# 南北地震带应力场演变的数值模拟研究

### 曹雪峰<sup>1</sup>, 尹京苑<sup>1, 2</sup>, 杨立明<sup>3</sup>

(1.上海市地震局,上海 200062; 2.中国地震局构造物理开放实验室,北京 100029;
 3.中国地震局兰州地震研究所,甘肃兰州 730000)

**摘要**:应用有限元方法,考虑主要地质构造情况,就粘弹介质状态下南北地震带及其相邻区域的 应力场时空演变过程进行了数值模拟研究.计算了 10万零10年累积载荷作用下模型的应力场 演变,发现在周边板块不断推挤作用下,当整 偷 北带的应力松弛趋于稳定后,带上应力场的总 体扰动大小取决于印度—澳大利亚板块、菲律宾板块和太平洋板块的共同作用.南北地震带上呈 现出的"地震南北呼应"现象,就是区域应力场达到平衡态后,整 偷 北带对外载荷(板块边界力) 作用的总体反应.

关键词:南北地震带;数值模拟;体应力;地震呼应

中图分类号: P315.72<sup>+</sup>7 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2003)03-0221-05

0 引言

南北地震带(经度 99<sup>°</sup>~106<sup>°</sup>E)是我国强震密集发生的地区.1900 年以来中国大陆共发生 7 级以上大 震 59 次,其中 34 次发生在南北地震带上,占总数的 57.5 %.在分析南北带构造体系的基础上,一些人研 究了该带上强震的时空动态图像演化,提出南北带上的地震活动性具有南北向迁移特征和南北地震呼应 特征<sup>[1~4]</sup>.在目前地震研究中人们总是力图把不同时域和不同空域发生的地震联系起来,希望通过统计 的方法找出它们之间的相关关系,从而达到预测未来地震的目的.然而对于南北带这样一个广大的区域, 由于强震样本数的不足难免使得统计出的结论缺乏说服力;而且对于南北带这样一条由一系列北西向、北 西西向、北东向及南北向断裂组成的复杂构造体系,简单地从断层活动的角度谈地震活动性也很难找出合 适的结论.

本文就从探索地震活动之间力学联系的角度出发,应用有限元方法,以欧亚板块边缘的受力状况作为 模型的加载边界条件,选取南北地震带作为具体研究区(22°~45.2°N,95°~120°E),通过数值模拟计算来 研究南北地震带地震活动"迁移"和"呼应"现象.计算南北地震带受长期载荷作用,应力状态达到稳定的情 况下南北带南段和北段的应力状态同步发生变化的结果,以此对南北带地震活动的一些特征现象进行解 释.

#### 1 有限元模型的建立

中国大陆及邻近地区处于印度、太平洋、菲律宾三大板块的联合作用之中,南北地震带受力状态复杂, 如果仅仅以研究区建立模型,则它的边界条件很难得以确定.为使模型的受力状况尽可能地接近实际情况,我们以欧亚板块的主体作为模型,参照文献[5]选取模型的边界条件(图1),最终从模型中划出研究区 进行讨论分析.

由于地壳模型的 X、Y 方向的尺寸远远大于 Z 方向(厚度方向),厚度变化相对很微小,因此模型建为 等厚度薄壳,薄壳厚度参考地壳平均厚度定为 40 km.

收稿日期: 2003-01-06

基金项目: 中国地震局"十五"重点课题(2001BA 601B-02-01)

作者简介:曹雪峰(1977一),男(汉族),江苏通州人,中国地震局分析预报中心在读硕士研究生,主要从事强震孕育机理方面的数值模 拟研究.



图 1 欧亚板块边界、断层分布和地壳 S 波平均速度结构分区图 Fig. 1 Distribution of Eurasian plate boundary, primary faults, and partition of mean S-wave velocity in lithosphere.

模型北部边界远离研究区,且根据 GPS 实际观测资料知道这一区域里各点的位移量很小<sup>[6]</sup>,因此将 这一边界位移取为零.印度板块向北的推挤对整个欧亚板块特别是南北地震带的影响巨大,这部分边界总 体上施加北东向 30 mm/a 的位移作为位移载荷,并根据青藏块体内部位移场的分布情况在不同区段调整 载荷方向.在欧亚板块的西边界,总体上施加水平方向的力约束,让其产生微量的向东的位移,整个 Y 方 向上不加约束.欧亚板块东部边界受到了太平洋板块向西和菲律宾海板块向西北的推挤,因此施加向西的 边界力,且通过调整力的大小和方向使模型的位移场大致与 GPS 资料(参考文献[6])相吻合.将远离研究 区的模型右上角边界固定以防止模型的旋转.在薄壳模型的底面,给定 Z 方向的位移约束为零.

