

层状土地震反应分析中的输入波

王 广 军

(中国建筑科学研究院, 北京)

提 要

文中对层状土地震反应分析时输入波的考虑方法作了评述, 认为用平均加速度反应谱来反映基岩输入运动是一种值得推荐的方法。为此利用近年来国内外的一些统计结果, 给出基本烈度为 7° , 8° , 9° 时考虑震级、震中距影响的基岩运动谱特征。同时建议用考尔人工地震波法产生层状土地震反应分析时的输入波。

一、概 述

因土质条件不同的震害差异现象很早就引起人们的重视, 其中层状地基的地震影响更是多年来人们探讨的课题。电子计算技术的飞速发展, 使我们有可能在重要结构、核电站抗震分析、小区域地震影响以及反演计算中采用理论分析的方法来研究层状土地震反应。目前这种分析所需的土壤参数、计算方法和电算程序已基本得到解决, 只是基岩输入波这个问题, 尚无比较满意的处理方法。

进行层状土地震反应分析, 首先要给定基岩所处位置和输入波形式。通常将具有不变波速、且有连续广泛界面以下的岩层称为基岩, 其剪切波速约为 $1 \sim 3 \text{ km/s}^{[1]}$ 。从工程应用的角度来看, 以这样的岩层作为基岩, 无论财力或物力上显然都是难于实现的。考虑到引起建筑物破坏的主要因素是地震波中短周期成分, 而深层介质对这些成分的影响并不很显著, 因此在实用分析中大多取某一适当的深度作为假想的基岩。

通常, 基岩输入地震波是以震级、震中距函数形式给出的。有关层状土地震反应研究可按下述两种途径进行: ①假定一个比较简单的模型, 根据震级和距离大小, 从理论上推算出基岩地震动参数; ②对已获得的强震观测资料进行统计分析, 给出回归公式。目前第一种方法尚不十分成熟, 故广泛地采用第二种方法。

近年来, 层状地基地震反应分析所采用的基岩输入波形式大致可划分为下述四种类型:

I. 直接采用裸露岩石上的强震记录或按具体情况调整已有记录的幅值、卓越周期后所给出的波形作为输入运动;

II. 将地表上所获得的强震记录反演到基岩上, 作为同次地震中没有获得记录的那些地点的地震反应输入波;

III. 以深井岩层上强震记录的统计结果作为输入波;

IV. 用某一频带区均等幅度转换的人工地震波作为输入波。

我国近年来层状土地震反应分析的研究大多采用第 I 种类型作为输入波。可以认为, 用

埃尔申屈(Elcentro)地震和我国四川松潘地震记录作为基岩输入波是不够恰当的。因为这些记录本身已包含有土质条件的影响,谢泼德(Shepherd)和特拉弗斯(Travers)对埃尔申屈等记录的理论分析已证实了这一点。应该指出的是,锡德(Seed, 1969)等给出的基岩幅值和卓越周期随震级、震中距变化的关系是在数据较少的情况下统计出来的,因此不能较好地反映基岩运动特征。用此结果对已获得的岩石记录加以改造后作为输入波,势必产生较大的误差。

第Ⅱ种类型的应用问题尽管在理论和实践上都得到了解决^[2,8],但只能用于同次地震没有获得强震记录的那些地点。第Ⅳ种方法与豪斯纳(Housner)1959年提出的平均反应谱相当符合^[4],因此已在某些层状土地震反应分析中加以应用。但必须指出,豪氏结果是根据四个地震8个水平分量进行统计的。它既没有考虑震级、震中距对谱形状的影响,也没有考虑因土质条件不同所产生的差异,故缺乏代表性。以至于不能作为地震小区划分析及重要结构、核电站地震反应分析时的输入运动。第Ⅲ种方法是以地下岩层的强震记录为依据,因此能较好地反映基岩运动特征,可惜这样的资料太少。

已有的层状土地震反应分析,大都将震级和震中距的影响以基岩输入运动表示,故地表地震动谱特征可用如下形式给出:

$$R(\omega) = f\{O(\omega), P(\omega), G(\omega)\} \quad (1)$$

式中 $R(\omega)$ ——地表地震动谱;

$O(\omega)$ ——表示震源机制特征的谱;

$P(\omega)$ ——传播途径影响函数;

$G(\omega)$ ——复盖土层的传递函数。

若用 $F\{O(\omega), P(\omega)\}$ 表示基岩输入运动特征,则

$$R(\omega) = f\{F\{O(\omega), P(\omega)\}, G(\omega)\} \quad (2)$$

显然,如果能够根据一些强震观测结果,给出上式中 $F\{O(\omega), P(\omega)\}$ 的统计特征,作为未来地震的基岩输入运动,无疑将具有较好的代表性。本文基于文献^[6~8]中各公式计算结果,给出适应于我国基本烈度为7°, 8°, 9°时基岩输入运动的谱特征,并按考尔(Kaul)方法产生相应的人工地震波作为基岩输入运动。

