

# 深部剪切形变带对浅源地震的控制—— 立交模式有限元的模拟计算

白超英 秦保燕

(国家地震局兰州地震研究所)

## 摘 要

本文在“立交模式”的基础上,用三维粘弹有限元方法计算了几个简化的地质体模型,讨论了地壳下部的蠕滑断层对浅部断层活动的影响和对浅部应力场的调整和控制过程。结果表明,深部断层的蠕滑作用可使浅部应力场增强,并使得在特定方向、特定走向的断层内的应力加速积累或松弛。据此,本文解释了地震震中沿直线的迁移问题,同时也讨论了大地震原地重复发生的力学机制。

## 一、前 言

在关于震中迁移问题的研究中,人们发现,地震除了沿构造带迁移外,还出现了短期、长距离、跨越不同地质构造单元的直线迁移现象。这种直线型震中迁移的力学机制是什么,这是需要进行研究的。另外,对古地震的研究表明,历史上曾出现过多次大地震在原地重复发生的现象。一般认为,岩石圈上部存在的某些断层,经历了长期地质构造活动的影响,断层面上或多或少都存在有一定厚度的断层泥,也就是说经过多次构造运动(其中也包括地震),断面上的凹凸不平早已被错平了。这样断层要重新被锁住,并积累起很大的能量看来是很困难的。那么,造成大地震原地重复发生的原因是什么?为了解释上述两个问题,郭增建提出了“立交模式”的观点<sup>[1]</sup>。本文在这一模式的基础上,用三维粘弹有限元方法定量计算了岩石圈下部蠕滑断层的活动对地壳浅部应力场分布的影响,讨论了这种深部断层的蠕滑对浅部应力场的调整和控制过程,定量计算了与深部蠕滑断层立交的、不同走向的浅部断层内应力积累或松弛的问题,并讨论了大地震原地重复发生的可能机制。

## 二、模型及边界条件的选取

在选取地质体模型时主要考虑了以下三点。

(1) 将岩石圈按其力学性质自上而下分为脆性、弹塑性和塑性三层。

(2) 确定模型时不考虑重力的影响。这是由于我们求解的是三维线性问题,并假定各层中断层周围的介质是均匀和各向同性的。

\*地震联合基金资助项目。白超英为兰州地震研究所1988年硕士研究生,现在新疆维吾尔自治区地震局工作。  
本文为其硕士学位论文。

(3) 由于我国华北地区及大陆部分地区普遍存在低速层, 我们在选取模型时考虑了低速层的影响。

根据以上原则, 我们选取了三个简化的地质体模型。

### 1. 模型 I (层状均匀模型)

该模型长和宽均为250km, 高为73km, 共分4层。由上而下按脆性层、低速层、弹塑性层及塑性层的分层原则选取各层参数。各层的厚度及参数见表1。其中E为弹性模量,  $\nu$ 为泊松比,  $\eta$ 为粘滞系数。第4层厚40km, 计算时在中间设置了假想层。

表1 模型 I 各层参数

层数 \ 参数	厚度 (km)	E (达因/厘米 <sup>2</sup> )	$\eta$ (泊)	$\nu$
第一层	10	$7.5 \times 10^{11}$	$5.0 \times 10^{20}$	0.25
第二层	3	$1.5 \times 10^{11}$	$5.0 \times 10^{22}$	0.30
第三层	20	$5.0 \times 10^{11}$	$1.0 \times 10^{23}$	0.35
第四层上部	20	$2.0 \times 10^{11}$	$5.0 \times 10^{22}$	0.38
第四层下部	20	$2.0 \times 10^{11}$	$5.0 \times 10^{22}$	0.38

### 2. 模型 II (正交断层模型)

由“立交模式”的观点可知, 地壳下部近于塑性的介质层内所产生的剪切蠕滑带的走向与区域应力场最大主应力轴的方向成 $45^\circ$ 角<sup>[1, 2]</sup>, 因而可将其蠕滑作用等价于沿地壳底部北东向的剪切位移输入。基于上述考虑, 且为了简化计算, 将此模型分为三层, 相当于模型 I 的前三层, 模型长和宽均为250km, 高33km。模型内有两条呈正交的断层, 它们的宽为3km, 长约150km。其中一条断层走向NE, 与底部所加剪切位移走向平行, 另一条断层走向NW与底部所加剪切带走向垂直立交。NE向的为主滑断层, 而NW向的为扭曲断层。各层及断层内的介质参数选取如表2所示。

表2 模型 II 各层参数

层数 \ 参数	厚度 (km)	E (达因/厘米 <sup>2</sup> )	$\eta$ (泊)	$\nu$
第一层	10	$7.5 \times 10^{11}$	$5.0 \times 10^{20}$	0.25
第一层断层内	10	$1.0 \times 10^{11}$	$1.0 \times 10^{23}$	0.30
第二层	3	$1.5 \times 10^{11}$	$5.0 \times 10^{23}$	0.35
第三层	20	$5.0 \times 10^{11}$	$1.0 \times 10^{23}$	0.35
第三层断层内	20	$7.5 \times 10^{11}$	$7.5 \times 10^{21}$	0.38

