

强余震的断裂力学机理

黎在良 王周元

(华中工学院) (兰州地震研究所)

一、裂纹扩展的方向

利用应变能密度理论, 结合裂纹闭合的作用, 研究混合型裂纹的扩展。在考虑裂纹闭合的影响时, 我们仿照McIntock 和Walsh^[1] (1962) 的思路, 研究直的裂纹。

薛昌明根据应变能密度理论研究混合型裂纹失稳扩展的问题^[2]。这个理论在裂纹扩展方向上给出比通常所用的最大拉应力理论更合理的结果, 而且不必计算能量释放率就可以得到裂纹开始扩展的判据。由于薛昌明在这一理论中忽视了断裂过程的不可逆性, 即没有考虑裂纹闭合, 使裂纹性质发生突变的情况。在压缩情况下, 他用 $K_I < 0$ 来考虑压应力的影响, 使他的结果在压缩情况下与实验结果相差较远。

在图1中^[2], 当 β 大约 30° 时, 裂纹将向反向扩展, 这从实验中没有观测到, 另外又很难从直观上给出一种可能的使 θ 。大于 90° 的模式。

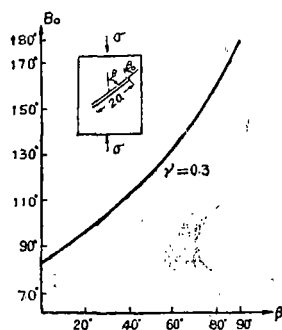


图1

实验指出, 在相当低的压力作用下, Griffith 裂纹就可以闭合。例如在大气压力之下对大理石进行的压缩实验中, Nishihara^[8]发现材料的杨氏模量几乎从载荷为零起就随载荷线性地增加, 他用裂纹的闭合解释了这一现象。由于构造地震绝大多数处于高围压环境之下, 裂纹闭合的影响就是很重要的了。

研究的问题如图2(a)所示; 进行坐标变换得到图2(b), 由于裂纹是闭合的, 所以对裂纹尖端附近的奇异应力场有贡献的应力状态为图2(c)。

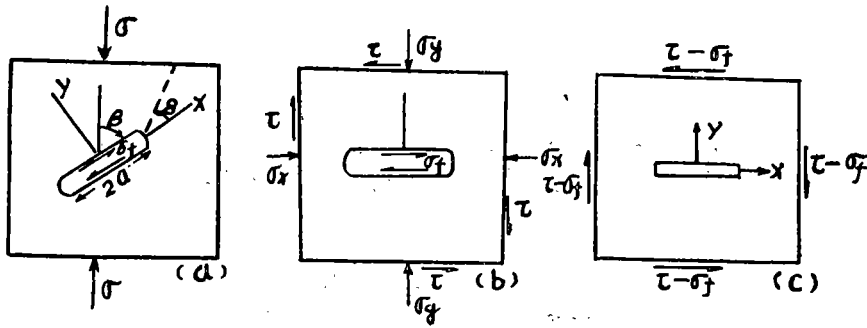


图 2

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{2} (1 + \cos 2\beta) \quad \sigma_y = \frac{\sigma}{2} (1 - \cos 2\beta) \quad \tau = \frac{\sigma}{2} \sin 2\beta$$

$\sigma_t = \mu\sigma$, μ 为摩擦系数

按照薛昌明^[2], 裂纹尖端附近的应变能密度因子

$$S = a_{22} K_{I1}^2$$

式中 K_{I1} 为 II 型裂纹尖端的应力强度因子, 这里

$$K_{I1} = (\tau - \mu\sigma_y) \sqrt{\pi a}$$

而

$$a_{22} = \frac{1}{16\pi G} [4(1-\nu)(1 - \cos\theta) + (1 + \cos\theta)(3\cos\theta - 1)]$$

其中 G 为剪切模量, ν 为泊松比, 因此

$$S = \frac{(\tau - \mu\sigma_y)^2 a}{16G} [4(1-\nu)(1 - \cos\theta) + (1 + \cos\theta)(3\cos\theta - 1)] \quad (1)$$

由 $\partial S / \partial \theta = 0$ 和 $\frac{\partial^2 S}{\partial \theta^2} > 0$ 得到

$$\theta_0 = \cos^{-1} \left(\frac{1 - 2\nu}{3} \right) \quad (2)$$

可见对于同一种材料, 裂纹扩展方向与原裂纹方向的夹角等于常数, 与 β 无关。 θ_0 随 ν 变化的部分数值列于下表。

ν	0.00	0.10	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50
θ_0	75.5°	74.5°	78.5°	80.4°	82.4°	86.2°	90.0°

