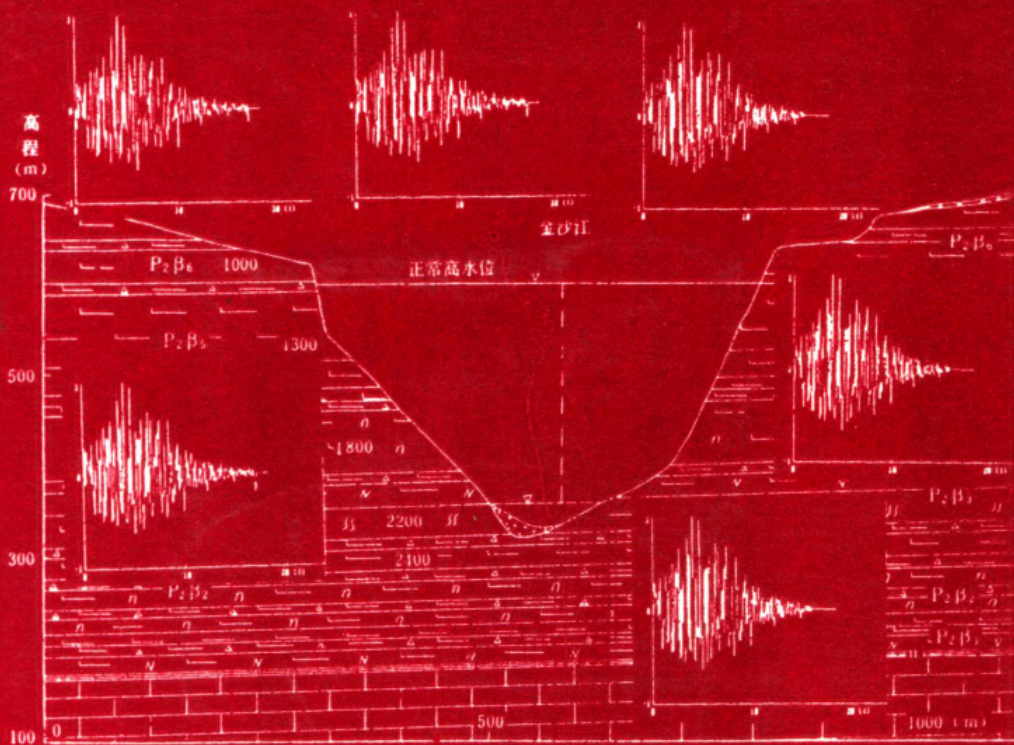


时程合成与模拟



地震出版社



56.259
717

工 程 地 震 动 时 程 合 成 与 模 拟

蒋 溥 梁小华 雷 军 著

地 震 出 版 社

1991

内 容 提 要

本书是作者在近几年工程地震动时程合成和模拟研究的基础上撰写的。

全书分为三部分：第一部分概要地介绍了有关地震动方面的概念和预测方法及资料。第二部分系统而概要地介绍了工程场地人工时程合成的主要原理、方法和相应结果。第三部分概要介绍核电、工业与民用建筑、海洋平台和水工建筑等人工地震动时程研究结果。

书中前言、第一、三章由蒋涛、梁小华撰写；第二章由梁小华、雷军、蒋涛撰写。

本书可供工程抗震设计人员、结构动力分析人员、地震动及地震工程研究人员参考。

工程地震动时程合成与模拟

蒋 涛 梁小华 雷 军 著

*

地 震 出 版 社 出版 发行

北京海淀区民族学院南路9号

北京大学印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 7.5 印张 185 千字

1991年5月第一版 1991年5月第一次印刷

印数 001-400

ISBN 7-5028-0439-0/P.281

(827) 定价:4.50 元

前 言

地震动或地面运动,是由震源释放出来的地震波引起的近地表的地面振动。地震仪可记录到该地震引起地面振动的全部或大部分过程。这一过程,我们称其为地震动时程。工程上关心和使用的地震动,大都由强震仪所记录,一般包含三个分向。地震动时程是幅值和频率随时间变化的不规则的函数。从物理量纲上来看,地震动可以表示为加速度、速度和位移等参量及其频率随时间的变化过程,分别称其为加速度时程、速度时程和位移时程。对于这样一个不规则的时间函数,一般以其幅值、频率特性和持续时间三个主要参数来表示其特征。

地震动是地震反应研究和抗震设计的基础。在静力学或准静力学抗震设计阶段,一般以地震动的幅值和谱为基础,而在目前动力学设计的阶段,则以了解结构在整个地震动时程输入过程中的动力行为为基础。因此,随着结构设计逐步向动力设计阶段发展,作为结构动力学分析的输入,地震动时程越来越显示其重要性。特别是对于大型的工程,如核电设施、水电设施、海洋平台、超高层建筑及其他特殊结构的设计分析,地震动时程越来越显示其重要性。此外,对土体动力行为、土体地震反应及其对地震影响的研究等,亦需要地震动时程。在研究结构的非线性反应时,从随机振动理论出发,需对同一集系的地震动大批采样,这样需要的是一组地震动时程。

