

唐山余震活动的分期分区特征

吕培苓 付征祥 薛峰 陈章立

(地震分析预报中心)

摘要

本文研究唐山余震活动时空分布特征,提出唐山余震活动可以分为四个时期和三个余震活动亚区。文中讨论了这一分布特征与震源区地质构造、深部结构以及主震前后地面形变特征的关系。最后指出,主震后应力场的重新分布以及膨胀-流体流动理论可以作为唐山余震成因的一种物理解释。

引言

1976年7月28日唐山7.8级地震后接着发生了大量余震。作者早些时候的研究指出,唐山地震序列是一次主震余震型地震,它具有高 b 值(0.98),低 P 值(1.08),余震的频度高、强度大、持续时间长和能量起伏大,以及晚期强余震发育等主要特点。国内还有不少人

对唐山余震活动作了专门的研究^[1,2,3,4]。但是,上述有关唐山余震活动的研究还是很不够的。详细地研究一次浅源大地震活动时空分布,不仅能够使我们进一步认识余震对于主震的依赖关系,并可能提供有关余震成因的更多的信息,从而为正确地预报强余震,特别是晚期强余震提供某些线索。

一、唐山余震活动的分期特征

余震发生过程实质上是震后震源区应力—应变特征的反映。国内外许多人对余震活动作过大量研究。帕帕扎科斯在研究希腊地区余震活动后曾经指出^[5],一次浅源大地震的余震序列,按其应力—应变特征,可以分为三相。第一相为压缩相,第二相以切变为主,第三相即为晚期强余震释放。近年来, M. Bonafede^[6]根据破裂机制和膨胀-流体扩散模式研究余震成因时,把余震过程分为早期余震和晚期余震。作者在《唐山余震活动的某些特征》一文中,根据余震序列的统计量(如 P 值、 b 值、蠕变释放和余震频次)随时间的变化,结合各种前兆异常,把唐山余震活动进行了阶段划分,认为1976年底以前属于早期,其后为晚期余震活动。

实际观测表明,上述划分还不能够完全反映震后震源区的复杂情况,在应力衰减的不同

时期中发生的余震,可能具有不同的成因机制和特点。最晚期强余震,可能发生在界值强度恢复的情况下。因此,按照余震活动所表现的特点,我们更详细地把唐山余震活动分为四个时期。

1.最早期,指主震后2天内。大量观测事实表明,绝大多数大地震的最强余震,发生在主震后2天内。理论上也证明,余震序列的应变降低到其初值的 $1/e$ 的时间约为2天。因此,把主震后2天作为余震活动的第一个重要时期*。唐山地震的最大强余震,发生在主震后15小时,7.1级地震发生后,释放的应变是 3.6×10^{11} 尔格。2天内释放的能量(包括主震能量)占全序列的95%以上。由于应力迅速衰减,b值大幅度回升(图1)。在该时期中,余震分布于初期余震区内,其长轴约130公里。

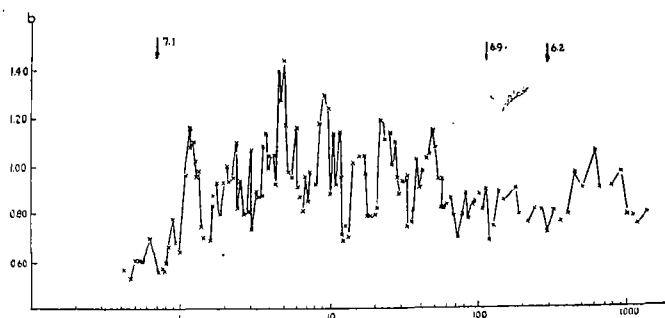


图1 唐山余震序列b值曲线

2.早期,指2天以后至100天左右的时期。茂木曾经统计过35次大地震的余震频度衰减〔7〕,指出大震后100天左右,余震频度衰减符合公式 $N = N_1 t^{-p}$,100天以后,则按 $N = N_1 e^{-p}$ 衰减。这个统计结果表明,100天以后,余震活动可能进入一个新的转折时期。唐山余震观测表明,无论是余震的应变释放,b值和P值,在这个时间附近均存在拐点*。6.9级强余震发生在主震后第111天,震前观测到P值增大和b值减小的明显变化,震后继续保持较大的P值和低b值。6.9级地震发生在余震频度大幅度有起伏衰减的背景下,震后频度明显减小($M_L \geq 3$)。在这一期中,余震活动范围向外扩展,余震区长轴达145公里,余震区大小相对稳定。由此把6.9级地震作为早期活动结束的标志。