二、强震观测资料及其统计特征

自1966年河北邢台地震后,我国获得了大量的强震观测记录,其中有1972年辽宁海城和1976年河北唐山强余震时的许多岩石记录。图1分别给出辽宁海城余震时4个水平分量以及唐山余震时迁安、昌黎、唐山水泥厂和红山等地27个水平分量的平均反应谱曲线。可看出,两次地震强余震加速度反应谱其主峰周期都偏短,唐山余震的平均趋势为主峰后幅值衰减迅速。1976年松潘地震时,文县一中台记录虽然不是岩石上获得的,然而与海城地震时在岩石上所获得的结果很相似(见图1)。上述资料是相当宝贵的,所不足的是缺乏大地震时的主震和近震资料,因此用于强震分析似乎不妥。为此,本文选用近几年来日本、美国以及我国利用国外强震记录统计分析的成果作为资料(见表1)加以分析。

从表1中可看出,不同研究所采用的数据都具有局限性,且其表述形式也不一样。为了比较不同的研究成果,以便从中找出规律,本文按表1各公式分别计算了不同震级、震中距

六种情况的谱值(取周期0.05~4.00 s间18个值), 参见图2~4。

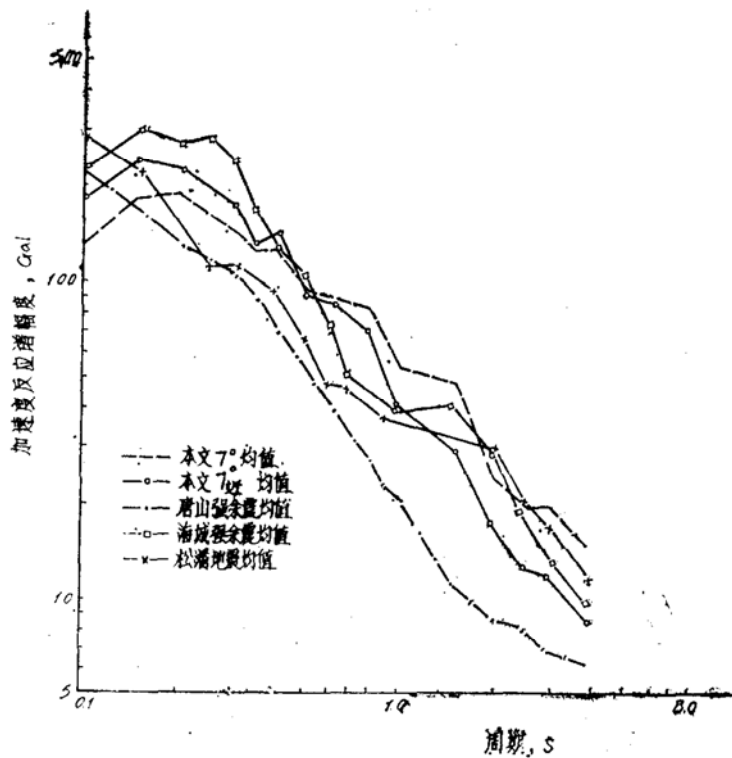


图1 建议值与国内强余震记录比较

表1

强震记录统计分析概况

编号	作者	数据说明	统计公式	备注
1	片山恒雄 ^[5]	取自日本震级5.0~7.9, 震中距20~200km裸露岩石记录29个	$\overline{SA}(T, h)$ $= f_M(T, h) f_\Delta(T, h) f_{GC}(T, h)$	不同震级、震中距、场地条件的权系数是用表格形式给出
2	特弗奈克 ^[6]	主要选用美国1971年圣费南多地震岩石记录26个	$\lg[PSV(T)] = M - \lg A_0 R$ $- b(T)M - c(T) - d(T)h$ $- e(T)V - f(T)M^2 - g(T)R$	$b(T) \dots g(T)$ 为周期的函数, 采用91个周期回归分析给出
3	胡聿贤 ^[7]	选用1971年圣费南多地震岩石记录27个	$Y = A(R + R_0)^{-h_1} \times 10^{b_1 M}$	$R_0 = 30\text{km}, -h_1 = B_1$ $b_1 = B_2, \lg A = B_0$ B_0, B_1, B_2 回归分析给出
4	大崎顺彦 ^[8]	日本9个台站硬岩石记录60个	$\lg S_v = a' M - b' \lg x - c'$	硬岩石指剪切波速大于1.5km/s, a', b', c' 回归分析给出
5		日本东北部4个台站软岩石记录35个	$\lg S_v = a' M - b' \lg x - c'$	软岩石指剪切波速为0.5~1.0km/s, a', b', c' 回归分析给出
6	长桥纯男 ^[9]	日本青森地下100m ($v_s = 1.6\text{km/s}$) 上记录10个	$\lg S_v = A(T)M - B(T)\lg x - C(T)$	$A(T), B(T), C(T)$ 由回归分析给出

