c - \mu \sigma)| = |\tau| \quad (7)$$

$\Delta S = 0 \pm \alpha$  时, 此断层上该单元达到临界破坏状态。

$\Delta S \gg \alpha$  时, 安全。

$\Delta S \ll -\alpha$  时, 已超过该单元的临界强度。

## 4 计算结果及分析

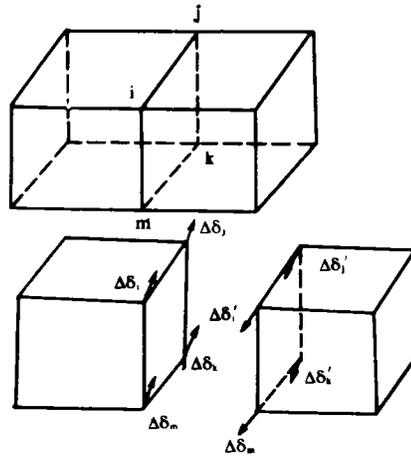


图 5 劈节点原理图

Fig. 5 Principle of cleavage nodes.

我们进行计算的目的是想搞清大震发生时深浅断层之间的相互作用,最终导致大震断层端部或离端部一定距离的横向断层致锁、孕震的可能性。为此,我们对模型 2(横向断层位于大震震源区端部)和模型 1(横向断层位于大震震源端部一定距离处)分别进行了震前、震后、深部断层发生 1 m 错动、2 m 错动这四种情况下发震断层 F3、深部断层 F1、横向断层 F2 和沿深部断层 F1 方向的上岩石圈的剪应力和正应力,垂直于横向断层的和沿横向断层的水平位移以及各单元节点的相对位移分布的计算分析。并由这些计算结果综合分析讨论了横向断层发生致锁的机理、致锁条件和致锁指标问题。下面给出计算结果并进行有关问题的讨论。

#### 4.1 大震前各断层单元的应力分布

##### 4.1.1 发震断层 F3,深部断层 F1 及调整单元剪切应力分布

在大震前发震断层 F3,深部断层 F1 和震源端部调整单元之间存在相互作用,下面分别介绍上述各断层和调整单元的应力分布,图 6 表示了计算结果。图 6a、图 6b、图 6c 中横坐标上分别给出了 0—10 km,10—20 km,20—40 km 范围内沿 F1 和 F3 断层方向上的各单元号(二者单元号相同)。纵坐标为剪应力  $\tau(\times 10^3 \text{dyne/cm}^2)$ ,曲线(1)表示未发震时上述各单元的剪应力分布。原模型设定的积累单元位置,由 42 单元至 76 单元(长 170 km,自断层端部

至横向断层距离为 100 km),从图上可以看出积累单元剪应力较高,而两端(调整单元)剪应力较低,横向断层与积累单元延伸相交位置在 115 单元处,该处剪应力也较低。这说明离震源端部距离较近的横向断层仍对发震断层起调整单元作用。在 20—40 km 范围(即 F1 断层深度范围)内,在岩石圈上层 F3 断层剪应力高值区下方,F1 断层单元的剪应力小,而其两端单元的剪应力反而大。上部积累单元对应下部较低的剪应力区,而上部调整单元对应下部较高的剪应力区。这一计算结果是合理的,因为岩石圈是整体受力的,当岩石圈上层调整单元不能承受很大应力时,就会把一部分应力转移到同层的应力积累单元上,另一部分转移到岩石圈下层,使调整单元下部岩层的剪应力值增高。调整单元正下方岩层中剪应力的增高,可产生两种后果,一种是当其应力达到岩石的剪破裂强度时,可先发生破裂错动,并加速调整运动;另一种是当积累单元发震前,调整单元下方 F1 断层首先发生剪破并对积累单元 F3 的发震起开辟作用。

