

新疆伽师地区地应力的 GPS 损伤模拟研究^{*}

张永志¹, 朱桂芝¹, 王 琪²

(1. 中国地震局第二地形变监测中心, 陕西 西安 710054;

2. 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 采用几何损伤理论和方法推导了地壳存在不同方向和大小的断层时的有效应力的公式, 讨论了利用几何损伤理论来分析和计算地壳中存在不连续断层的理论和方法, 同时对中国新疆伽师地区的地应力变化用几何损伤理论和方法结合该地区的 GPS 资料进行了数值计算研究, 通过比较计算结果与 1997 年 1 月至 1998 年 12 月发生在该地区的 $M_s \geq 5.0$ 地震活动可以看出, 新疆南部的中强地震活动区主要在应力场变化激烈的地区。

主题词: 应力; 地震活动性; 全球定位系统; 新疆; 损伤理论

中图分类号: P315.72⁺7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2000)04-0386-04

0 引言

地壳运动是地壳这个复杂介质在各种力源的综合作用下的一种响应, 外因(力的大小、方向等的变化)是地壳运动和变形的条件, 内因(地壳介质本身包含的介质参数在空间的分布变化, 如介质中所含裂纹的大小、深浅、走向等)是地壳运动和不均匀形变的根据, 因此, 内因对地壳的运动和形变起着至关重要的作用。如在地壳的运动和形变过程中, 当地壳的某些局部位置存在着缺陷(如大小不同的断层等)时, 这些缺陷使得地壳的部分介质不承受应力或承受应力的能力降低, 从而在其附近的某些局部位置的介质中形成应力、应变和能量的集中区。当这些集中在地壳某局部位置的应力、应变和能量等超出该局部位置介质所能承受的极限时, 地壳发生破裂, 释放出能量, 从而使地壳的运动和变形达到一种新的应力、应变和能量的平衡。地震是伴随在地壳运动和变形过程中的一种自然现象, 而且大部分中强地震都发生在断层分布复杂和地壳运动激烈的地区。为此, 就要研究这些在地壳演变过程中形成的断层分布对现今和将来地壳运动和变形的影响, 达到认识孕震、地震、地壳形变变化和利用大地测量资料来预报地震的目的。由于分布在地壳中的断层对地形变变化的影响相对于断层的几何尺度来讲是极其微小的, 在实验室条件下无法获得与实际地壳运动和变形相应的结果, 因此, 必须进行野外观测实验。为了认识这些在地球表面观测到的地壳运动和地壳形变的机制, 了解实际地壳在地质尺度下变化的物理过程, 需要建立一个适当的地壳运动和地壳形变模型, 并进行外因(力)变化和内因(介质状态)变化的数值模拟以了解内部存在断层的块体周边受力条件一定的情况下应力场的空间分布随时间的演化过程。这对于理解这些地面大地测量观测要从事 GPS 等大地测

收稿日期: 1999-05-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(49774214); 中国地震局“九五”科技攻关项目(96-913-07)

作者简介: 张永志(1961—), 男, 贵州人, 高级工程师 博士生, 主量资料的反演与解释工作。

结果的变化分布与观测地区的中强地震的孕育和发生的关系具有极其重要的意义.

1 理论和方法

1.1 损伤张量的定义

损伤力学理论是研究物质不可逆破坏过程的科学, 前苏联塑性力学家钱卡洛夫在 1958 年研究蠕变断裂时, 第一次引进损伤因子的概念, 直到本世纪 70 年代后期, 损伤概念才开始受到多方面的重视, 国外一些学者采用连续介质力学方法将损伤因子推广为一种场向量^[1]. 几何损伤理论是日本学者村上澄男和大野信中等人提出的^[2], 川本兆万等在利用损伤力学理论研究岩体时, 发现岩体中存在大量地质缺陷, 如断层、节理、裂缝等不连续现象, 因此提出了岩体中存在大量地质缺陷时的一系列理论和计算方法^[3]. 几何损伤理论建立在如下假设的基础上: ① 断层(裂纹)都是平面断层(裂纹); ② 地质块体由许多无损伤块体组成, 断层存在于块体的边界上并沿着这些边界扩展. 设 V_1 和 V 分别表示地质子块体和地质块体的体积(图 1).

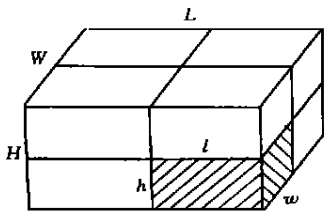


图 1 地质块体有效表面面积
Fig. 1 The effective area on surface of a geological block.