自从 1931 年美国西部设置强震仪以来,在近 60 年的历史中,美国、日本、苏联、欧洲、大洋洲、亚洲包括中国在内都先后获得不少强震记录。但对于满足上述三个方面的应用无疑是远远不够的。特别是对工程而言,其所在场地是千变万化的,震源特征、地震机制、传播路径等也是因地、因时而异。相同或相近地质环境下的记录和相近地震动特性(地震大小、记录幅值、频谱和持时等)的记录都难找到,同一集系的地震动更难找到。在这种情况下,按一定程序人为形成与实际或预期地震特性相似的地震动过程成为必需,这就是所谓地震动的人工合成或模拟,一般称为人造地震动。产生人造地震动有多种途径,现场微秒差的连续多次爆破、工业爆破或核爆破、振动台上施加机械冲击力或使之发生电噪声,以及以一定计算程序完成数字或模拟地震动等。

从工程应用角度出发,对人工地震动时程要求主要集中在两方面:其一是满足抗震设计、结构动力分析等所需要的关于强度、频谱和持续时间等方面的参数,其二是能反映地震动本身特点或包含有和地震动记录相一致的信息。最早为工程目的用计算机进行地震动时程合成是由 Housner (1947, 1955, 1964)完成的。其后,许多研究者先后提出许多改进和发展的人工合成方法。概括起来说,按照时程产生和其特征大致可分为三组:(1)以随机脉冲迭加模型为基础的人造地震动时程。包括早期平稳随机过程模型和以后的非平稳的随机过程模型产生的时程及包括三维地震地面运动的随机模拟时程等。其中,70 年代 (Scanlan 和 Sachs, 1974)三角级数和模型合成时程的应用较为广泛;(2)以天然地震记录为基础的修正时程,其中包括 Seed (1969)用比例法产生的时程以及 Chang 等(1979)、Polnemus 等(1981)、Cakmak 等(1985)用 ARMA 模型产生的时程;(3)由震源机制和波传

播为基础的理论地震动模拟(Trifunac, 1971; Blot, 1981; Aki, 1982 等)。

作者在近些年工程地震研究中, 结合核电、水电工程和城市、矿区等地震动预测, 完成一些实际地震动时程合成。一个工程场地地震动时程合成的基础, 是地震动参数预测, 为了使读者对其有所了解, 作者在第一章中首先概要地介绍了有关地震动概念和预测方法, 特别汇集了作者收集的关于地震动预测时所必须的地震动衰减资料, 它有助于我们在实际应用中参考。第二章为地震动合成基本原理部分, 第三章是部分结果。

地震动模拟是个复杂的科研和技术实现过程, 理论和技术尚在研究探索之中。工程地震动模拟涉及到工程要求的应用过程, 不同工程有不同要求, 加上地震地质环境变化复杂, 无疑会使地震动模拟至少在目前尚不能完成其全部任务, 满足全部要求, 何况作者的研究只涉及其中一部分。许多理论和方法及其在工程应用中的问题, 都有待于进一步研究, 不断完善起来。

作 者

1990 年 12 月于北京

目 录

前 言

第一章 工程场地地震动参数评估	(1)
第一节 工程场地地震动参数确定的基本程序	(1)
第二节 地震动参数	(3)
第三节 烈度地震动衰减关系转换	(7)
第四节 工程场地地震动估算方法	(9)
第五节 松散土层地震动参数估算	(11)
第二章 合成原理和方法	(13)
第一节 比例法	(13)
第二节 拟合目标谱法	(26)
第三节 自回归滑动平均模型(ARMA)法	(33)
第四节 近场地面运动理论模拟	(37)
第五节 方法评估	(44)
第三章 工程场地地震动时程合成实例	(45)
第一节 核电工程地震动时程	(45)
第二节 工业与民用建筑地震动人工时程	(50)
第三节 海洋平台地震动人工时程	(57)
第四节 水工建筑——混凝土重力坝地震动人工时程	(60)
参考文献	(69)
附 录	(72)
I 烈度和地震动参数及其衰减公式	
II 人工合成地震动图	
III 核电基岩场地合成时程谱精度表	

CONTENTS

Preface

Chapter 1 Evaluation of ground motion at engineering

site	(1)
1 Principal procedure to determine ground motion	(1)
2 Ground motion parameter	(3)
3 Transposition of attenuation relationship about intensity to ground motion	(7)
4 Calculation of ground motion at a site	(9)
5 Calculation of ground motion at a site with unconsolidated soil	(11)