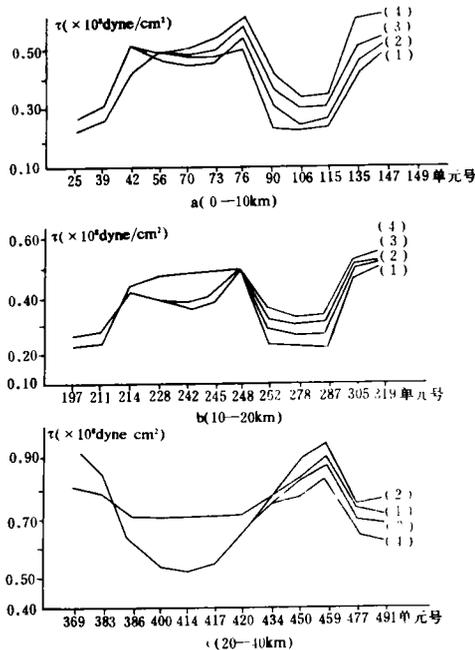


图 6 模型 1 沿发震断层方向剪应力分布曲线

Fig. 6 Distributions of shear stresses along the causative fault in model 1.

计算结果还表明模型 1 和模型 2 均在横向断层右侧,即横向断层剪应力由低值又转为高值。我们认为这是由于震前深部断层 F1 在横向断层下部剪应力已很高造成的,它相当于

一个次级力源作用到横向断层下部,使横向断层的左侧介质中具有较高的剪切应力。

### 4.1.2 横向断层剪应力分布

图 7 表示了模型 1 未发震时沿横向断层走向的剪应力分布情况(图中曲线(1)),纵坐标为剪应力  $\tau(\times 10^8 \text{dyne/cm}^2)$ ,横坐标为横向断层单元号。可以看出在 0—10 km 和 10—20 km 范围内剪应力比较小,但在横向断层中部的下方剪应力最大,向两边逐渐减小。

### 4.1.3 发震时各单元节点的错动量

本文设地震震级为 8.0,闭锁长度 170 km,单侧最大错距 4 m,发震深度 20 km,最大错动幅度单元节点在 20 km 处,断层中部单元的错动幅度最大,向两侧逐渐减小,由于发震时为快速破裂,本文在计算中采取一次错动完成。F3 断层各单元节点和深部断层 F1 各单元节点的错动量由表 2 给出。错动量(单位:cm)以劈节点位移形式加到断层面各节点上,两盘错动时错动方向相反,错动幅度大小相等。

## 4.2 震后阶段各断层单元的应力场变化

在 F3 发生大震时和大震后,由于 F3 断层巨大的错动,它将导致平行立接的深浅断层(F1 和 F3)之间和垂直立交的 F1 和 F2 断层之间发生相互作用,图 6 中的曲线(2)为剪应力计算结果。下面根据计算结果对断层之间的相互作用进行讨论。

### 4.2.1 发震断层 F3 和深部断层 F1 之间的相互作用

F1 与 F3 为同面立接的断层,由图 6 中不同深度的(2)号剪应力曲线可以看到,当 F3 发震后不仅 F3 释放了应变能,而且 F1 也随同 F3 破裂释放应变能,这说明在震时和震后 F1 与 F3 一样有类似的释放能量的行为,只是由于其介质性质偏于塑性,不利于形成地震罢了。应当指出的是,

在 0—10 km 深的 F3 断层中的剪应力比震前略有所增加,这可能是因原假定 10—20 km F3 断层各单元错动量比 0—10 km F3 断层各单元错动量大而造成的,而假定的介质参数是一样的,这样在 0—10 km 和 10—20 km 范围内,其实际积累的剪应力是一样的,错动幅度小导致应变释放不足,从而使震后 0—10 km 范围内的剪应力增加。

### 4.2.2 发震断层 F3 与其端部调整单元之间的相互作用。

图 6 中 25、39、90、106、115 单元是 0—10 km 范围内 F3 断层两端的调整单元,197、211、262、278、287 为 10—20 km 范围内 F3 断层两端的调整单元。由图 6 中的(2)号曲线可见,大震后总的来说 0—20 km 范围内与震前一样仍为低剪应力区,但在积累单元与调整单元相接的几个单元区(如 42、76、214 和 248 单元),剪切应力在震后仍维持高值。这一计算结果表