定义地质块体的总有效表面面积为

$$A = 3 V^{2/3} (\frac{V}{V_1})^{1/3} = 3 \frac{WLH}{(wlh)^{1/3}} \tag{1}$$

设块体 V 中有 N 条断层, 第 k 条断层的面积为 A_k , 其法矢量为 n_k . 对于第 k 条裂缝而言, 裂缝的面积密度可写成

$$D_k = \frac{A_k}{A/3} \tag{2}$$

于是, 对于这条裂缝的损伤张量可定义为

$$D_k = \frac{(wlh)^{1/3}}{WLH} A_k (n_k \otimes n_k) \tag{3}$$

将所有的 N 条裂缝都代入式(3)可以得到岩体 V 中的损伤张量

$$D = \frac{(wlh)^{1/3}}{WLH} \sum_{k=1}^N A_k (n_k \otimes n_k) \tag{4}$$

因为损伤张量 D 是实对称张量, 所以有 3 个实特征值和 3 个正交主轴.

1.2 地壳损伤张量的计算

要测量研究区域内式(4)中所有的 A_k 和 n_k 是不可能的, 只能获得研究区域内地面断层的分布. 如图 2 所示: 设研究区域内第 i 单元地壳的长、宽、厚分别为 l 、 w 、 h .

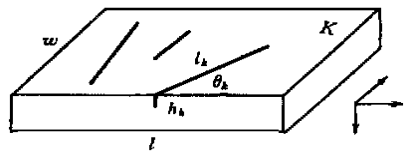


图 2 损伤张量的计算
Fig. 2 The geometry damage vector model.

该单元的体积为

$$V_i = lwh \tag{5}$$

该单元内第 k 条断层的面积为:

$$A_k = l_k h_k \tag{6}$$

式中: l_k 、 h_k 分别为第 k 条断层的长度和深度. 该条断层引起的损伤张量主值定义^[4] 为

$$D_k = \frac{l_k h_k}{lwh} \tag{7}$$

第 i 单元第 k 条断层引起的二维损伤分量为

$$D_k^i = \begin{bmatrix} D_k \cos^2 \theta_k & D_k \cos \theta_k \sin \theta_k \\ D_k \sin \theta_k \cos \theta_k & D_k \sin^2 \theta_k \end{bmatrix} \tag{8}$$

第 i 单元数条断层引起的总损伤分量为

$$\boldsymbol{D}^i = \sum_{k=1}^N \boldsymbol{D}_k^i = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N \boldsymbol{D}_k \cos^2 \theta_k & \sum_{k=1}^N \boldsymbol{D}_k \cos \theta_k \sin \theta_k \\ \sum_{k=1}^N \boldsymbol{D}_k \sin \theta_k \cos \theta_k & \sum_{k=1}^N \boldsymbol{D}_k \sin^2 \theta_k \end{bmatrix} \quad (9)$$

1.3 二维有效应力张量和本构关系

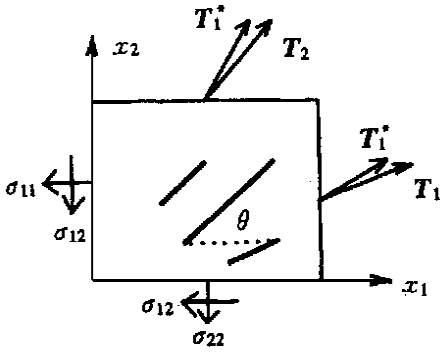
如图 2 所示, 在单元内存在任意方向的断层分布时, 单元内的总损伤张量可由式(7)、(8)和(9)求得. 根据损伤力学理论^[4](图 3), 有效应力分量为

$$\bar{\sigma}_{k,l} = \frac{\sigma_{k,l}}{I - \boldsymbol{D}_{k,l}^i} \quad (10)$$

式中: I 为单位矩阵. 图 3 中 $\boldsymbol{T}_i$ 和 $\boldsymbol{T}_i^*$ 分别表示由 $\sigma_{k,l}$ 和 $\bar{\sigma}_{k,l}$ 计算的面力矢量.

