

中国西南地区地震活动数值模拟的初步研究

陈化然¹, 张杰卿¹, 董洪军¹, 马宏生²

(1. 天津市地震局, 天津 300201; 2. 中国地震局分析预报中心, 北京 100036)

摘要: 初步建立了西南地区有限元动力学模型, 讨论了由于地震发生产生的应力变化对西南地区整个系统的应力调整情况. 初步结果表明, 许多强震发生在应力增强区.

关键词: 有限元模型; 西南地区; 强震危险区

中图分类号: P315.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2002)04-0310-05

0 引言

在地震活动研究中, 许多人采用简化模型来模拟地震活动. 这类模拟计算简单, 突出关键性的因素, 有助于了解地震活动的复杂物理过程. 但正确提炼、简化孕震规律困难较大, 而且过于简化的模型无法反映实际过程的物理特征和几何特征. 中国西南地区强震活动频繁, 强震之间相互关联^[1], 因此本文从理论上建立西南地区强震活动的三维有限元模型, 对该地区地震活动进行模拟研究, 为地震及其预报研究提供一种理论依据.

本文选取的中国西南地区区域, 包括了青藏高原和川滇地区. 因为青藏高原对整个西南地区地震活动有至关重要的作用, 因此将其和川滇视为一体进行研究.

1 有限单元的划分、边界条件及单元材料性质

1.1 有限单元的划分

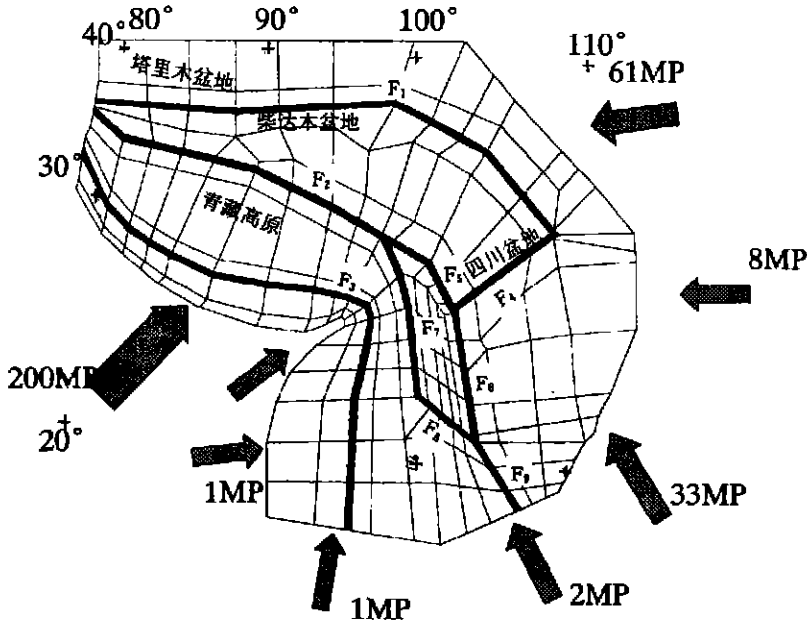
西南地区活动断裂带分布较复杂. 藏南主要的构造带由北向南有雅鲁藏布缝合带、主中央断裂和逆掩的主边界冲断裂等. 雅鲁藏布冲断裂的东端往南急转与缅甸那加山带相连, 其断面较陡, 大部分向南倾, 为向北冲的逆断裂带; 往西与巨大的北西向右旋走滑的喀拉昆仑断裂带斜接. 喜马拉雅断裂带是青藏高原最南的活动弧形断裂带. 其他主要断裂(带)包括: 可可西里—红河断裂, 西昆仑—阿尔金主边界断裂带, 川滇菱形块体东缘断裂带, 青藏高原东北缘断裂带, 班公湖—怒江—澜沧江断裂等^[2].

本文利用含相对软弱的断层单元的有限元模型来模拟前面所述大断裂带的错动方式, 估计各主要构造单元通过大断裂带的调整发生相对运动的状况, 并探讨控制断裂带变形方式的动力因素.

青藏高原内部地震活动以浅震为主, 而在边缘地区, 特别是喜马拉雅弧形构造两端, 则有深度为 200~300 km 的中源地震. 在高原东部的川滇菱形地块和高原东北地区, 震源深度为

20 km 以内, 优势深度为 10 km.

本文在前人研究的基础上, 应用简化的二维有限元模型进行研究. 图 1 给出了西南地区有限单元的划分网络, 其中黑颜色单元为断层单元, 共划分出 301 个节点, 268 个单元.



