

92, 12(2) 地震动, 峰值, 参数, 衰减规律

1-11

地震动峰值参数衰减规律的研究

霍俊荣

胡聿贤

(国家地震局地球物理研究所)

P 315.4

提 要

震级和地震波传播途径均有测量误差和不确定性。本文考虑震级和距离的不确定性,用作者提出的回归多随机变量间相关关系的一致加权最小二乘法^[4,5,6],对地震动水平峰值加速度(PGA)、速度(PGV)和位移(PGD)的衰减关系进行了研究,在衰减模型中考虑了地震动的近场距离饱和与震级饱和特性。研究结果表明,考虑震级和距离的随机性后,地震动的距离与震级标定系数比常规方法增大16—28%,大震的地震动估计值及小震近场的地震动估计值均高于用常规方法得到的结果;高频地震动具有明显的近场距离与震级饱和特性,且距离饱和范围随震级的增大而加宽,场地条件对地震动衰减规律有明显影响,同时这一影响又同距离和震级密切相关。本文预测结果与新近发生的三大地震($M_s = 8.1, 7.8, 7.1$)的观测资料很吻合。

一、前 言

在过去几十年中,人们提出了很多地面运动衰减的经验关系式,这些关系式在数据相对集中的中等震级和中等距离区域均可确定出与实测资料相吻合的结果,但在采样数据范围之外的外推结果却极为分散,相差很大。主要原因之一是衰减模型形式对外推功能有重要影响,另一个主要原因则是统计分析中回归原则的影响,即选择哪些变量为随机量。前者是人所共知的,但后者还没有引起众多研究者的重视。本文将对这两个问题进行专门研究,并给出典型结果。

衰减关系数学表达式的选择取决于参数间的物理关系。如果取用的数据能代表集合中相对均匀分布的子集,只是在采样数据范围内预测函数值,则选用简单的经验关系式就能满足要求。但是,若用这种经验关系外推到很少或缺乏数据的参数域时,衰减模型的合理选择就变得极为重要。

通常,地震动衰减关系的一般形式为

$$Y = b_0 \cdot f_1(R) \cdot f_2(M, R) \cdot f_3(M) \cdot f_4(P_s) \cdot \epsilon \quad (1)$$

式中 Y 为所研究的地震动参数,如峰值加速度(PGA)、速度(PGV)、位移(PGD)、反应谱等, ϵ 为预测 Y 值时体现不确定性的随机误差, M 和 R 分别为震级和距离。函数 $f_2(M, R)$ 和 $f_1(R)$ 分别表示地震波几何扩散造成的衰减效应和介质对地震波的能量吸收及波本身的散射造成的

非弹性衰减效应; $f_3(M)$ 为震级标定函数,反映震源释放能量大小对地震动的影响; $f_4(P_i)$ 则综合反映地震类型、场地条件等因素的影响。

上述衰减模式的繁简优劣应该同可用的数据量及其分布情况一并考虑,从而选定适当的形式,甚至可事先根据物理机制指定部分系数的数值。

二、震级和距离的随机性分析

研究某一场地的地震动衰减特征时,用于描述震源和地震波传播过程的震级 M 和距离 R 是两个最基本的参数,它们提供了最直接的地震环境信息。取得记录后,人们总是习惯于把 M 和 R 当作精确测定的参数处理,根本不考虑其中的不确定性。然而事实上,除了地震动参数具有很大的不确定性之外,地震学中确定 M 和 R 时也带有很大的不确定性,这对地震区划和结构抗震设计的可靠性有重要影响。

1. 震级的不确定性

震级一般定义为:

$$M = \lg[F(A, T)] + f(\Delta, h) + C_s + C_r \quad (2)$$

式中 A 和 T 分别为地面运动位移幅值及相应的地震波周期, Δ 为震中距, h 为震源深度, C_s 和 C_r 分别为台址和区域校正系数。函数 $F(A, T)$ 根据不同类型震级有不同形式,如 A 和 A/T ; $f(\Delta, h)$ 为震级起算函数,通常由经验和理论综合确定,对距离效应(包括几何扩散和能量吸收)和震源深度效应进行校正,它还视不同类型波或同一种波的不同分量而有所不同。无论哪种震级的确定,地震波测量、离散化和计算过程中均存在不确定性,使震级计算结果带有一定范围的误差。著名地震学家 Bath 曾指出^[1],在最好的情况下,可以预期计算的震级存在 0.2—0.3 级的误差。而实际上各地震台网间震级测定的偏差可多达 0.5 级。作者认为,造成误差的原因至少有以下几个:

(1)地震波最大位移幅值同其它地震动参数(如加速度)一样,因受到介质和震源中许多随机因素的影响而具有随机性,既然认为加速度等是离散性很大的随机量,就不能不认为震级 M 也有随机性;

(2)目前运行的地震台多用窄带地震仪进行记录,这样的记录只能反映地震波能量谱中某一频段的能量变化,这个频段并不一定是对所研究地震动参数 Y 起控制作用的频带,而地震释能的频谱分布又呈多样化。地震愈大,长周期成分愈多,但短周期成分并非成比例增多。单用某给定有限带宽地震波确定的震级 M 无法反映其它频段决定的地震动特性;

