

判断续发性强震的一种能量标志

王 振 声

(兰州地震研究所)

一、前 言

大地震发生以后,几乎无例外地有余震发生。由于历史地震缺失余震的记载,所以早期余震方面的研究很少。近年来由于区域台网建立,加以强震频繁积累了一些余震的记录,因而地震序列活动的研究日渐其多,但过去多偏重于序列活动类型方面的研究,对于一强震序列活动后有无续发性地震的问题研究尚少,本文拟对这一问题进行一些初步探讨。

地震的发生有着不同的方式,常见的有地震群、前震、余震等。但是也有破坏性地震的续发现象。它们之间很难下一确切定义以进行鉴定。续发性地震与前一序列在震级方面虽大致相同,但在空间分布与时间间隔上却存在着一定的距离。地震的集合是否具有续发性的关系,除了上述一些问题以外,主要的还是在力学问题上是否具有成因联系,本文拟从能量观点对这一问题作一初步探讨。

二、续发性地震的判别问题

一般说来按照经验,续发性地震发生的震中位置通常在前一地震序列中余震密集区的附近,对于时间来说短则半年长则数年。而他们发生的能量则应由同一能源供应,众所周知这种能源是地壳在地质力的作用下,地层中的某些部位发生变形而引起应变和应变能的,当变形在超过一定限度后应变在某处达到岩石破裂临界值时岩层就会破裂产生错动,从而将贮存的应变能释放以形成地震。断层错动后,将所积累的应变能有时一次放完,也有时多次释放,这种能量的释放其一部分是以地震波的形式传播出去,另一部分则重新分配在邻近岩石中以进行调整,因而可能激发成新的地震,这种新的地震如果在时间上接近,在地点上与强震同处于一个形变体中,多次形成应力的突然降落,因而总的结果是地震成序列地发生,一个序列的地震活动则属于同一个集合的发震过程。

序列的类型很多,一般分为三种类型,即主——余震型、震群型、孤立型。它们的分类是由序列中最大震级释放的能量,与余震释放能量的比值来确定。

在主震——余震序列活动中观测表明由主震所激发的余震常密集在主震附近,这种余震可以理解为与主震同处于遭受过应变的形变体中。为此贝尼奥夫努力去用余震序列以求应变,他引入了一些简化的假设,用地震波能量 E 的平方根以求应变(即每单位体积的形变

量)。E可以从震级 M_s 求出,这样就可能简单算出每次地震应变,特别是主震的应变来。许多地震学家广泛采用了贝尼奥夫的这一方法所假设的地震体积也就是应力贮存的空间并不是不变的,而是随着震级而增加的这一论点。如以余震体积作为形变体积来处理,他得出体积 V (厘米³)和震级 M_s 之间的关系是

$$\lg V = a + bM_s$$

上式表明大震和小震之间的根本差别不在于应变(每单位体积应变)而在于应力状况以及释放应力的体积的大小,其应变是恒定的与震级无关〔4〕。

作者认为地震序列活动释放能量是与形变体积成比例的,形变体积越大,所释放的能量就越大,设E为地震能量,V为形变体积,则有:

$$V \propto E \quad (1)$$

观测表明:余震区密集于主震附近可以作为曾经形变过的形变体积来处理〔6〕,如以V为余震体积,E为序列活动释放的能量,于是上式可化为

$$V = CE \quad (2)$$

在主震-余震型序列活动中主震占序列总能量的98%以上,因而E与主震震级便可以满足古登堡-李希特关系式:

$$\lg E = 11.8 + 1.5M_s \quad (3)$$

将(2)式取对数,并以(3)式代入得:

$$\lg V = \lg E + \lg C = 1.5M_s + b \quad (4)$$

通过对表〔3〕中11次的主-余震序列活动〔5〕研究得

$$b = 9.1 \quad (M_s = 5.5 \sim 7.0)$$

$$b = 8.5 \quad (M_s = 7.1 \sim 8.0)$$

这与巴特所得 $a = 5.17$ 相差悬殊。对于7级左右来说,b值有所不同,这可能与岩石强度有关,如将b值分别代入(4)式则得与主震震级所应有的形变体积如表1所示,众所周知,按照断层成因说,地震是岩层错动的结果〔1〕,受构造运动影响的体积和岩层的强度越大,则可能产生的地震也越大。实际上岩石的强度是有限的。单位体积可能积蓄的应变能也是有限的。岩石在达到破裂时的应变能通常是以单位体积在主震前积累的应变能W表达:

