2000年 9月 郑州工业大学学报 Sep. 2000
第21卷 第3期 Journal of Zhengzhou University of Technology Vol.21 No.3

文章编号:1007-6492(2000)03-0104-04

青藏高原动力学模型的数值研究

秦元芬[1],史金松[2],崔军文[3]

(1.河南省出版局职工中等专业学校,河南 郑州 450000;2.河海大学物理系,江苏 南京 210098;3.中国地质科学院岩石圈中心,北京 100037)

摘 要:给出了青藏高原结构变形的动力学模型及其数值模拟.模型采用了热传导、弹塑性和大变形的理论,利用数值方法给出了从距今70 Ma(百万年)到现今各个历史阶段的温度场、位移场、应力场以及开裂和滑动等情况,得到了青藏高原陆壳的缩短、增厚和隆升之间的定量关系,为实现青藏高原动力学的定量研究进行了有益的尝试.

关键词:青藏高原;动力学模型;地体;数值模拟
中图分类号:O 313 文献标识码:A

青藏高原的急剧隆升是第四纪以来全球最伟大的地质事件之一.本文在根据地质、地球物理和地球化学资料建立的动力学模型的基础上,着重研究自印度板块和欧亚板块碰撞以来的70 Ma(百万年)间陆壳的缩短、增厚和隆升之间的定量关系,试图把定性描述青藏高原隆升的动力学过程转为定量描述.

本模型特采用热、弹塑性,大变形的动力学模型,即同时考虑温度场与应力场的影响,温度变化对应力场的作用,岩体相对滑动的摩擦生热对温度场的作用,岩石的弹塑性特性、拉应力过大引起岩体开裂的软化影响,大变形引起的应力与应变之间的非线性关系等.陆壳缩短和消减作用主要发生在老第三纪(距今70~40 Ma),高原大致经历了3个隆升阶段:整体缓慢均衡隆升阶段(距今40~20 Ma);整体缓慢差异性隆升阶段(距今20~3 Ma);整体急剧性隆升阶段(距今3~0 Ma)[1].据此,本文选择了4个时间段:距今70~40 Ma,40~20 Ma,20~3 Ma以及3~0 Ma,以阐明青藏高原隆升的动力学过程.本模型通过设定不同时期边界位移值的办法来体现高原形成的主要动力机制和动力过程,该设定经过反复调试,与观察值及推算值基本相符.本文对调整后的模型进行了全过程的计算,得到各历史时期的位移场、应力场、温度场;给出了陆壳缩短、增厚与隆升之间的定量关系;给出了各历史时期断面上的开裂、滑动等状况.

1 地质概况

青藏高原可划分为6个地体,其间以缝合带为边界,从北往南它们是:塔里木-柴达木地体、北昆仑冲断裂、北昆仑地体、中昆仑缝合带、南昆仑地体、南昆仑缝合带、巴颜喀拉地体、沱沱河-金沙江缝合带、羌塘地体、班公湖-澜沧江缝合带、冈底斯地体、雅鲁藏布江缝合带、喜马拉雅地体、主边界冲断裂和印度克拉通.动力学计算取二维剖面,北起格尔木,南至亚东,横跨青藏高原,与已有的'亚东-格尔木地学断面'相符,基本反映了岩石圈结构、构造、物质组成的主要断裂分布和地体的拼合关系及动力学状态.

2 数学模型

为了相对合理地模拟青藏高原演化的历史进程,本方案考虑温度变化、弹塑性、大变形、滑动及由滑动引起的摩擦生热、开裂及由开裂引起的岩性软化等因素的计算模型[2].

2.1 温度变化的模拟

采用不计对流项的热传导方程模拟温度变化.热传导方程可表示成

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} K_{i_j} \frac{\partial T}{\partial x_j} + Q \ , \qquad (1)$$

收稿日期:1999-11-16;修订日期:2000-03-20
作者简介:秦元芬(1958-),女,山东省蒙阴县人,河南省出版局职工中等专业学校讲师,主要从事高原动力学方面的研究.

其中:T 为温度;ρ 为密度;C 为比热;K_{ij} 为热传导系数,对于各向同性的岩体来说,$K_{ij}=k$ 为某一常数;Q 为热源项,它包括岩体物质的放射性生热及由滑动引起的摩擦生热的影响.

