

# 关于地震烈度衰减模型的系统偏差

沈建文 华宜平

(安徽省地震局)

## 摘 要

本文讨论在地震危险性分析中目前使用广泛的地震烈度衰减模型,即 Cornell 建立的点源模型和洪华生(A. H-S. Ang)等建立的断层-破裂模型。与实际烈度资料的比较表明,在等震线狭长的区域,点源模型有系统偏差,通常这种偏差不算严重。为了克服上述偏差,断层-破裂模型引进了破裂长度的概念,但其衰减与实际资料出入较大。与实际地震等震线的比较和计算表明,对大地震沿断层或等震线长轴方向,断层破裂模型总是高估高烈度区而低估低烈度区。此外,本文分析了断层破裂模型产生系统偏差的原因,讨论了点椭圆模型的合理性,并用地震危险性分析实例做了说明。

**关键词** 危险性分析;点源模型;断层-破裂模型;经验点椭圆模型;地震区划

## 一、引言

城市或重大工程所处地区的基本烈度或危险性是国民经济建设的重要依据。低估危险性而降低设防标准将导致 1976 年唐山地震那样的悲剧,高估危险性则意味着盲目要求增加投资,也需付出重大的代价。

1968 年, Cornell 首先对地震危险性分析作较系统的研究<sup>[1]</sup>,建立了著名的库内尔模型,也称点源模型。此种模型的特点是把震源假设为仅代表震源位置的一个点,烈度以震源所在点为最高点,逐渐向周围衰减。上述文献中,烈度衰减取

$$I = c_1 + c_2 M - c_3 \ln R \quad (1)$$

式中  $c_1, c_2, c_3$  为半经验常数,  $I$  为修正的麦卡里烈度,  $M$  为震级,  $R$  为震源距。根据上述衰减规律和地震时空强分布的概率模型,可算得场地在一定年限内对于不同烈度  $i$  的超越概率  $P(I \geq i)$ 。

1977 年, Der. Kiureghian 和洪华生(A. H-S. Ang)对库内尔模型作较大的修改<sup>[2]</sup>,提出断层-破裂模型,在我国得到了较广泛的应用。他们认为点源模型没有考虑地震断层对烈度或地震动的影响,假设地震能量都从一点发出,因而低估了断层区的危险性。据此,断层破裂模型假设地震能量沿整个断层释放,且假设场地的烈度或地震动由震级和断层距(场地到发震断层的最短距离)决定。衰减关系为

1986 年 11 月 10 日收到本文初稿, 1987 年 6 月 20 日决定采用。

$$I = I(M, r) \quad (2)$$

式中,  $I$  为烈度,  $M$  为震级,  $r$  为断层距。

一般认为, 与点源模型相比, 断层破裂模型更接近实际。但本文将用实际震例比较两者的偏差, 说明断层破裂模型不一定优于点源模型。此外, 本文将讨论建立危险性分析模型的一般方法, 指出断层破裂模型的缺陷, 提出按照实际等震线资料建立系统误差较小的经验点椭圆模型, 以取得更符合实际的危险性分析结果。

## 二、点源和断层破裂模型的系统偏差

众所周知, 由于地学的复杂性, 许多预测问题都带有相当的不确定性。地震危险性区划工作也明显如此。例如, 确定潜在震源就带有许多不确定因素。由于历史地震资料有限, 潜在震源的最高震级、发生率、 $b$  值等特征参数常常带有相当的不确定性。在衰减公式中, 最常用的形式是选取震级和一个距离参数, 从而假设衰减等震线是同心圆; 另一类常用的形式是选择震级和长短轴两个参数, 假设衰减形式为同心椭圆系列。但实际等震线远为复杂, 因而, 不确定性是显见的。在断层破裂模型中还用到震级-破裂长度关系, 其不确定性也是明显的。

笔者认为, 上述不确定性包含着性质不同的偏差或误差, 尽管此差别并非绝对, 因而有可能将不确定性区分为“随机误差”和模型本身的“系统偏差”。这里的随机误差是指由客观复杂性造成的不具规律性的误差; 而系统偏差是由模型本身与已认识的实际规律不符而引入的, 可以通过使模型和实际一致而减小。以下将结合点源模型和断层破裂模型的实际加以说明。

