

汶川地震的6区域模型加速度峰值衰减关系

杨帆^a, 罗奇峰^b

(同济大学 a. 结构工程与防灾研究所; b. 上海防灾救灾研究所, 上海 200092)

摘要:利用加速度记录直接拟合衰减关系时,几乎所有现行文献都采用圆模型,以震中距或震源距为观测点坐标位置的唯一统计量。对于长断层的大震而言,等震线的圆模型假设和实际等震线图存在严重的偏差,为修正这种偏差,作者曾提出了4区域的椭圆模型,但是该模型忽略了断层长度垂直范围的2个区域,导致其等震线形状没有沿着断裂方向“发散开”的趋势。且不能反映破裂方向对短轴衰减的影响。该文提出的加速度衰减关系的6区域模型,通过过断层方向和过断层两端点且垂直于断层6条分割线,将地震记录观测点位置分为6个区域,通过研究沿分割线方向的衰减关系得到地震动衰减与衰减路径所处区域的相关性。以汶川8.0级地震为例,说明模型下的6条衰减关系,各自代表的物理意义以及汶川地震地震动峰值加速度衰减的区域特性。在拟合精度上,该模型较圆模型有大幅提高,比4区域椭圆模型略高,在反映地震动区域特性上,比4区域模型更加细致的反映了断层破裂方向效应和上下盘效应。

关键词:衰减关系;加速度峰值;圆模型;4区域椭圆模型;6区域模型

中图分类号:X43 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)05-0029-06

Fitting of Acceleration Peak Attenuation With Six-area Model for Wenchuan 8.0 Magnitude Earthquake

YANG Fan^a, LUO Qi-feng^b

(a. Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction;

b. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: At present, euqi-distance circle model is generally used for directly fitting acceleration peak attenuation. Epicenter distance or focal distance is the only coordinate statistical parameter of seismic station. For large earthquake with a long fault, the iso-seismical curve of euqi-distance exists serious deviation from realistic iso-seismal curve. Six-area model was addressed to correct the deviation. With the model, seismic station was divided into six areas by two cut lines of coincided with fault and four cut lines perpendicular to fault. The acceleration peak attenuation curve along cut lines was fitted to analyse the relationship between attenuation curve and area seismic station. Take Wenchuan earthquake for an instance, the accuracy of the model is much higher than that of euqi-distance circle model and a little higher than that of four-area elliptical model. And the model is more accurate than four-area elliptical model in reflecting hanging and foot wall effect and direction effect.

Key words: attenuation relationship; acceleration peak; round model; four-area elliptical model; six-area model

收稿日期:2010-03-10

基金项目:国家自然科学基金(50578125)

作者简介:杨帆(1981-),男,博士生,主要从事地震动输入研究,(E-mail)yangfan081422@163.com。

罗奇峰(联系人),男,教授,博士生导师,主要从事地震波理论研究及地震灾害评估研究,(E-mail)luo@tongji.edu.cn。

目前,在加速度峰值衰减关系研究中主要存在 2 种思路:1)从原因出发,通过研究震源机制和地震动传播过程与加速度峰值衰减的理论关系,得到由更多细化参数控制的衰减关系式。这类方法从研究地震过程本质出发,对提高地震传播及衰减理论具有很强的指导意义。但是,由于地震过程本身的复杂性导致各参数间的相关影响,该方法必需依托庞于大量、精细的地震数据。如美国的 NGA 项目^[2]下的 3 个工作团队得出衰减关系式^[3-7]所用到的地震波描述参数则多达 130 个,这在世界大部分地区是无法实现的,不便于地震动衰减关系的工程应用。2)以实际得到的加速度等震线出发,研究衰减关系。为简化计算,该类方法以控制等震线的大体形状来抓住影响衰减关系的主因。目前基本上都使用圆模型,它将等震线近似的看作同心圆,以震中距或震源距为加速度等震线在测点位置方面的唯一控制参数,然而对于长断裂的大震而言,圆模型的加速度等震线和实际等震线偏差很大,例如图 1^[8]中汶川 8 级地震的烈度等震线形状就和圆模型明显相悖。需要特别指出,图 1 给出的是烈度等震线,它与加速度等震线还有一定区别,但可以认为两者存在近似的线性关系,同时也必须认识到这种关系比较模糊。该文利用烈度等震线代替加速度等震线的基本依据已经在文献^[1]中详细阐述。鉴于圆模型的严重不足,在 4 区域椭圆模型的基础上提出了 6 区域模型,以便更加细致的刻画衰减关系的区域性特点。