2.2　弹塑性与大变形的模拟

用增量方程模拟弹、塑性与大变形.岩体受力作用的平衡方程增量形式可表示为

$$\frac{\partial \Delta\sigma ik}{\partial xk}=-\Delta X_i, \qquad (2)$$

其中:$\Delta\tau_{ik}$ 为应力增量,可表示成

$$\Delta\sigma ik=(C^e_{ikjl}-C^p_{ikjl})(\Delta\varepsilon_{jl}-\alpha\delta_{jl}\Delta T),$$

式中:C^e_{ikjl} 为弹性系数;C^p_{ikjl} 为塑性部分对弹性系数的影响;ΔX_i 为荷载增量,包括重力、表面荷载、温度变化的等效力等的增量.为了体现大变形的影响,应变 ε_{ij} 与位移 U_i 之间满足非线性关系

$$\varepsilon_{jl}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_l}+\frac{\partial U_l}{\partial x_j}+\frac{\partial U_m}{\partial x_j}\cdot\frac{\partial U_m}{\partial x_l}\right).$$

2.3　初始条件与边界条件

温度问题的边界条件:在顶部及底部各个时刻均为已知值,底部的已知值主要由陆壳的深度所确定,顶部取地表温度值.为简化起见,假设在两个侧边温度梯度为零,初始时刻的温度值由初始时刻的边界值通过求解稳定温度场而得.

位移计算的边界条件均采用已知位移的方式给出,在计算中加以调试.

3　计算处理

沿亚东 – 格尔木断面截取单位宽度的陆壳,作平面应变问题处理.在断面内存在纵向及横向的一些软弱夹层,因此划分出 24 个不同组合的物性参数分布区,而每个组合内有 11 种参数.在断面内用四结点的四边形等参数单元作有限元离散,在时间方向用有限差分法作离散.网格剖分方案分成粗单元与细单元两种,粗单元方案取 90 个单元 112 个结点;细单元方案取 432 个单元 490 个结点.具体的离散格式及计算处理如下[3].

3.1　热传导部分的离散

对方程(1)沿时间方向用隐式差分离散,在剖面内作有限元离散.记 $t+\Delta t$ 时刻结点 n 处的未知温度值为 T^n,则所得的代数方程组可写成

$$h^{mn}T^n=f^m,$$

式中:h^{mn} 为系数矩阵中的系数.

$$h^{mn}=\sum_e\int_{\Omega e}N^mN^n\mathrm{d}\Omega+\sum_e\int_{\Omega e}\frac{k_{ij}}{\rho c}\cdot\frac{\partial N^m}{\partial x_i}\frac{\partial N^n}{\partial x_i}\mathrm{d}\Omega\Delta t,$$

右端项 f^m 可表示成

$$f^m=\sum_e\int_{\Omega e}N^mN^n\mathrm{d}\Omega T^n(t)+\Delta t\left\{\sum_e\int_{\Omega e\cap\partial\Omega}N^m\frac{k_{ij}}{\rho c}q_{ij}\mathrm{d}T+\sum_{\Omega e}\int_{\Omega e}\frac{N^mQ}{\rho c}\mathrm{d}\Omega\right\},$$

式中:Ωe 表示单元;N^m 为 m 点的形状函数;$\partial\Omega$ 表示平面定解区域的边界;$\Omega e\cap\partial\Omega$ 表示边界 $\partial\Omega$ 位于单元 Ωe 上的部分;q_{ij} 为已知的边界温度梯度,$T^n(t)$ 表示时刻 t 时 n 点温度值.

3.2　平衡方程的离散

用 ΔU^n_j 表示从时刻 t 到 $t+\Delta t$ 时,n 点 j 方向的位移 U^n_j 的增量.增量形式的平衡方程(2)可用有限元方法离散成代数方程组

$$K^{mn}_{ij}\Delta U^n_j=f^m_i,$$

式中:K^{mn}_{ij} 是劲度矩阵的系数,可表示成

$$K^{mn}_{ij}=\sum_e(C^e_{ikjl}-C^p_{ikjl})\int_{\Omega e}\frac{\partial N^m}{\partial x_k}\cdot\frac{\partial N^n}{\partial x_l}\mathrm{d}\Omega,$$