3.晚期,指自100天左右至一年的时期。我国发生的大地震,一般均能观测到一年左右的强余震活动。唐山余震观测表明,6.9级强余震后,余震序列的应变释放和频度衰减曲线(直角坐标系中)均呈平缓有起伏状态。在此期间内发生的强余震,如1977年3月7日7.5级地震和1977年5月12日6.2级地震,在平缓有起伏的频度曲线上出现了明显的阶跃。在空间上,这类晚期强余震通常发生在余震区的边缘。如图1所示,6.2级地震后,b值明显回升,表示这一阶段结束。

4.最晚期,指一年以后的余震活动。近几年来我国发生的一系列大震,具有最晚期强余震的不多,明显的一例是1975年2月4日海城7.3级地震,震后3年零3个月在主震附近发

*大地震后短时间内余震时空分布的某些研究,1980。

*唐山余震活动的某些特征,1979。

生6.0级强余震。我国历史大震中,最明显的是1918年2月广东南澳 $7\frac{3}{4}$ 级地震后于1921年

3月在主震附近发生的 $6\frac{3}{4}$ 级强余震。仅就以上二例表明最晚期强余震可能发生在主震震

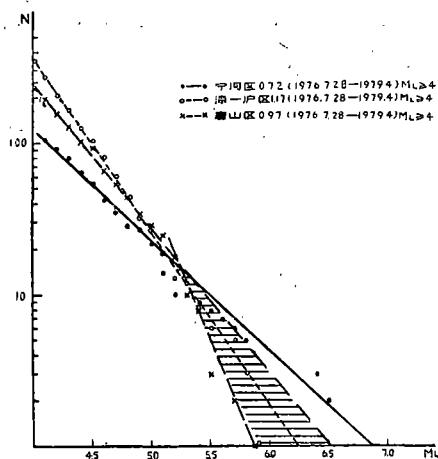


图2 唐山余震区三个余震活动亚区b值曲线

中附近,并发生在余震活动基本平息之后。

自1977年5月12日宁河发生6.2级强余震后,唐山地震区再没有发生6级或6级以上强震。目前唐山地震的余震活动已处于最晚期,未来是否发生强余震,目前尚难判定。但以下一些现象是值得注意的。1.全区b值下降后已开始回升,唐山市b值曲线明显缺震(图2); 2.主震东南钱营附近存在 $M_L \geq 4$ 余震活动空白区*, 3.余震区向北东、南西方向扩大,长达180公里。同时考虑到唐山地震序列和海城地震序列一样具有高b值、低P值以及主震应力降均较低等特征,初步推测唐山震源区发生最晚期强余震的可能性是存在的。

二、唐山余震活动的分区特征

规定上述前二期的余震活动范围为唐山余震区。该区在平面上的投影为长轴145公里、短轴60公里的椭圆分布,主震位于椭圆中部。根据余震能量释放,震源机制和震源深度等差别,把全区分分为西南部的宁河区,中部唐山区和东北部滦县—卢龙三个余震活动亚区。

1.唐山亚区,主震发生在该区内,是主震之后很快形成的余震活动区域。北部边界为7.1级强余震前余震分布确定。7.1级地震发生前,在主震北东方向无 $M_L \geq 3$ 余震活动,即7.1级地震震中区在主震后短时间内是一个空白区,并且有沿北北西向滦县—乐亭断裂分布的余震活动条带通过这一空区(图3)。根据7.1级地震震源机制解和地裂缝等资料,表明该余震属于滦县—乐亭断裂活动的结果。该区西南部边界确定在 $M_L \geq 5$ 级余震活动明显间断的部位。