(3)式(2)中起算函数 $f(\Delta, h)$ 是一种经验性的简化处理,忽视了方位和地区特性,其本身就有偏差,由此计算的震级必将产生不确定性。由于各地区的 $f(\Delta, h)$ 不尽相同,不同周期地震波在介质中的衰减也不相同,而 $f(\Delta, h)$ 却不能反映这些差异,故硬性预报全球统一震级必然存在离散性;

(4)不同地震台网使用的地震仪特性不同,仪器校正和台址校正均存在不确定性;

(5)历史地震的震级是从震中烈度或其它方式推算的,这会带有很大的不确定性。

上述这些影响说明,震级 M 不但具有随机性,而且远不能正确反映震源释放能量的谱特

性,这种以一个常数值代替形状可变的谱曲线,当然会增加其不确定性。

2. 传播途径的不确定性

由于地壳内部构造的复杂性,地震波在到达地表的传播过程中,经历过许多次反射和折射,波中的不同部分走过了不同的曲折而迂回的途径,简单地用震源到观测点的直线距离表达这一过程,显然不能真实反映地震波在传播过程中所受的影响。另外,作为距离计算起点的震源位置的测定误差可达几公里至十几公里,震源并不是一个点,而是占有一定面积或体积的平面或空间,地震能量从震源体的每一个部位向四周传播,不论是从初始破裂点、能量释放中心或是某一其它点或某一条断层线算起,都不能反映地震波传播的真实距离。这一影响对工程上关心的几公里至几十公里的近场是不可忽视的。来自不同研究者的资料,由于对距离定义的不同(如震中距、能中距、震源距、断层距等),也会给数学分析过程造成不确定性。

三、多随机变量的回归分析模型

从数理统计的观点出发,常规最小二乘法要求关系式中所有自变量 x 均为可控制的确定性变量,在指定自变量值之后测取具有随机特性的函数变量 y ,回归原则要求函数变量的随机误差在统计意义上最小,即 $\sum (\Delta y_i)^2$ 最小。但是,在研究地震动衰减关系时,地震动参数 Y 与 M 、 R 均为具有不确定性的随机变量,这时常规方法所得结果不能真实体现 Y 、 M 、 R 三随机量之间的相关关系。此外,在现行地震危险性分析中还需要衰减关系 $Y(M, R)$ 的反函数 $R(M, Y)$,它是由 $\sum (\Delta Y)^2$ 最小原则确定关系式 $Y(M, R)$ 后,再求其反函数 $R(M, Y)$ 而定出的。然而,对于同一组数据,它与用常规方法按 R 的统计误差最小,即 $\sum (\Delta R)^2$ 最小求得的结果有很大差别。究其原因,上述两种处理方法实际上都不合理,因为它们各自只考虑了三个随机变量中一个的不确定性。

根据作者提出的多随机变量回归分析的一致加权最小二乘法^[4,5,6],对于由 m 个随机变量 $y_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 和 l 个确定性变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, l)$ 所构成的关系式:

$$A + \sum_{i=1}^m B_i y_i + \sum_{i=1}^l C_i x_i = 0 \quad (3)$$

回归原则要求所有随机变量 y_i 的归一化回归残差平方和综合最小,即

$$J = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m W_i (\Delta Y_{ik})^2 = \min \quad (4)$$

其中 ΔY_{ik} 为随机变量 y_i 在第 k 个样本点处的归一化回归残差。归一化的目的在于使参与最小二乘的变量同量纲化或无量纲化,并确保归一化后变量数值的量级相近,以免小数量级变量的作用在式(4)中求和时被大数量级变量淹没。 W_i 为体现 y_i 随机性大小的加权因子。当 y_i 为确定性变量时, W_i 自动变为零,从而不参与最小二乘计算。传统最小二乘法只是式(4)的一个特例。可以简单证明,对于二维情况,多随机变量回归原则式(4)在 $W_1 = W_2$ 的特殊情况下与距离平方和最小原则等价。此外,式(4)确定的结果不受回归关系式中函数变量选择的影响,无论选取哪个变量作函数,或无论是用函数形式本身还是其反函数形式进行回归分析,结果总是唯一的。故此方法称为多随机变量的一致加权最小二乘法。

由式(4)确定的回归系数的正则方程为多元高次方程组,对于超过三个随机变量的情况,求解正则方程组将十分繁琐。但作者提出的求解多随机变量回归方程的直接迭代法^[5]可以方便有效地解决这个问题。

