震级、异常时间和应变能积累速度

龚 鸿 庆
（天津市地震局）

在地震予报实践中，人们试图应用前兆现象的异常时间的长短来估计未来地震的震级大小。国内外地震工作者提出了一些前兆异常时间与震级的经验关系式。这些关系式一般由下列形式给出：

$$\lg T = aM + b \quad \cdots\cdots (1)$$

式中T为前兆异常时间，M为震级，a与b均为系数。在这里我们根据一些对前兆现象的观测结果，提出以下两个问题：

1.一些地震的异常时间是符合公式（1）的关系。但公式（1）是经验公式，它的实质是什么？

2.另一些地震的某些前兆异常时间並不符合公式（1）又是什么原因？

对此，我们认为在建立异常时间和震级关系式时，必须考虑应力，应变能积累速度。进而本文讨论了震级、异常时间和应变能积累速度的关系，提出了估算应变能积累速度的公式。

一、震前波速比异常时间与震级 地震是一种复杂的物理过程，在此过程中应力的作用是公认的。按浅源构造地震的断层说应力是最活跃的因素，在地震过程中随着应力，应变能的积累将会出现多种前兆现象。诸如；地震波速度的变化，地壳形变，重力变化等等。显然这些前兆现象都有一定的理论和实地观测结果作为自己的依据。其中多数前兆现象外界条件的影响甚大。但地震波速度变化状况直接来自震源区，其物理意义比较明确，现象也较为稳定可靠。因此我们特选择震前地震波速度异常来讨论应力，应变能的积累速度。

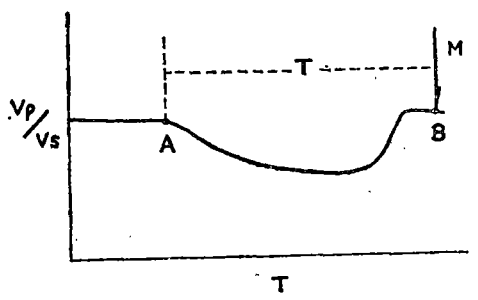

图 1

自从在苏联加尔姆地区发现地震前震源附近地区纵横波速度比（Vp/Vs）出现负异常现象之后，美国、日本、新西兰和我国先后相继证实了一些地震前存在波速比异常。其异常形态可由图1给出。在早期研究报告中，发现波速比异常持续时间（图1中A-B两点间的时间段）与震级有某种联系。惠特科姆（L. H. Whitcomd）应用一些地震的波速比异常持续时间的统计，得到如下经验关系式：

$$\lg T = 0.80M - 1.92 \quad \cdots\cdots (2)$$

一些观测结果表明，有一部份地震的波速比异常时间与震级的关系不符合公式（2）。如我国广东省新丰江水库地震（M=6.1）。按公式（2）计算新丰江水库地震波速比异常时间

应有三十个月，但实际异常时间仅为十一个月。二者相差2.76倍，较大地偏离了公式（2）[1]。对此，笔者考虑应用应力、应变能积累速度加以解释。

二、应力、应变能积累速度 应力、应变能在地震过程中是变化着的。因此我们不仅要考虑其大小，而且还要考虑它们的变化状态。在震前应力、应变能是由小到大地变化着，这就存在一个应力增长速度问题。同时，应力作用结果使岩体内应变能也相应积累，也存在应变能的积累速度问题。如图1所示，按照膨胀理论，波速比 Vp/Vs 的下降，意味着震源区岩体因微裂隙张开，体积膨胀。此时我们完全可以将波速比下降的发生时刻看作一个应力、应变能变化过程中的一个临界标志。我们将波速比出现异常时（图1中A处）作用在岩体上的应力记为 σ_V；将波速比出现异常时已积累的应变能记为 E_V。以后应力进一步发展，应变能也相应进一步积累，当应力、应变能积累水平达到岩体的抗破坏强度时，岩体快速断破，应变能以地震波形式辐射释放，于是地震发生。此时我们将地震发生时的应力记为σ_C；其相应的应变能记为E_C。考虑到应力由波速比异常开始时的 σ_V发展到地震发生时的 σ_C，所需要时间就是波速比异常持续时间 T。这样应力的平均增加速度 V_σ可以写为：

$$V_\sigma = \frac{\sigma_C - \sigma_V}{T} \qquad \cdots\cdots (3)$$

同时可将应变能积累速度 V_E写为：

$$V_E = \frac{E_C - E_V}{T} \qquad \cdots\cdots (4)$$

公式（3）（4）中的V_σ和 V_E是平均积累速度，实事上应力和应变能积累速度在地震前是非均速积累的。但是目前我们对这种非均速积累情况细节实际上是一无所知。因此，我们认为对公式（3）（4）进一步作数学分析的条件还不成熟，仅能用（3）（4）公式给出平均积累速度。