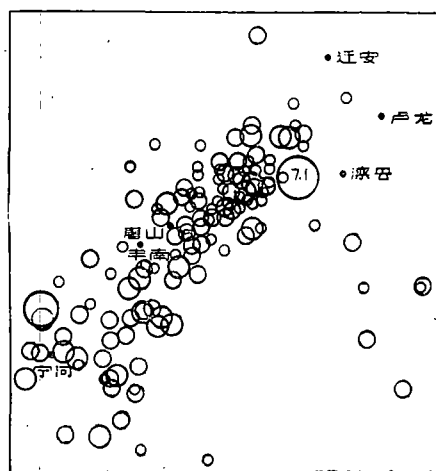


图3 7.1级强余震前的余震分布

* 唐山余震活动的某些特征, 1979。

根据1976年7月28日至8月31日余震资料,该区余震平均断层面解为北 49° 东,主压应力近东西方向。主震以及发生在本区内几次较大余震震源机制解表明该区主要受北东方向唐山断裂控制。余震大体沿北东 49° 方向分布,其深度集中分布于20公里以上。

该区内除主震外,最强余震5.6级,该区地震过程本身可以构成次一级主震余震型序列,序列b值0.97。

2.宁河亚区,是主震向西南方向破裂,在唐山断裂与蓟运河断裂交汇处附近形成的余震活动区域。几次强余震($M \geq 6$)震后余震分布以及震源机制结果一致表明蓟运河断裂是本区主要活动断裂。本区余震也大体沿北西向蓟运河断裂分布,余震深度集中分布于20公里附近,有不少余震分布于20公里以下。

该区内共发生3次6级强余震,由于震级相近,因而构成次一级震群型地震序列,序列b值为0.72。

3.滦县—卢龙亚区,这个区是在7.1级强余震发生后形成的余震活动区域,北东边界止于辽宁省建昌到河北省抚宁一线。

唐山部分5级余震震中迁移 表1

亚区	唐 山 亚 区	宁 河 亚 区	滦—卢亚区
震	1976.7.28 03h42m7.8	1976.7.28, 07h17m,6.5	1976.7.28, 18h45m,7.1
	1976.9.24, 5.0	1976.10.23, 5.0	1976.8.31 11h 5.5
例		1976.11.15 6.9	1976.11.12 5.0
	1977.1.3 5.1	1977.5.12 19h 6.2	1977.3.7 08h 5.7

大量余震平均断层面解为北 26° 东,主压应力小方向北 71° 东。几次强余震震源机制解表明,该区余震受几组断裂控制。余震总体上沿北东方向分布。余震深度分布于20公里以上以10公里附近最集中比上述两个亚区余震深度略浅一些。

本区除了发生7.1级地震外,最大余震5.7级,因此本区地震过程本身构成次一级主震余震型序列,序列b值1.12。

唐山余震分区活动特征是明显的,除了邢台地震外,这种分区现象还不多见。各区余震活动有密切的联系,表现在同一活动期中震中南北迁移。表1是5级以上强余震,在南部、中部和北部三个区交替发生的实例,由此构成唐山余震整体活动特征。

三、讨 论

上述研究结果表明,在同一活动期中,包含有三个亚区的活动,每个分区内的地震过程本身又构成次一级序列。这一分区和分期的形成和唐山地震区内部结构的不均一性有关。以下分别讨论分期分区特征与震源区地质构造、深部结构以及主震前后地面形变特征的关系。

