

地震活跃期和平静期的模型研究^{*}

黄忠贤

(中国北京 100085 国家地震局地壳应力研究所)

摘要 利用有限元模型模拟一条走滑断层上强震重复发生的过程. 在模型中引入断层阀机制以考虑流体孔隙压力变化的作用. 用 5 个参数来表征断层的流变、孔隙压变化及破裂准则等基本特性. 通过系统地改变这些参数对大量模型进行计算, 初步探讨了地震活动的平静期—活跃期现象与模型参数和加载方式之间的关系. 在常速率边界位移载荷作用下, 处于中等应力和孔隙压状态下的模型表现出有规律的平静—活跃现象, 其周期长度为地震原地复发周期的 $1/3 \sim 1$. 当模型处于高应力或高孔隙压状态时, 平静—活跃现象变得无规律或不明显. 在周期性变化的边界力作用下, 当力变化幅度达到一定程度时, 模型地震活动性表现出与外力变化周期相同的平静—活跃现象.

主题词 地震模型 有限元 平静期 活跃期

引言

中国大陆 1 000 多年的地震记录表明, 一个构造单元内地震的发生, 往往集中在一个时间段内, 随着出现一个地震活动较少的时期, 通常称为地震的活跃期和平静期. 这种地震活跃期和平静期交替出现的现象, 在世界上其它地震带上也有 (Ambraseys, Barazangi, 1989). 对于地震活跃期规律性的认识, 对正确估计地震的长趋势危险性及有效地布置地震短临监测工作是很有用的. 由于地震记录的历史很短, 古地震研究的资料少而零散, 我们目前对于地震活跃期和平静期的认识是非常有限的, 而且这种实际观测资料不足的情况不可能在短时期内得到解决. 因此, 根据一定的物理定律建立地震发生模型, 从而产生长时间的模拟地震序列, 成为研究地震活动规律的一种重要补充手段. 张国民等 (1993) 利用滑块模型研究了中国大陆强震轮回活动的规律. 本文中我们利用一个包含断裂的有限元模型, 模拟一条走滑断裂带上重复发生的强震, 对地震活动活跃—平静现象的产生、形态及其与构造载荷方式和模型力学参数之间的关系作了初步探讨.

1 地震模型

我们采用有限元模型以便较真实地模拟由断层滑动引起的应力变化. 图 1 所示的二维模型代表一个长 760 km、宽 480 km 的水平地块, 包含一条长度为 677 km、贯穿整个模型的走滑断层, 与构造载荷方向 (边界位移或边界作用力方向) 成 45° 交角. 断层被 25 对断层

^{*} 地震科学联合基金资助项目.
1995-06-19 收到初稿, 1995-10-09 收到修改稿并决定采用.

结点分成均等的段落. 模型不考虑沿深度方向的参数变化, 厚度为 10 km, 代表从 5~15 km 地壳中的地震层. 地震破裂贯穿整个模型的厚度, 因此我们模拟的最小震级大约是 6.5 左右. 模型材料的杨氏模量和泊松比分别取为 80 GPa 和 0.25, 静岩压力和静水压力均取 10 km 深度的值, 分别为 300 和 100 MPa. 中地壳发震层与粘弹性的下地壳之间的耦合作用, 对于大地震之后余震序列的产生, 及对于大震后较短时期内应力传递的方式有重要影响. 我们的模型没有考虑这种耦合作用, 可以认为, 我们所论述的大震是包括主要余震在内的一次地震过程. 当与余震过程有关的时间常数远小于大地震原地复发周期时, 这种简化对于我们所研究的大震规律影响不大.