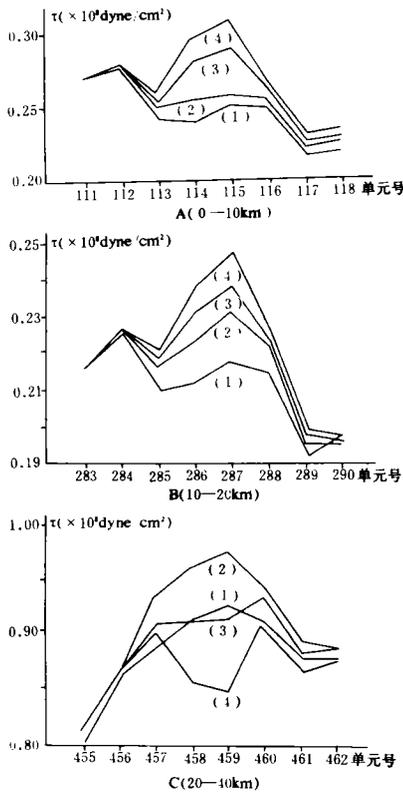


图 7 模型 1 横向断层剪应力分布曲线  
Fig. 7 Distributions of shear stresses along the transverse fault in model 1.

明调整单元在震时让位很有限,实际上在原模型中就假定发震断层中部位错量很大,然后两端减小,从而造成剪应力不能全部释放。这种情况必然导致强余震的发生。此模式的计算结果与实际地震有一定的类似性。

表 2 模型 1 大震发生时断层各单元节点错动量

Z=0		Z=-10km		Z=-20km		Z=-40km	
节点号	错动量	节点号	错动量	节点号	错动量	节点号	错动量
213	50	214	50	215	100	216	70
225	100	226	200	227	300	228	200
277	200	278	300	279	400	280	300
289	200	290	300	291	400	292	300
301	150	302	250	303	350	304	250
353	100	354	150	355	250	356	200

#### 4.2.3 震后深部断层满足破裂条件

前面我们已讨论了震后震源区下方深部断层 F1 发生破裂并释放剪应力的情况,但由图 6 可见,F1 断层两端震后剪应力仍维持高值,这种情况有利于深部断层沿 F1 断层走向继续破裂传播,下面我们用公式(7)对深部断层是否能发生传播进行判定。取  $c=1\text{Mpas}$ ,  $\mu=0.45$ ,表 3 给出模型 1 的判定情况,从表 3 看出,除 492 单元外,沿 F1 断层的各单元均达到破裂,因此深部断层可发生破裂传播。

表 3 模型 1 中 F1 断层破裂判定

单元号	正应力	剪应力	$\Delta S$	$\Delta G$
434	$0.1485 \times 10^9$	$-0.7922 \times 10^8$	$-0.5486 \times 10^7$	1
435	$0.1543 \times 10^9$	$-0.8600 \times 10^8$	$-0.9632 \times 10^7$	1
450	$0.1635 \times 10^9$	$-0.8476 \times 10^8$	$-0.9357 \times 10^7$	1
451	$0.1659 \times 10^9$	$-0.8600 \times 10^8$	$-0.9632 \times 10^7$	1
458	$0.1702 \times 10^9$	$-0.9712 \times 10^8$	$-0.1366 \times 10^8$	1
477	$0.1690 \times 10^9$	$-0.9299 \times 10^8$	$-0.1532 \times 10^8$	1
478	$0.1567 \times 10^9$	$-0.7360 \times 10^8$	$-0.9075 \times 10^8$	1
491	$0.1593 \times 10^9$	$-0.7471 \times 10^8$	$-0.9768 \times 10^8$	1
492	$0.1558 \times 10^9$	$-0.6936 \times 10^8$	$-0.2998 \times 10^8$	-1

