

冲击响应谱频率特征值法研究

赵秦晋 李伯松

(洛阳水利工程技术研究所)

摘要 本文以几次地下核爆炸实测波形为例,分析了响应谱的特点,建立了计算响应谱频率特征值的经验公式,介绍了绘制冲击响应谱的频率特征值法。对特定条件下的冲击响应谱可按该法绘制。

关键词 冲击 响应谱 频率特征值

一、引言

隔震结构在爆炸冲击作用下的响应可以用冲击响应谱简要地描述,获得了特定环境中的冲击响应谱,就可以进行结构隔震设计。冲击响应谱是单自由度线性系统对特定地运动响应的最大值随系统阻尼和固有频率变化的图谱。对于初始静止,阻尼比 $\xi \ll 1$ 的系统,响应谱的数学表达式为^[1]

$$S_D(\xi, f) = (2\pi f)^{-1} \left| - \int_0^t \ddot{x}(\tau) \exp[-2\pi f \xi(t-\tau)] \sin[2\pi f(t-\tau)] d\tau \right|_{\max} \quad (1)$$

$$S_V(\xi, f) = \left| - \int_0^t \dot{x}(\tau) \exp[-2\pi f \xi(t-\tau)] \cos[2\pi f(t-\tau)] d\tau \right|_{\max} \quad (2)$$

$$S_A(\xi, f) = 2\pi f \left| \int_0^t \ddot{x}(\tau) \exp[-2\pi f \xi(t-\tau)] \sin[2\pi f(t-\tau)] d\tau \right|_{\max} \quad (3)$$

式中 $\ddot{x}(\tau)$ 为地冲击加速度实测波形, f 为系统的固有频率, S_D 、 S_V 、 S_A 分别为系统的相对位移响应谱、相对速度响应谱、绝对加速度响应谱,设 S_{PV} 为拟速度谱

$$S_{PV} = \left| - \int_0^t \dot{x}(\tau) \exp[-2\pi f \xi(t-\tau)] \sin[2\pi f(t-\tau)] d\tau \right|_{\max} \quad (4)$$

则
$$S_A = 2\pi f S_{PV} = (2\pi f)^2 S_D \quad (5)$$

在一定频率范围, $S_{PV} = S_V$ 。利用(5)式可以把 S_D 、 S_{PV} 、 S_A 画在三对数坐标图中,这就是常用的三坐标谱。若分别用地冲击运动位移、速度、加速度峰值 D_{\max} 、 V_{\max} 、 A_{\max} 除 S_D 、 S_V 、 S_A ,则得到相对位移标准谱 $N_D = S_D/D_{\max}$ 、相对速度标准谱 $N_V = S_V/V_{\max}$ 、和绝对加速度标准谱 $N_A = S_A/A_{\max}$ 。

设计使用的冲击响应谱并不是按上述公式计算得出的,而是利用简便的方法绘制的。这些简便方法是在对大量实测波形用数值方法(如线性加速度法,Newmark法)计算得出的结果在分析基础上提出的。目前常用的方法为三系数法^[2,3],即在三坐标图上作三条 S_D 、 S_V 、 S_A 等值线(图1),其中