1.分期分区特征和震源区地质构造的关系 唐山地震区及其附近存在走向不同、活动程度不等的几条断裂。因此,主破裂发生后,震源区内应力场的再分布是复杂的,有的断裂带上应力集中程度增加,有的减弱。这些断裂互相影响,互相牵动,控制了各期各区余震活动。强余震的观测表明,蓟运河断裂在余震活动过程中,至少有三次明显的活动,即主震当天发生的6.5级、11月15日发生的6.9级和1977年5月12日6.2级强余震。相应地,北东向滦县—卢龙断裂,也至少有三次明显的活动,即1976年8月31日连续发生的两次5.0级、11月12日发生的5.0级和1977年3月7日5.7级强余震。但后者的活动强度要比前者弱得多。

三个余震活动亚区内断裂组合方式是不同的。唐山亚区只表现为单一的唐山断裂作用,余震也大体沿唐山断裂呈狭窄条带分布。宁河亚区和滦县—卢龙亚区分别处于二组以上不同方向断裂交汇处,因而余震分布、能量释放和唐山区有明显的差别,从而使得唐山余震活动得以持续相当长的时间。

2. 分期分区特征和震源区深部结构的关系 这里主要用了邵学忠同志的研究成果^[8]。仔细分析发现,从宁河到卢龙、迁安一带深部构造上有差别,唐山亚区处于地壳隆起、上地幔界面凹陷的中心部位,宁河亚区和滦县—卢龙亚区位于两侧边缘,同时可以看到,宁河区的花岗岩层埋藏最深,因此观测到宁河亚区余震深度要比另二区深一些。

3. 分期分区特征和主震前后地面形变的关系

据有关资料^[9],1969年以来唐山北部是地面形变上升区,南部表现为下沉。分界线从唐山、丰南通过。宁河附近在1969年前是局部隆起区,1969年后北部仍继续隆起,而宁河附近则由局部隆起变为下沉。因此,震前震中区地面形变明显存在三个区域,即滦县—卢龙上升区,唐山附近上升、下降差异运动强烈区和宁河下沉区。震后形变测量结果表明,唐山以南大幅度下沉,在唐山附近和滦县附近分别形成垂直形变梯度带,震后三个形变单元和三个余震亚区大体吻合。

四、震后应力场的重新分布、 膨胀—流体流动模式和唐山余震

综合以前的研究和本文的研究表明唐山地震的余震活动和同类型大震的余震活动有明显的不同。用贝尼奥夫早期指出的随时间变化的蠕动恢复来解释唐山余震成因,那么很难解释不在主震断层上发生,而震级又相当大的强余震,特别是晚期强余震。用努尔提出的关于孔隙液流从压缩区向膨胀区流动,增加了膨胀区中岩石孔隙压力而减低了膨胀区中岩石强度引起余震的观点,也难于解释那些发生很晚、震级很大的余震。M. Bonafede根据破裂机制和膨胀—流体流动理论对于晚期强余震的发生作出了较好解释。

由于余震是和主震最密切有关的地震现象,在解释余震成因时,还必须联系主震成因机制,特别要考虑到主震成因机制对余震可能产生的重大影响。目前,已提出多种物理模式来解释唐山地震的成因。这些模式强调主震孕震过程中,震源区经历了地面隆起、水的作用和蠕动。唐山主震是震源区饱和水的岩石膨胀—蠕动过程的结果^[10]。主震发生后,震中区应力很快衰减,原来膨胀的区域可能开始复原(观测到震后地面显著下沉)。在恢复过程中,震中区的地下水溢出地面向周围流动,我们把主震的这一作用叫做“膨胀泵”^[11]。震中区外围被水浸入的地方孔隙流体压力随之增大。众所周知,主震后断层端部常常是应力最集中的部位,当流体流入断层端部,特别是断层端部附近受张的区域,强余震很容易发生,这一推测已为唐山较大余震空间分布特征所证实。

震后应力场的重新分布和孔隙流体的流动引起余震,一般应属早期阶段的余震。努尔实验指出^[12],如果考虑暂态孔隙压力引起余震效应,那么余震发生时间应和孔隙压力衰减时间 $t = 120$ 天一致,唐山地震的早期强余震发生在主震后111天。这也是把6.9级作为早期阶段结束的原因。

