

水平层状粘弹性介质中震源应力—应变场的三维边值问题及相应的地电阻率前兆变化的数值模拟*

叶同贵 汤 泉 钱家栋

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文应用关于粘弹介质的弹性力学三维有限元方法,研究了定常速率加载边界条件下以断层闭锁模拟震源的“孕震”过程,并将所求得层状介质应力—应变场与视电阻率的“前兆”变化相关联,以此给出该“孕震”过程中地表视电阻率“前兆”变化的时空分布,从而揭示水平层状介质视电阻率的变化与震源区应变场之间的关系。

计算结果表明,粘弹性介质的存在,对孕震过程起着相当重要的作用。介质中应力集中程度与材料粘弹性有着密切的关系。另一方面,对于视电阻率前兆而言,其时空分布不仅与大范围的应力—应变场有关,而且还与台站探测范围内介质的力学、电性结构条件相关联。

一、引 言

目前,对浅源大地震的机理,一般认为是由于震源处应力集中引起岩体破坏或粘性滑动所致,对大部分前兆现象而言,一种看法认为它们是由于震源作用在地面附近所造成的力学效应而引起的,因而研究震源应力场和源外应力场及其前兆间的关系,是地震工作者很感兴趣的问题之一。

震源的情况相当复杂,很多学者将震源简化后,加以数值模拟^[1-3]。但是实际地球介质的力学性质取决于岩石的种类、围压、温度和受力时间长短等诸多因素。在震源孕育过程中,震源附近地球介质受力相当缓慢且处于高温高压状态,故模拟震源的孕育过程,必须考虑到岩石的粘弹性性质,也即考虑到时间因素。当前,岩石的粘弹性特征的实验研究和考虑岩石粘弹性条件下地壳应力场的数值模拟已越来越受到人们的重视^[4-7]。

* 本文系国家地震局震基准字J852003号基金资助课题研究报告之一。

但是,在上述文献的计算中,模型的边值问题是二维的。对于实际问题来说,或者由于介质结构的复杂性,或者由于边界条件的复杂性,二维的边值问题还是不充分的。要模拟大范围的滑移在断层闭锁时在介质中产生的应力应变场,由于在靠近断层的闭锁区以及在远离断层的介质边界处的位移条件各不相同,在断层面上沿垂直方向也不尽一致,因此构成一个三维的边值问题。

本文的目的在于将介质的粘弹性引入上述考虑较为复杂边界条件的三维问题中。首先采用三维介质中的有限元方法¹⁾,对粘弹性介质中的震源区应力应变场进行模拟,研究其时空演化特征,进而研究其与前兆间的关系。在模型中,介质被简化为水平层状介质。

二、粘性介质应力应变场计算的理论与程序

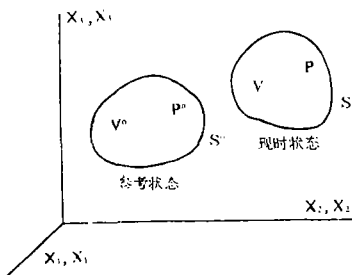


图1 现时状态和参考状态

Fig. 1 Temporal state and reference state

量为:

$$\delta D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \delta V_i}{\partial X_j} + \frac{\partial \delta V_j}{\partial X_i} \right) \quad (1)$$

利用虚速度原理,给出虚速度方程:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta D_{ij} dV = \int_V F_i \delta V_i dV + \int_{S_T} T_i \delta V_i dS \quad (2)$$

这里 σ_{ij} 、 F_i 、 T_i 和 δV_i 均是Euler坐标的函数。

选取物体变形过程中某一时刻的形状作为参考状态。在参考状态下物体内部点的坐标 x_i 称为参考坐标,则Euler应力张量 σ_{ij} 与参考状态的Lagrange应力张量 t_{ij} 之间有如下关系:

$$t_{ij} = \left| \frac{\partial X}{\partial x} \right| \frac{\partial x_i}{\partial X_j} \sigma_{ij} \quad (3)$$

式中 $\left| \frac{\partial X}{\partial x} \right|$ 是Jacobian行列式。

以(3)式代入(2)式,并定义 $F^0_i = F_i \frac{dv}{dv^0}$, $T^0_i = T_i \frac{dS}{dS^0}$,得到参考状态的速度方程为:

