15-21

Vol. 19 No. 1 March 1997

维普资讯 http:

.cqvip.com

组合震源模式的数值模拟研究* ? 315-8

傅宇ン (东北大学, 沈阳 110006)

摘要 针对随机介质模型和组合震源模型,应用二维网络系统有限元数值模拟方法,研究了微震的空间和时间分布序列及震致-频度关系。结果表明,微震从起初随机无序的空间分布状态逐渐向临震前主震源区域集中,呈现有序分布迁移,前兆具有 "先外围,后震中"的传播神征。此外,震级-频度的线性关系只近似存在于中等震级 范围内,对于高震级与低震级都有很大的偏移。

主题词: 组合模式 数值模拟 有限元分析 震級-頻度关系

她爱,震源

1 引言

地震过程的复杂性已为地震研究和预报的长期实践所证实^[1]。在用数值模拟方法研究 地震动力学过程及活动性规律方面,我国学者进行了大量的研究工作,得到了前震、主震、余震 等活动性规律、各种震源参数之间的相互关系、地震的统计特征及复杂性等成果^[1~4]。耿鲁 明等利用相互并联的多个非线性单元的相互串联的滑块模型研究了断层带的地震活动性,模 拟出与实际地震目录相似的地震目录图象^[1]。张国民等利用有限元数值模拟方法研究了观 测点与地震短临前兆的关系,进一步阐明了地震前兆的复杂性^[2]。石耀霖等则运用有限元方 法对地震的膨胀性现象进行了分析^[3]。梅世蓉等曾针对唐山地震利用不同阶段时岩石不同 的物性参数来模拟膨胀现象及断层的蠕动^[4]。以上各种研究都基于空间单元材料性能确定 性假定,对地震所产生的物理现象及前兆进行了研究,并未对震源形成机制作深入的探讨。根 据地质材料介质随机、离散的特点,本文利用有限元数值模拟方法,对单元力学性能进行随机 赋值,得出了郭增建等提出的组合震源模型^[5]的形成过程、微震的时空分布及震级-频度关系。

2 组合震源模式的建立

根据郭增建在 1973 年首次提出的组合**震源模式**,首先对一个地质材料二维网络进行划分 和赋值。网络划分成 m×n个等面积正方形单元,这样的单元划分处理比较简单,可以节约机 时,完全能满足本研究工作的精度要求。

一般地质材料经过漫长的地质运动,不可避免地存在数量不等的缺陷,从而造成其弹性模量、强度等力学参数在空间分布上具有强烈的非均匀性及随机性。如果单纯用确定性的赋值 方法难于实现这一要求。而这种微观单元参数的非均匀性及随机性可以用一个统计分布函数

^{*}国家自然科学基金资助项目、

第一作者简介:陈忠辉,男,28岁,博士生,现从事岩石失稳机理和地震预报研究. 本文 1995年11月15日收到,1995年12月2日收到修改稿.

ţ

ł

来描述,此统计分布可以是正态分布、泊松分布以及韦布尔分布等。结合前人的经验及实验的结果,本文采用韦布尔统计分布形式。在宏观上单元的力学参数可以服从一个统计分布函数,但在微观上就显得随机与无序。这种微观空间上的随机与无序可以运用 M. Shinozuky 对材料性能赋值的一种概率模型加以实现^[6]。

图1 是组合震源模型的赋值示意图,根据震源 组合模式的定义,本模型采用4 800 个单元(80 · 60)。椭圆形 A 区域为应力积累单元,长短轴比为 10:3,其平均强度比周围介质强度高40%,弹性模 量略高20%。A 区域两端的应力调整单元也采用 椭圆形区域贯通整个网络,长短轴比为24:1,其平 均强度为周围介质的70%,弹性模量为80%。因为 介质参数的赋值具有随机的特点,因而应力积累区 域与应力调整区域和周围介质没有明显的界限。

本文采用的有限元微观单元的本构关系虽然属 于线弹性范畴,但网络宏观本构关系却显示出明显



图 1 模型强度的赋值示意图 Fig 1 A sketch showing elements strength.