### 3. 模型 III (迁移模型)

为了讨论应力沿直线的迁移, 同时讨论立交构造夹角不同时, 其内应力的积累情况, 我们选择了一个二层地质体模型, 其长和宽均为1000km, 高为45km。模型中未考虑低速层的影响。在上层中有4条走向不同的断层, 分别记作断层 I、II、III、IV, 它们与北东方

向的夹角分别为 $10^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 和 $90^\circ$ ，长度分别为130km、120km、130km和140km，宽均为4 km。各层及断层内介质参数选取见表3。

表3 模型Ⅱ各层参数

层数 \ 参数	厚度 (km)	E (达因/厘米 <sup>2</sup> )	$\eta$ (泊)	$\nu$
第一层	10	$7.5 \times 10^{11}$	$5.0 \times 10^{20}$	0.25
第一层断层内	10	$1.0 \times 10^{11}$	$1.0 \times 10^{23}$	0.30
第二层	35	$5.0 \times 10^{11}$	$1.0 \times 10^{23}$	0.35

### 三、计算结果及分析

#### 1. 应力自下而上的放大作用

我们在模型 I 的东西两面上施加均匀压应力，其值为 $0.2 \times 10^9$ 达因/厘米<sup>2</sup>，加力方式是将面力换算成节点力输入。为了防止产生刚体位移和旋转，顶部四个角点加了位移为零的约束，即图 1 中的 1、31、181和211号节点。

在地壳内，随深度的增加，围压也随之增大，但在30km左右岩石强度反而减小，因此在板块边界力源的作用下，地壳下部近于塑性的介质层内就有可能首先产生塑性流动，从而影响其上部地壳中的应力场分布。另一方面，由于地幔对流体单元各部位运动速度不同，即受阻程度差异较大，就有可能在两块体之间产生不同程度的蠕滑或者说相对运动。为了模拟

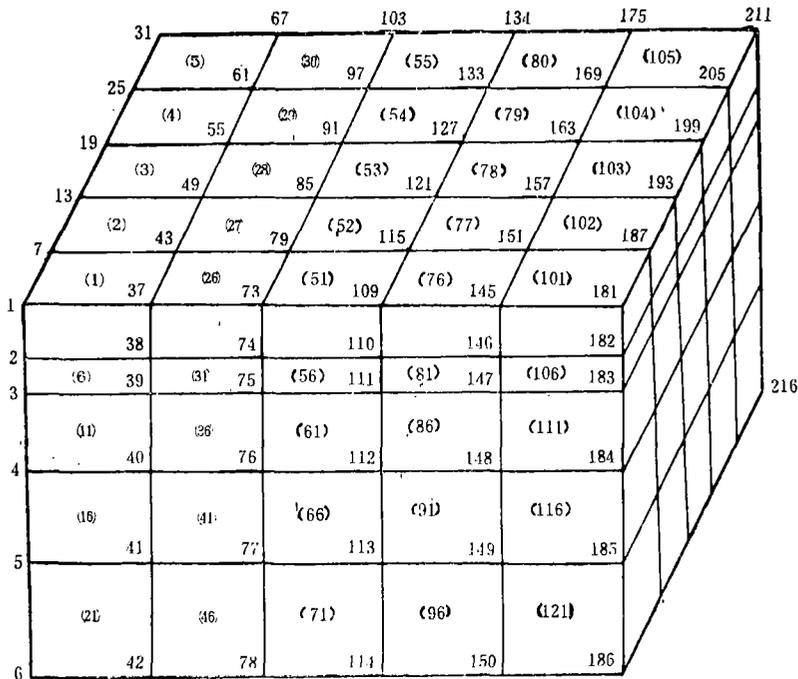


图1 模型 I 网格化示意图

Fig. 1 Dividing elements of the Model I

上述作用的效果,并考虑到塑性层滑移线的特点〔2〕,我们在模型底部沿与东西向加力方向成 $45^\circ$ 角的直线两边加了右旋剪切位移,为了与地表形变资料一致(形变量级为 $10^{-6}$ ),所加剪切位移为厘米量级。我们连续计算了 $T = 0, 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 5.5, 7.5, 9.5$ 和 $11.5$ 年,共九个结果。

为了说明应力自下而上的放大作用,我们求取了模型 I 中各层内单元的差应力 $c$ 、最大剪应力 $\tau_{max}$ 和最大剪应变 $\gamma_{max}$ 的平均值。将第四层内的平均值作为起始值,扣除了边界条件的影响,结果如下(其中下脚标零的是底部没加剪切位移时的平均值,不标零的是底部加剪切位移时的平均值):