1) 沈亚鹏, 三维粘弹性大变形问题的有限元分析.

$$\int_{V^0} \dot{t}_{ij} \frac{\partial \delta V_i}{\partial x_j} dV^0 = \int_{V^0} \dot{F}_i \delta V_i dV^0 + \int_{S_T} \dot{T}_i \delta V_i dS^0 \quad (4)$$

将(4)式的虚速度方程用于两相邻时刻 t 和 $t+dt$ 的平衡状态, 则得持续平衡方程为:

$$\int_{V^0} \dot{t}_{ij} \frac{\partial \delta V_i}{\partial x_j} dV^0 = \int_{V^0} \dot{F}_i \delta V_i dV^0 + \int_{S_T} \dot{T}_i \delta V_i dS^0 \quad (5)$$

其中 $\dot{t}_{ij}$ 、 $\dot{F}_i$ 、 $\dot{T}_i$ 表示对时间的导数。

为了消除物体作刚体转动对应力的影响, 将Lagrange应力速度张量用旋转无关的Jaumann应力速度 σ_{ij} 表示^[9], 并取参考状态与现时状态重合有:

$$\dot{t}_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_{ik} D_{kj} - \sigma_{jk} D_{ki} + \sigma_{ik} \frac{\partial V_j}{\partial x_k} \quad (6)$$

将(6)代入(5)得到用 σ_{ij} 表示的持续平衡方程

$$\begin{aligned} & \int \left[\sigma_{ij} \delta D_{ij} - \frac{1}{2} \sigma_{ij} \left(2 D_{ik} D_{kj} - \frac{\partial V_k}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial V_k}{\partial x_i} \right) \right] dV \\ & = \int_V \dot{F}_i \delta V_i dV + \int_{S_T} \dot{T}_i \delta V_i dS \end{aligned} \quad (7)$$

(7)式是建立有限元方程的基础。

2. 材料的本构方程

基于热力学基本定律, 利用内变量概念, 可以证明任何粘弹性体的松弛函数可用广义Maxwell模型表示^[9], 而任何粘弹性体的蠕变函数可用广义Kelvin链表示^[10], 这两者可以转化。

对三维应力状态, 当时间步长相当小时有:

$$\Delta \{ \epsilon_c \} = \left[\sum_{r=1}^n (a_r [A] \{ \sigma \} - b_r \{ \epsilon_c^r \}) \right] \Delta t \quad (8)$$

式中 $a_r = \frac{1}{\eta_r}$, $b_r = E_r / \eta_r$, η_r 是粘性系数, E_r 是弹性模量。 $\Delta \{ \epsilon_c \}$ 是Cauchy蠕变增量 $\{ \sigma \}$ 是与旋转无关的应力全量。(8)式表示的粘弹性材料, 其拉伸模量(或剪切模量)与时间有关, 而泊松比与时间无关。

3. 有限元方程

采用20节点三维等参数元^[11], 并将蠕变变形作为初应变处理, 由(7)式得到大变形状态下的有限元方程:

$$([Ke] + [Ks]) \{ \dot{\psi} \} = \{ \dot{P}_v \} + \{ \dot{P}_s \} + \{ \dot{P}_c \} \quad (9)$$

式中 $\{ \dot{\psi} \}$ 是节点速度向量, $\{ \dot{P}_v \}$ 、 $\{ \dot{P}_s \}$ 、 $\{ \dot{P}_c \}$ 分别是由体力、面力和蠕变所产生的等效节点载荷速度向量。 $[Ke]$ 是小变形时刚度矩阵, $[Ks]$ 是考虑大变形时的附加刚度矩阵, 分别表示为:

$$[Ke] = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} [B]^T [C] [B] |J| d\xi d\eta d\zeta \quad (10)$$

$$[Ks] = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} [G]^T [M] [G] |J| d\xi d\eta d\zeta \quad (11)$$

上式表示在等参数元的局部坐标下积分。矩阵 $[B]$ 、 $[C]$ 、 $[G]$ 、 $[M]$ 的表达式参见文

献^[12]。

三、三维边值问题粘弹性介质应力应变场的计算结果

1. 计算模型的选取

计算模型如图2所示。介质分成三层结构，上面的两层为性质不同的弹性材料相对比较坚硬，第三层（下层）为粘弹性材料，用Maxwell本构关系来模拟。计算模型为160公里×180公里×10公里的长方体。用固定 S_1 面来模拟应力应变积累区。具体参数见表1。

