

地震场源应变前兆的区别及其在 地震预报中的应用

李启成

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要 本文以组合模式为基础,用三维有限元方法计算了两个模型,主要研究结论是:(1)在发生大地震前,调整单元首先破裂,其应变随时间变化曲线呈准“ λ ”型;(2)在调整单元破裂后,积累单元破裂,其应变随时间变化曲线呈“ λ ”型;(3)在断层垂直方向上应变衰减很快,而沿断层走向方向上衰减很慢;(4)场区各单元的情况很复杂,其应变随时间变化的曲线呈非“ λ ”型。最后本文列举了一些有关“ λ ”型的震例,并利用结论(1)解释了几种前兆现象。

关键词: 组合模式 三维模型 有限元模拟 相变 应变

1 问题的提出

大地震与中强地震发生前其场区前兆和源区前兆的区分一直是地震学家探索的目标。但问题很复杂。其主要问题是:

(1)场前兆范围很大,震源淹没在前兆场中,从宽广的前兆场中无法确定震源。

(2)前兆场内有前兆的点仅占前兆观测台中的少数。且这种不连续的前兆点的形态各异,缺乏判断源区和场区前兆的指标。

1992年,郭增建、秦保燕首先把统计物理学中描述系统演化和突变的序参量的整个历程图类似于希腊字母“ λ ”引入地震预报的研究,发表了“临界乳光和 λ 型在地震预报中的重要意义”一文^[1]。1993年秦保燕和郭增建根据模拟实验,结合震例对大震前近源区前兆和场区前兆的区别作了进一步总结,指出绝大多数“ λ ”型前兆只存在于源区和近源区,场区和远场区的前兆形态发生畸变(相对于“ λ ”型),因而提出了“ λ ”型前兆是源区、近源区与场区前兆区分的重要指标。但以上研究仅是指明了方向,其中关于模式选择和数学模拟计算以及震源系统演化的具体时间进程尚未深入讨论。本文选择组合模式,以三维有限元为数学手段对源区、近源区等的应变变化历程进行了模拟研究,以期对地震预报有所裨益。

2 物理学中的两类相变和第二类相变—“ λ ”型在自然界中的普适性

地震灾害一般认为是某一过程突变和放大的结果,为了讨论地震这一突变现象并探讨地震预报,首先对“ λ ”型在自然界中的普适性进行讨论,以便在地震研究中借鉴。

* 本文为李启成硕士学位论文,其导师为秦保燕

物理学中有两类相变,第一类相变有体积变化和潜热积累阶段,它既有两相共存的状态,也有过热和过冷的状态,是一种亚稳态。用数学语言说就是热力学势本身连续,而一阶导数不连续的叫第一类相变。第一类相变点不是奇异点,它只是两相曲线的交汇点。

在地球科学中,第一类相变伴有突变,其中突变的例子有:岩石中包裹体的爆裂,过热液体的爆沸和岩浆突然减压爆发等。第二类相变的特点是体积没有变化,没有潜热,不出现两相共存和亚稳态。然而在不同物质的情况,在临界点处都出现热膨胀系数、压缩率比热和磁化率等的“发散”。用数学方式来描述第二类相变,则表现为热力学势和它们的一阶导数为连续变化,而二阶导数为不连续变化。这就是在相变点没有体积变化和潜热,但比热、压缩率、磁化率等物理量在其随温度而变化的曲线上出现跃变或尖峰。第二类相变点两侧只有一个相能够存在,因此不允许过冷、过热共存。

第二类相变的变化历程类似于希腊字母“ λ ”,典型的“ λ ”型应具有以下特征:变化历程曲线在相变前呈线性和非线性,相变点是奇异点;相变后曲线迅速下降,最后达到一个稳定状态。郭增建、秦保燕首先把“ λ ”型引入地震预报的研究,即认为前兆、大震、震后表现的全过程类似于希腊字母“ λ ”,尖峰处对应大震发生。

“ λ ”型在自然界中具有普适性。例如文献[3]中列举的氩的比热, EuO 和 EuS 的比热, 镉铝石榴石的比热、磁化率曲线, 铁磁体和铁磁化合物等的比热和磁化率随温度的变化历程图均类似于“ λ ”,即在临界点处均出现了很大尖峰,尖峰前经历了线性和非线性增长过程,峰后急剧下降。此外,大滑坡前位移随时间的变化历程图也呈现“ λ ”型,在尖峰处对应大滑坡发生。文献[2]中所列举的模拟实验和有关震例也证明了自然界中“ λ ”型的普适性。