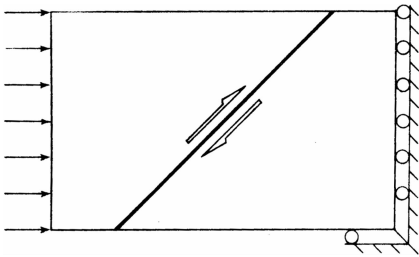


图 1 计算模型示意图. 模型中粗黑线为断层, 箭头表示相对滑动方向

断层带中孔隙流体压力的变化在地震孕育发生的过程中起着重要的作用. 我们在模型中引入了控制流体作用的断层阀机制(Sibson, 1990). 在两次地震之间, 断层带内的流体通道可能由于沉积作用或其它机制被有效地阻断(Blanpied 等, 1992; Byerlee, 1990), 封闭在断层带中的孔隙流体压力随时间逐渐升高, 大大降低有效围压, 直至地震发生. 地震破裂使流体通道开通, 孔隙体积恢复, 因此, 断层带中的流体压力迅速降低到静水压. 这种过程随着地震的重复而不断重复发生, 解决了断层上剪切力不足以克服由于巨大围压造成的摩擦力这一难题. 虽然地下流体在地震过程中的重要作用为很多人所承认, 但迄今为止, 我们对于地下流体压力变化的确切机制及控制因素了解得还是很少, 这可能是目前地震模型研究几乎都不包括流体压力变化这个重要因素的原因. 在我们的研究中采用了 Sleep 和 Blanpied(1992)的蠕变压实理论, 断层上的剪切蠕变造成孔隙体积减小, 因而孔隙压力增大直至发生破裂. 根据他们的研究结果, 我们用一个简单的指数关系将蠕变量和孔隙压力的变化联系起来.

断层的力学性质由 5 个参数来表示. 参数 A 表示在两次地震事件之间断层在剪应力 τ 作用下产生无震蠕滑的能力. 在一个时间步长 Δt 内, 断层的滑动增量 Δd 为

$$\Delta d = A\tau \cdot \Delta t$$

参数 A 正比于断层带的宽度而反比于断层材料的粘滞系数(为了计算方便, 我们用 $\text{m/GPa} \cdot \text{s}$ 作为 A 的单位, 等于 $3.17 \times 10^{-15} \text{m/N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$). 另一个参数 B 表示由于蠕变压实引起孔隙压力升高的能力, 它具有长度的量纲. 当蠕变滑动量等于这个特征尺度时, 孔隙压力与静岩压力的差值降低到原来的 $1/e$. 在一个时间步长中的孔隙压力增量为

$$\Delta P = \frac{\Delta d}{B}(P_{\text{lith}} + \sigma_n - P_{\text{fluid}})$$

式中, σ_n 是作用于断层面的正应力, P_{lith} 和 P_{fluid} 分别为静岩压力和流体孔隙压力. 断层的破裂由 3 个摩擦系数值控制. 在任何时刻, 当断层上某点的剪切应力超过该点的有效正应力乘以静摩擦强度 f_s .

$$\tau \geq f_s(P_{\text{lith}} + \sigma_n - P_{\text{fluid}})$$

则该断层点发生破裂. 此时该点的摩擦系数下降到一个剩余摩擦强度 f_r , 同时保持断层其它各点的滑移量及模型边界条件不变, 重新计算模型中的应力分布, 判断破裂是否向两端

