

震源错动带端部的刚度效应

王绳祖 施良骐 张 流

(国家地震局地质研究所)

摘 要

本文通过震源简化模型的分析表明,震源的环境刚度(包括轴向、侧向和错动带端部刚度)是影响发震的重要因素。除强度条件外,环境刚度条件是发震的另一必要条件。在考虑环境刚度效应的情况下,震源平均应力降的数量级有可能小于 10^2 MPa,甚至 10^1 MPa,在较高围压下产生较低的应力降。文中还讨论了区分两类闭锁部的必要性,指出错动带上的闭锁部有的是潜在的“震核”,有的则作为“端部”,阻碍发震;液体渗入震源体的不同部位可能引起两种相反的作用,诱发或抑制强震的发生。同时还讨论了环境刚度的几何参数和烈度分布之间的关系。

引 言

在浅源强震的发震过程中,震源处于周围岩体的围限之中。从发震的力学作用来看,震源所受的围限包括两个方面:第一,压力围限—震源受三轴压力的作用;第二,变形围限—震源处于不同刚度特性的岩体包围之中,其中包括错动块体前方岩体的阻挡作用。已有的有关高压失稳的种种实验结果,诸如沿平直错动面的粘滑、完整岩石峰值强度与摩擦强度之间差距的缩小、张裂和扩容现象的减弱以及脆性—延性过渡等等^[1~4],为人们认识“压力围限”,摆脱单轴实验和浅表岩石失稳的传统观念提供了依据。固体围压介质三轴实验^[5~7]则为人们认识“变形围限”提供了有利条件。作者已作的研究表明,处于错动块体前方的围压介质的刚度对岩石失稳状况有着十分明显的影响。环境刚度不仅影响应力降的大小,而且成为是否产生突发震动的重要条件。

对于无限延展的平直错动带,环境刚度可以由轴压系统刚度和围压系统刚度的联合影响表示。对此,作者已在文献^[6]中作了初步的探讨。实际的断层不可能无限延展,各种各样的阻挡和闭锁形成了错动带的“端部”。错动带端部的阻挡作用成为震源环境刚度的重要组成部分。本文的目的在于着重探讨错动带端部阻挡下的环境刚度效应,从而为进一步建立合乎震源实际的比较完整的发震模式做准备。

二、震源简化模型及应力降

1. 无限错动带上的单元滑块^[6]

假设震源发震时岩体沿一无限伸展的错动面错动，采用图1所示的二维弹簧—滑块简化模型表示其中一单元块体。弹簧长度 l_1 和 l_3 分别由远端静止（速度 $V_1 = V_3 = 0$ ）来定义，它们反映了震源的发震范围。忽略弹簧的侧向变形（泊松效应），由集中于滑块“1、2、3”处的等效质量 M 表示发震系统的质量，忽略速度阻尼项，这样可建立沿 $X-X$ 方向的运动方程：

$$M\ddot{X} = A - BX \quad (1)$$

$$\begin{cases} A = \frac{A_1}{M \cos \theta} [(S_s - S_k) + (\mu_s - \mu_k) \sigma_{n:0}] \\ B = \frac{k_1 \sin^2 \theta}{M} [1 - \mu_k \cot \theta + \frac{k_3}{k_1} (\cot^2 \theta + \mu_k \cot \theta)] \end{cases} \quad (2)$$

$\sigma_{n:0}$ 为开始错动时的法向压力；

$$\sigma_{n:0} = \frac{\sigma_{1:0} + \sigma_{3:0}}{2} + \frac{\sigma_{1:0} - \sigma_{3:0}}{2} \cos 2\theta \quad (3)$$

$\sigma_{1:0}$ 、 $\sigma_{3:0}$ 为初始最大和最小主应力； θ 为错动面法线与最大主应力的夹角； K_1 、 K_3 为沿最大和最小主应力方向的弹簧刚度；

$$K_1 = \frac{E_1 A_1}{L_1}, \quad K_3 = \frac{E_3 A_3}{L_3} \quad (4)$$

E_1 、 E_3 为“弹簧”柱体的等效变形模量； A_1 、 A_3 为最大和最小主应力对滑块的作用面积； S_s 、 μ_s 和 S_k 、 μ_k 为静的和动的摩擦常量。

解方程(1)，并导出应力降表达式如下：

$$\Delta \tau = 2 \lambda_0 [(S_s - S_k) + (\mu_s - \mu_k) \sigma_{n:0}] \quad (5)$$

