

考虑震源破裂方向的地震动衰减模型

刘汉兴 汪素云 时振梁

(国家地震局地球物理研究所)

摘 要

本文基于 Haskell 的 ω^3 源辐射谱模型,加上介质非弹性吸收项,几何扩散项和自由面放大效应,推演出峰值加速度和均方根加速度表达式。据此,建议一种考虑震源破裂方向的地震动衰减模型。用 Morgan Hill 和 Imperial Valley 两地震的峰值加速度资料,单震级统计分析结果表明,文中建议的地震动衰减模型是合理的。与 Joyner 和 Boore 所用的衰减模型相比较,剩余标准差可减少 0.1—0.2。本文所考虑的震源破裂的地震动衰减模型,可分别用于不同断层类型的地震,如单侧和双侧走滑型地震及倾滑型地震,分别建立地震动衰减关系,进行地震危险性分析。文章最后给出了美国西部考虑震源破裂方向的地震动峰值加速度和均方根加速度的衰减关系。

关键词 震源破裂方向;地震动衰减模型;方向性函数;地震动参数;空间分布形状

一、引 言

七十年代,美国西部 San Fernando 和 Imperial Valley 发生两次强震,取得了大批近场地震动记录,为用经验方法预测某一场地的地震动参数提供了基础资料。目前,地震危险性分析和工程抗震设计中的地震动衰减关系,大多采用地震动资料的经验回归分析得到。但统计分析结果对统计分析所用的强震记录的性质,如空间分布是否均匀的依赖性极强,导致不同地区或同一地区由不同地震的观测资料得到的经验地震动衰减关系千差万别,如美国西部据近二十年的强震观测资料得到的衰减公式就多达十几个 (Boore^[1]; Campbell^[2]; Scholl 和 King^[3])。影响地震动空间分布的因素包括震源,介质传播路径和局部场地条件,通常对后两因素考虑较多。只要介质性质给出,用土层地震反应可得到较精确的结果;在许多国家的抗震规范中,都对局部场地条件的影响作了规定。而多数作者把统计分析模型中的震源影响项用震级(或矩震级)表示,不考虑其他源特性对地震动参数空间分布的影响,如断层类型,震源破裂方向和破裂方式以及辐射振型等。从统计分析模型 II (见下文)可看出,对同一地震,当研究场地到震源区的距离给定时,场地条件相同的观测点地震动值也相同,这显然和强震观测结果不相符。

Benioff^[4] 最早在远震中长周期位移记录中观测到由于破裂传播方向引起的地震动辐射可以随方位角变化的现象,这一现象也称“地震的多普勒效应”。后来,McGuire 和

Hanks^[5], Archuleta^[6], Swenger 等^[7], Boatwright 和 Boore^[8] 和 Abrahamson 和 Darragh^[9] 分别从近场强地面运动记录中发现地震动峰值加速度的空间分布也和破裂方向有关。尽管造成方向性分布的因素很多, 但震源破裂方向的影响是不可忽视的。宏观烈度调查结果也表明, 断层破裂方向与烈度空间分布形状的长轴, 特别是内圈等震线长轴相一致, 这和加速度分布相似。

基于上述分析, 本文用 Haskell 的 ω^3 源辐射谱, 发展了一种考虑震源破裂方向的地震动衰减模型, 并用美国西部的强震记录资料检验了文中建议的衰减模型的合理性, 最后给出了美国西部的考虑震源破裂方向的峰值加速度和均方根加速度衰减关系。

二、地震动衰减方程的理论推导

Haskell^[10,11] 基于均匀位错时间函数的假设, 利用位错自相关函数与位移谱之间的关系, 导出了无限、均匀各向同性介质的远场位移谱, 相应的加速度谱可用下式表示^[12]

$$A(\omega) = \frac{cM_0\omega^2}{4\pi\rho\beta^3R} \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \right]^{-1} \quad (1)$$

式中 c 为常数, ω 为圆频率, R 为观测点到断层面上某一参考点的距离, ρ 为介质密度, β 为剪切波速度, M_0 为地震矩, ω_1 和 ω_2 分别为 Haskell 源谱的两个拐角频率。

根据 Savage^[13] 的结果, 有如下关系

$$\omega_1 = \frac{\beta K_L}{m^{-1} - \cos\theta}, \quad \omega_2 = K_T \quad (2)$$

其中 K_L 和 K_T 分别为 Haskell 模型的特征长度和特征时间, m 为破裂速度与剪切波速度之比, θ 为破裂传播方向与断层参考点(如仪器震中)和观测点连线间的夹角。

由 Faccioli^[14] 的假定, 有

$$K_T = \nu K_L, \quad \omega_1 = \frac{\omega_2}{\lambda} \quad (3)$$

式中 $\lambda = 1 - m\cos\theta$, ν 为破裂速度。

(1) 式乘上非弹性吸收项和自由放大因子 2, 得地表加速度幅值谱

$$A(\omega) = \frac{cM_0}{2\pi\rho\beta^3R} \exp\left(\frac{-\omega R}{2Q\beta}\right) \omega^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda\omega}{\omega_2} \right)^2 \right]^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \right]^{-1} \quad (4)$$

式中 Q 为品质因子, 其一般表达式为^[15]

$$Q(f) = Q_0 f^n \quad (5)$$

为简化计算, 理论推导中取 $n = 1$, 代入(4)式得

$$A(\omega) = \frac{cM_0}{2\pi\rho\beta^3} \cdot \frac{\exp(-qR)}{R} \cdot \omega^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda\omega}{\omega_2} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \right]^{-1} \quad (6)$$

其中 $q = \frac{\pi}{Q_0\beta}$, Q_0 相当于 $f = 1 \text{ Hz}$ 时的品质因子。

由均方根加速度定义并利用 Parseval 定理得

$$a_{\text{rms}} = \left(\frac{1}{Td} \int_0^{Td} a^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{\pi T d}} \left(\int_0^{\omega_{\max}} A^2(\omega) d\omega \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中 $\omega_{\max}$ 为源谱截止频率。

将(6)式代入(7)式,积分得

$$a_{rms} = \frac{c M_0}{2\pi \rho \beta^3} \cdot \frac{\exp(-qR)}{R} \left[\frac{\omega_0^2 f\left(\frac{\omega_{\max}}{\omega^2}\right)}{2\lambda(1-\lambda^2)^2 T d \cdot \pi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中 $f(x) = 2\text{tg}^{-1}(\lambda x) + (\lambda^3 - 3\lambda)\text{tg}^{-1}x + \lambda(1-\lambda^2)x(1+x^2)^{-1}$ 。