第一层	第二层	第三层	第四层
$2.61\bar{C}_0$	$0.58\bar{C}_0$	$2.08\bar{C}_0$	$\bar{C}_0$
$3.32\bar{C}$	$0.77\bar{C}$	$2.18\bar{C}$	$\bar{C}$
$8.59\bar{\tau}_{0max}$	$1.27\bar{\tau}_{0max}$	$3.29\bar{\tau}_{max}$	$\bar{\tau}_{0max}$
$10.90\bar{\tau}_{max}$	$1.82\bar{\tau}_{max}$	$3.39\bar{\tau}_{0max}$	$\bar{\tau}_{max}$
$2.58\bar{\gamma}_{0max}$	$1.98\bar{\gamma}_{0max}$	$1.61\bar{\gamma}_{0max}$	$\bar{\gamma}_{0max}$
$2.62\bar{\gamma}_{max}$	$2.25\bar{\gamma}_{max}$	$1.52\bar{\gamma}_{max}$	$\bar{\gamma}_{max}$

从上述结果可以看出,在底部无剪切位移作用时,除低速层(第二层)外,其余各层内差应力和最大剪应力的平均值自下而上增大。第一层与第三层内差应力的比值为1.25,最大剪应力的比值为2.6。当底部有剪切位移作用时,第四层及第三层内差应力和最大剪应力值基本保持不变。但第一层与第三层内差应力的比值由底部无剪切作用时的1.25增加到1.52,最大剪应力比值由2.6增加到3.2。这说明了底部所加的剪切位移作用能够通过低速层(这一层相对于其上、下层,介质较软)传递到其上层介质中去,使上层介质内应力水平增高,起到了应力放大的作用。这相当于底部剪切作用通过层间耦合,使上层介质内迭加了一个附加应力场,它可以改变原来应力场的大小和方向。这与 M.H.P. Bott 等人的观点相符〔3〕,即地壳浅部产生大应力的一个重要原因是岩石层蠕变引起的应力放大。这种放大作用说明了深部蠕滑作用对浅部应力场的影响。

## 2. 浅部各层内剪切应变带的形成

根据“立交模式”的观点,当模型 I 只受东西向压应力作用,或所受东西向压应力远大于南北向压应力时,其内可形成一对配套的剪切应变带。当在模型底部加剪切位移时,所加的剪切位移通过层间耦合而传递到地壳浅部,使其内形成明显的剪切应变条带,图 2 给出了 $T = 0$ 时各层节点平面的位移矢量图。从图中可以看出,各层内剪切应变带的优势方向与东西方向(构造力源)的夹角自上而下均为 $45^\circ$ ,即剪切应变带的位置和方向在自下而上传递过程中不发生畸变。然而每一个节点的剪切应变自下而上有明显畸变。为了进一步说明这个问题,我们对各层节点位移矢量与东西方向的夹角( $\theta$ 角)进行了统计,统计中扣除了边界附近的部分节点的影响,然后对各层分别进行平均,我们得到自下而上各层内不同位置总的剪切应变方向与东西方向的夹角分别为 $31^\circ.6$ 、 $32^\circ.6$ 、 $34^\circ.1$ 和 $36^\circ.7$ 。这种剪切应变方向的畸变,我们认为是模型太小引起的边界效应。如果改善模型的尺度,就可改善这种情况。

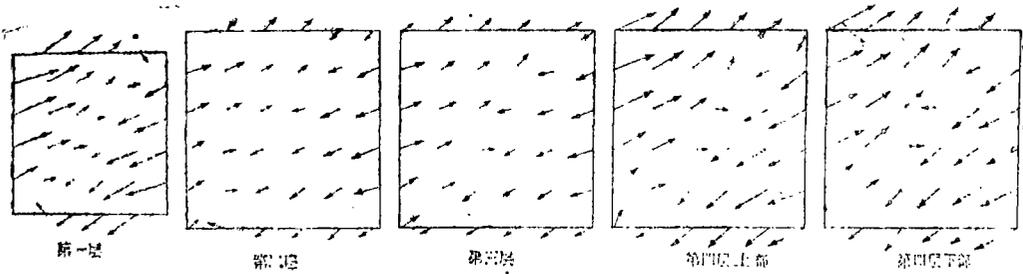


图 2 模型 I 各层节点平面位移矢量图 (T = 0)

Fig. 2 The node displacement vector of every layer in the Model I (T = 0)

### 3. 大地震原地重复问题

根据“立交模式”的观点, 我们讨论深部蠕滑方向与浅部断层走向正交时的情况, 见图 3。图中共有 384 个节点, 315 个单元。顶层 4 个角点仍加了位移为零的约束。在模型 I 的东西两面施加了压应力, 其量值同模型 I。在底部北东向断层上加了右旋剪切位移, 连续计算了 T = 0、0.5、1.5、2.5、3.5、5.5、7.5、9.5、11.5 年, 共 9 个结果。图 4 给出了模型 I 中第一层上、下平面内节点的位移矢量图, 从图中可以看出, 随距北西向断层距离的减小, 北西向断层扭曲程度加剧, 即在两断层相交的部位扭曲程度最大, 同时扭曲程度越大的单元, 其内压应力越大, 差应力、差应变水平也越高 (见图 5)。这种扭曲现象可用来解释大地震原地重复发生的现象。对于一个已经发生过地震的断层来说, 其断层面内较为破碎, 要重新闭锁, 再度积累起很大的能量是不可能的。但如果该断层在深部的蠕滑作用下发生了扭曲, 那么, 该断层面上摩擦强度将会增强, 就有可能被重新锁住, 进入应力积累状态, 随后在有利的力源作用下, 就可再度发震。