Chapter 2 Methods and ways of generated ground

motion	(13)
1 Ratio method	(13)
2 Fitting objective spectra method	(26)
3 Autoregressive moving average (ARMA) models	(33)
4 Simulation of ground motion of near source	(37)
5 Discussion	(44)

Chapter 3 Practices of synthesize and simulation of ground motion

at engineering site	(45)
1 Nuclear power plant	(45)
2 Industrial and civil architecture	(50)
3 Offshore platform	(57)
4 Concrete gravity dam	(60)

References	(69)
------------------	------

Appendix	(72)
----------------	------

- I Intensity and ground motion and its attenuation
- II Generated time history
- III Relative error of spectra with dampings

第一章 工程场地地震动参数评估

对一个具体工程场地的地震动时程的合成或模拟，都要考虑场地设计地震动特征。场地设计地震动特征包括：①峰值（PGA：峰值加速度；PGV：峰值速度和 PGD：峰值位移）；②频率特征（谱或优势周期）；③持续时间及幅值随机时间的变化特征。这些特征参数，都是根据工程场地所在地区的地震地质环境和场地地震工程地质环境而确定的。无论是理论的模拟还是经验合成，地震动时程合成的最终结果都要反映这些参数特征或以这些参数特征进行校核调整。只有这样，最终时程才能作为各类工程设计或动力分析依据。

关于场地设计地震动参数确定详细理论和方法已有专门论著（蒋溥等，1990），这里仅仅围绕和地震动合成有关的一些特征参数作一概要叙述。

第一节 工程场地地震动参数确定的基本程序

场地地震动预测的基本程序一般用图 1.1.1 来示意。从图中可知，任何一个工程场地地震动预测都涉及到三个部分，即震源、传播路径和局部场地条件。各类工程都是如此，其间差别无非是由于工程类型及其重要性不同而对各个部分进行简化考虑而已。

震源、路径和场地三个方面的效应是工程地震动研究的主体，结构和基础相互作用而导致对地震动的影响，是地震工程研究的一部分。因此，我们所涉及到的地震动主要是包含震源、传播路径、场地地质三个方面的主要特性共同的作用结果，其一般数学形式可以写成（频率域）：

$$G(\omega) = S(\omega) \cdot T(\omega) \cdot L(\omega)$$

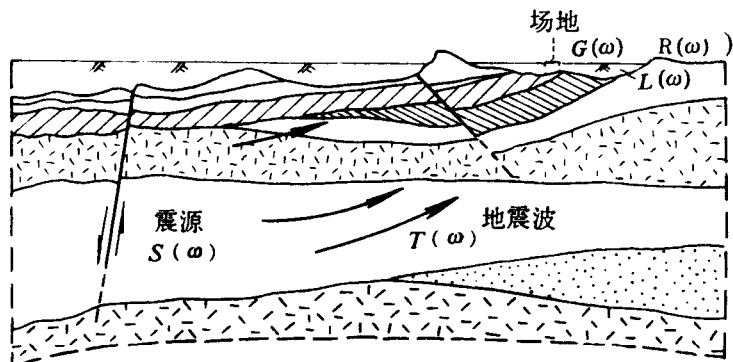


图 1.1.1 工程场地地震动预测示意图

式中， $G(\omega)$ 表示场地地震动； $S(\omega)$ 表示震源震动； $T(\omega)$ 表示波传播介质（路径）对震源震动 $S(\omega)$ 的影响（或传播路径转换函数）； $L(\omega)$ 表示局部场地地质条件对震源震动的影响（局部场地转换函数）。

在应用上式进行地震动预测分析时，一般分为两步进行，即写成

$$G(\omega) = R(\omega) \cdot L(\omega)$$

式中， $R(\omega) = S(\omega) \cdot T(\omega)$ 表示岩石地震动，主要考虑震源运动和传播路径的影响。第一步预测 $R(\omega)$ ，第二步预测 $L(\omega)$ 。从工程地震角度来看， $R(\omega)$ 的预测是大范围平均地震动预测， $L(\omega)$ 的预测是局部场地地质条件的地震动效应预测。前者是解决场地共性问题，后者是解决场地个性问题。但是，从地震动预测角度来说，岩石地震动和局部场地地震动是不可分割的两部分。岩石地震动是场地地震动预测的基础，是场地地震动分析的输入。它们共同构成地震动小区划或场地地震预测的基本内容。图 1.1.2 概括为工程场地地震动预测的基本程序框图。