F₁: 阿尔金断裂; F₂: 可可西里—玉树断裂带; F₃: 班公湖—怒江断裂带; F₄: 龙门山断裂带; F₅: 鲜水河断裂带; F₆: 则木河断裂带; F₇: 金沙江断裂带; F₈: 红河断裂带; F₉: 小江断裂带

图 1 西南地区有限单元的划分和边界条件

Fig. 1 The division of finite elements and boundary conditions in Southwest China.

1.2 边界条件

本文主要从以下几个方面考虑影响构造应力边界载荷条件及位移边界条件:

(1) 印度洋板块对青藏高原的强烈碰撞. 该段边界作用对东亚地区构造应力场的强烈影响在目前得到普遍认同. 根据现代板块及亚板块相对运动的测量结果, 印度洋板块正以每年大约 60 mm 的速率相对欧亚板块向北偏东方向运动, 对青藏高原施加挤压作用.

(2) 印度洋板块向北运动时对印缅山弧地区的剪切拖拽作用. 印缅山弧地区的地震震源分布显示存在向东的俯冲带, 印缅山弧地区南北走向的褶皱带可能是这种俯冲作用产生的东西向挤压的结果. 在该段主要施加向北的边界作用. 根据目前在区域北部发生的地震震源机制解看, 其最大主压应力轴为北北东方向, 基本上与缅甸印度洋板块边界的走向相平行, 且主要为走滑断层类型地震.

(3) 中朝古地台对青藏高原物质向东北方向扩展的阻挡作用. 青藏高原内部最大主应力轴方向为近南北向, 而其东北部边缘在逐渐远离印度洋板块向北挤压作用后, 最大主压应力轴方向转为北东向, 说明东北方向的中朝古地台可能对青藏高原物质的运动有阻挡作用. 在考虑边界载荷时对东北边界施加了较大的挤压力.

(4) 青藏高原物质向东及向东南方向运动时所受阻挡作用. 根据东亚地区新生代碰撞及大断层活动示意图中绘出的印缅山弧地区东部及东南亚的运动方向, 该构造相对青藏高原中心有向东南方向运动的趋势. 为使模拟结果同时满足西南地区地震震源机制解反映出的最大

主压应力轴在水平面上的投影方向以及地壳物质相对高原中心向东南方向的流动,在模型东南部边界施加弱的挤压作用。

(5) 其它边界的位移限制条件.为了从西南及青藏高原复杂的地质构造中突出所关心的要素,对有限元网格数值模型的西部和北部边界的边界条件做了如下简化:

(1) 本文注意的目标是西南和青藏高原中心及东部地区,所以建立模型时没有考虑青藏高原西部帕米尔地区复杂的构造活动对青藏高原内部构造活动的影响,而仅假定为一条简单边界。

(2) 西部边界对应于喀拉昆仑山脉至班公湖地区,限定该段边界可以沿南北向自由移动,而沿东西向的运动则予以限定.在计算能力的限制下,模型没有考虑太大的地区,而仅仅局限于西南及其邻近地区。

(3) 北部边界对应塔里木盆地南缘,考虑西伯利亚地台的阻挡,其南北向被固定,东西向自由。

1.3 材料性质

断裂单元的杨氏模量要比其它单元的低一些,粘滞系数也要小一些.模型中所有单元的性质被分为三大类,第一类是高原地块,第二类是断层,剩下的归属为第三类,见表1。

2 有限元理论模型

本文虽然考虑了真实地球介质的情况并对各种参数进行了无量纲化处理,但所建立的仍是一种理论模型,以便在这种模型上讨论各种参数变化对模型造成的影响,为今后在实际中应用打下基础.因此设计了一个简单的网格模型进行试验研究,具体内容及结论另文发表。

在模拟强震成组孕育与成组活动时,原有的弹簧—滑块—活塞网络模型既要利用现有的计算条件,又要根据具体地区实际的地质条件和孕震环境,选取适当的介质参数和边界条件.因此本文设计了一种基于有限元方法建立的地震活动模型,该模型是在张国民等^[1]提出的由Maxwell体组成的平面网络模型基础上的进一步发展。

模型的计算原理为:设定位移速率边界条件;根据边界条件和单元介质参数分布,利用二维有限元方法确定每个单元应力各分量的增长速率;每个单元设定初始应力水平、破裂方向和静、动摩擦系数;利用破裂准则(库仑准则和拜尔利准则),确定单元破裂所需时间;当单元破裂后,将破裂单元作为内部边界条件,利用有限元方法计算由这个破裂造成的应力降对系统其它单元产生的应力调整.编制的有限元程序可循环重复执行,建立起地震活动演化模型。