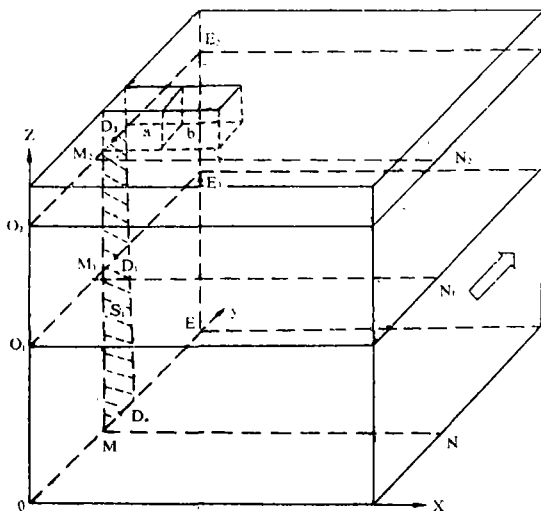


图2 计算模型

Fig. 2 The 3-D model for computation

表1 图2模型中的材料参数

	弹性模量	泊松比	粘性系数 (泊)	厚度 (km)
第一层	2.4×10^5	0.25		1
第二层	3.6×10^5	0.52		8
第三层	1.2×10^4	0.25		6

本文的主要目的是模拟应力场的一般变化规律及其与地震前兆间的关系，故参数的选取是在前人工作的基础上^[2、3、4]所作的一般性选取。为突出粘弹性层及杨氏模量的影响，我们取泊松比为常量。

计算中的加载方式采用文献^[4]中所述及的位移速率加载。即在计算模型的右端面同时增加某一位移值，如图2中箭头所示。位移速率取为50厘米/年。总的加载时间为5年。

计算模型被分成75个20节点等参元。每层25个，即分别沿X轴分成20、20、20、20和180公里五份，沿Y轴分成60、20、20、20和60公里五份。应力积累区居模型左侧中部，其沿Y方向的长度为20公里，其顶部埋深为1公里，沿Z方向向下延伸9公里，全部计算在VAX-750机上进行。

2. 计算结果

我们在计算模型不同的层位中，沿两个互相垂直的方向共选取六条测线，即图2中的 OE 、 O_1E_1 、 O_2E_2 和 MN 、 M_1N_1 、 M_2N_2 。将它们的结果作成图3--5。为了更好地比较不同层中应力应变场随时间的变化，我们还分别在三层中各选取一点（ D_0 、 D_1 、 D_2 ），作出其应力应变随时间变化曲线（图6）。在作图中，对图形进行了归一化，以利于比较，其中 t_0 的解为第一次加载（边界位移为50cm）介质中的弹性解，作为本问题的初级解。

图3给出了粘弹性材料中应力、应变场的时空变化。由图3a可知，沿Y轴方向，在应力应变积累区剪应力值最大，其值为 10^4 Pa量级，随着时间的增长，剪应力值的变化幅度为

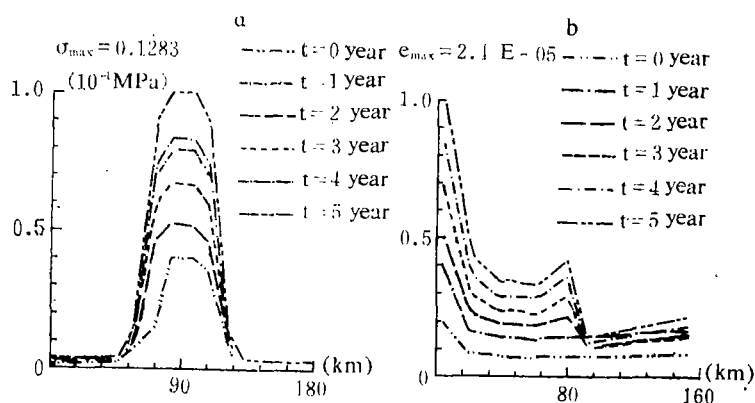


图3 图2中OE测线上剪应力及MN测线上剪应变在不同时段的空间分布

a. 剪应力 b. 剪应变

Fig. 3 The distributions of shear stress (a) on the line OE and shear strain (b) on the line MN of Fig. 2 at different time