危险性分析归结为两方面的内容。其一是判定潜在震源, 其二是根据衰减规律确定潜在震源在场地上造成的影响, 烈度或加速度等。本文只涉及第二方面。

当等震线近似为椭圆时, 设衰减等震线为椭圆系列, 这里已经包含了不确定性。但既要建立模型, 简化及随之而来的不确定或误差就不可避免。但若人为地忽略长短轴方向的差异, 将椭圆换成面积相等的圆, 按圆形衰减规律建立点源模型, 则显然将低估椭圆长轴方向的危险性 [图 1(a) 中的斜线区], 而高估短轴方向两侧的危险性 [图 1(a) 中的叉线区]。这种系统偏差是由于模型本身过于简化而造成的。

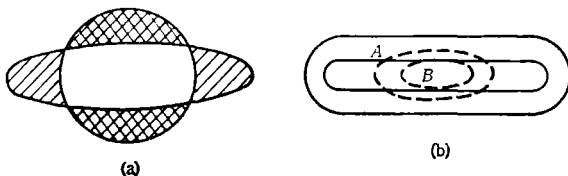


图 1 点源模型和断层破裂模型的衰减

实际上, 断层破裂模型的出发点正是想克服上述偏差。文献[2]指出: “从历史地震的分析中发现, 通常等震线的形状都是椭圆的, 这就有力地支持了这个假定(指断层破裂模型)”。问题在于, 断层破裂模型的衰减等震线并不是椭圆, 从而人为地引进了新的系统

偏差.

### 1. 断层破裂模型的衰减规律

断层破裂模型假设场地的烈度由震级和场地到发震断层的最短距离决定,故断层破裂模型的理论衰减图象如图 1(b) 中的实线所示. 显然这与椭圆系列有较大差别.

考察实际等震线不难发现,与断层距离相等的场地上,烈度可能不同. 如图 1(b) 中的  $A, B$  两点虽然位于断层破裂模型的同一条等震线上,实际上却有不同烈度(实际等震线如虚线所示). 这样,若按(2)式严格地建立衰减公式,显然会遇到困难——同一震级  $M$ ,同一断层距  $r$ ,却有不同的烈度. 当然,由于实际资料的离散,此矛盾可以在回归中得到掩盖. 在我国,通常并不严格地按(2)式建立衰减经验公式,而把(2)式中的  $r$  改变为椭圆衰减关系中的短轴. 由于实际中多用此类做法,我们将讨论上述做法的偏差.

### 2. 断层破裂模型和点源模型的偏差

按断层破裂模型的假设,若在(2)式中令  $r$  趋于零,则易见整个断层区都将是同等的高烈度区. 例如,若一个 8 级地震,破裂长度达 150km,震中最高烈度为 11 度,则 11 度区至少应延续 150km. 但按邢军等<sup>1)</sup>,破裂长度的尺度大体与 8 度区相当. 若此估计基本正确,则断层破裂模型在估计场地危险性时将 8, 9, 10 度区中的相当一部分提高到了 11 度. 10 度和 9 度区也将有相应的扩大,从而大大地高估了断层区两侧部分的危险性.

为定量比较,我们从我国现代 7 级以上的大地震中选出炉霍地震和唐山地震,分别作为等震线较扁和较圆震例的代表. 有关参数列于表 1. 震级引自文献[3],破裂长度资料取自文献[4],本文按平均定炉霍地震为 110km,唐山地震为 130km (唐山地震地表破裂资料舍去).

炉霍和唐山地震的实际等震线取自文献[5],分别绘于图 2 和图 3,用实线表示. 这些等震线若用椭圆近似则可表示为图 2 和图 3 中的点划线. 我们保持这些椭圆的圆心和轴向不变,改变圆心和轴向无疑可使椭圆更好地拟合实际等震线,只是对未来的潜在震源难于作此预测. 图 2 及图 3 中的虚线构成的圆表示忽略方向差异的衰减规律,圆面积与相应的椭圆相等,易见此即代表点源模型. 图 2 及图 3 中的双点划线表示断层破裂模型的衰减规律, $r$  为相应等震线椭圆的短轴. 与实测等震线相比可见,断层破裂模型大大地夸大了高烈度区. 表 2 给出了各模型的偏差或误差. 断层破裂模型的偏差用扩大的倍数  $A_1/A$  表示,  $A$  为实际等震线面积,  $A_1$  为按断层破裂模型估算的面积. 由表 2 知,断层破裂模型把炉霍地震的 10 度区扩大了 2.6 倍, 9 度区扩大了 1.2 倍;唐山地震把 11 度区扩大了 15 倍, 10 度区扩大了 4 倍等. 对点源模型,偏差用比值  $A_1/A$  表示,  $A_1$  为

