

# 基岩地震动参数与震级和距离的关系\*

胡聿贤 张继林 邹夕林 齐 心

(中国科学院工程力学研究所)

## 摘 要

关于强地震对结构的作用,应当考虑随时间变化的地面运动的全过程。这个过程的统计特征是由震级、中介介质及地表土层的特性决定的。因为现在已经有了从基岩运动推算地表运动的可靠方法,所以搞清基岩运动的特征并由此对基岩运动的过程作出估计,显得特别重要。

本文对美国27个基岩台上的强震记录的反应谱以及几个最大值与震级和震源距离的关系进行了统计分析,找到它们的关系。从这些关系出发,对指定的震级和震源距离的基岩,可以估计它的运动特征,并人工造成一组运动过程。

## 一、引 言

结构地震反应分析所需要的地震动参数,通常包括最大值、周期特性和持续时间。它们是随着震源特性和传播的中介介质和覆盖层特性而变化的地面运动统计特征。关于覆盖层特性的影响,目前已经有了比较可靠的分析方法,能够以足够的精确度,从基岩地震动的时程曲线推算地表的时程曲线<sup>[1]</sup>。反过来,从地表地震动的时程曲线,也可以推算基岩地震动的时程曲线<sup>[2]</sup>。时程曲线当然包括了上述地震动参数。因此,关于覆盖层对地震动参数的影响的问题,可以说在原则上已经解决了。剩下的主要问题是研究震源特性和中介介质对地震动参数的影响,主要是震级和距离的影响。因此,基岩地震动参数与震级和距离的关系问题,越来越受到各国研究者的重视。

研究这个问题的途径有两个。一个是假定一个比较简单的模型,根据震级和距离从理论上推算基岩地震动参数。这方面虽然作了一些工作,但是,由于问题的复杂性,目前尚未取得有实际意义的结果。大多数研究者采取另一个途径,即对现有的强震观测资料进行统计分析。

本文介绍我们沿第二个途径所作的一部分工作。我们对27个基岩台站的强震记录的加速度反应谱、地面位移、速度以及加速度的最大值与震级和震源距离的关系,进行了统计分析。本文的研究工作完成于1978年。

\* 1980年1月5日收到初稿,1981年6月4日收到修改稿。

## 二、资料和分析方法

关于基岩地震动的观测,国内虽已取得一些记录,但常规分析尚未全部完成。目前,我们先分析了美国的资料。这些资料取自文献[3]。

基岩台的选择,我们是根据文献[4—7]综合研究确定的。一共选了 27 个台。震中距,我们尽可能采用至能量释放中心(宏观震中)的距离。

关于经验公式的形式,我们用下式概括:

$$Y = A \times (R + R_0)^{-n_1} \times 10^{-n_2 R + n_3 / R} \times 10^{b_1 M + b_2 M^2} \quad (1)$$

其中:  $Y$  是反应谱值或地震动参数值;  $R$  是震源距离 (km);  $M$  是震级;  $A$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  都是待定常数。  $A$  仅影响  $Y$  的绝对值;  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$  等决定随距离衰减的快慢,其值越大,则衰减越快;  $b_1$  与  $b_2$  决定随震级而增长的快慢。从物理意义上来看,上式中  $(R + R_0)^{-n_1}$  代表由于几何扩散引起的衰减,  $10^{-n_2 R}$  代表由于内阻尼引起的衰减,  $10^{b_1 M}$  是由震级的定义引伸而来的,  $10^{b_2 M^2}$  是为了在震级很大时代表地震动随震级可能有的非线性的变化。一些研究者曾经采用过的其它一些型式,我们觉得物理意义不甚明确,又比较复杂,没有采用。对于式(1)中各项的具有理论和实际意义的各种组合型式,我们都进行了计算。

## 三、结果及讨论

### 1. 1971 年 2 月 9 日圣费尔南多 (San Fernando) 地震观测结果的分析

在我们目前收集到的 27 个基岩台的资料中,大部分是 1971 年 2 月 9 日圣费尔南多地震的。因此,单独对这一部分资料进行了分析,研究震源距对基岩地震动参数的影响。