继续扩展以及断层上是否有其它点达到破裂强度。在判断破裂是否扩展时,我们用的是一个低于静摩擦强度的动摩擦强度值 f_d 。

我们采用了一种新的双结点算法处理包含断层的有限元模型,用代入补充方程、部分重写整体刚度矩阵的方法来消去每对断层结点之间的未知力。用这种方法可以同时处理断层上有部分结点为已知滑移量,而其它结点为已知摩擦系数的情况,从而可以计算由于破裂(即部分断层面上摩擦系数突然下降)引起的模型中的应力变化及破裂面上的滑动量。在一次破裂事件后模型中储存的应变能下降,这些能量中的一部分用于克服断层面上的摩擦力而转换为热能;另一部分则转化为地震波辐射的动能。地震波能量与全部释放应变能的比值,即地震效率,取决于破裂时断层面条件变化的细节。在我们的模型研究中,根据破裂滑移量和破裂面积计算地震矩,然后利用经验公式计算每次地震的矩震级。作用于模型的构造载荷是通过随时间变化的边界位移或边界力施加的。断层上的初始条件为到处为 0 的错动量及在静岩压力和静水压力之间随意设置的不同的初始孔隙压力。所有模型的初始条件设置都是相同的。我们的模型是自调节的,从初始条件出发,经过数百至数千时间步长后(视模型不同而不同),达到一种动态的稳定状态,此后模型中的应力及断层平均滑动速率在一个稳定值附近波动,地震活动性表现出该模型固有的特征。文中所叙述的计算结果都是在经过足够的时间步长之后截取的,以保证他们不受初始条件设置的影响。

2 匀速边界位移作用下的地震活动

我们假设模型边界以每年 20 mm 的速率匀速推进,在与此运动成 45° 斜交的断层上,走滑运动的平均速率为每年 28.28 mm。这种构造运动部分以蠕变的方式进行,部分以地震滑动的形式释放。这两种滑动的比率以及模型中的应力水平,主要取决于断层的力学参数 A 和 B ,而与断层摩擦强度的关系不大。参数 A 表示在一定剪切力作用下断层蠕变的速率, A 越大,蠕变越快。参数 B 则与孔隙流体压力的升高有关, B 越大,压力升高越慢。断层的力学行为取决于这两种过程共同作用的结果。我们在 A 和 B 可能取值的范围内系统地改变 A 和 B 的值,对大量模型进行了计算。我们的模型可以模拟各种不同力学行为的断层,从几乎是百分之百蠕变的断层到基本上全部是地震滑动的断层。结果表明,断层的蠕变率(蠕变滑动与总滑动量的比值)随乘积($A \cdot B$)的值增大而上升,而模型中的应力水平(断层所承受剪应力在长时间内的平均值)大致随商值(A/B)增大而降低。

表 1 给出一组蠕变量很小的模型的计算结果。在这组模型中断层是均匀的,即所有参数沿断层无变化。在所有模型中 A 取值 0.001, 3 个摩擦强度分别为 0.6, 0.5 和 0.4, 仅参数 B 值有变化。表中给出断层带在长时间内的平均剪应力和孔隙压力、蠕变率、所有地震的平均矩震级、各断层点的平均破裂间隔以及破裂间隔的标准偏差。这个偏差值越小,表示地震原地复发的周期性越好。随着参数 B 值的增大,模型所能承受的剪切力增大,断层带中的平均孔隙压力降低,同时地震震级上升而复发间隔变长。至于地震复发的周期性,是在中等应力和中等孔隙压力的情况下最好。当断层上的剪应力和孔隙压力趋于极端时,周期规律变坏。我们逐步增大 A 值,令断层蠕变的可能变大,再系统地改变 B 值进行计算。我们可以把断层所处的状态分为 3 类:高剪应力低孔隙压状态、低剪应力高孔隙压状态以及中等剪应力中等孔隙压的状态。当然,对于具有不同流变能力的断层,以上划分的剪应力和孔隙压值是不同的。地震原地复发的周期性规律总是在中等应力和孔隙压的状态下最

好. 在我们的模型中, 所有的模型参数包括载荷都不随时间改变, 造成复发间隔偏离周期性的原因是断层不同段之间的相互作用. 在一个地方发生的地震改变了沿断层的应力分布及整体模型中的应力水平, 从而使后续的地震提早或推迟发生.