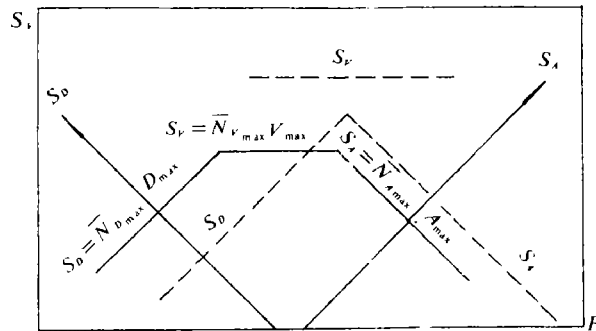


图1 三系数法

Fig. 1 3-coefficient method

$$S_D = \bar{N}_{D_{max}} D_{max} \quad (6)$$

$$S_V = \bar{N}_{V_{max}} V_{max} \quad (7)$$

$$S_A = \bar{N}_{A_{max}} A_{max} \quad (8)$$

式中 D_{max} 、 V_{max} 、 A_{max} 常用地冲击运动参数经验公式^[2]计算,它们和爆炸方式、药量、爆心距、介质特性等有关, $\bar{N}_{D_{max}}$ 、 $\bar{N}_{V_{max}}$ 、 $\bar{N}_{A_{max}}$ 分别是对各条波形通过数值计算得到的 $N_{D_{max}}$ 、 $N_{V_{max}}$ 、 $N_{A_{max}}$ 的均值或最大值,该方法具有简便实用的特点。我们经过实际应用和研究,发现它存在如下问题:

1. 由于爆炸实验通常测量加速度(或少量速度),其波形为不规则振动,且干扰较大,经基线修正和积分得到的速度,位移数据比较离散,拟合的经验公式精度差。这就使得设计常用的低频段响应谱失真较严重。

2. 由于 D_{max} 、 V_{max} 、 A_{max} 三个经验公式在运动学上很难协调,使得某些情况下作出的响应谱形状畸变,如出现三角形图谱,并沿频率轴偏移等现象(图1的虚线)。

为此,我们用线性加速度法编制了计算程序,对国外四次地下封闭核爆试验的自由场实测波形^[5,7]进行了响应谱计算,分析其结果,提出了绘制爆炸冲击响应谱的频率特征值法。本文仅以计算结果为例介绍了该方法研究的过程,结论适用于特定情况。

二、爆炸冲击响应谱的特点

由(1)(2)(3)式可以看出,具有相同阻尼,不同固有频率的系统在某一实测加速度 $\ddot{x}(t)$ 作用下的标准谱是三条 $N_D \sim f$ 、 $N_V \sim f$ 、 $N_A \sim f$ 曲线,这些曲线在某几个 f 处达到最大值,我们把标准谱取得最大值对应的频率 f 称为频率特征值。图2是一条实测加速度波形^[5],图3是该

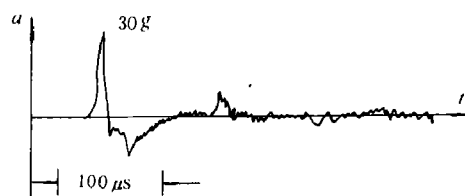
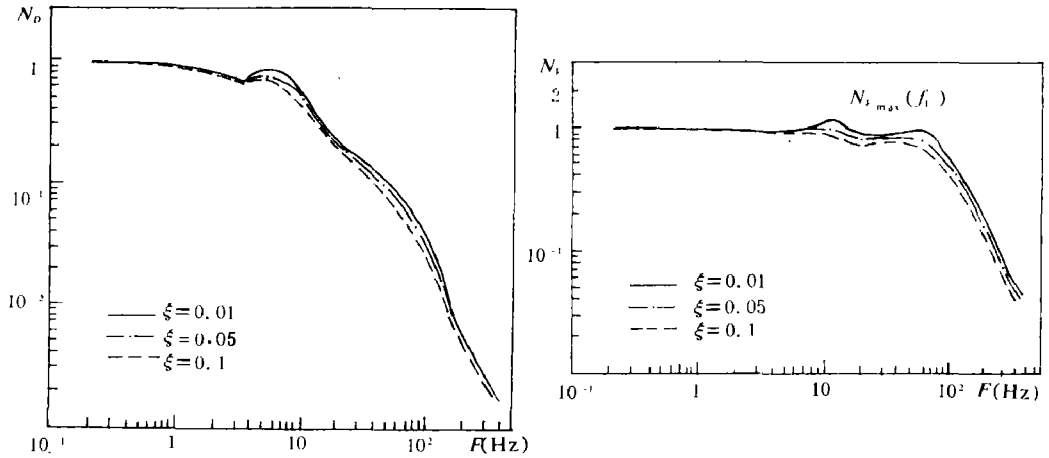