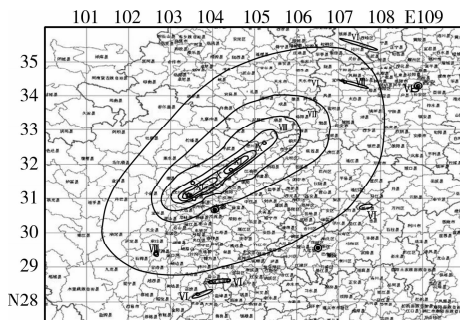


图 1 汶川地震烈度等值线图

1 4 区域椭圆衰减模型的不足

4 区域的椭圆模型以断层所在位置为长轴,以过断层中点并垂直于断层的方向为短轴,长短轴将整个观测区域分为 4 个部分。4 个区域物理意义分别为:沿破裂方向前端的上下盘和沿破裂反方向末端的上下盘。其加速度的等值线示意图见图 2,该方法忽略了断层长度垂直范围的 2 个区域,其等震线形状在断层长度垂直范围内没有沿着断裂方向“发散开”的

趋势,这导致前区椭圆看起来更加扁平,这与图 1 不符。由于破裂前端区域和末端区域共用短轴,短轴都是过断层中心,不能通过比较得到过断层不同位置处的短轴衰减关系来反映破裂方向对短轴衰减的影响。

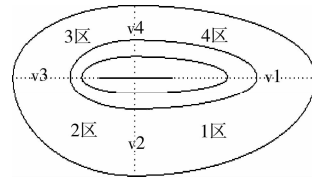


图 2 4 区域椭圆模型加速度峰值等值线示意图

2 6 区域衰减模型

由于 4 区域模型在等震线形状刻画和地震区域划分上的不足,该文采用下述划分方法:

以断层所在位置为长轴,以过断层 2 端点,且垂直与长轴的 2 条直线为短轴可以将等震线图分为 6 个基本区域。从图 1 可以看出:两端的 4 个区域曲线近似于椭圆,其形状由各自的长短轴控制。中间的 2 个区域曲线近似于直线。其形状由直线与断层 2 端点的断层距控制。

上述划分不仅在等震线图形上更加符合实际,而且所划分出的 6 个区域也具有明确的物理意义:断层垂直区域外,沿破裂方向前端的上下盘、断层垂直区域外,沿破裂反方向末端的上下盘以及断层垂直范围内的上下盘。

基于前文提到的烈度与加速度的线性关系,假设某几个值的加速度等震线(基准线)与烈度等震线形状相似,具体的控制指标是 2 种等值线在区域分割线方向上的截距相等,利用烈度等震线图量出这些截距,并由此作出加速度峰值的基准线。(图 3)基准线间的其他等值线通过某种差值规律假设转化为求解方程的方法求得,其具体步骤如下:

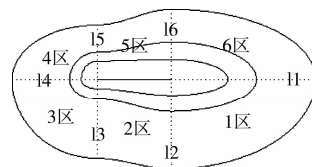


图 3 6 区域模型加速度峰值等值线示意图

1)以断层(图 3 中间实线)所在直线为长轴,以过断层端点且垂直长轴的 2 条直线为短轴。分割线与等震线的截距标识为 r_{ij} , i 为基准线标号, j 表示截取方向,取 $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。截距包含了两端 4 条椭圆线和中间段 2 条直线所需全部参数,可以由此

得到基准线。

2)对于 2 基准线 i 和 $i-1$ 间任意观测点的加速度等值线可由 2 条基准线差值算得。在理想状态下,2 条基准线间应由无穷条不相交的等值线覆盖,在任意测点位置都有唯一一条加速度峰值等值线经过。同时等值线的形状应渐变过渡直至与基准线重合。满足下列 2 个条件的等值线符合这些要求:①它们都由 4 段不同的椭圆曲线和 2 段直线组成;②等震线在坐标轴正负方向上的截距为:

$$l'_j(k) = r_{i,j} + (r_{i-1,j} - r_{i,j}) \cdot k \quad (1)$$

式中, k 为自变量, $0 < k < 1$ 。这样可以保证当 k 从 0 到 1 时,加速度等值线的 6 个截距相对均匀增长,并保证当 $k = 0, 1$ 时加速度等值线过渡为基准线形状。

