

# 爆炸地震动的反应谱拟合

庄兆铃

(工程兵工程学院)

**摘要** 本文提出采用拟动力试验方法解决爆破工程和防护工程中由于炸药爆炸和核爆炸地震动而引起的安全问题和结构抗震问题, 并提出采用该方法时应解决的爆炸地震动的设计反应谱和爆炸地震动人工模拟的反应谱拟合技术。

**关键词** 设计反应谱 爆炸地震动 反应谱拟合 拟动力试验

## 1. 引言

为了抗御天然地震破坏的抗震工程研究已有六十多年的历史。工程结构抗震分析经历了静力法和反应谱法两个阶段, 现正向第三个阶段的时程分析法过渡。对于重要结构, 如核电站、高层建筑、海洋平台等结构的抗震设计, 已在规范中规定用加速度时程曲线进行动力分析。

在爆破工程和防护工程中所遇到的更多的问题是炸药爆炸和核爆炸地震动所引起的问题和抗震问题。爆破地震动和天然地震动相比有一些不同的特点。主要表现在前者的能量较低、振动强度随距离衰减较快、振动持续时间较短而振动的卓越频率较高。解决爆破安全和结构抗震问题, 长期以来均采用某一地震参数, 如加速度、速度或位移的最大值作为衡量结构和建筑物是否安全的评定准则。这种以单一参数与经验统计数值为基准的方法有很大的局限性和不可靠性。近几十年来, 人们普遍认识到地震动的峰值、频谱特性和持续时间这三个要素对结构反应的重要影响。我国从七十年代后期开始引用反应谱理论解决结构安全和抗震问题, 但反应谱法基于线性叠加原理, 因此对一些非线性反应就不再适用。对一些重要的工程最好采用时程分析法。在时程分析法中, 地震动的时间过程是必需的数据。由于地震记录的数量有限, 而且因震源特性、震中距离、场地条件等的不同, 情况非常复杂, 单靠实际测试的时程曲线不能满足多方面的要求, 因此在抗震设计中, 地震动的人工模拟得到了很大的重视, 并在七十年代末发展了拟动力试验方法, 为解决工程结构和建筑物的抗震设计提供了一套比较理想的方法和手段。为了使这种方法有效地应用于重要的爆破振动安全研究和结构抗震设计, 必须着重解决以下三个问题, 现分述如下。

## 2. 爆炸地震动的设计反应谱

鉴于目前大多数国家都采用反应谱作为抗震设计的依据, 因此以反应谱作为目标谱拟合相应的人工地震波就具有更大的现实意义。

反应谱的概念是1933年首先由比奥特 (M. Biot) 提出的。所谓反应谱理论就是以单质点弹性体系在实际地震过程中的反应为基础来进行结构分析的一种理论。单质点弹性体系对实际地震过程的反应可用下面的微分方程式表示

$$\ddot{x} + 2\xi\omega\dot{x} + \omega^2x = -\ddot{x}_g \quad (1)$$

式中 $\ddot{x}$ 、 $\dot{x}$ 、 $x$ 分别为质点相对于地面的运动加速度、速度和位移； $\ddot{x}_g$ 为地震加速度； $\xi$ 、 $\omega$ 分别为单质点弹性体系的无因次阻尼比和无阻尼自振圆频率。

方程式(1)可用Welson- $\theta$ 法直接积分求解，求得对应于某一个 $\omega$ 和 $\xi$ 值下的结构响应全过程，并求得其最大值。对于每一条加速度实测波形，可用上述方法求得最大动力响应与 $\omega$ 、 $\xi$ 的关系曲线，此即为反应谱曲线。加速度反应谱曲线，其横坐标是结构自振周期，纵坐标为结构最大绝对加速度与地面运动最大加速度之比值，即 $(\ddot{x} + \ddot{x}_g)_{\max} / (\ddot{x}_g)_{\max}$ 。

图(1)是我们在上海地区饱和软土中用小药量(小于1公斤)地下爆炸时不同距离处实测加速度波形求得的加速度反应谱曲线。由图可见，各组反应谱曲线不仅形状相同，峰值和峰值所对应的结构周期也非常接近。因此可以方便地作出这些谱曲线的包络线(图中粗实线)作为设计用的反应谱，这就是所谓设计反应谱。

