

唐山地震破裂过程的雁行断裂模式 及理论和试验的模拟

张之立 王成宝 方兴 阎虹

(国家地震局地球物理研究所)

摘 要

按照重新定位后的震源位置及更多的补充资料,重新计算了唐山地震序列中主要地震的震源机制.用新方法和原有方法重新测定了主要地震的破裂几何尺度和震源参数.并进一步研究了1976年至今的余震活动性.

新结果指出,两个7级以上地震的震源机制更加相似,破裂方向也几乎相同. $M_s=7.8$ 地震的破裂长度在77—87km之间.它东北端的破裂终止点是在榛子镇稍南而不是芦龙附近.根据新的结果,本文提出一个非等长雁行断裂力学模式.理论和试验结果指出,新模式能更好地模拟唐山地震的破裂过程,并能较好地解释那些用已有模式不能解释的观测事实.

关键词 唐山地震破裂过程;非等长雁行断裂模式;有限元和边界元;理论和试验模拟;震源参数

一、前 言

唐山地震后,不少人研究了它的震源机制和地震破裂过程^[1-7].由于所用方法和资料的不同,结果也不完全相同.第一作者曾于文献[8]中,用三维断裂面扩展的力学模式进行了统一解释,但仍有一些问题没有得到合理解释,如唐山至滦县地区的地面下沉和中小余震的密集现象.还有一些问题至今仍有争议,如唐山地震序列的类型和 $M_s=7.1$ 地震的破裂方向等.更使作者关心的是,震源位置的重新修订和新的观测资料补充后,将会对原有的唐山地震破裂过程的分析有什么样的影响和改进.因此,根据新的震源位置和补充的新资料,我们重新计算了唐山地震序列的震源机制,并用新方法和原有方法测定了主要地震破裂面的几何尺度,重新计算了震源参数.在这些工作的基础上,对唐山地震的破裂过程提出新的看法和新的力学模式.

二、唐山地震的震源机制

本文仍然采用P波初动的数理统计方法用自编程序进行计算和绘图.除采用新修订

表 1 $M_s \geq 6.0$ 地震的震源机制解(下半球投影)

发震时间		震中位置		深度 (km)	震级 (M_s)	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴		资料情况	方法
						走向 ($^{\circ}$)	倾向 ($^{\circ}$)	倾角 ($^{\circ}$)	走向 ($^{\circ}$)	倾向 ($^{\circ}$)	倾角 ($^{\circ}$)	方位 ($^{\circ}$)	倾角 ($^{\circ}$)	方位 ($^{\circ}$)	倾角 ($^{\circ}$)	方位 ($^{\circ}$)			
年·月·日	时·分	纬度	经度																
1976.7.28	03-42	39°28′	118°12.5′	22	7.8	30	120	90	120	210	89.9	75	0.01	345	0.01	210	89.9	国内外 129 台	文献[7]
1976.7.28	03-42	39°38′	118°11′	11	7.8	29.8	299.8	86.3	120.2	30.2	83.5	255	1.9	164.9	7.2	0	82.5	国内外 189 台	本文
1976.7.28	07-17	39°26′	117°45′	19	6.2	138.2	228.2	58.7	51.6	321.6	84.4	99.5	25.8	0.77	17.3	240.6	58.1	国内外 56 台	文献[7]
1976.7.28	07-17	39°27′	117°47′	19	6.2	161.4	71.4	72.3	63.5	333.5	66.6	111	3.7	203.6	29.7	15	60	国内外 70 台	本文
1976.7.28	18-45	39°40′	118°34′	23	7.1	25.6	115.6	61.4	100.3	10.3	64.3	242	40.3	333.5	1.8	765.6	49.7	国内外 173 台	文献[7]
1976.7.28	18-45	39°50′	118°39′	10	7.1	29	299	79.5	121	31	79.5	75	0	165	15	345	75	国内外 260 台	本文
1976.11.15	21-53	39°28′	117°51′	17	6.9	150	60	60	60	330	90	289.1	20.7	190.9	20.7	60	60	国内外 136 台	文献[7]
1976.11.15	21-53	39°24′	117°42′	17	6.9	150	60	63.8	60	150	90	288.1	18.2	192	18.2	60	63.8	国内外 202 台	本文
1977.5.12	19-17	39°23′	117°48′	18	6.2	135.5	45.5	75.5	44.5	314.5	86.2	270.9	7.4	179.1	13	30	75	国内外 147 台	文献[7]
1977.5.12	19-17	39°23′	117°48′	18	6.2	150.1	60.1	83	59.9	329.9	88	285.2	3.7	194.8	6.5	45	82.5	国内外 195 台	本文