3 组合模式与弹性回跳模式之比较

组合模式与弹性回跳模式同为孕震模式,但二者比较,组合模式具有弹性回跳模式所不具备的优点。

岩石的稳定性不取决于岩石的介质和应力水平本身。大量的岩石力学实验已证明岩样的稳定性取决于压机刚度与岩样刚度的相对大小。压机刚度越小,岩样刚度越大,岩样越容易失稳,这说明地震的发生不仅取决于震源情况,而且取决于围岩情况。例如,震源区介质的刚度很大,应力水平很高,但如围岩的刚度条件也很大,则地震难以发生。因此,大震的发生不取决于震源的绝对刚度,而取决于震源和震源端部调整单元之间的刚度比。比值愈大,则大震易于孕育,也易于发生。

需要说明的是,组合模式先于压机刚度的研究,这就显示了理论思维在科学研究中的重要作用。

组合模式是由积累单元和其两端的调整单元组成,积累单元是地震的孕震单元,调整单元介质强度弱,不能积累起很大应力应变。组合模式不仅考虑了震源的情况,而且考虑了震源周围的物质环境(即围岩),而弹性回跳模式只考虑了震源情况。

近些年来,郭增建、秦保燕发表了一系列文章,阐明震源应变等随时间的变化类似于希腊字母“ λ ”,认为地震后应变等物理量迅速地部分地恢复。这就是“回跳”的概念。这里的回跳是粘弹性回跳,因此,组合模式可以称之为“粘弹性回跳组合模式”(只是作者个人见解)。

总之,组合模式包含了弹性回跳模式并有自己的特色,可以说组合模式是更为完善的孕

震模式，它完全可以代替弹性回跳模式。

4 物理模型和计算模型

为了研究源区、近源区和场区应变随时间变化的历程曲线的特点和区别。我们选择组合模式作为我们的物理模型，并用三维有限元方法进行计算。

4.1 物理模型——组合模式

组合模式是目前人们普遍使用的模式，其主要的特点是在震源的端部引入调整单元。调整单元的介质强度较低，变形能力较强，据文献[1]，调整单元的尺度与积累单元的尺度相当。此外，在场区也有弱介质区，如有蠕滑断层等存在，故设计了二个模型，一个模型考虑场区有调整区存在，另一个模型场区无调整区。此外，在震源区端部均设置了调整单元。其初步的物理模式如图1所示。

根据以上的模型，我们定义震源和震源端部调整单元区为源区和近源区，超此范围的为场区。下面对源区和近源区的尺度参数作进一步确定。

4.1.1 震源区尺度

我们主要的研究目标是大地震，所以在第一个模型和第二个模型中震源尺度分别为67km和100km(分别在模型1和模型2中计算)，按郭增建和秦保燕(1965)得到的震级与震源尺度的关系式

$$M = 3.3 + 2.1 \log L \quad (1)$$

计算，得出相应的震级分别为7.1级和7.5级。

4.1.2 调整单元的尺度

为了简单起见，我们设调整单元为蠕滑断层，则根据积累和调整的关系，一次大震引起的震前调整运动前兆半径为：

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

或

$$r = 10^{0.508M - 1.377} \quad (3)$$

前一个公式是粗略的，后一个公式是较精确的，这样根据(3)式可得7.1级地震前兆半径为170km，即近源区(包括震源区)的总的尺度可达340km。7.5级地震前兆半径为271km，近源区总尺度可达542km。