四、衰减关系物理模型

地震动衰减关系式一般形如式(1),其中各项均有明确的物理含义。应用中不同研究者根据各自问题的特点采用不同形式,有的简单,有的复杂。由于工程抗震主要考虑近场(100—200 公里)范围,式(1)中非弹性衰减项 $f_1(R)$ 对衰减规律的影响远小于几何扩散项。例如,用图 1 中这两组典型数据由常规方法回归求得两种不同形式的结果分别为:

$$\lg(PGA) = 1.932 + 0.3006M - 1.107\lg(R + 14) - 0.0013R \quad (5)$$

$$\lg(PGA) = 2.155 + 0.2975M - 1.296\lg(R + 14) \quad (6)$$

比较式(5)、(6)可知,式(6)的几何衰减快于式(5),这是由于非弹性衰减效应被包含在几何扩散效应中。若保持式(6)中几何扩散系数不变,将 $f_1(R)$ 加入该式中重新回归,可得

$$\lg(PGA) = 2.199 + 0.3012M - 1.296\lg(R + 14) - 0.00019R \quad (6a)$$

由此可见,非弹性衰减系数是一个很小的量。因此,在工程抗震所关心的近场范围内,用近场资料拟合衰减关系时, $f_1(R)$ 的作用不明显,单由 $f_2(M, R)$ 一项就能很好地拟合这一范围内数据的衰减趋势。从工程角度出发,衰减项常常只用几何扩散一项综合反映,本文也是如此。

众所周知,地震动在近场存在饱和特征,但如何在衰减模型中既合理又简便地处理仍无定论。绝大多数研究者常不考虑高频地震动的震级饱和,只用一个常数因子 R_0 考虑地震动的近场距离饱和。这样虽然简单,但对于近场高频地震动的估计却与实测资料相差较大,大震级时偏大,小震级时偏小,如图 3 中模型 I 的结果所示。因此引入饱和项是必要的。另一方面,如果不采用与震级相关的近场距离饱和因子,则与大小地震相应的衰减曲线均相互平行,无法区别大震级时近、远场饱和特性的差异和不同震级近场饱和范围的不同。因为大地震的震源体积大,在震源体的地表投影范围或震中区内,地震动衰减缓慢;小地震则相反,其地震波衰减明显地快,如图 3 中模型 II 和 III 所示。所以近场距离饱和因子 R_0 应取为震级的函数。综上所述,本文中衰减模型取为:

$$\lg[Y(M, R)] = C_1 + C_2M + C_3M^2 + C_4\lg(R - R_0(M)) \quad (7)$$

$$R_0(M) = C_5\exp(C_6M) \quad (8)$$

式中系数 $C_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 由回归分析确定。若 C_3 和 C_6 取为零,式(7)便退化为常用的模型。

五、考虑 M 和 R 随机性的衰减关系

本文用于回归分析的地震资料见表 1,震级和距离分布范围见图 1。这里距离定义为断层投影距,震级采用下式定义:

表 1 本文采用的地震的有关资料

序号	地震名称	发震时间	M_L	M_s	台站数目	
					土层	基岩
1	IMPERIAL VALLEY	MAY 18, 1940	6.7	7.1	1	0
2	NORTHWEST CAL IFORNIA	OCT 07, 1951	5.8	6.0	1	0
3	KERN COUNTY, CAL IFORNIA	JUL 21, 1952	7.2	7.4	5	0
4	EUREKA	DEC 21, 1954	6.5	6.6	1	0
5	SAN JOSE	SEP 04, 1955	5.8	5.5	2	0
6	EL ALAMO, BAJA CAL IFORNIA	FEB 09, 1956	6.8		1	0
7	SAN FRANCISCO	MAR 22, 1957	5.3		4	1
8	HOLLISTER	APR 08, 1961	5.7	5.6	2	0
9	BORREGO MOUNTAIN	APR 08, 1968	6.4	6.7	13	1
10	LONG BEACH	MAR 10, 1933	6.3	6.5	1	1
11	LOWER CAL IFORNIA	DEC 30, 1934	6.5	6.7	1	0
12	HELENA, MONTANA	OCT 31, 1935	6.0		1	0
13	1ST NORTHWEST CAL IFORNIA	SEP 11, 1938	5.5		1	0
14	2ND NORTHWEST CAL IFORNIA	FEB 09, 1941	6.4	6.6	1	0
15	WESTERN WASHINGTON	APR 13, 1949	7.1		2	0
16	NORTHERN CAL IFORNIA	SEP 22, 1952	5.5		1	0
17	WHEELER RIDGE, CAL IFORNIA	JAN 12, 1954	5.9		1	0
18	PUGET SOUND, WASHINGTON	APR 29, 1965	6.5		2	0
19	PARKFIELD, CAL IFORNIA	JUN 27, 1966	5.6	6.0	4	2
20	SECOND NORTHERN CAL IFORNIA	DEC 10, 1967	5.8		2	0
21	SAN FERNANDO	FEB 09, 1971	6.4	6.6	80	14
22	BORREGO VALLEY	OCT 21, 1942	6.5		1	0
23	LOWER CAL IFORNIA	NOV 12, 1954	6.3	6.7	1	0
24	GULF OF CAL IFORNIA	AUG 7, 1966	6.3		1	0
25	EUREKA	JULY 6, 1934	5.7		1	0
26	HELENA MOUNTAIN	NOV 28, 1935	5.0		1	0
27	HUMBOLDT BAY	FEB 6, 1937	5.8		1	0
28	SANTA BARBARA	JUN 30, 1941	5.9		1	0
29	NORTHERN CAL IFORNIA	OCT 3, 1941	6.4		1	0
30	NORTHERN CAL IFORNIA	MAR 9, 1949	5.3		1	0
31	CENTRAL CAL IFORNIA	APR 25, 1954	5.3		1	0
32	NORTHERN CAL IFORNIA	JUN 5, 1960	6.0	5.7	1	0
33	NORTHERN CAL IFORNIA	DEC 18, 1967	5.2		1	0
34	TORRANCE-GARDENA	NOV 14, 1941	5.4		1	0
35	SOUTHERN CAL IFORNIA	NOV 21, 1952	5.5	6.2	0	1
36	NORTHERN CAL IFORNIA	SEP 12, 1966	6.3	6.4	1	0
37	LYTLE CREEK	SEP 12, 1970	5.4		5	1
38	COYOTE LAKE	AUG 06, 1979	5.6	5.9	10	2
39	IMPERIAL VALLEY	OCT 15, 1979	6.6	6.9	37	2
40	COALINGA	MAY 02, 1983	6.2	6.5	38	9
41	MORGAN HILL	APR 24, 1984	6.1	6.2	60	4