假定 $\left(\frac{\omega_{\max}}{\omega^2}\right)^2 \gg 1$, 简化(8)式得

$$a_{rms} = \frac{c M_0}{2\pi \rho \beta^3} \cdot \frac{\exp(-qR)}{R} \cdot \left(\frac{K_T^2}{T d}\right)^{\frac{1}{2}} \sqrt{D(\theta)} \left[1 + \frac{K_T d(\theta)}{\pi^2 f_{\max}} \right] \quad (9)$$

式中 $D(\theta) = \frac{\lambda + 2}{\lambda(1 + \lambda)^2}$, $d(\theta) = \frac{(\lambda + 1)^2}{\lambda(\lambda + 2)}$ 。

Haskell^[11] 和 Faccioli^[14] 分别根据理论和统计结果,得到 K_T 和地震矩之间的标定关系

$$K_T = K_0 \cdot M_0^{-\frac{1}{3}} \quad (10)$$

式中 K_0 为标定常数。

根据 Hanks 和 Kanamori^[16] 的矩震级标定

$$M_w = \frac{2}{3} \lg M_0 - 10.7 \quad (11)$$

将(10)和(11)两式代入(9)式,并利用

$$\frac{K_T \cdot d(\theta)}{\pi^2 \cdot f_{\max}} \ll 1 \quad (12)$$

的近似条件,两边取对数得

$$\begin{aligned} \ln a_{rms} = & c_0 + c_1 M_w + c_2 \ln R + c_3 R \\ & + c_4 \ln D(\theta) + c_5 e^{-d M_w} d(\theta) \end{aligned} \quad (13)$$

式中 c_i 为统计分析待定常数, $d = \frac{\ln 10}{2}$ 。

类似于 Faccioli^[14], 定义有效峰值加速度为

$$a_{\max} = a_{rms} |_{T d = 2\pi k T}^{-1} \quad (14)$$

同理可导出有效峰值加速度的衰减方程

$$\begin{aligned} \ln a_{\max} = & c_0 + c_1 M_w + c_2 \ln R + c_3 R \\ & + c_4 \ln D_1(\theta) + c_5 e^{-d M_w} d_1(\theta) \end{aligned} \quad (15)$$

式中两方向性函数分别取为

$$\begin{aligned} D_1(\theta) = & [1 - 0.91\lambda + 0.41\lambda^3 - 0.64 \text{tg}^{-1}\lambda] / \lambda(\lambda^2 - 1)^2 \\ d_1(\theta) = & [2\lambda^2 D_1(\theta)]^{-1} \end{aligned} \quad (16)$$

如果在统计分析中考虑场地影响项,并将(13)和(15)式统一表为

$$\ln a = c_0 + c_1 M_w + c_2 \ln R + c_3 R + c_4 \ln D(\theta) + c_5 e^{-d M_w} \cdot d(\theta) + c_6 S \quad (17)$$

式中 a 为有效峰值加速度 $a_{\max}$ 或均方根加速度 a_{rms} ，当方向性函数分别取 $D_1(\theta)$ 和 $d_1(\theta)$ 或 $D(\theta)$ 和 $d(\theta)$ 时。 s 为场地变量。

尽管工程抗震对峰值加速度感兴趣，但地震动时程为一非平稳的随机过程，很难从理论上定量估计峰值加速度。为此，在下文的统计分析中，峰值加速度的衰减方程将用有效峰值加速度的衰减方程替代。

为和以往的地震动衰减模型对比起见，文中还用了 Joyner 和 Boore^[17] 的衰减模型（圆模型），用于同一组资料的统计分析

$$\ln a = c_0 + c_1 M_w + c_2 \ln R + c_3 R + c_4 S \tag{18}$$

式中 a 为 $a_{\max}$ 或 a_{rms} ， $R = \sqrt{h^2 + D^2}$ ， D 为震中距或断层距， h 为震源深度， s 为场地变量。

三、统计分析资料的选取

断层类型对地震动空间分布的影响以走滑断层最为明显，且确定的震源破裂方向也相对可靠。文中选取了美国西部 11 个具有走滑断层活动类型的地震的地面水平峰值加速度和均方根加速度资料，用于检验考虑震源破裂方向的地震动衰减模型的合理性，并建立美国西部的地震动参数的衰减关系。这些地震的震源参数及地震动记录分布列于表 1。

表 1 用于回归分析的地震资料

地震名称	M_w	时 间 (月 日 年)	地震记录数	
			RMS	PGA
Parkfield, California	6.1	06-28-1966	4	4
Coyote Lake, California	5.8	08-06-1979	4	4
Santa Barbara, California	5.4	09-04-1981	1	1
Imperial Valley, California	7.0	05-19-1940	1	1
Borrego Mountain, California	6.6	04-09-1968	1	1
Imperial Valley, California	6.5	10-15-1979	25	48
I. V. aftershock, California	(5.0)	10-15-1979	16	16
Sitka, Alaska	7.7	07-10-1972	1	1
Livermore Valley, California	5.8	01-24-1981	9	23
Livermore Valley, California	5.5	01-27-1981	10	23
Morgan Hill, California	6.0	04-24-1984		66

注：括号中震级代表地方震级。

文中所用的强震记录数据基于以下原则选取

- (1) 被选取的地震，其矩震级或地方震级不小于 5.0，这是工程抗震应用中感兴趣的震级范围。
- (2) 地震动记录应为自由场地或室内地面的记录，以减少土结相互作用或特殊地形引起的地震动失真。
- (3) θ 角的选取。对单侧破裂的走滑型地震，以初始破裂点（即仪器震中）为参考点，

观测点到参考点的连线与破裂方向之间的夹角即为 θ ，且以断层线对称的两侧观测点具同一 θ 值。对双侧破裂的走滑型地震，也以仪器震中为参考点，视为方位角分别为 θ_1 和 θ_2 ，断层长度分别为 L_1 和 L_2 的两个单侧破裂（图 1）。我们可对同一观测点分别确定方向性函数 $D(\theta_1)$, $d(\theta_1)$ 和 $D(\theta_2)$, $d(\theta_2)$ ，并将 $L_1 \ln D(\theta_1) + L_2 \ln D(\theta_2)$ 和 $d(\theta_1)d(\theta_2)$ 称为双侧破裂地震的两方向性函数。但理论上这样选取 θ 角对近场并不成立，因为在近场条件下，断层并不能看成点源，断层上不同破裂段对场点的影响不一样。如何在近场条件下，考虑断层长度对地震动参数空间分布的影响还有待进一步研究。