此时

$$S_{min} = \frac{[2(1-\nu) - \nu^2](\tau - \mu\sigma_y)^2 a}{12G} = \frac{[2(1-\nu) - \nu^2]\sigma^2 a}{48G (\sin 2\beta - \mu + \mu \cos 2\beta)^2} \quad (3)$$

当 $\operatorname{tg} 2\beta_m = \frac{1}{\mu}$ 时, S_{m1n} 达极大值。若 $\mu = 0$, $\beta_m = 45^\circ$ 时 S_{m1n} 有极大值; 若 $\mu = 1$, $\beta_m = 22.5^\circ$ 时 S_{m1n} 有极大值; 对于岩石而言, 最可能的值 $\mu = 0.6$ [4], 于是 $\beta_m = 29.5^\circ$ 时 S_{m1n} 有极大值。从图3可见, 考虑了裂纹闭合的应变能密度理论在 β 的极值点 β_m 与趋势方面与实验结果符合得相当好, 若不考虑闭合的影响理论与实验将产生较大的偏差。

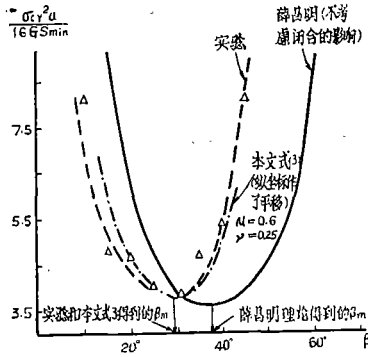


图3

我们的结论是: 压缩时, 裂纹以与裂纹原方向大约成 80° 的方向扩展。

二、破裂扩展停止的可能性

地震后, 破裂何以能停止下来是个值得探讨的重要问题。这方面已经有过一些讨论 [5、12], 这里试图从上述结果出发, 对破裂扩展停止的可能性作一简要讨论。

六十年代后期, 许多人在对岩石单轴压缩, 或在围压下再加单轴压缩的实验中发现, 当压力达到破坏强度的 $1/3 \sim 2/3$ 时, 出

现显著的扩容现象。图4给出了扩容现象的典型实验结果 [6]。产生扩容的可能机制如图5所示。设 $\tau - \mu\sigma_y$ 达到一定程度, 例如, 按应变能密度理论, 当 $S_{m1n} = S_{cr}$ 时, 原始裂纹 L_0 按大约 $\theta_0 = 80^\circ$ 的方向扩展。设扩展的长度为 L_1 , L_1 一定较原裂纹长度 L_0 小, 否则 L_0 上的剪切应力的作用就不会大到能克服 L_1 上的正压力的作用而把 L_1 拉开, 因此, 也就不会产生如图5所示的扩容。

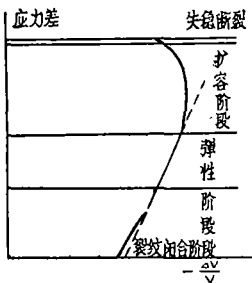


图4

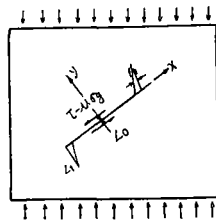


图5

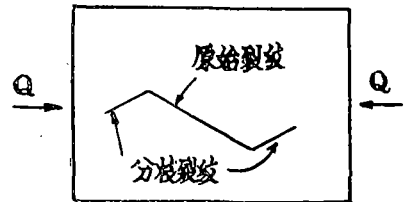


图6 (取自Brace和Bombolakis)

裂纹出现这种扩展以后, 原始裂纹 L_0 附近的剪应力大部分被释放, 从而原始裂纹对扩展的裂纹尖端的奇异应力场影响甚微, 可以略去不计。这样新裂纹尖端的应力强度因子只与 $\sqrt{L_1}$ 成比例, 与 L_0 的存在无关。因为 L_1 小于 L_0 , 从而 L_1 尖端的应力强度因子将比产生 L_1 之前原始裂纹 L_0 尖端的应力强度因子小。如果外载不再增加, L_1 将不再扩展。这个分析与Brace和Bombolakis [7] 的实验结果是一致的。

Brace和Bombolakis在有内部直裂纹的脆性材料上加压。他们发现当载荷缓慢增加时, 分枝裂纹在原始裂纹顶端形成, 逐渐转向主压力轴的方向, 但仅仅传播到一个有限的最