注：正应力、剪应力、 $\Delta S$  单位均为  $\text{dyne/cm}^2$ 。

#### 4.2.4 震后横向断层的应力场变化及扭曲变形分析

##### 4.2.4.1 震后横向断层应力改变

震后横向断层单元的剪应力和正应力都发生了变化,图 6 中的曲线(2)表示了模型 1 震后横向断层剪应力的分布,从中可以看到震后横向断层立交点上剪应力的分布,也可以看出震后横向断层立交点上剪应力是增加的,在 0—10 km 范围内 113、114、115、116 单元增加特别明显,在 10—20 km 范围内剪应力增加最大的是 287 单元,其它单元的增加量都小于这个单元,在 20—40 km 范围内剪应力也表现为增加,而且剪应力增加量比较大。模型 2 震后剪应力变化特点与模型 1 类似。总的来说,大震发生后对横向断层中部单元有较大的影响,而对两侧的影响较小。

4.2.4.2 沿横向断层和垂直于横向断层的水平位移分布

图 8 表示了模型 1 发震后各单元节点相对于未发震时的位移分布(a 为发震后相对未发震时,b 为 F1 断层错动 1 m 后相对于未发震时,c 为下断层错动 2 m 后相对于未发震时;(1)为 Z=0 km 面,(2)为 Z=-10 km 面,(3)为 Z=-20 km 面,(4)为 Z=-40 km 面)。从图上可以明显看出,在横向断层垂直立交区以及附近各层均有一定的垂直于横向断层的扭

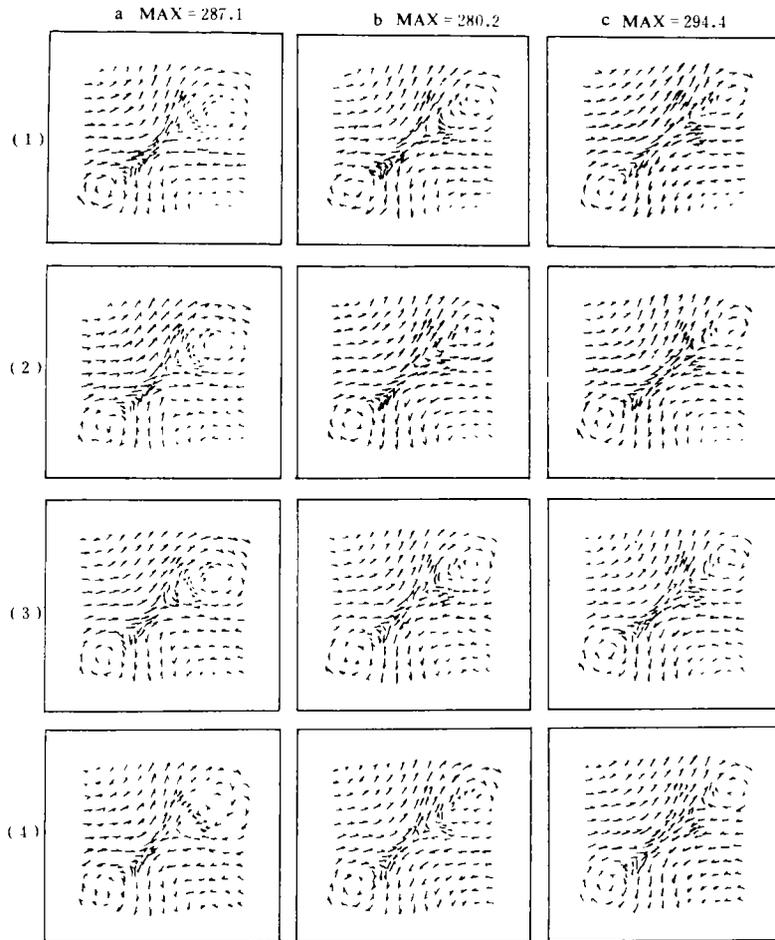


图 8 模型 1 相对位移分布

Fig. 8 Distribution of relative displacement in model 1.