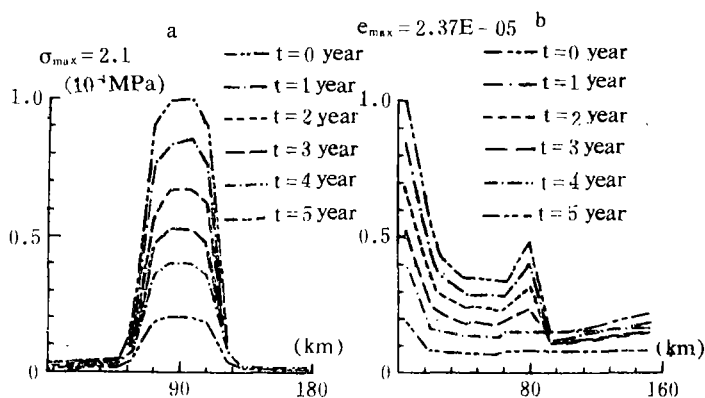


图4 图2中O₁E₁测线上剪应力、M₁N₁测线上的剪应变在不同时段的空间分布

a. 剪应力 b. 剪应变

Fig. 4 The distributions of shear stress (a) on the line O₁E₁ and shear strain (b) on the line M₁N₁ of Fig. 2 at different time

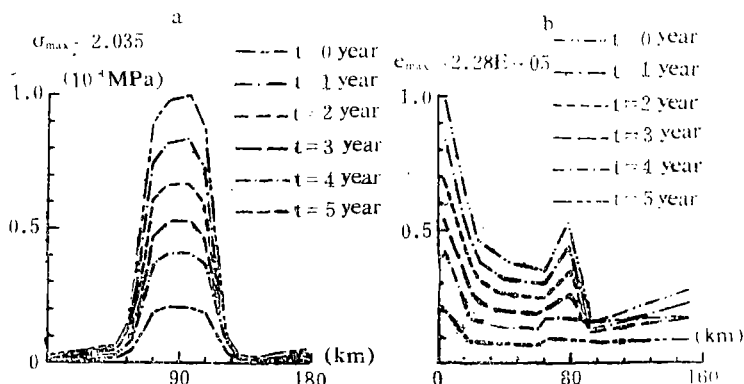


图5 图2中O₂E₂测线上的剪应力、M₂N₂测线上的剪应变在不同时段的空间分布

a. 剪应力 b. 剪应变

Fig. 5 The distributions of shear stress (a) on the line O₂E₂ and shear strain (b) on the line M₂N₂ of Fig. 2 at different time

700Pa ($t_0 \rightarrow t_5$), 在 $t = 1$ 年时出现一个相对高值, 这是由粘弹性变形特征所引起的。在平行X轴方向, 即垂直应力积累区方向, 随着离开积累区的距离的加大, 剪应变急剧下降(图3b), 当距离积累区为80公里(相当4倍积累区长度)时, 应变已减少60%; 在95公里时, 应变减小量达90%。

图4为中间坚硬且有锁住部位的完全弹性材料的应力、应变曲线。图5为上部较软的弹性介质中应力应变场的时空变化。

上部的两层介质中的应力、应变曲线有许多相似之处。虽然上层没有锁住部位, 但下层的锁住部位对上层产生了明显的影响。二者沿Y轴都在断层面的相应部位产生了剪应变的集中, 且幅度达到 10^{-5} 量级, 上层由于弹性模量低, 其应力值略低于中间层。随着时间的增加, 剪应力的积累不断增加。由于计算机容量的限制, 单元划分不可再细, 因此文中给出的仅是上述部位应力积累的平均值。剪应变随离开积累区的距离的变化规律与粘弹性的第三层相似, 最大剪应变的量级均为 10^{-5} 。

需要指出的是, 三层介质中剪应变的变化均在离积累区80公里处出现一个高值。以 $t = 5$ 年为例, 其幅度分别为: 表层为最大值的20%, 中间层为最大值的15%, 底层为最大值的10%, 这种现象也是在 $t = 2$ 年以后才出现, 看来也和底层粘性作用有关。

图6显示了三层中(D_0 、 D_1 、 D_2)点的剪应力、剪应变随时间变化的特征。从图6看出, 粘弹性层中应力变化最小, 且幅度远比上面两层小。相反虽然三层中应变都同时增加, 但粘弹性层大于其它两层, 只是其差异不如应力差异明显。应力和应变曲线在 $t = 1$ 年处出现一个转折点。此外, 从图3a、图4a、图5a看出这种计算所得的结果表现了很好的对称性。