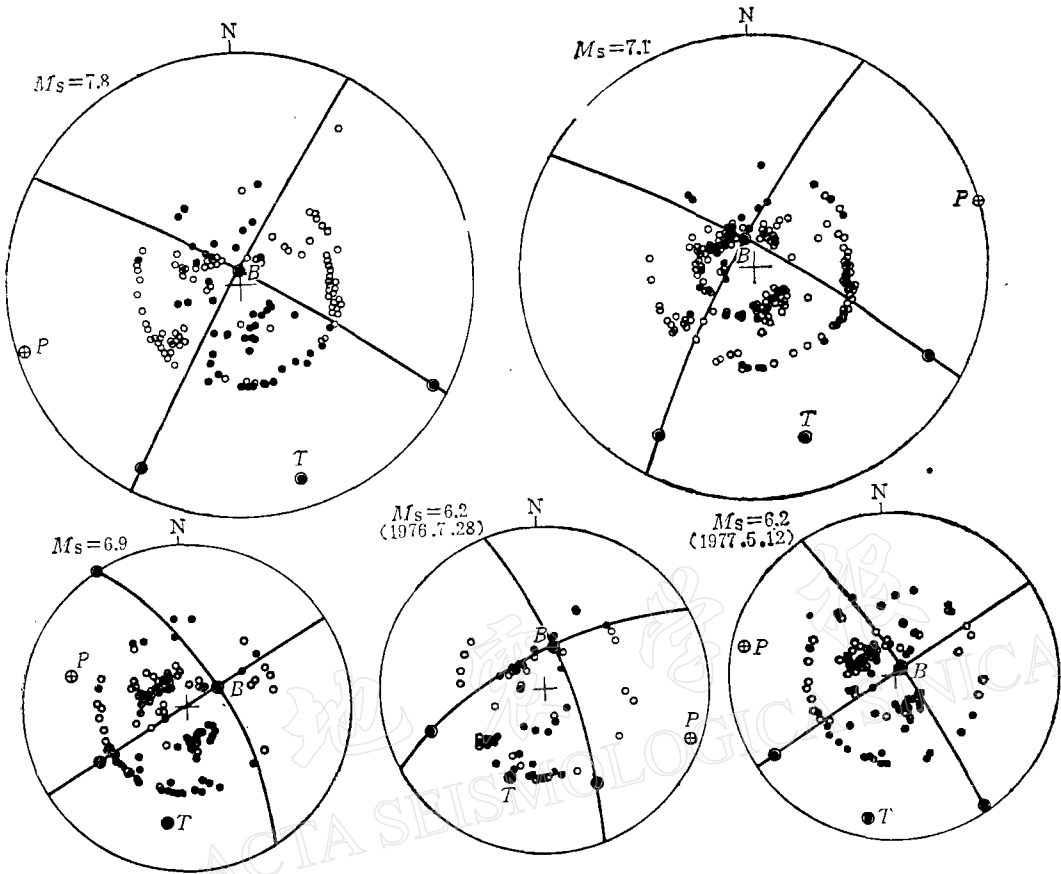


图 1 $M_s \geq 6.0$ 地震的震源机制解(下半球投影)

的震源位置外,还增加了一些新搜集到的清晰的初动符号,主要来自相邻亚洲国家的地震台站记录。 $M_s \geq 6.0$ 地震的结果见表 1 和图 1。计算结果表明,震源位置的修订所引起震源机制解的变动不大。相对来说,对 $M_s = 7.8$ 地震几乎没有影响;而 $M_s = 7.1$ 地震,修订后的结果比修订前的更偏向走滑,这使得它的震源机制解和 $M_s = 7.8$ 地震的更为相似。

三、主要地震的破裂面几何尺度和震源参数

第一作者于文献 [9] 中曾提出一种测定地震破裂长度的新方法。该方法按照复合型断裂不再沿自身方向扩展,而与它自身方向偏离 80° 左右的方向初始扩展的原理,提出只要从观测资料能找到该断裂不沿自身方向初始扩展的拐点,则从两拐点之间的距离即可确定原断裂的长度。图 2a 是 $M_s = 7.8$ 地震后 4 小时内至宁河第一个 $M_s = 6.2$ 地震期间的 $M_s \geq 3.0$ 余震震中分布图。图 2b 是 $M_s = 7.8$ 地震后至 $M_s = 7.1$ 地震期间的余震震中分布图。该两图形都显示出明确的拐折分支区。虽然后者比前者增加了很多

余震,但二者的拐折点的位置几乎重叠,说明 $M_s = 7.8$ 地震的终止破裂点已在图 2a 和图 2b 的余震活动图形中显示出来。所以,从图 2a 或图 2b 中余震图形的拐折点之间的距离即能测得 $M_s = 7.8$ 地震的破裂长度,结果是: $L = 82 \pm 5\text{km}$ 。说明 $M_s = 7.8$ 地震的破裂面是走向北东 30° ,近于直立、右旋、走滑,北东向长 43km 、南西长 35km 的双侧破裂。图 3a 是 $M_s = 7.8$ 地震至 1979 年底期间的 $M_s \geq 3.0$ 的余震震中分布图。从图上很易认出 $M_s = 7.1$ 地震的终止破裂点,即余震图形开始拐折的拐折点。由此测定 $M_s = 7.1$ 地震的破裂长度是: $L = 42 \pm 5\text{km}$ 。破裂面走向北东 29° ,右旋,走滑,破裂方式是以北东方向为主的非对称双侧破裂。其中 3 个 $M_s \geq 6.0$ 地震均发生在宁河附近的 $M_s = 7.8$ 地震的余震扩展分支区内,各自的余震分布均呈北西方向。其中 7 月 28 日发生的 $M_s = 6.2$ 地震和 11 月发生的 $M_s = 6.9$ 地震均有较大的倾滑分量,而次年 5 月发生的 $M_s = 6.2$ 地震则以走滑为主。对于前两个倾滑分量较大的地震,由于余震分布图上的拐折区不明显,不能精确测定它们的破裂长度。而后一个 $M_s = 6.2$ 地震的余震分布图上的拐折区是明显的,从而测得它的破裂长度为: $L = 35 \pm 5\text{km}$,见图 2c。由于这种测定破裂长度方法的精度主要取决于台网震中位置的相对定位精度,这里给出的破裂长度的

