

地壳中张力区对孕震断层的作用

荣代潞

(兰州地震研究所)

摘 要

本文应用裂缝的位错理论及位错在应力场中受力的概念讨论了地壳中水平张力区对孕震断层的作用。从理论上计算了位于径向分布的张力区中孕震断层端部所受力的表达式和方向。指出张力区对孕震断层有类似于象力*的作用。在一定配置条件下,它有利于裂缝的传播,并使裂缝在传播过程中拐弯。地壳底部受一定分布的垂直力作用时,会在其周围产生水平张力区。因此,可以通过地形变资料、孕震断层周围的地质情况去寻找张力区的可能存在区域并分析它对孕震断层可能产生的作用。

一、引 言

在一定的构造应力作用下,震源的孕育和地震的发生取决于地壳介质的不均匀性。在组合模式中,这种不均匀性表现为调整单元的存在。调整单元可以是介质切变模量低的地区,密度很小的地区,或者是一种张应力区。在地震发生时,调整单元可为震源断层盘的错动让位,即软介质为硬介质的运动让位;密度小的介质为密度大的介质让位;在一定条件下张力区为压力区介质让位。本文拟对第三种情况即张力区为压力区介质的让位问题作一比较详细的讨论,以供地震预报参考。

二、地壳中张力区的存在及其力学模型

在一般情况下,由于构造应力的存在,地壳中的介质处于压应力状态。但在某些情况下,在地壳中的某些区域可以处于张应力状态。例如:

1. 在构造应力作用下的蠕滑断层,在其周围要产生压力和张力区的象限性分布(图1)。
2. 文献^[1]论证了上地幔给予地壳底部的垂直力的存在。当地壳底部一定区域受一向上的垂直力作用时,地壳会向上隆起,因此对隆起区周围的介质有牵拉作用,这样就使周围介质处于张应力状态(图2a);当上地幔向下运动时,地壳的某一区域会产生凹陷(图2b),同

* 郭增建、秦保燕于1979年研究了象力在震源过程中的作用,见兰州地震研究所1979年2月上报国家地震局的课题计划书。

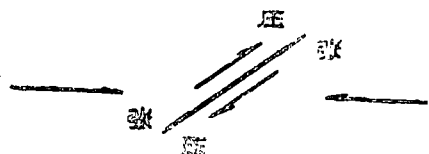


图1 蠕滑断层周围的压张区分布

Fig.1 The distribution of
press and tension
around the creep fault.

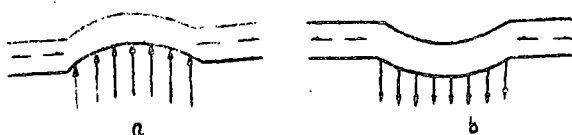


图2 地壳底部垂直力作用在其周围产生的张应力

Fig.2 The tension due to the acting
of vertical forces on the bottom
of the crust.

样会牵拉周围介质使其处于张应力状态。下面着重研究这种情况。

为简化起见, 设垂直力的作用区域为一半径为 a 的圆形。在离此区域足够远的地方的应力状态可以看作是由于在一圆周上作用有向内的径向力所引起的。设此圆周半径为 R ($R > a$), 作用力集度 q (图3), 由弹性力学可知^[2], 这时介质内 r 处 ($r > R$) 的应力状态为:

$$\sigma_r = \frac{R^2}{r^2} q, \quad \sigma_\theta = -\frac{R^2}{r^2} q, \quad \tau_{r\theta} = 0 \quad (1)$$

三、裂缝在应力场中受力的位错理论

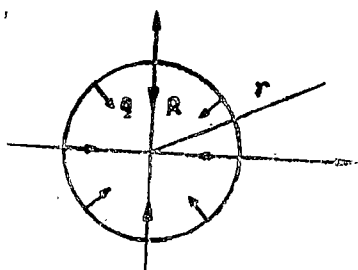


图3 平面内一圆周上有径向力作用

Fig.3 The radial forces acted
on a circle

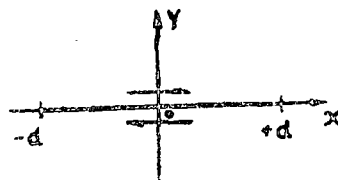


图4 平面弹性剪切裂缝

Fig.4 The plane elastic
shear fracture.