整个模型中考虑的断裂带有:阿尔金断裂,祁连山断裂,海原断裂,西秦岭断裂,东昆仑断裂,鲜水河断裂,金沙江断裂,怒江断裂,雅鲁藏布江断裂,龙门山断裂,小江断裂,红河断裂,喀喇昆仑断裂,南天山断裂,北天山断裂,鄂尔多斯周缘断裂系,秦岭断裂<sup>①</sup>(图1).根据GIS的地图资料,读取欧亚板块边界和其中断层的地理坐标,建立几何模型,为了减小计算量,模型中板块边界和断层都作了适当的几何简化和平滑.

根据文献[7],将整个模型分成具有不同速度结构的6个区域(图1),根据公式

$$E = \frac{3 V_{\rm S}^2 \rho (1+\mu) (1-2\mu)}{1-\mu} \tag{1}$$

分别计算这 6个区域的弹性模量 E.式中 P 为地壳物质密度; P 为泊松比; V<sub>s</sub> 为区域的平均横波波速.为 模拟地壳在长期载荷作用下的流变形态,整个模型的材料都选用标准线性固体<sup>[8]</sup>.标准线性固体具有接 近大多数实际材料的流变性质,在蠕变或松弛的开始阶段呈明显非线性变化,经历一定时间段后,趋于缓

#### 慢变化的稳定状态.模型的材料参数如表1所示.

区域	S 波波速 <i>V</i> <sub>S</sub>	密度	泊松比	弹性模量	粘滞系数
	/[ km $^{\circ}$ s] $^{-1}$	ℓ/[kg °m <sup>-3</sup> ]	$\mu$	<i>E</i> / 10 <sup>10</sup> Pa	$\eta$ / Pa ° s
1	3.68	2 800	0.25	9.475	$1 \times 10^{23}$
2	3.60	2 800	0.25	9.075	$1 \times 10^{23}$
3	3.45	2 800	0.25	8. 325	$1 \times 10^{22}$
4	3.20	2 800	0.25	7.175	$1 \times 10^{22}$
5	3.70	2 800	0.25	9. 575	$1 \times 10^{23}$
6	3.50	2 800	0.25	8.575	$1 \times 10^{23}$
断层	1.1	2 800	0.25	0.847	$5\!\! imes 10^{21}$

表 1 计算模型的材料力学参数

模拟选用 ANSYS 有限元分析程序实现. 在建立了几何模型和确定单元材料参数后, 使用三维 20 节 点粘弹实体元 VISCO 89 对几何模型进行网格划分, 建立有限元模型. 该粘弹实体元的本构关系符合标准 线性固体的本构特性. 模型共有 4 896 个单元, 34 565 个节点.

#### 2 数值模拟结果

整个模拟过程分两个载荷步.第一载荷步按印度板块每年 30 mm 北东向的推挤累积 10 万年的位移 总量作为模型西南部边界的位移载荷,并按前面讨论的方法给定其它边界位移或者力的约束.同时设定程 序计算的参考时间为 10 万个时间单位.载荷施加采用分子步线性增加的方式.第一载荷步模拟了模型受 载荷持续作用 10 万年后的应力场,模型应力状态是各载荷子步所产生应力综合积累的结果,我们称之为 "基本应力场".考虑到流变材料的松弛属性,此时模型内由最初施加的位移载荷产生的应力已基本松弛至 稳定状态,用此"基本应力场"的应力状态来定性模拟现时地壳的实际应力状态,并作为第二载荷步的计算 基础.