表 1 炉霍地震和唐山地震

日期 (年.月.日)	地震位置	震级 $M_s$	破裂长度 (km)		
			据地表	余震区长轴	地震波
1973.2.6	炉霍	7.6	90	110	135
1976.7.28	唐山	7.8	8	145	115

1) 邢 军、时振梁,震源体与地震影响场,重大工程抗震问题学术讨论会文集,1—5,1985.

各烈度高估区与低估区的总面积。从表中可见,点源的偏差不算太大,即使象炉霍地震这样等震线极为狭长的震例,其偏差最大值也不过 1.20 (对 10 度区),即 60% 的地区由 8 或 9 度提高到 10 度,60% 的 10 度区被降到 8 或 9 度。

表 2 中同时给出了点椭圆模型的误差,  $A_1/A$  的意义与点源相同。与点源模型和断层破裂模型相比,点椭圆模型显然最接近实际,且其误差是随机的。

表 2 点源模型和断层破裂模型的偏差

地震位置	烈度	点 椭 圆				点源		断层破裂	
		半长轴 (km)	半短轴 (km)	面积 (km) <sup>2</sup>	随机误差 $A_1/A$	半径 (km)	偏差 $A_1/A$	面积 $A_f$ (km) <sup>2</sup>	偏差 $A_f/A$
炉霍	10	20.3	2.4	153	0.16	7.0	1.20	546	3.6
	9	34.0	5.1	545	0.14	13.2	1.02	1204	2.2
	8	47.2	12.2	1809	0.14	24.0	0.70	3152	1.7
	7	62.7	23.3	4590	0.12	38.2	0.50	6832	1.5
唐山	11	5.4	3.6	61	0.19	4.4	0.35	977	16
	10	18.0	7.9	447	0.50	11.9	0.42	2250	5.0
	9	34.7	19.8	2158	0.39	26.2	0.65	6380	3.0
	8	62.5	40.0	7854	0.16	50.0	0.37	15426	2.0
	7	117.0	80.0	29405	0.30	96.7	0.45	40906	1.4