$$W = \frac{E}{V} \quad (5)$$

观测表明6~7级地震与7级以上地震W值不同。震级 M_s 在6.0~7.0范围内时 $W = (4.86 \pm 2.0) \times 10^2$ erg/cc, M_s 在7.1~8.0时 $W = (1.82 \pm 0.12) \times 10^3$ erg/c.c,这些数值表明岩层在积累形变能时强度大的岩石其单位体积所能积累的应变能也大,当单位体积积累到一定数值时岩石强度小的先破裂,释放能量以形成地震。如将上述W及各个地震形变体积V值大小代入(5)式并计算成震级列于表(3)中,表(3)中有*号者如1973年8月11日南坪地震其形变体积表示已孕育有相当于6.8级强震的能量,但主震 M_s 却为6.5;这表明在释放了一次6.5级强震以后还应有6.8级强震发生,在经过三年之久单位体积内的应变能不断增加终于在1976年8月16日松潘发生了一次 $M_s = 7.2$ 的续发性地震,类此还有1974年溧阳5.5级及1966年邢台的7.2级大震。从上述三例看来其0-C值皆在0.3以上而在具有“△”号的各震群型序列的地震中,应变能则大致与序列释放的能量相当。由此可见,凡后有续发性大震的序列活动,其释放能量只占形变能量的一小部分,其剩余能量则与未来续发性的强震震级

大致相当。

又按目前震源深度的测定，其精确度不够理想，作者又根据上述十一个地震〔5〕统计了余震面积 A （平方公里数）与震级 M_s 关系式得：

$$\lg A = aM_s + b \quad (6)$$

式中 $a = 1.1, b = -4.52$ ($M_s = 5.5 \sim 7.0$)；

$a = 0.95, b = -3.68$ ($M_s = 7.1 \sim 8.0$)

以(4)，(6)式对16个地震序列活动(表4)进行检验，对续发性地震来说，其前一地震震级观测值 0 与计算值 C 之差皆在 -0.3 以上，所得结果与(4)式所得一致性良好(表3)，这表明目前计算余震体积的精度可以用(4)式出计算或检验主震的震级，其误差在精度范围内。

三、破裂应变的取值问题

浅源的构造地震绝大多数人认为是地层错动的结果，而断错主要来源于剪切应力，为此如以刚性强度 $\mu = 5 \times 10^{11}$ dyne/cm²， \bar{W} 为剪切应变能代入弹性应变能关系式：

$$W = \frac{1}{2} \mu \gamma^2 \quad \tau = \mu \gamma \quad (7)$$

得剪切破裂应变及剪切应力为：

$$\tau_1 = 22 \text{ kg/cm}^2 \quad \lambda_1 = 4.5 \times 10^{-6} \quad (M_s = 5.5 \sim 7.0)$$

$$\tau_2 = 45 \text{ kg/cm}^2 \quad \lambda_2 = 8.9 \times 10^{-6} \quad (M_s = 7.1 \sim 8.0) \quad (8)$$

从上述破裂应变看来，其值与岩石强度有关，当应变积累到 γ_1 时，强度小的岩石层便破裂形成地震，强度大的岩层要积累到 γ_2 值时才有可能破裂形成地震，因此后者释放的能量要比前者为多，形成震级也比后者要大。上述 γ_1 与力武常次从大地测量所得 4.7×10^{-6} 一致性很好。

四、小 结

综上所述可见。

1. 在地震序列活动中，余震体积或面积分别与序列释放能量有关，在主一余震型序列活动中，由于主震占序列释放总能量的98%以上，所以可将余震体积（或面积）与主震震级之间的关系分别为(4)、(6)式所示。

2. 岩层断错后不可能将所积累的能量一次释放完毕，释放能量中的一部分又重新分配在邻近的岩层中，以激发新的地震形成余震，总的结果是使地震成序列地发生，其剩余能量经过一段时间，继续变形以积累能量，在达到一个新的破裂应变值后发生新的地震，这一地震即为续发性地震。由表(3)看出当震级 $0 - C$ 在 -0.3 以上者可作为续发性地震的一种能量标志。

3. 按照断层成因说，地震是岩层断错的结果，而断错主要来源于剪切应力，从单位体积积累的应变能(5)式来计算应变 $\gamma_1 = 4.5 \times 10^{-6}$ ， $\gamma_2 = 8.9 \times 10^{-6}$ 其中 γ_1 值与力武常次所得一致性很好，剪切应力 $\tau_1 = 22 \text{ kg/cm}^2$ 与 $\tau_2 = 38 \text{ kg/cm}^2$ 则与应力仪在解除应力值时所得数量级一致。