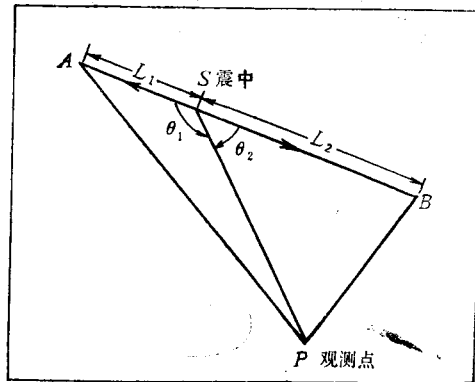


图 1 双侧破裂模型示意图

(4) 距离项的选取。最初，作者们常用震源距作为回归分析的距离项，以满足近距离峰值加速度饱和。但最近地震破裂动力学研究表明，高频地震动大小主要受距观测点最近的那部分地震辐射控制，观测点到断层的最近距离定义为断层距^[17,18]。实际上，发震断层是有限长的，上述定义的断层距低估了实际断层破裂对地震动幅值贡献最大的部分。本文采用另一种断层距定义，假定发震断层长度已知，如观测点到断层有垂直交点，就取这一垂直距离作为断层距取值；反之，则取观测点到断层破裂的两端点之一的最近距离作为断层距取值。下文将用震中距和断层距分别回归 Morgan Hill 和 Imperial valley 两地震的峰值加速度资料，并比较两者作为距离项的优缺点。

(5) 场地条件按 Campbell^[18] 分类法，分为土层和基岩两类。在统计分析中，当场地为基岩时，场地变量 (S) 取值为 0；而场地为土层时，取值为 1。

文中所用的均方根加速度除 Coyote Lake 地震外，皆取自 Kavazanjian 等^[19]的文章，其值按 Vanmarke 和 Lai^[20] 定义的地震动持时计算。

四、单震级统计分析结果

经验地震动衰减模型的好坏取决于两个因素：其一，地震动衰减模型本身的合理性；其二，检验模型的样本数多少及空间分布性质。以往大多数作者采用选择若干个地震的有限个地震动数据统计分析，这虽是震级外推所必需的，但往往将每一地震的不确定性叠加，导致总体剩余标准差的加大。为在模型检验中克服上述缺点，下面先用 Morgan Hill

和 Imperial Valley 地震的峰值水平加速度资料,用于(16)和(17)两式的统计分析,经验模型的待定系数用最小二乘法求得。以下简称(16)和(17)式为模型 I 和 II。理论推导可知, $\ln R$ 和 $\ln D(\theta)$ 的系数可分别取 1.0 和 0.5, 把 c_2 和 c_4 取定值的统计模型称为 I' 和 II'。衰减模型中的常数 h 和 m 在单震级回归中分别取震源参数反演结果, Morgan Hill 地震 $h = 8.2$ km, $m = 0.9^{[21]}$; Imperial valley 地震 $h = 10.5$ km, $m = 0.75^{[22]}$ 。表 2, 表 3 分别列出了两地震的 PGA 数据的统计分析结果。纵观两表可见,对 Morgan Hill 地震, I' 和 I 用震中距回归的系数较接近,断层距回归的系数也相差不大;而 Imperial Valley 则不同, I 和 I' 的系数相差较大,可能是本文所用的理论源模型和介质特性考虑得过于简单。因此,如何从经验地震动估计过渡到半经验估计,甚至地震动的理论估计,还有待于进一步研究。

表 2 Morgan Hill 地震的 PGA 回归结果

模型	C_0	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$\sigma \ln a$	距离项
I	8.206	-0.779	-0.0094	0.511	-249.6	0.0737	0.581	震中距
I'	8.815	-1.000	-0.0053	0.500	-239.4	0.0656	0.565	
II	7.543	-0.907	-0.0036			0.0261	0.794	
II'	7.813	-1.000	-0.0019			0.0225	0.785	
I	10.29	-1.638	0.0097	0.402	-251.9	0.0801	0.523	断层距
I'	8.842	-1.000	-0.0038	0.500	-343.5	0.0699	0.533	
II	10.17	-1.848	0.0113			0.0790	0.617	
II'	7.887	-1.000	-0.0074			0.0704	0.675	

表 3 Imperial Valley 地震的 PGA 回归结果

模型	C_0	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$\sigma \ln a$	距离项
I	7.050	-0.494	-0.0137	0.081	51.84	0.390	0.479	震中距
I'	8.833	-1.000	-0.0080	0.500	-162.4	0.400	0.253	
II	6.394	-0.226	-0.0157			0.482	0.539	
II'	8.736	-1.000	-0.0055			0.473	0.452	
I	7.974	-0.924	-0.0060	-0.071	60.45	0.256	0.367	断层距
I'	8.488	-1.000	-0.0044	0.500	-235.1	0.306	0.456	
II	8.104	-0.937	-0.0055			0.281	0.371	
II'	8.279	-1.000	-0.0044			0.268	0.349	

Imperial Valley 和 Morgan Hill 两地震的统计分析结果对比表明:

(1) Morgan Hill地震的场地影响项约为 Imperial Valley 的 $\frac{1}{5}$ 。也就是说, Morgan Hill 地震用经验模型预测的土层与基岩场地地震动幅值之比为 1.07; 而 Imperial Valley 则高达 1.5。这一差异可能是由两地震的震源特性差异以及场地条件差异的综合引起的。因为统计模型中震源对地震动影响项仅用震级表示,这就导致其它源参数对地震动的影响分配到场地条件项。

(2) 对比震中距和断层距统计分析结果,模型 I(I') 用断层距回归,剩余标准差可减少 0.1 左右;模型 II(II') 的剩余标准差减少比较明显,达 0.2 左右,这和 Joyner 和