右端项 f^m_i 为

$$f^m_i=\sum_e\alpha\delta_{ik}(2\lambda+G)\int_{\Omega e}\frac{\partial N^m}{\partial x_k}N^n\mathrm{d}\Omega\Delta T^n-\sum_e\alpha C^p_{ikjl}\delta_{jl}\int_{\Omega e}\frac{\partial N^m}{\partial x_k}N^n\mathrm{d}\Omega\Delta T^n+\sum_e\int_{\Omega e}N^m\Delta X_i\mathrm{d}\Omega+\sum_e\int_{\Omega e\cap\partial\Omega}N^m\Delta q_i\mathrm{d}\Gamma,$$

式中:第一项表示由温度变化而引起的等效结点荷载;ΔT^n 为结点 n 处的温度增量;第二项是由塑性变形引起的对温度变化等效结点荷载的影响;第三项是自重荷载增量;第四项边界外力增量 Δq_i 所引起的结点荷载.自重荷载只在开始时刻记及,以后各时刻不予考虑.

3.3　虚拟裂缝单元

为了便于考虑变形而引起的滑移、开裂等的影响,引进虚拟裂缝单元.所谓的虚拟裂缝单元,它区别于通常意义下所设置的裂缝单元,可以免去设置双结点带来的许多麻烦.它以普通单元之间的交界边为基础,两边各附上半个单元.设 A,B 为两个相邻单元的形心,也作为相邻单元的代号,用 ξ,η 代表虚拟单元的局部坐标.

剪应力用 τ_{ξ_η} 记;η 方向的正应力用 σ_η 记,它们的计算公式为

$$\tau_{\xi_\eta}=\lambda_s\Delta U_\xi+\tau_{\xi\eta 0};$$

$$\sigma_\eta=\lambda_n\Delta U_\eta+\sigma_{\eta 0},$$

式中:ΔU_ξ,ΔU_η 分别表示 A,B 两点沿 ξ 及 η 两个方向的位移值之差,即

$$\Delta U_\xi=U_{A\xi}-U_{B\xi};$$

$$\Delta U_\eta = U_{A\eta} - U_{B\eta}.$$

系数 λ_s,λ_n 分别取

$$\lambda_s = \min(G_1/e_1, G_2/e_2);$$

$$\lambda_n = \min(E_1/e_1, E_2/e_2),$$

其中:E_1,E_2,G_1,G_2 分别是单元 A 与单元 B 的弹性模量 E 及剪切模量 G;e_1,e_2 分别是 A,B 两点至交界边的垂直距离;$\tau_{\xi\eta0}$与 $\sigma_{\eta0}$均为初值.

3.4 虚拟裂缝单元状态的判别

虚拟裂缝单元的 4 种状态分别是密合、滑移、开裂、开裂与滑移.用 f 记岩体的摩擦系数,$\max\sigma$ 为最大抗拉应力.4 种状态的判别条件表示为:

密合:$\sigma_\eta < \max\sigma$,$|\tau_{\xi\eta}| < -f\sigma_\eta$,($\sigma_\eta < 0$);

滑移:$|\tau_{\xi\eta}| > -f\sigma_\eta$,($\sigma_\eta < 0$);

开裂:$\sigma_\eta > \max\sigma$;

开裂与滑移:$\sigma_\eta > \max\sigma$,$|\tau_{\xi\eta}| > 0$.

3.5 摩擦热的引入

热传导方程(1)的右端项 Q 包括两个部分:一是由岩体物质的放射性生热,二是摩擦生热的等效热源.当虚拟裂缝单元发生单纯的滑动,会因为岩体间的相互摩擦而产生热.这种生热应该与沿裂缝的剪应力 $\tau_{\xi\eta}$、两侧的相对滑动值以及缝长等因素有关.因缺乏现成的计算公式,暂取

$$\Delta Q = C_f \, |\tau_{\xi\eta}| \, |\Delta U_\xi| \, L/2,$$

式中:L 为缝长;C_f 为系数;ΔQ 为由摩擦生热而引起的热源的改变量,以 $\Delta Q/2$ 平均分配给相邻的 A,B 两个单元.

3.6 开裂的软化处理

为了考虑开裂对岩性软化的影响,当虚拟裂缝单元发生开裂时,将两侧单元的弹性模量各乘以一个小于 1 的正系数.