余震体积、余震面积与震级关系表

表1

M_s	A_1 (Km ²)	V_1 (C·C)	M_s	A_2 (Km ²)	V_2 (C·C)
5.0	9	3.98×10^{16}	7.1	1148	1.41×10^{19}
5.1	12	5.62	7.2	1445	2.00
5.2	16	7.94	7.3	1820	2.82
5.3	20	1.12×10^{17}	7.4	2239	3.98
5.4	26	1.58	7.5	2754	5.62
5.5	34	2.24	7.6	3467	7.94
5.6	44	3.16	7.7	4365	1.00×10^{20}
5.7	56	4.47	7.8	5370	1.58
5.8	72	6.31	7.9	6607	2.24
5.9	93	8.91	8.0	8318	3.16
6.0	120	1.26×10^{18}	8.1	10470	4.47
6.1	155	1.78	8.2	12880	6.31
6.2	200	2.51	8.3	15850	8.91
6.3	257	3.55	8.4	19950	1.26×10^{21}
6.4	331	5.01	8.5	25120	1.78
6.5	427	7.08			
6.6	550	1.00×10^{19}			
6.7	703	1.41			
6.8	912	2.00			
6.9	1175	2.82			
7.0	1514	3.98			

$\lg A_1 = 1.1M_s - 4.52$
 $\lg V_1 = 1.5M_s + 9.1$ (5.0~7.0)
 $\lg A_2 = 0.95M_s - 3.68$
 $\lg V_2 = 1.5M_s + 8.5$ (7.1~8.5)

各个地震单位体积释放能量表

表2

年一月一日	震中	M_s	形变体积 (C·C)	序列释放能量 erg	W (erg/CC)	γ	τ 公斤/cm ²
1974-4-22	溧阳	5.5	1.0×10^{18}	1.1×10^{20}	1.1×10^2	6.63×10^{-5}	33.9
1979-7-9	溧阳	6.0	9.1×10^{17}	6.3×10^{20}	6.9×10^2	5.25×10^{-5}	26.7
1979-8-25	五原	6.0	1.9×10^{18}	6.3×10^{20}	3.6×10^2	3.80×10^{-5}	19.4
1976-9-23	巴音木仁	6.2	2.4×10^{18}	1.3×10^{21}	5.4×10^2	4.65×10^{-5}	23.7
1976-4-6	和林格尔	6.3	3.8×10^{18}	1.8×10^{21}	4.7×10^2	4.34×10^{-5}	22.1
1973-8-11	南坪	6.5	2.3×10^{19}	3.5×10^{21}	1.5×10^2	2.45×10^{-5}	12.4
1962-5-21	霍布逊湖	6.8	3.2×10^{19}	1.0×10^{22}	3.1×10^2	3.52×10^{-5}	18.0
1974-5-11	永善大关	7.1	1.9×10^{19}	2.8×10^{22}	1.5×10^3	7.8×10^{-5}	39.8
1966-8-22	邢台	7.2 6.8	7.4×10^{19}	5.2×10^{22}	7.0×10^2	5.3×10^{-5}	27.0
1976-8-16	松潘	7.2 6.7 7.2	5.3×10^{19}	8.7×10^{22}	1.6×10^3	8.0×10^{-5}	40.8
1975-2-4	海城	7.3	3.6×10^{19}	5.6×10^{22}	1.6×10^3	8.0×10^{-5}	40.8
1969-7-18	渤海	7.4	4.4×10^{19}	7.9×10^{22}	1.8×10^3	8.0×10^{-5}	40.8
1976-5-29	龙陵	7.5 6.6 7.6 6.8	1.1×10^{20}	2.9×10^{23}	2.6×10^3	10.1×10^{-5}	51.5
1970-1-5	通海	7.7	1.1×10^{20}	2.2×10^{23}	2.0×10^3	3.9×10^{-5}	45.4
1976-7-28	唐山	7.8	1.6×10^{20}	3.2×10^{23}	2.0×10^3	8.9×10^{-5}	45.4
1973-2-6	炉霍	7.9	2.5×10^{20}	4.5×10^{23}	1.8×10^3	8.5×10^{-5}	43.4