表 1 一组在常速率边界位移加载下均匀断层模型的计算结果

模型	A^*	B/m	剪应力/MPa	孔隙压/MPa	蠕变率	矩震级	复发周期/a	周期偏差
01	0.001	0.000 1	4.07	233	0.01%	6.85	72.4	6.52%
03	0.001	0.001	12.30	217	0.03%	7.09	171.7	2.66%
05	0.001	0.01	31.16	195	0.09%	7.34	419.4	1.74%
07	0.001	0.1	57.74	172	0.16%	7.91	1 291	17.30%
09	0.001	1	91.73	144	0.29%	8.39	3 553	32.97%

* A 的单位为 $3.17 \times 10^{-15} \text{ m/N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$

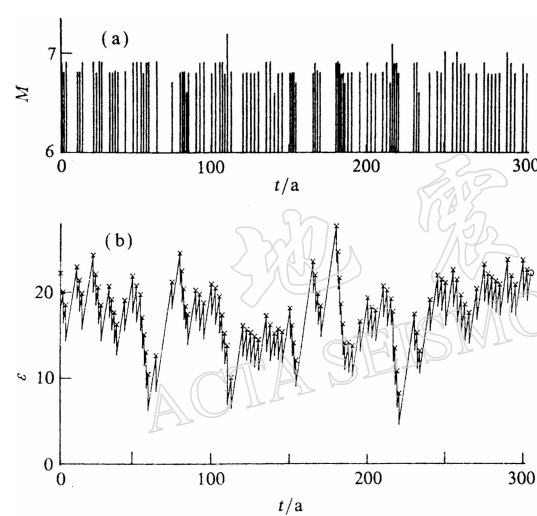


图 2(a) 常速率边界位移作用下模型 01 产生的震级时间分布; (b) 应变积累释放曲线, 叉号代表一次地震事件, 应变单位为任意的相对单位

我们将一条模型断层上的所有地震作为一个序列, 来考察整条断层的地震活动所表现的活跃期和平静期的规律性. 在我们计算的模型中, 出现了从极有规律的平静活跃现象到完全不能划分平静期和活跃期各种不同的情况. 图 2 和图 3 给出两个典型的例子. 图 2a 是由表 1 中模型 01 产生的震级时间分布. 为了比较客观地划分地震的平静期和活跃期, 需要作出一个与地震有关的物理量(如频度、应变或能量)随时间变化的曲线. 图 2b 给出的是对应于图 2a 的应变积累和释放的时间进程曲线. 根据震级可折算出每个地震释放的应变. 将一段较长时间中的所有应变释放量求和并除以时间, 得到在该时间段内的平均应变积累速率. 在两次地震之间曲线以此斜率上升, 在地震时突然下降. 这样, 如果在某段时间中曲线的总趋势是上升

的, 就认为是平静期, 相反就是活跃期. 从图 2 可见, 模型 01 给出的地震活动虽有平静期和活跃期之分, 但他们是无规律的. 从这样的曲线无法预测活跃期的开始和结束, 对于地震预测没有意义. 因此, 我们把这种情况与无明显平静活跃期之分的情况归为一类, 统称为无平静活跃规律. 图 3 是由模型 05 给出的地震活动, 表现出有规律的平静期—活跃期现象. 两种不同形态的平静—活跃周期交替出现, 每个周期的时间为 200 年左右.

应当指出, 所有模型的地震活动图象都是随时间演变的. 无平静活跃规律的模型, 可能在短时期中表现出清晰的平静—活跃现象. 而规律性强的模型, 也会出现短时期的混乱状态. 考察所有的模型后我们发现, 处于中等应力和中等孔隙压状态下的断层, 其地震活动总是表现出有规律的平静期—活跃期现象, 而处于高剪应力低孔隙压和低剪应力高孔隙压状态下的断层, 平静活跃现象是不明显或无规律的. 这就是说, 如果一条断层上地震原

地重复的周期性好,那么,这条断层地震活动的平静期—活跃期规律性也好.平静—活跃周期的时间与原地复发周期的比值在 0.3~1 之间.