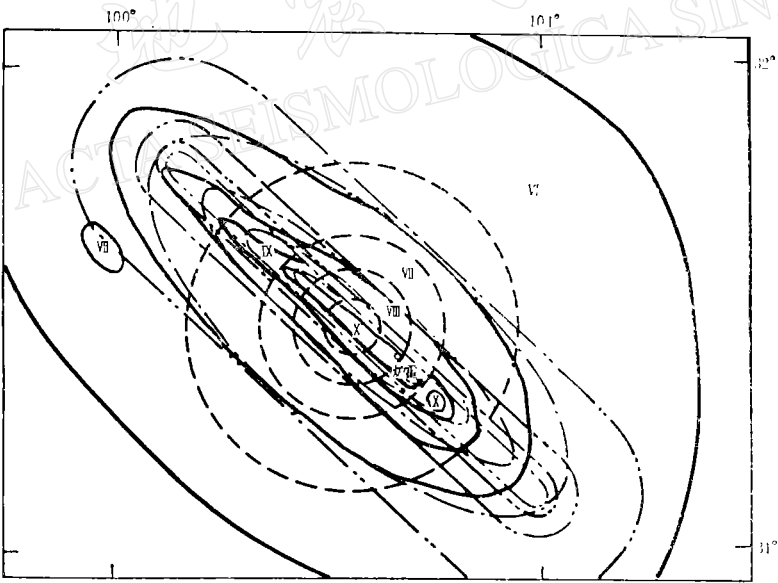


图 2 炉霍地震的等震线和断层破裂模型、点源及椭圆模型的衰减

3. 断层破裂模型低估危险性的问题

对五、六级的中强震,或大地震长轴方向的低烈度区,由于破裂长度能起的对等震线的“拉长”作用有限,用断层破裂模型作危险性分析可能出现低估危险性的偏差。

4. 关于断层破裂模型的修正形式

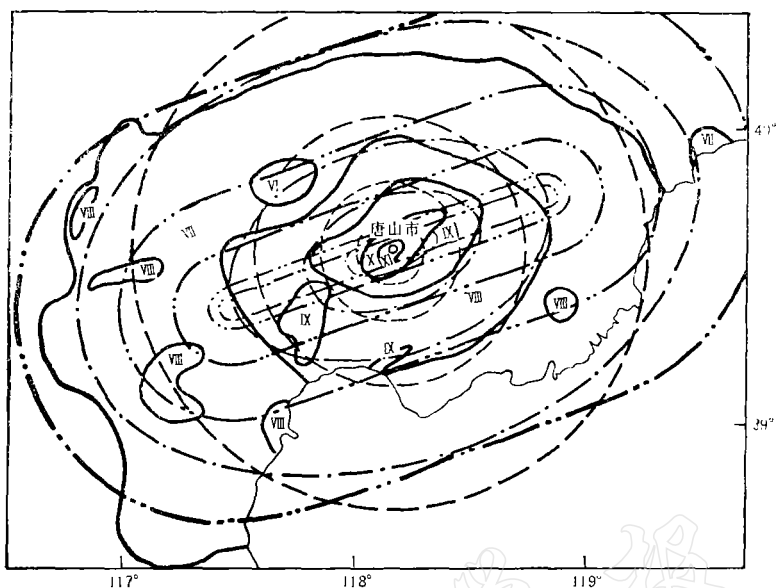


图3 唐山地震的等震线和断层破裂模型、点源及椭圆模型的衰减

在实际使用断层破裂模型时,有些研究者用其他“等效破裂长度”代替真正的破裂长度,这些等效破裂长度通常都以地表烈度为基础。限于篇幅,本文不再一一作比较,而仅指出:对一震例,在一固定的破裂长度的基础上结合断层距描述衰减,显然不如以可分别调节的长短轴双参数自由,即断层破裂模型限制了对于衰减的描述能力。

尚需指出的是,上述比较是对已知地震进行的,对未来地震,倘长轴无法预测,情况会有所变化。但若可统计得讨论地区等震线长轴的分布规律,对危险性分析的概率方法来说,上述结论不会有太大的变化。

### 三、经验点椭圆模型及其与断层破裂模型的算例比较

本文所谓危险性分析的模型,是指当潜在震源的各种特征参数确定之后,赖以给出其影响场(场地烈度或运动学参数)的方法。解决这一类问题,原则上可有理论和经验二种途径。经验方法的思路是总结该区域过去发生地震并产生影响场的规律以用于预测未来,此法一方面要从已有的震例中提取经验预测未来的潜在震源;另一方面要从该区域的烈度资料和强震记录资料中总结衰减规律。当未来潜在震源的特征确定后,用衰减规律作外推预测,可得场地的影响烈度或地震动参数。

经验模型的衰减规律一般可取潜在震源为坐标原点(点源),取形式

$$I = I_1(M, r, \theta) \quad (3)$$

式中  $r$  为震中距或震源距,  $\theta$  为方位角。如同极坐标可以描述任意平面图形一样,上述点源增加了方位角的模型有较强的能力表述一般衰减图象。应该强调指出的是,这里沿用了通常的“衰减规律”的说法。此概念用于此不仅不确切,而且很容易造成误解。实际上,这里所说的“衰减”不仅包括从震源到场地之间的介质的衰减作用,同时也包括了震源深

度、破裂长度、破裂速度等全部几何和物理参数的影响,其作用包括改变衰减快慢和等震线的形态,加大衰减公式的离散等。故使用(3)式建立模型作预测计算时,不应再次引进(3)式中尚未包含的震源参数,如深度、破裂长度等,否则,实际上相当于重复考虑了这些参数的作用。

