

# 大震广义影响场的讨论\*

黄福明<sup>1)</sup> 陈修启<sup>2)</sup>

1) 中国北京 100085 国家地震局地壳应力研究所

2) 中国北京 100036 国家地震局分析预报中心

## 摘 要

研究大震广义影响场的减震与加震作用对于地震危险区划、工程地震与中、短期地震预报均具有重要的意义,日益引起人们的重视。本文利用断层的三维弹性位错模式的数值计算结果,研究了中国东部地区和西部地区大震广义影响场的减震与加震作用以及对其邻近断层运动方式的影响。分别得到这两个地区的广义减震与加震距离同地震震级的统计关系式如下:

### 中国东部地区

$$\text{广义减震距离} \quad \ln R_1 = 0.828M - 2.812$$

$$\text{广义加震距离} \quad \ln R_2 = 0.623M + 1.266$$

### 中国西部地区

$$\text{广义减震距离} \quad \ln R_1 = 1.285M - 5.390$$

$$\text{广义加震距离} \quad \ln R_2 = 0.729M + 0.607$$

结果表明,对于同级地震,中国东部地区的广义减震距离与广义加震距离均小于中国西部地区的相应距离。影响减震与加震作用显著程度的因素主要有:(1)与地震断层的相对距离及相对位置;(2)邻近断层运动的旋性(左旋或右旋);(3)大震的震级与引起的附加剪应力的性质(减小或增加);(4)邻近断层的应力状态。

关键词 广义影响场;地震断层;剪应力;减震;加震

## 一、引 言

通常,地震影响场系指地震在地表造成的影响及其分布状况。它可以用“烈度”表示,称作宏观影响场;亦可以用质点运动的“速度”、“加速度”和“位移”来表示,称作微观影响场(国家地震局,1981)。本文所说的广义影响场乃是指地震断层高速错动停止之后在周围介质中产生的各种剩余形变场(即位移场、应变场与倾斜场)与相应的附加应力场。这些场均是静态场,亦可称为“广义”零频场(黄福明,1989)。80年代以来,由于地震危险区划、工程地震和中、短期地震预报的实际需要,人们日益重视对广义影响场的研究,尤其重视研究大地震发生后的减震与加震作用(郭增建等,1984;汪进,1987;陈学忠,1988;

\* 地震科学联合基金会资助项目的一部分。

1990 年 4 月 13 日收到本文初稿,1991 年 3 月 20 日决定采用。

郭安宁, 1989; 章淮鲁, 1989)<sup>1,2)</sup>, 即广义影响场的地震效应.

地震断层错动实质上是一种剪切破裂, 它的发生主要是剪切应力作用的结果. 因此, 从物理上讲, 同减震与加震作用关系最密切的应是地震引起的附加应力场中的剪切应力分量. 为此, 本文拟根据地震断层的三维弹性位错模式的数值计算结果, 试图从理论上对下列几个问题作进一步的讨论, 即(1)广义影响场的影响范围;(2)广义影响场对邻近断层运动方式的影响;(3)影响减震与加震作用的因素;(4)广义减震与加震距离统计公式的适用范围.

## 二、广义影响场的影响范围

鉴于走向滑动断层的减震与加震作用尤为显著, 故本文着重讨论地震断层走向滑动产生的附加剪应力的影响范围. 图1示出走向滑动断层倾角为 $89^\circ$ 时剪应力分量 $\tau_{12}$ 在地表面的变化图象(黄福明等, 1980). 图中 $\tau_{12}$ 的负值(虚线)表示剪应力减小, 正值(实线)表示剪应力增加. 该图表明, 断层错动后其周围大部分地区的剪应力减小, 离断层越近, 剪应力减小越多, 但在断层两端剪应力却很集中, 越是靠近断层端点, 应力集中程度越高, 有使断层自身扩展的趋向. 这样, 在地震断层周围地区内与该断层平行或大致平行的邻近断层上, 其剪应力将发生不同程度的变化. 有的剪应力减小, 有的剪应力则增加, 从而在一定时期内推迟或加速邻近断层发生地震错动. 如果推迟邻近断层发生地震错动, 则这种作用称为“减震作用”, 反之, 则称之为“加震作用”. 正确估计减震作用或加震作用的有效范围, 对于未来地震危险性分析无疑是重要的.