以上计算的模型,都是受恒定速率的边界位移作用的影响,模型不包含任何随时间变化的因素,因此,地震活动表现的平静活跃规律性显然是模型本身诸因素相互作用的结果.由于存在断层间的相互作用,当一个地震发生时,在一处释放的剪应力转移到断层上其它部位,促使某些接近临界状态的地点提前发生破裂.这种几个地震在时间上丛集的现象,在计算过程中是很明显的.当断层上接连发生一定数量的破裂事件之后(约三分之一至全部的断层点发生破裂),由于边界位移的速率是恒定的,模型中的应力水平降低,使地震孕育过程减缓,出现地震活动的平静期.图 3c 给出模型 05 中平均剪应变能量密度随时间的变化,反映出模型中的剪应力与平静活跃周期同步的小幅度波动.当断层处于高剪应力或高孔隙压力的状态时,断层相互作用明显增强,此时断层上的破裂点可能不易形成较为稳定的组合关系,因此平静—活跃现象表现得无规律或不明显.

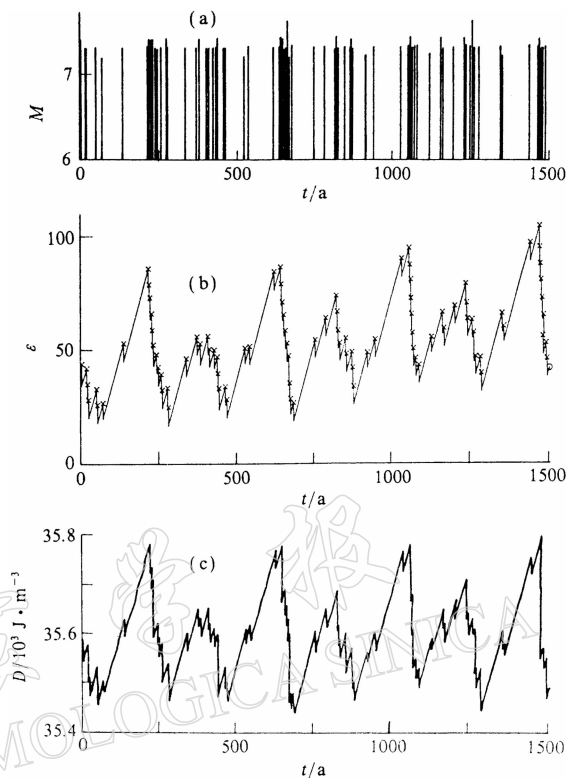


图 3(a) 常速率边界位移作用下模型 05 产生的震级时间分布; (b) 应变积累释放曲线, 可看出 7 个完整的平静—活跃周期, 上升段为平静期, 下降段为活跃期; (c) 模型中平均剪应变能量密度随时间变化曲线

3 变化外力作用下的地震活动

对模型施加一个随时间周期变化的边界力

$$F(t) = F_0 [1 + \alpha \sin(2\pi t/T)]$$

式中, F_0 为外载的均值, α 为变化幅度, T 为变化周期. 我们取表 1 中的模型 05 来进行计算. 该模型在常速率位移载荷下表现出有规律的平静活跃现象, 平静—活跃周期约为 200 年. 取 α 分别为 0.3, 0.1, 0.06 和 0.03; T 为 200 年和 400 年. 图 4 给出外载变化幅度(峰—峰值)为均值的 60%、周期为 200 年时的结果. 图 4a 为断层上平均剪应力随时间的变化, 与外载变化是一致的. 图 4b 为震级时间分布, 表现出明显而有规律的平静期和活跃期现象. 图 4c 为相应的应变积累释放曲线, 在曲线的最后一个周期处出现不规则现象, 以后的地震活动性表现出短时期的不规律性, 但很快又演变为规则的平静活跃形式. 当载荷的变化幅度相同但周期为 400 年时, 地震活动性表现出类似的有规律的平静—活跃现象, 平