的非线性结果。正如唐春安所提出的"岩石类脆性材料的宏观非线性并不是微观层次上的非 线性所造成的,其真正原因可能是材料微观层次上的非均匀性。^[7]"如极均匀的玻璃材料在宏 观上就表现出线性特性,而裂隙较发育的岩石的本构关系的非线性程度就较大。

计算采用反复迭代的方式,在一定的边界条件和单元体破坏规则下,由有限元计算应力场 来确定破裂的单元。本文采用的边界条件为低围压下逐级加载压缩方式,单元体的破裂规则 为最大极限应变准则,即当单元体所受的应力达到其应力强度时单元破坏。当单元破裂后,内 边界条件发生改变,需要重新求解应力场方程。为确保介质的连续性及有限元的顺利求解,假 定破裂的单元继续存在只是弹性模量和强度急剧下降,这样人为弱化破裂单元的做法,在有限 元计算中得到较满意的结果,这样不断重复求解直至到稳态。缓慢改变外边界条件,一次次重 复上述过程,直至材料宏观断裂为止。

有限元计算过程如下:对于一个确定的网络,在给定的外加位移下,计算每一个单元体的 应力,如果其中有超过阈值的,则令 *P*/*P*。最大的单元体破裂,*P*,*P*。分别为单元体的变形值和 变形阈值。然后重新计算每个单元的变形,以确定下一个应破裂的单元,如此重复,直至所有 的单元的变形均小于阈值,然后再增加外界位移。

3 计算结果

在 DX66-486 微机上借助于课题组最近完成的岩石破裂失稳过程分析(RFIPA)有限元新程序进行了数值模拟运算。结果不仅得到了网络宏观应力-应变曲线、单元应力、变形状态的时间进程,而且给出了它们的空间分布图象。更重要的是,通过模拟得到了微震的空间迁移规律,形象地证明了组合震源模式"先两头、后中间"的前兆规律。

3.1 宏观应力-应变曲线

图 2 是计算得到的整体网络宏观应力-应变曲线。虽然微观程度上每个单元从加载初期 直至破裂始终处于弹性阶段,但宏观的应力-应变曲线却呈现出明显的非线性特征。即使单元 参数的统计分布不变,而单元参数在空间分布上发生了改变,计算结果表明其宏观的应力-应 变曲线也会产生变化。图中应力-应变曲线出现的第一次应力降是由于应力调整单元大量破



图2 网络整体的宏观 应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of the whole network.

裂的结果。而此时积累单元并未破裂可继续承载。当外界再加载,应力升高直至积累单元大量破裂,出现第二次大的应力降。当然此次应力降到几乎为零是由于网络整体破裂的结果,与实际地震有一定的差距,因为实际地震时地壳应力不可能一下降为零。

3.2 震级-频度关系

为了与实际地震进行类比,模拟中的每个单元上的应力 超过其极限强度后释放能量,参照实际地震震级与能量的关 系,其震级用下式来表示:

$$A_i = C + \log(\frac{1}{2}E_i\varepsilon_i^2) \tag{1}$$

式中 E, 为第 i 个单元的弹性模量, e, 为第 i 单元破裂时的应变, 而 M, 为第 i 个单元对应的震级, C 为一常数。在边界位移的逐渐加载过程中, 一个单元破裂后, 将导致其周围单元应力不同程度的增加而超过其破裂强度, 造成多个单元的同时破裂, 那么空间位置上相邻单元的同时破裂, 可以被认为是一个大破裂, 即一次大震, 其释放的能量等于各破裂单元所释放能量的总和。

图 3 是计算过程中对整个模拟时段不同震级间 隔内微震个数统计所得出的 lgN-M 曲线。从图中 可看出曲线并不满足古登堡和里克特的著名 G-R 线性关系式,在高震级和低震级段都发生了偏移。 这种现象在实际地震过程中也存在。对于高震级的 偏移可能由于尺度效应的影响,使大尺度地震与小 尺度地震在机制上存在一定的差异^[1]。而对于低 震级端的频度分布偏移从多次模拟结果来看并不是

偶然现象,因此被李全林称为小震级端频度"低头"现象显然并不是一些学者所提出的实际地 震中漏记原因^[8],虽然对于震级-频度线性关系的偏移规律在实际地震中存在,并且模拟结果 也证实了这一点,但是其产生的机理尚不明确,需进行深入的研究。