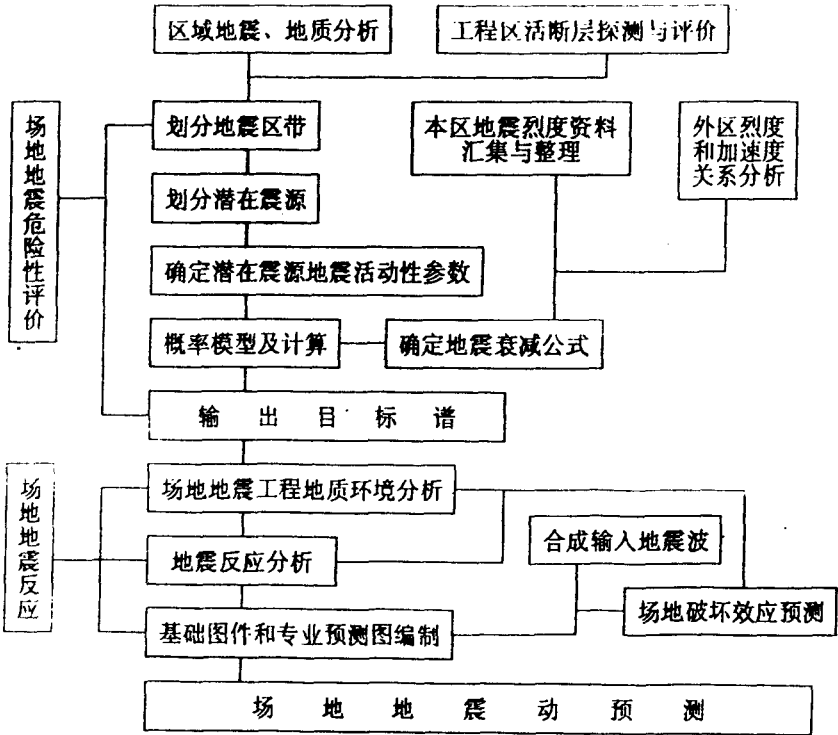


图 1.1.2 工程场地地震动预测框图

第二节 地震动参数

一、地震动振幅 (幅值)

1. 关于振幅和峰值的一些定义

以地震动幅值大小来表征地振动强度是最直观和最容易为人们所接受的。其中使用峰值为最早和最多。此外, 还有与谱及时程相关的地震动幅值。峰值系指地震动的最大值, 除近场外, 在一般情况下, 地震动垂直方向的幅值都小于水平向幅值。就其对结构物的影响而言, 危害主要来自地震产生的水平剪切运动。所以, 通常的地震动幅值都以两个水平向记录的峰值为基础, 或取其最大一个或取其平均值作为地震动的幅值, 或取两个水平分量的最大值的矢量和。

地震动峰值的大小反应了地震过程中某一时刻地震动的最大强度。在以静力学或准静力学为基础的抗震结构设计中, 地震动峰值的大小直接反应了地震力及其产生的振动能量和引起结构地震变形的大小, 是地震时对结构影响大小的尺度。在以烈度为基础作为抗震设防标准时, 往往对相应的烈度给出相应的峰值加速度。例如, 我国的新地震烈度表(1980)规定, 烈度为Ⅶ, Ⅷ, Ⅸ, X时对应的峰值加速度平均值分别为 0.125, 0.25, 0.5, 1.0g。工程地震研究中还常见如表 1.2.1 所定义的峰值。

表 1.2.1 地震动峰值一览表

峰值名称	峰值定义	作者
有效峰值加速度 (EPA)	$EPA = Sa / 2.5$ $Sa, 0.1-0.5$ 秒, 阻尼比为 5% 加速度谱值平均值	ATC-3, 1978
有效峰值加速度 (EPV)	$EPV = Sv / 2.5$ $Sv, 1$ 秒附近, 阻尼比为 5% 速度反应谱平均值	
等效简谐振动峰值	将 $a(t)$ 等效为简谐振动, 取 $0.65a_{max}$	Seed
等反应谱有效加速度 a_e	$a_e = a' / 0.90$, a' 为削去 $a(t)$ 峰尖, 使其反应谱强度 SI 为原反应谱的 90% 时最大加速度值	Ohsaki, 1980
持续加速度 a_s 和 持续速度 V_s	$a(t)$ 中第 3 至第 5 个最大加速度为持时加速度 $a = \frac{2}{3} a_{max}$, $V_s = \frac{2}{3} V_{max}$	Nattle, 1979
概率有效峰值	按概率分布函数给出具有概率意义的概率有效峰值, 一般以峰值大小与发生次数构成的组织图上 90% 或 95% 不超越概率的加速度峰值为有效值	Mortgat, 1979 Bolt, 1982
平均振幅 $\bar{a}$	$\bar{a} = Ca_{max}$, $C = \frac{1}{10a_{max}} \sum_{i=1}^n a_i$, a_i 为 $a(t)$ 中前 10 个大振幅	胡聿贤, 1988
均方根加速度 a_{rms}	$a_{rms}^2 = \sigma_a^2 = \frac{1}{Td} \int_0^{Td} a^2(t) dt$, Td 为振动持时	Arias, 1969