4.2 计算模型 I 和 II

根据前述的物理模型，并考虑减少边界效应，故设计了长宽各为1000km，厚为20km的厚板，如图2a所示。

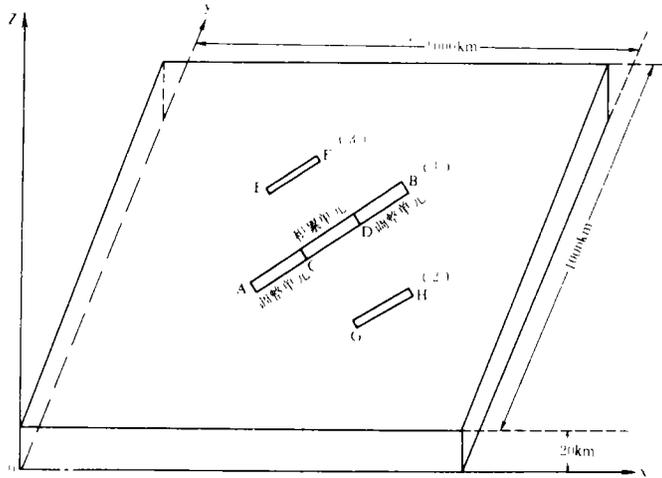


图1 三维有限元计算的物理模型

(1)组合模式断层模型；(2)场区断层介质与调整单元相同；(3)场区断层介质与积累单元相同

Fig. 1 Physics model of 3-D finite element calculation.

在此模型内设置了积累单元,长67km,约2km宽,走向北偏东53°,震源端部二个调整单元走向同积累单元,长度都约在70km左右。在场区设置了二个调整区,一个调整区的介质参数与震源端部的调整单元相同,另一个与积累单元相同。

我们还设计了模型Ⅱ,如图2b所示。该模型与模型Ⅰ的不同之处是该模型在场区没有设置断层,但积累单元长度加长,长度为100km,调整单元长度也为100km,其它几何参数与模型Ⅰ相同。

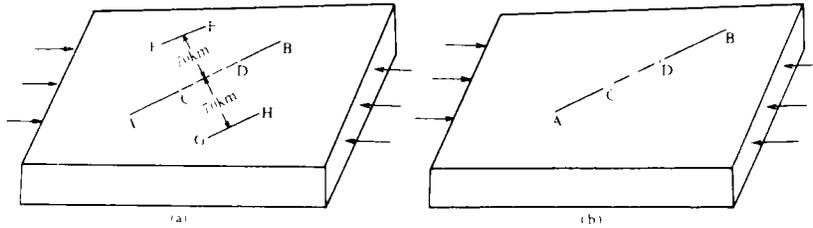


图2 计算模型Ⅰ和Ⅱ

a. 模型Ⅰ; b. 模型Ⅱ

Fig. 2 Calculating models I and II.

为了进行计算,我们把上述块体划分为1008个单元(图3),共计2114个节点,南北向加压为 $0.4 \times 10^8 \text{ dyn/cm}^2$,东西向压力大小为 $0.8 \times 10^8 \text{ dyn/cm}^2$ 。为了防止模型的旋转,对节点1和2113加了约束。

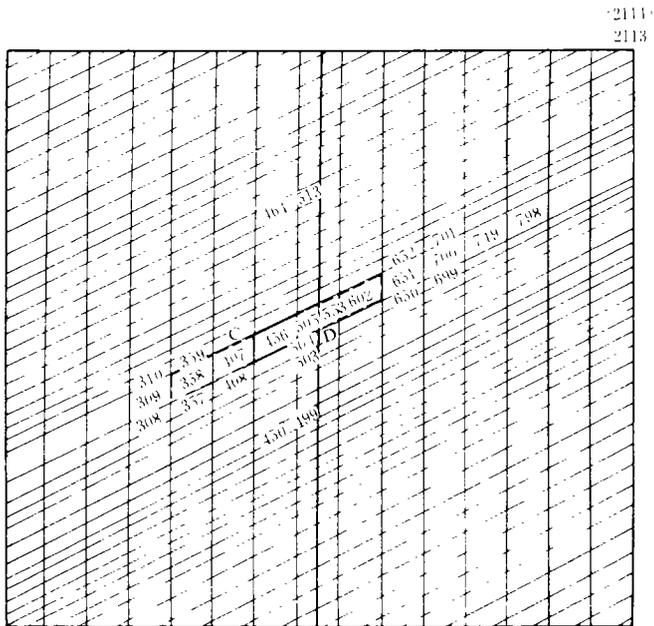


图3 有限单元划分示意图(中间较宽单元约3km)

Fig. 3 The division of finite elements.