Boore^[17] 和 Campbell^[18] 得到的结果类似。因此,单从剩余标准差而言,用断层距的回归效果比用震中距好。一般认为峰值加速度是由小区域的断层破裂引起的,高频峰值地震动受破裂前锋控制,破裂过程的突然加速或减速引起加速度值的突然增加,达到极值。但实际断层是极不均匀的,大小不同的 Barrier 随机地分布在整个断层面上,破裂前锋掠过的 Barrier 相继破裂构成大地震过程,小尺度的 Barrier 破裂产生较为丰富的高频地震动,从这一点讲,用目前的断层距很难度量高频地震动特性。实际上用断层距作距离项低估了距离项的影响,这在表 2 的统计分析结果中得到证实,非弹性系数项出现正值, Kavazanjian 等^[19]用断层距统计分析也得到类似的结果。Campbell^[26] 用三种经验方法估算美国东部 6.8 级大地震的近场地震动参数,用断层距模型得到的标准差比用震中距大。对给定大小的地震,地震动衰减关系本质上是描述地震动参数大小的空间分布。反过来说,用震中距或断层距作距离项,仅是基于不同的参考点描述地震动参数的空间分布。由断层距得到的地震动等值线为狭长的椭圆,这对于单侧走滑型和倾滑型地震是不合适的。且断层破裂长度误差较大,由此得到的断层距及地震危险性估计的不确定性也较大,而文中建议的衰减模型引入震中距和震源破裂方向这两个量描述地震动空间分布

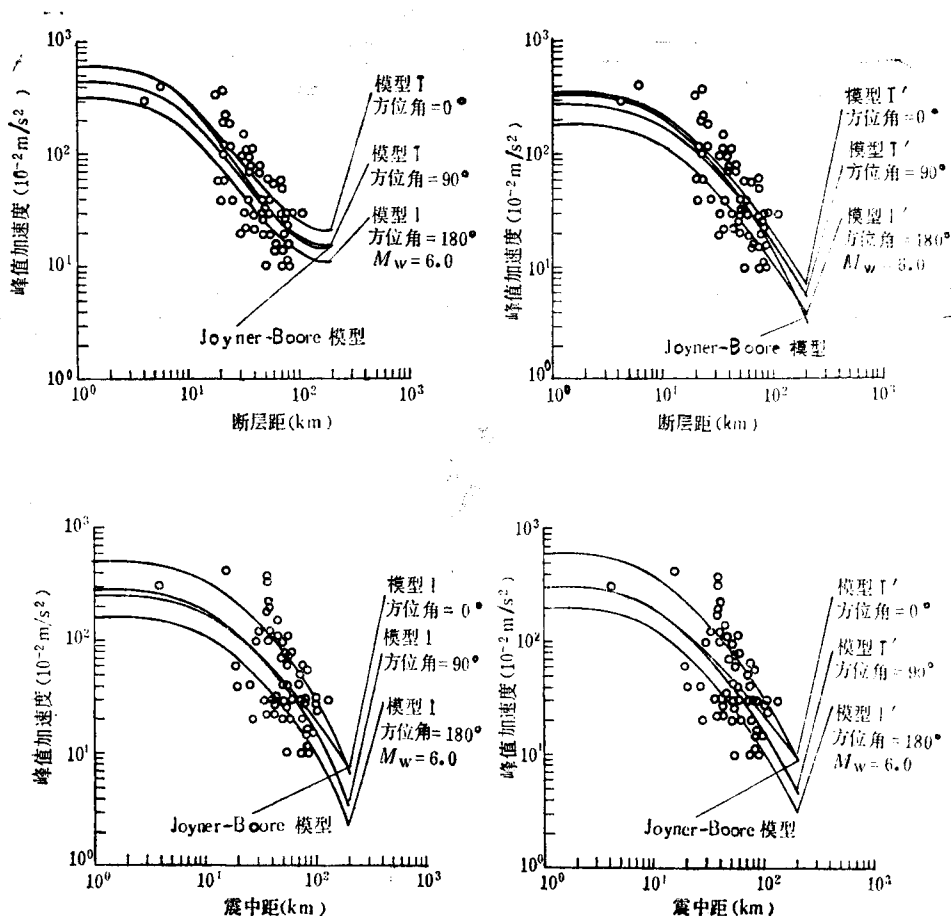


图 2 Morgan Hill 地震 PGA 衰减对比图

无疑可弥补这一缺陷。因此, 作者认为随着对地震动影响因素研究的逐步深入, 用断层距作距离项是否合适有待进一步研究。下文在建立美国西部的地震动衰减关系时将只采用震中距作距离项。

(3) 图 2, 图 3 分别为模型 I(I') 和 II(II') 与 Joyner 和 Boore 模型的衰减对比曲线, 场地条件皆为土层。下面简称 θ 取 0° , 90° 和 180° 的衰减曲线为曲线 1, 2 和 3, Joyner-Boore 的衰减曲线称为 J-B 曲线。很明显, Morgan Hill 地震的 J-B 曲线介于曲线 1 和 3 之间, 和曲线 2 很接近, 尾部衰减较曲线 2 慢; 而 Imperial Valley 地震的 J-B 曲线偏高, 几乎和曲线 1 相重。两地震对比结果的差异在于统计分析资料的空间分布性质不同, 这在 Morgan Hill 和 Imperial Valley 两地震的 PGA 数据离散图 (图 4) 中得到有力的证实。显而易见, Imperial valley 地震的数据主要集中在 $10-100$ km 和 $0^\circ-60^\circ$ 的范围内, 用 J-B 模型得到的结果主要反映小角度的地震动特性, 用这一经验公式预测其它场地的地震动参数, 结果将偏高; Morgan Hill 地震的峰值加速度资料则主要集中在 $0^\circ-60^\circ$ 和 $120^\circ-180^\circ$ 两区域内, 其综合结果等效于 90° 附近的影响。

