

一个划定强震危险区的方法*

丁文镜

(清华大学)

摘 要

华北地区多次强震发震断层走向表明,该区存在主应力方向一致的应力场。根据库伦-纳维强度理论,本文提出了临界走向断层的概念,探讨了形成闭锁段的物理机制。同时引用作者以往的研究结果——闭锁段附近断层错距和应力场的某些特征^[1,2]。综合这些结果,本文构成了一套按力学原理划定强震危险区的方法。此外,还讨论了估计未来地震震级的方法。

一、前 言

为了减轻地震灾害,必须较准确地划定强震危险区。可是目前人们对构造地震孕育和发展的过程尚未认识清楚,只有断层成因说获得比较普遍的承认^[1]。本文根据近十多年华北地区历次强震的观测资料,以及地震勘探和地质调查的结果,运用板块、断块学说和浅源构造地震断层成因说的一些观点^[2],根据库伦-纳维强度理论提出了临界走向断层的概念,讨论形成闭锁段的物理机制,同时引用了作者以往的研究结果——闭锁段附近断层错距和地应力场的特征,从而构成一套按力学原理确定强震危险区的方法。如果能够得到足够的观测资料来确定震区应力场的主方向和临界走向断层,并通过实测这些断层的错距来确定闭锁段位置和长短,再在闭锁段周围若干地点测量地应力增量,就能利用本文提供的方法划定强震危险地点。根据实测的断层错距,还可粗略地估计闭锁段附近积累的应变能,供预测未来强震震级时参考。

二、临界走向断层上闭锁段的形成机制

近来华北地区六级以上强震的发震断层大都为高倾角断层,其走向也具有明显的规律性。邢台地震群的首次强震(隆尧 6.8 级地震)、河间 6.3 级地震、渤海 7.4 级地震、和林格尔 6.3 级地震以及唐山 7.8 级地震^[3],其发震断层均为北北东走向,断层活动方式为右旋。海城 7.3 级地震断层走向为北西西,活动方式为左旋^[4](图 1)。不难看出,华北地区存在统一的主压应力轴为北东东方向的区域应力场。

地球物理勘探和地质调查资料都已证实,华北地区有许多深、大断裂^[5],将地壳分割成许多不同尺度和不同形状的断块。断块之间夹着很薄的填充物,其弹性模量和强度比

* 1980年2月20日收到初稿;1981年3月17日收到修改稿。

基岩低得多,因而华北地区地壳是一块非均匀介质构成的厚板。四周承受相邻地壳的挤压,垂向受自重重力压缩。一般说来,非均匀介质受压产生的应力场通常是不均匀的。可是,华北地区的历次强震表明,该区存在着主应力方向一致的应力场。下列三个因素也许是形成此种应力场的主要原因:第一,断层填充物很薄(约几十米厚);第二,相邻断块基岩的弹性模量接近;第三,地壳深部(超过十公里)承受三向压缩,使基岩和填充物形成一整体(包沁涅斯克曾用此种观点有效地处理了松散物质的平衡问题^[6]),故可将断层介质弹性模量急剧降低看作对原始均匀应力场的“扰动”,既然填充物很薄,这种“扰动”涉及范围也较小。一般说来,“扰动”除去使断层内剪应力降低外,在断层交汇部位和端部还引起局部应力集中。与此相应,在这些部位的主应力方向会有显著变化。而在其余更广阔的地区,主应力方向不会有明显变化。对此,已有人作了一些光弹试验,结果与上述观点基本吻合。

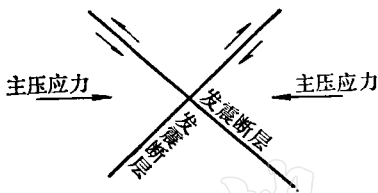


图 1

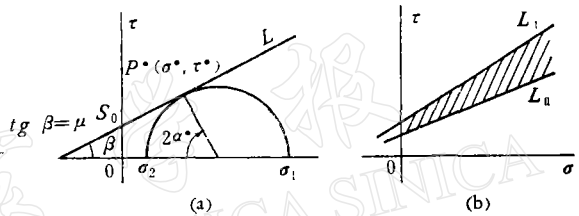


图 2

按照库伦-纳维强度理论,当断层面应力满足下列等式时,断层剪切破坏。

$$\tau = S_0 + \mu\sigma \quad (1)$$

式中 τ 和 σ 为断层面剪应力和正应力; S_0 为填充物内聚力强度; μ 为内摩擦系数。在 (σ, τ) 平面上, (1) 式是一条斜直线 L (图 2(a)), 称为剪裂线。若震区应力场主应力为 σ_1 和 σ_2 , 参照图 2(a), 不难看出, 应力圆与 L 切点 P^* 所对应的断层, 其走向与 σ_1 的夹角为 α^* 。按照库伦-纳维强度理论, 走向与 σ_1 夹角为 α^* 的断层最容易剪裂, 故称其为临界走向断层。因此, 走向与临界走向断层接近的那些断层是容易发震的危险断层。