4 边界值及调试

位移场的计算除考虑重力的作用及温度变化的影响之外,将印度板块的向北运动、北部刚性陆块的顶撞作用以及底部软流圈的作用等因素,通过设定已知位移边界的办法加以考虑.为了定量计算位移场,就必须恢复距今约 70 Ma 时各陆块的南北向宽度、地面高程、地壳厚度和地表温度场及各阶段的变化.根据对不同历史时期的地质特性及动力作用的分析与估算,从而给出各历史阶段陆壳的大致外形,这些提供了模型计算的初步边界条件.根据这些设定的边界条件进行计算,可以求得各不同历史阶段的地面高程及温度的分布.而这样求得的地面高程与观测、推测等所掌握的高程之间往往有较大出入.为此,又反过去修改历史上各不同时期所设定的边界值,以此反复进行调整直到地表高程与掌握的高程基本上相符.在整个调整过程中当今时刻陆壳的底部高程始终与观测值相同,即认为当今时刻陆壳底部高程应该是比较接近实际情况的.

5 模型计算的主要结果

分别选取 90 个单元、112 个结点的粗网格方案和 432 个单元、490 个结点的细网格方案 2 种不同的剖分情况对模型进行实际计算,结果如下:

(1) 由粗网格方案计算的 5 个不同历史阶段(距今 70 Ma,40 Ma,20 Ma,3 Ma 和 0 Ma)的陆壳位移变形表明,陆壳的剧烈变化发生在距今 3 Ma ~ 0 Ma 期间.

(2) 按细网格剖分方案计算了各阶段(距今 40 Ma,20 Ma,3 Ma,0 Ma)的滑动与开裂的状况.在距今 40 Ma 时刻,滑动主要在北部地区的上部发生,而开裂只在上部个别地区出现;在距今 20 Ma时刻,滑动与开裂的程度得到发展;在距今 3 Ma 时刻,北部底部的滑动就已比较明显;在 0 Ma时刻,开裂在北部地区的底部也较明显.

(3) 计算范围内青藏高原的陆壳平均厚度随时间逐渐加大,陆壳宽度和面积逐渐减小,而且加大和减小的速率增快,各地体的缩短率随时间也在不断地增长.

(4) 计算了温度、应力、缝合带(断裂)倾角在各时刻(距今 70 Ma,40 Ma,20 Ma,3 Ma 和 0 Ma)的变化值,并绘制等值线图表示其变化趋势.

6 结束语

本模型尽管对地质条件进行了简化,但仍然提供了不少对青藏高原构造演化和隆升颇有启发的信息和结果,特别是陆壳缩短与增厚的相关性,陆壳缩短与高原隆升的相关性,陆壳缩短与岩体物质消减的相关性以及陆壳缩短过程中温度的效应等方面提供了“量”的概念,为实现青藏高原动力学的定量研究作出了成功的尝试.

参考文献:

[1] 崔军文,朱 红,武长得,等.亚东-格尔木岩石圈地学断面综合研究[M].北京:地质出版社,1992.

[2] KIKUCHI N. Finite Element Methods in Mechanics[M]. London:Cambridge University Press,1986.

[3] WASHIZU K. Variational Methods in Elasticity and Plas-

ticity [M]. Third Edition. Pergamon: Pergamon Press, 1982.

Dynamical Model and Its Numerical Simulation for Structure Distortion of the Qinghai – xizang Plateau

QIN Yuan – fen[1], SHI Jin – song[2], CUI Jun – wen[3]

(1. Henan Press Staff Professional Secondary School, Zhengzhou 450002, China; 2. Department of Physics, Hoha University, Nanjing 210098, China; 3. Lithosphere Research Center, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract: In this paper, a dynamical model and its numerical simulation for the structure distortion of the Qinghai – Xizang Plateau are proposed. In the model the heat conduction, elastic – plasticity with the finite displacement theory are considered. The temperature fields, the displacement fields, the stress fields, the crack and sliding for the historic times in 70 Ma years, using the numerical method, are given, and the quantity relation among the compactness, thickening and lifting is gotten. The quantitative research for the Qinghai – xizang plateau dynamics proves to be successful.

Key words: qinghai – xizang plateau; dynamical model; terrane; numerical simulation