模型Ⅰ中取单元407、553、602为调整单元,505和456为积累单元,450、499、513和464为场区的调整单元。在模型Ⅱ中取单元407、456、505、651、700为调整单元,单元553、602为积累单元。积累单元、调整单元和完整介质的参数见表1。

5 计算方法和计算结果

5.1 计算原理与方法

本文采用三维有限元法对上述计算模型进行了震源孕震过程的模拟计算。假设厚板各单元介质为马克斯威体,则其应力应变关系为:

$$\epsilon = \frac{\sigma_{弹}}{E} + \frac{\sigma_{弹}}{\eta} \cdot t \quad (4)$$

式中 E 为岩石的弹性模量, η 为粘滞系数。此式的应力应变曲线是线性的。

但在实际中,当应变随时间增长较大时,各单元的应力增量就会成为外力的一部分在将来的应变中起作用。考虑到这一点,我们在计算中将上一次计算得到的应力值作为初始值代入方程(6)得到:

$$\epsilon_{i+1} = \frac{\sigma_i}{E} + \frac{\sigma_i}{\eta t} \quad (5)$$

其中 $\epsilon_{i+1} = c \sigma_{i+1} \quad (6)$

(6)式中 c 为粘弹模量。从上式可以看出应变随时间呈非线性加速变化。

表1 介质参数

物理量 介质	弹性模量 E (达因/厘米 ²)	泊松比 γ	粘性系数 η (Pa·S)
完整介质	0.85×10 ¹²	0.25	0.4×10 ²⁶
积累单元	0.29×10 ¹²	0.22	0.6×10 ²⁴
调整单元	0.80×10 ¹¹	0.30	0.4×10 ²³

5.2 计算结果

本文的目的是讨论积累单元、调整单元和场区调整单元应变随时间的变化特征和差异。下面介绍计算结果。

5.2.1 模型 I 计算结果

表2列出了场区调整单元450、积累单元456和场区断层464(物质同积累单元)在 X 轴方向上的正应变随时间的变化。

表2 正应变随时间的变化表

X 方向 单元号	30年	31年	32年	33年	34年	35年	36年	37年	38年
450	-0.1948 ×10 ⁻⁴	-0.91204 ×10 ⁻⁴	-0.40233 ×10 ⁻³	-0.7046 ×10 ⁻³	-0.97386 ×10 ⁻³	-0.12684 ×10 ⁻²	-0.1622 ×10 ⁻²	-0.19146 ×10 ⁻²	-0.22177 ×10 ⁻²
464	0.27816 ×10 ⁻³	0.21620 ×10 ⁻³	0.14496 ×10 ⁻³	0.75258 ×10 ⁻⁴	0.93356 ×10 ⁻⁴	-0.59934 ×10 ⁻⁴	-0.13524 ×10 ⁻³	-0.20594 ×10 ⁻³	-0.27566 ×10 ⁻³
456	-0.25444 ×10 ⁻⁴	0.12951 ×10 ⁻²	0.26165 ×10 ⁻²	0.39355 ×10 ⁻²	0.52430 ×10 ⁻²	0.6559 ×10 ⁻²	0.78914 ×10 ⁻²	0.92096 ×10 ⁻²	0.10528 ×10 ⁻¹

从表2可以看出:在同一时刻应变的绝对值大小次序为:积累单元456、场区调整单元450、场区断层464,其中场区450单元虽然初始应变很大,但其绝对值增加慢(与积累单元比较),再加上450号单元介质强度较弱,因此,该单元不具备发生地震的条件。场区断层464号和积累单元456号具有相同且较高的介质强度,因此,它们具备了发生地震的物质条件。但比较两单元的应变会发现:在同一时刻,456号单元应变的绝对值明显大于464号单元,而464号单元应变率较小(456号单元的应变率量级为10⁻³/年,而464号单元应变率量级绝对值为

10⁻⁵/年),所以我们认为464号单元不会发生地震。

456号单元和464号单元的主要区别在于,456号单元两端有调整单元而464号单元没有。因此我们可以认为震源端部的调整单元具有使应力在积累单元集中的作用。这就使我们看到了调整单元对孕震以至发震的重要作用。

地震孕育和发生乃是应变能的积累和释放的过程。调整单元的调整运动的结果使得积累单元积累起较大的应变能。地震发生时调整单元又起到了让位和止裂的作用。以上这些仅靠积累单元是难以实现的。因此,组合模式是符合实际的孕震模式。