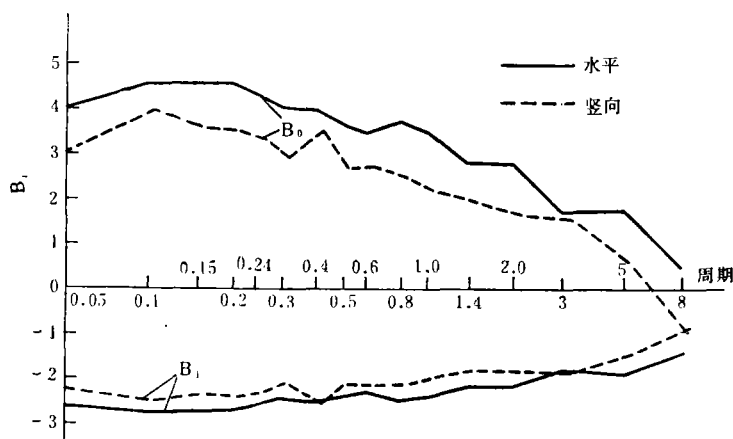


图 1 圣费尔南多地震加速度反应谱回归系数

水平加速度最大值的  $B_0 = 6.93$ ,  $B_1 = -2.65$ , 竖直加速度最大值的  $B_0 = 6.00$ ,  $B_1 = -2.30$ ; 水平速度最大值的  $B_0 = 4.61$ ,  $B_1 = -1.99$ , 竖直速度最大值的  $B_0 = 3.40$ ,  $B_1 = -1.48$ 。

首先,为了选择适当的公式形式,对以下五种型式进行了计算:

$$Y = A \times (R + R_0)^{-n_1} \quad (2)$$

$$Y = A \times (R + R_0)^{-n_1} \times 10^{-n_2 R} \quad (3)$$

$$Y = A \times (R + R_0)^{-n_1} \times 10^{-n_2 R + n_3/R} \quad (4)$$

$$Y = A \times (R + R_0)^{-n_1} \times 10^{n_3/R} \quad (5)$$

$$Y = A \times 10^{-n_2 R} \quad (6)$$

反应谱选取周期为 0.04—0.05 秒 (平均值)、0.3 秒、3 秒三个;地面运动最大值选加速度的和速度的。 $R_0$  值选 0、15、30、45、60 五个值。根据各组回归分析的标准差  $\sigma$  及显著性系数  $F$  值,我们选定公式(2)及  $R_0 = 30$ 。这意味着,由于传播介质的内阻尼引起的衰减比较小,总的衰减可以用几何扩散的型式概括。这与施纳贝尔 (Schnabel) (1973) 对帕克费尔德 (Parkfield) 1966 年地震所作的结论是一致的。