由于断层面尺度很大, 不同部位介质的内聚力强度和内摩擦系数差别也很大。剪裂线分布在图 2(b) 中的阴影线区内。上界为 L_1 , 下界为 L_2 。随着震区受压加剧, 应力圆扩大, 当它与 L_2 相切和相交时, 走向与临界走向断层相同或接近的断层上的脆弱部位将被剪裂, 使断层发生局部蠕滑(但整个断层并未失稳), 导致断层面应力重新分布, 使弹性模量和抗剪强度高的部位的剪应力增长。随着挤压进一步加剧, 局部蠕滑区域扩大, 最后仅有少数抗剪强度特别高的部位承受着剪切荷载, 使这些部位的剪应力高度集中。由于基岩抗剪强度远大于断层填充物的强度, 断层两盘相互卡住的地方, 长期蠕滑必将使其成为高应力集中区, 通常把它称为闭锁段^[8,9]。应该指出, 此处所说的闭锁段模式与 1973 年郭增建等提出的震源模式基本一致^[10]。此外, 1976 年努尔也提出类似的观点, 即当沿活动断层的岩石变形分布有变化时, 在断层高摩擦区的滑动会受到阻碍^[11]。

下述若干事实, 可以作为闭锁模式的证据。第一, 在活动断裂的曲折突出部位、活动断裂与另一断裂交叉处和断裂两端, 断层蠕滑最易使其成为闭锁段(李四光于 1970 年曾

经指出这些地方最容易发震^[12]。统计资料证实大多数强震确实发生在这些地方^[13]。第二,根据统计学的观点,小闭锁段的数目比大闭锁段的数目多得多,因而按照闭锁模式,小震频度远比大震频度为高,这一点与实际观测相符合^[1]。第三,同一地区在同一地质时期内,构造运动速度不会相差很大,因此,驱使小闭锁破坏所需的时间较短,而驱使大闭锁破坏所需时间要长得多。实际观测证实,强震孕育时间比小震孕育时间长得多^[14]。第四,在构造运动强烈地区,断层蠕滑较快,已发震段还可以重新卡住形成新闭锁,经过不太长的时间以后,可以再次发震。实际上,圣安德烈斯断层的霍列斯特地区(在加利福尼亚)每隔几年就有一次小震,我国南北地震带上也有重复发震的地区。第五,按照闭锁模式,断层在不很长的段上可能同时在几处卡住,形成几个闭锁段,发震时逐个剪破。维斯和布龙等的观测证实了这一点。他们发现某些强震(例如1964年阿拉斯加地震)包含了几次破裂^[15,16]。第六,强震过程中断层两盘剧烈错动,促使震区产生许多闭锁段。加上主震后震区应力调整很迅速,致使新的和老的闭锁较快破裂,构成余震序列。这已为大量观测所证实^[1]。此外,大闭锁段破坏伴有应力释放和调整,断层两端强余震常引起两端剪应力交错降低,导致强余震在两端跳跃,这也是经常观测到的现象。唐山地震尤为明显^[17]。综上所述,在强震发生地点、震级分布、孕育时间、重复发震、多次破裂、余震序列和余震震中跳跃迁移等方面,闭锁模式与实际观测都符合。

三、闭锁段附近的断层错距

闭锁段通常比整个断层要短得多,但它将两侧基岩连成一体,断层两侧的基岩可近似看作均匀连续体,通过闭锁段沿水平方向切出一薄片(图3)。考虑到断层接近直立,在铅垂方向又有自重作用,为了便于分析,假设该薄片处于平面应变状态。若断层面剪应力平均增长量为 q ,压应力平均增长量为 p ,断层全长为 $2L$,闭锁段长为 $2l$,断层厚度为 d 。开始形成闭锁后,局部蠕滑使闭锁段剪应力进一步增加,在单位厚度闭锁段上增加的切向荷载 $Q = 2ql$,根据圣维南原理,计算离闭锁段足够远处(大约 $2l$)的应力时,可将闭锁段增长的荷载用集中力 P 代替。至于压应力的增量,只能有一部分集中于闭锁段上。因此需研究两种情况:第一种情况,压应力增量完全集中于闭锁段。这时,用集中力 $P = 2pL$ 代表法向荷载增量。第二种情况,压应力增量保持均匀分布。与这两种相应的力学模型均示于图4。

