

一种求解倾斜滑动断层差应力的方法

陈书平 钟建华 宋全友

(石油大学资源系,东营,山东)

摘要 构造地质学与其他科学一样以定量化作为其目标之一,构造的应力分析和应变分析是构造地质学定量化发展的手段。在应力分析中,已有一些方法手段确定应力的主方向,但应力大小的计算仍没有得到很好的解决。本文通过固体力学和断裂力学的分析,推导出一套求解正断层和逆断层发生的差应力大小的求解公式。正、逆断层发生时的差应力大小随埋深的增大而增大;在地表条件下,正、逆断层发生时的差应力与岩石初始抗剪强度和岩石的内摩擦角有关。本文中的公式与已有的共轭剪节理求解古差应力大小的公式结合,可做出某一个地区的差应力值图,恢复古应力场。

关键词 差应力大小 正断层 逆断层

0 引言

Ramsay J G曾指出几乎所有的科学分支都在精确的定量方法取代较为定性的方法时得到重大的发展^[1]。构造地质学发展的目标之一就是定量化,而应力应变分析是构造地质学定量化发展的基础。应力的分析包括应力的方向和大小,对于应力方向的确定现在已经发展起了一些成熟的方法^[2],如通过断层、节理和褶皱的解析;但应力大小的确定仍然是一个难题,一些方法也很不成熟。如通过位错密度和亚颗粒大小或重结晶颗粒大小的估算^[2,3],大都处于探索阶段或较麻烦。从构造地质学意义上来说,对我们有意义的是差应力值的确定,王维襄等^[4]曾通过对共轭剪节理求解差应力大小做了有益的尝试。本文对正断层和逆断层差应力的求解作一些尝试。

1 三维应力状态下任意截面上的应力

现假定某一地质体处于三维应力作用下,取其一单元体,处于主应力状态($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3; \epsilon_1 > \epsilon_2 > \epsilon_3$; 压为正,拉为负)之下,从应力分析理论可知任意截面 n 上的应力(图 1)大小^①为:

$$\epsilon_n = \epsilon_1 l^2 + \epsilon_2 m^2 + \epsilon_3 n^2 \quad (1)$$

$$\bar{\epsilon}_n = \frac{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - \epsilon_n^2}{2} \quad (2)$$

1998年 1月 19日收稿,1998年 6月 10日修改稿

① 王维襄编著. 固体力学. 武汉地质学院, 1984. 146-147

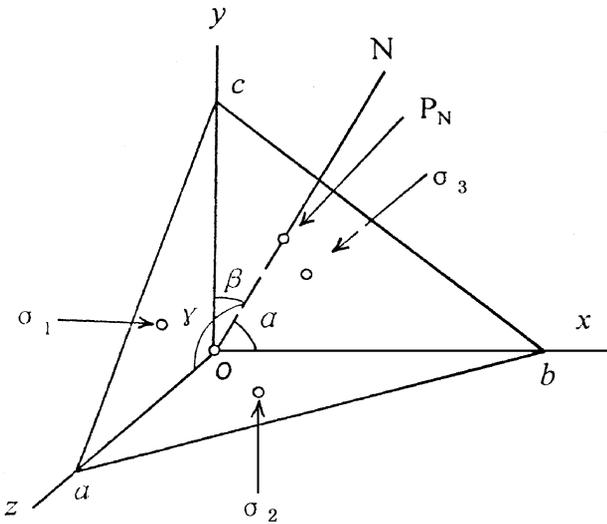


图 1 空间主应力状态下,某截面应力状态

Fig. 1 Sketch for stress state of certain plane in three dimension principal stress state

其中, ϵ_n 为该截面正应力, f_n 为该截面剪应力, l, m, n 为该截面在 $x-y-z$ 坐标系中的方向余弦 ($x/l, y/m, z/n$), 且,

$$l = \cos(N, \epsilon_1) \quad m = \cos(N, \epsilon_2) \quad n = \cos(N, \epsilon_3)$$

其中, N 为该截面的外法线.

该截面应力 P 在 x, y, z 轴应力分量分别为:

$$Px = \epsilon_1 l \quad (3) \quad Py = \epsilon_2 m \quad (4) \quad Pz = \epsilon_3 n \quad (5)$$

2 断裂准则

断裂准则有很多,如库仑-纳维叶准则,莫尔准则等^[5,6,7]. 库仑-纳维叶准则是目前岩石力学、构造地质学和地质力学中最常用、最简单也是较符合地质体断裂变形的准则^[7].