为了讨论模型每一次加载后对整个南北带应力场产生的影响,在第一载荷步产生的应力场基础上,第 二载荷步在西南部边界再加 10 年累积位移量作为位移载荷,并分为 10 个子步线性增加.在考虑某一区域 的地震活动性时,一般认为它与当地的体应力状况有关,这时由于地壳厚度的不同而导致出的垂直向应力 的作用就不能轻易忽略,尤其对于像青藏板块东缘这样具有强烈重力梯度变化的地区来说更是如此.考虑 到青藏高原每年 2 mm 的隆起<sup>②</sup> (Δ*h*),第二载荷步在模型中青藏块体部分(图 1 中③、④区域)的上表面 施加了一定的垂直向压力载荷.压力载荷大小按下列公式计算

$$= \rho_g \Delta_h$$

(2)

将第二载荷步每个子步的计算结果(模拟最后 10 年每年末的应力状态)减去第一载荷步的计算结果 (基本应力场),然后研究模型在这最后 10 年内每次加载在南北带上引起的体积应力变化(扰动)的分布情况.图 2(a)为模型第一次加载对南北带整体应力场带来的扰动情况(即将 10 万零 1 年的计算结果减去 10 万年的计算结果).可以看出,一次加载在南北带上造成的应力场扰动量非常小,主要集中在红河断裂与金 沙江断裂的交汇处.整个研究区中出现的最大扰动应力值为 400 Pa,出现在阿萨姆构造结附近.

 $\boldsymbol{P}$ 

图 2(b)反映的是第 10 万零 3 年的计算结果,即加载 3 年后的研究区体应力变化空间分布图,比图 2 (a)多承受了 2 年的荷载.这时整个研究区域内的体应力扰动值都有所增加.鄂尔多斯周缘断裂系的汾渭 段、秦岭断裂带的东部以及华北地区都开始出现拉张现象,即扰动应力值为正,而这些张性区往往都与压 性区成对出现;祁连山断裂带、鲜水河断裂带、金沙江断裂带以及小江断裂带附近的体应力变化场显示出 纯粹的受压状态(扰动应力值为负).整个研究区内最大的体应力扰动值(受压)仍出现在阿萨姆构造结附 近,达到 1 200 Pa.比较图 2(a),阿萨姆构造结处的体应力扰动有明显扩张的趋势,"扰动"的前端达到鲜水

223



图 2 在"基本应力场"基础上加载的南北地震带体应力变化场分布图

Fig. 2 Distribution of the body stress change on North-south Seismic Belt of China by loading on the base of "Basic stress field".

河断裂带附近. 而秦岭与龙门山断裂带的交汇处的体应力扰动值(受压)则达到了 800 Pa.

图 2(c)显示的是加载 5 年后的计算结果,从图中可以看出:华北地区的受张区域明显扩大;龙门山断 裂带受压扰动超过了 400 Pa;小江断裂与红河断裂的交汇处的体应力扰动值超过 1 200 Pa;鲜水河断裂带 上的体应力扰动值(受压)达到 800 Pa;阿萨姆构造结处的最大体应力扰动值为 2 000 Pa,并且其体应力扰动范围仍在继续扩大.

#### 3 讨论和结论

采用将第二载荷步的计算结果减去第一载荷步获得的"基本应力场"的方式进行讨论具有两方面的好 处,一是通过这样处理使得每次加载对整个研究区的应力场变化所做的贡献非常清晰,二是可以避免模型 初始条件难于给定的矛盾.第一载荷步计算10万年的目的是为了充分体现模型材料的松弛特征.

从图 2 可以看出,在没有发生其它扰动(如大地震发生)的情况下,在模型材料松弛趋于稳定时,模型 边界的每次加载(主要来自于印度板块的俯冲推挤)在研究区内引起的体应力变化表现出同步线性变化的 规律,且变化幅度基本按比例增加.为了更清楚地说明这一点,将南北带上 4 个高应力集中点 I、II、III、IV (图 2)上的体应力变化值列于表 2,从中可以看出它们与年份的正比例关系.由于高应力集中只是发生在 一些相对孤立的区域,这意味着从力学角度上来讲,南北带作为一个整体其强震的发生是有一定随机性 的.同时意味着南北带上的几条大构造带在一定时间间隔内都有可能发生强震,它们的发生更多的是由自 身的构造特点以及欧亚板块周边的大环境所决定.虽然某一处的强震发生会对同一条断裂带上下一次的 强震发生产生影响,但这是对一条完整断裂带上的地震迁移现象而言,而不是对我们要讨论的这样一条由 一系列巨大断裂带组成的复杂构造体系而言.