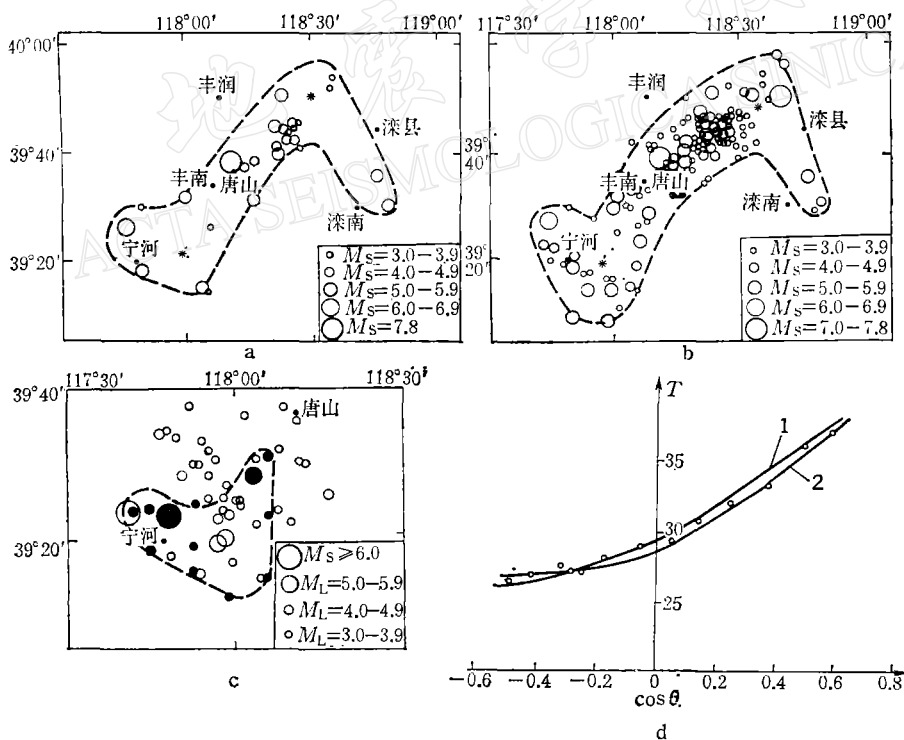


图 2 $M_s \geq 6.0$ 地震的余震震中分布图(*代表拐折点)

- $M_s = 7.8$ 地震至第一个 $M_s = 6.2$ 宁河地震期间的余震分布;
- $M_s = 7.8$ 地震至 $M_s = 7.1$ 地震期间的余震分布;
- $M_s = 6.9$ 地震和次年 $M_s = 6.2$ 地震的余震分布(○——1976 年 11 月 15 日至 30 日的余震分布;●——1977 年 5 月 12 日至 6 月 10 日的余震分布)。
- $M_s = 7.8$ 地震长周期 P 波记录位移谱第一极小点的 T - $\cos \theta$ 曲线 (1—— $V_2/V_1 = 0.8$ 和 $L_2/L_1 = 0.65$ 时的理论值; 2—— $V_2/V_1 = 1.0$ 和 $L_2/L_1 = 0.8$ 时的理论值; ○——观测值)

可能误差统一取±5km。

除 $M_s = 7.8$ 地震外,本方法得到的破裂长度和文献[7]中由 P 波位移谱测定的结果相差很小。对于差别较大的 $M_s = 7.8$ 地震,我们又重新核实了文献[7]的方法和资料。重新挑选记录图和频谱分析并精心选择第一极小点。除个别台站的极小点被删除和改正外,大多数台站的结果与文献[7]选用的相同(见图 2d 的*值)。对于双侧非对称破裂情形,我们仍用文献[7]和[10]中的理论推导和计算方法。在速度比 ($V_2/V_1 = 0.0-1.0$) 和长度比 ($L_2/L_1 = 0.0-1.0$) 的大范围内扫描,我们发现有两组差别较大的理论解均能较好地拟合观测值。这两组理论解是 ($V_2/V_1 = 0.8, L_2/L_1 = 0.65$) 和 ($V_2/V_1 = 1.0, L_2/L_1 = 0.8$), 见图 2d 中的曲线 1 和 2。由第一组解得到两侧的破裂长度和破裂速度是: $L_1 = 70\text{km}, L_2 = 45\text{km}, V_1 = 3.0\text{km/s}$ 和 $V_2 = 2.4\text{km/s}$ 。由第二组解得到的结果是: $L_1 = 43\text{km}, L_2 = 35\text{km}$ 和 $V_1 = V_2 = 2.6\text{km/s}$ 。由此看出,由位移谱极小点测定破裂长度和速度的方法,对于双侧破裂长度相近的情形存在多解的可能性,因为 $T-\cos\theta$ 曲线同时受比值 V_2/V_1 和 L_2/L_1 的制约,这时需根据其它资料综合判断来选择其中之一。在文献[7]中,我们曾参考整个余震区的长度,选取了第一组解。但根据本文多种资料的剖析,认为 $M_s = 7.8$ 地震的破裂终止点应在榛子镇附近而不是整个余震区的东北端。因此,第二组解 ($L = 78\text{km}$) 比第一组解 ($L = 115\text{km}$) 更符合实际,这与本文由拐点方法