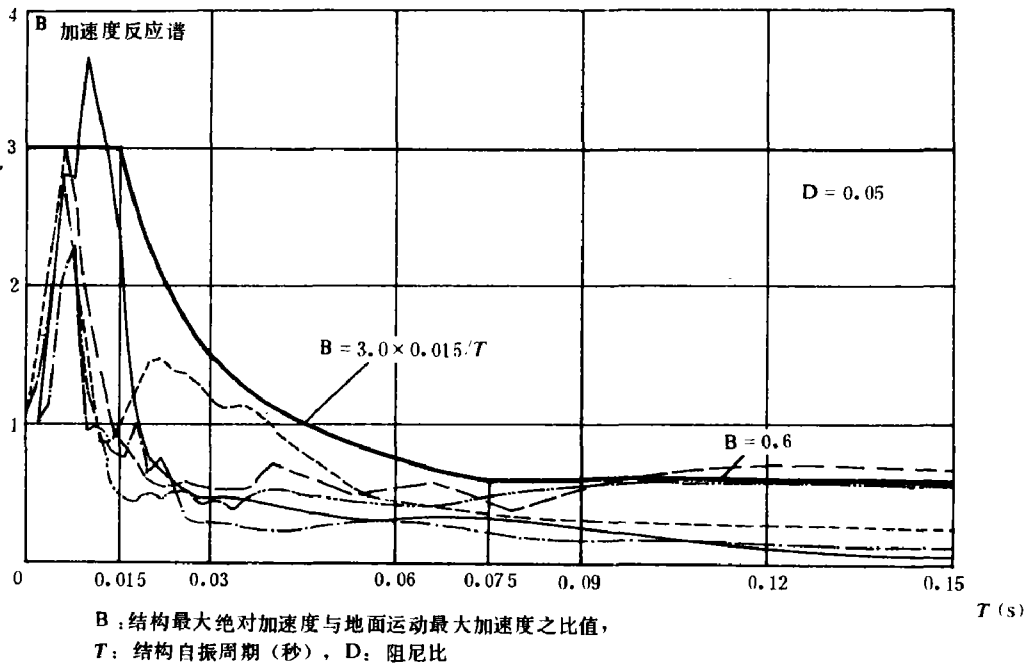


图1 加速度反应谱和设计反应谱

Fig. 1 Response spectrum of acceleration and response spectrum of design

### 3. 爆炸地震动的模拟与反应谱拟合

一次爆炸所引起的地震动，受到各种不确定因素的影响，因此是一个随机过程。而一次地震记录只是这一过程的一次实现，有一定的偶然性。人们从大量实际记录的统计特性出发，采用Monte-Carlo法产生一系列随机过程的样本，这样生成的地震波，不仅数量不限，而且比单一记录更具代表性。在使用时，可以有目的地按照人们已掌握的一些条件去模拟某一类特定的地震波，这就是地震动的人工模拟。

人工模拟地震动已有四十多年的历史。在此期间，各国学者提出了各种不同的模型，其中使用最广泛的是Scanlan和Sachs<sup>[1]</sup>在1974年提出的用三角级数迭加来模拟地震动加速度。它的基本思想是用一组三角级数之和构造一个近似的平稳高斯过程，然后乘以强度包线，

以得到非平稳的地面运动加速度时程。其数学表达式为

$$\ddot{x}_g(t) = f(t) \sum_{k=0}^n A_k \cos(\omega_k t + \varphi_k) \quad (2)$$

式中  $f(t)$  为强度包线函数;  $A_k$  和  $\omega_k$  分别为第  $k$  个频率分量的幅值和频率;  $\varphi_k$  为  $(0, 2\pi)$  区间内均匀分布的随机相角。

按照式 (2) 的模型, 首先要构造一个平稳的高斯过程

$$a(t) = \sum_{k=0}^n A_k \cos(\omega_k t + \varphi_k) \quad (3)$$

三角级数各分量幅值可由给定的功率谱密度函数  $S(\omega_k)$  求得

$$\begin{aligned} A_k &= [4S(\omega_k)\Delta\omega]^{1/2} \\ \begin{cases} \Delta\omega = 2\pi/T \\ \omega_k = 2\pi k/T \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $T$  为加速度时程曲线的持续时间。

为了采用加速度设计反应谱作为模拟的目标, 可利用已知的反应谱与功率谱的近似转换关系式<sup>[2]</sup>

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

式中  $S_a^T(\omega) = a_{max} \cdot \beta(\omega)$  为给定的设计加速度反应谱, 其中  $\beta(\omega)$  为加速度放大倍数反应谱,  $\xi$  为阻尼比,  $P$  为反应超越概率。

在数值计算中, 通常用快速傅氏变换 (FFT) 技术进行三角级数求和, 这时式 (3) 可写成傅氏变换的形式

$$a(t) = \sum_{k=0}^n C_k e^{j\omega_k t} \quad (6)$$

式中  $C_k$  为  $a(t)$  的傅氏谱

$$C_k = |C_k| \exp j\varphi_k \quad (7)$$

由 (4) 式可得到

$$\begin{aligned} |C_k| &= \begin{cases} [4S(\omega_k)\Delta\omega]^{1/2} & k=0, \frac{n}{2} \\ [S(\omega_k)\Delta\omega]^{1/2} & k=1, \dots, \frac{n}{2}-1 \end{cases} \\ C_k &= C_{n-k}^* & k = \frac{n}{2} + 1, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (8)$$