库仑-纳维叶准则认为岩石沿某一面发生剪切破裂,不仅与该面上剪应力有关,而且与该面的正应力有关,即满足下式:

$$f_n = f_0 + f \epsilon_n \quad (6)$$

其中, f_n 为岩石剪切面剪应力, f_0 为岩石初始抗剪强度, ϵ_n 为剪切面上的正应力, f 为岩石内摩擦系数 ($f = \tan h$, h 为岩石内摩擦角)

此准则并认为,剪裂面永远平行于中间主应力 (ϵ_2), 外法线与最大主应力 ϵ_1 的夹角为, $T = 45^\circ + h/2$, 与最小主应力的夹角为, $T = 45^\circ - h/2$

理想情况下,断裂面在 $x-y-z$ 坐标系下的方向余弦为:

$$l = \cos(45^\circ + h/2) \quad (7)$$

$$m = \cos 90^\circ = 0 \quad (8)$$

$$n = \cos(45^\circ - h/2) \quad (9)$$

将 (7), (8), (9) 代入 (1), (3), (4), (5) 式得:

$$\epsilon_n = 0.5(\epsilon_1 + \epsilon_3) - 0.5(\epsilon_1 - \epsilon_3) \sinh \quad (10)$$

$$Px = \epsilon_1 \cos(45^\circ + h/2) \quad (11)$$

$$Py = 0 \quad (12)$$

$$Pz = \epsilon_3 \cos(45^\circ - h/2) \quad (13)$$

将(10)、(11)、(12)、(13)代入(2)式并化简,得:

$$f_h = 0.5(\epsilon_1 - \epsilon_3) \cosh \quad (14)$$

将(10)、(14)代入(6)式并化简得

$$f_b = 0.5(\epsilon_1 - \epsilon_3) / \cosh - 0.5 \operatorname{tgh}(\epsilon_1 + \epsilon_3) \quad (15)$$

3 正断层、逆断层差应力求解

为推导方便,我们设:

$$\epsilon_1 - \epsilon_3 = k \quad (16)$$

将(16)代入(15)并化简有:

$$\epsilon_1 + \epsilon_3 = k / \sinh - 2f_b / \operatorname{tgh} \quad (17)$$

(16)+ (17)有:

$$\epsilon_1 = 0.5k(1/\sinh + 1) - f_b / \operatorname{tgh} \quad (18)$$

(16)- (17)有:

$$\epsilon_3 = 0.5k(1/\sinh - 1) - f_b / \operatorname{tgh} \quad (19)$$

根据威尔逊断裂准则,地表附近必有二个主应力水平。另一主应力铅直。 ϵ_1 直立时产生正断层, ϵ_1 水平 ϵ_3 直立时产生逆断层^[6](图 2)。

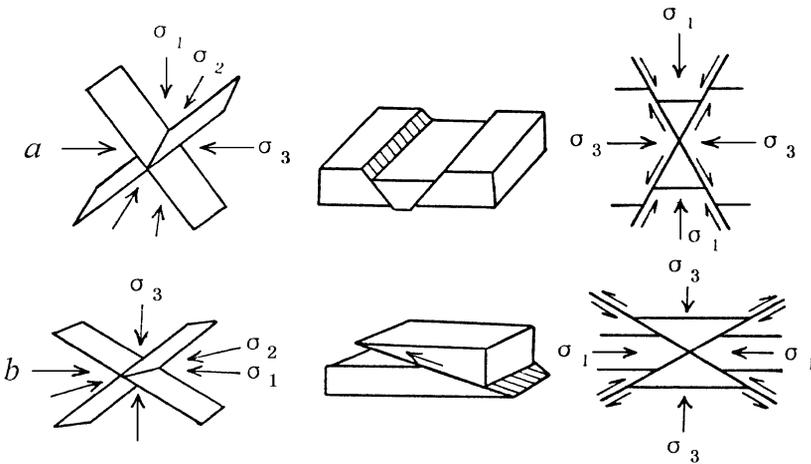


图 2 正断层和逆断层的应力状态

Fig. 2 Sketch for the stress state of normal and reverse faults

a. 正断层应力状态; b. 逆断层应力状态;