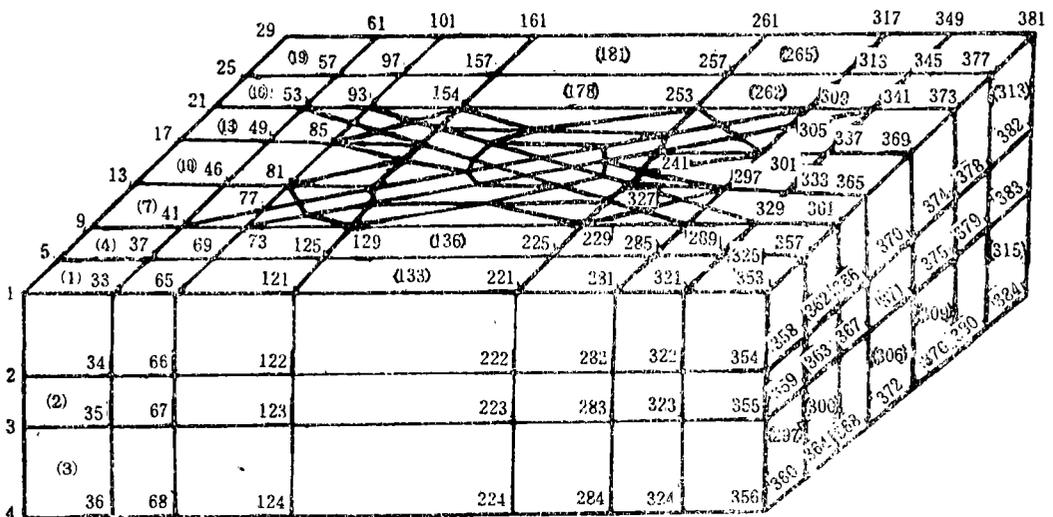


图 3 模型 I 网格化示意图

Fig. 3 Dividing elements of the Model I

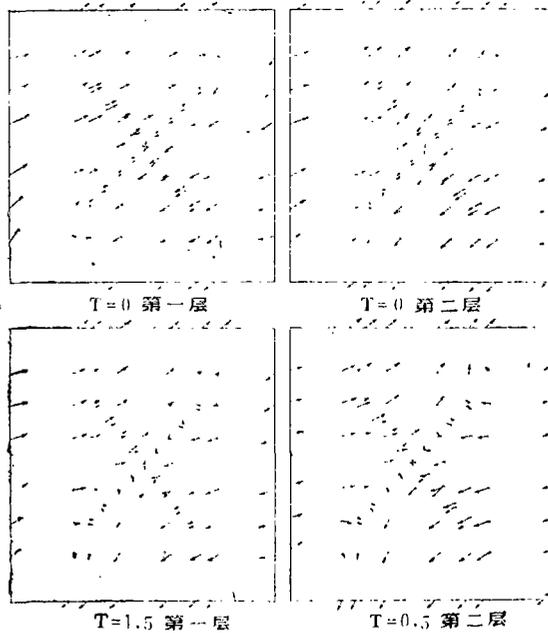


图4 模型Ⅱ第一层上、下平面内节点的位移矢量图  
Fig. 4 The node displacement vector in up and down surface of the first layer of the Model II

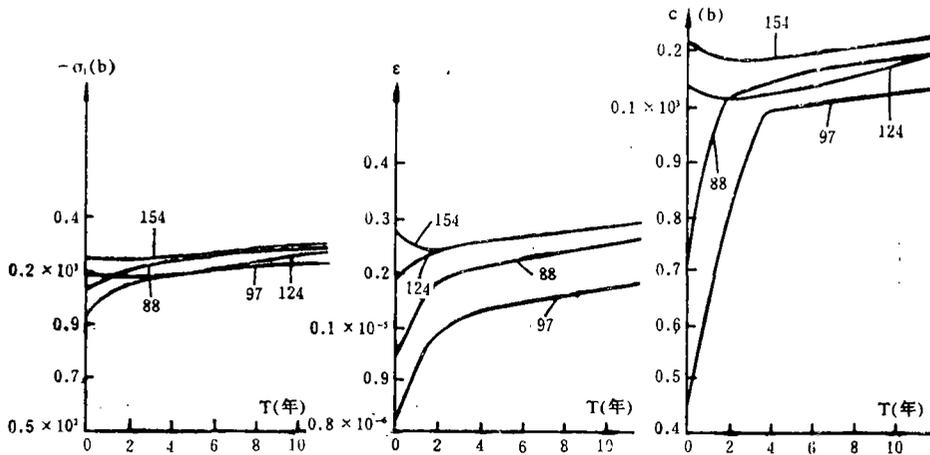


图5 北西向断层各单元内最大主应力 $\sigma_1$ 、差应力 $c$ 及差应变 $\epsilon$ 随时间的变化曲线  
Fig. 5 Changing curve of  $\sigma_1$ ,  $\epsilon$  and  $c$  with time in every element of NW fault