式中 λ_0 为震源的力学环境因数，

$$\lambda_0 = \frac{1 - (k_3/k_1) \cdot \cot^2 \theta}{1 - \mu_k \cot \theta + (k_3/k_1) (\cot^2 \theta + \mu_k \cot \theta)} \quad (6)$$

$$\lambda_0 = \frac{1 - (E_3/E_1) \cdot (l_1/l_3) \cot \theta}{1 - \mu_k \cot \theta + (E_3/E_1) (l_1/l_3) (\cot \theta + \mu_k)} \quad (7)$$

由(5)式可见，震源应力降 $\Delta \tau$ 取决于震源的应力状况($\sigma_{n:0}$ 或 $\sigma_{1:0}$ 、 $\sigma_{3:0}$ 、 θ)、岩体的强度特性(S_s 、 μ_s 和 S_k 、 μ_k)和力学环境因数 λ_0 。力学环境因数主要反映环境刚度和应力场方向对应力降和发震过程的影响。图2表示了它们之间的关系：随着 k_3/k_1 比值的增大，应力降减小，甚至没有应力降，即不发震。

2. 考虑错动带端部的阻挡作用

实际的震源错动带并不无限伸展，错动岩体的前方总要受到各种阻挡。为了反映错动带端部的这种阻挡作用，可采用图3所示的简化模型。其中 K_e 和 l_e 是端部“弹簧”的刚度和长度。

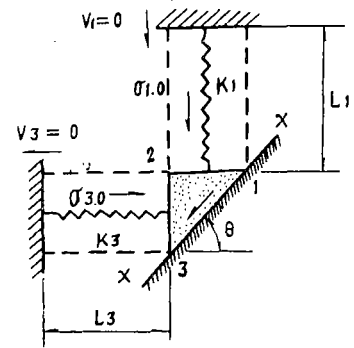


图1 无限错动带的震源模型

Fig. 1 A simplified model of hypocenter on infinite fault zone.

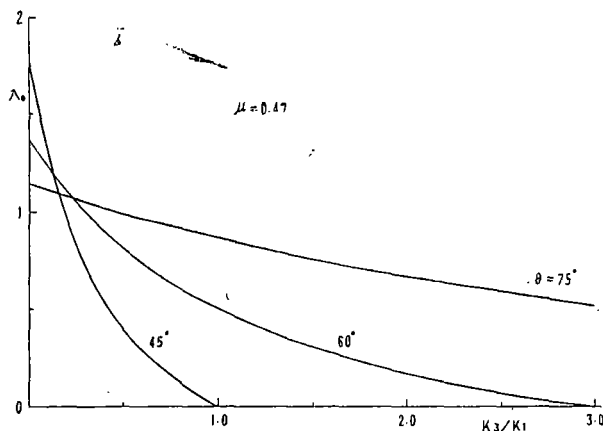
图2 无限错动带条件下的力学环境因数 λ

Fig. 2 Mechanical environment factor for infinite fault zone.

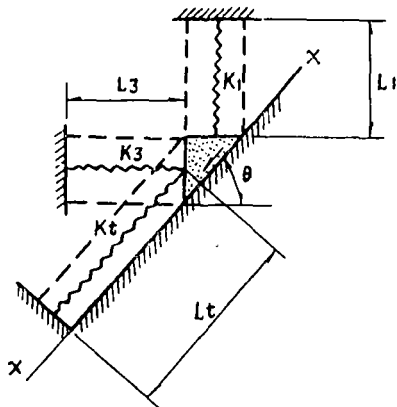


图3 考虑端部阻挡作用的震源模型

Fig. 3 A simplified model of hypocenter on tip-constrained fault zone.

设 R_x 为滑块沿X—X方向滑移 x 距离时前方的阻挡力,

$$R_x = K_3 x \cos^2 \theta + K_t x \quad (8)$$

或表示为

$$R_x = k_3' x \cos^2 \theta \quad (8a)$$

则

$$k_3' = k_3 \left(1 + \frac{k_t}{k_3} \cdot \frac{1}{\cos^2 \theta} \right) \quad (9)$$

$$k_t = \frac{E_t A_3 \cos \theta}{l_t}, \quad k_3' = \frac{E_3 A_3}{l_3'} \quad (10)$$

其中 E_t 为端部“弹簧”柱体的等效变形模量。利用(4)式和(10)式,由(9)式可得

$$k_3' = k_3 \left(1 + \frac{E_t}{E_3} \cdot \frac{l_3}{l_t \cos \theta} \right) \quad (11)$$