下面分别介绍不同性质单元的正应变 ϵ_x 随时间 t 的变化曲线。

5.2.1.1 震前调整单元的 ϵ_x-t 曲线

图4为模型 I 中调整单元的 ϵ_x-t 曲线,均呈线性非线性过程曲线,由于这些单元都先于积累单元破裂,所以其曲线的下降发生在积累单元发震前,故曲线呈准“ λ ”型(本文作者命名,此类图形在过峰值以后发生大地震)。

5.2.1.2 震前积累单元的 ϵ_x-t 曲线

如前所述,积累单元为456和505。图5给出了它们的 ϵ_x-t 曲线。可以看出它们也呈线性和非线性过程曲线,但由于它们后于调整单元破裂, ϵ_x-t 曲线呈“ λ ”型,大地震发生在 ϵ_x-t 曲线的高值处。

在积累单元505一侧有503和504单元,可以看出它们的 ϵ_x-t 曲线非线性程度较高,并随着离断层距离的增大 ϵ_x 值减小, ϵ_x-t 曲线的非线性程度亦减小。

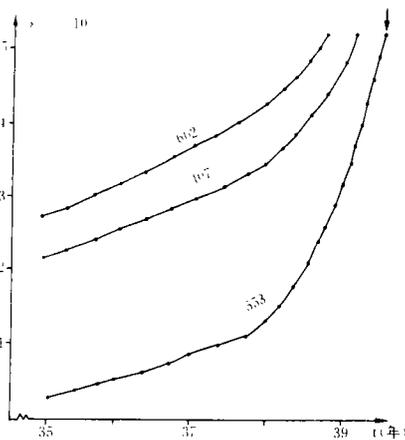


图4 模型 I 中各调整单元的正应变随时间变化曲线(图中数字为单元号,虚线箭头为调整单元破裂)

Fig. 4 The curves of variations of normal strain with time for adjustment elements in model I.

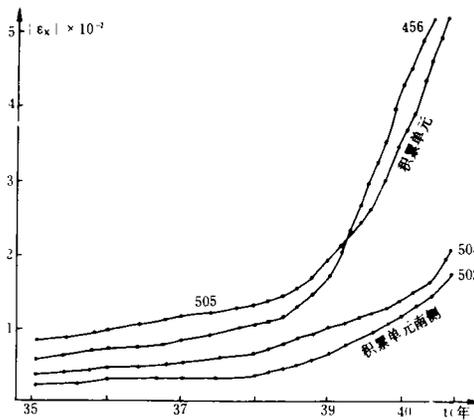


图5 模型 I 中积累单元及附近点的 ϵ_x-t 曲线(图中数字为单元号)

Fig. 5 The ϵ_x-t curves of accumulative elements and nearby points in model I.

5.2.1.3 震前沿断层走向上单元的 ϵ_x-t 曲线

图6为调整单元407和附近的几个单元的 ϵ_x-t 曲线。由图可见,其震前非线性程度在断层走向上最高,在垂直于断层面走向方向上应变衰减很快。如407单元位于积累单元端部,其应变较高,它的 ϵ_x-t 曲线非线性程度亦高;而位于其西北侧的408单元(垂直于断层走向)上的

应变较小且 ϵ_x-t 曲线非线性程度较小。又如308、310、357、359单元,这些单元介质已属完整介质且位于沿断层走向上,它们的 ϵ_x-t 曲线与407号单元类似。这些单元离震中已达170km至245km左右。沿断层方向上其它单元的应变已经非常小,以至无法在图上画出。由此可推断出7.1级地震的前兆半径可达250km左右。

从计算结果可以明显看出,沿断层走向方向上应变较大,而垂直于断层走向方向上应变衰减很快。因此,观测点的方位对 ϵ_x-t 曲线影响较大,在垂直于断层走向上,即使靠近震源,应变值也不大,如408单元。

5.2.1.4 震前场区某些单元 ϵ_x-t 曲线

图7画出了场区断层的 ϵ_x-t 曲线,其中450号单元介质同调整单元,464号单元介质同积累单元。由图可见:它们总的应力水平平均很低,看不出非线性过程,但场区450单元(调整单元介质)的应变略高于464单元的应变。