#### 4. 应力沿直线的迁移

##### (1) 浅部不同走向断层内应力的积累

图6为模型Ⅲ的网格化平面示意图，共计705个节点，586个单元。沿东西向所加压应力值同模型Ⅰ，底部两侧沿北东向加了右旋加速剪切位移，为了与实际资料接近，这种加速剪切位移以每年毫米的量级递增。作为背景应力场，初始时刻( $T=0$ )底部未加剪切位移。共计算了11个结果，即：(1)  $T=0$ ，位移为0；(2)  $T=0.5$ 年，位移为1.0cm；

(3)  $T = 1$  年, 位移为 1.1cm; (4)  $T = 2$  年, 位移为 1.2cm; (5)  $T = 3$  年, 位移为 1.3cm; (6)  $T = 5$  年, 位移为 1.5cm; (7)  $T = 7$  年, 位移为 1.7cm; (8)  $T = 10$  年, 位移为 2.0cm; (9)  $T = 15$  年, 位移为 2.5cm; (10)  $T = 20$  年, 位移为 3.0cm; (11)  $T = 30$  年, 位移为 4.0cm。

图 7 给出了模型 III 中 4 条断层各单元内的最大主应力  $\sigma_1$ 、差应力  $c$  和剪应力  $\tau_x$  随时间的变化曲线。图 8 给出了几个位移场的分布 ( $T = 0$ 、10、20 年)。从初始时刻开始的一个较小的时段内, 在 4 条不同走向的立交断层内应力都是积累的, 但积累的速率不同, 见表 4。

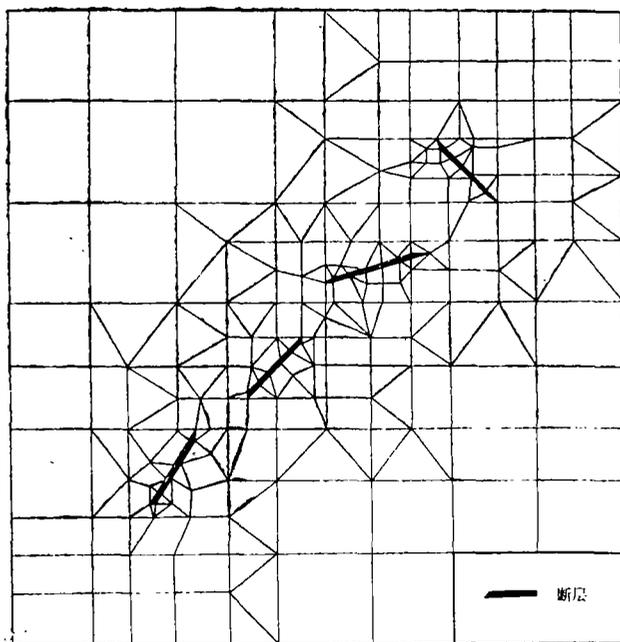


图 6 模型 III 网格化平面示意图

Fig. 6 Dividing elements of the Model III (plane diagram)

根据“立交模式”的观点, 模型 III 中前三条断层属主滑断层, 3 条断层与剪切应变带的优势走向的夹角从小到大依次为断层 III、断层 I 和断层 II, 表 4 中各断层内应力的积累速率也是符合这种排列的, 说明立交断层夹角越小, 其内应力积累的速率也越大, 即立交构造夹角越小的断层越易受深部蠕滑断层的影响。模型 III 中第 4 条断层为扭曲断层, 与重复发性地震成因的讨论相符, 其内应力也是不断积累的。从图 7 中可看出, 随着时间的变化, 断层 I、III 内应力发生松弛, 从图 8 中的位移场分布中可看出, 断层 III 与 IV 之间的区域, 在断层 III 的上盘产生了一相对引张区, 所以其内压应力减小, 应力松弛也是显然的。另外由于断层 I 靠边界太近, 同时南、北边界又无约束, 因而在其下盘也产生了一相对引张区。但如果我们选取合适的模型, 这种情况是可以避免的。