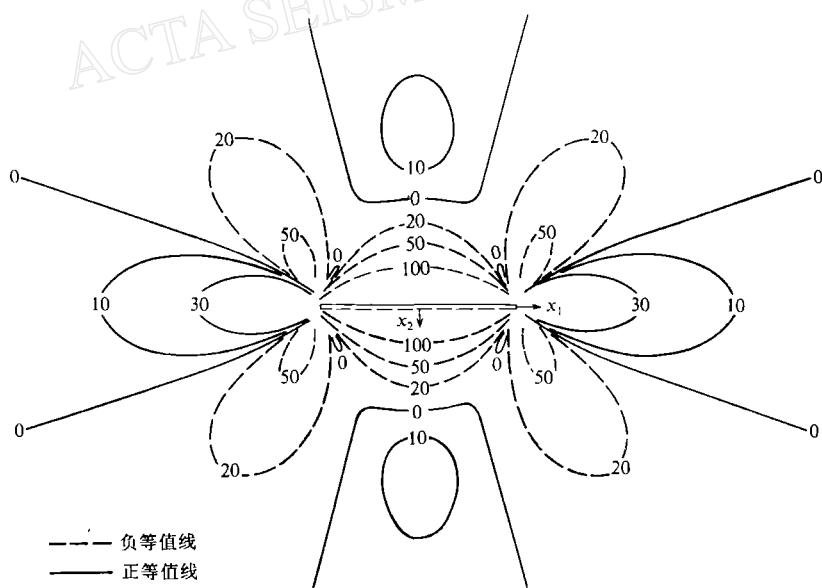


图1 走向滑动断层应力场的 $\tau_{12}$ 分量. 等值线单位是 0.01MPa

1) 郭增建、秦保燕, 1984. 平行断层之间的相互影响——减震作用. 青藏高原第一次地震学术讨论会论文.

2) 鄂家全、李正志、贾素娟, 1987. 大地震的减震作用. 地震危险性分析研究学术讨论会, 无锡.

## 1. 资料来源与计算方法

为了比较我国以南北带为界的东部地区与西部地区广义影响场的差异, 我们分别以华北块体与青藏块体作为这两个地区的典型代表, 并利用地震断层的三维弹性位错模式(黄福明等, 1980)进行了相应的数值计算。为此, 必须选择比较合理的断层参数和介质弹性常数。

首先假定地震断层面是矩形位错面, 所有强震的震源深度均为 15 km, 断层面上界的深度为零 km, 断层面宽度为震源深度的 2 倍(即 30 km), 断层面倾角均为 89°。

其次, 根据上述两个地质块体内的平均纵横波波速和密度值(国家地震局《深部物探成果》编写组, 1986)分别求得介质的弹性常数与泊松比, 结果示于表 1。为了清楚起见, 表中还列出两个地质块体平均地壳模型的基本参数。

表 1 中国大陆不同地区平均地壳模型的基本参数及其相应的弹性常数与泊松比

地区	平均地壳模型的基本参数				弹性常数		泊松比 $\nu$	基本参数的资料来源
	$h$	$\alpha$	$\beta$	$\rho$	$\lambda$	$\mu$		
华北块体	15.0	6.75	3.90	3.00	4.543	4.563	0.249	见国家地震局《深部物探成果》编写组, 1986 表 1.1 和 1.5
青藏块体	15.3	5.81	3.36	2.75	3.074	3.105	0.249	

注:  $h$  为层厚度(km);  $\alpha$  为纵波速度(km/s);  $\beta$  为横波速度(km/s);  $\rho$  为密度(g/cm<sup>3</sup>);

$\lambda$  和  $\mu$  为拉梅常数( $10^{10}$  Pa)

最后, 根据不同地区的地震震级与断层长度的经验公式估算各级地震的断裂长度。这些经验公式如下:

### 中国东部地区

$$M = 2.971 \lg L + 2.56^{\dagger} \quad (1)$$

### 中国西部地区

$$M = 2.1 \lg L + 3.3 \quad (\text{郭增建等, 1973}) \quad (2)$$

(1)、(2)式中  $L$  为断层(破裂)长度(km)。

至于断层位移与地震震级的关系, 则统一使用郭增建等(1973)得到的经验公式

$$D = 10^{0.52M - 1.25} \quad (5 < M < 8.5) \quad (3)$$

## 2. 结果

(1) 垂直于地震断层走向的方向上剪应力的衰减 图 2 示出 6 级以上地震应力场的剪应力  $\tau_{12}$  在垂直于断层走向的方向上从负值变到零值时的距离与震级的关系曲线。从图中看到, 对于不同震级的地震, 其附加剪应力从负值变到零值的距离  $R_1$  是不同的。在这个距离之内, 与地震断层平行或近于平行的邻近断层上的初始剪应力将程度不同地减少, 因而推迟邻近断层发生地震滑动的时间。愈是靠近地震断层, 这种推迟作用愈是显著。为了便于讨论, 本文特定义距离  $R_1$  为广义减震距离。显然,  $R_1$  值随震级增大而增大, 并且中国东部地区同级地震的广义减震距离要比中国西部地区小。若对  $R_1$  取自然对数, 则发现  $\ln R_1$  与震级  $M$  之间呈现很好的线性关系(见图 2)。回归计算结果得到:

1) 国家地震局震源机制研究小组, 1973. 中国地震震源机制的研究, 第二集。

## 中国东部地区

$$\ln R_1 = 0.828M - 2.812 \quad (r \approx 1.0, s = 0.0513) \quad (4)$$

## 中国西部地区

$$\ln R_1 = 1.285M - 5.390 \quad (r \approx 1.0, s = 0.0052) \quad (5)$$

式中  $R_1$  是广义减震距离(km),  $r$  是相关系数,  $s$  是剩余标准差.

为了清楚起见, 表 2 同时给出本文与其他作者所得到的不同震级地震的减震距离. 从表中看到, 本文所得到的平均减震距离与其他作者所得到的结果相当接近.

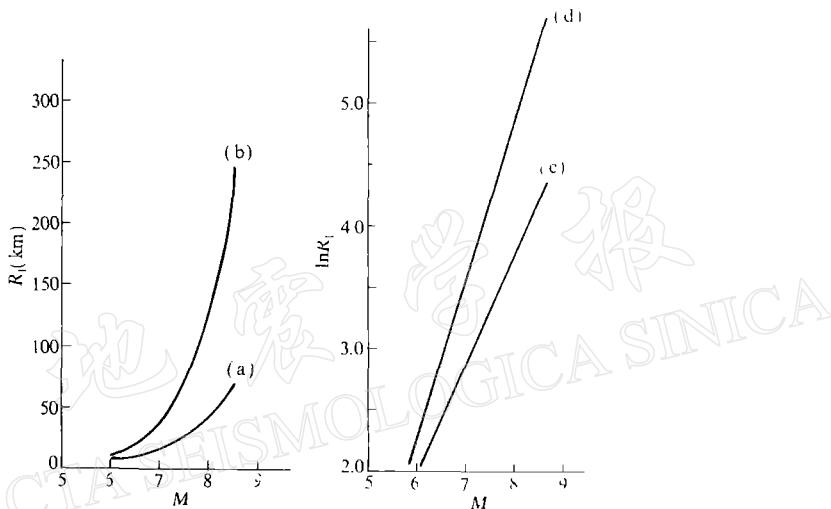


图 2 在  $x_2$  方向上 ( $x_1=0$ ) 地震应力场剪应力分量  $\tau_{12}$  从负值变到零值的距离  $R_1$  与震级  $M$  的关系曲线

(a) 中国东部地区  $R_1$  与  $M$  的关系曲线; (b) 中国西部地区  $R_1$  与  $M$  的关系曲线;  
(c) 中国东部地区  $\ln R_1$  随  $M$  的变化; (d) 中国西部地区  $\ln R_1$  随  $M$  的变化

