

床応答波とその応答スペクトルの確率的計算手法

宮崎大学 工学部 学生員 佐藤 敏丈
宮崎大学 工学部 正 員 原田 隆典

1.まえがき 構造物内の機器の動的性能を解析する場合、通常、構造物に過去の地震記録を入力して、機器が設置されている床の応答時刻歴を計算し、これを、機器の入力として使用する場合が多い。しかし、記録数に限りがあることや、個々の波形は、偶発的な要素を含んでおり、より一般的な耐震検討を行うには、不合理な側面がある。本文では、確率論的な手法を用いて、構造物の各床の平均的な波形を得ることを目的とし、①床応答波応答スペクトルを与える場合と②地震波応答スペクトルと構造物の周波数応答関数を与える場合の二つの違った基準値から、各床の時刻歴を創成する方法とその試算例を示す。

2.方法の概説 不規則振動理論を使うと、固有円振動数 ω_0 と減衰定数 h も有する1質点系の最大加速度応答値とそれを入力する波形のパワースペクトル密度関数の関係は、近似的に次式により与えられる[1]。

$$A_{TP} = \gamma_{TP} \left(Q(\omega_0) G_1(\omega_0) + \int_0^\infty G_1(\omega) d\omega \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Q(\omega) = \left[\frac{1+4h^2}{4h} \pi \left\{ 1 - \exp(-2h\omega T) - \frac{1}{2} \right\} \omega \right]$$

A_{TP} は、継続時間 T の非定常ランダム波の非超過確率 P に対する最大値で、 $G_1(\omega)$ は、入力波のパワースペクトル密度関数である。最大値係数 γ_{TP} に関しては、これまで厳密な解は得られていないが、ここでは、Vanmarcke博士[2]のものを用いる。すなわち

$$\gamma_{TP}^2 = 2 \ln \left\{ 2N(1 - \exp(-Se^{1/2} \sqrt{\pi \ln(2N)})) \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$N = -\Omega T / 2\pi \ln P \quad \Omega = (\lambda_2 / \lambda_0)^{1/2} \approx \omega_0$$

$$Se = (1 - \lambda_1^2 / (\lambda_0 \lambda_2))^{1/2} \approx \sqrt{(4h/\pi) / (1 - \exp(-2h\omega_0 T))}$$

$$\text{ただし } \lambda_i = \int_0^\infty \omega^i G_1(\omega) d\omega \quad i=0,1,2,\dots$$

(1)、(2)式を用いると、振動数領域において、最大応答値を計算することができる。また逆に、最大応答値(加速度応答スペクトル)から、入力波のパワースペクトル密度関数を計算することができる。パワースペクトル密度関数 $G_1(\omega)$ より、非定常な加速度時刻歴 $\ddot{y}(t)$ は、Shinozuka博士[3]らの研究を用いると、次式によって作成できる。

$$\ddot{y}(t) = B(t) \sum_{j=1}^N \left[2G_1(\omega_j) \Delta\omega \right]^{1/2} \cos(\omega_j t + \phi_j) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\omega_j = (j - \frac{1}{2}) \Delta\omega \quad \Delta\omega = \omega_{max} / N \quad \phi_j: \text{ランダム位相差}$$

$$B(t) \begin{cases} 0 \leq t \leq 2 & B(t) = 0.25t^2 & 2 \leq t \leq 12 & B(t) = 1.0 \\ 12 \leq t \leq 16 & B(t) = 0.05(16-t)^2 + 0.2 & 16 \leq t \leq 20 & B(t) = 0.0093(20-t)^2 + 0.05 \end{cases}$$

3.床応答波応答スペクトルを基準にする場合の試算例

(1)式に、図-1に示す床応答波応答スペクトル値を与えて、(1)式の逆演算から構造物の床に及ぼす加速度波の片側パワースペクトルを計算すると図-2のようになる。図-2の実線と鎖線は、それぞれ、(2)式の Ω と

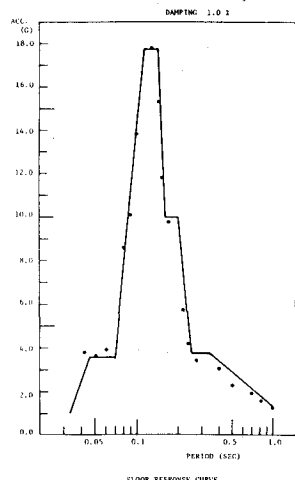


図-1 床応答波応答スペクトル

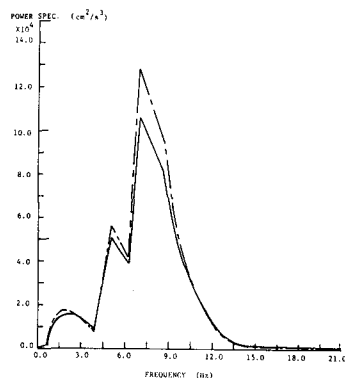


図-2 床応答のパワースペクトル

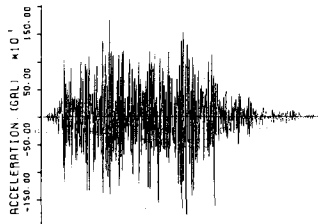
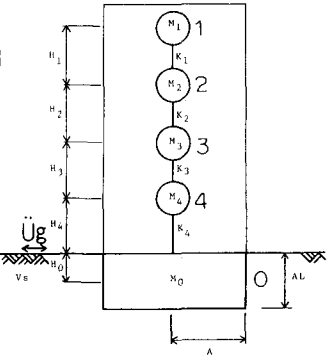