以 k_3' 代替(6)式中的 k_3 。则得端部阻挡下的力学环境因数 λ :

$$\lambda = \frac{1 - (k_3/k_1) [1 + (E_t/E_3) (l_3/l_t \cos \theta)] \cot^2 \theta}{1 - \mu_k \cot \theta + (k_3/k_1) [1 + (E_t/E_3) (l_3/l_t \cos \theta)] (\cot^2 \theta + \mu_k \cot \theta)} \quad (12)$$

或

$$\lambda = \frac{1 - [(E_3/E_t) (l_t/l_3) + (E_t/E_1) (l_t/l_t \cos \theta)] \cot \theta}{1 - \mu_k \cot \theta + [(E_3/E_t) (l_t/l_3) + (E_t/E_1) (l_t/l_t \cos \theta)] (\cot \theta + \mu_k)} \quad (13)$$

如果考虑块体错动前方岩体的等效变形模量 $E_3 = E_1$, 则(12)式可改写为;

$$\lambda = \frac{1 - (k_3/k_1) (1 + l_3/l_1 \cos \theta) \cot^2 \theta}{1 - \mu_k \cot \theta + (k_3/k_1) (1 + l_3/l_1 \cos \theta) (\cot^2 \theta + \mu_k \cot \theta)} \quad (14)$$

若取 $\mu_k = 0.47$ ，则(14)式可由图4表示。由图示曲线可见，随着单元滑块距端部距离的加大， λ 值上升。例如，在 $\theta = 60^\circ$ ， $k_3/k_1 = 1.0$ ， $l_k \cos \theta / l_3 = 1.0$ 的情况下， $\lambda = 0.172$ ； $l_1 \cos \theta / l_3 = 0.5$ 时， $\lambda = 0$ 。因此，应力降远远小于不考虑环境刚度情况下所得的计算值，而且，只有距端部一定距离的岩体才可能发生突发错动，出现应力降。

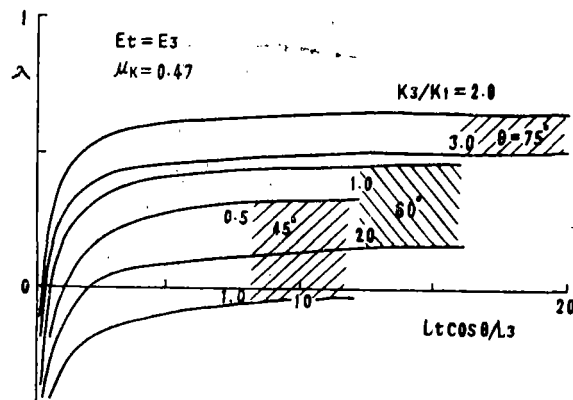


图4 考虑端部阻挡作用的震源力学环境因数 λ

Fig. 4 Mechanical environment factor for tip-constrained fault zone.

3. 震源平均应力降

由上文可知，因端部阻挡作用，应力降沿错动带的分布是不均匀的。其中零应力降（即 $\lambda = 0$ ）的位置可由(12)式确定：

$$\left(\frac{l_1 \cos \theta}{l_3} \right)_{\lambda=0} = \frac{(E_t/E_3) (k_3/k_1) \cot^2 \theta}{1 - (k_3/k_1) \cot^2 \theta} \quad (15)$$

或

$$\left(\frac{l_1 \cos \theta}{l_3} \right)_{\lambda=0} = \left(\frac{E_1}{E_t} \tan \theta - \frac{E_3}{E_t} \right)^{-1} \quad (15a)$$

代入(12)式得

$$\lambda = \lambda_0 \left(\frac{\xi}{a + \xi} \right) \quad (16)$$

式中 λ_0 为无限错动带的力学环境因数，见(6)式。

$$a = \left[\frac{E_1}{E_t} \cdot \frac{l_3}{l_1} \tan(\theta - \phi_k) + \frac{E_3}{E_t} \right]^{-1} \left[\frac{E_1}{E_t} \tan \theta - \frac{E_3}{E_t} \right]^{-1} \quad (17)$$

$$\phi_k = \tan^{-1} \mu_k$$

$$\xi = \left(\frac{l_1 \cos \theta}{l_3} \right)_{\lambda=0} - \left(\frac{l_1 \cos \theta}{l_3} \right) \quad (18)$$