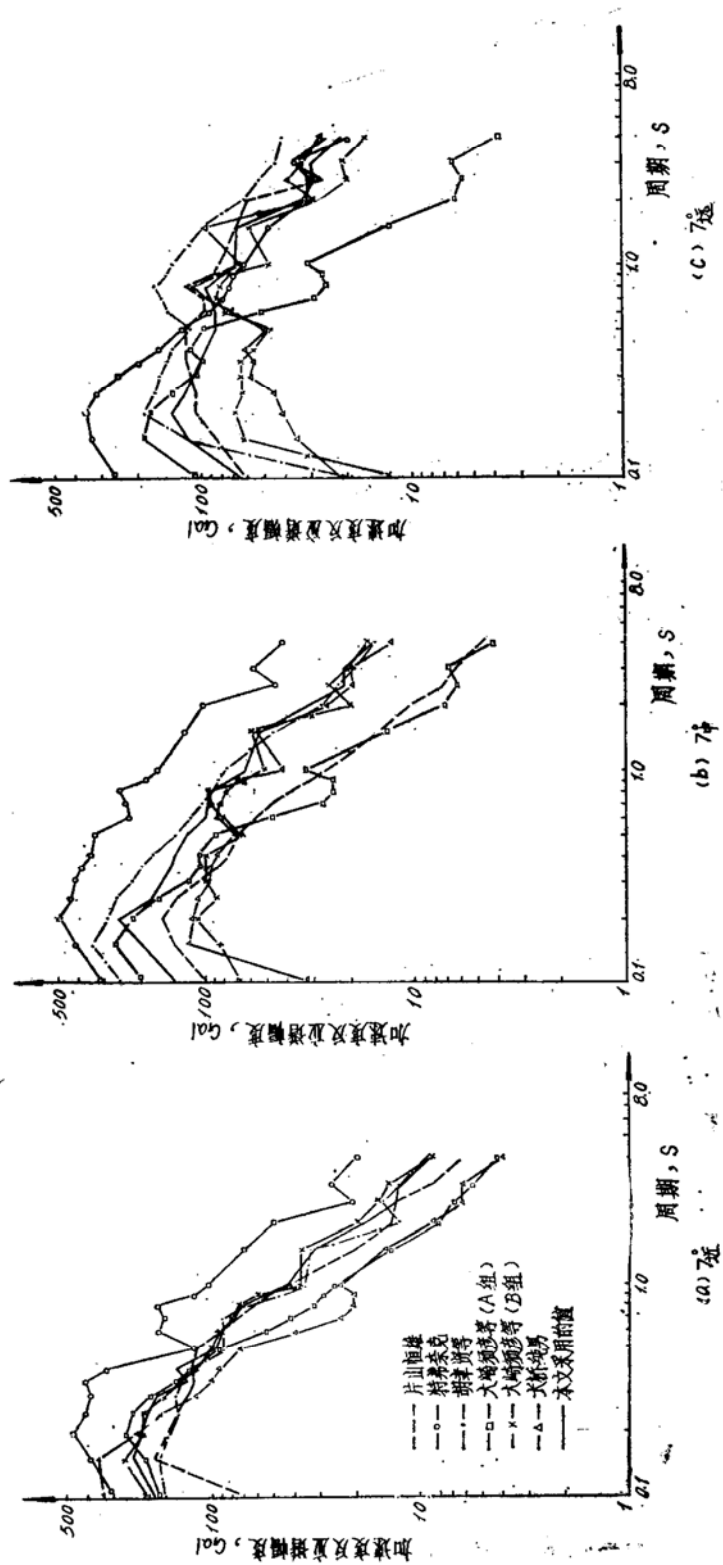


图2 7°基岩运动谱特征

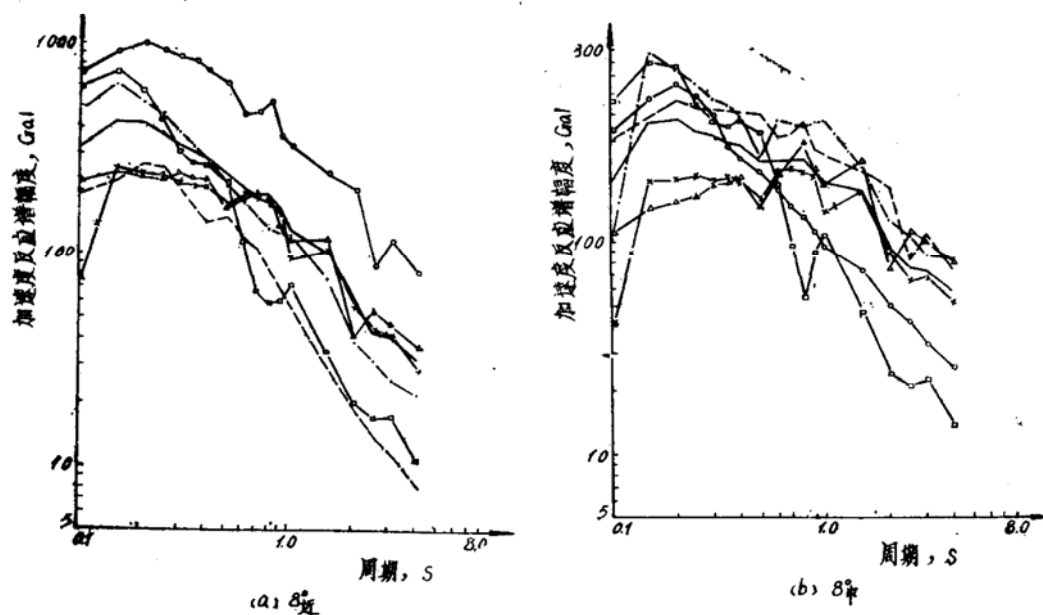


图3 8°基岩运动谱特征

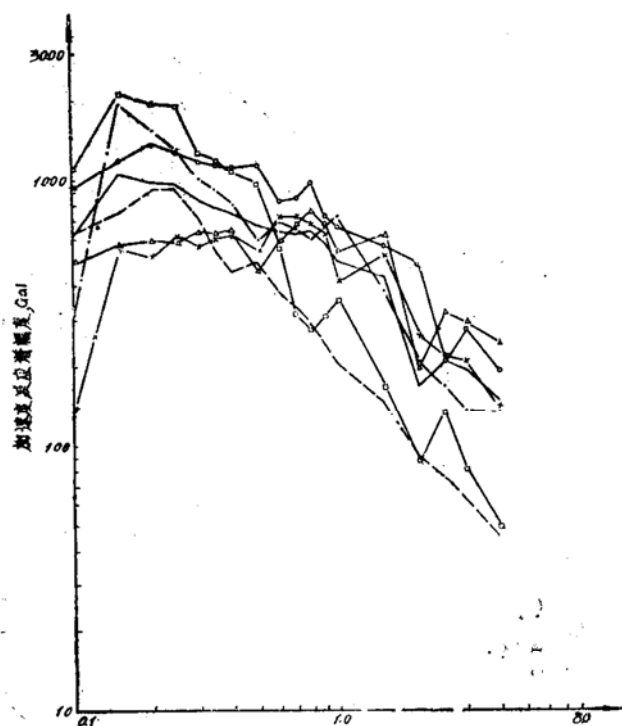


图4 9°基岩运动谱特征

由图可看出,不同研究者所给出的结果差异较大,即使是原始资料大致相同的二个研究成果其谱值也不一样^[6,7]。就共同的趋势来看,加速度反应谱主峰值出现的周期,并不随震级增大和距离增长而出现非常明显的变化,但谱形状却随震级、距离的增加变得比较平缓。应

该指出的是,表1中编号4,6为硬岩石情况,若从基岩输入运动角度来看,所给出的特征可能更为接近实际情况。硬岩石和软岩石无论在地下或地上,其对比观测资料都较少,仅就一些统计规律来看,两者谱形状很相似,但幅值上有些差异。表1的4,6与其它4种情况相比结果表明,在短周期部分($T \leq 0.3$ s),硬岩幅值约为软岩的一半,而在长周期部分($T \geq 0.8$ s),两者幅值相当。至于 $0.3 \text{ s} < T < 0.8 \text{ s}$ 时,则规律性不十分明显。可见,硬岩石与软岩石的加速度反应谱幅值差异主要表现在高频部分。

三、烈度为 7° , 8° , 9° 时基岩运动谱特征

在我国,对地震危险性的估计是以基本烈度形式给出的。TJ 11-78《工业与民用建筑抗震设计规范》规定,抗震设计适用于 $7 \sim 9^\circ$ 震区内的房屋和构筑物。目前抗震规范将场地条件与震源机制、传播途径分开加以考虑,并用三条不同的谱曲线反映场地土质影响的效应。其中,震源机制、传播途径的影响综合以基本烈度形式给出。应该指出的是,我国以往所发生的多次大地震,特别是1975年辽宁海城地震、1976年河北唐山地震,都表明不同震级、震中距在同等烈度时不同建筑物的震害差异很大;国外的许多大地震也有同样的结论。这表明仅用一个笼统的烈度似乎不足以反映震级、震中距对频谱形状的影响。近年来,国外的一些研究^[10,11]都力图根据已有的强震观测资料来解决这个问题,其中美国ATC-3尝试性规范已考虑了震中距的影响。基于上述情况,本文将根据我国的等烈度线图^[12]找出烈度随距离衰减的统计规律,然后对同等烈度,不同震级、震中距情况做可能的考虑。