本文用极坐标和应力函数法求解平面应变问题。众所周知,无体力的弹性平面问题

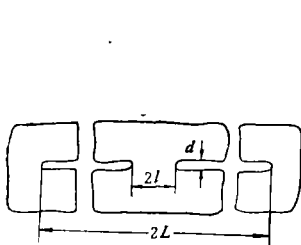


图 3

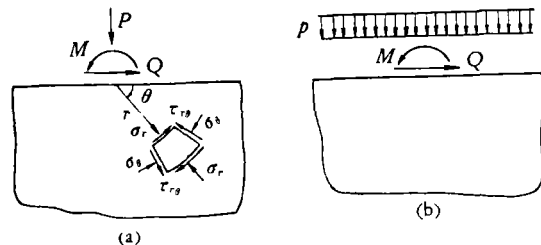


图 4

可以归结为解双调和方程^[18]:

$$\nabla^2(\nabla^2\Phi) = 0 \quad (2)$$

式中应力函数 Φ 可由问题的边界条件确定。文献[8]找到了相应的应力函数,并且导出了径向位移 u 的解析解。对于第一种情况:

$$u = -\frac{2Q}{\pi E_1} \left(\cos\theta \ln r + \frac{d \sin 2\theta}{2r} \right) + \frac{(1-\nu_1)Q}{\pi E_1} \theta \cos\theta - \frac{2P}{\pi E_1} \sin\theta \ln r + \frac{(1-\nu_1)P}{\pi E_1} \theta \sin\theta + C_1 \sin\theta + C_2 \cos\theta \quad (3)$$

对于第二种情况

$$u = -\frac{2Q}{\pi E_1} \left(\cos\theta \ln r + \frac{d \sin 2\theta}{2r} \right) + \frac{(1-\nu_1)Q}{\pi E_1} \theta \cos\theta - \frac{P}{E_1} (\sin^2\theta - \nu_1 \cos^2\theta) + C'_1 \sin\theta + C'_2 \cos\theta \quad (4)$$

参照图 5, 发震前闭锁段端点 A 和 A' 的位移近似相等, 可用它作为定解条件。再由 (3)、(4) 式导出断层两侧基岩上共轭点 B 和 B' 间的径向相对位移:

$$\Delta u = u_{B'} - u_B = \frac{4Q}{\pi E_1} \ln \frac{r}{l} \quad (5)$$

按上述两种情况计算出的 Δu 相同。称为断层错距 (上式中 E_1 为平面变形状态的弹性模量)。将 Δu 对相对距离 r/l 求导数, 得到断层错距梯度

$$\Delta \dot{u} = \frac{4Ql}{\pi E_1 r} \quad (6)$$

按以上二式绘出闭锁段附近断层错距及其梯度的分布曲线 (图 6)。如果断层上两个闭锁段间的距离比闭锁段长得多, 那么, 两个闭锁段相互影响不大。因而, 可以用以上二式近似地绘出每个闭锁段附近的错距及其梯度的分布曲线 (图 7)。

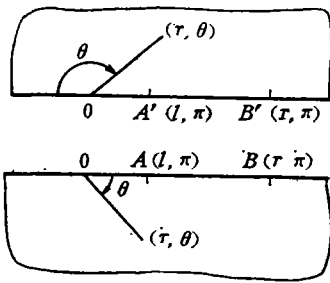


图 5

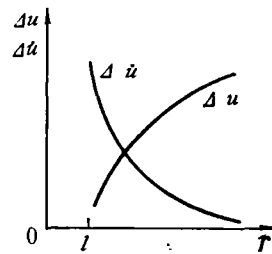


图 6

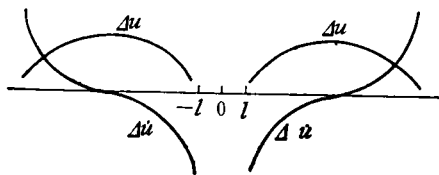


图 7

图 6 和图 7 中的曲线表明, 闭锁段及其附近的断层错距和错距梯度的分布具有两个特点: (1) 在闭锁段内, 断层错距及其梯度均等于零; (2) 在闭锁段外, 离闭锁段越远, 断层错距越大, 错距梯度越小。