$$M = \begin{cases} M_s & (\text{当 } M \geq 6) \\ M_L \text{ 或 } m_s & (\text{当 } M < 6) \end{cases} \quad (9)$$

每个记录台站采用两个水平分量参与回归分析,这样会更充分体现地震动的随机变化特性。目

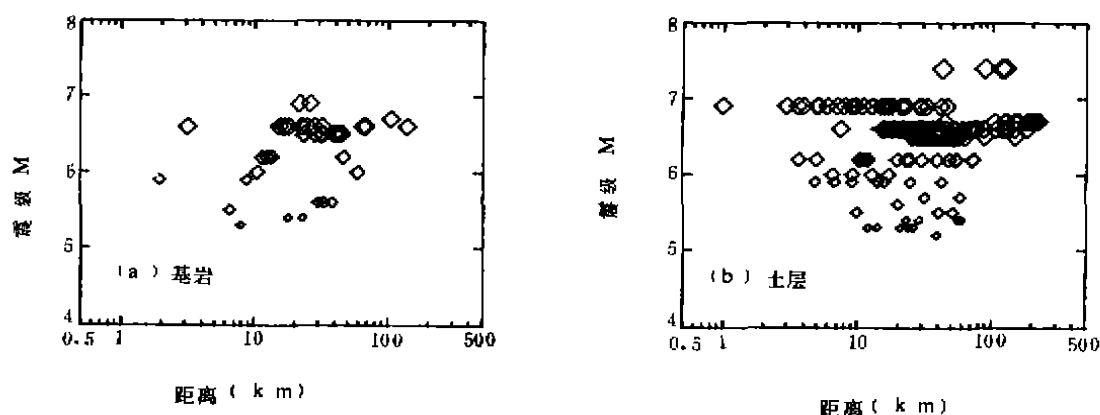


图1 震级-距离分布图

前所获强震记录中大部分集中于中等震级和中等距离范围内(参见图1),从统计学角度看,由于样本分布极不均匀,会造成统计结果的不稳定,样本集合边缘处的预测值的置信度降低,难以向数据稀少的大震级、近距离外推。为此,本文对现有资料进行加权处理,其原则是确保权系数之和在 M - R 平面内均匀分布,这样数据的权系数就取决于每个 M 、 R 分档内数据量的多少。此处震级分档为: $M < 5.5$, $5.5-5.9$, $6.0-6.4$, $6.5-6.9$, $7.0-7.4$, ≥ 7.5 。距离分档为: $R < 3$, $3-9.9$, $10-29.9$, $30-59.9$, $60-99.9$, $100-299.9$, ≥ 300 公里。对含有数据的各分档区间 $[\Delta M_i, \Delta R_j]$ 赋予等权,而每个区间内各数据具有等权 $1/n_{ij}$, n_{ij} 为 $[\Delta M_i, \Delta R_j]$ 内数据的总和。最后再进行标准化处理,使权系数总和等于样本总数,确保统计自由度不变。

先选用表1中距离分布范围较广而震级大小不等的地震的加速度资料进行两步回归分析,求得震级相关的距离饱和因子

$$R_0(M) = \begin{cases} 0.3268 \exp(0.6135M) & R_0 \text{ 单独为随机量} \\ 0.1818 \exp(0.7072M) & R_0 \text{ 与 } M \text{ 为随机量} \end{cases} \quad (10)$$

再由回归原则式(4)从全部资料回归确定式(7)表示的衰减关系。回归时视地震动参数 Y 和 M 、 R 为随机不确定性程度相近的随机变量,相应式(4)中加权因子 W_i 取为相同值。此外,为了便于比较,根据式(7)中部分参数的取舍,将其进一步分为下述三个模型:

$$\text{I: } y = C_1 + C_2 M + C_4 \lg[R + C_5] \quad (11a)$$

$$\text{II: } y = C_1 + C_2 M + C_4 \lg[R + C_5 \exp(C_6 M)] \quad (11b)$$

$$\text{III: } y = C_1 + C_2 M + C_3 M^2 + C_4 \lg[R + C_5 \exp(C_6 M)] \quad (11c)$$