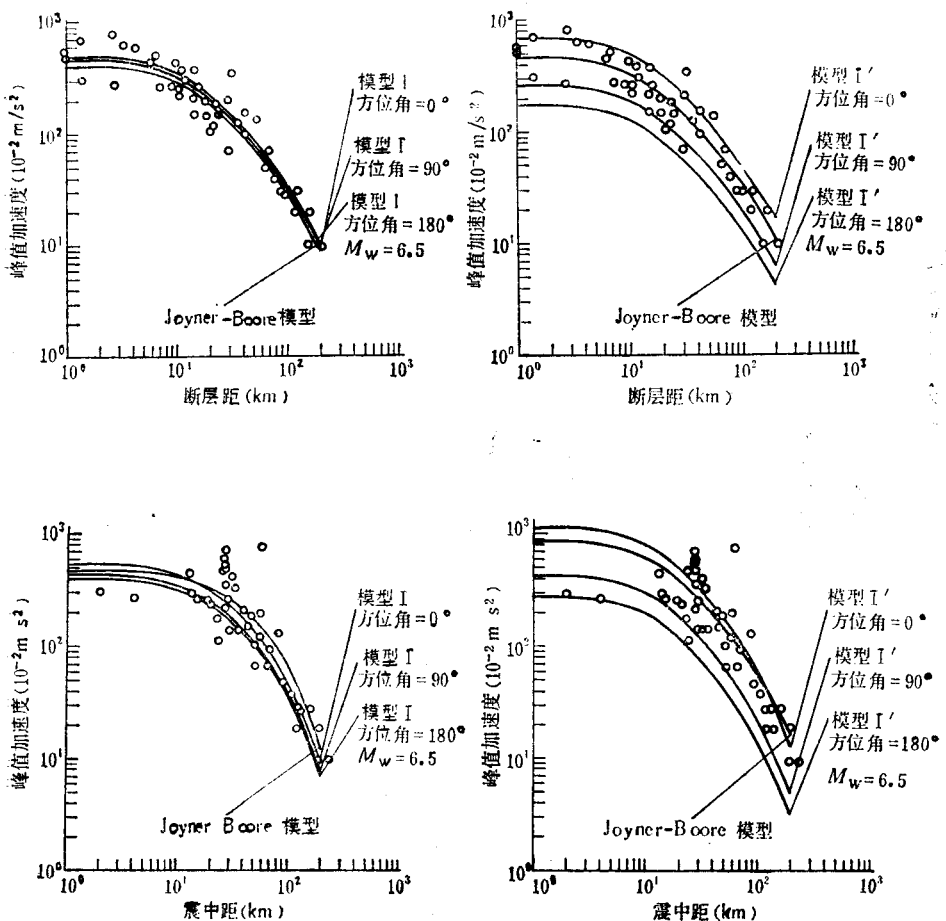


图 3 Imperial Valley 地震 PGA 衰减对比图

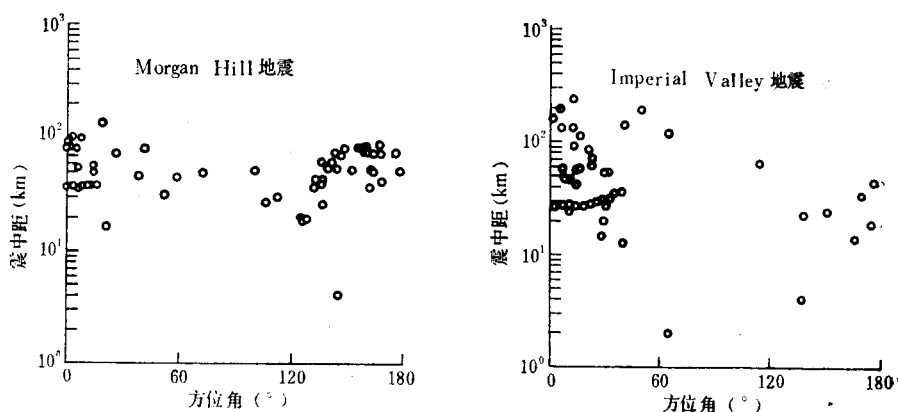


图4 用于建立衰减关系的 PGH 数据离散图

从对比曲线还可看出,对单侧走滑型地震,峰值加速度地震动参数的空间分布呈锥形。同一震中距,和破裂方向同向的地震动参数峰值最大,垂直向次之,反方向最小,曲线1和曲线3相差最大处达3倍。对双侧对称破裂走滑型地震,只要按上节所述,适当修改方向性函数,统计衰减模型同样适用。Upadhyay 和 Ahnja^[24] 用喜马拉雅山东部的地震动加速度记录,研究了震中区记录的加速度谱密度。结果表明,0°和180°的谱密度大于90°的值;180°的值小于0°的值,这和双侧不对称走滑型地震的模型的结果相符。

(4) 衰减模型的合理性。众所周知,经验地震动参数估计的关键在于衰减模型的合理性和评价回归系数的资料选取。衰减模型的合理与否可用剩余标准差和残差分布性质衡量。经验地震动参数估计的不确定性来源于影响地震动空间分布形状的各种构造区、源特性,不同记录数据的处理方法等的差异。对同一地震,构造和数据处理引起的不确定性可忽略不计。

图5为模型 I(I') 用震中距统计分析得到的残差随方位角的分布,这里定义残差为实际观测值与预测值之比。Weisberg^[25] 认为用残差分布随某一自变量的分布图,可判断模型中相应自变量项的假定是否合理,且要求数据随自变量均匀分布。但强震记录的空间分布大多是随机的,很难满足这一要求。如放松这一要求,单对现有数据的残差分布而言,残差分布基本上在0.5—2.0之间,看不出具某种趋向性分布。

检验模型合理性的另一标准是用观测资料统计分析得到的剩余标准差大小,这也是概率地震危险性分析方法中,作不确定性校正所必需的量。分析结果表明,单震级统计分析可大大减少不确定性。从表2,3可见, I(I') 比 II(II') 的剩余标准差减少了0.1—0.2。由此推断,本文所建议的地震动衰减模型是合理的,方程中增加的方向性函数和峰值或均方根地震动参数有关。反过来说,峰值加速度和均方根加速度等地震动参数空间分布形状的影响因素之一是震源破裂传播方向。此外,对同一组数据,统计分析剩余标准差的减少无疑提高了经验地震动预测方法的水平。以 Morgan Hill 地震用震中距统计分析得到的结果为例,如果预测的峰值加速度期望值为 1.00 m/s^2 。对模型 I, 标准差为0.581, 相应的预测值上限为1.79乘以 1.00 m/s^2 , 即 1.79 m/s^2 ; 而对模型 II, 标准差为