资料表明,等烈度线的形状和衰减规律主要取决于震级大小、传播途径以及地形等因素,其形状绝大多数为椭圆形。由于烈度随距离的衰减与震级关系较为密切,为此我们将文献[12]中的153个数据按震级大小划分为六档分别进行统计,并给出如下形式的回归公式:

$$I = a + b \lg D \quad (3)$$

式中 I ——烈度;

D ——震中距,以km计;

a, b ——回归系数。

表2分别给出椭圆形长轴、短轴、平均半径在不同震级范围时,回归系数 a , b 和相关系数 R 值。图5为回归结果,可看出各回归线大致相互平行。为使用方便起见,本文用如下公式拟合图中各组直线:

$$\left. \begin{aligned} I &= 5.06 + 0.64M^{\frac{2}{3}} - 3.32 \lg D && (\text{长轴}) \\ I &= 4.41 + 0.63M^{\frac{2}{3}} - 3.34 \lg D && (\text{短轴}) \\ I &= 0.92 + 1.63M - 3.49 \lg D && (\text{平均半径}) \end{aligned} \right\} (4)$$

其结果如图5中虚线所示。看得出它与原回归线比较接近。

按式(4)中的平均半径近似公式,以震级 M , $\lg R$ 为直角坐标勾画出等烈度区以示烈度衰减规律,结果示于图6。图中的 7° , 8° , 9° 区相应于不同的震级和震中距的组合。为了考虑震中距的影响,我们粗略地将图中 7° 划分为近、中、远三种情况, 8° 划分为近、中二种情况,以反映各区分时谱特征差异。

表 2

回归系数 a , b 和相关系数 R

震级范围	长 轴			短 轴			平均半径		
	a	b	R	a	b	R	a	b	R
8.0~8.5	15.89	-3.44	-0.99	14.33	-3.20	-1.00	15.31	-3.76	-0.99
7.5~7.9	15.92	-4.00	-1.00	13.32	-3.44	-0.99	13.39	-3.60	-0.99
7.0~7.4	13.76	-3.32	-0.99	12.19	-3.02	-0.99	12.87	-3.81	-1.00
6.5~6.9	12.93	-3.31	-0.98	12.34	-3.49	-1.00	11.84	-3.49	-0.99
6.0~6.4	11.78	-2.89	-0.97	11.54	-3.45	-1.00	11.14	-3.69	-1.00
5.5~5.9	11.88	-3.42	-1.00	11.18	-3.68	-1.00	10.69	-3.69	-1.00