从总体上讲,它是有限元方法和细胞自动机模型的一个结合体.在模型随时间演化上,采用的是细胞自动机模型的原理,由每个单元的初始应力、应力增长速率确定.不同之处是我们的应力是张量.应力增长速率由有限元计算得到(通过定常边界位移速率),而原来的细胞自动机模型一般是随机给出的.在破裂准则上,采用的方法与细胞自动机模型相似,均是通过判定剪应力与正压力之比与静摩擦系数的关系得到,只是本模型计算比较复杂,需要考虑张量的投影和摩尔圆.在应力分配上,细胞自动机模型是向邻近四个单元分配应力,而本模型采用有限元方法通过内部边界产生的应力降向周围单元分配应力.此外,每一步的初始应力均是上一步的计算结果;边界条件、弹性模量和摩擦系数均不随时间变化;非断层单元在首次破裂后,破裂方向将固定,内聚力降为零。

表1 模型中使用材料的力学性质

分层	杨氏模量/Gpa	泊松比
高原地壳	84.0	0.27
普通地壳	54.0	0.27
地壳断裂带	10.0	0.35

为检验模型设计的合理性, 以汪素云等^[3]给出的中国陆区, 尤其是西南地区的应力图像作为拟合和约束条件, 在图 1 的基础上计算得到的最大主压应力方向(图 2), 大体与前人研究结果一致.

另外, GPS 为现代地球动力学研究提供了相对运动最先进的观测手段, 它可以在全球或区域范围内监测块体的相对运动, 同时也可观测块体内部各点之间的相对运动. 近年来我国建立了规模较大的 GPS 网, 在观测资料基础上初步建立了中国大陆板块内部运动模型. 图 2 中所得到的最大主应力方向与最新的本地区 GPS 水平形变格局^[4~6]较好地吻合, 表明本文的各个参数设置是比较合理的.

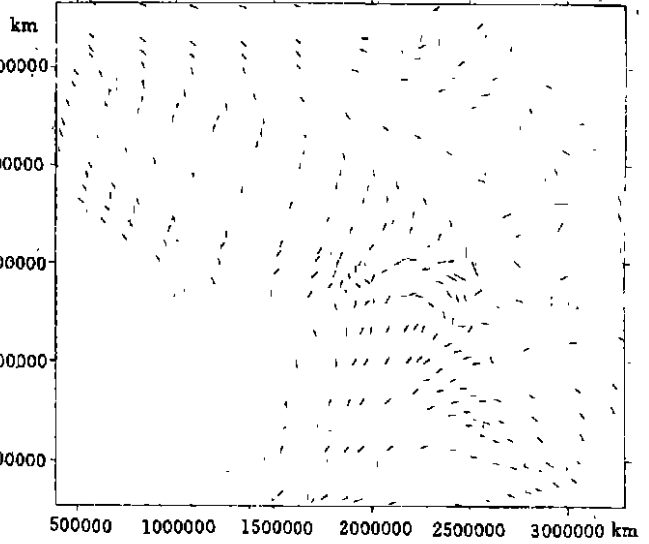


图 2 西南地区最大主压应力方向
Fig. 2 The distribution of maximum main stress direction in Southwest China.

3 强震对西南地区应力场的调节作用

利用所建立的有限元模型, 计算了 1970 年以来历次强震后西南地区应力场的影响情况. 作为例子, 这里仅给出 1996 年丽江 M_s 7.1 地震对西南地区应力场的调节影响图(图 3)(图中+代表有限单元节点位置).

研究结果表明, 每一次强震都对周围地区应力场进行了调整. 某些区域(如: 沿断层区域)应力急剧增强, 有些区域应力减弱. 而大部分强震都发生在上一次强震后的库仑破裂应力增强区.

4 结论

尝试将有限元理论模型应用于中国西南地区的应力时空演化、应力调整、强震成组孕育和成组活动, 对强震之间相互关联特征进行模型模拟理论研究, 得到的初步结果说明: 可以用有限元方法模拟、计算强震的应力影响和调整作用,