按经验模型的思路,若震例资料足够充分,可以分别考虑震源深度  $h$  或破裂长度  $L$  等某些震源参数对衰减的影响,则应在建立衰减规律时引进这些参数,即

$$I = I_2(M, r, \theta, h, L), \quad (4)$$

而引用经验规律作预测时也应(4)式为依据。

断层破裂模型属于经验模型,但引进了部分理论假设,即从地震由断层引起,能量沿断层释放等理论性观念出发,假设烈度或地震动由震级和断层距决定。如假设与实际有较大的差别,在此假设的基础上,衰减公式已不能保持通常采用的“面积相等”的原则。即对指定烈度,断层破裂模型给出的等震线与实际等震线不仅形状不同,包含的面积也不相等,从而导致了较大的系统偏差。

应该指出,若将(2)式中的  $r$  当作短轴,则由于等震线短轴与断层距无明确的函数关系,而造成逻辑上的混乱。

若某区域中地震的等震线可用圆心和轴向不变的椭圆系列近似,则经验模型可具体化为经验点椭圆模型。此时的衰减规律为

$$I = F_1(M, R_A) \quad (5)$$

$$I = F_2(M, R_B) \quad (6)$$

式中  $R_A$  和  $R_B$  分别为椭圆形等震线的长轴和短轴,  $I$  为相应的烈度。限于篇幅,该模型将由另文介绍<sup>[6]</sup>,但这里我们将给出经验点椭圆模型和断层破裂模型的一个算例,以进一步讨论偏差问题。库内尔的点源模型仅能较好地适用于等震线无明显方向性差异的地区,可视为经验点椭圆模型的特例,此处不再讨论。

本算例以华北地区作背景,等震线长轴和短轴的衰减规律为

$$I = 1.5M - 1.1464 \ln R_A + 1.1397, \quad s = 0.68 \quad (7)$$

$$I = 1.5M - 1.3386 \ln R_B + 1.5822, \quad s = 0.63 \quad (8)$$

上二式中,

$$R_A = \sqrt{h^2 + d_A^2} \quad R_B = \sqrt{h^2 + d_B^2} \quad (9)$$

$d_A$  和  $d_B$  为相应等震线椭圆的半长轴,  $h$  相当于震源平均深度,这里取  $h = 10\text{km}$ ,  $s$  为标准差。震级破裂长度关系为:

$$\ln L = 1.1974M - 4.6052, \quad s = 0.14 \quad (10)$$

式中  $L$  是破裂长度,  $M$  为震级,  $s$  为标准差。

设有一长 200km、宽 100km 的矩形潜在震源,取  $\beta = 1$ , 按 8.5 级地震的年发生率为 1% 或推算得 4.75 级以上地震的年发生率为 0.425。据此,我们分别用断层破裂模型和经验点椭圆模型计算震源周围的影响场,若取 50 年超越概率为 10%, 则计算的结果表示于图 4 (由于对称,仅画出四分之一)。两者的比较列于表 3。上述结果已包括不确定性校正(包括衰减和断层破裂模型的震级破裂长度关系)。从图表可见,两模型的差别是明显

的. 断层破裂模型估算的烈度最高值达 10.4 度, 而椭圆模型最高值仅为 9.5 度. 对 8 度以上的地区, 断层破裂模型扩大了范围, 而对 7 度以下的地区, 断层破裂模型反而缩小了范围. 这里所做的定量比较与上文中直接从等震线所得的结论基本吻合.

表 3 表示断层破裂模型与经验点椭圆模型差别的算例

烈度(指大于或等于)	面 积 (km <sup>2</sup> )		比值 $s_f/s_e$
	据断层破裂模型 $s_f$	据经验点椭圆模型 $s_e$	
10	17000	0	/
9.5	28000	5600	5.0
9	46000	20000	2.3
8.5	63000	48000	1.3
8	90000	80000	1.1
7.5	160000	160000	1.0
7	300000	350000	0.86
6.5	550000	730000	0.75