对式 (7) 进行傅氏逆变换, 即可得到式 (3) 所示平稳高斯过程。

强度包线可选用图 2 所示的常用形式。

强度包线的数学表达式如下

$$f(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2 & 0 \leq t < t_1 \\ 1 & t_1 \leq t < t_2 \end{cases} \quad (9)$$

$$\exp[-c(t-t_2)] \quad t_2 \leq t$$

将式(3)与(9)相乘,即得到式(2)表示的模拟地震波的初始过程。为了提高拟合精度,一般可采用调整傅氏幅值谱的办法进行迭代修正,直至获得满意结果为止。上述过程可编成程序自动在计算机上完成。

#### 4. 拟动力试验

由于计算机人工模拟地震波的成功研究,七十年代末又发展了一项新的试验方法——拟动力试验方法。这是一种半理论半实验的非线性地震反应分析法。它把计算机分析与恢复力实测数据相结合,这个恢复力不是假定的,而是由结构模型中直接测量得到的。

拟动力试验设备由两大部分组成:一是加载系统,包括反力墙、台座和电液伺服作动器;二是数控和数据计算系统,包括用于控制和数据处理的专用计算机。

这种试验方法的基本原理可举最简单的单自由度系统的振动过程加以说明,对于多自由度系统,其原理完全相同。

一个单自由度振动过程的振动方程式为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + p = -m\ddot{x}_g \quad (10)$$

式中 $m$ ,  $c$ 为结构物的质量和阻尼系数; $\ddot{x}$ ,  $\dot{x}$ 为结构物反应加速度和速度; $p$ 为结构物的恢复力; $\ddot{x}_g$ 为地面运动加速度。

电子计算机在对振动微分方程式进行数值解的时候,可得到每一时刻结构的位移 $x$ ,并施加到结构上去,同时实际测量结构受到的恢复力 $p$ ,然后将 $p$ 又回输到计算机中进行下一步的计算。如此反复进行就可得到动力过程中结构的动力反应。

#### 参 考 文 献

- [1] Scanlan, R. H., Sachs, K., Earthquake Time Histories and Response Spectra, *J. of eng. Mech. Div., ASCE*, 100 (EM4) (1974).
- [2] Kaul, M. K., Stochastic Characterization of Earthquakes Through Their Response Spectrum, *EESD*, 6 (5) (1978).
- [3] 陈永祁等, 拟合标准反应谱的人工地震波, *建筑结构学报*, (1981, 4).
- [4] 霍永基, 施俊跃, 地面结构爆破地震响应动力分析法, 内部报告 (1987, 7).
- [5] 赵西安, 用计算机-试验机联机系统进行结构拟动力试验的方法, *建筑结构学报*, (1986, 5).
- [6] 胡聿贤, 何训, 考虑相位谱的人造地震动反应谱拟合, *地震工程与工程振动*, 6 (2) (1986).

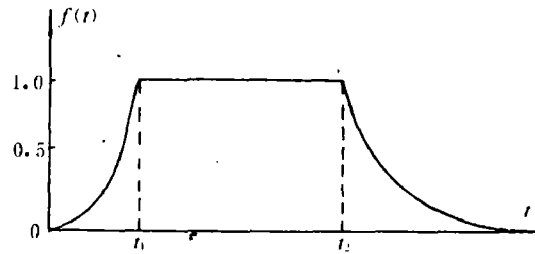


图2 强度包线

Fig. 2 Intensity envelope

## RESPONSE SPECTRUM COMPATIBLE WITH EXPLOSIVE GROUND MOTIONS

Zhuang Zhaoling

*(Nanjing Engineering Institute of Engineer Corps)*

**ABSTRACT** This paper presents a method of pseudo-dynamic test which could resolve problems of safety and vibrational proof of structures in the explosive and proofing engineering that results from ground motions by explosion.

It also presents the design of the response spectrum of the explosive ground motion and its compatible technique with the response spectrum.

The approach on generating artificial accelerograms presented here is on the basis of approximate relationship between the acceleration response spectrum and its power spectrum.

The method of pseudo-dynamic test of structure by computer-actuator on-line system is a new experimental method. It can reflect the actual seismic behavior and dynamic response of structures under earthquake motion and can test large scale models as well as full size structures.

**KEY WORDS** design of the response spectrum, explosive ground motion, compatible with response spectrum, pseudo-dynamic test.