静—活跃的周期为 400 年. 但是, 从同样的初始条件出发, 400 年周期载荷需要较长时间达到稳定的规则状态, 而且在达到稳定后, 不规则活动时期所占的比例大于前一种载荷. 以上计算说明, 在较大变幅的周期载荷作用下, 模型地震活动性表现出与外载相同的周期性起伏, 当外载周期接近于模型参数所决定的固有的起伏周期时, 平静—活跃的规律性就更好. 对比图 4a 和图 4c 可以看到, 两条曲线的相位是相反的, 地震活跃期在模型中应力降到最低点时开始, 达到最高点时结束, 而在地震活动的平静期内应力是下降的(准确地说, 是外载下降的半个周期对应于地震平静期). 这与前述的常速率边界位移加载的情况正相反. 图 3c 和 3b 表明, 模型中活跃期的开始对应于应力的峰值. 这种差异揭示了两种不同加载方式的根本区别, 在边界位移加载下, 断层滑动总是使模型卸载的.

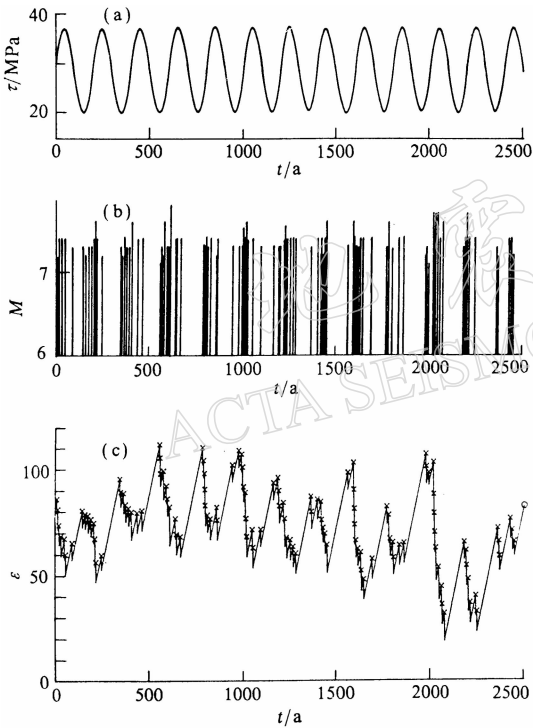


图 4 周期变化边界力作用下的计算结果,
力变化幅度为均值的 60%
(a)断层上平均剪应力;(b)震级时间分布;
(c)应变积累释放曲线

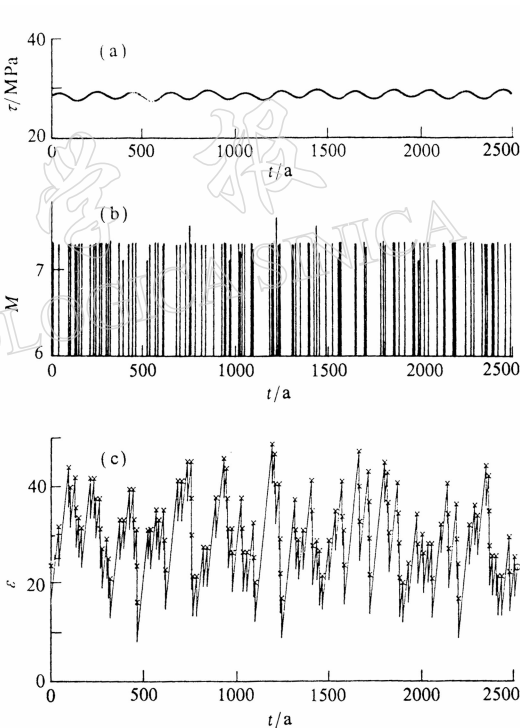


图 5 周期变化边界力作用下的计算结果,
力变化幅度为均值的 6%
(a)断层上平均剪应力;(b)震级时间分布;
(c)应变积累释放曲线

保持边界作用力的均值不变但逐渐减小力变化的幅度, 我们发现外载对于地震活动性的控制作用越来越小, 由初始条件开始达到稳定的规则状态所需的时间变长, 地震平静期和活跃期的规律性变差. 受到 200 年周期外载的 05 模型, 当外载变化幅度(峰—峰值)为均值的 20% 时, 地震活动仍表现出与外载明显相关的平静—活跃现象; 当外载变幅为 12% 时, 这种相关性还存在, 但平静活跃期的规律性较差. 图 5 给出外载变化幅度为 6% 时的结果, 其中已看不出外载对于地震活动的控制作用.