曲位移。将位移差转换为沿断层方向的水平位移差分量  $U_x^j$  和垂直于断层方向的位移差分量  $U_y^j$ 。图9表示了模型1震后在  $Z = -10$  km 处横向断层节点沿断层方向的位移差  $U_x^j$  与垂直断层方向的位移差  $U_y^j$  分布。图中曲线(1)表示横向断层靠近发震断层一侧边缘的节点垂直于横向断层的位移差值。从图中可以看出中间单元相对位移不大,但位移梯度大,这说明中间单元扭曲较大,而两侧单元在426和546单元有较大的位移差值。曲线(2)表示了远离发震断层一侧的横向断层的边缘节点垂直于发震断层方向的位移分布。对比曲线(1)和曲线(2)可以看出(2)号曲线的垂直位移比(1)号曲线要小得多,说明横向断层2 km 宽度对发震断层的破裂传播有着明显衰减作用。根据文献[13]收集的大震时发生原生错动的宽度资料,8级大震的宽度可达4 km,故实际横向断层(未与发震断层直接相交)的变形幅度可能还要小,这就保证了横向断层在大震时不破裂。曲线(3)是表示靠近发震断层一侧横向断层( $Z = -10$  km)边缘节点沿横向断层的位移差  $U_x^j$  分布,由图可见沿横向断层的位移差变化比较小。模型2有类似的结果。

根据大震后垂直于横向断层的水平位移分布范围,我们可大致估计横向断层致锁的尺寸。图9中垂直于断层的位移明显范围大致在426节点到546节点之间,此断层长度为150

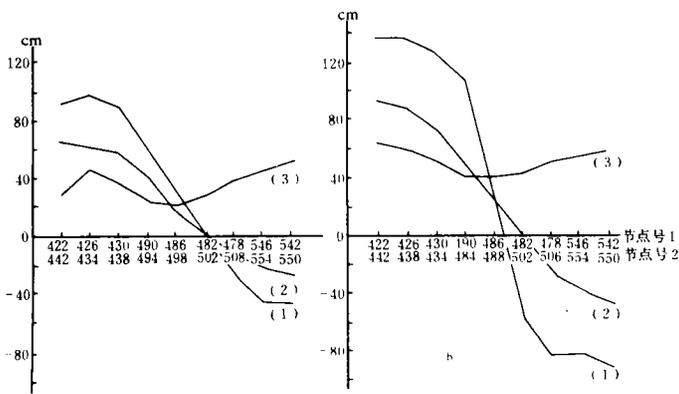


图9 模型1垂直于(1)、(2)和平行于(3)横向断层的水平位移垂直分布(节点号1指靠近发震断层侧的节点,节点号2指远离发震断层侧的节点)

Fig. 9 The vertical distribution of horizontal displacements of transverse faults perpendicular to curves (1) and (2) and parallel to curve (3) for model 1.

km。如果深部断层在震后继续运动,则横向断层的凹凸体范围继续扩大,而且其孕震的震级也将更大。

值得指出的是图9中的位移曲线在发震断层两侧具有明显的不对称性,我们认为这种不对称性是横向断层对传播压应力有利而对传递拉应力不利所造成的。虽然压缩变形很大,但实际剪应力是不大的。这是导致传播断层止裂的重要条件。当然如果横向断层间有相等的摩擦力或断层很薄不能在震时提供快速让位空间,此时传播断层有可能穿越横向断

层,横向断层不但能作为传播断层的止裂点,而且很难再孕育大震了。

综上所述,发震后横向断层有扭曲变形,而且没有被发震断层剪断,因此有一定的孕震能力。根据前面的讨论可知,横向断层震后剪应力仍为较小值,而且扭曲范围也不大,因此可认为震后横向断层不会被锁住而且即使锁住也是局部的,不会孕育大震的。要在横向断层孕育大震,单靠发震效应是不行的。其次发震对横向断层的扭曲影响也来自两个方面,其一是浅层发震断层的影响,其二是深部断层的影响,因为发震时发震断层正对的深部断层也破裂,而深部断层的破裂同样也增加了横向断层的扭曲。