设 L_0 为应力降不小于零（即 $\lambda \geq 0$ ）的错动段长度， λ 值最大处

$$\left(\frac{l_1 \cos \theta}{l_3} \right)_{\lambda=\lambda_{max}} = \left(\frac{l_1 \cos \theta}{l_3} \right)_{\lambda=0} + \frac{L_0}{2 l_3} \quad (19)$$

$$\xi_{max} = \frac{L_0}{2 l_3} = \left(\frac{l_1 \cos \theta}{l_3} \right)_{\lambda=\lambda_{max}} - \left(\frac{l_1 \cos \theta}{l_3} \right)_{\lambda=0} \quad (20)$$

以 λ_m 表示 L_0 长度范围内平均的 λ 值, 则

$$\lambda_m = \frac{2l_3}{L_0} \lambda_0 \int_0^{\xi_{max}} \frac{\xi}{a+\xi} d\xi \quad (21)$$

可求出

$$\lambda_m = \beta \lambda_0 \quad (22)$$

式中

$$\beta = 1 - \frac{2l_3}{L_0} \cdot a \ln \left(1 + \frac{L_0}{2l_3} \cdot \frac{1}{a} \right) \quad (23)$$

如果 $E_1 = E_3 = E_t$, $\mu_k = 0.47$, 则 β , λ_m 值如表1, 2所示。

β 值

表1

θ	l_3/l_1	$L_0/2l_3$					
		0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	4.0
45°	1.33	0.013	0.026	0.062	0.115	0.201	0.323
	1.50	0.018	0.036	0.084	0.152	0.255	0.391
	2.00	0.030	0.058	0.131	0.225	0.354	0.502
60°	0.87	0.019	0.036	0.085	0.153	0.257	0.393
	1.16	0.031	0.059	0.133	0.228	0.357	0.505
	1.73	0.049	0.092	0.196	0.316	0.461	0.607
75°	0.54	0.030	0.057	0.129	0.222	0.350	0.497
	0.80	0.046	0.088	0.187	0.305	0.448	0.595
	2.95	0.129	0.222	0.396	0.545	0.682	0.791

震源的力学环境因数平均值 λ_m

表2

θ	l_3/l_1	$L_0/2l_3$					
		0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	4.0
45°	1.33	0.002	0.004	0.010	0.018	0.031	0.050
	1.50	0.004	0.008	0.019	0.034	0.056	0.086
	2.00	0.012	0.023	0.052	0.089	0.140	0.198
60°	0.87	0.003	0.006	0.015	0.026	0.044	0.068
	1.16	0.009	0.018	0.041	0.070	0.109	0.155
	1.73	0.025	0.046	0.098	0.158	0.231	0.304
75°	0.54	0.007	0.013	0.029	0.049	0.078	0.110
	0.80	0.017	0.033	0.070	0.113	0.167	0.221
	2.95	0.104	0.180	0.321	0.441	0.552	0.640

如果以 $\theta = 45^\circ \sim 60^\circ$ 的角度范围和比值 $L_0/2l_3$ 不大于2.0估计, λ_m 值的可能范围为0~0.231。

三、讨 论

1. 发震的刚度条件

由上文可知, 突发应力降的发生并不是无条件的。也就是说, 并不是沿错动带剪应力达

到剪切强度就必然发震。强度条件只是发震的必要条件,而不是充分条件。只有具备突发应力降大于零所要求的各种条件时,才会发震,其中包括震源的环境刚度条件。环境刚度条件是发震的另一必要条件,并可表示如下:

$$\lambda > 0 \quad (24)$$

将(13)式代入上式,则有

$$\frac{E_3}{E_1} \cdot \frac{l_1 \cos \theta}{l_3} > \left(\frac{E_1}{E_3} \cdot \frac{l_3}{l_1} \tan \theta - 1 \right)^{-1} \quad (25)$$

如果 $E_1 = E_3 = E_t$, 则发震的环境刚度条件为

$$\frac{l_1 \cos \theta}{l_3} > \left(\frac{l_3}{l_1} \tan \theta - 1 \right)^{-1} \quad (26)$$

并可由图5表示。当 $\frac{l_1 \cos \theta}{l_3}$ 和 l_3/l_1 坐标点落在曲线以上区域时,才可能发震。

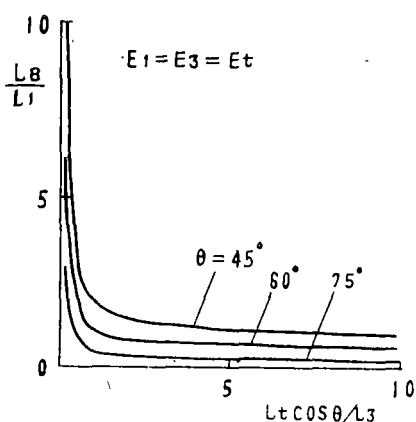


图5 发震的环境刚度条件

Fig. 5 Environmental stiffness condition for shock-generation.