表 2 唐山地震序列 $M_s \geq 6.0$ 地震的破裂几何和震源参数

发震日期 (年·月·日)	震 级 (M_s)	破裂方式	破裂面走向 ($^{\circ}$)	破裂长度 (km)	断层宽度 (km)	地震矩 N.cm ($\times 10^{20}$)
1976.7.28	7.8	双侧	30 $^{\circ}$	82 $\begin{cases} 43 \text{ NE} \\ 35 \text{ SW} \end{cases}$	22	124
1976.7.28	7.8	双侧	30 $^{\circ}$	115 $\begin{cases} 70 \text{ NE} \\ 45 \text{ SW} \end{cases}$	24	124
1976.7.28	6.2	单侧	341 $^{\circ}$	25	19	8
1976.7.28	7.1	双侧	29 $^{\circ}$	45 $\begin{cases} 35 \text{ NE} \\ 10 \text{ SW} \end{cases}$	20	20.4
1976.7.28	7.1	单侧	25 $^{\circ}$	50	26.4	20.4
1976.11.15	6.9	单侧	330 $^{\circ}$	40	17	11
1977.5.12	6.2	单侧	330 $^{\circ}$	35	18	6

发震日期 (年·月·日)	平均错距 (cm)	最大错距 (cm)	应力降 (Pa) $\times 10^5$	应变降 $\times 10^{-5}$	释放能量 (J $\times 10^{14}$)	方 法
1976.7.28	208	264.8	20	3.03	149	拐点法
1976.7.28	136	173	12	1.82	89.4	频谱
1976.7.28	51	65	6	0.91	2.7	频谱
1976.7.28	73.5	93.6	8	1.21	9.7	拐点法
1976.7.28	47	60	5.7	0.86	5	频谱
1976.11.15	56	71.3	7	1.05	4.6	频谱
1977.5.12	33.6	42.8	4	0.61	1.6	拐点法