我们采用公式(2),对 18 个基岩台在圣费尔南多地震时的记录的加速度反应谱 (选

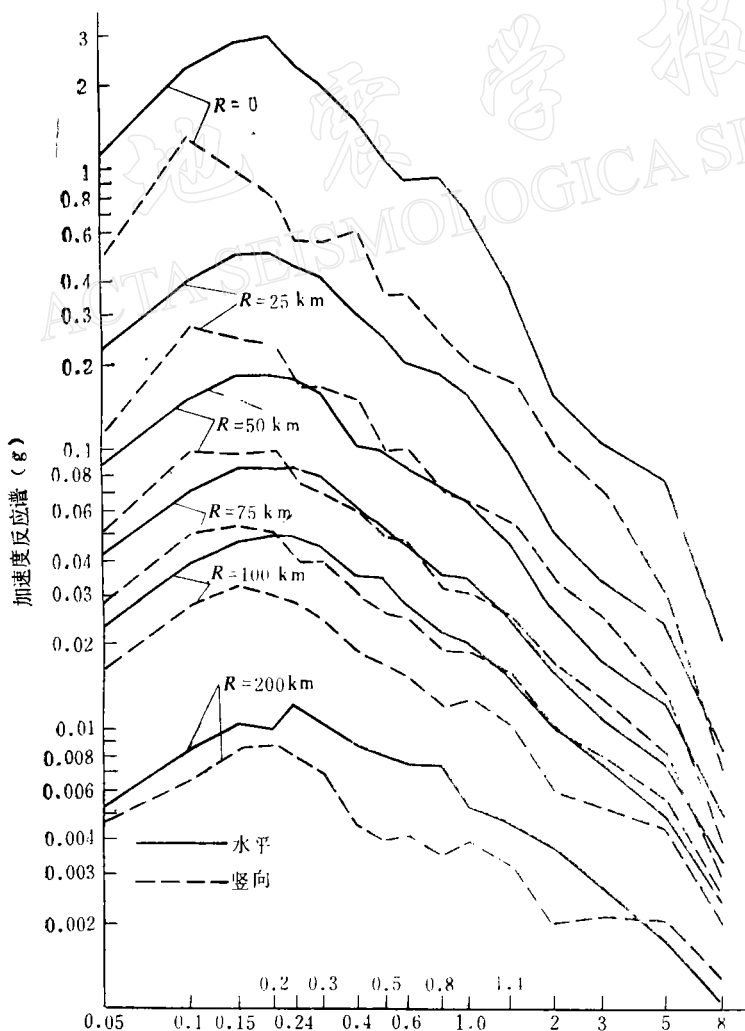


图 2 圣费尔南多地震不同距离处加速度反应谱

16 个周期)、反应谱最大值和地震动最大值进行了统计分析,回归系数如图 1 所示。其中  $B_0 = \log_{10} A$ ,  $B_1 = -n_1$ , ( $A$ 、 $n_1$  为式 (2) 中的常数)。计算结果表明,所有各组的回归都是高度(都在 0.01 水平以上)显著的。不同震源距处水平及竖向的反应谱,如图 2 所示。用水平方向地面最大加速度平均衰减曲线上相应距离的数值去除加速度反应谱,就得到图 3 所示的水平方向加速度放大系数曲线。

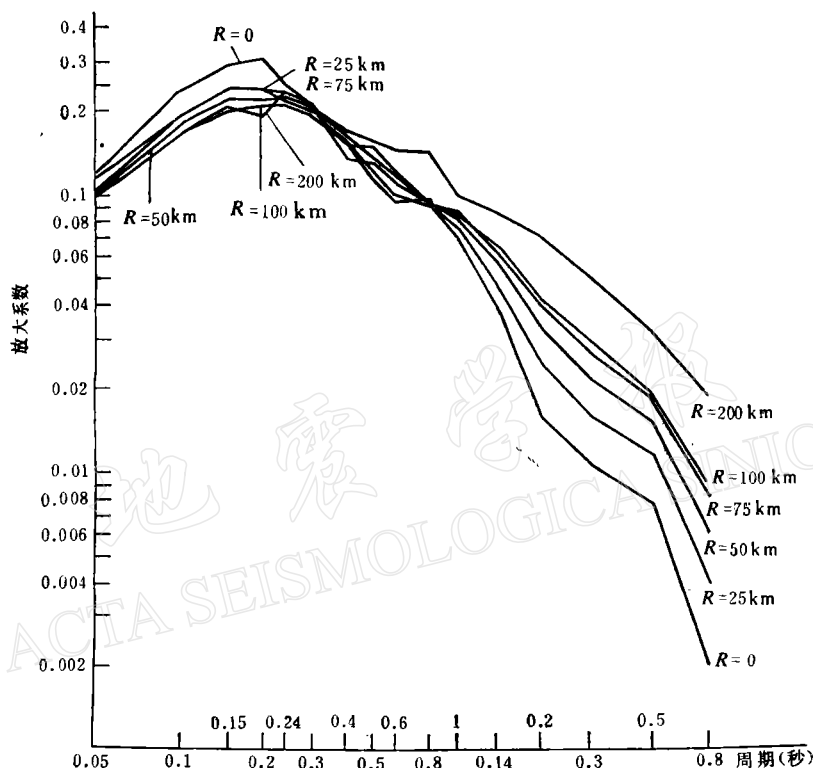


图 3 圣费尔南多地震不同距离处水平加速度放大系数

从图 2、3 可以看出: 随着距离的增加, 加速度反应谱越来越变得平缓, 但其最大值出现的周期却无明显的变化。从图 1 也可以看出: 加速度反应谱的衰减因周期而异, 周期越长, 则  $n_1 = -B_1$  值越小, 衰减越慢。随距离的增加, 图 3 中的加速度放大系数  $\beta$ , 在短周期部分变化不大, 似略有减小的趋势, 长周期部分则随距离的增加而增大, 周期越长, 变化更明显些。放大系数的最大值在 2 到 3 之间。上述这些, 与过去某些研究者的结果, 例如栗林荣一 (Kuribayashi) 等 (1972)<sup>[8]</sup> 认为随距离的增加, 放大系数增加, 是不尽相同的。其原因, 我们将在下文中加以分析。