2. 竖向与水平向地震动加速度之间的关系

根据现有地震动记录, 垂直向地震动加速度 a_v 与水平向地震动加速度 a_H 之间比值的平均值一般在 $1/2 \sim 2/3$ 之间, 在近震中或在发震断层上时, 比值 a_v/a_H 的离散性变大。从个别记录来看, 比值可以很大, 也可以很小。胡聿贤(1988)根据包括苏联 1976 年格兹里地震、1979 年美国南加州英佩里亚尔地震以及几次近期地震, 如 1979 年南斯拉夫地震、1976 年我国唐山地震及其余震资料, 得出如下结论:

(1) 当加速度最大值不超过 $0.5g$ 时, a_v 总是小于 a_H 平均值, a_v 大约是 a_H 的 $1/2 \sim 2/3$;

(2) 若不分加速度大小而只分震中距或距断层远近, 对于近断层处 (断层距 $D < 10$ 公里) 的数据, a_v/a_H 的比值平均值仍为 $1/2 \sim 2/3$ 之间, 只是离散性大些;

(3) 当加速度最大值很大时 ($> 0.5g$), 则平均而言, a_v 接近于 a_H 。这些大的加速度值都是在断层距 $D < 10$ 公里之内得到的。

3. 其他地震动幅值参数之间的关系

大崎顺彦 (Ohsaki et al., 1980) 研究地震动幅值 a , v , d 和谱强度之间的关系, 其结果列于表 1.2.2。

表 1.2.2 一些地震动参数之间的相关性 (比值和方差)

水平向 竖向	a		v		d		SI_0		$SI_{0.2}$	
	系数	方差	系数	方差	系数	方差	系数	方差	系数	方差
加速度 a	1.669	0.168	0.0961	0.255	0.389	0.369	0.579	0.282	0.227	0.202
	0.523	1.472	8.701	1.799	15.98	2.339	1.429	1.914	3.945	1.529
速度 v	9.921	0.264	1.753	0.184	0.440	0.183	5.921	0.130	2.242	0.128
	0.008	1.837	0.448	1.528	2.000	1.124	0.362	1.349	0.431	1.343
位移 d	17.67	0.366	1.839	0.186	1.555	0.237	11.81	0.245	4.290	0.278
	0.046	2.323	0.476	1.535	0.468	1.726	0.0710	1.758	0.181	1.897
谱强度 I_0	1.551	0.271	0.157	0.167	0.0741	0.954	1.887	0.135	0.371	0.110
	0.551	1.866	5.821	1.469	1.063	1.954	0.489	1.365	2.610	1.288
谱强度 $I_{0.2}$	4.819	0.206	0.469	0.158	0.216	0.299	2.855	0.100	2.038	0.156
	0.186	1.607	2.035	1.439	3.614	1.991	0.334	1.259	0.435	1.432

二、地震动谱

峰值仅仅表示地震动某一局部、某一时刻振幅的大小, 而地震动谱则表示地震动频域特征。因此, 它是频率域中地震动的特征参数。

1. 地震反应谱

所谓地震反应谱, 就是单自由度弹性系统对于某个实际地震加速度的最大反应 (可以是加速度、速度和位移) 和体系的自振特征 (自振周期或频率和阻尼比) 之间的函数关

系，其数学表达式为：

$$\begin{aligned} S_d &= |y(t)|_{\max} \\ S_v &= |\dot{y}(t)|_{\max} \\ S_a &= |\ddot{y}(t) + \ddot{x}(t)|_{\max} \end{aligned}$$

式中， S_d ， S_v ， S_a 分别为相对位移反应谱、相对速度反应谱和绝对加速度反应谱，统称为反应谱。反应谱也是 ω 和 ζ 的函数。

2. 拟反应谱、三联反应谱、标准反应谱

(1) 拟反应谱：若系统的阻尼很小，这时可得到如下近似式：

$$\begin{aligned} S_v &\approx \omega S_d = V \\ S_a &\approx \omega S_v \approx \omega^2 S_d = A \end{aligned}$$

我们称

$$\begin{aligned} V &= \left| \int_0^t \ddot{X}(\tau) e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \cos\omega(t-\tau) d\tau \right|_{\max} = \omega S_d \\ A &= \left| \omega \int_0^t \ddot{X}(\tau) e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sin\omega(t-\tau) d\tau \right|_{\max} = \omega^2 S_d = \omega V \end{aligned}$$