表 2 中国不同作者所得广义减震距离  $R_1$  的比较

作 者	广义减震距离 $R_1$ (km)						备 注
	$M6.0$	$M6.5$	$M7.0$	$M7.5$	$M8.0$	$M8.5$	
本 文	9.1	13.1	18.6	28.4	45.8	71.4	中国东部地区适用
	10	19.3	37.5	71.4	134.5	246	中国西部地区适用
	9.5	16.2	28.1	49.9	90.1	159	中国东部、西部地区的平均结果
郭增建等(1984)			25	50	90	160	
郭安宁(1989)			31	54	93	162	

(2) 平行于地震断层走向的方向上剪应力的衰减 从图 1 看到, 地震断层两端出现应力集中现象, 因而在这个方向上的一定距离内的平行断层上的剪应力将增加, 有利于发生地震滑动. 这种加震作用随距离的增加而衰减. 为了讨论方便, 本文定义剪应力  $\tau_{12}=0.001\text{ MPa}$  时的距离为“广义加震距离”. 图 3 示出广义加震距离  $R_2$  与震级的关系曲线. 回归计算结

果得到:

### 中国东部地区

$$\ln R_2 = 0.623M + 1.266 \quad (r \approx 1.0, s = 0.0023) \quad (6)$$

### 中国西部地区

$$\ln R_2 = 0.729M + 0.607 \quad (r \approx 1.0, s = 0.0052) \quad (7)$$

式中  $R_2$  的单位为 km.

表 3 示出中国不同地区广义加震距离  $R_2$  的比较结果. 对比表 2 和表 3 可以看出, 对于同一个地震, 其广义加震距离远大于相应的广义减震距离.

表 3 中国不同地区广义加震距离  $R_2$  的比较

地 区	广 义 加 震 距 离 $R_2$ (km)					
	M6.0	M6.5	M7.0	M7.5	M8.0	M8.5
中国东部	149	204	278	379	520	711
中国西部	146	210	301	434	629	>800
中国东、西部地区的平均结果	148	207	290	407	575	>755

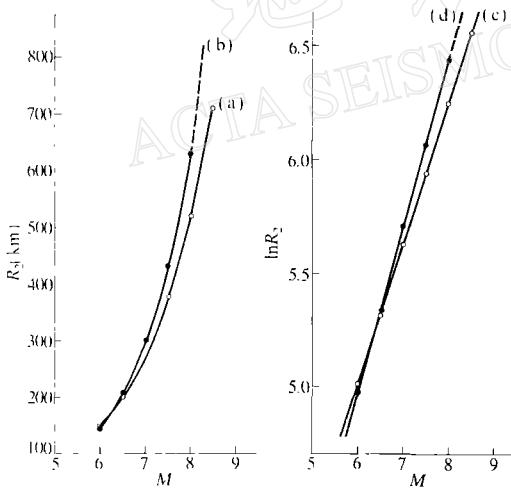


图 3 在  $x_1$  方向上 ( $x_2 = 0.1$  km) 地震应力场剪应力分量  $\tau_{12} = 0.001$  MPa 时的影响距离  $R_2$  与震级  $M$  的关系曲线  
(a) 中国东部地区  $R_2$  与  $M$  的关系曲线; (b) 中国西部地区  $R_2$  与  $M$  的关系曲线; (c) 中国东部地区  $\ln R_2$  随  $M$  的变化;  
(d) 中国西部地区  $\ln R_2$  随  $M$  的变化

力场对不同走向的邻近断层的影响是不同的. 当邻近断层走向与地震断层的夹角  $\theta$  处于  $0 < \theta < 45^\circ$  或  $135^\circ < \theta \leq 180^\circ$  时, 邻近断层中点上的附加剪应力取负值(即减小), 而当  $45^\circ < \theta < 135^\circ$  时, 相应的附加剪应力取正值(即增大). 此时, 邻近断层上的作用究竟是减震抑或加震, 尚需根据该断层运动的旋性确定. 若断层运动的旋性与地震断层旋性相同,

### 三、广义影响场对邻近断层运动方式的影响

上面着重讨论了地震广义影响场对邻近平行断层的减震与加震作用的影响范围, 尚未涉及与地震断层斜交的邻近断层的减震与加震作用问题. 为此, 本文利用黄福明等(1983)的程序计算了我国东部地区一个 7.5 级地震断层走向滑动时, 其附加剪应力的变化对邻近三个典型位置上斜交断层运动方式的影响. 在下面的讨论中, 假定邻近断层的中点即是未来地震的始破裂点.