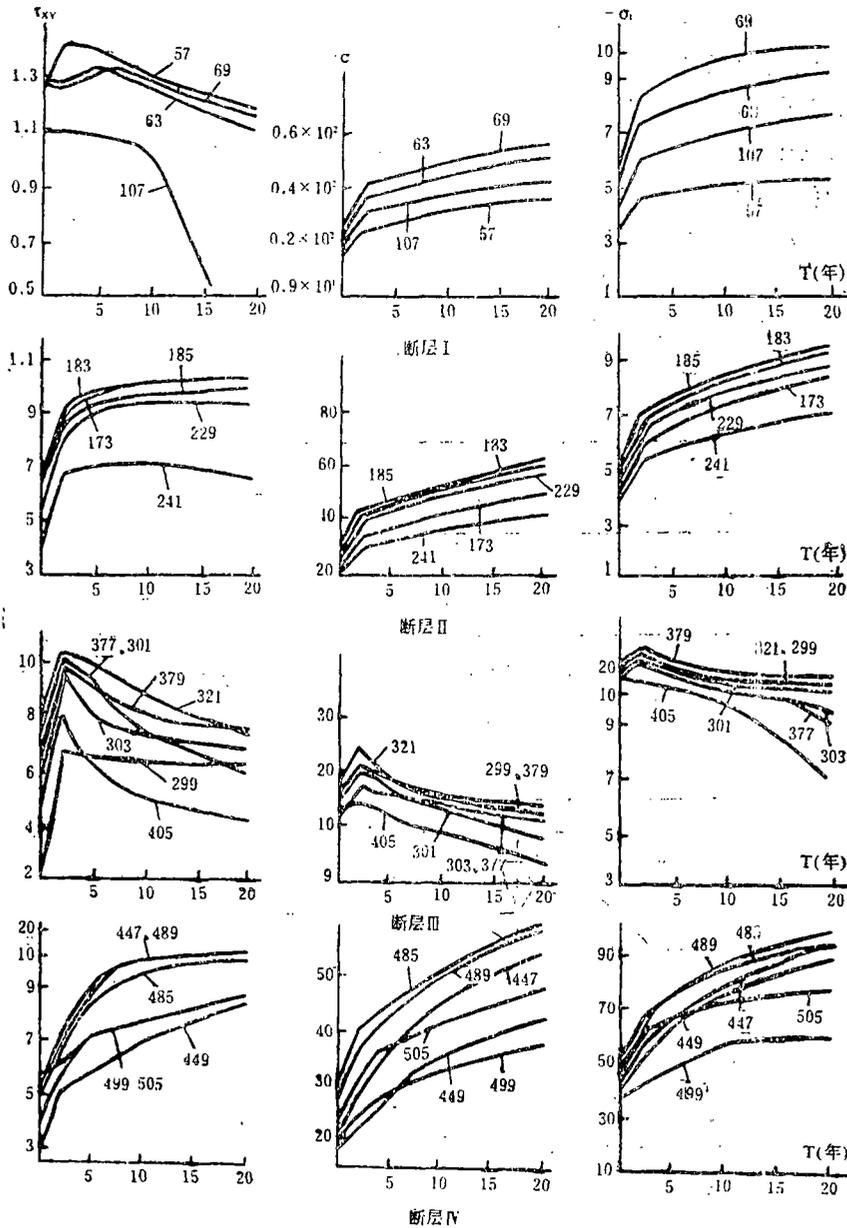


图7 模型Ⅱ各断层单元内 $\sigma_1$ 、 $\varepsilon$ 和 $\tau_{xy}$ 随时间的变化曲线  
 Fig.7 Changing curve of  $\sigma_1$ ,  $\varepsilon$  and  $\tau_{xy}$  with time in every fault's element of the Model Ⅱ

### (2) 深部蠕滑作用对浅部应力场的调整

图9给出了几个不同时间浅层介质内各单元的差应力的分布。从图中可以明显地看出，在初始时刻( $T=0$ )，底部无剪切位移作用时，应力场分布为块状(对高值应力而言)。当底部加剪切位移后，应力场的高值区向底部所加的剪切位移方向调整，并且这种高值区向深部蠕滑线方向集结，应力场高值区由块状分布变成条带状分布( $T=2$ 年时的结果)。在这个过程中，断层端部首先达到应力高值(如 $T=2$ 年的结果)，随后应力又从断层端部向断层中部传递，使中部应力水平增高，而端部的应力则相对变小，起到了调整单元的作用(如 $T=30$ 年的结果)。同时随着时间的增长，这种条带状高值应力分布的强度逐渐增强。