为 $\ddot{X}(t)$ 的拟（伪）速度反应谱，和拟（伪）加速度反应谱。

(2) 三联反应谱：由于拟速度反应谱、拟加速度反应谱及位移反应谱之间有一个十分简单的关系：

$$A = \omega V, \quad V = \omega S_d$$

若取其对数，便可得到：

$$\begin{aligned} \log A &= \log V + \log \omega \\ \log S_d &= \log V - \log \omega \end{aligned}$$

也就是这些谱的对数值和频率的对数值有一个简单的线性关系，这样就有可能把三个谱值画在同一个坐标图上，构成三联谱图。

(3) 标准反应谱：在实际应用中，取谱值与地震动的最大值之比作为纵坐标，横坐标仍以频率或周期表示，构成一无量纲的反应谱。这类反应谱称为标准反应谱。标准反应谱定义如下：

$$\text{标准加速度反应谱: } \frac{\left| \ddot{Y}(t) + \ddot{X}(t) \right|_{\max}}{\left| \ddot{X}(t) \right|_{\max}} = \frac{S_a}{\left| \ddot{X} \right|_{\max}}$$

$$\text{标准速度反应谱: } \frac{\left| \dot{Y}(t) \right|_{\max}}{\left| \dot{X}(t) \right|_{\max}} = \frac{S_v}{\left| \dot{X} \right|_{\max}}$$

标准位移反应谱:
$$\frac{|Y(t)|_{\max}}{|\dot{X}(t)|_{\max}} = \frac{S_d}{|X|_{\max}}$$

标准反应谱的概念, 也同样可用于拟反应谱中, 如标准拟加速度反应谱为:

$$\frac{\omega^2 S_d}{|\ddot{X}|_{\max}} = \frac{A}{|\ddot{X}|_{\max}}$$

标准反应谱通常还称为动力放大系数, 如

加速度动力放大系数:
$$\beta_A = S_a / |\ddot{X}|_{\max}$$

速度动力放大系数:
$$\beta_V = S_v / |\dot{X}|_{\max}$$

位移动力放大系数:
$$\beta_D = S_d / |X|_{\max}$$

四、Husid 图和地震动的持续时间

Husid (1969) 提出一个已知加速度能量随时间上升的图, 用来估价地震动记录的振动水平。用积分

$$\int_0^t a^2(t) dt$$

来定量表示振动强度随时间 t 的变化。式中, $a(t)$ 为地震动加速度记录时程, t 表示给定的积分时段。若将此积分除以该记录 $a(t)$ 在整个记录时段 t_e 上的积分值, 并用标准变量 $h(t)$ 来表示:

$$h(t) = \frac{\int_0^t a^2(t) dt}{\int_0^{t_e} a^2(t) dt}$$

式中, t_e 为地震动总记录时间或总持续时间。记录始点 $h(0)=0$, 记录终点 $h(t_e)=1$ (或百分之百)。 $h(t)$ 随时间变化的图即为 Husid 图 (图 1.2.1)。从图中可以看出, 任意一个强震记录或地震动时程对应其 Husid 图上有相对一致的特征, 即它们由三部分组成:

- (1) 初始部分: 主要是由 P 波构成的微弱振动, 它对应着 Husid 图中缓变的斜率;
- (2) 中间部分: 主要由 S 波所组成的强振动部分, 它对应着 Husid 图中陡斜率;
- (3) 最后部分: 它对应着非直达体波或面波。在岩石地面这部分记录较弱, 在软土地面上的记录显示有中等强度, 对应着 Husid 图中平滑部分。

Trifunac 和 Brady (1975) 定义的持时是和结构反应有关, 他根据输入结构的总地震能的百分数来定义持时。他用 Husid 图 (图 1.2.1) 规定 90% 地震能量作为持时定义, 即从 5% 上升到 95% 作为持时间隔。