终长度,並不立即失稳扩展,如图6所示。

三、强余震的一些特征

一个大地震系列的主震形成的机理是一个更加复杂的情况。很可能主震断裂面原来是一个薄弱带,在其上逐渐发展起许多小的裂纹,而主震是由这些小裂纹的贯穿所致。然而在主震一旦发生之后,我们将主震形成的断裂面看作弹性体中的原始裂纹。许多资料表明,强余震常发生在主震断裂面的两端,因而我们把强余震看成主震原始断裂的分枝扩展。

(一)强余震断层面的转向特征 主震后,在主破裂面端部将有高度的应力集中,按上面的理论,发生在主震破裂带端部附近的强余震的断层面应当有明显的转向变化。实际上也已经观测到这种现象。

1975年2月4日海城7.3级地震后,2月6日主破裂西端的5.7级强余震断层面的走向由 120° 变为 60° 左右^[8]应当指出,以该处原来存在走向为 60° 的活动地质断层来解释这个强余震是勉强的。

1974年5月11日永善7.1级地震,由极震区长轴及余震震中分布的长轴走向可知主破裂面为北西走向,而6月15日在主破裂东南端发生的5.7级强余震前后,小震活动明显改为沿北东 40° 的长轴取向^[9],也表明了发生在主破裂端部附近的强余震的破裂面走向发生了较大的转向变化。

郦家全等^[10]研究了国内外一系列强余震的断层面解特征后曾指出,强前震和主震的震源机制相当接近,而一部分强余震的结果同主震相差显著。这种差别大致可以分为三类:①主震为走滑断层活动,而强余震变为倾滑断层活动;②主震为倾滑断层活动,强余震却变为走滑断层活动;③断层错动性质变化不大,但走向有明显的变化。他们的第三种类型的强余震特征,用本文的理论可以得到一定的说明,因为本文只讨论了平面应变的情况,前二种类型的强余震特征是三维问题,这是一个尚待解决的理论问题。

(二)强余震的衰减特征 在主破裂端部发生的强余震应当具有不同于其它强余震的特点:其一,这种强余震为主震破裂带端部新的应力集中所致,它的发生为一新的破裂,因此它自身可以在整个主震序列中自成另一相对独立的系列,而其它余震则一般都作为主破裂引起的应力调整,即弹性后效的结果,往往很难自成系统。其二,如上所述,这种破裂将使整个震源区内的应力水平明显降低,而一般余震不能起到这种作用,所以整个地震序列的活动水平将以该强余震为转机,衰减加快,并逐渐趋于平静,或者该强余震系列的衰减将比它以前的地震序列衰减明显加快。其三,这种强余震在强度上一般不低于整个序列的其它余震,而在发生时间上通常不早于其它强余震。

国内近十多年来的7级以上大震序列的衰减特征¹⁾基本上表明了这些特点,尤其是根据宇津德治给出的公式 $N = N_1 t^{-P}$ 求得的衰减系数 P 更为明显,其结果是该强余震前, P 值一般不大于1,而该强余震的 P 值或者说该强余震后整个序列的 P 值都大于1,即是该强余震发生之后,频度的衰减大大加快了,这就清楚地表明该强余震发生在衰减曲线的拐点上。

(三)破裂长度同地震强度的关系 设震级与断裂面长度关系是:

1) 付征祥,判断强余震活动持续时间的一种可能方法,中国地震学会地震学、地震观测技术、地震前兆专业委员会学术讨论会论文摘要汇编,1980年。

$$M_s = A + B \lg L \quad (4)$$

在这方面已有不少人作了工作，也得到了一些经验的或理论的公式。

既然有一种特殊的强余震发生于主破裂的端部，我们就有可能由强余震的分布线量来表征主破裂的长度。据此统计了1920年海原8½级地震以来，国内近40个6级以上地震的破裂长度，这些地震均为主震余震型，而且均为有多个余震的大震。破裂长度（公里计）同主震强度（ M_s ）的关系（图7）按最小二乘法求（4）式中的系数可得：