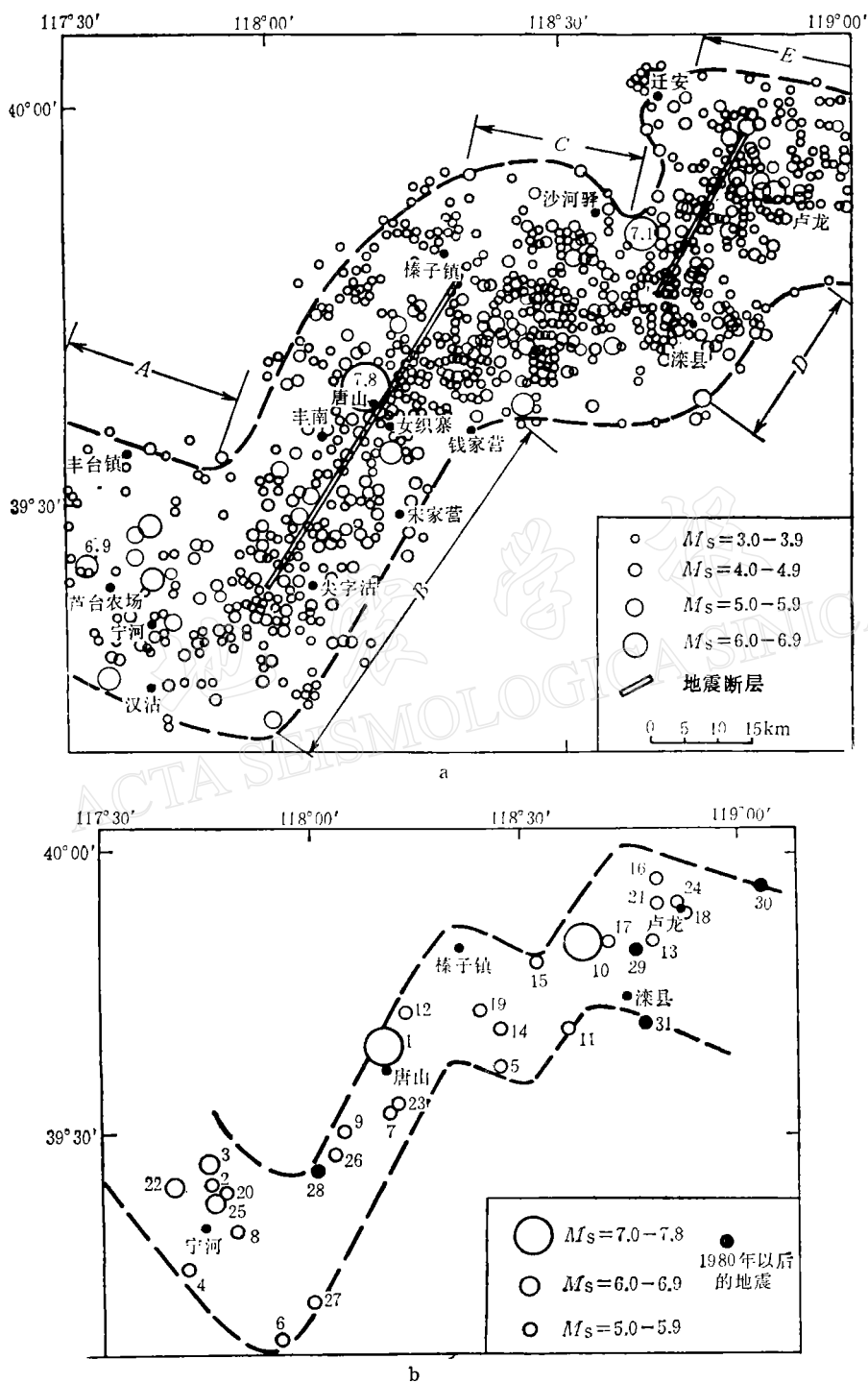


图3 唐山地震序列余震震中分布图

- a. 1976年 $M_s = 7.8$ 地震发生至1984年底期间 $M_L \geq 4.0$ 的余震分布;
 b. 1976年 $M_s = 7.8$ 地震后至1987年底期间 $M_s \geq 5.0$ 余震的时空分布(数字表示时间顺序)

法测量的结果 ($L = 82\text{km}$) 很相近. 对于其它的 $M_s \geq 6.0$ 地震, 破裂方式均以单侧为主, 极小点易于辨认且解唯一, 因而两种方法得到的结果相近, 详见表 2.

四、唐山地震序列的时空特点

唐山地震序列余震分布的总体图型呈北东向的锯齿形. 这种特征没有因所取震级的大小而改变, 也没有因陆续余震的发生而改变^[2,11], 见图 3. 唐山地震序列的余震区显示了 5 个分区, 即: 芦台农场至尖字沽, 尖字沽至榛子镇, 榛子镇至滦县, 滦县至卢龙西, 卢龙西至卢龙东. 分别以 A, B, C, D, E 表示. 这 5 个分区的走向以北西西和北北东方向交错排列. 3 个 6 级地震发生在 A 区, 它们的破裂方向均为北西西. $M_s = 7.8$ 和 $M_s = 7.1$ 的地震分别发生在 B 区和 D 区, 它们的破裂方向均为北北东. A, C 和 E 区内的余震比较密集, 尤以 C 区的余震最密集.

五、唐山地震前后水平和垂直位移特点

水平位移矢量分布图^[2](图 4a) 表明, $M_s = 7.8$ 地震破裂面左、右侧的方向相互是不平行的. 左侧指向北北东 (30°), 而右侧却指向西南 (230°). 按照矢量合成和分解的原理, 若以左侧方向为准, 则右侧矢量可分解为两个与左侧方向平行和垂直的分矢量. 反之, 以右侧方向为准亦可将左侧矢量分解. 显然前者分解合乎实际, 因为地震发生北北东向的右旋剪切错动时还受到来自东南垂直方向的挤压作用, 这与震源机制结果及板块运动趋势一致. 而后者表明, 地震发生北东向的右旋剪切错动时, 还同时受到来自西北与断层垂直方向的拉张作用, 这与现有观测资料是矛盾的, 说明水平位移矢量资料也支持 $M_s = 7.8$ 地震的破裂面是北 30° 东走向的结果. 在 $M_s = 7.1$ 地震破裂面地区, 也可看到地面有北北东向的右旋剪切错动和受东南方向挤压的现象, 但相对 $M_s = 7.8$ 地震而言, 位移矢量要小得多. 在 $M_s = 7.8$ 和 $M_s = 7.1$ 地震破裂面的端部地区, 水平位移矢量明显地呈北西方向, 说明 $M_s = 7.8$ 地震破裂面东北端的终止点位于滦县的西南, 它的破裂长度只有 80km 左右. 垂直形变资料^[2]也指出, 宁河和滦县西地区是大规模的地面下沉区, 沉降中心分别达 1551mm 和 1040mm . 更值得注意的是, 水平位移矢量呈北西向的地区和垂直形变的下沉区是同一地区并相应于余震密集的 A 区和 C 区, A, C 余震区的走向亦呈北西方向. 显然, 这种一致性是由唐山地震序列的破裂过程决定的.

六、非等长雁行断裂的力学模式及理论和试验的模拟

按照以上多种观测资料的进一步剖析, $M_s = 7.8$ 地震东北端的破裂终止点应是榛子镇附近, 而 $M_s = 7.1$ 地震西南端的破裂终止点应是滦县地区. 这两个地震破裂面的走向近似平行, 都是北北东的右旋剪切错动, 但两个地震的破裂长度差别较大. 因此, 本文提出一个更符合实际情况的力学模式来模拟唐山地震的破裂过程, 即, 非等长度的雁行断裂模式, 示于图 4b. 图中长短断裂分别代表 $M_s = 7.8$ 和 $M_s = 7.1$ 的地震断层, 北东东方

向的 σ_1 代表区域最大主压应力. 此种断裂系实际是文献[12]中的 LL 型雁列, 也即作者于文献[13]中论述的顺向雁行断裂系, 但文献[12]和[13]论述的都是等长度的. 对于非