図-3 床応答波のサンプル波形

S_e の計算に近似式と厳密な式を使用したものに対応する。この場合、 $P=0.5$, $T=10$ 秒, $h=0.01$ を用いた。図-2の鎖線に示す $G_I(\omega)$ から、(3)式により、床のサンプル加速度時刻歴を計算すると、図-3のようになる。この波形は定常区間10秒を持つ継続時間20秒の波形で、最大加速度1905 galを示している。(1), (2)式の計算過程をチェックするために、図-3のようなサンプル波を20波作成し、これらの波による平均床応答応答スペクトルを計算すると、図-1の●印のようになる。これは、本手法の正しさを証明するものである。

4.地震波加速度応答スペクトルと構造物の周波数応答関数を基準にする場合の試算例 地震波加速度応答スペクトル(図-5)を、(1)式の $A_{r,p}$ とすると、(1)式の逆演算により、入力地震動のパワースペクトル(片側) $G_I(\omega)$ が求まる。次に、構造物の周波数応答関数を $H_s(\omega)$ とすれば、床応答のパワースペクトル $G_s(\omega) = (|H_s(\omega)|^2 G_I(\omega))$ が計算できる。図-4は、構造物の周波数応答関数 $H_s(\omega)$ を計算する構造物モデルを示すが、振動数領域で計算するので、地盤と構造物の相互作用が、効率よく取り込める[4]。図-6は、図-4,5の構造物モデルと地震波加速度応答スペクトルから、構造物の2,3,4質点の片側パワースペクトルを計算したものである。このパワースペクトルより、質点2のサンプル加速度波を、(3)式より計算したものを図-7に示す。この波は、継続時間20秒(定常部分10秒)の波で、最大加速度は、750 galである。このような波を10波創成し、平均床応答応答スペクトルを計算すると図-8のように求まる。地震波応答スペクトルに比べると、構造物の固有周期に対応する周期に高いピークを持つスペクトルとなっており、構造物の周波数応答関数 $H_s(\omega)$ が強く影響しているのがわかる。以上の確率的計算手法は構造物内に設置されている機器に対する応答スペクトルを効率的に計算、作成するのに役立つと思われる。



	M tons/cm	K ton/cm	H_1	8.0
1	6.12	3000.0	H_2	5.1
2	7.07	25000.0	H_3	7.2
3	8.04	27189.0	H_4	8.5
4	9.07	34158.0	H_0	8.5
0	99.64		AL	17.0
			A	25.0

$V_s=1500\text{m/s}$ $\rho=240.0\text{Kg/m}^3$

図-4 構造物振動モデル

参考文献

- [1] 原田, 佐藤: 土木学会第37回年次学術講演会講演概要集第1部 PP 767~768, 1982
- [2] Erik. H. Vanmarcke: Proc. of A.S.C.E, vol 98, No EM2, PP425~446, 1972
- [3] M. Shimozuka: Computers & Structures, Vol 2, PP855~874, 1972
- [4] 原田, 又保, 片山: 東京大学生産技術研究報告 vol 29 第5号 1981

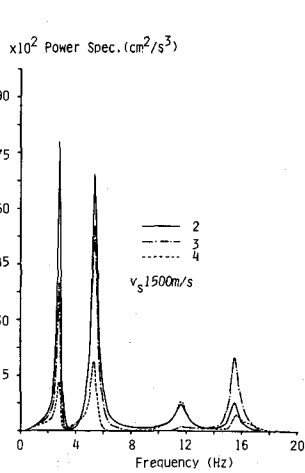


図-6 構造物のパワースペクトル

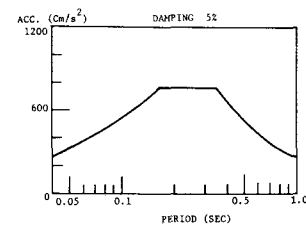


図-5 地震波応答スペクトル

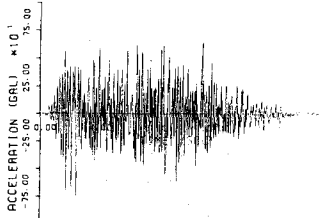


図-7 床応答波のサンプル波形

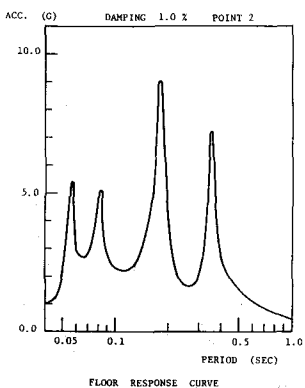


図-8 床応答波応答スペクトル