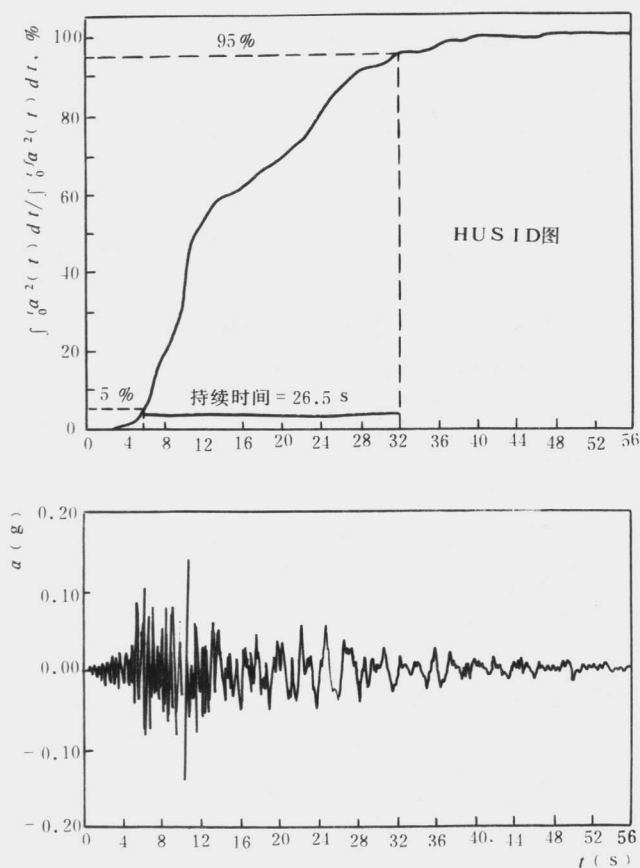


图 1.2.1 大震记录的 Husid 图

第三节 烈度—地震动衰减关系转换

地震动衰减研究的目的是为了进行地震动参数的估算和预测。原则上讲，一旦一个地区地震动衰减方程建立以后，就可以应用这一方程进行该地区场地地震动的预测。但在很多情况下，由于场地缺乏足以直接建立地震动衰减方程的数据，为工程地震动预测，往往通过烈度衰减关系来推导出地震动衰减关系，以满足工程地震动参数预测的需要。从目前工程实践和地震动研究的观测资料现状来看，在实行这一途径方面，大致存在有下列具体方法。

1. 简单烈度地震动对应法

主要是根据世界范围地震烈度和地震动观测资料，建立烈度和地震动参数之间的一一对应关系，根据烈度和地震参数之间的关系，求得场地相应烈度条件下的地震动参数，这

一方法尽管在建立烈度和地震参数(峰值加速度、速度、位移、谱烈度等)之间关系时存在有很大的离散性,但因其简单、直观,因而应用也极为广泛。众多烈度表中的地震动参数反映了这一状况,我国现行抗震规范中,用以得出设计地震动加速度的方法是利用烈度估算地震动参数的典型代表(胡聿贤、张敏政,1984)。

2. 构造类比借用法

根据两个地区构造类比相似性直接借用邻区地震动衰减曲线,并根据烈度和地震动的对应关系,进行场地地震动估算。

3. 有感面积法

这是由 Battis(1981)提出的修正区域地震动衰减关系的一种方法。有感面积法包含四个经验关系的确定:

- 1)在某个参照区,要确定出近场加速度和震中烈度或震级之间的关系;
- 2)在研究地区,需要知道震级和有感半径之间的关系;
- 3)对参照或感兴趣的地区,也要估计出震中烈度和震级之间的关系;
- 4)确定有感地区加速度大小。

Battis 的方法是以烈度资料中首($R=10\text{km}$)加尾($\text{MMI}=\text{III}^\circ$ 的有感范围)为界的。所以有人称其为首尾两端法(胡聿贤、张敏政,1984),其缺点可能在于仅仅考虑到衰减曲线的首尾两端,而用先验公式来内插中间距离 R 处的地震动参数,忽视了中间距离可能的烈度变化差异(胡聿贤、张敏政,1984)。

4. 限制性烈度、地震动转换法

在一定限制性条件下,例如在一定震级或震中(震源)距条件下,烈度和地震动幅值(包括反应谱幅值)可能会有其一定的对应关系。所谓“限制性烈度、地震动转换”也是从这一基本点出发的。它是在强度和距离两个制约条件下,即在对地震动谱和持续时间施加某种约束条件下,寻找烈度和地震幅值之间的对应关系。应用这一基本原理,附带某些假设,就可以根据一个地区的烈度衰减关系和地震动衰减关系以及预测场地地震烈度的经验关系,建立预测场地地震动的衰减关系。在使用这一方法转换时,强调如下三点是必要的:

(1)相互转换的两个地区的烈度假定是分别一一对应的。特别是两个地区的烈度应有相同或相近的对应标准。例如,要用美国地震动参数转换出中国地震动参数,则假定美国的 MM 烈度表和我国 12 度烈度表可一一对应,或有相同划分标准等等。

(2)一个地区地震动衰减在一定限制条件下可以由烈度衰减所反映,因此,两个地区地震动衰减特征差异,也可以由烈度衰减特征差异来反映。

(3)因为两个地区烈度、加速度的转换共需三个方程,为叙述方便,分为参照地区和预测地区。其中参考地区需要两个经验方程:一个是烈度衰减方程 $I_1(M, R)$, 另一个是地震动衰减方程 $Y_1(M, R)$, 第三个是预测地区烈度衰减方程 $I_2(M, R)$ 。每个方程都有一定场地条件应用限制。因此,一一对应的场地条件不应混淆。表 1.3.1 列出地区经转换后公式适用场地条件(以岩石和平均土层为例)。对我国大部分地区,所建立的地震烈度经验公式 $I_2(M, R)$, 均以平均土为基础的,所以,要得到岩石场地 $Y_2(M, R)$, 原则上则应满足表 1.3.1 中第 5 项条件。