等长度的雁行断裂系的扩展过程, 至今尚未见到报道. 为此, 作者对非等长度的任意几何排列的断裂系, 从理论上用有限元和边界元方法进行了研究并相应地进行了岩石模拟试验, 详见另文. 本文仅给出图 4b 所示的断裂模式的结果. 按照作者在文献[7]中的推导, 有效剪应力 τ_e 是:

$$\tau_e = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\beta - f \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\beta \right) \quad (1)$$

当 $\sigma_1 \gg \sigma_2$ 时, 近似写成:

$$\tau_e = \sigma_1 (\sin \beta \cos \beta - f \sin^2 \beta) \quad (2)$$

式中, β 是断裂走向和 σ_1 的夹角, f 是摩擦系数. 理论计算时, 根据裂纹尖端附近位移场和应力强度因子的关系式:

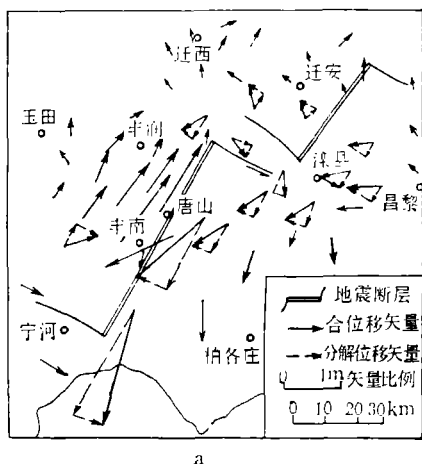
$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{K_I}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2\phi - 1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] \\ &+ \frac{K_{II}}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2\phi + 3) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right], \\ u_2 &= \frac{K_I}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2\phi + 1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ &- \frac{K_{II}}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2\phi - 3) \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{式中} \quad \phi = \begin{cases} 3 - 4\nu & \text{平面应变} \\ (3 - \nu)/(1 + \nu) & \text{平面应力} \end{cases} \quad (4)$$

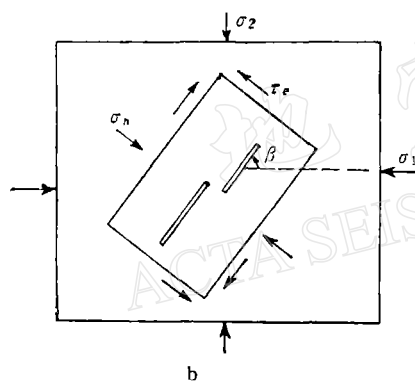
当考虑受压裂纹面受有效剪应力 τ_e 作用时, $K_I = 0$, II 型应力强度因子 K_{II}^I 和位移场的关系简化为:

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \frac{K_{II}^I}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} (1 - f \tan \beta) \begin{Bmatrix} -(2\phi + 3) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \\ (2\phi - 3) \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

计算时有限元是在整个区域进行离散, 而边界元是在边界上划分网格, 我们采用分区计算的直接积分法. 有限元和边界元的网格划分见图 5a 和图 5b, 均配有高次元、裂端奇异元和过渡元等单元类型. 计算应力强度因子时采用裂端附近位移及适当的外插位移, 计算



a



b

图 4 唐山地震的水平位移矢量分布及非等长的雁行断裂模式

a. 水平位移矢量图(原始资料取自文献[2]);

b. 非等长的雁行断裂力学模式

表 3 非等长雁行断裂的应力强度因子 ($\beta = 30^\circ$, $f = 0.6$, $L_2/L_1 = 0.5$)

断裂端点	长断裂西南端	长断裂东北端	短断裂西南端	短断裂东北端
K_{II}/σ_1	2.835	3.096	2.189	2.157
K_{II}^I/σ_1	1.853	2.024	1.431	1.410
K_{II}/K_{II}^{in}	1.315	1.435	1.015	1.000
K_{II}/K_{II}^{ingle}	0.987	1.078	1.078	1.062

结果见表 3。其中 K_{II}^{in} 和 K_{II}^{ingle} 分别代表最小值和单条断裂的应力强度因子。由此看出,对图 4b 的断裂模式,应力强度因子大小的顺序是长断裂的东北端、西南端;短断裂的西南端、东北端。与单条断裂相比,除长断裂西南端外,其余 3 个端均大于 1,说明这 3 个端都因断裂之间的互相作用而使扩展更易于发生。这些特点均与等长雁行断裂^[3]的不同,说明非等长雁行断裂除在间距较小时存在断裂之间的相互作用外,还受有断裂长度比的影响。计算得到的位移和应力等值线分布见图 5c—g。为了比较和直观,我们还进行了岩板模拟试验,结果见图 6a(1—5)。扩展形态与等长雁行断裂的相同^[9],即都是在裂端的张应力区部位生成与原断裂成 80° 左右的扩展分支。但扩展顺序却与等长的不同,而非等长的理论计算的应力强度因子大小顺序相同。最终形态也与等长的相同,都是在相邻端内侧形成连通的扩展分支区,并在足够的应力水平下,成雁行排列的两断裂与相邻端的扩展分支连通区及远端的扩展分支相互贯通,形成剪-张型的锯齿状断裂。为了模拟扩