## 2. 不同震级基岩地震动观测资料的分析

首先, 为了选择适当的公式, 我们对以下几种型式进行了初步计算, 随距离的衰减则以前节所得的结果为主:

$$Y = A \times (R + R_0)^{-n_1} \times 10^{-n_2 R} \times 10^{b_1 M} \quad (7)$$

$$Y = A \times (R + R_0)^{-n_1} \times 10^{-n_2 R} \times 10^{b_1 M + b_2 M^2} \quad (8)$$

$$Y = A \times (R + R_0)^{-n_1} \times 10^{b_1 M} \quad (9)$$

$$Y = A \times (R + R_0)^{-n_1} \times 10^{b_1 M + b_2 M^2} \quad (10)$$

反应谱的周期选(0.04—0.05)秒(平均值)、0.3 秒、3 秒三个;地震动最大值选加速度的和速度的。 $R_0$  值对式(7)、(8)取 30, 对(9)、(10)取 30、45、60 三个值。算出了各组回归分析的  $\sigma$  及  $F$  值,部分数据如下表所示:

$T = 0.3$  秒的  $\sigma$ 、 $F$  值(水平)

公式	(7)			(8)			(9)			(10)		
$R_0$	30	45	60	30	45	60	30	45	60	30	45	60
$\sigma$	0.425			0.428			0.471	0.462	0.456	0.476	0.473	0.46
$F$	16.3			12.3			14.9	16.6	17.7	9.78	9.85	11.6

对于全部数据,就  $\sigma$  值而言,不同公式,不同  $R_0$  值的,都相差不多。就  $F$  值而言,式 (9)  $R_0 = 30$ 、45、60 的  $F$  值都比较大,表明回归都是在很高的水平上显著的。最后我们选定公式(9)及  $R_0 = 30$ 。

我们用上述公式,对不同震级的 27 个基岩台记录的加速度反应谱(选 16 个周期)、反应谱最大值和地震动最大值进行了统计分析。回归系数如图 4 所示。其中  $B_0 = \log_{10} A$ ,  $B_1 = -n_1$ ,  $B_2 = b_1(A, n_1, b_1$  为式(9)中的常数)。计算结果表明,所有各组的回归都是高度显著的(都在 0.01 水平以上)。不同距离处,水平向加速度反应谱随震级的变化,如图 5、6 所示( $M = 7$  以上供参考)。对震源距  $R = 25$  公里,根据公式(9)及图 4 中的回归系数,用不同震级地面加速度最大值的统计值去除加速度反应谱,得到加速度放大系数,如图 7 所示(竖向反应谱略)。

从图 5—7 可以看出:同一距离处加速度反应谱随震级的增加,长周期部分比短周期

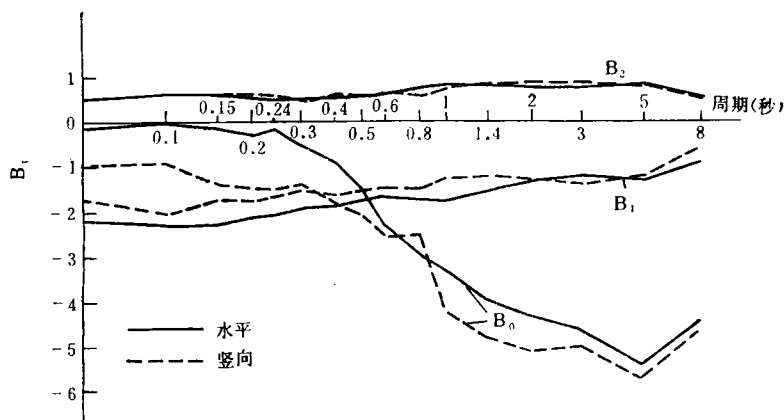


图 4 不同震级加速度反应谱回归系数

水平加速度最大值的  $B_0 = 1.71$ ,  $B_1 = 2.18$ ,  $B_2 = 0.657$ , 竖直加速度最大值的  $B_0 = 1.72$ ,  $B_1 = -1.75$ ,  $B_2 = 0.489$ ; 水平速度最大值的  $B_0 = -0.269$ ,  $B_1 = -1.53$ ,  $B_2 = 0.604$ , 竖直速度最大值的  $B_0 = -1.41$ ,  $B_1 = -0.98$ ,  $B_2 = -0.585$ 。