表 1.3.1 转换后公式适用场地条件

参 照 地 区			预 测 地 区	
参量	$I_1(M,R)$	$Y_1(M,R)$	$I_2(M,R)$	$Y_2(M,R)$
方 程 所 代 表 场 地 条 件	岩石	岩石	岩石	岩石
	平均土	平均土	平均土	平均土
	岩石	岩石	平均土	平均土
	平均土	平均土	岩石	岩石
	平均土	岩石	平均土	岩石
	岩石	平均土	岩石	平均土

第四节 工程场地地震动估算方法

场地地震动的估算，是具体工程场地地震危险性评价的主要内容之一。涉及的内容有：

- 1.场地的地震烈度；
- 2.场地峰值地震动参数，其中以峰值加速度确定最为普遍。这里应包括两方面内容：一是岩石地面峰值加速度，二是场地平均土层条件下的峰值加速度；
- 3.场地岩石反应谱；
- 4.用于场地地震反应分析的输入地震动时程。

场地地震危险性评价主要涉及下列三个主要问题：

- 1.场地及其周围（一般 200—300 公里为半径的范围，特殊情况下可扩至 400 公里以外范围）震源确定和地震活动性的估计。
- 2.场地周围烈度和地震动衰减特征。
- 3.采用适当的模型定量估计场地的地震危险性。

目前，场地地震危险性评价一般采用确定性和概率法来完成。本节主要概要地介绍构造地震法、历史地震法、统计法、地震危险性概率分析等具体方法。

1.构造地震法

(1)根据对场地及其周围构造活动、断裂活动，地震活动及其构造力学条件和成因机制等地震地质环境分析研究，划分地震区带，研究每个区带内强震发生背景及区带活动性差异划分出地震危险区或潜在震源；

(2)通过地震区带内地震时空分析和构造类比，在详细研究危险区或潜在震源地震地质特征条件下，确定其某一给定时间内地震危险性或最大可信地震震级；

(3)根据地震活动特点和震源构造特点，确定震源类型（点源、线源或其它类型源）

和震源深度;

(4)建立或选用适合于本地区地震烈度或地震动衰减公式;

(5)以危险区或潜在震源距场地最短的距离和相应震级,计算场地影响烈度或地震动参数;

(6)根据计算结果,择其最大值为场地地震动;

(7)根据已有地震动优势周期和持续时间公式,计算出场地优势周期和持续时间。在必要时可根据谱的衰减公式,计算出工程场地地震反应谱。

2.历史地震法

(1)根据历史地震记载或仪器记录,确定出工程场地及临近地区历史地震的确切位置、震级、震中烈度、震源深度等参数。

(2)应用烈度法和震级法分别计算出工程场地地震动有关参数。

①烈度法:选用适合于工程地区或根据烈度资料拟合出本地区烈度衰减公式,计算出工程场地每次地震的影响烈度。择其最大烈度为其工程最大烈度。在根据工程场地烈度适当转换方法,估算出场地地震动。

②震级法:根据震源区震级大小,应用地震动震级和震源距(或震中距)关系式,计算出工程场地可能的地震参数。

(3)对烈度法和震级法结果进行对比评估,根据工程要求择其最大或综合确定之。

(4)由于历史地震记载的不完备性而导致不足以计算或不足以相信时,则需要考虑工程场地地震地质环境特征,对计算结果进行可信性评估,在评估基础上进行必要调整,以确定出符合工程安全要求的地震动参数。

3.统计法

(1)和历史地震法一样,完成该步骤(1)和(2)。

(2)对计算结果进行统计分析得出给定值 y (烈度或地震动) 的事件的年发生率:

$$V(Y) = N(y) / T$$

式中 $N(y)$ 为 Y 超过 y 的事件发生次数, T 为历史地震跨越的时间(年),则在 t 年内场地 Y 超过 y 的事件发生次数为:

$$N(Y, t) = V(y) t$$

(3)给定 t , 令 $N(Y, t) = 1$, 则可以得到相应的 Y_t 值。这里 Y_t 表示未来 t 年内可望发生一次的地震动参数。

(4)对上述结果同样应根据历史地震资料的完整性,进行必要可信度论证,并和工程场地地震地质环境进行综合评估,在其基础上,进行必要调整以满足工程地震动的需要。

4.地震危险性概率分析

地震危险性概率分析是以“超越概率”来表示场地的地震危险性。常用的术语是场地地震危险性分析。地震危险性概率分析是用概率模型表示不确定性,概率模型根据固有的偏差或不完善的知识估计不确定性的来源。它不仅给出场地地震危险性而且亦给出危险性的大小(概率)。