3.3 微震的时间序列

如果把一个单元的破裂假定为一次微震,那么微震在 模拟整个时段内的序列可以由计算而得。图3就是计算得 到的微震时间序列曲线。单元参数的变化对微震时间序列 的影响很大。尽管所计算的模型比较简单,但计算结果仍 然显示出有关前震、主震及余震的明显特征。主震前的前 兆特征随着单元参数空间分布的变化而显得不明显,从模 拟结果看主震前没有统一的前兆规律。但模型中表现出主 震的轮回现象及主震前的平静期现象很明显(图4)。

3.4 微震的空间迁移特征

引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
引
日
4
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(
(

Fig. 4 Simulation of microquake time sequence.

RFIPA 程序的一个显著特点就是它能给出应力、应变及微震的空间分布图象。图 5 和图 6 是组合模型计算结果经处理后给出的应力、应变及微震的空间分布变化图。图 5a 和图 6a 是 各单元应力、应变的空间分布变化进程图。与等应力线和等位移线的表示方法不一样,此处是



图3 震级-频度关系的模拟结果

Fig.3 Simulation of frequence-magnitude relation.

直接将单元的变形和应力状态表示出来,以便用来分析与应力、应变有关的前兆和应力场的迁移特征。图中的网格变化反映了单元的变形状态,网格越扁表示变形越大。而单元的亮度大小直接表示了按强度准则归一化后的应力相对大小。单元越亮,表明其越临近破坏。单元一旦破坏,其颜色变黑。这种图象表示方法不仅可以反映出已经产生破坏的单元的空间位置,而且可显示出应力场的迁移状况,从而可以预料未来产生破坏的潜在区域。



图 5 微震的空间分布图象模拟结果 Fig. 5 Simulation of spatial distribution of microquakes. a 各单元应力、应变的空间分布; b 微震的空间分布

图 5b 和图 6b 是微震的空间分布图,图中的圆圈既代表发震的位置,其直径大小又可以代 表微震的震级大小,为了分清每一步微震的多少,白色圆圈代表当前步的微震分布,而黑色圆 圈则表示过去所有步微震数量的累积。



图 6 微震的空间分布图象模拟结果 Fig. 6 Simulation of spatial distribution of microquakes. a 各单元应力、应变的空间分布; b 微震的空间分布

4 讨论

由于地震的前兆信息不仅存在于未来的震中区,而且在震中的周边区域也广泛存在,因此 孤立地看待由某一地震台站观测的物理及几何现象的异常而得到的前兆信息是远远不够的, 只有综合考虑广泛区域地震台站的信息,在正确的震源模式指导下,才能对地震作出有效的预 报。由于物质条件所限,现场观测很难得到具有全局性的构造活动及微震迁移的空间图象,面 对这种地震前兆的复杂性,很难用解析的物理模型来解释此种规律。而本文所提出的组合模 型对地震过程的数值模拟方法,不但体现了组合震源模型所表现出前兆规律的一些定性描述,

第19卷

维普资讯 http://www.cqvip.com

而且形象地体现出震源的迁移规律。下面的讨论将具体说明这一点。

4.1 地震空段

地震空段是大震前地震活动的一个重要现象,也是地震时、空、强三要素预报的重要依据 之一。郭增建指出,在组合模型中,地震空区的形成主要是由应力积累单元和应力调整单元联 合作用的结果。主震区的应力积累单元强度、弹性模量均很高,在构造应力作用下不易破坏, 相反应力调整单元由于强度弱而首先破坏,形成小震,把应力转移到承受能力较高的积累单 元。由于调整单元和积累单元的分布和类别的差异,形成的地震空区也就千差万别。本文的 计算结果演示了地震空区的形成过程。图 5 和图 6 中椭圆形线是地震空区的界限,在计算步 数 26 以前,微震很少在此间发生,一般在其周围产生。在计算步数 22~25 之间微震越来越靠 近空区,直到 26 步积累单元整体剪切破坏。