如图 3,以基准线 i 和 $i-1$ 间的任意点 $h(x, y)$ 的等值线作法为例。判断其所在象限, $h(x, y)$ 在第 1 区时,以 $l'_1(k)$ 为长轴、 $l'_2(k)$ 为短轴在一区范围内作椭圆; $h(x, y)$ 在第 3 区时,以 $l'_4(k)$ 为长轴、 $l'_3(k)$ 为短轴在 3 区范围内作椭圆; $h(x, y)$ 在第 4 区时,以 $l'_4(k)$ 为长轴、 $l'_5(k)$ 为短轴在 4 区范围内作椭圆; $h(x, y)$ 在第 6 区时,以 $l'_1(k)$ 为长轴、 $l'_6(k)$ 为短轴在 6 区范围内作椭圆;将长短轴和 $h(x, y)$ 点坐标带入到椭圆方程中,通分化简可以得到关于 k 的一元 4 次方程:

$$k^4 + g_3 k^3 + g_2 k^2 + g_1 k + g_0 = 0 \quad (2)$$

式中 $g_3 = 2e_2/e_2$

$$g_2 = \frac{e_2^2 - x^2 - y^2 e_1^2}{e_1^2}$$

$$g_1 = \frac{-2e_2 y^2}{e_1}$$

$$g_0 = \frac{-e_2^2 y^2}{e_1^2}$$

$$e_1 = \frac{(r_{i-1,j_1} - r_{i,j_1})}{(r_{i-1,j_2} - r_{i,j_2})}$$

$$e_2 = \frac{(r_{i-1,j_2} - r_{i,j_2}) \times r_{i,j_1} - (r_{i-1,j_1} - r_{i,j_1}) \times r_{i,j_2}}{(r_{i-1,j_1} - r_{i,j_1})}$$

式中, j_1 取 2 个长轴即 ($j_1 = 1, 4$); j_2 取 4 个长轴即 ($j_2 = 2, 3, 5, 6$);其取值由 $h(x, y)$ 所在象限决定。

$h(x, y)$ 在第 2 区或第 5 区时, K 值直接由下式给出:

$$k = (y - k_1)/k_2 \quad (3)$$

式中,

$$k_1 = \frac{(r_{i,j_1} - r_{i,j_2})x + r_n(r_{i,j_1} + r_{i,j_2})}{2r_n}$$

$$k_2 = \frac{[(r_{i-1,j_2} - r_{i,j_2}) - (r_{i-1,j_1} + r_{i,j_1})]x/2r_n + [(r_{i-1,j_2} - r_{i,j_2}) - (r_{i-1,j_1} + r_{i,j_1})]/2}{2r_n}$$

式中, j_1 取 2 个长轴即 ($j_1 = 2, 6$); j_2 取 4 个长轴即 ($j_2 = 3, 4$),其取值由 $h(x, y)$ 所在象限决定。 r_n 为断层半长。

通过求解式 2 和式 3,得到任意位置点在 $(0, 1)$ 的范围内的唯一 k 值。将 k 代回到(1)式中即可求得等值线的 6 个截距。它是描述加速度等值线的完整参数,由其代替圆模型中的单一的震中距作为统计量进行拟合运算得到 6 个地震动加速度衰减关系。它们反映了 6 个区域中地震加速度衰减的基本特性。注意在求解方程式(2)时,应用一元 4 次方程的系数解^[9]可以大大简化计算,提高计算速度和精度。

3 汶川 8.0 级地震的加速度峰值衰减关系曲线

以汶川 8.0 级地震,四川、陕西、甘肃、青海、宁夏、云南、山西 7 省公布^[10]的 261 个土层加速度峰值记录为对象,拟合衰减关系曲线。

4 区域椭圆模型的计算方法和过程文中不再给出,直接引用文献[1]中的相关结论于表 2,以便于结论分析及对比。

对于圆模型采用衰减关系式为^[11-12]:

$$\ln y = a - b \ln(R + R_0) \quad (4)$$

式中 y 为地震加速度峰值, R 为震中距, R_0 为距离饱和因子,有: $R_0 = k_1 \exp(k_2 \cdot M)$, k_1, k_2 直接按文献^[13]结论取值,分别等于 0.39、0.623,算得 $R_0 = 57, a, b$ 为回归系数。