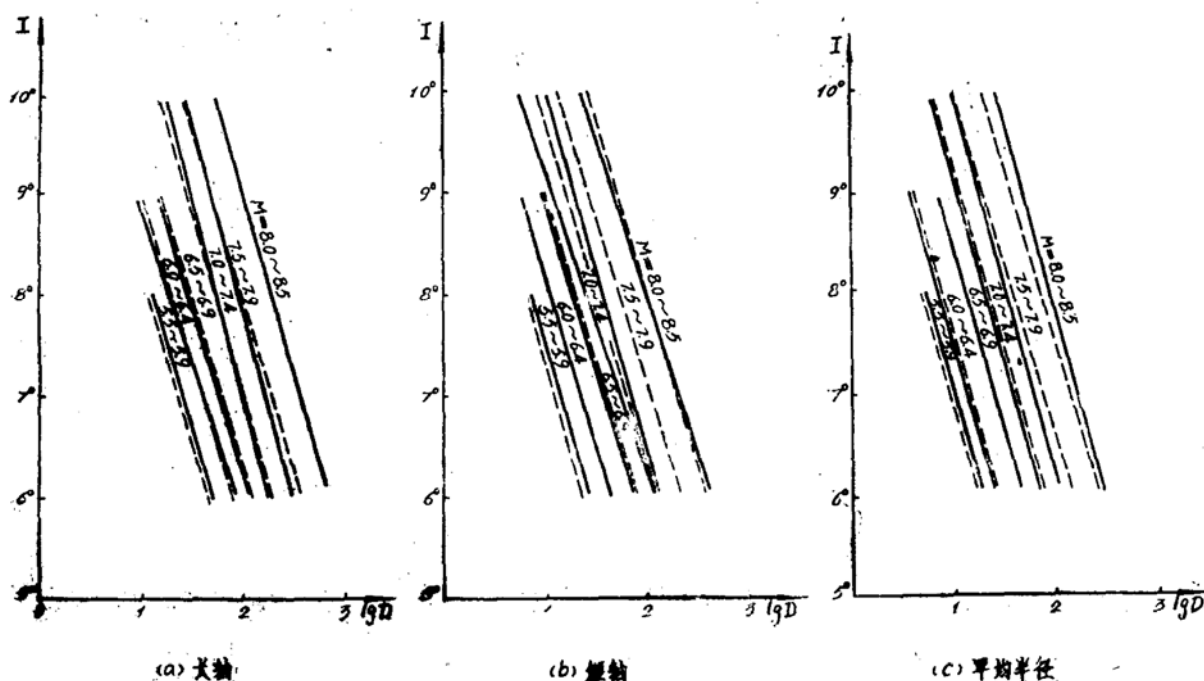


图 5 不同震级时烈度衰减统计

在我国, 建筑施工的钻探深度大多为 10~20m; 而已有的层状土地震反应分析研究多数取 20~50m 作为假想的基岩, 其根据是这一深度往往可看作结构物地基的持力层。因此从工程应用的角度来看, 取地下 20~50m 深处的地层作为假想基岩还是比较适宜的。按前节各研究者所给出的基岩运动谱特征, 本文在考虑了软、硬岩石差异的基础上, 给出相应于图 6 中 7° 近、中、远、8° 近、中、9° 时的基岩运动谱, 参见图 2~4。

图 7 分别给出 7° 和 8° 时不同震中距区分时谱形状的相互比较。可看出, 7° 小震级近震在短周期部分比其它两种情况具有较大的幅值, 而大震级远震时长周期部分相对于小震级近震具有较大幅值, 且长周期部分变得平缓; 8° 时也具有同样的趋势。这个结果显然与目前国内、外强震观测分析所得的趋势完全一致。

为了同我国的强震观测资料相比较, 我们将辽宁海城地震、河北唐山地震以及四川松潘地震的平均加速度反应谱(按 7° 情况考虑)分别与本文 7° (不考虑震中距区分) 和 7° 近值同绘于图 1。图中可看出, 本文值与海城地震、松潘地震对应较好, 但与唐山地震在长周期部分差异较大。