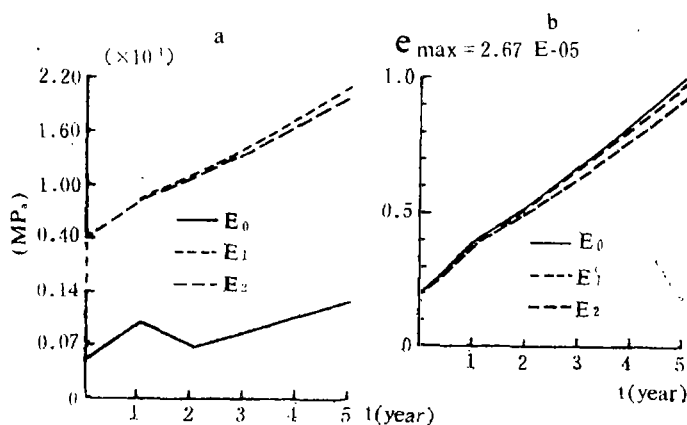


图6 D_0 、 D_1 、 D_2 点上剪应力、剪应变随时间变化

a. 剪应力 b. 剪应变

Fig. 6 The temporal changes of shear stress (a) and shear strain (b) at points of D_0 , D_1 , D_2

3. 讨论

(1) 在相同受力条件下, 弹性介质中的应力增长速率比粘弹性材料大得多, 随着时间的增长, 弹性介质中的应力越来越大, 这无疑加速弹性介质的应力积累, 最终产生破裂。而另一方面, 粘弹性介质中的应变较大, 随着时间增长, 这种差异也略有增加。这些都是下层粘

弹性材料松弛效应的结果。

(2) 由于粘弹性介质的存在, 除积累区的应变高值外, 在离积累区80公里(4倍积累区长度)处所出现的次高值, 可用来说明在源外区所观测到的一些前兆异常。而且, 计算表明, 这一高值越到表层越明显。

四、电法探测范围内应力应变场的计算及其与地电阻率异常的关系

上述计算是在以应力应变积累区为中心的一个较大区域中进行的, 但进行地震前兆观测的大多数方法仅反映了地表某一局部区域中的变化, 为此, 我们以地电阻率方法为例, 进一步研究考虑了小区域介质结构下的应力应变场时空变化特征, 并给出相应的地电阻率前兆异常的时空变化规律。

1. 电法探测范围内应力应变场的计算

我们从大模型的表层的适当区域取出一块大小为20公里×20公里×1公里的长方形块体(其位置见图2中的a、b两块), 做成一个三层介质模型, 以前面每次计算的大范围的受力变形时的位移场在这一个小块体边界的值作为小模型区域边界约束, 重复前述计算, 以求得这个小模型上每一时段的应力应变场。

2. 视电阻率变化的计算结果

本文采用了与文献[2]中类似的方法、参数与步骤来计算, 以期比较两种震源与应力应变场相关联的地电值率变化的时空分布特征。所得的结果见图7、图8。小模型各层的力学和电性参数见表2。为了下面讨论方便, 我们将各层中的体应变和剪切应变的平均值一并给在表3中。

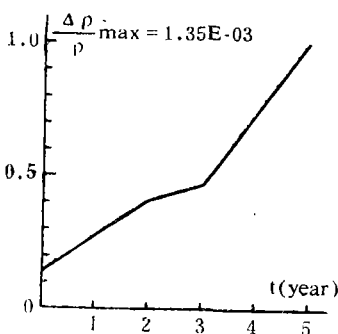


图7 视电阻率“异常”随时间变化

Fig.7 The temporal changes of anomaly in apparent resistivity

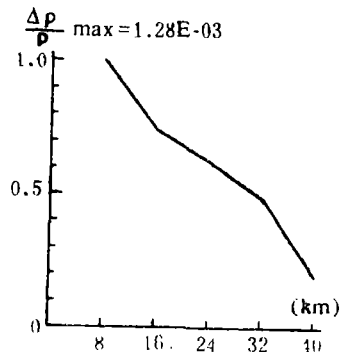


图8 视电阻率“异常”的空间分布

Fig.8 The spatial change of anomaly in apparent resistivity

(1) 固定“观测点”上视电阻率随时间的变化

图7给出了在与断层面垂直方向上距断层面“震中距” Δ 为32公里处的视电阻率“异常”随时间变化的曲线。可以明显地看出, 在“孕震”过程中, 视电阻率“异常”值有逐渐增大的趋势, 也就是显示了与震源应力应变场相应的地电阻率“异常”。根据本文给定的条