存在任意裂纹分布的单元地壳的本构关系为

$$\bar{\sigma}_{k,l} = E_{k,l,i,j} \epsilon_{i,j} \quad (11)$$



由式(10)和(11)可以看出, 有效应力的增加等效于将断层介质的强度取得相对于周围的介质软弱一些, 但由于损伤张量是随时间和断层的扩展而变化, 而不是一相对较小的介质常数, 因此, 二者在物理意义上存在本质的区别. 由于每个单元地壳中分布断层的大小和方向不同, 如果断层表面是光滑的, 则断层不能抵抗剪应力, 然而, 断层的表面常常是粗糙的或填充了其它物质, 剪应力不是直接传递, 有效损伤修正为 $(I - C_t \boldsymbol{D}_{k,l}^n)$. 另一方面, 垂直于断层的拉应力不能被传递, 压应力的有效修正为 $(I - C_n \boldsymbol{D}_{k,l}^n)$. 式中 C_t 、 C_n 是 0 ~ 1 变化的系数. 因此, 每个单元具有不同的本构关系, 地壳在受损情况下承受的实际应力比原来大得多, 容易在断裂附近的局部位置形成形变、应力和能量的集中区.

图 3 有效应力(应变)张量的计算
Fig. 3 The relationship between effective stress and real stress vector.

2 新疆伽师地区的断层和构造分布

中国新疆伽师地区的地质构造和断层分布如图 4 所示^[5]. 伽师地区西南部的地质构造主要有北西向的西昆仑北缘断裂、阿格勒达坂断裂等, 北部有北东向的托特拱拜孜和柯坪断裂等, 主要地震活动集中在这 2 种分布的断层上, 特别是在这 2 组断层汇合处附近的喀什、伽师等地区, 地震活动更为激烈. 为研究该地区的地震活动, 建立了 GPS 观测网(图 4). 为分析含有不同方向裂纹群块体在受力时的应力场变化分布, 以东为 x 轴, 北为 y 轴, 喀什为坐标原点建立了直角坐标系, 并按矩形划分有限单元网格, 将每个子网格内的断层的起点坐标分别量出, 采用平面公式

$$l_i = \sqrt{(y_{2i} - y_{1i})^2 + (x_{2i} - x_{1i})^2}$$
$$\theta_i = \arctan \frac{y_{2i} - y_{1i}}{x_{2i} - x_{1i}} \quad (12)$$

计算断层的长度和方位.

3 有限元数值模拟结果与地震活动分析

为了分析在内部存在断层分布的实际地质块体在边界力作用下的应力场分布, 采用有限

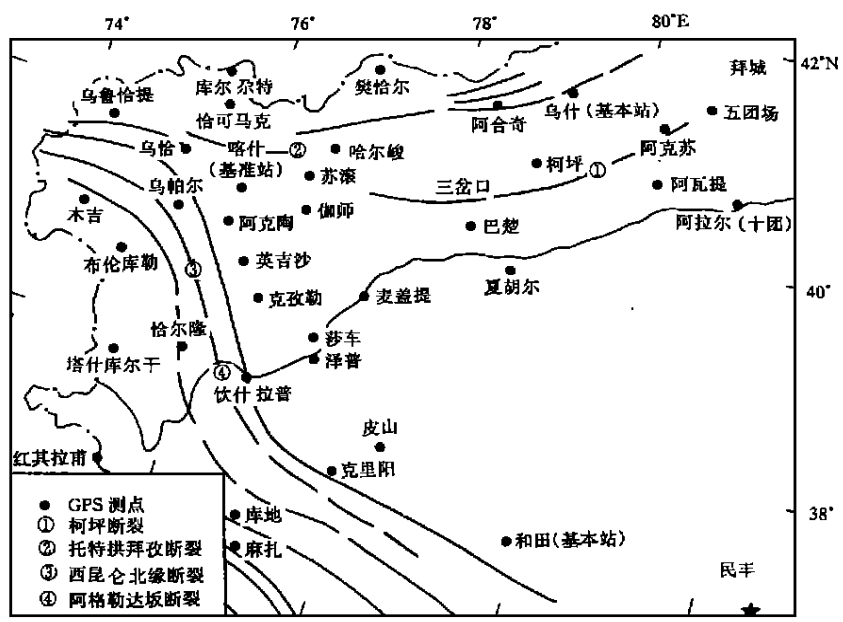


图 4 新疆伽师强震活动区的地质构造与 GPS 站点分布

Fig. 4 The Distribution of GPS network and faults in Jiashi area, Xinjiang.