相应 6 区域椭圆模型各方向半轴的衰减关系式为:

$$\begin{aligned} \ln y &= a_1 - b_1 \ln(l_1 + R_1) \\ \ln y &= a_2 - b_2 \ln(l_2 + R_2) \\ \ln y &= a_3 - b_3 \ln(l_3 + R_3) \\ \ln y &= a_4 - b_4 \ln(l_4 + R_4) \\ \ln y &= a_5 - b_5 \ln(l_5 + R_5) \\ \ln y &= a_6 - b_6 \ln(l_6 + R_6) \end{aligned} \quad (5)$$

为保证震源体内加速度相等,采用联合椭圆模型^[14-15]类似的方法计算,给出联合的衰减关系曲线式(6)。式中 $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ 为 6 个方向上的距离饱和因子,作为回归参数,通过式(5)采用最小二乘法,循环回归取方差为最小时对应的值。 $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$ 为 6 个方向的半轴长,其值由式(1)、(2)、(3)求得,当其中任意一个按式(1)、(2)、(3)取值时,其它 5 个取为 0, (1)、(2)、(3)式中 $r_{i,j}$ 在图 1 中量出。 $a, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ 为回归系数。

通过(6)式,采用最小二乘法,求得回归系数后

各个方向的衰减关系由式(7)确定。

$$\begin{aligned} \ln y &= a - b_1 \ln(l_1 + R_1) - b_2 \ln(l_2 + R_2) - \\ & b_3 \ln(l_3 + R_3) - b_4 \ln(l_4 + R_4) - \\ & b_5 \ln(l_5 + R_5) - b_6 \ln(l_6 + R_6) \quad (6) \\ \ln y &= a - b_2 \ln(R_2) - b_3 \ln(R_3) - b_4 \ln(R_4) - \\ & b_5 \ln(R_5) - b_6 \ln(R_6) - b_1 \ln(l_1 + R_1) \\ \ln y &= a - b_1 \ln(R_1) - b_3 \ln(R_3) - b_4 \ln(R_4) - \\ & b_5 \ln(R_5) - b_6 \ln(R_6) - b_2 \ln(l_2 + R_2) \\ \ln y &= a - b_1 \ln(R_1) - b_2 \ln(R_2) - b_4 \ln(R_4) - \\ & b_5 \ln(R_5) - b_6 \ln(R_6) - b_3 \ln(l_3 + R_3) \\ \ln y &= a - b_1 \ln(R_1) - b_2 \ln(R_2) - b_3 \ln(R_3) - \\ & b_5 \ln(R_5) - b_6 \ln(R_6) - b_4 \ln(l_4 + R_4) \\ \ln y &= a - b_1 \ln(R_1) - b_2 \ln(R_2) - b_3 \ln(R_3) - \\ & b_4 \ln(R_4) - b_6 \ln(R_6) - b_5 \ln(l_5 + R_5) \\ \ln y &= a - b_1 \ln(R_1) - b_2 \ln(R_2) - b_3 \ln(R_3) - \\ & b_4 \ln(R_4) - b_5 \ln(R_5) - b_6 \ln(l_6 + R_6) \quad (7) \end{aligned}$$

通过观测点坐标和震中坐标计算出测点震中距 R , 代入关系式(4), 利用最小二乘法得到圆模型的汶川地震水平向和竖向衰减曲线图 4、5。拟合系数、饱和距离及拟合方差见表 1。