由于浅源构造地震的闭锁段不会很深, 因而上述力学模型导出的公式, 能定性地表达闭锁段附近地表断层错距及其梯度的变化规律。若闭锁段较深, 则上述公式算出的数据与地表实测的结果会有一些差别。但是, 闭锁段顶上的地表断层错距总要比周围的小些。因此, 上述解析结果能够用来粗略估计闭锁段的位置和长度。

目前北京地区已经在若干大断层上设置了断层错距测点, 在 1976 年唐山地震孕育和发震过程中, 断层有明显的错动, 不同部位的错动量不同^[19]。由于测点数目太少, 暂时还不能用来确定闭锁段的位置和长度。

利用某个测点 s 实测的断层错距 Δu_s 和该点到闭锁段的距离 r_s , 就能用 (5) 式计算出单位厚度闭锁段上剪切荷载的增长量

$$Q = \frac{\pi E_1 \Delta u_s}{4 \ln \frac{r_s}{l}} \quad (7)$$

以及闭锁段上剪应力的平均增长量

$$q' = \frac{\pi E_1 \Delta u_s}{8 l \ln \frac{r_s}{l}} \quad (8)$$

根据以上公式算出 Q 和 q' 值后, 还能进一步估计闭锁段及其附近累积的弹性应变能的数量级。供预测未来地震震级时参考。

四、闭锁段周围的地应力增量

根据图 4 中的力学模型, 文献 [9] 导出了闭锁段附近应力增量的解析式。引入下列诸参数:

$$\bar{r} = \frac{r}{d}, \quad \alpha = \frac{\pi d}{L}, \quad \beta = \frac{p}{q}, \quad \tau = \frac{q}{\alpha} \quad (9)$$

不难写出第一种情况的应力增量

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -4\tau_0 \cos \theta (\bar{r} - \sin \theta) \bar{r}^{-2} - 4\beta \tau_0 \sin \bar{r}^{-1} \\ \sigma_\theta &= 0 \\ \tau_{r\theta} &= \tau_0 (1 - \cos 2\theta) \bar{r}^{-2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

和第二种情况的应力增量

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -4\tau_0 \cos \theta (\bar{r} - \sin \theta) \bar{r}^{-2} - \alpha \beta \tau_0 \sin^2 \theta \\ \sigma_\theta &= -\alpha \beta \tau_0 \cos^2 \theta \\ \tau_{r\theta} &= \tau_0 (1 - \cos 2\theta) \bar{r}^{-2} - \frac{1}{2} \alpha \beta \tau_0 \sin 2\theta \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由于断层宽度远比断层长度小, 同时, 临界走向断层与主应力 σ_1 间的夹角不会偏离 45° 太远。因此, 选择 $\alpha = 0.01$; $\beta = 0.5, 1.0, 2.0$ 作为典型参数制图是合适的。现将

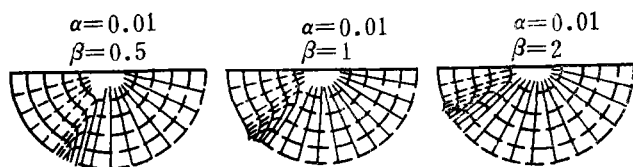


图 8

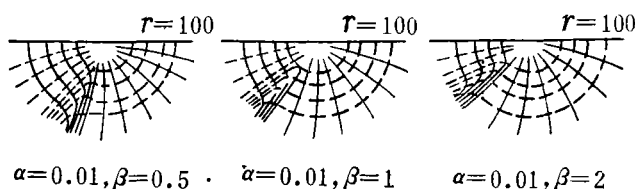


图 9

两种压应力分布情况下的主应力迹线绘制在图 8 和图 9 中。

图 8 和图 9 中的虚线是最大主应力迹线(代数),它是张性应力迹线;实线是最小主应力迹线(绝对值是最大的),它是压应力迹线。这两种情况的主应力(限于应力增量部分,不是绝对应力)迹线有一定的差别。第一种情况(图 8)离闭锁段足够远处($\bar{r} > 10$),除去在射线

$$\theta_1 = \operatorname{tg}^{-1} \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) \quad (12)$$