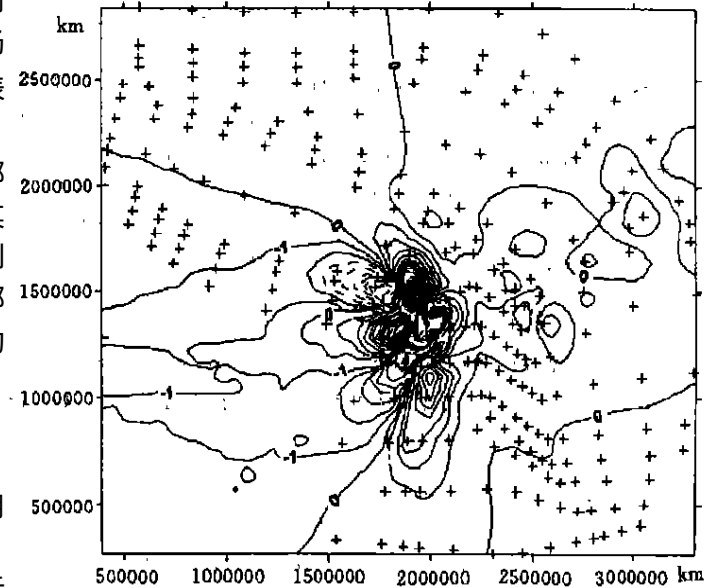


图 3 1996 年丽江 M_s 7.1 地震对西南地区剪应力场的影响(等值线间隔为 1 MPa)
Fig. 3 The influence on the shear stress field in Southwest China after the 1996 Lijiang (M_s 7.1) earthquake (The interval for isoline is 1MPa).

确定库仑破裂应力增强区,为下一次强震的地点判定提供理论依据.具体结论为:

(1) 由于耦合网络动力学模型是通过求解一组联立的微分方程组进行计算的,因此,当单元较多时,运算速度就会显著下降.而本模型采用有限元方法进行计算,运算速度可大幅度提高.根据我们的研究,同样的计算能力,采用本方法可计算的单元数是原来的近10倍,因而可较容易地在计算机上实现几千个单元的计算.

(2) 在耦合网络动力学模型中,单个震源的应力仅用一个标量表示.而本研究提出的模型用具有三个独立分量的张量表示,与实际情况更接近.此外,模型中还可以考虑真实断层的走向和倾向,研究不同类型断层的破裂过程以及对系统的影响.因此它是一种新的地震活动模型.

(3) 地震发生时对周围单元造成的应力影响,虽然可以由弹性位错模型计算得到,但这种计算是在假定周围单元与震源处介质相同这一条件下得到的.显然不同介质分布对其应力分配是有影响的,国外解决这个问题采用的是边界元方法,本研究采用内边界方法同样也解决了这个问题.但需要指出的是,当单元划分较大时,可能造成单元边界与实际断裂带有一定差别.这样一个地震的发生与单元边界的破裂会有一定的差距,所得结果的可靠性就较差.因此在应用本方法时,单元的划分是比较重要的,应尽可能单元划分的细一些、多一些.

(4) 后续强震大多发生在前一地震所触发的应力增长区,这再次证明了强震之间是相互作用、相互影响的.即强震有可能成组孕育、成组发生,一个强震的发生势必对本地区的应力情况进行调整,影响(加速或推迟)下一次地震的发生.因此,应用地震活动图像分析配合时间预测方法,可对下一次强震发生地点和发生时间作出一定程度的预报.

致谢:本文成文过程中,张东宁博士、刘杰博士提供了大量宝贵资料,张国民教授给予了细致的指导,在此作者表示深深的感谢!

[参考文献]

- [1] 张国民,傅征祥.西南强震的时间分布特点及其物理解释[J].地球物理学报,1985,28(8):569—578.
- [2] 张东宁,高龙生.东亚地区应力场的三维数值模拟[J].中国地震,1989,5(4):24—33.
- [3] 汪素云,陈培善.中国及邻区现代构造应力场的数值模拟[J].地球物理学报,1980,23(1):35—45.
- [4] 李永林,高旭.中国西部及邻区强震迁移规律与喜马拉雅弧关系研究[J].地震,2000,20(3):37—42.
- [5] 傅容珊,徐耀民,黄建华,等.印度与欧亚板块碰撞的数值模拟和现代中国大陆形变[J].地震学报,2000,22(1):1—7.
- [6] 李延兴,胡新康,赵承坤,等. GIS跟踪站观测的初步结果所揭示的板内及板缘地壳水平运动[J].地壳形变与地震,1998,18(2):29—34.

STUDY ON THE ELEMENT MATHEMATIC MODELLING FOR STRONG EARTHQUAKE ACTIVITIES IN SOUTHWEST CHINA

CHEN Hua-ran¹, ZHANG Jie-qing¹, DONG Hong-jun¹, MA Hong-sheng²

(1. Tianjin Seismological Bureau, Tianjin 300201, China;

2. Center of Analysis and Prediction of CSB, Beijing 100036, China)

Abstract: The finite element model for Southwest China is established, and the stress adjustment due to strong earthquake in the region is studied. The preliminary result shows that many strong earthquakes occurred in the area of stress increased.

Key words: Finite element model; Southwest China; Risk region of strong earthquake