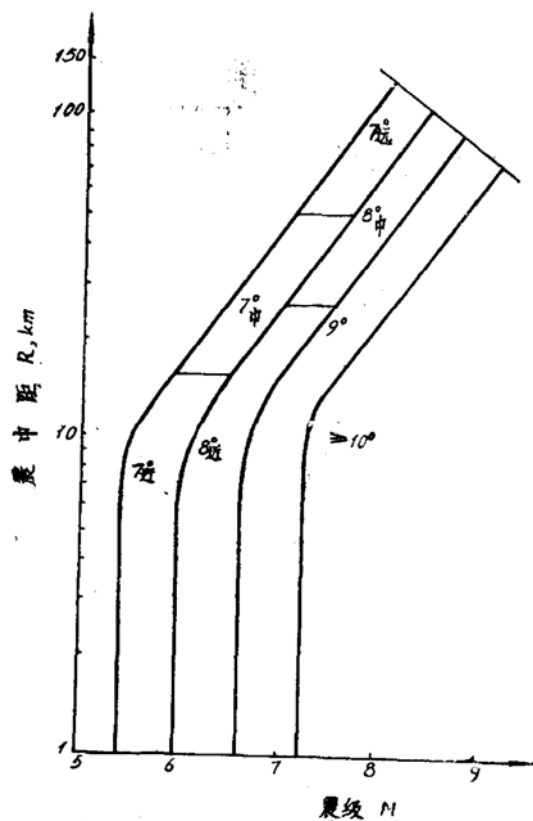


图6 等烈度分区

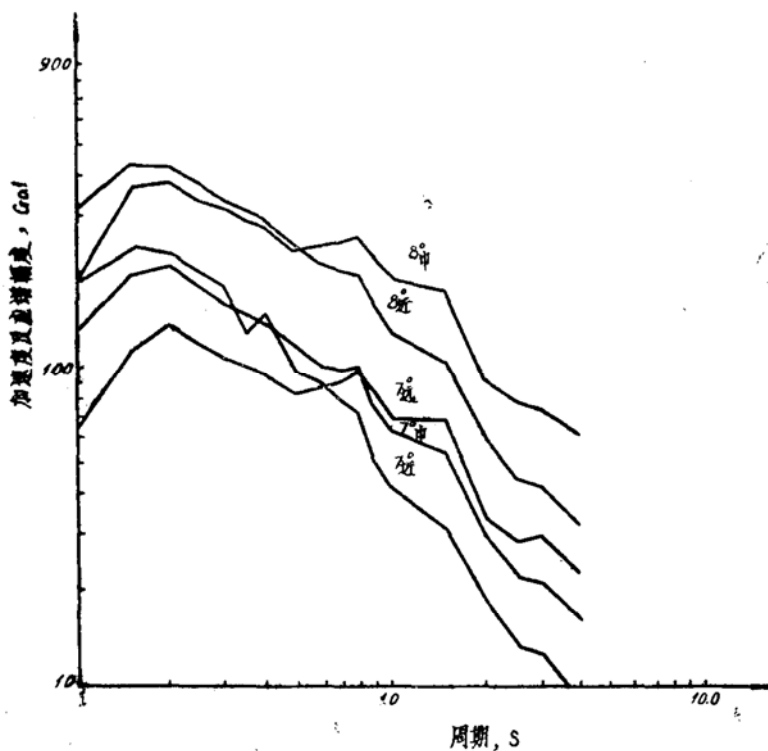


图7 等烈度不同震中距区分时谱形状比较

四、基岩输入波的产生

人造地震波大多根据一些有代表性的数字特征, 应用蒙特-卡洛法 (Monte-Carlo) 随机

产生。以功率谱密度函数来表征地面运动频率特征,是目前给出人工地震波的一种主要途径。近些年来,由于世界上大多数多地震国家较广泛地采用标准加速度反应谱进行抗震设计,因此由加速度反应谱求得相应功率谱的方法越来越受到重视。可以认为,这样合成的人工地震波作为输入具有明显的工程意义。本文采用近些年来考尔^[13]所给出的加速度反应谱与功率谱的关系式:

$$S(\omega) = \frac{\frac{2\xi}{\pi\omega} S_a^2(\omega)}{\left\{ -2\ln\left[\frac{-\pi}{\omega T} \ln(1-r) \right] \right\}} \quad (5)$$

式中 $S(\omega)$ ——功率谱;

$S_a(\omega)$ ——加速度反应谱;

r ——平均反应谱的概率水准。

求出功率谱,并用如下三角函数模型:

$$\ddot{x}_0(t) = I(t) \ddot{x}_a(t) = I(t) \sum_{k=1}^N A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k) \quad (6)$$

合成人工地震波,由此编出ASEW电子计算机程序(FORTRAN语言),其框图如图8所示。程序是由我所陈永祁等同志编制的^[14]。图9为根据该程序计算所给出的一种基岩输入人工地震波。