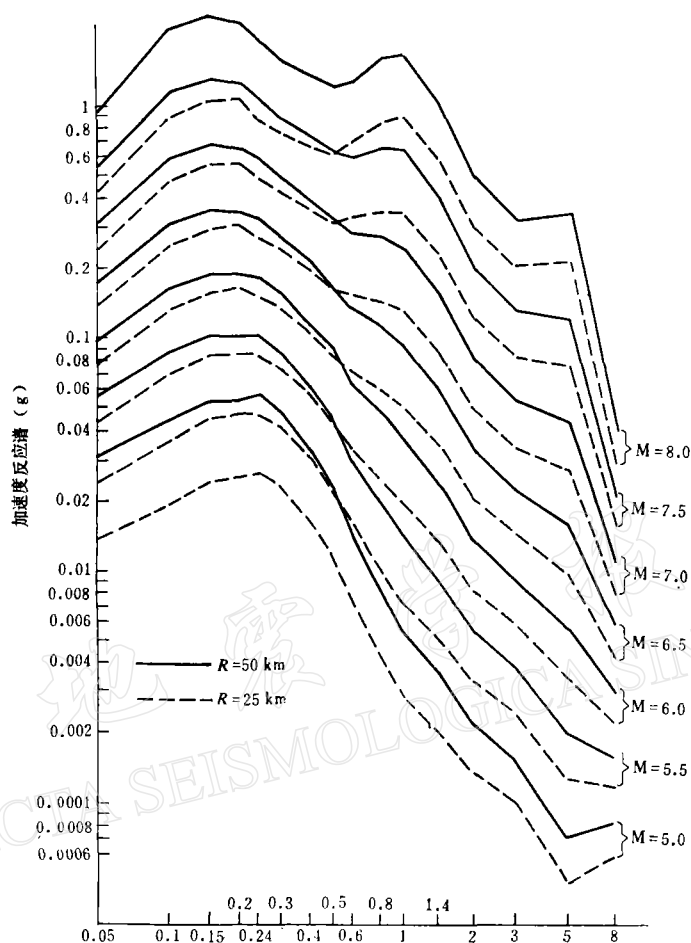


图5 不同震级水平加速度反应谱曲线

部分增加得快些。当震级较大时,这种趋势更为明显。加速度反应谱的最大值出现的周期,随震级的改变,没有明显的变化。从加速度放大系数来说(图7),同一距离处,随震级的增加,在周期0.6秒附近保持不变,较短周期部分逐渐减小,较长周期部分逐渐增加。这些与过去某些研究者例如栗林荣一等(1972)<sup>[8]</sup>的结果也略有不同,但与特里夫纳克(Trifunac)(1976)<sup>[9]</sup>得到的加速度富氏谱衰减规律,则是一致的。

需要指出,过去一些研究者在对不同震级、距离的加速度反应谱进行统计分析时,大都不区分地基类别,而且在对震级的影响进行统计分析时也不区分不同的距离,分析距离的影响时又不区分不同的震级,这样一来,地基特性、震级、距离三个因素的影响交织在一起,故其结果不一定能正确反映这三个因素单独的影响。例如在文献[8]的表II所列的分组当中,当按震级不同进行分组时,各组的距离 $\Delta$ 的平均值也有明显变化,  $M = 4.8-5.5$ 一组的平均  $\Delta = 40$  公里;  $M = 6.5-7.5$  的  $\Delta = 107$  公里;  $M = 7.5-7.9$  的  $\Delta = 176$  公里,当震级增加时,距离也增加了。当按距离不同进行分组时,各组震级的平均值也有明显变化,  $\Delta = 5-20$  公里,平均  $M = 5.6$ ;  $\Delta = 20-120$  公里,  $M = 6.4$ ;  $\Delta = 120-320$