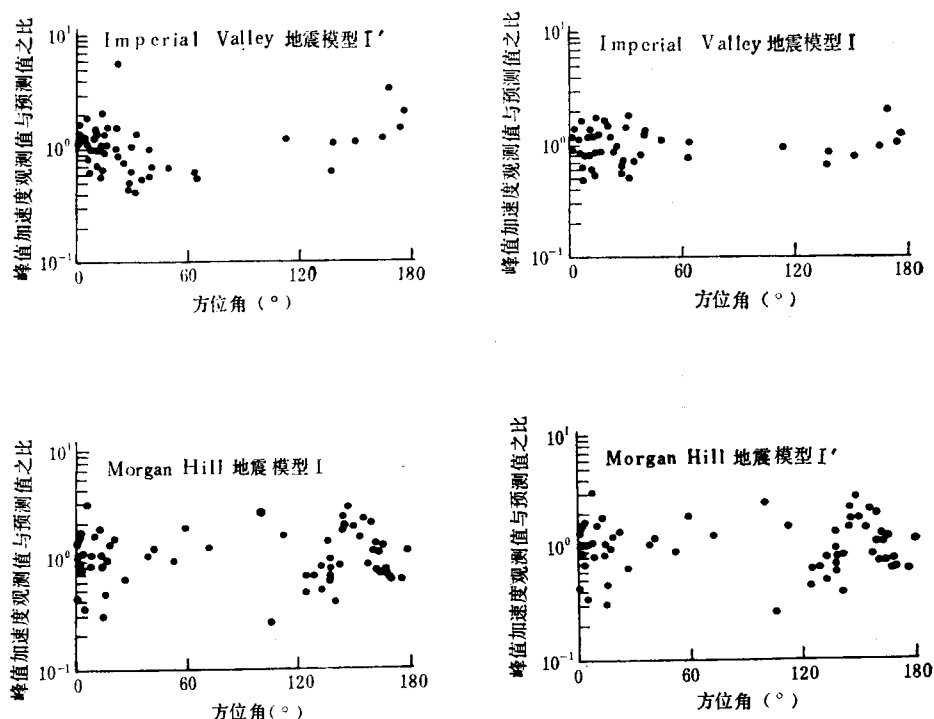


图5 Morgan Hill 和 Imperial Valley 地震的残差分布

0.794, 相应的预测值上限则为 2.22 m/s^2 , 两者相差达 0.50 m/s^2 .

综上所述,得到以下几点认识: 首先,震源破裂传播方向对地震动空间分布形状的影响是不可忽视的;其次,经验地震动参数对统计分析所用的数据的依赖性极强, Morgan Hill 和 Imperial Valley 两地震的对比结果清楚地表明了这一点,这也是经验地震动参数估计法的致命缺点;再者,用断层距作距离项统计分析时,远场区出现反向增加现象,这很难用地震学理论来解释。因此,用断层距作距离项研究地震动参数空间分布是否合理有待进一步探讨;最后,虽然本文衰减模型检验中所用的统计分析资料取自单侧走滑地震,但这一模型对其它断层类型的地震如双侧走滑型地震和倾滑型地震同样适用。Faccioli^[14] 曾研究了 San Fernando 地震的峰值加速度和均方根加速度的衰减特性,认为方向性影响是不可忽视的。从破裂动力学角度来说,只要发震断层沿某一方向错动,在破裂传播方向上就有地震辐射能的集中,导致该方向上的加速度值增大。但倾滑型地震的破裂传播方向不容易确定,如取值不当,会影响地震动衰减模型合理性检验的效果。

五、多震级统计分析结果

为预测不同震级的地震动空间分布,文中选取了美国西部的 10 个走滑断层活动类型的地震,分别有 74 个峰值和均方根加速度数据,统计分析中取参数 $h = 8.0 \text{ km}$, $m = 0.75$,这是多数作者所采用的平均值^[27]。表 4 为美国西部的地震动加速度数据用震中距

表 4 美国西部数据的回归结果

模型	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$\sigma \ln a$	距离项
I	2.529	0.622	-0.448	-0.0151	0.266	84.91	0.680	0.555	PCA
I'	5.884	0.329	-1.000	-0.0002	0.500	-2.535	0.689	0.363	震
II	3.180	0.381	-0.194	-0.0178			0.968	0.640	中
II'	5.066	0.377	-1.000	-0.0074			1.049	0.618	距
I	0.395	0.652	-0.119	-0.0277	0.283	78.29	0.600	0.574	RMS
I'	4.329	0.341	-1.000	-0.00009	0.500	-17.29	0.703	0.424	震
II	1.611	0.440	-0.067	-0.0251			0.831	0.665	中
II'	3.783	0.438	-1.000	0.0040			0.929	0.643	距