两侧很窄的扇形区外,总有一个主应力指向闭锁段;第二种情况(图 9),在 $100 > \bar{r} > 10$ 的环形带上,在由 (12) 式确定的射线附近,也有一个主应力近似指向闭锁段。在远离闭锁段的区域,主应力迹线并不在闭锁段上交汇。实际上,由于闭锁段的抗压刚度比断层填充物的抗压刚度,闭锁段上也会有压应力集中。因此,压应力的真实分布状况介于图 4 中两种力学模型之间。与此相应,主应力迹线的分布图谱也介于图 8 和图 9 之间。

此外,文献 [9] 还导出了 σ_r 的等值线,如图 10 所示。图中 θ_1 由 (12) 式确定, θ_2 和 θ_1 的关系由下式确定

$$\left. \begin{aligned} \theta_2 &= \theta_1 + \frac{\pi}{2}, & \beta > 0 \\ \theta_2 &= \theta_1 - \frac{\pi}{2}, & \beta < 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

利用图 10 可以找到地应力增量大的区域。显然,地应力测量点应该设置在这样的地区。

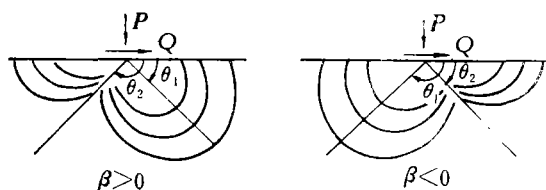


图 10

对于断层上有几个闭锁段的情况,若两个闭锁段靠得很近,可以把它们连起来构成一个较大的闭锁段;若两个闭锁段相距很远,每个闭锁段可单独用上述方法处理。只是当两个闭锁段距离 L_i 介于以上两种情况之间时,例如, $5l < L_i < 20l$, 这时需要按下面介绍的方法处理。

首先,通过实测断层错距确定各个闭锁段的位置、长度以及闭锁段上集中的剪切荷载 $Q_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。至于法向荷载增量的分布,可以采取折中方案,假设仅有一半压应力集中于闭锁段上,另一半均匀分布。由于临界走向断层与 σ_1 的夹角已知,所以由 Q_i 可以推出集中作用于闭锁段上的法向荷载 P_i 和平均分布于半平面边界上的分布荷载 p 。同时,根据野外观测(或地球物理勘探)资料确定断层宽度 d_i , 计算出相应的集中力偶 M_i 。从而构成多个闭锁段的力学模型,如图 11 所示。

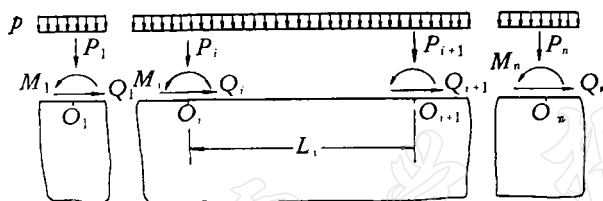


图 11

其次,按(10)式和(11)式计算出各个闭锁段上的集中力、力偶和分布力 p 共同产生的地应力增量 $\sigma_x^{(i)}$ 、 $\sigma_y^{(i)}$ 、 $\tau_{xy}^{(i)}$, 将它们换算到同一个直角坐标上,求得相应的应力增量 $\sigma_x^{(i)}$ 、 $\sigma_y^{(i)}$ 、 $\tau_{xy}^{(i)}$, 再按线性迭加原理把它们迭加起来,就能得到有几个闭锁段时的地应力场,由此可以绘出按理论计算出的主应力迹线。

最后,按实测的地应力增量,数据经过整理后也能据以绘出实测的主应力迹线。如果理论计算的主应力迹线和实测的主应力迹线比较接近,这就证实了按实测断层错距所确定的闭锁段是准确的。从而为划定强震危险地区找到了可靠的科学依据。

以上分析均将基岩作为理想弹性体处理。事实上,地壳深部处于高温高压状态,岩石具有明显的粘弹性。按照钱学森推广的阿尔夫雷对应定理:线性粘弹介质中应力分布和纯弹性介质在同一瞬时的表面力和体积力作用下的应力分布相同^[20]。上述结果对地壳深部仍然成立。

五、划定强震危险地点的方法

综上所述,划定强震危险地点和预测震级,应该完成下列几项工作:

第一,用一种或几种方法确定地区应力场的主方向。其中包括:利用三角网测量地面的水平形变;利用现场应力解除技术测量地应力;分析地震的震源机制解等。

第二,根据地球物理勘探和地质调查资料查明该地区所有深大断裂的走向,选出走向与临界方向接近的断层作监视对象。

第三,在接近临界走向的大断层上,按等间隔原则建立横跨断层的基岩标,测量断层错距,并将实测结果与图 6 中的理论曲线对比,从而估计出断层闭锁段的位置和长度。应

该指出,小闭锁段只能产生小震,特大的闭锁段,根本不会剪破。因此,尺度适中的闭锁段才是最危险的,它的破坏可能引起强震。

第四,在尺度适中的闭锁段周围地应力增量大的区域(参照图 10),设置地应力增量测点,监测地应力变化,并绘出主应力迹线。将其与理论计算出的主应力迹线作对比,如果两种主应力迹线比较接近,那么就证实了利用测量断层错距找到的闭锁段,确实处于应力集中状态,应将其作为强震危险地点。

第五,经过足够长时间的观测,积累了断层错距和地应力增量的观测数据,就能用(7)式和(8)式计算出闭锁段上长期积累的剪切荷载和平均剪应力增量。据此,还可进一步算出它们的增长速率。这些数据对预报地震震级和发震时间都是很有价值的资料。

在长期实践的基础上,不断提高断层错距和地应力增量的测量精度,一定可以从断层错距和地应力增量变化曲线上找到可靠的临震标志。因而,上述两种手段,不仅可以用来完成中长期预报,而且还能为短临预报提供可靠的前兆资料。

确定强震危险地点是一项极为困难的工作,目前还处于探索阶段。本文只是总结华北地区发震断层走向的特点,提出临界走向断层的概念,探讨闭锁段形成的力学机制,对此种模式作了论证,然后综合以前的一些研究结果,归纳出发现闭锁段的方法,将其作为按力学原理划定强震危险地点的依据,以便促进这方面的探讨。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院地球物理研究所,地震学基础,科学出版社,1976.
- [2] 张文佑等,“断块”与“板块”,中国科学,2,1978.
- [3] 邱群,1976年7月28日河北省唐山7.8级地震发展背景及其活动性,地球物理学报,19,4,1976.
- [4] 邓超东等,关于海城地震震源模式的讨论,地质科学,3,1976.
- [5] 滕吉文等,华北平原中部地区深部构造背景及邢台地震(二),地球物理学报,18,3,1975.
- [6] S. P. Timoshenko, History of Strength of Materials, 1953.
- [7] J. C. Jaeger, Elasticity, Fracture and Flow, 1964.
- [8] 丁文镜,强震前闭锁段附近的断层错距,力学与实践,1,1980.
- [9] 丁文镜,强震前闭锁段周围应力场的某些特征,科学通报,14,1979.
- [10] 郭增建等,震源孕育模式的初步讨论,地球物理学报,16,1973.
- [11] A. Nur, Nonuniform friction: a physical basis for earthquake mechanics, EOS, 57, 330, 1976.
- [12] 李四光,地震地质,科学出版社,1973.
- [13] 中国科学院地质研究所,中国地震地质概论,科学出版社,1977.
- [14] 藤井陽一郎,地震発生前の異常地殻変時間とマグニチュードとの関係,《地震》,27,3,1974.
- [15] M. Wyss and J. N. Brune, The Alaska earthquake of 28 March 1964: a complex multiple rupture, Bull. Seis. Soc. Amer., 57, 5, 1967.
- [16] M. D. Trifunac and J. N. Brune, Complexity of energy release during the Imperial Valley California earthquake of 1940, Bull. Seis. Soc. Amer., 60, 1, 1970.
- [17] 丁文镜,唐山地震强余震分布特征和迁移规律,地质科学,1,1978.
- [18] S. Timoshenko, J. N. Goodier, Theory of Elasticity, 3ed., 1970.
- [19] 王宋贤等,北京地区断层的活动,地球物理学报,21,4,1978.
- [20] 钱学森,对粘弹性介质 Alfrey 定理的推广, Quart. Appl. Math., 8, 104—106, 1950.

A METHOD FOR DEFINING DANGEROUS AREAS OF IMPENDING STRONG EARTHQUAKES

DING WENJING

(*University of Tsinghua*)

Abstract

The strike directions of earthquake faults of many strong earthquakes occurred recently in North China show that there exists a stress field, the direction of its principal stress is nearly the same everywhere. Based on the Coulomb-Navier strength theory, the present author proposes in this paper the concept of fault with critical strike and discusses the physical mechanism forming the blocked segment of fault. Some characteristic features of the offset of a fault and the stress field around the block-segment as worked out by the same author previously are referred.

By combining all such results, a method for defining dangerous areas of strong earthquakes is now available. In addition, a method for predicting the magnitudes of earthquakes is also proposed.