其中 y 为 $\lg(Y)$ 。各种情况的结果汇总于表2中,相应部分衰减曲线绘于图2及图3中。

表 2 衰减关系回归结果

$$\lg(Y) = C_1 + C_2 M + C_3 M^2 + C_4 \lg(R + C_5 \exp(C_6 M)) + \epsilon$$

参 数	场 地	模 型	随 机 变 量	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	σ_i
加 速 度 (Gal)	基 岩	I	1	2.1630	0.4389	—	-1.8430	14	—	0.1812
			3	1.4640	0.5890	—	-1.9990	14	—	0.1931
		II	1	0.6430	0.7000	—	-1.9050	0.3268	0.6135	0.1901
			3	0.0650	0.8290	—	-2.0490	0.1818	0.7072	0.1893
		III	1	-0.9350	1.2410	-0.0460	-1.9040	0.3268	0.6135	0.1802
			3	-1.8220	1.4480	-0.0520	-2.0180	0.1818	0.7072	0.1868
	土 层	I	1	1.9600	0.3167	—	-1.2160	14	—	0.2143
			3	1.0580	0.5103	—	-1.4270	14	—	0.2319
		II	1	1.4280	0.4770	—	-1.4910	0.3268	0.6135	0.2104
			3	0.6010	0.6630	—	-1.7220	0.1818	0.7072	0.2263
		III	1	0.5260	0.7650	-0.0230	-1.4880	0.3268	0.6135	0.2100
			3	-1.1640	1.2030	-0.0440	-1.6500	0.1818	0.7072	0.2242
速 度 (cm/s)	基 岩	I	1	-0.0457	0.5818	—	-1.7290	14	—	0.2571
			3	-0.6924	0.7352	—	-1.9300	14	—	0.2747
		II	1	-1.4480	0.8241	—	-1.7940	0.3268	0.6135	0.2582
			3	-2.1550	0.9841	—	-1.9810	0.1818	0.7072	0.2697
		III	1	-4.4720	1.8460	-0.0855	-1.7940	0.3268	0.6135	0.2552
			3	-5.0450	1.9820	-0.0865	-1.9460	0.1818	0.7072	0.2629
	土 层	I	1	-0.0253	0.4829	—	-1.2350	14	—	0.2015
			3	-0.6394	0.6339	—	-1.4540	14	—	0.2144
		II	1	-0.6193	0.6136	—	-1.3570	0.3268	0.6135	0.2011
			3	-1.1760	0.7736	—	-1.6350	0.1818	0.7072	0.2111
		III	1	-3.6890	1.5780	-0.0764	-1.3300	0.3268	0.6135	0.1986
			3	-3.9140	1.6520	-0.0742	-1.5070	0.1818	0.7072	0.2055
位 移 (cm)	基 岩	I	1	-0.4464	0.4834	—	-1.4190	14	—	0.3140
			3	-1.4310	0.7280	—	-1.7690	14	—	0.3488
		II	1	-1.5790	0.6728	—	-1.4470	0.3268	0.6135	0.3178
			3	-2.6030	0.9199	—	-1.7790	0.1818	0.7072	0.3450
	土 层	I	1	-1.5320	0.6113	—	-1.0840	14	—	0.2873
			3	-2.2620	0.8166	—	-1.4080	14	—	0.3070
		II	1	-2.0600	0.7212	—	-1.1680	0.3268	0.6135	0.2896
			3	-2.6690	0.9342	—	-1.6030	0.1818	0.7072	0.3101
烈 度	I	I	1	3.5240	1.0470	—	-2.5590	10	—	0.7023
			3	1.7340	1.5410	—	-3.3750	10	—	0.8063

六、结 果 分 析

1. 考虑多随机变量的衰减关系特性

不同衰减关系模型的结果(表 2)均表明,考虑了 M 和 R 的随机性后,衰减关系 $Y(M, R)$ 中震级和距离标定系数 C_2 和 C_4 分别比常规回归结果大约增大 28% 和 16%。常规方法低估大震地震动值,如图 2 所示。对于回归方差,新回归原则在三个变量方向的方差综合最小,而常规方法只在某一个变量方向方差最小,但另两个变量方向却很大,如表 3 所示。