图2 SALMON 12·11 实测波形

Fig. 2 SALMON 12·11 Real waveform

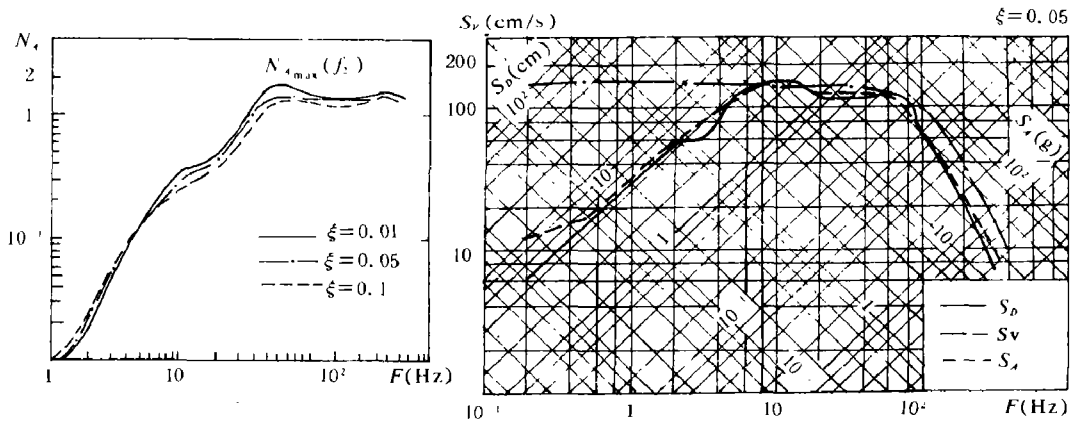


(a) 位移标准谱

(b) 速度标准谱

(a) Normal displacement spectra (N_D)

(b) Normal velocity spectra (N_V)



(c) 加速度标准谱

(d) 三坐标反应谱

(c) Normal acceleration spectra (N_A)

(d) 3-axial spectra.

图3 SALMON12-11 实测波形响应谱

Fig. 3 SALMON12-11 Real measuring waveform spectra

波形各标准谱的数值计算结果。其他实测波形的各标准谱计算结果与其类似。可以看出：

1. N_D 在低频段其值近似为 1, 以后随 f 增加而降低, 相应 N_D 的频率特征值从理论上讲为零。
2. N_V 在 f_1 处达最大值 $N_{V,max}$, $f < f_1$ 段 N_V 渐增, $f > f_2$ 段, N_V 急剧下降, f_1 是频率特征值。
3. N_A 随 f 增加而增加, 在 f_2 处达到最大值 $N_{A,max}$, 当 $f > f_2$, 其值在 $N_{A,max}$ 上下抖动衰减。

4. 由三坐标图可以看出,小阻尼体系 ($\xi \leq 0.05$), S_D 和 S_A 基本吻合 (理论上 $\xi=0$ 时, S_D 与 S_A 重合); $f > f_1$ 时, S_V 与 S_D 、 S_A 吻合,说明 $f > f_1$ 后, S_{PV} 等于 S_V 。另外由该图还可以得知,仅由 (4) 式计算 S_{PV} , 就可以粗略得到体系的三坐标响应谱 (注意 $f < f_1$ 时, S_V 与 S_{PV} 并不相等)。

5. 三坐标图可以分为三段, $f < f_1$ 段, 为 S_D 坐标等值线 (除 S_V 外); $f_1 \leq f \leq f_2$ 段, 为对 S_V 坐标下斜线 (或近似为等值线); $f > f_2$ 段, 为 S_A 坐标等值线。

6. ξ 增加, 谱曲线趋于平滑, 峰值降低。

7. 不同实测波形的响应谱都存在上述特点, 且谱形变化不大, 但频率特征值随爆炸当量、爆心距和介质特性而变化, 阻尼对频率特征值影响较小。

8. 在 ξ 相同时, 各地运动标准谱的最大值离散较小, 表 1 给出了 $N_{D_{max}}$, $N_{V_{max}}$, $N_{A_{max}}$ 在不同阻尼比 ξ 下的均值 \bar{N} 和标准偏差 σ 。