续发性地震的几种指标

表3

年一月一日	震中	震级 (O)	余震面积 (A)	对应震级 (C ₁)	0-C ₁	余震体积 (V)	对应震级 (C ₂)	0-C ₂
*1974-4-22	溧 溧	5.5	138	6.0	-0.5	1.0×10 ¹⁸	6.0	-0.5
1979-7-9	溧 阳	6.0	110	6.0	0	9.1×10 ¹⁷	5.9	+0.1
1979-8-25	五 原	6.0	145	6.1	-0.1	1.9×10 ¹⁸	6.1	-0.1
1976-9-23	巴音木仁	6.2	244	6.3	-0.1	2.4×10 ¹⁸	6.2	0
1976-4-6	和林格尔	6.3	188	6.2	+0.1	3.8×10 ¹⁸	6.3	0
*1973-8-11	南 坪	6.5	960	6.8	-0.3	2.3×10 ¹⁹	6.8	-0.3
1962-5-21	霍布逊湖	6.8	1310	6.9	-0.1	3.2×10 ¹⁹	6.9	-0.1
1974-5-11	永善大关	7.1	1280	7.1	0	1.9×10 ¹⁹	7.2	-0.1
*1966-3-22	邢 台	7.2	3680	7.6	-0.4	7.4×10 ¹⁹	7.6	-0.4
△1976-8-16	松 潘	7.2	2560	7.5	-0.3	5.3×10 ¹⁹	7.5	-0.3
1975-2-4	海 城	7.3	2100	7.4	-0.1	3.6×10 ¹⁹	7.4	-0.1
1969-7-18	渤 海	7.4	1630	7.3	+0.1	4.4×10 ¹⁹	7.4	0
△1976-5-29	龙 陵	7.5	4160	7.7	-0.2	1.1×10 ²⁰	7.7	-0.2
1970-1-5	通 海	7.7	4480	7.7	0	1.1×10 ²⁰	7.7	0
1976-7-28	唐 山	7.8	5600	7.8	0	1.6×10 ²⁰	7.8	0
1973-2-6	炉 霍	7.9	9120	8.0	-0.1	2.5×10 ²⁰	7.9	0

资 料 来 源 表

表4

年一月一日	震中	M _s	余震体积 V	资料来源	余震面积 A	资料来源
*1974-4-22	溧 阳	5.5	1.0×10 ¹⁸	1	138	8
1979-7-9	溧 阳	6.0	9.1×10 ¹⁷	10	110	1
1979-8-25	五 原	6.0	1.9×10 ¹⁸	2	145	2
1976-9-23	巴音木仁	6.2	2.4×10 ¹⁸	8	244	8
1976-4-6	和林格尔	6.3	3.8×10 ¹⁸	2	188	2
*1973-8-11	南 坪	6.5	2.3×10 ¹⁹	8	960	8
1962-5-21	霍布逊湖	6.8	3.2×10 ¹⁹	8	1310	8
1974-5-11	永善大关	7.1	1.9×10 ¹⁹	7	1280	7
*1966-3-22	邢 台	7.2	7.4×10 ¹⁹	3	3680	3
△1976-8-16	松 潘	7.2	5.3×10 ¹⁹	8	2560	8
1975-2-4	海 城	7.3	3.6×10 ¹⁹	3	2100	3
1969-7-18	渤 海	7.4	4.4×10 ¹⁹	3	1630	3
△1976-5-29	龙 陵	7.5	1.1×10 ²⁰	9	4160	9
1970-1-5	通 海	7.7	1.1×10 ²⁰	6	4480	6
1976-7-28	唐 山	7.8	1.6×10 ²⁰	5	5600	5
1973-2-6	炉 霍	7.9	2.5×10 ²⁰	4	9120	3

1. 江苏地震工作通讯——80年1期。
2. 内蒙古地震——79年2期。
3. 西北地震学报——80年2卷2期, P.51。
4. 地球物理学报——Vol.17, №2, P.82。
5. 唐山地震——陈非比等编 P.23。
6. 通海地震目录。

△ 震群型序列

• 后有续发性的地震序列

7. 昭通地震目录。
8. 陕甘宁青地震目录。
9. 龙陵序列目录。
10. 西北地震学报——80年2卷3期 P. 96。

(本文1981年4月8日收到)

参 考 文 献

- [1] 傅承义 地球十讲 科学出版社 1976
- [2] 松泽武雄 地震の理论と应用 东京大学出版会(1976)
- [3] 力武常次 地震予知 中公新书376(1974)
- [4] Markus Bath, Introduction to Seismology 1973 Birkhäuser Verlag Basel and Stuttgart.
- [5] 周惠兰 地震震型判断方法探讨 西北地震学报 第二卷 第二期 1980
- [6] 王振声 从能量及地质条件对主—余震型序列活动特征的初步探讨 西北地震学报 第3卷 第1期 1981
- [7] 山口梅太郎、西松裕一 岩石力学入门 东京大学出版会 1977

AN ENERGY NOTATION TO DISTINGUISH SUCCESSIVE STRONG EARTHQUAKES

Wang Zhen-sheng

(The Seismological Institute of Lanzhou)

Abstract

In the activity of a seismic sequence, there is often a destructive earthquake after the swarm. It is difficult to say that they belong to the same sequence, but it is possible that they are related each other in mechanism. ~~In this paper, we discuss it from the energy idea.~~ ^{the author considers} It shows that the volume and the area of the aftershock are related to the energy of the major earthquake. when the released energy is only a little part of the strain energy, then the remained energy is corresponding to the forthcoming strong earthquake.