从计算方便考虑，我们采用σ_C乘上一个系数k来表示σ_V。同样，E_C乘一系数k 也可表示E_V。

即：

$$\sigma_V = k\sigma_C \qquad \cdots\cdots (5)$$

$$E_V = kE_C \qquad \cdots\cdots (6)$$

由于 $\sigma_C > \sigma_V$，$E_C > E_V$所以系数k始终小于1。将（5）式代入（3），（6）式代入（4）则有：

$$V_\sigma = (1-k)\frac{\sigma_C}{T} \qquad \cdots\cdots (7)$$

$$V_E = (1-k)\frac{E_C}{T} \qquad \cdots\cdots (8)$$

（7）式中的系数 k 可以应用一些实验室结果进行估计。例如，别尼奥夫斯基（Z.T. Bieniawski）所做的单轴压缩实验表明，当应力（载荷）达到$0.35\sigma_C$时，（σ_C是岩石破坏应力）岩石标本便开始出现膨胀。由此可大概估计 k = 0.35。也有另一些实验结果表明，系数k可估计为0.50。所以系数k 可估计为0.35～0.50左右。

现在我们应用公式（7）（8）来讨论震级、异常时间与应力（或应变能）积累速度的关系。

1.公式（7）、（8）给出了震级、异常时间与应力（或应变能）积累速度的关系。因

为无论是σ_c还是E_c都是震级的函数，由公式（7）、（8）可知，震级与前兆异常时间确实存在正比关系。但这时必须考虑应力积累速度。

2.公式（1）和（2）中，建立了震级与异常时间的关系，並有一部份地震的震级与异常时间符合这种关系。按公式（7）、（8可知，只有当应力、应变能积累速度不变时这种关系才能有明确结果，这是公式（1）和（2）的实质性基础。

3.若在不同的应力、应变能积累速度下，公式（1）中的系数a、b将变化较大，因此，惠特科姆经验公式（公式（2））有一定局限性。一些地震的震级与异常时间不符合公式（2），其原因是在地震孕育过程中应力、应变能积累速度不同所致。新丰江水库地震前波速比异常时间较短，这是因为水库载荷的加载速度（水库蓄水）较快引起的。

4.由公式（7）、（8）可知，若应力、应变能积累速度（V_σ和V_E）具有较高的值，则将导致波速比异常时间较短。因此，出现波速比异常时间较短而震级又较大的震例也是可以理解的。

三、应变能积累速度的估算 利用公式（7）、（8）可以估算从波速比异常开始到地震发生的时间段内的应力、应变能的平均积累速度。但公式（7）中的σ_c不容易估算，因此我们在这里仅用公式（8）来估算应变能积累速度。

为了计算应变能积累速度，对公式（8）中的E_c须作一些说明。E_c是指导致地震发生的震源区的总弹性应变能，可以用地震波能除以地震效率η来求得，即：

$$E_c = \frac{E}{\eta} \qquad \cdots\cdots (9)$$

将（9）式代入（8）有：

$$V_E = (1-k)\frac{E}{\eta T} \qquad \cdots\cdots (10)$$

（10）式中地震波能E可由大家熟知的震级—能量公式求得，我们采用：

$$\lg E = 1.5M + 11.8 \qquad \cdots\cdots (11)$$

这样，应用公式（10）和（11）以及波速比异常时间T就可以估算整个震源区在波速比异常开始后到地震发生时间段内的应变能积累速度V_E。由于不同震级地震的震源区大小不同，因此最好归算到单位体积上的应变能积累速度。此时有：

$$V'_E = V_E/D \qquad \cdots\cdots (12)$$

式中D为震源区体积，这是不易计算的量。我们只能用断裂面面积或断裂长度来概略代替震源区体积。本文只考虑了用断裂长度来代替D，这样得到的应变能积累速度是单位断裂长度上的应变能积累速度。震级与地震断裂长度的关系式我们采用由中国科学院西北地震考察队于1965年给出的公式：

$$M = 3.3 + 2.1\lg L \qquad \cdots\cdots (13)$$

现在来看公式（10）中系数k的估计。系数k是表示岩体出现膨胀时应变能已经积累的程度。因应变能与应力的关系甚为密切，可以参照一些实验给出的出现膨胀现象时的应力水平来估计应变能积累程度。此时系数k在0.35～0.50的范围内，我们取k＝0.40。这一估计含义是：当应变能积累到总弹性应变能的40％时，震源区体积开始膨胀，波速比也出现异常。换言之，地震总弹性应变能的60％是在波速比异常出现后积累起来的。至于地震效率η，陈培善等的估计值0.01～0.05〔2〕，我们取η＝0.05。

为了检查惠特科姆经验公式，我们用公式（2）求得不同震级的波速比异常时间，然后求得整个震源区的应变能积累速度 V_E 和每公里上的应变能积累速度 $V'_E=(V_E/L)$，见表1：