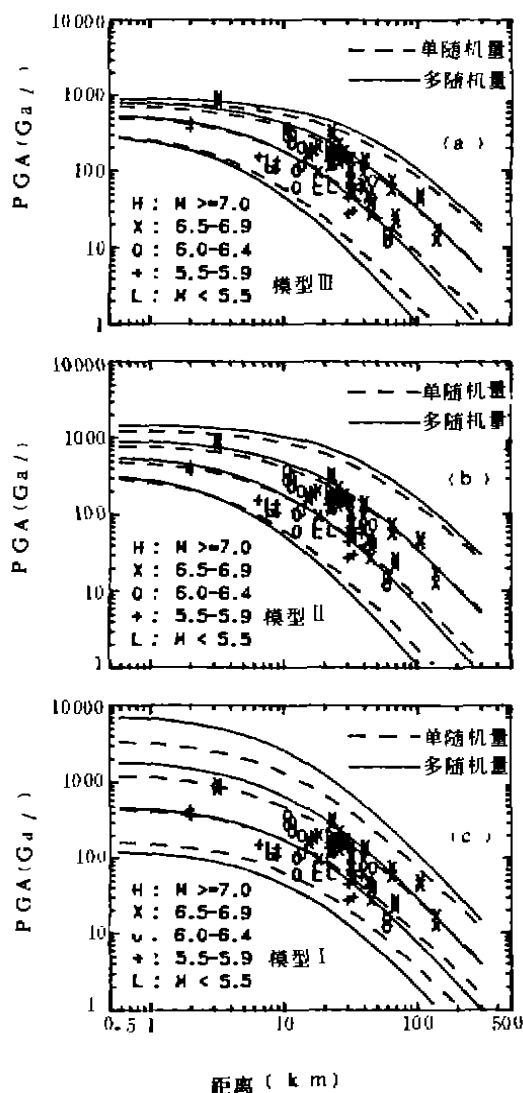


图2 基岩加速度回归结果及观测资料
($M = 5, 6, 7, 8$)

在以往的多数研究中^[3,7,9],场地条件的影响用下式中参数 S (基岩取0,土层取1)来反映,

$$\lg(Y) = C_1 - C_2 M - C_3 \lg(R + R_0) - d \cdot S \quad (12)$$
 各种场地上的资料一同参与统计分析,不同场地上衰减因子 C_1 被强迫一致。正是由于这一不合理约束,使上述近、远场的不同影响被平均化,得到两簇相互平行的衰减曲线,特别是 PGA 近、远场恰相反的差别完全被抵消,得出 PGA 不受场地条件影响的错误结论。对于 PGV 和 PGD ,这种处理方法也将场地条件影响的远近差异混淆。所以,场地条件对地震动的影响应该与震级和距离一同讨论。

表3 回归标准差比较

随机变量	Y	M	$\lg R$	Y, M, $\lg R$
σ_y	0.1801	0.2108	0.1925	0.1893
σ_x	0.2584	0.2180	0.2396	0.2194
$\sigma_{\lg R}$	0.0941	0.0971	0.0884	0.0907

2. 不同衰减模型对应结果的差别

由于近场大震缺乏资料,此范围的回归结果会受到从中远场数据外推的控制。在这种情况下,除了对数据的不均匀分布进行加权处理外,还应根据理论研究结果合理选定模型。本文建议的衰减模型通过 $R_0(M)$ 反映了地震动的近场距离饱和,通过 $R_0(M)$ 和 $C_3 M^2$ 共同反映了高频地震动的近场震级饱和特性,使近场回归结果与观测资料更为接近,如图3中模型Ⅰ和Ⅱ,克服了传统模型(模型Ⅰ)对大震近场地震动估计过高的缺点,同时保持中、远场与实测资料仍相吻合。 PGA 具有明显的近场饱和特性,并且饱和范围随震级增大(震源体增大)而加宽。这种模型的选择既反映了目前地震学理论研究结果与强震观测资料特性,又同现有实测资料一致,从而提高了模型的合理性和可靠性。图4给出了三个模型近场饱和趋势的比较。

3. 场地条件影响

从图5可知,场地条件对 PGA 、 PGV 、 PGD 的衰减规律均有明显影响。基岩地震动衰减速率比土层高,即 C_4 绝对值在基岩上明显大于其在土层上。两种场地上地震动估计值本身也明显不同,在近场,基岩 PGA 比土层值平均高约38%, PGD 则相反,约低43%,而 PGV 在两种场地上相近;在远场,基岩地震动幅值低于土层相应值,且减小程度随距离加大而增高。

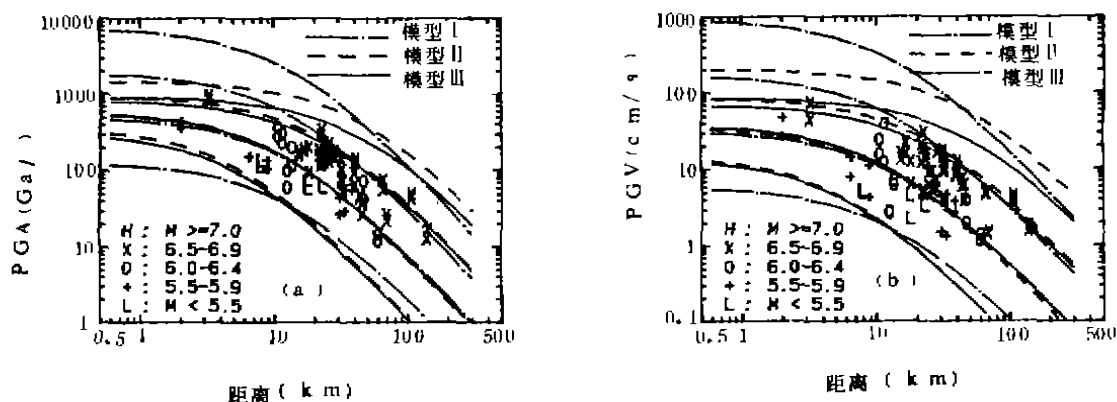


图3 不同模型回归结果比较

(M = 5, 6, 7, 8)