表 2

AB = 1000米

参 数 层 号	厚度(m)	弹性常数(kg/cm ²)	电阻率 (Ω m)	响应系数	电阻率—应变灵敏度	泊松比
1	50	400	20	0.3822	100	0.25
2	100	1.2×10^5	30	0.5129	500	0.25
3	850	2.4×10^5	600	0.1048	10^4	0.25

表 3—1

Δ 层 号 t(year) 应 变		$\Delta = 32 \text{ km}$					
		0	1	2	3	4	5
1	体应变	-0.41599×10^{-7}	-0.6329×10^{-7}	-0.8419×10^{-7}	-0.6622×10^{-7}	-0.9403×10^{-7}	-2.6447×10^{-7}
	剪应变	0.11819×10^{-5}	0.2053×10^{-5}	0.3273×10^{-5}	0.4216×10^{-5}	0.4921×10^{-5}	0.60795×10^{-5}
2	体应变	0.18319×10^{-7}	0.2443×10^{-7}	0.3056×10^{-7}	0.2085×10^{-7}	0.2075×10^{-7}	1.850×10^{-7}
	剪应变	0.11426×10^{-5}	0.1904×10^{-5}	0.31597×10^{-5}	0.40715×10^{-5}	0.4809×10^{-5}	0.884×10^{-5}
3	体应变	-0.22099×10^{-7}	-0.5956×10^{-7}	-0.5956×10^{-7}	-0.7501×10^{-7}	-0.8349×10^{-7}	-0.50652×10^{-7}
	剪应变	0.96703×10^{-5}	0.2053×10^{-5}	0.2053×10^{-5}	0.34318×10^{-5}	0.4347×10^{-5}	0.50652×10^{-5}

表 3—2

t 层 号 应 变 $\Delta(\text{km})$		$t = 3 \text{ 年}$				
		8	16	24	32	40
1	体应变	-0.9721×10^{-7}	-0.9215×10^{-7}	-0.7041×10^{-7}	-0.6419×10^{-7}	-0.5037×10^{-7}
	剪应变	0.6105×10^{-5}	0.6083×10^{-5}	0.5973×10^{-5}	0.4273×10^{-5}	0.2496×10^{-5}
2	体应变	0.5037×10^{-7}	0.4256×10^{-7}	0.2833×10^{-7}	0.1986×10^{-7}	0.1603×10^{-7}
	剪应变	0.1684×10^{-5}	0.1574×10^{-5}	0.1003×10^{-5}	0.3963×10^{-5}	0.2157×10^{-5}
3	体应变	0.9942×10^{-5}	-0.9684×10^{-7}	-0.8463×10^{-7}	-0.7408×10^{-7}	0.6216×10^{-7}
	剪应变	0.3518×10^{-5}	0.1746×10^{-5}	0.1746×10^{-5}	0.3232×10^{-5}	0.2045×10^{-5}

件和参数, 这个“异常”的大小约0.14%。

(2) 视电阻率“异常”的空间分布

图 8 给出了 $t = 3$ 年时在与断层面垂直方向不同“震中距”的测点的视电阻率变化的空间分布曲线。可以看出视电阻率的“异常”量值随着“震中距”的增大呈急剧减小的趋势。