设想在介质中有一穿透的平面剪切裂缝, 选择坐标系如图4, 裂缝长为 $2d$ 处于应力场 $[\sigma]$ 中。根据裂缝的位错理论, 此平面弹性剪切裂缝可以用分布密度为 $B(x)$ 的刃型位错阵列来表示^[5]。

$$B(x) = \frac{2(1-\nu)\sigma_t}{\mu} \cdot \frac{x}{\sqrt{d^2-x^2}} = M \frac{x}{\sqrt{d^2-x^2}}, \quad (M = \frac{2(1-\nu)\sigma_t}{\mu}) \quad (2)$$

ν 为介质泊松比, μ 为剪切模量, σ_t 是裂缝上的剪应力, 在一般情形下:

$$\sigma_t = \sigma_T - \sigma_F \quad (3)$$

σ_T 是裂缝处的构造剪应力, σ_F 是裂缝面上的摩擦应力。一个布格矢量为 $\vec{b}$ 的位错在应力场 $[\sigma]$ 中单位长度位错线上所受到的力为^[8]:

$$\vec{F} = [\sigma] \vec{b} \times \vec{t} \quad (4)$$

$\vec{t}$ 为位错线方向的单位矢量。位错分布密度 $B(x)$ 表明，在 $x \rightarrow x+dx$ 范围内总的布格矢量大小为 $B(x)dx$ 。对于图4所示平面弹性剪切裂缝，在 $-d \rightarrow 0$ 范围内（即裂缝左边）， $d\vec{b} = (-B(x)dx, 0, 0)$ ， $\vec{t} = (0, 0, -1)$ 。在 $0 \rightarrow +d$ 范围内（即裂缝右边）， $d\vec{b} = (B(x)dx, 0, 0)$ ， $\vec{t} = (0, 0, 1)$ （以上的Z方向垂直纸面向外）。对于平面应力问题：

$$[\sigma] = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{xy} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

由(4)式，通过普通的张量和矢量运算，对于裂缝的左边和右边均得出：

$$d\vec{F} = (B(x)\tau_{xy}dx - B(x)\sigma_x dx, 0) \quad (6)$$

即：

$$\begin{cases} dF_x = B(x)\tau_{xy}dx \\ dF_y = -B(x)\sigma_x dx \\ dF_z = 0 \end{cases} \quad (7)$$

此处 τ_{xy} ， σ_x 为裂缝上两边X处的应力。对于整个裂缝的作用力可通过(7)式积分求得：

$$\begin{cases} F_x = \int_L B(x)\tau_{xy}dx \\ F_y = \int_L (-B(x))\sigma_x dx \\ F_z = 0 \end{cases} \quad (8)$$

对裂缝左边，积分限 L 为 $-d \rightarrow 0$ ，右边 L 取为 $0 \rightarrow +d$ 。这力分别作用于裂缝左右两端的裂缝线上，它可以使裂缝两端扩展，拐弯或阻止裂缝扩展。

四、张力区对裂缝的作用

设坐标选取和裂缝位置如图5。在直角坐标 $x'-y'$ 中，圆周边上的径向应力所产生的应力场为：

$$\begin{cases} \sigma_{x'} = \sigma_r \cos^2 \alpha + \sigma_\theta \sin^2 \alpha = \frac{R^2}{r^2} q \cos 2\alpha \\ \sigma_{y'} = \sigma_r \sin^2 \alpha + \sigma_\theta \cos^2 \alpha = -\frac{R^2}{r^2} q \cos 2\alpha \\ \tau_{x'y'} = (\sigma_r - \sigma_\theta) \sin \alpha \cos \alpha = \frac{R^2}{r^2} q \sin 2\alpha \end{cases} \quad (9)$$

其中 $r = \sqrt{x'^2 + y'^2}$ ， α 为介质中一点的矢径对 x' 轴的夹角。在裂缝坐标 $x-y$ 中，由

$$\begin{cases} x' = x + h \\ y' = y + k \end{cases} \quad (10)$$

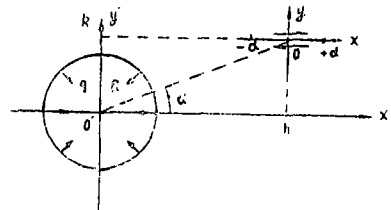


图5 张力区中的平面弹性剪切裂缝
Fig. 5 The plane elastic shear fracture in the tension region distributed radially.