4 讨论

在周期性变化的边界力作用下,当力变化幅度达到一定程度时,模型地震活动表现出与外力变化周期相同的平静—活跃现象,但是需要有一定的响应时间,使地震活动起伏与外力变化呈现明显的相关.力变化幅度越小,这种过渡时间就越长.目前没有证据表明,构造动力存在较大幅度的周期性变化.从我们用同一模型受两种不同载荷的计算结果来看,当变化幅度超过外力均值的 10% 以上时,周期性外力才对地震活动性起到较明显的控制作用.而在受常速率边界位移作用时,与地震平静—活跃期相联系的模型应力变化幅度只在 1% 左右.由此看来,构造动力的变化很可能不是地震活动周期性起伏的原因,其主要起因可能在于构造带内部自身因素相互影响和调节的结果.

现在我们对于断层带中孔隙流体压力的控制因素和变化规律的认识非常有限,模型中所采用的孔隙压随蠕变量变化的关系也未必正确.但孕震过程无疑地包含着地下流体作用及其它一些随时间变化的物理过程.构造载荷除了对岩体的直接作用外,还可能通过这类过程起着间接的作用,而地震的发生是各种外加和内在的因素共同作用的结果.我们的模型研究表明断层阀机制对地震活动性图象所起的重要作用,在地震模型研究中考虑这种作用是十分必要的.在讨论实际地震活动性的起伏时,简单地将其与构造应力的升降联系起来显然是不正确的.

在讨论实际的地震活动性变化时,除了平静期和活跃期外,还经常用到一个时间尺度较短的“幕”的概念.在我们的模型研究中,确实存在着相当于“幕”的时间尺度的地震活动性起伏,这通常是由于断层相互作用使一组地震在时间上相互靠拢的结果,但地震幕的出现和持续时间似乎无规律可循.对于地震预报和估计地震危险性而言,探索是否存在与地震活跃期的开始和结束相联系的特征性的应力应变变化是非常有意义的.从我们的初步研究来看,在离断层较远地方的变化只是反映了模型整体应力水平的变化,在离断层近的地方反映的是与断层局部相联系的变化.在中等的距离上(大致相当于整条断层长度的 1/3),体应变以及垂直于最大构造压力方向上的线应变分量,可能存在与活跃期相联系的特征性变化.但这种变化有可能只是由于所采用的加载和边界条件造成的结果,不一定有普遍意义,这有待进一步探讨.

参 考 文 献

- 张国民,耿鲁明,石耀霖,1993. 中国大陆强震轮回活动的计算机模型研究. *中国地震*, **9**(1): 20~32
- Ambraseys N N, Barazangi M 1989. The 1759 earthquake in the Bekaa Valley: Implications for earthquake hazard assessment in the eastern Mediterranean region. *J Geophys Res*, **94**: 4 007~4 013
- Blanpied M L, Lockner D A, Byerlee J D, 1992. An earthquake mechanism based on rapid sealing of faults. *Nature*, **358**: 574~576
- Byerlee J, 1990. Friction, overpressure and fault normal compression. *Geophys Res Lett*, **17**: 2 109~2 112
- Sibson R H, 1990. Rupture nucleation on unfavorably oriented faults. *Bull Seism Soc Amer*, **80**: 1 580~1 604
- Sleep N H, Blanpied M L, 1992. Creep, compaction and the weak rheology of major faults. *Nature*, **359**: 687~692