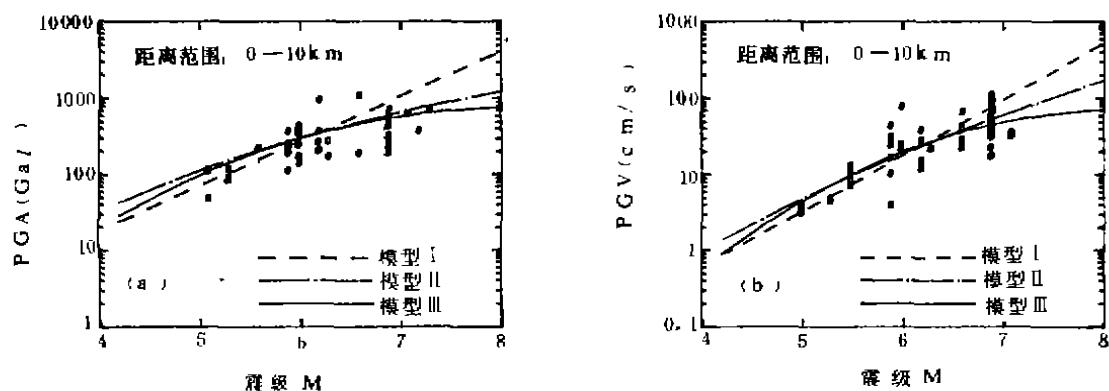


图4 近场观测资料与三种模型预测结果对比

4. 与其它结果比较

此处仅以近年来有代表性的几种 PGA 衰减结果^(2,4,7,8)为例进行比较。由于以往研究中认为 PGA 的衰减规律不受场地条件影响,统计中采用各种场地上的混合资料。在比较中,本文也将基岩与土层资料合并,结果(模型 I)为:

$$\lg(PGA) = 0.583 + 0.651M - 1.652\lg[R - 0.182\exp(0.707M)] \quad (13)$$

图6绘出了本文预测结果与其它结果的比较,可知本文结果在近场区较之现有方法的预测效果有了明显的改善。从对新近发生的三次取得记录的大地震(1985年9月19日墨西哥地震, $M_s = 8.1$; 1985年3月3日智利地震, $M_s = 7.8$; 1989年10月18日美国加州 Loma Prieta 地震, $M_s = 7.1$)的地震动衰减规律的预测结果可知,无论是近场还是远场,本文结果都能与实测资料很好吻合,且优于其它结果。这证明本文模型及模型参数具有良好的大震外推功能。

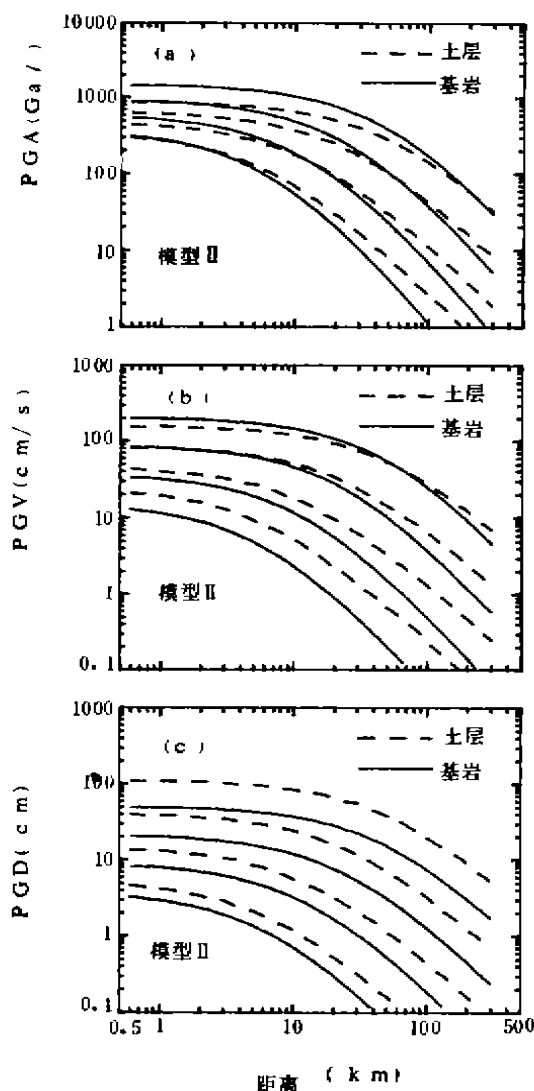


图5 场地条件对地震动衰减规律的影响
($M=5, 6, 7, 8$)