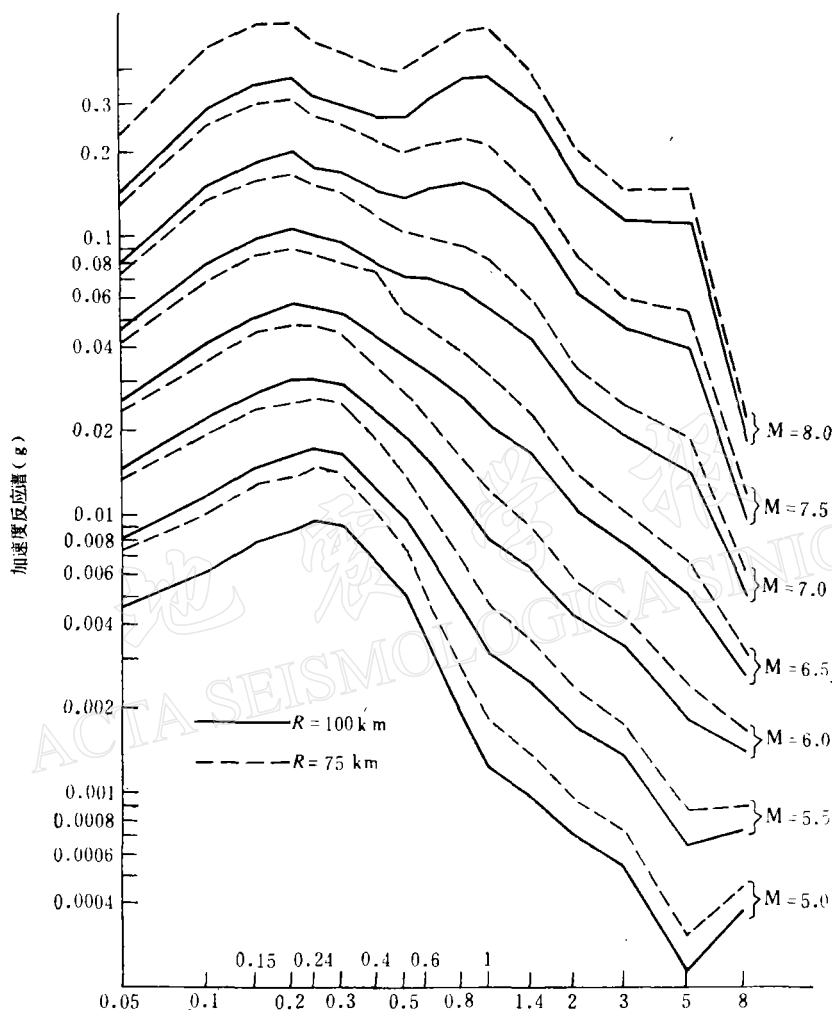


图6 不同震级水平加速度反应谱曲线

公里,  $M = 7.0$ ; 当距离增加时, 震级也增加了。当按不同地基进行分组时, 各组的平均震级和距离也有显著区别, 例如基岩一组的平均  $M = 5.7$ ,  $\Delta = 61$  公里; 软土一组的  $M = 6.7$ ,  $\Delta = 89$  公里。地基变软, 震级和距离增加。照上述这样作的结果, 有可能将软土对长周期分量的选择放大作用归之为震级或距离的影响。

本文在选择资料时, 区分了地基类别, 单独对基岩地基进行统计分析。在分析方法上又将震级和距离的影响分别加以考虑。这样, 我们得到的结论与过去一些研究者不甚一致便是可以理解的了。