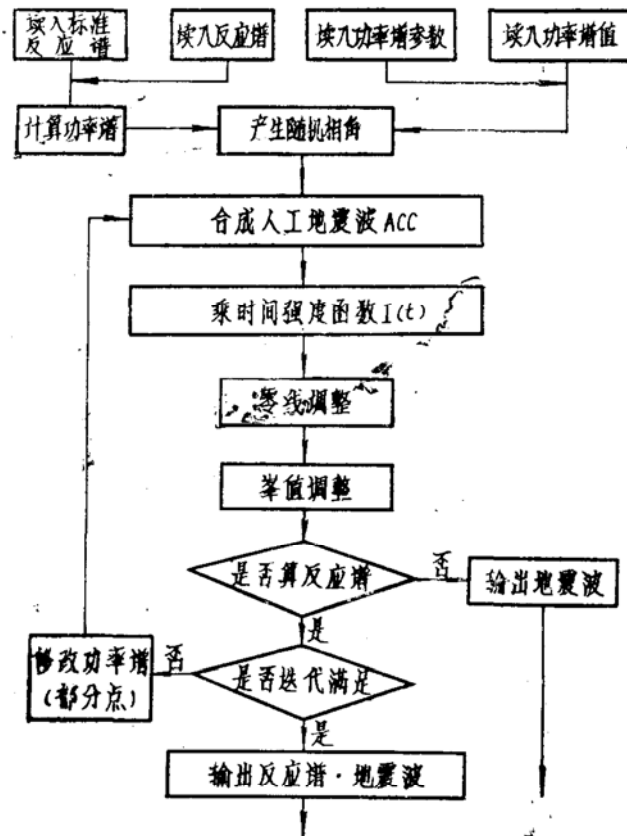


图8 ASEW 程序框图

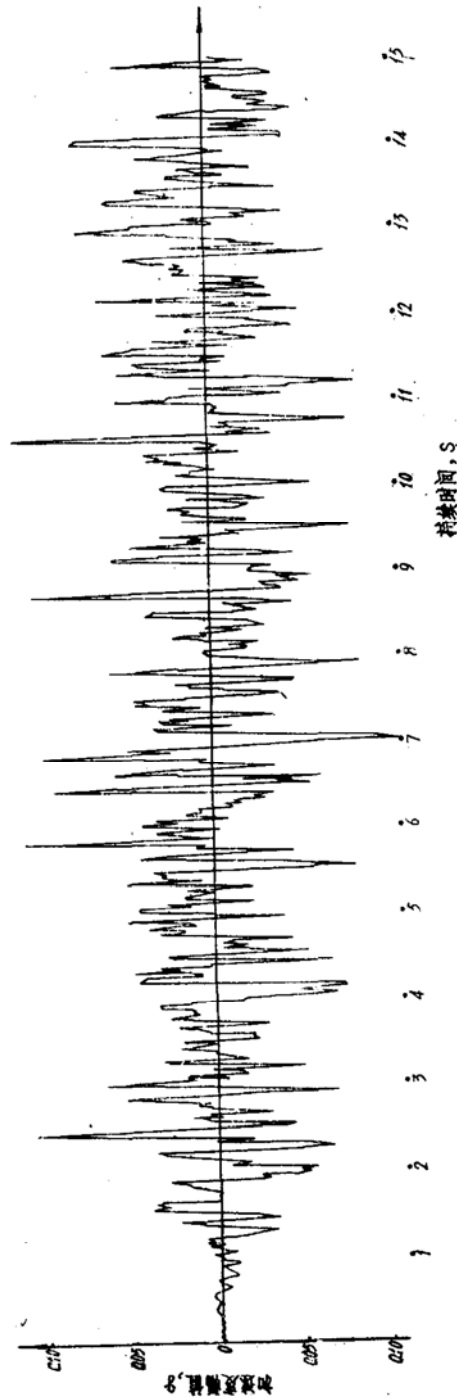


图9 基岩输入人工地震波

五、结 语

以统计方法给出基岩运动谱特征,并由此转换成人工地震波作为层状土地震反应分析输入运动是一种较为可取的方法。强震观测结果表明,软岩石的谱形状与硬岩石有很多相似之处,只是在短周期部分幅度差异较大。根据本文给出的 7° , 8° , 9° 基岩运动谱特征,按ASEW程序转换成人工地震波,便可作为层状土地震反应分析的输入运动。

本研究承蒙周锡元同志大力支持和帮助,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 嶋悦三, 基盤層, 土と基礎, Vol. 25, No. 1, 1977.
- [2] 小林啓美, 長橋純男, 地表で観測された地震動の周期特性から求めた地盤の増幅特性と地震基盤における地震動の性質, 日本建築学会論文報告集, 第240号, 1976.
- [3] 謝君斐, 石兆吉, 地面运动的反演及其在震害分析中的应用, 地震工程与工程振动, 一卷二期, 1981.
- [4] Bycroft, G.N., White Noise Representation of Earthquakes, Journal of the Eng. Mech. Div, ASCE, Vol. 86, 1960.
- [5] 片山恒雄, 岩崎敏男, 佐伯光昭, 地震動加速度応答スペクトルの統計解析, 土木学会論文報告集, No. 275, 1978.
- [6] Trifunac, M. D., Effects of Site Geology on Amplitudes of Strong Motion, Proc. of the 7th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1980.
- [7] 胡聿贤, 張继栋等, 基岩地震動参数与震级、距离的关系, 中国科学院工程力学研究所地震工程研究报告集(四), 科学出版社, 1982.
- [8] Ohsaki, Y., Sawada, Y. and Hayashi, K., Spectral Characteristics of Hard Rock Motions, Proc. of the 7th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1980.
- [9] 長橋純男, 東京で期待される地震動の強さ, 第五回日本地震工学シンポジウム, 1978.
- [10] 韓清宇, 美国新抗震设计条例对地震力计算的改进, 地震工程动态, 1期, 1981.
- [11] Heidebrecht, A. C. and Tso, Wai-keung, Proposed Seismic Loading Provision National Building Code of Canada 1985, Fourth Canadian Conference Earthquake Engineering, 1983.
- [12] 国家地震局全国地震烈度区划编图组, 中国地震等烈度线图集, 地震出版社, 1979.
- [13] Kaul, M. K., Stochastic Characterization of Earthquakes Through Their Response Spectrum, EESD, Vol. 6, No. 5, 1978.
- [14] 陈永祁, 刘锡芸, 龚思礼, 拟合标准反应谱的人工地震波, 建筑结构学报, 1981年第4期.

The Incident Motion in Seismic Response Analysis of Layered Soils

Wang Guang-jun

(Chinese Academy of Building Research, Beijing)

Abstract

This paper reviews some prevalent methods which prescribe incident rock-motion in seismic response analysis of layered soils, and we think it might be a good method to use average acceleration response spectrum in rock as characteristics of input movement for layered soils. For this reason, base on the related statistical data home and abroad, a group of typical acceleration response spectra of rock motions in accordance with different intensities (7° , 8° , 9°) and epicentral distances have then been given. Finally, this paper suggests that the Kaul's method for relating response spectrum to power spectrum can be used for producing artificial accelerograph of input movement for seismic analysis of layered soils.