#### 1. 邻近断层的中点位于地震断层的中心垂线上

从图 4 曲线(a)可以看出, 地震应

则附加剪应力减小(增加)将意味着减震(加震);若断层运动的旋性与地震断层相异,则附加剪应力减小(增加)将意味着加震(减震).当 $\theta = 45^\circ$ 或 $135^\circ$ 时,附加剪应力均为零值,邻近断层上不出现减震或加震现象.

## 2. 邻近断层的中点位于地震断层的一个端点垂线上

图4曲线(b)示出这种情形.曲线(b)相对于曲线(a)向左移了约 $12^\circ$ ,并且其附加剪应力的最大绝对值亦明显减小.当 $0 < \theta < 33^\circ$ 和 $123^\circ < \theta < 180^\circ$ 时,邻近断层上附加剪应力均为负值;当 $33^\circ < \theta < 123^\circ$ 时,附加剪应力均取正值;而当 $\theta \approx 33^\circ$ 或 $123^\circ$ 时,附加剪应力全为零.

## 3. 邻近断层的中点位于地震断层走向的延长线上

这种情形在图4的曲线(c)中示出.曲线(c)相对于曲线(a)向左移了 $90^\circ$ ,并且其附加剪应力的最大绝对值亦比曲线(a)的相应值小得多.当 $0 < \theta < 45^\circ$ 或 $135^\circ < \theta < 180^\circ$ 时,邻近断层上的附加剪应力均为正值,尤其是 $\theta = 0$ 或 $180^\circ$ 时,加震效应最为显著.当 $45^\circ < \theta < 135^\circ$ 时,附加剪应力全为负值;而当 $\theta = 45^\circ$ 或 $135^\circ$ 时,附加剪应力取零值.

## 四、影响减震与加震作用的因素

根据上述讨论,影响减震与加震作用的因素主要有下列几方面:

(1) 与地震断层的相对距离及相对位置.对邻近的平行断层,距离地震断层越近,其减震作用越显著;而在地震断层两端延长线的方向上,平行断层距地震断层端点愈近,其加震作用愈显著.对于斜交的邻近断层,其减震与加震效应,不仅同距离有关,而且同其与地震断层的夹角有关.

(2) 邻近断层运动的旋性与地震断层旋性的异同,对减震与加震作用的性质影响甚大.若两者旋性相同,则附加剪应力减小将导致减震,否则将加震;若旋性相异,则附加剪应力减小将意味加震,否则将减震.

(3) 大震的震级与引起的附加剪应力的性质(减小或增加).地震的震级愈大,其减震与加震效应的范围就愈广.附加剪应力性质的影响同断层的旋性紧密相关,如上所述.