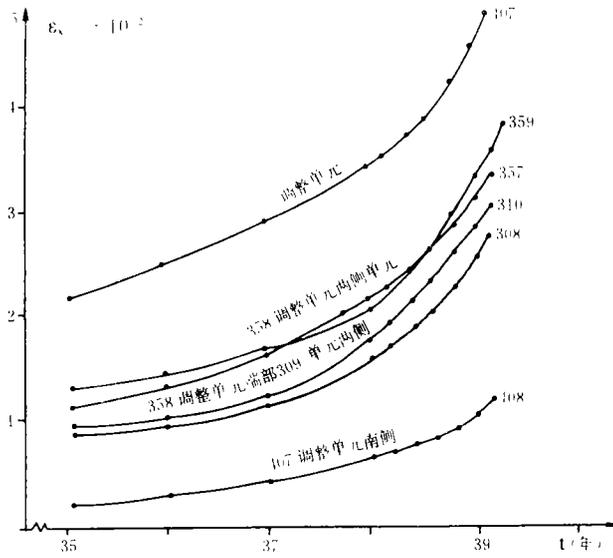


图6 模型 I 调整单元(407)及附近的几个单元的 ϵ_x-t 曲线

Fig. 6 The ϵ_x-t curves of the adjustment element 407 and nearby elements in model I.

图8为调整单元602及附近单元的 ϵ_x-t 曲线。完全可以得到与图6相同的结论。

5.2.2 模型 II 的计算结果

由于篇幅所限,没有给出模型 II 的计算结果。对模型 II 的计算结果进行分析,完全可以得到与模型 I 相似的结论,但有如下两点差别:

(1) 临震前积累单元和调整单元 ϵ_x-t 曲线比模型 I 出现了更剧烈的非线性变化。这可能是模型 II 场区缺少调整单元,从而导致震源区和震源端部应力更为集中引起的。

(2) 模型 II 的非线性范围(前兆范围)比模型 I 大,其前兆半径大约350km。这与震级大有一定的关系。

应该说明的是震后情况未作计算,主要是震后应变迅速恢复是众所周知的事实。

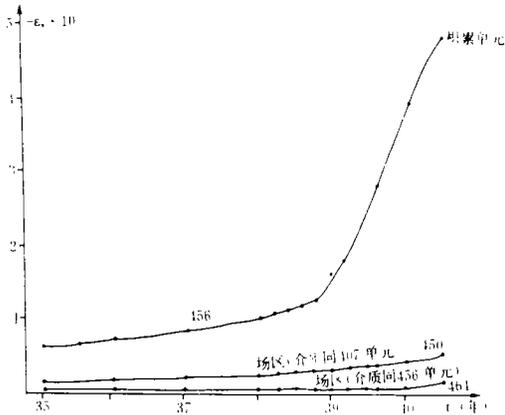


图7 模型 I 场区的应变曲线与积累单元的比较

Fig. 7 The comparison of strain curve in field region and that of accumulative element for model I.

6 几点结论和有关问题讨论

6.1 几点结论

(1)调整单元首先破裂,其应变随时间变化曲线呈准“ λ ”型(本文作者命名,这类图形地震发生在尖峰后),因破裂后应变被释放, ϵ_x 值迅速下降,大震发生在 ϵ_x 略有恢复处。

(2)积累单元在调整单元破裂后破裂,其应变随时间变化在调整单元破裂后还继续增长,故 ϵ_x-t 曲线呈“ λ ”型。

(3)沿断层垂直方向上应变衰减很快。大多衰减一个量级,且 ϵ_x-t 非线性程度低。而沿断层走向上衰减很慢。

(4)场区各单元的 ϵ_x-t 曲线基本上表现为线性,且应变值较小,但在场区调整单元附近的单元其应变水平高于场区类似于积累单元介质性质的单元。说明应变与介质条件是密切相关的。

(5)模型 II 的研究表明,如果场区没有弱介质区,则震源附近调整单元端部应力集中更明显,从而应变随时间的非线性增长比模型 I 更高。

6.2 有关问题讨论

6.2.1 临震前调整单元相互作用形成非线性正反馈

在本文的计算中由于在震源端部设置了调整单元,因此每次迭代过程中隐含了调整单元之间的相互作用。组合模式中调整单元之间的相互作用是正反馈性质的。因此前面列举的曲线非线性部分与上述调整单元之间的相互作用机制是有关的。正是由于调整单元之间的相互作用,最后促使应力积累单元发生破裂和错动,调整单元之间的相互作用正反馈机制是震源发震的重要条件。