假定唐山震源区是均匀弹性多孔介质,在构造应力作用下可能发生再膨胀。肖尔茨实验

指出〔13〕, 当对韦斯特里花岗岩进行周期加载时, 每次周期加载都产生比前一次更大的膨胀, 而且一次比一次在更低的压力下开始膨胀。1977年5月12日6.2级强余震前, 我们观测到一组明显的前兆异常*, 说明震源区可能经受了一次应力作用。由于再膨胀, 使这些地区岩石界值强度增加。水从震中区流动到这些地区是需要一定时间的。考虑到流体扩散作用, 根据M. Bonafede 提出的公式〔6〕,

$$T = \frac{d^2}{C \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{1}{2} - \frac{P_c}{2\alpha - \Delta\sigma} \right) \right]^2}$$

其中d是强余震震中到主震震中距离的一半, 单位是厘米, C是水扩散系数, 其值, 为 5.8×10^4 厘米²/秒, $\Delta\sigma$ 为主震应力降, P_c 是孔隙压力, 通过1975年8月28日发生的海城5.4级晚期强余震的滞后时间, 可以计算 $\frac{P_c}{2\alpha}$ 的值, 然后计算唐山地震的晚期强余震发生时间 $T = 324$ 天, 实际发生时间是289天。

至于最晚期强余震, 由于和主震相隔时间太长, 用流体流动解释余震发生必然出现许多困难。根据海城地震的经验, 考虑到1978年5月18日6.0级地震和主震的相似性, 因此其成因机制可能和主震相同。

(本文1981年2月13日收到)

参 考 文 献

- 〔1〕王碧泉等, 强余震的准周期性, 地震学报, Vol. 1, №. 2, 1979.
- 〔2〕谷继成等, 强余震的时间分布及其理论解释, 地球物理学报, Vol. 22, №. 1, 1979.
- 〔3〕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.
- 〔4〕张之立等, 唐山地震的破裂过程及其力学分析, 地震学报, Vol. 2, №. 2, 1980.
- 〔5〕帕帕扎科斯, 大地震的前震和余震系列的研究, 科学技术参考资料, №. 2, 1970.
- 〔6〕M. Bonafede et al. A Physical Model for the Prediction of Large Late Aftershocks, Unesco Headquarters, Paris, 2—6, April, 1979.
- 〔7〕Mogi, on the Time Distribution of Aftershocks Accompanying the Recent Major Earthquakes on and Near Japan, B. E. R. I., 40, 1962.
- 〔8〕邵学忠等, 京津唐地区地震转换波测深结果, 地震地质, Vol. 2, №. 2, 1980.
- 〔9〕局测量队, 唐山地震的垂直形变, 地震战线, №. 2, 1977.
- 〔10〕牛志仁等, 唐山7.8级地震前兆异常的物理解释, 西北地震学报, Vol. 1, №. 2, 1979.
- 〔11〕努尔, 孔隙流体在断层过程中的作用, 国外地震, №. 4, 1975.
- 〔12〕R. H. Sibson, 伴随着断层活动的流体流动——流体的证据和模式, 1980年拉蒙特会议摘要.
- 〔13〕C. H. Scholz, Notes on Dilatancy Recovery, J. G. R., 79, 4, 1974.

CHARACTERISTICS OF AFTERSHOCK ACTIVITIES IN TANGSHAN

Lü Pei-ling Fu Zheng-xiang Xue Feng Chen Zhang-li

(*Centre of Analysis and Prediction, State Seismological Bureau*)

Abstract

Based on the analysis of characteristics of aftershock activities in Tangshan, the authors think aftershock activities in Tangshan can be fallen into four stages and three subregions. In this paper the authors also discuss the relationships between these characteristics and the geological structures, the structure of depthin seismic focus area, and the characteristics of ground deformation before and after main earthquake. Finally, the authors point out that new distribution of stress field after main earthquake and dilation-flowing fluid theory can regarded as a physical interpretation of genesis of Tangshan aftershock.