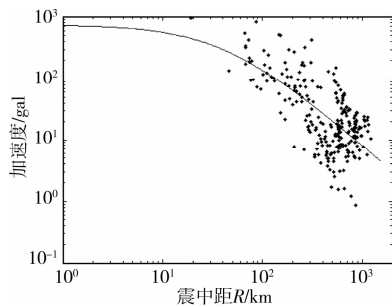


图 4 圆模型水平向加速度峰值衰减关系

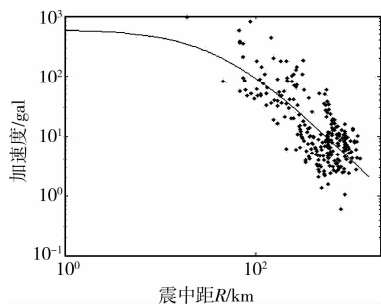


图 5 圆模型竖向加速度峰值衰减关系

通过式(1)、(2)、(3)得到观测点 4 个方向的半轴长 $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$ 代入(5)式, 通过循环回归得到饱和因子与方差关系图 6、7, 并取方差最小值为距离饱和因子。求得饱和因子后利用式(6)进行最小二乘拟合, 求得回归系数, 并带入式(7)求得 4 个

半轴向的最终衰减关系图 8。

表 1 6 区域模型的拟合系数

	R	a	b	b/R	$\sigma_{\ln y}^2$
水平向拟合系数及方差					
圆	57	12.06	1.43	0.025 0	0.930
l_1	145	20.22	2.66	0.018 3	
l_2	59	14.96	1.95	0.033 1	
l_3	46	14.01	1.83	0.039 8	0.475
l_4	35	12.98	1.68	0.048 0	
l_5	20	11.36	1.45	0.072 7	
l_6	35	12.99	1.68	0.048 1	
竖向拟合系数及方差					
圆	57	12.42	1.59	0.027	0.750
l_1	106	19.28	2.63	0.024 8	
l_2	36	13.68	1.86	0.051 7	
l_3	26	12.61	1.72	0.066 0	0.338
l_4	20	11.81	1.60	0.079 9	
l_5	12	10.56	1.43	0.119 1	
l_6	22	12.11	1.65	0.074 9	

表 2 4 区域椭圆模型的拟合系数

	R	a	b	b/R	$\sigma_{\ln y}^2$
水平向拟合系数及方差					
圆	57	12.06	1.43	0.025 0	0.930
v_1	103	17.99	2.33	0.022	
v_2	45	14.14	1.83	0.040	0.49
v_3	25	12.13	1.54	0.062	
v_4	47	14.37	1.87	0.040	
竖向拟合系数及方差					
v_1	73	17.35	2.35	0.032	
v_2	27	13.15	1.78	0.066	0.34
v_3	13	11.05	1.47	0.113	
v_4	28	13.32	1.81	0.065	

4 模型的对比及结论

观察图形可知, 利用圆模型按震中距统计的观测点(图 4、5)离散性较大, 在近场时, 该现象尤其明显; 利用模型按 6 个方向的半轴长统计得到的数据点(图 8、9)离散性小。从拟合方差上看, 表 1、2 中圆模型的水平向和竖向拟合关系式方差分别为 0.930、0.750; 4 区域椭圆模型方差为: 0.490、0.340; 该文模型的拟合关系式方差为 0.475、0.338。后 2 者方差都比圆模型减小了 1 倍左右。而