#### 4.3 深部断层错动和传播对浅部横向断层扭曲变形的影响

#### 4.3.1 深部断层的破裂传播对传播方向上方单元应力分布的影响

由前所述,大地震发生后,深部断层 F1 上各单元已释放了一部分剪切能,并发生了破裂传播,由于断层端部无让位条件,加之介质的剪应力强度小于拉张强度,因此断层将继续传播,直到应力水平下降,断层传播停止。但目前我们还无法测出深部断层传播的速度,以及位移的大小,为此我们假定凡达到和超过破裂极限的 F1 断层单元以每 0.1 年 10 cm 的量级发生错动,用有限元方法计算出应力应变,然后又用公式(7)重新检测 F1 断层单元,看其是否达到和超过破裂极限,凡达到或超过破裂极限的单元再加上 10 cm/0.1 年的量级再错动,如此重复进行直到 F1 断层上单元达到安全为止,我们最后算得约 2 年 F1 断层单元基本上安全,这样我们把 2 年作为大震的后效时间,根据文献[13]的统计,大震后的动态应力场大致在 2—3 年时间,说明以上给定的计算 F1 断层破裂传播的方法是合理的。为了研究深部断层的错动对横向断层的影响,我们取 F1 断层错动量累计达到 1 m(大约震后 1 年)和错动量累计达到 2 m(大约震后 2 年)时沿 F2 断层方向上各层剪切应力分布,图 6 中曲线(3)和曲线(4)分别表示这一结果,由图可见,其剪应力分布大体与震前、震后的曲线相符,但应力值相对较高,这说明深部断层的错动幅度对岩石圈上层 F3 断层和 F2 断层的剪应力起着控制作用。此外,由图还可看出,无论是模型 1 还是模型 2,深部断层破裂单元剪应力减小(图 6c),而在破裂单元正上方单元(图 6a、图 6b)剪应力增加(0—10 km, 10—20 km 范围内),这对 0—10 km, 10—20 km 深度范围内的小震活动有较大的影响,并导致大震后往往出现沿深部断层活动的小震带。这种小震带由于垂直于横向断层,故我们称其为致锁带。它是判断横向断层致锁的指标之一。

#### 4.3.2 深部断层的破裂传播进一步改变了横向断层的应力状态

图 7 中曲线(3)、(4)表示了模型 1 在深部断层错动 100 cm、200cm 后横向断层的剪应力分布,可以看出曲线(3)、(4)都明显高于曲线(2),表 4 给出了横向断层中部单元剪应力的增值,即震后剪应力与未震时之差,深部断层错动 100 cm 后与震后剪应力之差,深部断层错动 200 cm 后与 F1 断层错动 100 cm 时剪应力之差。

表 4 模型 1 横向断层中间单元剪应力增量

单元号	113	114	115	116	286	287	288
发震后	0.009	0.014	0.014	0.009	0.011	0.012	0.008
下断层错动 100 cm	0.002	0.026	0.031	0.006	0.008	0.010	0.006
下断层错动 200 cm	0.002	0.026	0.031	0.005	0.008	0.008	0.008

注: 剪应力增量单位为  $1 \times 10^8 \text{ dyne/cm}^2$

从表中可以看出 114、115 单元由于 F1 断层的错动剪应力增加比发震时更为明显,而其它单元(116、286、287、288),F1 断层错动总效果也比发震时的影响大,此外其它横向断层单元剪应力在 F1 断层错动后也增加。

#### 4.3.3 F1 断层的破裂传播使横向断层的扭曲加剧

图 8b 和图 8c 表示了模型 1 各单元节点在 F1 断层发生 100 cm、200 cm 错动后的位移与未发震时的位移差的分布,我们只要对比一下图 8a、b、c 中对应层的矢量分布就会发现,

横向断层 F2 在 b 中的扭曲比 a 明显, c 中的扭曲比 b 明显。

同样我们将横向断层各单元的位移差分解为垂直于横向断层的分量和平行于横向断层的分量, 从图 9 中可看出 F1 断层发生 100 cm 错动后垂直于断层方向的位移分量增大, 两侧单元达到较大值, 中间单元扭曲更加明显。表 5 表示了模型 1 在 10 km 深度上靠近发震断层方向的节点的位移差的垂直分量, 由此表可以看出 F1 断层错动 100 cm、200 cm 后垂直位移量大于发震后的垂直位移量, 这种较大幅度的扭曲可导致横向断层致锁。