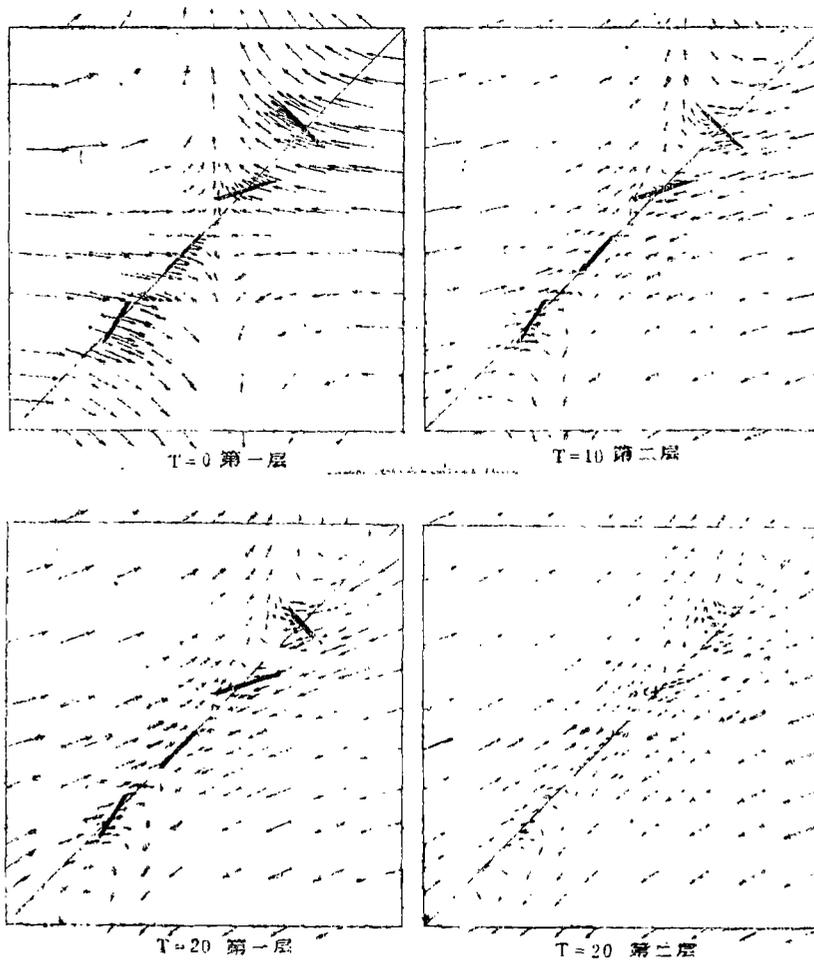


图8 模型Ⅲ中第一、二层平面节点位移矢量图  
Fig.8 The node displacement vector of the first and the second layers surface in the Model Ⅲ

表4 模型Ⅲ各断层内应力积累速率

断 层	I	II	III	IV
积累速率	0.02巴/年	0.06巴/年	0.1巴/年	0.067巴/年

从以上分析中可看出，深部的蠕滑对浅部应力场有一调整和控制过程，它使得浅部应力在特定方向上（深部滑移线方向）集中，在特定走向的断层内（主滑、次主滑和扭曲断层内）积累。说明深部的蠕滑作用对浅源地震有重要的控制作用。

(3) 应力沿直线的迁移

由以上讨论可知，在深部的蠕滑作用下，浅部不同走向的立交断层内应力的积累速率是不同的，因此将发生应力沿该深部蠕滑线方向的迁移。模型Ⅲ的计算结果表明，其内应力是由北东向南西方向迁移的。在此模型中，断层的体积为  $4 - 7 \times 10^{18} \text{cm}^3$ ，大体上相当于6—7级地震的震源体积。如果取6级地震所释放的能量为  $6.31 \times 10^{20}$  尔格，7级地震所释放的能量为  $0.2 \times 10^{23}$  尔格，按表4的应力积累速率计算，各断层内积累起相当于6~7级地

震的能量所需的时间见表5。如果各断层破裂发震，那么对于6级地震，其震中沿直线的迁移应以月计算，而对于7级地震的迁移则是以年计算。这样断层Ⅲ首先发震，然后依次为断层Ⅱ、Ⅰ。震中迁移方向也是由北东向南西。断层Ⅳ是否发震主要取决于深部的加速蠕滑作用，也就是取决于这种扭曲断层能否被解锁。

表5

震级 积累时间	断层	
	Ⅰ	Ⅳ
6级 ( $6.31 \times 10^{20}$ 尔格)	380天	264天
7级 ( $0.2 \times 10^{23}$ 尔格)	325年	24年