2. 关于错动带上的闭锁部

错动带上的种种闭锁部容易引起应力集中和能量积聚,通常被认为是发震危险地段。然而,根据错动段端部的阻挡作用和刚度效应,闭锁部又有可能成为岩体错动前方的障碍,抑制地震的发生。因此,应该把潜在错动带上的闭锁部分为两类:

第一类闭锁部积聚能量,并在满足强度条件时促成可逆应变能的释放,成为震源体中的震核。

第二类闭锁部阻挡岩体错动,抑制能量释放,形成错动带端部。

只有距离第二类闭锁部足够远,即 $l_1 \cos \theta / l_3$ 值满足(25)式的情况下,第一类闭锁部才可能成为实际的震核和地震危险区。因此,对于断层的交汇部、曲折部、端部等闭锁部要作具体分析,区分类别,判断发震的可能性。

当错动带上有多个第一类闭锁部断续分布时,它们的强度相互越接近,越容易发生突发错动;反之,强度分布越分散,错动容易表现为渐进式。

3. 关于地壳岩体的非均质性

(12)式等 λ 值表达式表明,震源环境刚度受岩体变形特性 E_1 、 E_3 和 E_t 等参数的影响,而震源各部位岩体变形特性的差异则是这种影响的前提。

造成岩体变形特性差异的原因很多,诸如岩性、温度或压力的不均匀分布,不同的载荷状态(处于加载区或卸载区),不同的变形破坏程度(处于弹性、塑性或假塑性变形阶段),流体的渗透,以及岩浆的侵入等等。它们通过种种途径改变震源的环境刚度,从而导致孕震和发震过程的复杂多样,大大增加了地震预报的难度。

例如,液体渗入震源的不同部位对发震的影响也就不同。液体渗入第一类闭锁部,引起岩体的软化和孔隙压的增大,强度随之降低,从而避免能量的高度积聚,或者,诱发能量的

释放;液体渗入第二类闭锁部附近,则将降低变形模量和刚度,促成第一类闭锁部的突发错动。因此,关于注水消震的设想,必须考虑到水的两种作用,避免酿成地震。

4. 环境刚度参数与烈度分布

由(22)式等可知,环境刚度效应直接取决于 E_3/E_1 、 E_1/E_3 、 l_3/l_1 、 $L_0/2l_3$ 和 θ 等物理、几何参数。其中几何参数 l_1 、 l_3 由“弹簧”远端静止来定义,它们反映了震源体的尺度。震源体,作为地震波的源,包括突发错动带和错动直接作用下的振荡区,震源简化模型中“弹簧”的静止端,相当于震源体的边界。

对于近垂直的走滑断层,如果强震震源深度为10~25公里,错动带长度达数十公里,则浅表地层在震源体的直接牵连下,也将发生错动和振荡。震中附近的烈度分布,除了反映地震波的作用外,还受到这种牵连作用的直接影响。尤其是浅表地层的错动和破裂主要地应该是这种牵连作用的结果。若以地表裂缝作为牵连作用的标志,则可采用烈度Ⅶ度区^[8]的外侧或内侧等震线粗略估计 l_1 、 l_3 以及 l_1 ,并用极震区长度粗略估计 L_0 值。

例如,1970年1月5日通海7.7级地震^[9-11],震源深度13公里, L_0 约为51.4公里,取 $\theta = 45^\circ \sim 60^\circ$, $\mu_k = 0.47$, $S_k = 25\text{MPa}$, $\mu_s = 0.60$, $S_s = 50\text{MPa}$, $\sigma_{s,0} = 200 \sim 400\text{MPa}$, $E_1 = E_3 = E$,计算所用的其它参数及计算结果如表3所示。