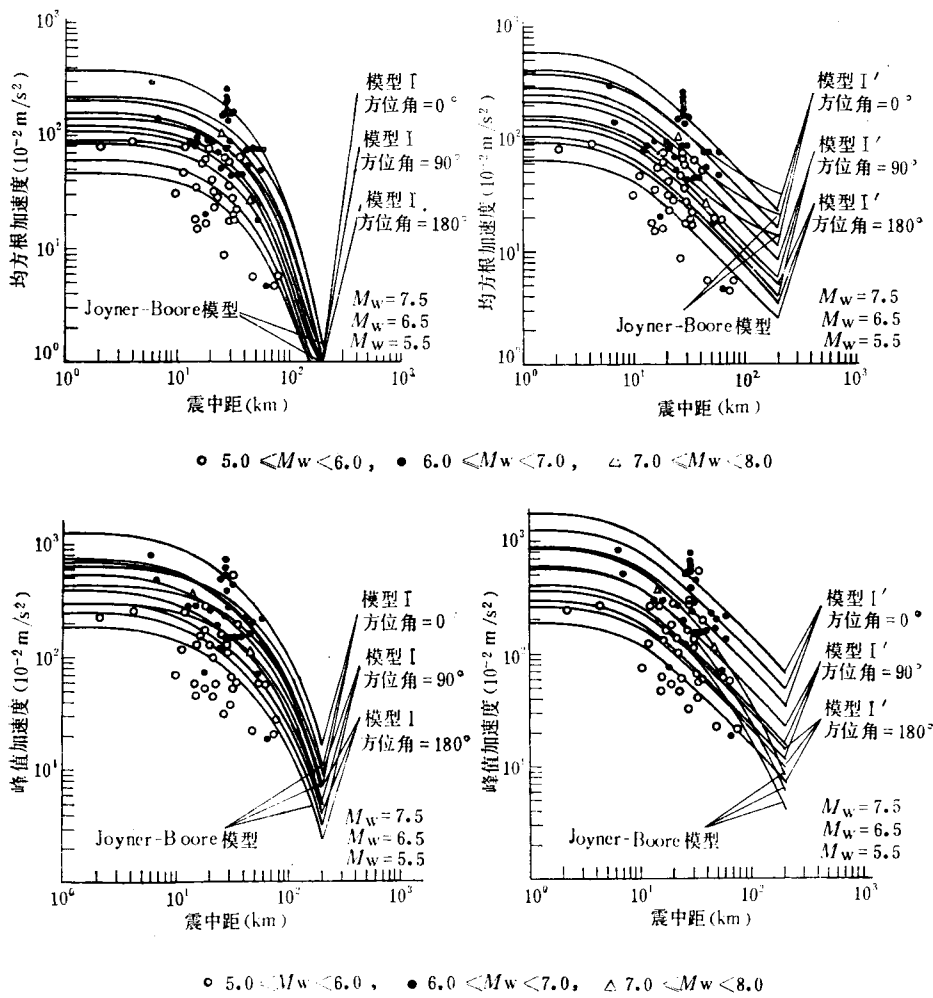


图 6 美国西部峰值和均方根加速度衰减对比图

回归的结果。图 8 为美国西部相应的给定方位的加速度大小随距离变化曲线对比图。在模型 I 中,均方根加速度的对数距离项系数 c_2 比 I' 的固定值小得多;在模型 I 中,峰值加

速度的非弹性吸收项系数 c_3 比 I' 的值大得多。从衰减曲线对比还可看出, 在模型 I 中, 当震中距超过 60 km 后, 地震动值主要由 c_3 项决定, 在 200 km 处其值约为 0.01 m/s^2 ; 而模型 I' 的衰减比 I 慢得多; 由此可见, 定系数模型 I' 与不定系数模型 I 哪一个合理还有待进一步研究, 可能是本文所用的源模型和介质模型过于简单, 造成定系数过于简化的缘故, 这需在理论地震动估计和半经验半理论地震动估计中进一步加以考虑。

残差分析表明, 文中建议的地震动衰减模型对多震级统计分析也是可行的。和常规地震动衰减模型相比, 考虑震源破裂方向的地震动衰减模型的剩余标准差可减少 0.1—0.2。统计分析所用的峰值加速度和均方根加速度资料的离散图表明 (图 9), J-B 曲线主要受 0° — 80° 的加速度资料区控制, 比破裂方向模型 $\theta = 90^\circ$ 的衰减曲线高。公式外推的适用范围见图 9。

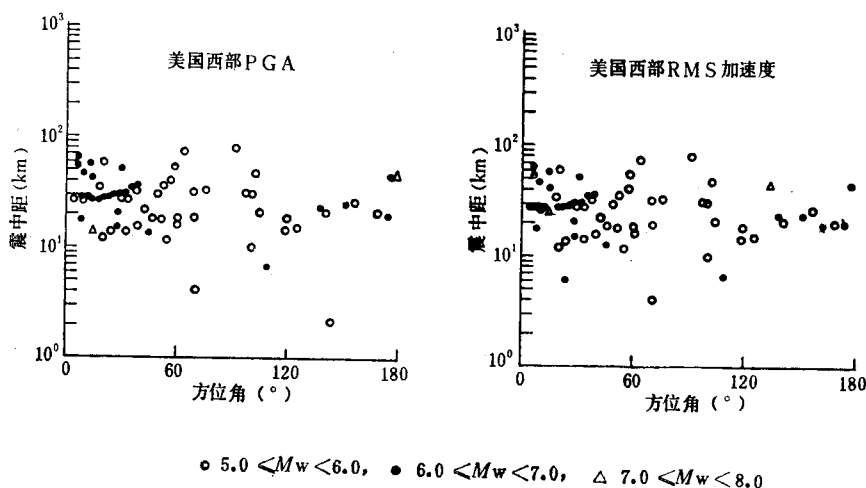


图 7 用于建立衰减关系的 PGA 和 RMS 数据离散图

六、讨 论

本文提出了一种考虑震源破裂方向的地震动衰减模型, 即在衰减方程中引入和震源破裂方向有关的方向性因子。这样对破裂性质已知的潜在震源区, 分别建立不同断层类型的地震动衰减关系, 采用不同的地震危险性分析方法。

概率地震危险性分析的本质是预测某一场地未来若干年内 (如 50 年), 某一量级的地震动超越概率。可见, 某一场地的地震危险性等于所有对这一场地有影响的潜在震源产生的危险性的总和。因此, 预测某一地震的地震动参数空间分布或影响场是地震危险性分析中的重要步骤。在以往的地震危险性分析模型中, 康纳尔的点源模型的地震动圆形空间分布相当于某一距离处各方位地震动值的平均; 而洪华生的断层破裂模型中, 把震中距改为断层距, 地震动衰减方程形式相同, 地震动空间分布呈窄长的椭圆形, 一般都高估了远区距发震断层较近的地震危险性。本文建议的破裂方向模型原则上可克服上述缺点, 对不同的潜在震源可分别建立一套相应的地震危险性分析方法, 如在华北地区用双侧

破裂的走滑型地震危险性分析方法。破裂方向模型用震中距和方位角描述单侧走滑和双侧走滑以及倾滑地震的地震动参数空间分布。在计算超越概率中,舍弃了不确定性较大的断层破裂长度与震级关系式,提高了预测地震动参数的水平,并克服了康纳尔模型中的地震动等距离圆形分布的不足。

文中还用 Morgan Hill 和 Imperial Valley 两地震的丰富的峰值加速度资料检验了破裂方向模型的合理性。单震级统计分析结果表明,常规地震动估计结果受统计分析资料的选取控制;对同一组数据,考虑震源破裂方向的地震动衰减模型,比 Joyner 和 Boore 模型的剩余标准差可减少 0.1—0.2。最后,文中选取了美国西部的 10 个走滑单侧地震的峰值加速度和均方根加速度资料,以本文建议的衰减形式给出了美国西部的加速度衰减关系。