根据大震后垂直于横向断层的水平位移分布范围, 我们可大致估计横向断层致锁的尺度, 如根据图 9 中垂直于横向断层的位移明显范围大到在 426 节点与 546 节点之间, 此断层长度为 150 km。如果按公式(3)计算, 孕震震级为 7.8 级。

表 5 模型 1 横向断层单元节点位移差垂直分量

节点号	422	426	430	490	486	482	478	546	542
发震后	92	98	92	60	28	2	-32	-56	-57
下断层错动 100 cm	137	135	124	107	19	-62	-86	-86	-94
下断层错动 200 cm	171	178	175	134	31	-100	-118	-120	-116

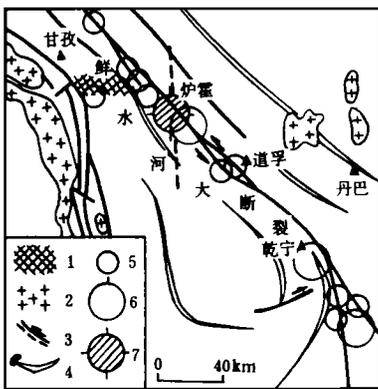


图 10 1973 年炉霍地震区构造略图

1. 近代强烈隆起地带; 2. 花岗岩; 3. 断裂;
4. 褶皱轴; 5. 历史地震震中 (M=6.0-6.9); 6. M=7.0-7.9;
7. 炉霍地震震中

Fig. 10 Structures within the Luhuo earthquake region in 1973.

#### 4.4 实际震例

1973 年 2 月 6 日炉霍 7.6 级地震极震区位于鲜水河断裂带内, 图 10 是鲜水河断裂构造图<sup>[14]</sup>, 该断裂深切地壳, 是长期继承性发展的左旋走滑断裂。1870 年巴唐发生 7.5 级地震, 虽然此震的发震断层面的走向不明, 但根据该区小震条带与发震构造相关性讨论, 我们初步认为巴唐大震的发震构造为北东向, 此小震条带是深部 F1 断层的反映, 它与北西向的炉霍发震构造带相交(图 11), 在炉霍形成垂直立交区。按照近场立交模式的观点, 巴唐地震发生时间即为鲜水河断裂带垂直立交区炉霍大震孕震开始时间, 则其孕震时间为 1870 年到 1973 年共 103 年, 按前面的公式(4)计算可得到震级为 7.6, 与实际震级 7.6 完全一致。

## 5 结论

(1) 临震前由于调整单元下部断层的剪应力水平很高, 因此深部 F1 对发震断层 F3 可能有底辟作用。

(2) 震源端部的调整单元和具有蠕滑能力的横向断层对发震断层 F3 传播有止裂作用。

(3) 由于组合模式是积累单元与调整单元的协调关系, 而且作为调整单元的横向断层不具备传递拉力的条件等, 大震时发震断层破裂传播至横向断层时, 不能使该横向断层发生闭

锁。

(4)大地震时横向断层对发震断层错动的让位主要通过垂直于和平行于横向断层的水平位移共同提供。

(5)发震断层破裂错动可导致调整单元区对应的深部 F1 断层单元首先满足破裂条件,并发生破裂传播。

(6)当深部断层 F1 作蠕滑剪切传播时,可导致浅层横向断层 F2 扭曲闭锁,计算表明由深部 F1 断层造成垂直于横向断层的水平位移比较大,因而横向断层可能被扭曲致锁。同时形成由深部断层控制的直线式小震条带。