震源平均应力降的计算

表 3

θ	45°	60°	
l_1 (km)	15.4~40.0	18.3~42.9	
l_3 (km)	21.7~54.3	17.7~48.6	
l_3/l_1	1.36~1.41(平均1.39)	1.13~0.97(平均1.05)	
$L_0/2l_3$	0.47~1.19	0.53~1.45	
β	0.066~0.149	0.124~0.267	据式23
λ_0	0.177	0.261	据式7
$\beta\lambda_0$	0.012~0.026	0.032~0.070	
$\Delta\tau/\beta\lambda_0$ (MPa)	212.5~342.5	141.1~220.6	参见式5
$\Delta\tau$ (MPa)	2.55~8.91	4.52~14.44	

四、小 结

(1) 本文提出的震源简化模型进一步表明了环境刚度对于发震过程的重要影响。在判断地震危险区、估计强震迁移趋势和从事有关的数学和物理模拟时,不仅要分析应力场和强度条件,而且要考虑变形场和刚度条件。强度条件只是发震的一个必要条件,而不是充分条件。

(2) 实验应力降显著偏大的原因之一是未能具备相应的环境刚度条件。在考虑环境刚度效应(包括端部刚度)的情况下,震源平均应力降有可能小于 $2[(S_s - S_k) + (\mu_s - \mu_k)\sigma_{s,0}]$ 值的1~2个数量级;震源在较高的围压下有可能产生较小的应力降。

(3) 震源错动带上存在着两类闭锁部:一类,积聚变形能,成为可能的震核;另一类,阻挡错动,成为错动带的端部。前者距离后者足够远的情况下才可能成为实际的震核。

(4) 震源各部位岩体变形特性的差异和变化是改变环境刚度、导致孕震发震过程复杂

化的重要原因。例如，液体的渗入有可能抑制强震的发生，也可能降低侧向和端部刚度，诱发强震。

(5) 环境刚度的几何参数 l_1 、 l_3 、 l_1 、 L 。等和震源尺度及烈度分布有关，研究烈度分布和机制很可能是震源模型用于实际的一个重要环节。

(本文1984年3月10日收到)

参 考 文 献

- [1] Byerlee, J. D., Brace, W. F., High-pressure mechanical instability in rocks, *Science*, vol. 164, P. 713—715, 1969.
- [2] 王绳祖、张流, 地壳温压条件下周口店花岗闪长岩的变形破坏, *地震地质*, Vol. 4, № 4, 1982.
- [3] 王绳祖、张流、剪切破裂与粘滑—浅源强震发震机制的研究, *地震地质*, Vol. 6, № 2, 1984.
- [4] 张流、王绳祖、施良骐, 我国六种岩石在高围压下的强度特性, *岩石力学与工程学报*, 待发表.
- [5] Tullis, J., Yund, R. A., Experimental deformation of dry Westerly granite, *J. Geophys. Res.*, Vol. 82, № 36, 1977.
- [6] 王绳祖、施良骐、张流, 环境刚度效应—影响震源应力降的重要因素, *地震地质*, Vol. 5, № 3, 1983.
- [7] 张流、施良骐、王绳祖, 地壳条件下与地震相关的岩石破坏和断层活动的实验研究, *中国地震断层学术讨论会文集(出版中)*, 1984.
- [8] 中国科学院地球物理研究所, *地震学基础*, 科学出版社, 1976.
- [9] 国家地震局地质研究所, *中国八大地震震害摄影图集*, 地震出版社, 1983.
- [10] 马宗晋、付征祥、张郢珍、汪成民、张国民、刘德富, 一九六六年—一九七六年中国九大地震, 地震出版社, 1982.
- [11] 韩慕康, 关于通海地震发震地点的商榷, *地震地质*, Vol. 2, № 2, 1980.

STIFFNESS EFFECT OF FAULT ZONE TIP IN HYPOCENTER

Wang Shengzu Shi Liangpi Zhang Liu

(Institute of Geology, State Seismological Bureau, Beijing, China)

Abstract

Some simplified hypocenter models are presented for explaining an important effect of environmental stiffness, which includes the axial and the lateral stiffness and that of fault zone tips, on shock-generation process of hypocenter. Besides the strength condition, the environmental stiffness condition is another one necessary for shock-generation. The effect of environmental stiffness may reduce the magnitude of mean stress drop in hypocenter to the order of 10^2 or even 10 Mpa, and the lower stress drop may occur at higher confining pressure. Some problems are discussed; two different kinds of locking segments on fault zone--the potential "seismic core" and the "tip" which constrains shock-generation; two possible effects of water injecting into different parts of hypocenter region--inducing or preventing strong earthquake; the relation between the geometric parameters of environmental stiffness and the distribution of seismic intensity.