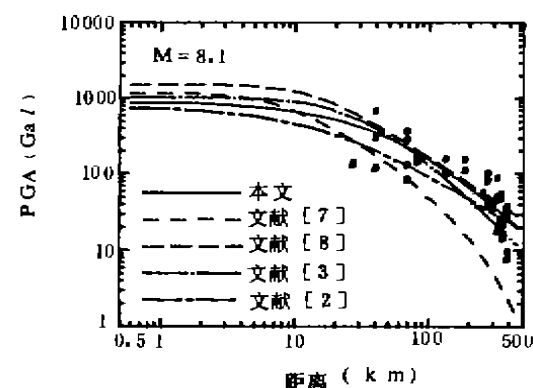
七、结 论

通过以上结果分析可得以下结论:

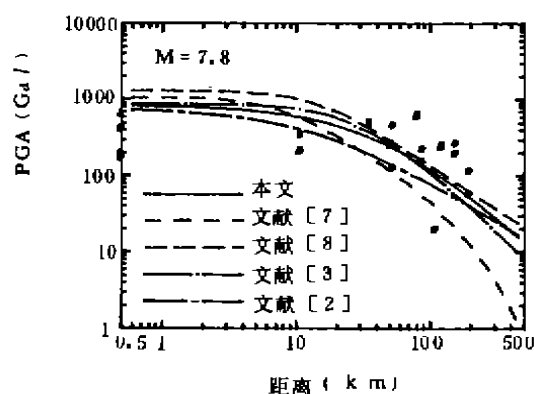
1. M 和 R 的随机性对地震动估计结果的影响不容忽视。新回归方法可确定 Y, M, R 间唯一的相关关系式。

2. 综合考虑强震观测资料特性与地震学理论成果,具有近场饱和和特性的衰减模型更趋合理可靠。

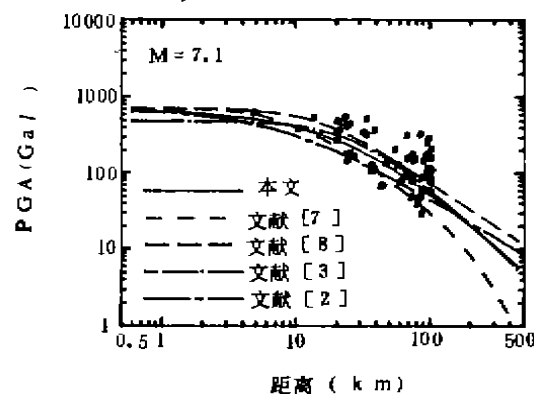
3. 场地条件对地震动衰减规律有明显影响,且与距离和震级相关。



(a) 墨西哥地震



(b) 智利地震



(c) Loma Prieta 地震

图6 大震预测结果与实测资料的比较

4. PGA 具有明显的近场饱和特性,且饱和范围随震级增大而加宽。
5. 本文模型与三大地震的实测资料很吻合,且优于其它结果。

参 考 文 献

- (1) Bath, M., Earthquake Magnitude-Recent Research and Current Trends, Earth-Science Review, V. 17, 315—398, 1981.
- (2) Campbell, K. W., Near-Source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration, BSSA, V. 71, 2039—2070, 1981.
- (3) Cornell, C. A. et al., Seismic Motion and Response Prediction Alternatives, EESD, V. 7, 295—315, 1979.
- (4) 胡幸贤、霍俊荣,具有随机误差变量之间的回归关系,地震工程与工程振动,8 卷 4 期,1—12,1988.
- (5) 霍俊荣,近场强地面运动衰减规律的研究,国家地震局工程力学研究所博士论文,1989.
- (6) Huo, Jun-Rong et al., On Earthquake Intensity Attenuation, Proc. of International Seminar on Seismic Zonation, Guangzhou, China, 322—331, 1987.
- (7) Joyner, W. B. and D. M. Boore, Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-Motion Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake, BSSA, V. 71, 2011—2038, 1981.
- (8) McGuire, R. K., Seismic Ground Motion Parameters, ASCE, V. 104, GE, 481—490, 1978.
- (9) Trifunac, M. D., Preliminary Analysis of Peaks of Strong Earthquake Ground Motion—Dependence of Peaks on Earthquake Magnitude, Epicentral Distance, and the Recording Site Conditions, BSSA, V. 66, 189—219, 1976.

STUDY ON ATTENUATION LAWS OF GROUND MOTION PARAMETERS

Huo Junrong Hu Yuxian

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

ABSTRACT

Accounting for the measuring errors or uncertainties of magnitude and distance in addition to ground motion, the attenuation laws for peak horizontal ground acceleration (PGA), velocity (PGV), and displacement (PGD) are studied with a weighted consistent least square regression method proposed by the authors to obtain the functional relation among several random variables. The saturation of ground motions near epicenter with respect to both magnitude and distance is also emphasized in the models. The result is that the scaling factors for distance and the linear term of magnitude in the attenuation relations regressed by the suggested method are about 16—28% in average larger than those from the routine method. The ground motion estimates are somewhat higher than the routine values for large earthquakes or at near field for small events. The peak values saturate near the source and the scope of saturation widens with the increase of magnitude. The site geological conditions affect the ground motion attenuation very much and this effect is related with distance and magnitude at the same time. The prediction from the new model is very well consistent with the observed data from the three large earthquakes recently occurred and not considered in the regression.