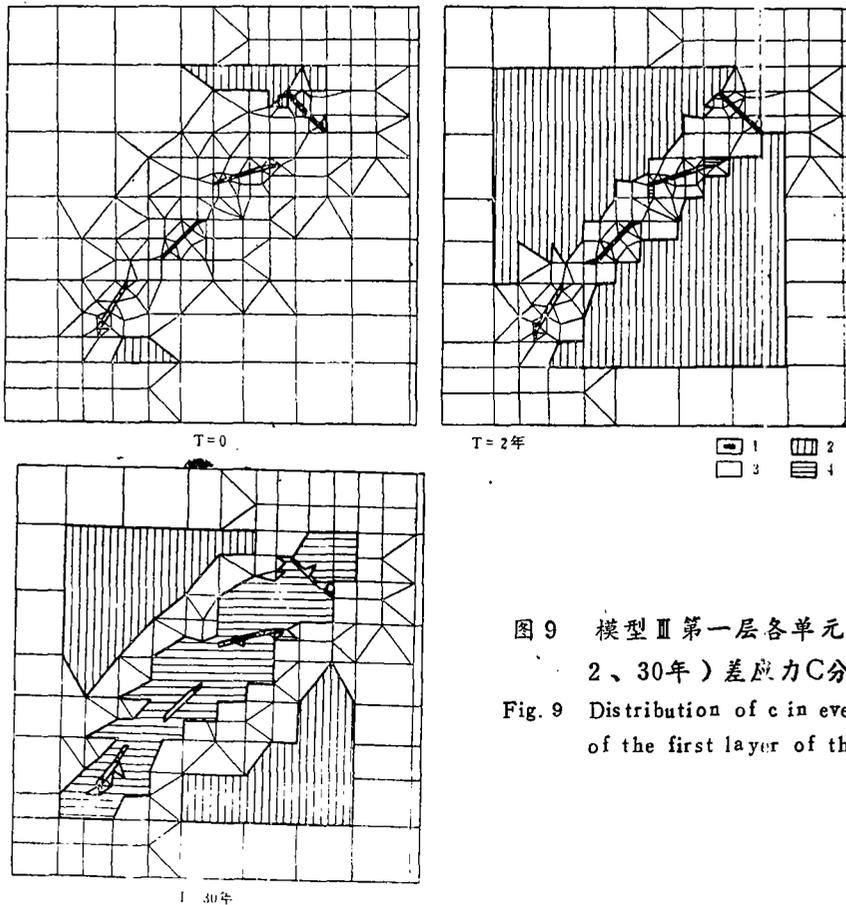


图9 模型Ⅱ第一层各单元(T=0、2、30年)差应力C分布图  
Fig.9 Distribution of c in every element of the first layer of the Model II

#### 四、结 论

根据上述对计算结果的讨论，可以得出以下几点结论：

1. 深部的蠕滑作用可以通过低速层而传递到地壳浅部，从而影响浅部应力场的分布，使浅部应力水平增强。
2. 深部蠕滑带运动时可致使与之垂直立交的浅部活动断层产生扭曲而锁住，同时可触发

其蠕滑投影线方向上快临近发震的震源发震, 从而造成短时间、长距离的直线式的震中迁移。这就是深部剪切蠕滑带对浅部地震的控震作用。

3. 深部剪切蠕滑带的位置和方向通过层间耦合向上传递过程中不发生畸变, 因此由它对浅部临近发震的震源的控制作用所导致的短时、长距离和直线式的震中迁移可反推岩石圈下层内实际存在的剪切蠕滑带位置和方向。

4. 当浅部断层与深部剪切蠕滑带立交时, 该具有孕震条件和发震条件的浅部断层或蠕滑断层其应变积累和松弛速率均比较高。从而深部剪切蠕滑断层的运动对浅部发震断层起有触发作用, 而对浅部蠕滑断层起到加速调整的作用。

5. 断层端部的应力调整单元将应力传递给断层中部, 使中部应力增强。这是浅源大震的另一个控震条件。

本文是在秦保燕导师的指导下完成的, 郭增建导师审阅了全文, 并提出了宝贵的意见。在计算及模型的选取中得到了国家地震局地质研究所宋惠珍老师的热情指导和帮助。在计算过程中还得到了国家地震局地质研究所孔祥红同志的帮助, 在此一并表示感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] 郭增建等, 由“立交模式”讨论地震预报, 西北地震学报, Vol. 7, No. 2, 1985.
- [2] 郭增建、秦保燕, 唐山地震前的某些前兆(英文稿), 西北地震学报, Vol. 6, No. 3, 1984.
- [4] M. H. P. Bott等, 岩石层构造应力起源, 世界地震译丛, No. 3, 1986.
- [5] Kasahara, K., Migration of crustal deformation, Tectono-Physics, Vol. 52, No. 4, 1978.
- [5] 冯德益, 地震活动波的研究(综述), 世界地震译丛, No. 2, 1986.
- [6] 郭增建等, 地震迁移问题(综述), 国际地震动态, No. 2, 1982.
- [7] 秦保燕等, 倍九日震中迁移的时空特征以及在地震预报中的应用, 西北地震学报, 增刊, 1985.
- [8] 宋惠珍等, 海城地震后对辽宁半岛断层应力场的研究, 地震地质, Vol. 8, No. 4, 1986.
- [9] 汪素云等, 中国及邻区现代构造应力场的数值模拟, 地球物理学报, Vol. 23, No. 3, 1980.

## CONTROLLING OF DEEP SHEAR DEFORMATION BELT TO SHALLOW EARTHQUAKE—FINITE ELEMENT SIMULATING CALCULATION ON “STEREOSCOPIC MODEL”

Bai Chaoying, Qin Baoyan

(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou, China)

#### Abstract

Based on the “stereoscopic model”, we computed a few simplified geological models using 3-D viscoelastic finite element method in this paper, discussed the effect of deep creep fault on shallow fault activity in crust and the process of controlled and adjusted shallow stress field by the deep fault. The results show that the stress field in shallow can be increased and the stress accumulation or slack can be accelerated in fixed direction and fixed trend fault by creeping function of deep. Based on above, we explained the migration problem of seismic epicentre along a straight line and discussed the mechanism of repeat occurrence of large earthquakes.