及 $y = 0$ (即裂缝处)
得:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{R^2 q}{(x+h)^2 + k^2} \cos 2\alpha \\ \sigma_y = \frac{-R^2 q}{(x+h)^2 + k^2} \cos 2\alpha \\ \tau_{xy} = \frac{R^2 q}{(x+h)^2 + k^2} \sin 2\alpha \end{cases} \quad (11)$$

这时 α 为裂缝上坐标为 x 的点的矢径对 X' 轴的夹角, 由此可求得裂缝左右两端所受的力。根据(8)式, 并将

$$\begin{cases} \sin 2\alpha = \frac{2k(x+h)}{(x+h)^2 + k^2} \\ \cos 2\alpha = \frac{(x+h)^2 - k^2}{(x+h)^2 + k^2} \end{cases} \quad (12)$$

代入, 得:

$$\begin{cases} F_x = 2MR^2q \int_L \frac{kx(x+h)}{\sqrt{d^2 - x^2} [(x+h)^2 + k^2]^2} dx \\ F_y = -MR^2q \int_L \frac{x[(x+h)^2 - k^2]}{\sqrt{d^2 - x^2} [(x+h)^2 + k^2]^2} dx \\ F_z = 0 \end{cases} \quad (13)$$

五、讨 论

(13)式中 F_x , F_y 分别表示裂缝端部在张应力场中沿裂缝平面和垂直于裂缝平面所受的力, F_x , F_y 的大小、方向不同就分别表示张应力场有利于裂缝扩展、阻止裂缝扩展或使裂缝在传播过程中拐弯。可以看出, F_x , F_y 的大小和方向与裂缝在空间的位置有关, 即与表达式中 h , k 有关。我们对(13)式中的两个积分进行了数值计算, 得到如图6所示的结果, 其中 $\alpha = \arctg \frac{k}{h}$ 表示裂缝中心在 $x' - y'$ 坐标系中的方位角。

由图可以看出, 在 $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ 范围内, 对裂缝左边, $F_{x左} < 0$, 对右边, $F_{x右} > 0$, 这表明张力区有利于裂缝的传播。在 $-\frac{\pi}{2} < \theta < 0$ 范围内, $F_{x左} > 0$, $F_{x右} < 0$, 表明张力区阻止裂缝传播。对于 F_y , 情形稍复杂一些。关于 F_x , F_y 在各个区域内的方向示于图6中。 F_y 的方向表明张力区使裂缝在传播过程中发生拐弯的情况。

张力区的这种吸引裂缝的物理实质正是由于在一定配置条件下张力区对压力区的介质让位的结果, 这种让位改变了裂缝端部的应力分布状态。一方面增大了裂缝两边的有效剪应力, 有利于裂缝错动; 另一方面使裂缝端部的正应力 (σ_x) 发生变化, 正是这正应力使裂

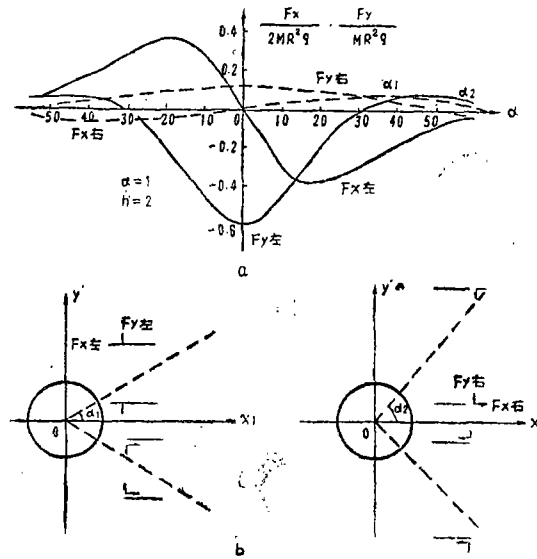


图6 张力区中的裂缝在不同区域的受力情况

Fig. 6 The value and direction of the forces acted on the ends of the shear fracture located in the tension region distributed radially.