4.2 应力降

在地震活动中,由于形变能量的积累与释放,造成应力降的产生。在主震发生前,只是由 于应力调整单元的破坏,其累积的初始应力一般都不高,由此产生的应力降相应地也不大。随 着调整单元逐渐把应力转移到应力积累单元上,网络整体承受的荷载也就变大。当破坏的单 元在空间位置上越来越接近积累单元时,由于此处的初始应力一般较大,因此在主震前就会产 生较大的应力降,此时调整单元可能要向积累单元扩展,也就是积累单元向失稳阶段发展(图 5、图 6)。

4.3 震中迁移

应力降的产生导致地壳中的应力紧张状态逐步缓解,使地震活动转入平静期。调整单元 由于强度低而首先破坏,在地应力作用下,破坏单元逐渐向积累单元靠近,从而形成大震。这 种微震由于应力的頻繁调整而造成的迁移,就是震中迁移。王仁等早在 1980 年就用数学模型 讨论了我国华北地区的地震迁移问题,得到了与实际相近的规律^[9]。从本模拟结果图 5 和图 6 可看出,微震从 12 步无序分布,逐渐过渡到 18 步时的向应力调整单元呈条带状集中。然后 经过 19~25 步的应力调整,应力全部集中在积累单元上,这可从两图中应力积累单元的亮度 得出,微震从外围向中间发展的趋势也就构成了震中迁移的特征。这同样也显示出前兆在空 间序列上先外围后中间的规律性。

5 结论

本文用组合模式对孕震过程的数值模拟研究从现象上揭示了地震活动的孕育及发展过程 的一些基本特征,所得到的结果,特别是所给出的应力、应变和微震分布的图象,在时、空两方 面使地震全过程的力学物理图象更为清晰,同时也展现出一幅地震孕育过程的复杂图象。虽 然本文仅以平面问题研究了震源深度平面上的孕震过程,但所得的先两头后中间的前兆规律、 地震空段的形成过程等均与实际地震活动规律相近。作为地震前兆主要观测量的异常,本文 未涉及,但这些研究对预报有重要的作用,作者将在另文中作详细讨论。

参考文献

- 1 耿鲁明,石耀霖,张国民,地震活动的简化模型研究,地震,1993,(1):68~75.
- 2 张国民,张永仙,石鋼霖 地震前北复杂性的數值模拟研究,地震,1994,(1):1~11
- 3 石罐菜,张永灿,张国民,孕蕉过程中岩石膨胀及断层蠕动的数值模拟研究,地震学报,1994,(增):10~17.
- 4 梅世蓉,梁北援,唐山地震孕育过程的数值模拟,中国地震,1989,(3):9~17.
- 5 郭增建,秦保蕉,地震成因和地震预报,北京,地震出版社,1979.46~110.
- 6 Shinozuky M, Lence E. A probabilistic model for spatial distribution of material properties. Engen Fracture Mech, 1976, (8):217 ~ 227.
- 7 Chun'an Tang, John A Hudson, Xiaohe Xu. Rock Failure Instability and Related Aspects of Earthquake Mechanisms. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993.
- 8 李全林,于禄,郝柏林,陈锦标.地震频度-震级关系的时空扫描.北京:地震出版社,1979.10~54.
- 9 王仁,何国琦,殷有泉,蔡永恩.华北地区地震迁移规律的数学模拟.地震学报,1980,(2):32~42.

STUDY OF NUMERICAL SIMULATION ON COMBINATION PATTERN OF AN EARTHQUAKE SOURCE

CHEN Zhonghui FU Yufang TANG Chun'an (Northeastern University, Shenyang 110006)

Abstract

Based on the model of stochastic medium and the model of composite focus, the spatial distribution and time sequence of microquakes and the magnitude-frequency correlation were discussed by using finite element numerical simulation in this paper. The results show that the disorder of the spatial distribution of microquakes in initial stage was translated to the order in main-shock stage. The precursors are characterized by the propagation from periphery to center. In addition, the linear relation between magnitude and frequency only exists in the middle magnitude range and very large deviation exists in the high and low magnitude ranges.

Key words: Combination pattern, Numerical simulation, Finite element analysis, Magnitude-frequency correlation