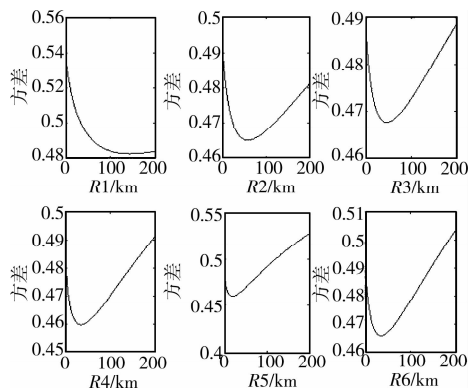


图 6 6 区域模型水平向距离饱和因子

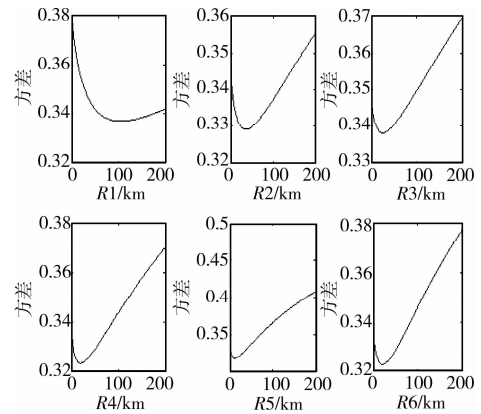


图 7 6 区域模型竖向距离饱和因子

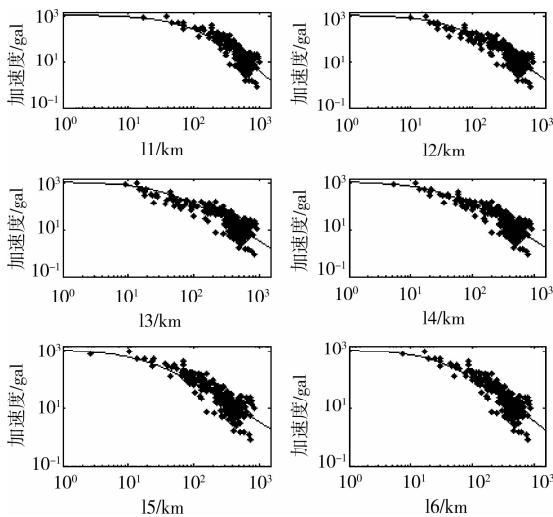


图 8 6 区域模型水平向衰减关系

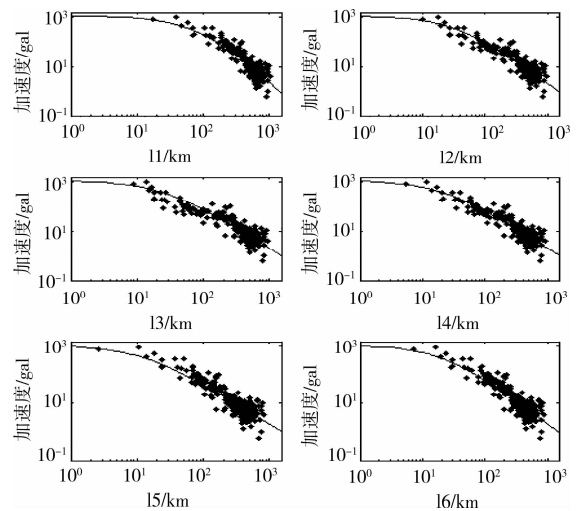


图 9 6 区域线模型竖向衰减关系

6 区域模型比 4 区域模型方差略小,这说明结果更加符合实际。

6 区域模型可以得到 6 条衰减关系,每相邻 2 条衰减关系代表了 1 个区域内加速度峰值衰减关系的上下限值。它可以反映破裂方向效应和上下盘效应。由衰减关系式 2 边对距离取导数可知,拟合系数 b 与震中饱和距离 R 之比是衡量近场衰减速度的关键。比值越小近场的衰减慢,反之亦然。该文称其为近场衰减速率系数。

从表 1 可以看出圆模型的近场衰减速率系数大小介于该文模型 6 个方向上的系数之间,可以认为圆模型是衰减速率在各方向的平均反应,对沿破裂方向的长轴 l_1 衰减明显高估,这种方法是危险的。

就长轴而言,4 区域椭圆模型与 6 区域得到的结论一致, l_1 和 l_4 方向, v_1 和 v_3 方向

的衰减关系各项拟合系数差别明显,从近场衰减速率系数上看,沿断层传播方向衰减慢,同时,它也是所有方向上衰减最慢的方向。

就短轴而言,2 种模型得到的结论有较大差别。

从表 2 中可以看出,对 4 区域椭圆模型, v_2 和 v_4 方向的衰减关系各项拟合系数以及近场衰减速率系数差别都很小,这 1 方面可能是由于汶川地震的倾滑成份较少引起的,同时还有另外一个原因:汶川地震的主断层在其长度中心处有一定距离的间断,由于间断距离与断层总长度相比很短,对间断处垂直范围以外的区域影响很小,才可以近似的将其看作一条连贯的断层。但是 4 段线模型的短轴经过了 this 间断区域,在这里并没有实际上的断层,所以在该处得到的短轴衰减关系上下盘效应不明显。另外,4 区域椭圆模型并不能体现破裂方向对短轴衰减关系的影响。

对于 6 区域模型, l_6 方向是过断层前 endpoint,沿下盘垂直于断层方向的传播方向, l_5 方向是过断层后 endpoint,沿下盘垂直于断层方向的传播方向,从表 1 中可以看出 l_6 衰减更慢,另外由于 l_6 和 l_5 的衰减关系存在差别,说明在区域 5 内的等值线与断层并不平行,除去断层距,观测点与断层的垂足在断层上所处的位置对短轴方向的地震衰减也有影响。研究 l_2