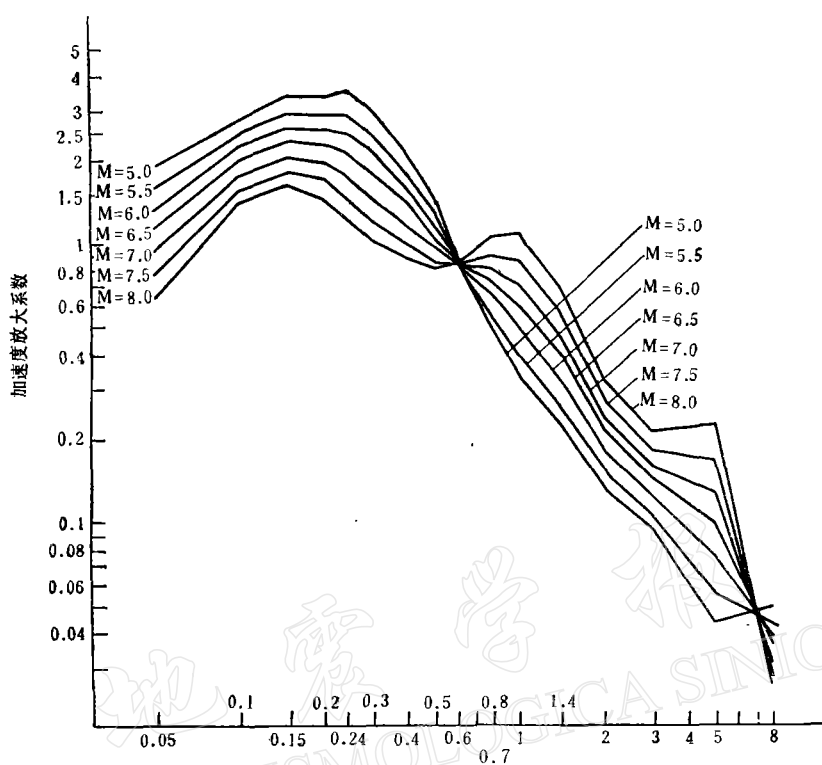


图7  $R = 25$  公里不同震级加速度放大系数曲线

## 四、结 论

根据上述统计分析,对于基岩地震动参数与震级和距离的关系,可以得到以下几点初步的结论。

1. 在距离的影响中,岩石内阻尼引起的衰减很小,总的衰减可以用几何扩散的形式概括。震级和距离对地震动参数的影响,可以用式(9)的形式描述。

2. 随距离的增加,加速度反应谱越来越变得比较平缓,但其最大值出现的周期却无明显变化。

3. 随距离的增加,加速度放大系数在短周期部分变化不大,长周期部分则逐渐增加,周期越长则变化越明显。

4. 随震级的增加,加速度反应谱的长周期部分比短周期部分增加得快些;当震级较大时,这种趋势更为明显。加速度反应谱的最大值出现的周期,与震级的关系不明显。

5. 随震级的增加,加速度放大系数在周期 0.6 秒附近保持不变,较短周期部分逐渐减小,较长周期部分逐渐增加。

6. 本文所得到的结果表明,加速度反应谱最大值的周期与震级和距离的关系不明显,但加速度反应谱形状则随震级和距离的增加而变得平缓。这种长周期部分随震级和距离而相对增长的变化,在速度反应谱中更为明显。

## 参 考 文 献

- [1] I. M. Idriss and H. B. Seed, Seismic response of horizontal soil layers, *Proc. ASCE*, **94**, SM4, 1003—1031, 1968.
- [2] 胡聿贤, 朱镜清, 朱莉, 胡勇: 频域中的结构振动输入反演, *地震工程与工程振动*, **1**, 1, 41—55, 1981.
- [3] Earthquake Engineering Research Laboratory, Strong Motion Earthquake Accelerograms, v. 1—4, California Institute of Technology, 1969—1975.
- [4] H. B. Seed, et al., Site-dependent spectra for earthquake-resistant design, *BSSA*, **66**, 1, 221—243, 1976.
- [5] M. C. Trifunac and A. G. Brady, On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion, *BSSA*, **65**, 1, 139—162, 1975.
- [6] Seismic Engineering Branch, USGS, Strong-Motion Accelerograph Station List-1975. Open File Rept. No. 76—79, U. S. Dept. of Interior, 1976.
- [7] C. M. Duke, et al., Effect of Site Classification and Distance on Instrumental Indices in the San Fernando Earthquake, UCLA Engg Rept. No. UCLA-ENG-7247, 1972.
- [8] E. Kuribayashi (栗林荣一), et al, Effects of seismic and subsoil conditions on earthquake spectra, *Proc. Int. Conf. Microzonation for Safer Const. and Appl.*, **2**, 499—512, 1972.
- [9] M. D. Trifunac, Preliminary empirical model for scaling fourier amplitude of strong ground acceleration in Terms of earthquake magnitude, source-to-station distance and recording site conditions, *BSSA*, **66**, 4, 1343—1373, 1976.

## FUNCTIONAL RELATIONS OF BEDROCK MOTION PARAMETERS WITH EARTHQUAKE MAGNITUDE AND DISTANCE

HU YUXIAN   ZOU XILIN   ZHANG JIDONG   QI XIN

(*Institute of Engineering Mechanis, Academia Sinica*)

### Abstract

It is not any single maximum value, but the whole process of the ground motion that determines the behavior of a structure during a strong earthquake. Statistical characteristics of the whole process or the time history of ground motion are functions of earthquake magnitude and propagation path and media, especially soil condition near ground surface. Since there exist some potentially reliable method to calculate ground surface motion from bedrock motion, reasonable evaluation of bedrock motion parameters and generation of time histories therefrom seem to become more important.

The present paper analysed records obtained on 27 U. S. stations on bedrocks, trying to find out some statistical functional relations of the acceleration response spectra and some maximum values with earthquake magnitude and distance which are the most important basis for generating time history of ground motion.