元法以 GPS 观测的位移场变化为边界条件对中国新疆伽师地区的应力场变化进行了数值计算. 在计算中, 取断层深度为地壳厚度的 1/2 分别按式 (9) 计算各单元的损伤分量. 采用 GPS 观测的年位移场变化作为已知节点位移, 按式 (10) 计算了有效应力变化. 根据新疆伽师地区东西方向应力、南北方向应力和剪应力变化等值线与地震活动分布的比较可看出, 伽师地区的东西方向应力场大小变化在地震活动激烈地区附近明显大于其它地区; 伽师地区南北方向的应力场和剪应力变化在地震活动激烈地区附近也明显大于其它地区. 这种应力场的变化可能与该地区的地震活动有关.

4 结论与认识

- 由理论分析、数值计算结果与伽师地区地震活动性的比较分析可以得出如下几点认识:
- (1) 地壳的运动和变形是地壳介质在各种力源的综合作用下的一种响应, 内因起着至关重要的作用. 断层附近的单元, 由于断层的存在, 这些缺陷使得地壳的部分介质不承受应力, 当受到周边应力作用, 在其附近容易形成应力、应变和能量的集中区, 从而使得断裂附近容易发生地震.
 - (2) 损伤模型考虑了断层分布对应力场变化的影响, 比传统的弹性模型更接近地壳的实际情况.
 - (3) 从伽师地区的应力场变化与地震活动分布比较看出, 伽师地区的中强地震活动主要发生在应力场变化激烈的地区, 这种应力场的变化可能与该地区的地震活动有关.

THE DISTRIBUTION OF SHEAR STRESS AND AN ANALYSIS ON SHORT-TERM SEISMIC TREND IN GUANZHONG REGION OF SHAANXI PROVINCE

WANG Ya-xiu, LI Bo, LI Shao-rui

(*Seismological Bureau of Shaanxi Province, Xi'an 710068, China*)

Abstract: According to the relation between the peak velocity and the tectonic shear stress, a preliminary estimation of shear stress distribution in Guanzhong region of Shaanxi province is made by using data of small earthquakes from Xi'an digital seismic network. The results show that the shear stress level is lower in central area of Guanzhong and the possibility of large earthquake in this area is lower than the other areas. The areas with relatively higher stress level are Hancheng in northern Guanzhong, Baoji-Qianyang in the western part and Dali-Huayin in the eastern part. In these areas, there exists the potential of earthquake with magnitude about 5.

Key words: Shaanxi; Digital seismic network; Stress; Seismic trend

(上接 389 页)

- [1] 吴鸿遥. 损伤力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [2] Murakami S. Mechanical modeling of material damage[J]. Journal of Applied Mechanics, June 1988, 49—55.
- [3] Kawamoto T, Ichikawa Y, Kyoya T. Deformation and fracturing behaviour of discontinuous rock mass and damage mechanics theory[A]. Theme/ Feature Paper, Int. J. For Numerical and Analysis Methods In Geomechanics[C]. 1988, 12; 1—30.
- [4] 楼志文. 损伤力学基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- [5] 丁国瑜, 蔡文伯, 于品清, 等. 中国岩石圈动力学概论[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [6] 唐春安, 傅宇方, 赵文. 震源孕育模式的数值模拟研究[J]. 地震学报, 1998, 19(4): 337—346.
- [7] 牛志仁, 陈党民, 李炳乾. 唐山大地震孕育过程的数值模拟研究[J]. 地震学报, 1998, 19(4): 347—358.

ON SIMULATION OF EARTH STRESS IN JIASHI AREA, XINJIANG, BY DAMAGE MECHANICS MODEL WITH GPS DATA

ZHANG Yong-zhi¹, ZHU Gui-zhi¹, WANG Qi²

(1. *The Second Crustal Deformation Monitoring Center, CSB, Xi'an 710054, China;*

2. *Institute of Seismology, CSB, Wuhan 430071, China*)

Abstract: The effective stress formula of the earth crust having the faults with different direction and size is deduced by geometry damage theory and method, and the theory and method to analyze and compute the uncontinuous faults in the earth crust by geometry damage theory is discussed. At the same time, the earth stress variation in Jiashi area, Xinjiang, is computed by geometry damage theory with GPS data. Comparing the computed results with $M_s > 5.0$ earthquake activities in the region from Jan. 1997 to Dec. 1998, it is seen that modern strong earthquakes in the south of Xinjiang mainly occurred in the region where the stress field variation is very large.

Key words: Stress; Seismic activity; GPS; Xinjiang; Damage theory