对地表某岩层来说,考虑其铅垂方向上的正应力是由上覆地层自重引起的,则有:在正断层情况下,

$$\epsilon_1 = dgz \quad (20)$$

在逆断层情况下,

$$\epsilon_3 = dgz \quad (21)$$

d 为岩石密度, g 为重力加速度, z 为深度,

将(20)式代入(18)式并化简有:

$$K = (2dgz \sinh + 2f_0 \cosh) / (1 + \sinh) \quad (22)$$

此为正断层发生时的最大差应力。

将(21)式代入(19)式并化简有:

$$K = (2dgz \sinh + 2f_0 \cosh) / (1 - \sinh) \quad (23)$$

此为逆断层发生时的最大差应力。

在式(22)、(23)中,对某一岩性来说, d, g, h 是一定的,变化的是深度。如果深度已知,则很容易求出差应力值。上述两式反映正断层发生的差应力比逆断层发生的要小。同一岩性,随深度增加,发生断层的差应力也随之增大。如果不考虑岩石内摩擦角随深度的变化,则发生断层的差应力大小与深度呈线性关系。

如果岩石密度连续变化,则式(22)、(23)中的 dgz 应换为 $\int_0^z dg dz$ 。如果分段均匀,则此项应换为 $E d_g H_i$, n 为分段数量,且:

$$H_1 + H_2 + \dots + H_n = Z \quad (24)$$

如果考虑地表浅层条件下 z 很小,且岩石内摩擦角一般小于 30° ,多数情况下小于 $10^\circ - 20^\circ$,所以 \sinh 比 \cosh 小得多,则可将项 $2dgz \sinh$ 略去,则(22)(23)式简化为:

$$K = 2f_0 \cosh / (1 + \sinh) \quad (25)$$

和

$$K = 2f_0 \cosh / (1 - \sinh) \quad (26)$$

(25)、(26)式分别为地表条件下,正断层和逆断层最大差应力表达式。

4 讨论

由于岩石破裂准则有很多,本文所用的库仑断裂准则可能不一定合适,但我们推导出的计算正、逆断层发生时的差应力公式仍有一定的实用性。对于某一岩性,很容易从我们推导出的公式中求出发生断裂时的差应力大小,且正断层发生的差应力比逆断层的小。岩石埋深越大,发生断层时所需的差应力越大。

在构造地质学的应力分析中,已经有比较成熟的方法恢复古应力的方向,如通过断层的解析,褶皱的解析和节理的解析,但仅有这些是不够的,还应该确定应力的大小,王维襄已推导出从共轭剪节理求解差应力大小的公式。如果与本文推导出的公式相结合,能尽量多地获得某一地区的应力点,从而可以做出差应力等值线图,弥补了当前应力场研究中仅仅依靠主应力轨迹图表达应力场的不足。差应力等值线可用于预测和寻找隐伏构造及矿体。

参 考 文 献

- 1 Ramsay J.G.等. 现代构造地质学方法. 刘瑞 等译. 北京: 地质出版社, 1991
- 2 万天丰. 古构造应力场. 北京: 地质出版社, 1988
- 3 Max Wyss. 地球的应力. 马瑾等译. 北京: 科学出版社, 1984. 18- 30

- 4 王维襄,等.棋盘格式构造的力学分析.地质力学论丛(4).北京:科学出版社,1977.64-75
- 5 王仁,等.固体力学基础.北京:地质出版社,1979.71-72
- 6 陆克政.构造地质学教程.山东:石油大学出版社,1996.49-52,131
- 7 陈子光.岩石力学性质与构造应力场.北京:地质出版社,1986.217-220,111-112,108

A NEW METHOD TO DETERMINE THE DIFFERENTIAL STRESS OF DIP-SLIP FAULTS

Chen Shuping Zhong Jianhua Song Quanyou
(*University of Petroleum, Dongying*)

Abstract Structural geology seeks to approach its subject of study in a quantitative way. Stress and strain analysis of structures are essential to this approach. In the stress analysis, we can often determine the directions of the principal stresses, instead of their magnitudes. In this paper, we develop the equations to determine the differential stresses for normal and reverse faults, which increase with depth and are related to the initial shear strength and the angle of inner friction of rocks on the surface. These equations can be used in combination with those in calculating the differential stress from conjugate joints to obtain the differential stress in certain area.

Key words magnitude of differential stress, normal fault, reverse fault

第 一 作 者 简 介

陈书平,男,1965年生,讲师,1985年毕业于华东石油学院(现石油大学)。1988年在中国地质大学(北京)获硕士学位,现在石油大学(华东)从事构造地质学和大地构造学的教学和科研工作。通讯地址:山东东营市泰安路149号石油大学资源系。邮政编码:257062