(7)如假定发震断层发震后不再继续活动,则算得大震后深部断层破裂传播进行 2 年后停止活动,这一时段与大震后效时间 2—3 年大致相符。

(8)震时调整单元的让位能力是有限的,并造成震后震源端部余震发育。

本文是在秦保燕研究员精心指导下完成的,国家地震局地质所宋惠珍研究员在模型选取以及计算方法方面给予了热心指

导和帮助,在论文完成过程中郭增建教授给予了热心指导,在此表示衷心的感谢。

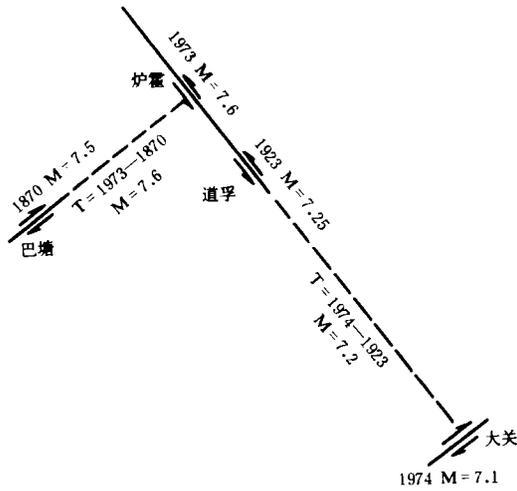


图 11 炉霍大关地震立交图

Fig. 11 Stereoscopic pattern of the Luhuo and Dagan earthquakes.

## 参考文献

- 1 秦保燕. 大震时震源断层错动对近场横向断层的致锁作用和大震预报. 《昌马地震与 7 级强震研究》, 1994
- 2 郭增建, 秦保燕, 徐文耀, 汤泉. 震源孕育模式的初步讨论. 地球物理学报, 1973
- 3 郭增建, 秦保燕. MEETING OF A PROPAGATING SHEAR FRACTURE WITH A STATIC FAULT. 西北地震学报, 1983, 5(3)
- 4 郭增建, 秦保燕. 唐山地震前的某些地震前兆. 西北地震学报, 1984, (3)
- 5 郭增建. 立交模式及其在地震预报中的应用. 西北地震学报, 1985, 7(1)
- 6 白超英, 秦保燕. 深部剪切带对浅源地震的控制——立交模式有限元的模拟计算. 西北地震学报, 1990, 12(1)
- 7 秦保燕, 等. 我国大陆活动断层锁住、解锁指标与大震预报问题的讨论. 西北地震学报, 1989, 11(增)
- 8 郭增建, 秦保燕. 地震成因和地震预报. 地震出版社, 1991
- 9 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, 1987, 9(增)
- 10 梅世蓉, 等. 唐山地震前兆机制的数值模拟. 中国地震, 1989, (2)
- 11 宋惠珍, 刘洁, 兰印刚. 位错模型有限单元公式. 西北地震学报, 1993, 15(3)
- 12 宋惠珍, 黄立人, 华祥文. 地应力场综合研究. 石油工业出版社, 1990
- 13 郭增建, 秦保燕, 李革平. 未来灾害学. 地震出版社, 1993
- 14 马宗晋, 傅征祥, 等. 中国九大地震. 地震出版社, 1982

THE FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE NEAR FIELD TRANSVERSE FAULT  
LOCKED ON ACCOUNT OF THE INTERACTION BETWEEN THE DEEP  
AND SHALLOW FAULTS DURING A STRONG EARTHQUAKE

Guo Xingquan

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB*)

**Abstract**

By using 3-D finite element method, author studied and calculated the interaction between the source fault and the deep upright fault on the same plane before, during and after a strong earthquake and the near field transverse fault which is locked because of the dislocation of the deep upright fault. The following results are obtained: (1) Before a strong earthquake occurs, the deep fault units under the adjustment units have higher shear strain level with the result that the deep fault has a diapirism at the bottom of the seismic source fault during the earthquake, namely, the deep fault units under the adjustment units first reach the fracture limit and split. (2) The adjustment units at the ends of earthquake source and transverse fault with the creeping capacity might prevent the earthquake faults from splitting. (3) A strong earthquake fault's splitting spreads to transverse fault, which could not make the transverse fault locked but may make the deep fault splitting spread. The shallow transverse fault is twisted and locked when the deep fault's splitting spreads to the bottom of the shallow transverse fault. Meanwhile, the seismometry quota concerned with the locked transverse fault appears, this quota is the very small earthquake belt which is controlled by the deep fault. (4) The resigning capacity of the adjustment units is limited during a strong earthquake, it may give rise to strong aftershocks at the ends of the source fault.

**Subject words:** Finite element analysis, Locked fault, Macroquake, Earthquake fault