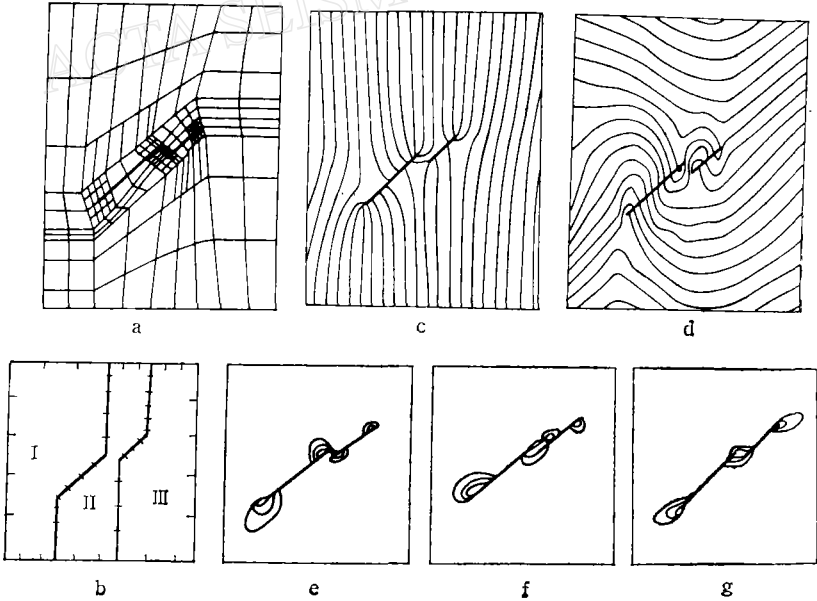


图 5 非等长雁行断裂扩展过程的理论位移场和应力场

- a. 有限元网格划分;
- b. 边界元分区网格图 (I, II, III 为分区号)
- c. 平行 σ_1 位移等值线;
- d. 垂直 σ_1 位移等值线;
- e. 断裂端部压应力等值线;
- f. 断裂端部张应力等值线;
- g. 断裂端部剪应力等值线

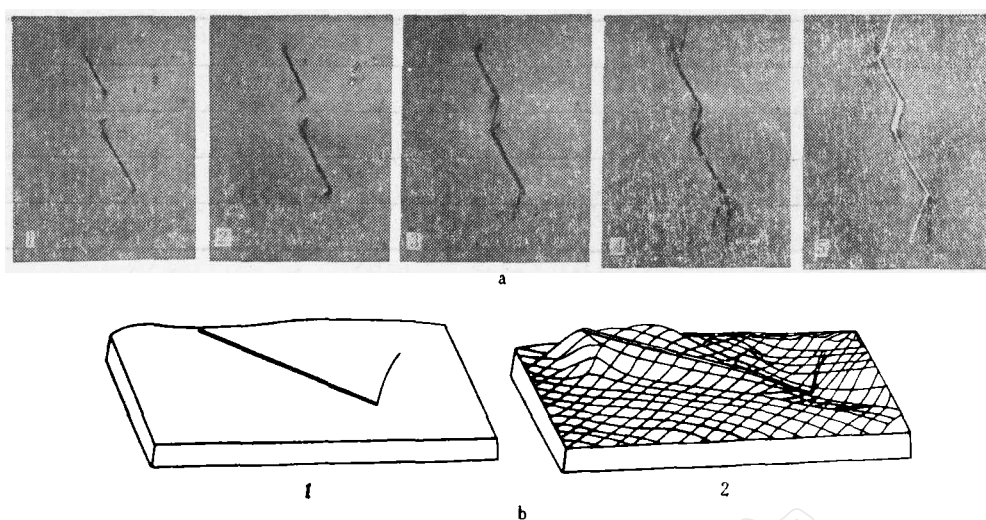


图 6 非等长雁行断裂扩展过程的模拟试验结果

a. 扩展过程变化图; b. 裂端垂直变形的立体图

展过程的垂直形变,我们采用激光全息方法^[44],拍摄了干涉条纹图.经过数据处理,得到断裂扩展端部的垂直位移变化图(图 6b).它表明受压断裂在剪切错动的同时,由于受到断裂面之间的相互作用,使断裂周围的垂直变形上凸,而断裂端部的扩展分支区,由于拉张作用使表面下凹.计算和试验一致表明,断裂面之间的相互作用使应力强度因子降低.因此,闭合断裂比非闭合断裂需要更高的应力水平才能扩展.

将理论和试验结果与唐山地震序列的观测事实进行对比,无论是起始扩展顺序、扩展过程、扩展形态,还是水平位移和垂直形变,处处都很相似.如 $M_s \geq 5.0$ 地震在时间空间的迁移过程(图 3b)表明: $M_s = 7.1$ 地震前主要发生在 $M_s = 7.8$ 地震断裂两端的扩展分支区内. $M_s = 7.1$ 地震后发生的顺序是 $M_s = 7.8$ 断裂的东北端,其次它的西南端,其后是 $M_s = 7.1$ 断裂的西南端,最后是 $M_s = 7.1$ 断裂的东北端.这与非等长雁行断裂起始扩展的顺序相同.再如余震分布图形,不仅总体上与非等长雁行断裂的扩展形态相同,而且两者在分区的部位,走向和特点方面也很相像.三个北西走向的余震区(图 3a 中的 A, C, E 区)恰好与雁行断裂的 3 个扩展分支区相对应.由于扩展分支区的拉张力学性质,使该区成为大震后持续释放能量的地区,且易于发生倾滑分量较大的中小余震.因此,余震密集、地面下沉和水平位移矢量转向等现象是扩展分支区的特点.各方面结果对比后证明,非等长雁行断裂扩展模式是模拟唐山地震序列的最恰当的力学模式,因为它能解释唐山地震发生过程中所观测到的所有重要现象.