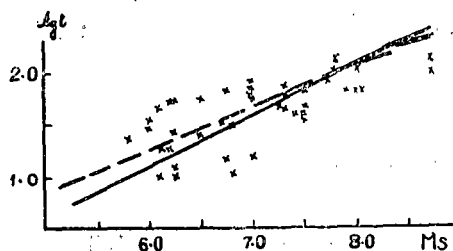


图7

$$\text{——} M_s = 2.1 \lg L + 3.3 \quad \text{---} M_s = 2.0 \lg L + 3.8 \pm 0.5$$

$$M_s = 2.0 \lg L + 3.8 \pm 0.5 \quad (5)$$

显然，这同郭增建等根据地面断裂资料得到的关系 $1) M_s = 2.1 \lg L + 3.3$ 甚为接近。

应当指出：（1）本方法在实质上同余震区长轴线量确定破裂长度的方法一致，但在意义上略有差别；（2）资料点的分散可能是资料点的精度不高和错动类型及震源深度的影响所致。

至此，在前述裂纹扩展及（5）式的基础上，根据最大强余震与主震强度差，我们有可能大致估计前述裂纹扩展长度 L_1 同原始破裂长度 L_0 之比的大致量级。

在统计 $M_s \sim L$ 关系的同时也统计了大震与其强余震的震级差。根据这些结果可得 $\Delta M = 1.6$ ，这同巴特给出的 $\Delta M = 1.2$ 的结果有些差别，但基本一致。根据（5）式及一系列类似的公式¹⁾ 不难得到：

$$L_1/L_0 = 10^{-\frac{\Delta M}{2}} \approx 0.16 \quad (6)$$

可见破裂扩展的长度大约为原始破裂的0.16倍，这同Paul在文献^[11]中假定的 $L_1/L_0 = 0.1 \sim 0.2$ 是一致的。

四、结束语

本文利用混合型裂纹失稳扩展的应变能密度理论，讨论了发生在大地震主破裂端部的强余震在破裂规律上活动特点上的某些问题，同时对于大震破裂的停止机制及破裂长度等问题也作了简单的讨论，并引证了一些有关的现象。这些无疑都有一定的参考价值。当然，许多问题还有待进一步深入探讨，例如，我们在本文中所用的混合型裂纹扩展方向的应变能密度理论是基于脆性材料的，而且本文只讨论了二维问题，因此，实际上的地震资料在数值上与理论有一定的差异。可见，从弹塑性断裂力学的观点研究三维问题对地震机制的研究是很必要的。然而从我们的初步结果可以看出，用断裂力学理论来研究地震的成因是有着广泛的前景的。

（本文1981年11月17日收到）

1) 郭增建、秦保燕，用发震构造显示的构造规模来估计地震的最大强度，酒钢地震考察报告之七，1965年。

参 考 文 献

- [1] F. A. Meclintoch and J. B. Walsh, Friction on Griffith Cracks in rocks under Pressure, in "Proceedings of the 4th U.S. National Congress of Applied Mechanics (1962)" p1015—1021.
- [2] G. C. Sih International Journal of Fracture 10, p305, 1974.
- [3] Nishihara, M., Doshisha Engineering Review, Vol. 8, No. 2, pp32—55, 1957.
- [4] J. D. Byerlee, J. G. R. p3639 1967.
- [5] 郭增建、秦保燕编著, 震源物理, 地震出版社, 1979.
- [6] Brace et al. J. G. R. 1966 No. 16
- [7] W. F. Brace and E. G. Bombolakis, J. G. R. 68, 3709—3713, 1963.
- [8] 顾浩鼎等, 1975年2月4日辽宁省海城地震的震源机制, 地球物理学报, 19卷4期。
- [9] 刘正荣等, 1974年5月11日云南省永善大关地震, 地球物理学报, 20卷2期。
- [10] 鄢家全等, 强余震机制解特征, 地震学报, 2卷, 4期。
- [11] Paul, B. Macroscopic Criteria for Plastic Flow and Brittle Fracture in "Fracture II" (Liehowitz, ed.) 1968.

DISCUSSION OF A KIND OF STRONG AFTERSHOCKS
OCCURRING BASED ON FRACTURE MECHANICS

Li Zailiang (*Huazhong University of Science and Technology*)

Wang Zhouyuan (*The Seismologic Institute of Lanzhou*)

Abstract

Based on the strain energy density theory on the unstable growth of mixed mode cracks, this paper discusses some problems on fracture law and activity characteristics of strong aftershocks occurred at the end of main fracture of large earthquakes. Combining some relative examples, it suggested: 1. the angle between fracture planes of this strong aftershock and its main earthquake should be much more than zero degree, 2. this strong aftershock should generally locate at the corner of attenuation curve of aftershock frequency, 3. the relationship between fracture length and magnitude of strong earthquakes is quite close to the result obtained by Guo Zeng-jian and others. 4. the growth length is about 0.16 time that of main fracture.