表 1
Table 1

ξ	0.01		0.05		0.1	
	\bar{N}	σ	\bar{N}	σ	\bar{N}	σ
$N_{D_{max}}$	0.94	0.06	0.91	0.06	0.89	0.0
$N_{V_{max}}$	1.65	0.55	1.42	0.45	1.21	0.35
$N_{A_{max}}$	2.30	0.50	1.91	0.37	1.74	0.35

三、频率特征值经验公式拟合

地下封闭爆炸、地冲击波以球面波从爆心向外传播, 位于自由场的结构响应主要与爆炸药量 W (吨), 爆心距 R (米), 介质纵波波速 c (米/秒), 系统固有频率 f (Hz) 有关, 通过量纲分析⁴, 上述参数可以写成如下无量纲参数的函数表达式

$$f(fR/c, R/W^{1/3}) = 0 \quad (9)$$

图 4 为无量纲组合式 fR/c 和 $R/W^{1/3}$ 的数据分布规律, 可以看出 fR/c 对 $R/W^{1/3}$ 呈线性分布, 经回归计算可得

$$f_1 R/c = 0.022(R/W^{1/3})^{0.945} \\ \gamma = 0.92 \quad (10)$$

$$f_2 R/c = 0.414(R/W^{1/3})^{0.538} \\ \gamma = 0.93 \quad (11)$$

式中 γ 为相关系数。相应于 N_D 的频率特

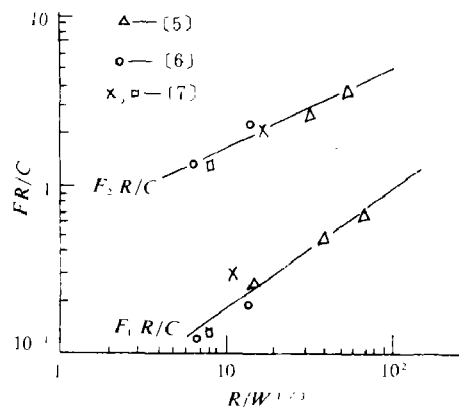


图 4 fR/c 和 $R/W^{1/3}$ 分布规律
Fig. 4 fR/c and $R/W^{1/3}$ distribution

征值对绘制反应谱影响不大,可不予讨论。

由(10)(11)式可以看出:

1. 当 c, R 一定, f_1, f_2 随 W 增加而降低,说明大药量爆炸冲击的低频分量较大。
2. 当 R, W 一定, f_1, f_2 随 c 增加而增大,说明密实介质对冲击的高频分量吸收作用较小。
3. 当 W, c 一定, f_1, f_2 随 R 增加而降低,这与介质中弹性波频散现象一致。

四、爆炸冲击响应谱频率特征值法

1. 已知地冲击加速度 A_{max} , 速度 V_{max} 绘制冲击响应谱的步骤:

(I) 由(10)、(11)式计算 f_1, f_2 ; 确定体系的阻尼比 ξ , 查表1得 $\bar{N}_{V_{max}}, \bar{N}_{A_{max}}$, 按(7)(8)式计算 S_V, S_A 。

(II) 由 f_1 和 S_V , 在三坐标图上确定 A 点(图4), 由 f_2 和 S_A 确定 B 点, 连接 AB , 过 A 作 S_D 等值线 AC , 过 B 作 S_A 等值线 BD , $CABD$ 即为绘制的响应谱。

2. 已知地冲击加速度 A_{max} 绘制响应谱的步骤:

(I) 按(10)(11)式计算 f_1, f_2 , 查表1得 $\bar{N}_{A_{max}}$, 按(8)式计算 S_A 。

(II) 由 f_2, S_A 确定 B 点, 过 B 点作 S_V 等值线与 f_1 交于 A' 点, 过 A' 点作 S_D 等值线 $A'C'$, 过 B 作 S_A 等值线 BD 。 $C'A'BD$ 即为绘制的响应谱。