参 考 文 献

- [1] Boore, D. M., 1983. Strong-motion seismology. *Rev. Geophys. and Space Phys.*, **21**, 1308—1318.
- [2] Campbell, K. W., 1985. Strong motion attenuation relations; Aten-year perspective. *Earthquake Spectra*, **1**, 759—804.
- [3] Scholl, R. E. and King, J. L., 1984. Proceedings of workshop on strong ground motion simulation and earthquake engineering application. A Technological Assessment, EERI, Berkeley, California.
- [4] Benioff, H., 1965. Mechanism and strain characteristics of the White Wolf as indicated by the aftershock sequence, Earthquake in Kern County, California during 1955. *Calif. Div. Mines Bull.*, **171**, 199—202.
- [5] McGuire, R. K., and Hanks, T. C., 1980. RMS accelerations and spectral amplitude of strong motion during the San Fernando, California earthquake. *Bull. Seism. Soc. Amer.* **70**, 1907—1919.
- [6] Archuleta, R. J., 1979. Rupture propagation effects in the Coyote Lake earthquake (abstract). *EOS. Trans. Am. Geophys. Union*, **60**, 890.
- [7] Swanger, H. J., Day, S. M., Murphy, J. R. and Guzman, R., 1981. State-of-Art study concerning near-field earthquake ground motion. U. S. Nuclear Reg. Comm. NUKEG/CR-1978.
- [8] Boatwright, J. and Boore, D. M., 1982. Analysis of the ground acceleration radiation by the 1980 Livermore Valley earthquake for directivity and dynamic source characteristics. *Bull. Seism. Soc. Amer.* **72**, 1843—1865.
- [9] Abrahamson, A. and Robert B. Darragh, 1985. The Morgan Hill earthquake of April 24, 1984—the 1.29g acceleration at Coyote Lake Dam: due to directivity, a double event, or both. *Earthquake Spectra*, **1**, 445—455.
- [10] Haskell, N. A., 1964. Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults. *Bull. Seism. Soc. Amer.* **54**, 1811—1842.
- [11] Haskell, N. A., 1966. Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults, 2, astatistical source model. *Bull. Seism. Soc. Amer.* **56**, 125—140.
- [12] Aki, K., 1967. Sealing law of seismic spectrum *J. Geophys. Res.*, **72**, 1217—1231.
- [13] Savage, T. C., 1972. Relation of corner frequency tto fault dimension. *J. Geophys. Res.* **77**, 3788—3795.
- [14] Faccioli, E., 1984. Measures of strong ground motion derived from a stochastic source model, Proceeding of the International School of Physics, Enrico Fermi, Earthquakes Observation, Theory and Interpretation.
- [15] K. Aki, 1980. Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.5—25 Hz. *Phys. Earth. Planet. Int.* **21**, 50—60.
- [16] Hanks, T. C. and Kanamori, H., 1979. A moment magnitude scale. *J. Geophys. Res.*, **84**, 2348—2350.
- [17] Joyner, W. B. and Boore, D. M., 1981. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial valley, California earthquake. *Bull. Seism. Soc. Amer.* **71**, 2011—2038.
- [18] Campbell, K. W., 1981. Near-field source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bull. Seism. Soc. Amer.* **71**, 2039—2070.
- [19] Kavazanjian, E., H. Echezuria and McCann, M. W., 1985. RMS acceleration hazard for San Francisco. *Soil. Dynam. Earthquake Eng.*, **4**, 106—123.

- [20] Vanmarke, E. H. and Lai, S. P., 1980. Strong motion duration and RMS amplitude of earthquake records. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **70**, 1293—1307.
- [21] Bolt, B. A., Uhrhammer, R. A. and Darragh, R. B., 1985. Morgan Hill earthquake of April 24, 1984—seismological aspects. *Earthquake Spectra*, **1**, 407—418.
- [22] Archuleta, R. J., 1984. A faulting model for the 1979 Imperial Valley earthquake. *J. Geophys. Res.*, **89**, 4559—4585.
- [23] Madariaga, R., 1983. High frequency radiation from the dynamic earthquake fault models. *Annales Geophysicae*, **1**, 17—23.
- [24] Upadhyay, S. K., and Annja, A. K., 1982. Azimuthal variation of acceleration spectral density near fault, *VII Symp. on Earthquake Eng.*, **1**, 89—92.
- [25] Weisberg, S., 1980. Applied linear regression, Wiley, New York, 283.
- [26] Campbell, K. W., 1986. An empirical estimate of near-source ground motion for a major mb: 6.8 earthquake in the Eastern United States. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **76**, 1—17.
- [27] Campillo, M. and Bouchon, M., 1983. A theoretical study of the radiation from small strike-slip earthquake at close distances. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **75**, 81—96.

A GROUND MOTION ATTENUATION MODEL DEPENDENT ON THE RUPTURE DIRECTION OF SEISMIC SOURCE

LIU HANXING, WANG SUYUN AND SHI ZHENLIANG

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

Abstract

In this paper, the expressions of peak ground motion acceleration and r. m. s acceleration have been derived, based on the Haskell's ω -cube radiated spectrum of source model, plus the terms of anelastic attenuation, geometrical spreading and enlargement factor of free surface. Then, a ground motion attenuation model dependent on the rupture direction of the seismic source from the expressions has been recommended. The formula is as the following:

$\ln(a) = C_0 + C_1 \times M_w + C_2 \times \ln R + C_3 \times R + C_4 \times \ln(D(\theta)) + C_5 \times d(\theta) + C_6 \times S$
Where a is a parameter of peak acceleration or RMS acceleration for the directivity functions of $D(\theta)$ and $d(\theta)$, respectively.

The results of uni-magnitude regressions indicated that the model proposed in this paper is more adequate than the equi-distance circle model, utilizing the acceleration data of the Morgan Hill and Imperial Valley earthquakes which abound with ground motion records. Standard deviations may be reduced by 0.1 to 0.2, comparing the model developed in this paper with the conventional attenuation model, for instance, the Joyner and Boore's model. The ground motion attenuation model dependent on rupture direction of seismic source developed in this paper may be applied to earthquakes with different patterns of faults, for example, to unilateral or bilateral strike-slip and dip-slip rupture and reverse rupture patterns. The inadequacy of the circle distribution of Cornell's point source model and the narrow-long ellipse distribution of fault rupture model with equi-distance also may be improved. Finally, The formulas of PGA and RMS accelerations attenuation dependent on the rupture direction of the seismic source are presented for the Western United States.