(4) 邻近断层的应力状态.这包括两层意思.即初始应力水平与附加围压的性质.如

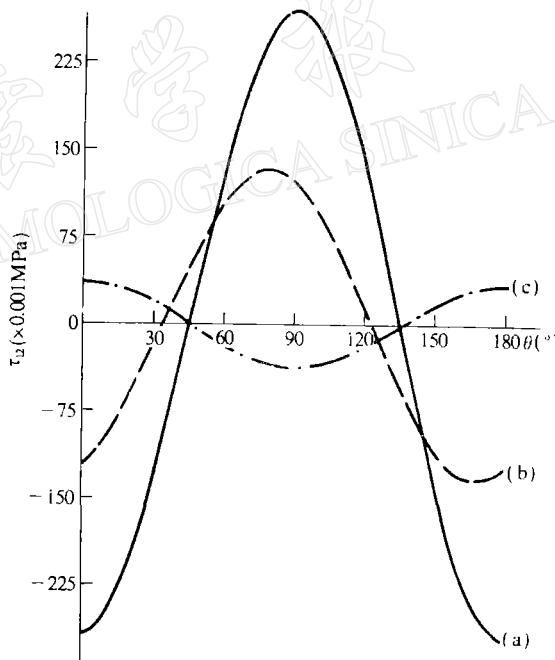


图4 中国东部地区一个7.5级地震应力场对邻近地区不同走向断层活动影响大小的比较

(a) 邻近断层的中点位于地震断层的中心垂线上( $x_1=0$ ,  
 $x_2=10\text{ km}$ );(b) 邻近断层的中点位于地震断层的端点垂线上( $x_1=-23\text{ km}$ , $x_2=10\text{ km}$ );(c) 邻近断层的中点位于地震断层走向的延长线上( $x_1=-63\text{ km}$ , $x_2=0.1\text{ km}$ )

果邻近断层的初始应力水平较高(或接近其临界状态),并且处于地震断层形成后附加流体静应力的引张区内(相当于附加围压减小),则邻近断层比较容易发生剪切错动,因而“加震”作用显著.如果邻近断层处于附加流体静应力的压缩区内,则由于摩擦效应增大,致使减震作用明显.

顺便指出,在一般情况下,地震断层面上界深度取值的变化对减震和加震作用影响不大,故可以不予考虑.

## 五、广义减震与加震距离计算公式的适用范围

本文用断层的弹性位错模式研究了大震的广义减震距离与加震距离同震级的关系,所得到的统计公式仅适用于与主震断层平行或大致平行的邻近断层.在应用这些公式进行估算时,应当注意到断层位错模式存在的局限性.因为用弹性位错模式计算将在断层端部出现奇异性,即出现应力无限大和位移不确定的点,这在物理上是不合理的,也同实际情况不符.当断层端点的应力足够大时,端点附近的地壳介质就要屈服,产生宏观的塑性变形,从而使断层端点的应力松弛,这样端点的应力就不可能无限地增大.于是在断层两端将出现一定范围的塑性变形区.由于塑性变形消耗一定的能量,所以这个变形区要比不考虑塑性变形的应力集中区范围小一些.但究竟小多少,则需依具体情况而定.另外,实际地壳介质并非完全弹性均匀,而且地震断层面的错距也非常数,往往是断层面中间错距大而向断层两端衰减.因此,预计实际的减震距离与加震距离应比本文得到的统计值小一些.在实际进行优化减震距离与加震距离的统计分析时,应当充分注意到这一点.

## 参 考 文 献

- 陈学忠, 1988. 斜交断层之间的相互作用. 西北地震学报, **10**, 1, 12–23.
- 郭安宁, 1989. 关于减震问题的讨论. 西北地震学报, **11**, 2, 96–99.
- 国家地震局, 1981. 中国地震烈度区划工作报告, 79. 地震出版社, 北京.
- 国家地震局《深部物探成果》编写组, 1986. 中国地壳上地幔地球物理探测成果, 9–12. 地震出版社, 北京.
- 郭增建、秦保燕、徐文耀、汤泉, 1973. 震源孕育模式的初步讨论. 地球物理学报, **16**, 43–48.
- 郭增建、秦保燕, 1984. 大震重复性与减震作用. 西北地震学报, **6**, 4, 89–96.
- 黄福明、王廷韫, 1980. 倾斜断层错动产生的应力场. 地震学报, **2**, 1–20.
- 黄福明、王廷韫, 1983. 多段断层均匀滑动的应力分布特征. 地球物理学报, **26**, 增刊, 678–692.
- 黄福明, 1989. 浅谈断层运动产生的应力波. 地震, **6**: 63.
- 汪进, 1987. 优化减震距离. 西北地震学报, **9**, 4, 28–33.
- 章淮鲁, 1989. 华北地区强震的背景地震活动性的研究. 地震学报, **11**, 225–235.