缝在传播过程中发生拐弯。由此可以看出,张力区对孕震断层也可以产生类似象力^[4]的作用。以上讨论的是典型的径向分布的张力区的情形。在一般情形下,地壳介质中一定区域产生的张力区的形状、分布等是十分复杂的,但它对孕震断层产生作用的物理实质是一样的,也要产生类似象力的作用。在文献^[1]中已提到过组合模式中不同的调整单元配置情况下压张应力分布对积累单元发震的影响。

地壳中的水平构造压应力与垂直力联合作用共同决定着地震的孕育和发生^[1]。本文所讨论的垂直力所引起的水平张应力对孕震断层的作用,我们认为也就是垂直力对震源过程起作用的主要方式之一。地壳介质受垂直力的作用可以从地壳的形变资料反映出来,它表现为地壳表面的某一区域形成隆起或凹陷。近年来,我国的一些大震就发生在隆起区的边缘或稍远的地方。例如1975年2月4日辽宁海城地震,由形变资料可以知道,大震前在震中区外存在明显的隆起区,即著名的庄河隆起(图7)^[5]。可以看出,这种隆起所产生的水平牵拉作用对海城地震的西南盘施加拉力,增加了海城地震震源断层面上的剪应力,有利于海城地震的发生。

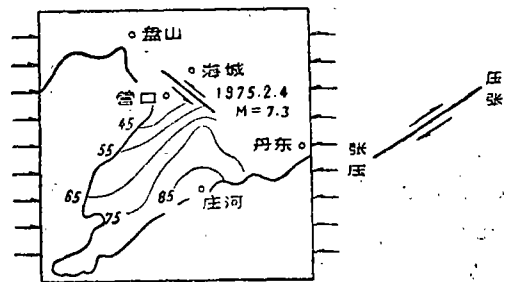


图7 海城地震与庄河隆起

Fig. 7 The fault of Haicheng earthquake and zhuanghe bulge.

因此,在实际应用中我们可以通过地形变资料、孕震断层周围的地质条件去寻找地壳中张力区的可能存在区域,并分析它对孕震断层可能产生的作用。这样,对震源发展过程的研究

究以及地震预报可以提供一定的参考信息。

本文得到郭增建老师的直接指导、谨致感谢。

(本文1983年10月22日收到)

参 考 文 献

- [1] 郭增建等, 从水平力和垂直力的互相作用讨论我国境内地震的孕育, 地球物理学报 Vol. 20, № 3, 1977.
- [2] 徐芝纶, 弹性力学, 人民教育出版社, 1979.
- [3] R. w. Lardner, Mathematical theory of dislocations and fracture, University of Toronto press, 1974.
- [4] 荣代路, 像力及其在震源过程中的作用, 西北地震学报, Vol. 4, № 1, 1982.
- [5] 郭增建、秦保燕, 震源物理, 地震出版社, 1979.

THE EFFECT OF TENSION REGION IN THE CRUST ON THE FAULT IN EARTHQUAKE SOURCE

Rong Dailu

(*Seismological Institute of Lanzhou, State Seismological Bureau, Lanzhou, China*)

Abstract

In this paper, by applying the theory of dislocation for fracture and the conception of the force acted on the dislocation in stress field, the effect of horizontal tension region in the crust on the fault in earthquake source has been discussed. The formulas and the directions of the forces acted on the ends of the fault in earthquake source located in the tension region distributed radially have been derived theoretically. It is pointed out that tension region has the effect similar to image force for the fault in earthquake source. Under certain dispositions, this effect is to the benefit of propagating of fracture and cause the change of the propagating direction to the fracture. When the bottom of the crust is acted by certain distributed vertical forces, horizontal tension region will be produced at the surroundings. So, according to the datum of surface deformation of the crust and the geological condition around the fault in earthquake source, we could find out the possible existence of tension region and analyse it's possible effect on the fault in earthquake source.