在本文震源条件下“震中距”最小的测点其幅度大约为0.13%。

应当指出的是, 图7和图8所给出的视电阻率异常的量级只有千分之几的量级, 似乎太小。然而分析表2和表3的结果, 此时介质内剪应变达到 10^{-5} 量级。其可能的原因是由于在计算与应变有关的岩石电阻率变化时采用了电阻率—体应变灵敏度的缘故。岩石电阻率—体应变灵敏度是在岩石孔隙体积变形的基础上加以考虑的。而岩石电阻率—剪切应变灵敏度目前研究得还不十分清楚, 有关的实验资料也不够充分。根据文献[16]的讨论, 在运用阿契定律 $\rho = \rho_0 \eta^{-m} S^{-n}$ (ρ 及 ρ_0 是岩石及岩石中孔隙溶液的电阻率, η 为孔隙数, S 为饱和度, m 、 n 是两个常数, 其中 m 为表征影响岩石导电的孔隙或裂隙排列方式的结构指数^[12]) 分析比较影响岩石导电性的诸因素时, 承受应力的岩石, 其孔隙度的变化即体应变对岩石导电性的影响, 要远远小于结构指数 m 变化的影响, 而 m 的变化主要受制于孔隙的几何形状的改变, 即剪切应变的作用^[16]。由此看来, 同样量级的剪切应变引起的电阻率变化可能会比体应变更大。在本文的模型计算中, 也得到了地壳上层的剪应变有比体应变大一到两个量级的计算结果(见表3), 这也许与本文所取的孕震模型有关, 它们或许可以为本文所得到的视电阻率变化与文献[16]的结果在量级上有较大差异提供一个可能的解释。当然剪切应变作用下结构指数 m 的变化的研究还有待另文讨论。

本文的目的在于在一定震源模式下, 研究其孕震过程的力学效应, 即应力应变场在一定的结构上(层状介质)进行观测的前兆物理量(地电阻率)之间的关系, 而不是任何一次特定地区的震例的数学模拟, 因此, 图7和图8的结果具有理论上的意义。

3. 不同的表层结构对前兆异常的影响

为了反映不同的表层结构对前兆异常的影响, 我们在前述的大范围与震源孕育有关的应力应变不变的情况下, 改变表层结构, 使得在950米处有一个50米厚的软弱夹层进行计算。具体块体为图2中的a、b块体。并取大模型计算中 $t = 5$ 年时的位移作为小模型的边界约

表4

$\Delta(km)$ 应变 层位		8	16	24	32	40	扬氏模量 (kg/cm^2)	厚度 (m)	泊松比
1	体应变	-0.12602×10^{-7}	0.12638×10^{-7}	0.81019×10^{-7}	-0.13723×10^{-8}	-0.12536×10^{-8}	2.4×10^5	850	0.25
	剪应变	0.63435×10^{-5}	0.69853×10^{-5}	0.87906×10^{-5}	-0.84303×10^{-8}	0.70427×10^{-5}			
2	体应变	-0.6730×10^{-7}	-0.56839×10^{-7}	-0.32628×10^{-7}	-0.23301×10^{-7}	-0.21502×10^{-7}	1.2×10^5	150	0.25
	剪应变	0.45046×10^{-5}	-0.32628×10^{-7}	0.97583×10^{-5}	0.55074×10^{-7}	0.44395×10^{-5}			
3	体应变	-0.32655×10^{-5}	-0.34643×10^{-6}	-0.32476×10^{-6}	-0.13743×10^{-6}	-0.12946×10^{-6}	400	50	0.25
	剪应变	0.49035×10^{-5}	0.71158×10^{-5}	0.99757×10^{-5}	0.89338×10^{-5}	0.82315×10^{-5}			

束。表4为各层参数、体应变和剪应变的计算结果。

由于夹层的存在,夹层处的体应变要比上层高出一个数量级。这一结果说明夹层的应变集中主要是靠减小上层介质的应变场来进行补偿的。那么,体应变引起的前兆异常,将在夹层中被放大,故在地壳中存在前兆的优显层^[20]。要想得到明显的前兆显示,各种探测手段的探测深度应能达到这类软弱夹层的深度。

以上结果也可作为前兆观测台址条件的定量化研究提供一个数值模拟基础。比如在地电台址的选择上,就必须考虑到不同台址下介质的力学、电学性质的组合,选取能充分反映前兆现象的最佳组合。同时对地下低阻层的存在深度加以考虑,架设适当极距的装置,使得探测深度能达到低阻层等。

五、结论

- 1.在模拟与震源孕育过程有关的各种力学问题时,应用粘弹性大应变理论是必要的。
- 2.加载方式对孕震过程中的应力应变场计算影响很大。文中采用了位移定常速率加载。
- 3.粘弹性介质的存在,对震源孕育过程起着相当重要的作用。介质中的应力集中程度与粘弹性材料有着密切关系。震前的前兆现象也因粘弹性介质的存在有不同的时空反应。
- 4.表层介质的不同力学、电学性质组合,影响着前兆现象在地表的反映,因而在选择台址上要充分地考虑到这一点。