图5中还绘出了实测波形的响应谱, 可见该方法较好地再现了实测波形响应谱。

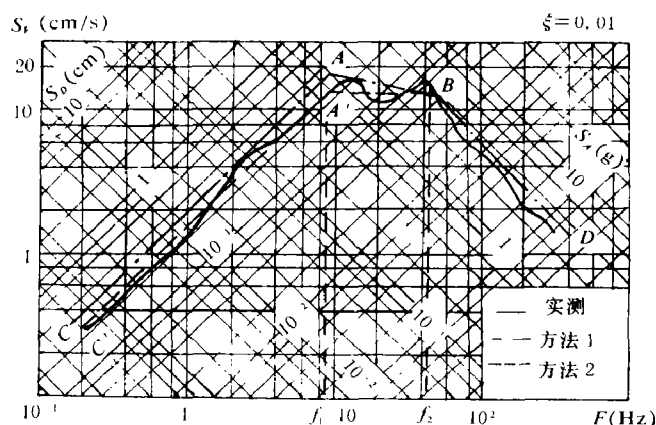


图5 绘制的响应谱与实测响应谱比较

Fig. 5 Comparison of drawing spectra with real measuring spectra.

五、结 论

频率特征值法由于控制了 f_1, f_2 , 克服了三系数法因运动参数计算偏差使得响应谱在频率轴上移动的优点, 绘制的响应谱不会产生畸变。由于只要加速度峰值 A_{max} 计算公式, 避免计算 D_{max} , 弥补了目前由于位移实测数据较少, 经验公式精度差的缺陷。另外确定该方法时, 同时考虑标准谱的最大值和与最大值相应的频率特征值比三系数法只考虑标准谱的最大值更

加合理

参 考 文 献

- [1] 大崎顺彦, 地震动谱分析入门, 地震出版社, (1980).
- [2] Crawford, R. E. etc., The Air Force Manual for Design and Analysis of Harden Structures, *AFWL-TR-74-102*.
- [3] Harris, C. M., Crede, C. E., Shock and Vibration Handbook, McGraw-Hill Book Co., (1976).
- [4] 李之光, 相似与模化, 国防工业出版社, (1982).
- [5] AD-688158.
- [6] Free-Field Ground Motion Induced by Underground Explosion, *SAND74-0252*.
- [7] Free-Field Particle Motion from a Nuclear Explosion in Salt part II, (1964), *VUF-3012*.

STUDIES OF THE SPECIFIC FREQUENCY METHOD USED IN THE ANALYSIS OF SHOCK RESPONSE SPECTRUM

Zhao Qinjing, Li Bosong

(Luoyang Institute of Hydraulic Engineering & Technology)

ABSTRACT In this paper, several real measuring waveforms induced by underground nuclear explosions are taken as specimens. By numerical method, the spectra of these real waveforms are obtained. We define the frequency corresponding to maximum spectrum value as the specific frequency. The main characteristics of the response spectrum are: (1) Normal displacement spectrum (N_b) approximately equals 1 for low frequency and decreases with increase of frequency. Theoretical specific frequency of N_b theoretically equals to zero. (2) f_1 is the specific frequency of the normal velocity spectrum (N_v). When $f < f_1$, N_v increases gradually; when $f > f_1$, N_v decreases abruptly. (3) Normal acceleration spectrum (N_a) increases with f when $f > f_2$, N_a decreases vibrationally. f_2 is the specific frequency of N_a . (4) For system with low damp ($\xi \leq 0.5$), the spectra of the displacement velocity and acceleration (S_b , S_v and S_a) coincide approximately with 3-axial spectra, which can be divided in to 3 parts by f_1 and f_2 . When $f \leq f_1$, the spectra are constant in S_b coordinate; when $f_1 < f < f_2$, the spectra are constant in S_v coordinate; when $f \geq f_2$, the spectra are constant in S_a coordinate. (5) Specific frequencies f_1 and f_2 vary with explosion yield, distance from explosion point and the behavior of the medium. Empirical formula to calculate f_1 and f_2 are established.

On the basis of above characteristics, the specific frequency method for drawing response spectrum is presented. This method has some advantages over the 3-coefficient method^[2,3]. The shock response spectrum under particular conditions can be obtained by this method.

KEY WORDS shock, response spectra, specific frequency.