表1 由惠特科姆关系式所得的应变能积累速度

震级	波速比异常时间（天）	整个震源区应变能积累速度（尔格/天）	每公里上应变能积累速度（尔格/天）
5.0	120	2.0×10^{18}尔格/天	
5.5	302	4.8×10^{18}	
6.0	759	1.0×10^{19}	5.3×10^{17}尔格/天
6.5	1901	2.5×10^{19}	7.6×10^{17}
7.0	4787	5.0×10^{19}	8.7×10^{17}
7.5	12020	1.0×10^{20}	1.0×10^{18}
8.0	30200	2.5×10^{20}	1.4×10^{18}
8.5	75850	6.3×10^{20}	2.1×10^{18}

由表1可知，分配到每公里上的应变能积累速度对不同震级的地震十分接近。这就说明惠特科姆经验公式的基础是：不同震级的地震震前应变能积累速度有相同或相近的值，才能有公式（2）的关系。

表2是用相同方法计算的新丰江水库地震，海城、唐山和日本北长野、北宫城地震的应变能积累速度。

应用表1和表2所给出的每公里上应变能积累速度可绘制成图（2）。由该图可以看出对

表2 用实际异常时间推算的几个地震的应变能积累速度

地点	震级	波速比异常时间	整个震源区的 V_E	每公里上的 V'_E
日本、北长野、	5.5	200天	3.6×10^{19}尔格/天	5.7×10^{18}
新丰江水库	6.1	330	3.6×10^{19}	1.9×10^{18}
日本、北宫城	6.5	365	1.3×10^{20}	3.9×10^{18}
海城	7.3	1460	4.1×10^{20}	5.1×10^{18}
唐山	7.8	1670	2.3×10^{21}	1.6×10^{19}

于符合惠特科姆经验关系式的地震，其每公里上应变能积累速度可拟合成一曲线，而表2所引的地震大都偏离了这条拟合曲线。偏离的原因是由于不同的应变能积累速度所造成的。这也是惠特科姆公式有局限性的原因。

应该指出，表1表2给出的应变能积累速度是用波速比异常时间推算的。我们在建立公式（7）、（8）时，异常时间T也可以由其它前兆异常给出，亦即用其他前兆异常也可以推算应变能积累速度。但在应用其他前兆现象异常时间推算应变能积累速度时应注意：（1）

尽量选择距震源较近的观测资料；（2）必须考虑该手段出现异常时应力、应变能的积累水平，即考虑公式（7）、（8）中的系数K的大小问题。

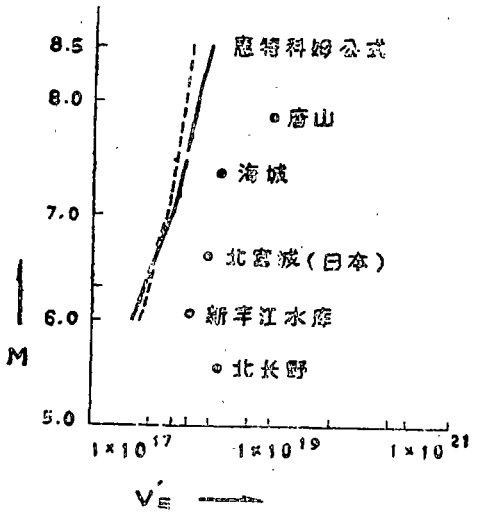

图 2

四、初步结论 综合上述分析，本文有如下初步结论：

（1）震级、异常时间应变能的积累速度三者之间关系可由公式（8）或（10）给出。

（2）惠特科姆提出的震级和异常时间的关系式，其基础是要求这些地震无论震级大小都有相近或相同的应变能积累速度。

（3）实际上应变能积累速度不可能是一致的，对于不同地区、不同时间、不同情况下的地震应变能积累速度可能会相差较大，以致震级与异常时间的关系将不符合公式（2），因此惠特科姆经验公式有局限性。我们在地震预报中应用这类公式应该慎重，否则将可能出现对未来地震的震级估计有较大的偏差。

参 考 文 献

〔1〕冯锐：新丰江6.1级水库地震前后的波速比变化。地球物理学报。1977年3期

〔2〕陈培善、谷继成、李文香：从断裂力学观点研究地震的破裂过程和地震预报，地球物理学报。1977年3期。

（上接第85页）

参 考 文 献

1. 可控硅整流装置 北京电机修理厂，清华大学自动化系编
2. J. L. Storr-Best, Criticai Inductance for Half-Controlled Thyristor Rectifiers, Electronic Eng.38, No.458, PP.230--233, 1966.
3. A. Davies, The Design of Thyristor Controlled Current Stabilized D. C. Power Supplies, E.E.38, No.457. PP.1978--182, 1966.
4. R. Smith, Harmonic Voltages in the Output of Controlled Rectifier Circuits, E.E.36, 832 1964.