6.2.2 关于调整单元 ϵ_x-t 曲线准“ λ ”型、积累单元“ λ ”型的讨论

计算结果表明,调整单元比积累单元有更大的应变且岩石强度低,因而调整单元首先破裂错动。这就相当于积累单元的调整单元演变为二个裂纹,而裂纹端部的应力集中使积累单元应力、应变迅速增大,从而使应变出现了更大的非线性,大震随即发生。因此,调整单元出现准“ λ ”型,并在尖峰略有下降处发生大震,而积累单元出现“ λ ”型,并在“ λ ”型尖峰处发生大震。

在实际震例中,场区有时也出现“ λ ”型,例如某些蠕滑断层在蠕滑前、蠕滑时和蠕滑后的位移时程曲线类似于“ λ ”型。但它们与积累单元和调整单元的时程曲线是不能比拟的,前者时间过程短,而后者时间过程是很长的。在分析实际前兆时应注意区别。当然自然界的介质

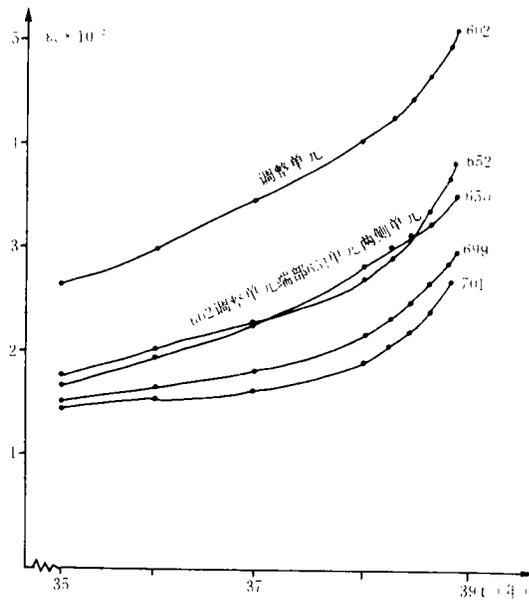


图8 模型 I 中调整单元602及其附近点的 ϵ_x-t 曲线

Fig. 8 The ϵ_x-t curves of adjustment element 602 and nearby points in model I.

状况和应力分布比本模型更为复杂,因此,前兆的形态也将更复杂,但是积累单元、调整单元以及场区的时程曲线为“ λ ”、准“ λ ”型和非“ λ ”型(线性型和其它类型)仍然是判别源场前兆的重要准则。

本论文从题目的确定到完成都是在导师——秦保燕研究员指导下完成的。郭增建先生多次阅读全文并给予指导。作者曾多次以信函方式请教宋惠珍老师有关问题。高树心老师帮助修改了英文摘要。作者在此表示诚挚的谢意。

参考文献

- 1 郭增建,秦保燕. 临界乳光和“ λ ”型在地震预报中的重要意义. 西北地震学报,1992,14(1):78
- 2 秦保燕,郭增建. “ λ ”型在地震预报中的应用前景. 内陆地震,1993,7(4):309—318
- 3 于禄,等. 相变和临界现象. 北京:科学出版社,1984
- 4 郭增建,秦保燕,李革平. 未来灾害学. 北京:地震出版社,1992

THE DIFFERENCE BETWEEN STRAIN PRECURSORS WITHIN SEISMIC SOURCE AND SEISMIC FIELD REGIONS AND ITS APPLICATION TO EARTHQUAKE PREDICTION

Li Qicheng

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000*)

Abstract

In this paper, on the basis of the combination pattern, author calculates two models by using the 3-D finite element method. The major conclusions are: (1) The adjustment element fractures firstly before the strong earthquake takes place, variation of strain with time is a quasi-lambda curve. (2) The accumulative element will fracture after the adjustment element fractures, variation of strain with time is a lambda curve. (3) The strain attenuates quickly along the perpendicular direction of fault strike, but slowly along the fault strike. (4) The situations of the elements in a seismic field region are very complex, and their strain changes with time are non-lambda curves. Finally, some seismic events about lambda-pattern are presented, and some precursory phenomena are interpreted by using conclusion (1).

Subject words: Combination pattern, Three-dimension model, Finite element modeling, Phase change, Strain