5.三维有限元方法,在处理象震源孕育过程这样的空间问题上,在考虑边界条件、介质的空间不均匀性时有很大的灵活性,为我们模拟复杂的震源和介质提供了一条可行的途径。

参考文献

- [1]钱家栋、朱仁益,两层介质中均匀膨胀球的应变场和位移的计算结果和应用,西北地震学报, Vol. 2, No. 2, 1980.
- [2]赵和云、钱家栋,层状介质中膨胀球模拟力源的应力—应变场与视电阻率的关系,西北地震学报, Vol. 10, No. 1, 1988.
- [3]汤泉等,震前预滑的有限元分析,地震科学研究, No. 2, 1983.
- [4]梁北援等,定常边界力作用下断层应力应变积累的模拟与地震危险区讨论,中国地震, Vol. 3, No. 2, 1987.
- [5]Kusznir N.J. et al., Stress concentration in the upper lithosphere caused by underlying visco elastic creep, Tectonophysics, Vol. 43, 1977.
- [6]Mai Yane et al., Time-dependent deformation and stress relaxation after strike slip earthquakes, J.G.R., Vol. 86, B₄, 1981.
- [7]王启鸣等,简单断层带上缓慢应力积累及松弛过程的有限元模拟,地震地质, Vol. 5, No. 3, 1983.
- [8]欧阳邕,粘弹性理论, 1983.
- [9]Fang Y.C., Foundations of Solid Mechanics, 1965.
- [10]Argyris J.H., Pister K.S., Szimmat J. and William K.J., Unified Concepts of Constitutive Modelling and Numerical Solution Methods for Concrete Creep Problems, Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 10, 199—246, 1977.
- [11]李大潜等,有限元法续讲,科学出版社, 1979.
- [12]嵇醒、殷家驹、汤泉,粘弹性大应变有限元法及其在断裂力学中的某些应用,固体力学学报, No. 1, 1983.
- [13]北京大学地球物理教研室地电组、兰州地震大队预报室,岩石视电阻率与压力关系的实验,北京大学学报, No. 2, 1978.
- [14]张同俊,矿井岩层受力状态与视电阻率关系的实验研究,西北地震学报, Vol. 3, No. 3, 1981.
- [15]吕广延等,应力作用下层状砂岩电阻率的变化特征,西北地震学报, Vol. 6, No. 1, 1984.
- [16]Qian, J., Regional study of the anomalous change in apparent resistivity before the Tangshan earthquake (M=7.8, 1976) in China, Pageoph., Vol. 122, 1984/85.
- [17]钱家栋等,地电阻率法在地震预报中的应用,地震出版社, 1985.
- [18]赵和云等,水平层状介质中不同深度对地表 ρ_s 变化的响应特性,地震, No. 6, 1985.
- [19]Barsukov, O.M., Variation of electric resistivity of mountain rocks connected with tectonic causes, Tectonophysics, Vol. 14, 1972.
- [20]郭增建等,临震前兆的一种可能机制——暴沸,西北地震学报, Vol. 1, No. 1, 1979.

**MATHEMATICAL MODELLING OF THE 3-D BOUNDARY CONDITION
PROBLEM OF SOURCE STRESS-STRAIN FIELD IN HORIZONTAL
LAYERED VISCO-ELASTICAL MEDIUM AND THE CORRESPONDING
PRECURSORY CHANGES IN EARTH RESISTIVITY**

Ye Tonggui, Tan Quan, Qian Jiadong
(*The Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB*)

Abstract

This paper takes the concentration of stress in a locked fault as the model of earthquake source and deals with the changes in the stress field in a three layered media under the lateral boundary condition of a constant rate of displacement loading. The "precursory" changes in apparent resistivity at the surface of the media associated with the changes in stress-strain field is also discussed in this paper in order to reveal the possible way of connecting the spatial-temporal changes in apparent resistivity to the source process.

The results show that, the existence of viscous material in the media would play a very important role in the preparatory process: besides of the influence of structure of the media the extent of stress concentration is closely relative to the viscous property of the media also, And the spatial-temporal distribution of apparent resistivity precursor is not only concerned with the stress-strain field but also with the mechanical and electrical structure condition of media within the detective scale in observational stations.