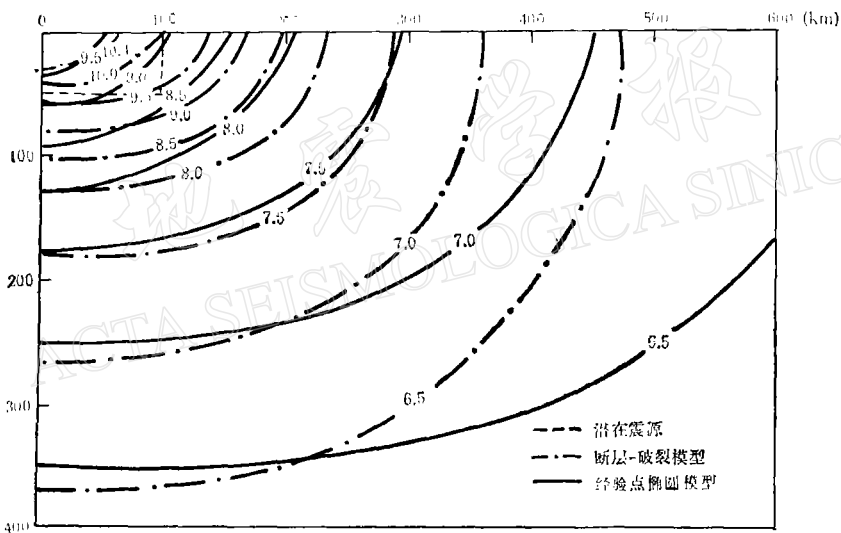


图 4 表示断层破裂模型和经验点椭圆模型烈度计算结果差别的数值算例

## 四、结 语

本文的研究表明, 危险性分析的模型本身可以对计算结果起一定的作用. 故对于危险性分析模型的研究应引起重视.

由于假设与实际有较大的出入, 断层破裂模型具较大的系统偏差. 对具高震级的潜在震源, 在断层方向或等震线长轴方向上, 它总是高估高烈度区的危险性而低估低烈度区的危险性. 我国常用等震线椭圆短轴代替断层距建立衰减公式, 此时已引起逻辑上的混乱.

在等震线具方向性差异, 大体可用椭圆近似的区域, 点源模型也具系统偏差, 即低估

椭圆长轴方向的危险性而高估短轴方向的危险性。此时,为克服系统偏差,可采用经验点椭圆模型。经验点椭圆模型逻辑上较严密。此外,由于避开了并非必需的“破裂长度”的概念,震级-破裂长度的不确定性也消除了。

笔者对廖振鹏老师的热情鼓励和指导表示衷心感谢。

### 参 考 文 献

- [1] Cornell, C. A., 1968. Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **58**, 1583—1606.
- [2] Der Kiureghian, A., and Ang, A. H-S., 1977. A fault rupture model for seismic risk analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **67**, 1173—1194.
- [3] 顾功叙, 1983. 中国地震目录(公元 1970—1979 年), 地震出版社。
- [4] 马宗晋、傅征祥、张郅珍、汪成民、张国民、刘德富, 1980. 1966—1976 年中国九大地震, 7—11, 地震出版社。
- [5] 国家地震局全国地震烈度区划图组, 1979, 中国地震等烈度线图集, 97—106, 地震出版社。
- [6] 沈建文、华宜平、邱 瑛、孔令磊, 地震危险性分析的经验点椭圆模型, 地震学报, 待发表。

## ON THE SYSTEMATIC DEVIATION OF SEISMIC INTENSITY ATTENUATION MODELS

SHEN JIANWEN AND HUA YIPING

(Seismological Bureau of Anhui Province)

### Abstract

In this paper, discussions are made on the widely applied intensity attenuation models of seismic hazard analysis: the point-source model introduced by Cornell, C. A. and the fault-rupture model given by Der Kiureghian and A. H-S. Ang. Comparisons with practical intensity data show that there is systematic deviation which isn't very large in the results given by point-source model for regions where isoseismals are of elongated shapes. To reduce the above deviation, the concept of rupture length is introduced into the fault-rupture model, but the attenuation is quite different from practical data. Comparisons with isoseismals of actual earthquakes and computation show that the results given by the fault-rupture model overestimate the attenuation in high-intensity area and underestimate it in low-intensity area along the directions of fault or the major axis of the isoseismals. The reason causing such systematic deviation in the fault-rupture model is analysed, and the rationality of the empirical ellipse model is discussed, with illustration by examples of seismic hazard analysis.