和 l_3 可以在上盘得到同样的结论。

l_6 和 l_2 的垂足均为断层前端,且也是垂直与断层方向,唯一的不同的是, l_6 沿下盘传播而 l_2 沿上盘传播,对比两者的近场衰减系数可知,在该断层位置,汶川地震上盘的近场衰减更慢,对比 l_3 和 l_5 可以得到相同结论。

对比在任意方向上的竖向近场衰减系数都比同方向上的水平向衰减系数大,即竖向衰减快。

参考文献:

- [1] 杨帆,罗奇峰.基于4区域椭圆模型的汶川8.0级地震加速度峰值衰减关系拟合[J].振动与冲击,2010,29(5):136-140.
YANG FAN,LUO QI-FENG. Wenchuan8.0 magnitude earthquake acceleration peak attenuation curve using four-area elliptical mode[J]. Journal of Vibration and Shock,2010,29(5):136-140.
- [2] 陶夏新,孙晓丹,陶正如.对新一代地震动衰减关系研究看法[C]//第七届全国地震工程学术会议论文集.2006.
- [3] ABRAHAMSON N A, YOUNGS R R. (1992). A stable algorithm for regression analyses using the random effects model Bull[J]. Seism. Soc. Am. 1992, 82; 505-510.
- [4] CAMPBELL K W, BOZORGNIA Y. Campbell-Bozorgnia next generation attenuation (NGA) relations for PGA, PGV and spectral acceleration; A progress report[C]//Proc. of the 8th U. S. National Conf on Earthquake Engineering (8NCEE), San Francisco, USA,2006.
- [5] CHIOU B, DARRAGH R, SILVA W. An overview of the NGA strong-motion dataset[C]//Abstracts of the Centennial Meeting of the Seismological Society of America, San Francisco,2006.
- [6] CHIOU B, R YOUNGS. PEER-NGA empirical ground motion model for horizontal spectral accelerations from earthquakes in active tectonic regions[C]//Abstracts of the Centennial Meeting of the Seismological Society of America, San Francisco, USA,2006.
- [7] POWER M, BCHIIOU N A, BRAHMSON, ROBLEE C. The "Next generation of ground motion attenuation models"(NGA) project[C]//An Overview, Proc. of the 8th U. S. National Conf. on Earthquake Engineering (8NCEE), San Francisco, USA,2006.
- [8] 地震工程与工程振动编辑委员会.汶川8.0级地震工程震害概览[M].北京:科学出版社,2008,10:15-20.
- [9] Laubenbacher R, Pengelley D. Mathematical Expeditions [M]. New York: Springer-Verlag Inc, 1999.
- [10] 中国地震局震害防御司.汶川8.0级地震未校正加速度记录[M].北京:地震出版社.2008.9.
- [11] CAMPBELL K W. 1981. Near 2 source attenuation of peak horizontal acceleration[J]. BSSA, 1981, 71(6): 2039-2074.
- [12] 雷建成,高孟潭,俞言详.四川及临区地震动衰减关系[J].地震学报,2007,29(5):500-511.
LEI JIAN-CHEN, GAO MENG-TAN, YU YAN-XIANG. Seismic motion attenuation relations in sichuan and adjacent areas[J]. Acta Seisologica Sinica, 2007, 29(5):500-511.
- [13] 黄慧华.近源地震动峰值加速度衰减关系影响因素分析[J].工程地质学报,1998,6(1):38-41.
HUANG HUI-HUA. Analysis of influence of factors on attenuation relation of near source ground motion peak acceleration[J]. Journal of Engineering Geology, 1998, 6(1):61-66.
- [14] Cornell C A. Engineer Seismic Risk Analysis[J]. BSSA, 1968, 58(5):1583-1606.
- [15] 姜慧.新疆地震烈度的椭圆衰减关系研究[J].高原地震,15(4):47-50.
JIANG HUI. Study on the elliptic attenuation of seismic intensity in xinjiang [J]. Earthquake Research In Plateau, 1993, 5(4)90:96.

(编辑 胡玲)