七、结 论

1. 用新方法和原方法重新测定的结果表明, $M_s = 7.8$ 和 $M_s = 7.1$ 地震的破裂长度各为 82km 和 45km. 破裂面走向北北东,右旋.该两地震的发生与唐山地震断层和滦

县—卢龙断层的活动有关,其它断层影响很小。

2. 唐山地震中出现的一些重要观测现象,如地震序列的时空迁移,余震区是由北东北和北西向相间排列的 5 个分区组成总体呈波浪锯齿形态,北西向余震区出现的余震密集、地面下沉、水平位移矢量明显转向等,均与 $M_s = 7.8$ 和 $M_s = 7.1$ 地震断层成顺向雁行排列形成的扩展分支区有关。

3. 本文对非等长雁行断裂扩展的力学计算和模拟试验得到的扩展过程,位移场和应力场能模拟唐山地震过程中观测到的所有重要现象,因此,非等长雁行断裂扩展模式是当前提出模拟唐山地震破裂过程模式中最好的力学模式。

4. 三个北西向余震区对应雁行断裂的扩展分支区,是大震后能量持续释放的地区。不仅 1976 至 1979 年的强余震是发生在这 3 个区内,而且 1980 至 1984 年发生的 4 个 5 级余震也是发生在该区。估计今后仍会有少量中强余震发生在该区,尤其需注意唐山至滦县的扩展连通区。

本研究得到地震科学联合基金会的资助。

参 考 文 献

- [1] 国家地震局科研处,1981. 唐山地震考察与研究. 地震出版社.
- [2] 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组,1982. 一九七六年唐山地震. 地震出版社.
- [3] 邱 群,1976. 1976 年 7 月 28 日河北省唐山 7.8 级地震的发震背景及其活动性. 地球物理学报, **19**, 259—269.
- [4] 陈运泰、黄立人、林邦慧、刘妙龙、王新华,1979. 用大地测量资料反演的 1976 年唐山地震的位错模式. 地球物理学报, **22**, 201—216.
- [5] 马宗晋、傅征祥、张郅珍、汪成民、张国良、刘德富, 1982. 一九六六—一九七六年中国九大地震, 地震出版社.
- [6] Butler, R., Stenart, G.S. and Kanamori, H., 1979. The July 27, 1976 Tangshan China Earthquake—a complex sequence of intraplate events. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **69**, 207—220.
- [7] 张之立、李钦祖、谷继成、靳雅敏、杨懋源、刘万琴, 1980. 唐山地震的破裂过程及其力学分析. 地震学报, **2**, 111—129.
- [8] 张之立, 1984. 唐山地震破裂过程的三维分析. 地震学报, **6**, 22—28.
- [9] 张之立、方 兴, 1988. 研究地震破裂过程的一种新方法及其应用. 地震学报, **10**, 1—10.
- [10] 张之立、刘新美, 1982. 1970 年 1 月 5 日云南通海地震的震源特征. 地球物理学报, **25**, 440—447.
- [11] 于新昌、靳雅敏, 1986. 唐山地震序列的空间活动指数. 华北地震科学, **4**, 127—134.
- [12] 刘力强、马 瑾、吴秀泉, 1986. 雁列式断层变形与失稳过程的实验研究. 地震学报, **8**, 393—403.
- [13] 张之立、方 兴, 1987. 断裂构造体系的形成和扩展过程的力学分析及应用. 中国科学, B 辑, **11**: 1214—1224.
- [14] 陈 颢、郑 捷、郭继光、阎 虹, 1984. 脉冲激光全息干涉术在岩石力学研究中的应用. 科学通报, **10**: 609—611.

AN ECHELON FRACTURE MODEL FOR THE TANGSHAN EARTHQUAKE SEQUENCE AS WELL AS SIMULATION IN THEORY AND EXPERIMENT

Zhang Zhili, Wang Chengbao, Fang Xing and Yan Hong

(*Institute of Geophysics, State Seismological Bureau*)

Abstract

Based on the re-locating earthquake catalogue and more additional data, the focal mechanism solutions of the Tangshan earthquakes of $M_s \geq 6.0$ are computed again. Their rupture geometries and source parameters are also re-estimated by means of the new and old methods respectively. The aftershock seismicity in the period since the mainshock of 1976 to the end of 1984 is studied in some detail.

The new results show that the focal mechanism solutions of the earthquakes of $M_s=7.8$ and $M_s=7.1$ become more similar to each other and their rupture directions are almost the same. The rupture length of the $M_s=7.8$ earthquake is estimated as 77—87 km, and its northeastern end terminated in the region near Zhenzizhen, instead of extending to the region of Lulong. According to the new results, a new mechanical model of echelon fractures with unequal lengths is presented in this paper. The theoretical and experimental results indicate that the echelon fracture model can simulate the fracture processes of the Tangshan earthquake better than other models. By using this model, more observed facts that could not be explained with other models, can be explained more satisfactorily.