应力集中点	加载1年	加载3年	加载5年
Ι	- 812. 28	- 2 436 <b>.</b> 9	-4061.4
II	- 812. 34	-2437.0	-4061.7
III	- 285.43	- 856 <b>.</b> 30	-1 427.2
IV	531.74	1 595.2	2 658.7

表 2 高应力集中点相应年份体应力变化值(单位: Pa)

但从另一个角度来看,当整个区域的背景应力达到稳定状态时,印度板块对青藏块体南部边界上的每 一次推挤都会同时对整个带上的应力场产生影响,即对这些相对孤立的高应力集中区同时产生影响.板内 的应力积累最终要通过强震进行释放.由于强震发生的随机性,强震孕育需要较长的时间,和统计样本的 不足,因此从时间上看,人们产生南北带上强震的发生具有"南北地震呼应"的现象是可以理解的.

从图 2 还可以看出应力集中的位置都在断层附近.需要说明的是,我们的模型考虑的只是研究区内最 主要的断层,在南北地震带内实际上还有更多次级断层,因此可以推断,在这些没有被考虑的次级断层附 近很可能同样发生某种程度的应力集中,从而引发地震.当然,按照大构造产生大地震,小构造产生小地震 的说法,模型中对次级断层的简化并不影响我们对强震活动性的分析讨论.

#### [参考文献]

- [1] 韩守琪. 南北地震带活动分析[J]. 内陆地震, 1998, 12(1): 36-43.
- [2] 毛可,石特临,杨立明.南北地震带强震迁移特征及其预测意义[J].西北地震学报,1997,19(4):6-11.
- [3] 赵振才, 王继英. 青藏块体近期地震活动特征[J]. 地震研究, 1999, 22(1): 9-16.
- [4] 陈文德. 中国南北地震带 1900 年以来强震的时空分布特征及其预报意义[J]. 四川地震, 1997, (3): 17-22.
- [5] Kong X. P Bird. Neotectonics of Asia: Thin-shell finite-element models with faults[A]. See: The Tectonic Evolution of Asia[J]. Cambridge University Press. 18-34.
- [6] Qi Wang, Pei-zhen Zhang, et al., Present-Day Crustal Deformation in China Constrained by Global Positioning System M easurements
  [M], SCIENCE, 2001, 574-577.
- [7] 马杏垣. 中国岩石圈动力学地图集[Z]. 北京: 中国地图出版社, 1989.
- [8] 尹祥础. 固体力学[M]. 北京: 地震出版社, 1985.

(下转245页)

# DEFORMATION FEATURES OF MENYUAN EARTHQUAKE $(M_{s}6.4, 1986)$ AND BLOCK MODEL ANALYSIS

CHEN Bing, JIANG Zai-sen, ZHANG Si-xin, ZHANG Xiao-liang, XUE Fu-ping (*The Second Crustal Deformation Monitoring Center, CSB, Xi an* 710054, *China*)

Abstract: The evolution features of cross-fault deformation in different scares during seismogenic process near epicenter of Menyuan earthquake ( $M_{\rm S}$  6.4, August 26, 1986) is analyzed. Based on theory of Discontinues Deformation Analysis (DDA) the Displacement Loading Method is applied to simulate vertical displacement velocity change due to focal rupture. The result shows that combination of vertical and lateral force produce the deformation change on earth surface, and the former may be more important.

Key words: Discontinues deformation analysis(DDA); Displacement loading method; GPS; Block movement

(上接225页)

## STUDY OF SIMULATION FOR THE EVOLUTION OF STRESS FIELD ON NORTH—SOUTH SEISMIC BELT IN CHINA

CAO Xue-feng<sup>1</sup>, YIN Jing-yuan<sup>1, 2</sup>, YANG Li-ming<sup>3</sup>

(1. Seismological Bureau of Shanghai, Shanghai 200062, China;

2. Laboratory of Tectonic Physics, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China;

3. Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Using finite element method, the time-space evolution of stress field on North—south Seismic Belt and adjacent region is simulated, considering the geological structures and designing the model with viscosity characteristic. Through simulated calculation of evolution of stress field affected by 100, 010 years accumulated loading, it is found that the joint continuous effect from India—Australia plate, Philippine plate and Pacific plate determines the disturbance quantity of the stress state on the belt after the creep deformation has approached steady state. The phenomenon of seismic echo on North—south Seismic Belt is a synthetic reaction to the external loads (plate boundary force) after the regional stress field reaches a equilibrium state.

Key words: North-south Seismic Belt; Numerical simulation; Body stress; Seismic echo