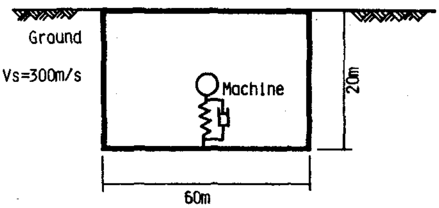
117−⑤ 確率論的方法による地下構造物内の機器応答スペクトル計算法について

宮崎大学大学院○学生員 佐藤 敏文
宮崎大学工学部 正員 原田 隆典

1.まえがき 構造物内の機器の応答スペクトルを計算する場合、通常の応答スペクトルの計算と同じように、機器を1質点にモデル化し、この1質点系に、構造物の床の地震応答加速度時刻歴を入力する。この1質点系の最大加速度を、系の固有周期、減衰定数に対してプロットすると機器の加速度応答スペクトルが得られる。しかし、床の加速度時刻歴は、構造物の種類や地震波の組み合せを考えると多種となる。さらに機器の設置位置などを考慮すると、平均的な機器の応答スペクトルを得るためには、膨大な計算を必要とする。そこで本文では、確率論的方法を採用して、通常の構造物設計用加速度応答スペクトルから、地下構造物内の機器に対する加速度応答スペクトルを算定する手法とその試算例を報告する。



図−1 機器−地下構造物モデル

2.方法の概説 不規則振動理論1)により、加速度応答の最大値を次式で予測する。

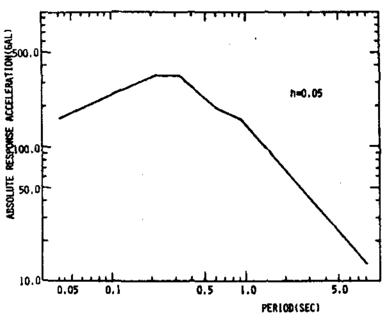
$$S_{T,P}=\gamma_{T,P}\cdot\sigma \qquad ①$$

$S_{T,P}$は、継続時間Tの定常ランダム過程の非超過確率Pに対する最大値，σは、そのランダム過程の標準偏差である。また、$\gamma_{T,P}$は、ピークファクターと呼ばれている。$\gamma_{T,P}$に関しては、色々な式が提案されているが、現在までのところ、厳密な解は、得られていない(1)。本文では、とりあえず、Vanmarck博士のものを用いる。すなわち

$$\gamma_{T,P}^2=2\ln\left[2n\left(1-\exp\left(-\delta_e^{1.2}\sqrt{\pi\ln(2n)}\right)\right)\right] \qquad ②$$

$$n=\frac{-\omega_0 T}{2\pi\ln P}$$

$$\delta_e=\sqrt{\frac{4h/\pi}{1-\exp(-2h\omega_0 T)}}$$



図−2 構造物設計用加速度応答スペクトル

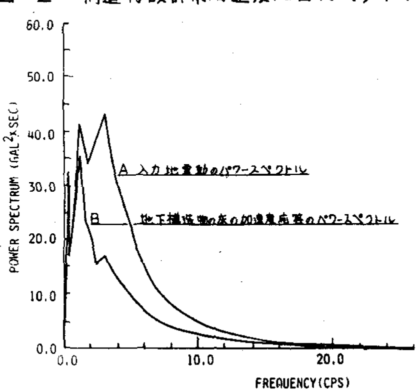
次に、σについて述べる。$S_{T,P}$を地下構造物内の機器の加速度応答の最大値とすれば、σは、機器の加速度応答の標準偏差となるから、機器の加速度応答のパワースペクトルを、$G_E(\omega)$とすれば

$$\sigma=\left[\int_0^\infty G_E(\omega)\,d\omega\right]^{\frac{1}{2}} \qquad ③$$

さらに、$H_S(\omega)$，$H_E(\omega)$をそれぞれ、地下構造物，1自由度系の周波数伝達関数，$G_I(\omega)$を入力地震動のパワースペクトルとすれば、機器の加速度応答の標準偏差σは、次式となる。

$$\sigma=\left[\int_0^\infty |H_S|^2\cdot|H_E|^2\cdot G_I\,d\omega\right]^{\frac{1}{2}} \qquad ④$$

ここで、$G(\omega)=G_I(\omega)\cdot|H_S(\omega)|^2$と置けば、④式は



図−3 パワースペクトル

$$\sigma = \left[\int_0^\infty |H_E(\omega)|^2 G(\omega)\,d\omega\right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{——⑤}$$

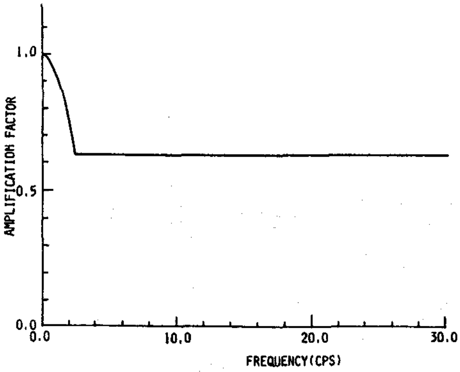
さらに、⑤式は、近似的に次のように求まる。

$$\sigma^2 = Q(\omega_0)G(\omega_0) + \int_0^{\omega_0} G(\omega)\,d\omega \quad \text{——⑥}$$

$$Q(\omega_0) = \left(\frac{1+4h^2}{4h}\pi\left(1-\exp(-2h\omega_0 T)\right) - \frac{1}{2}\right)\omega_0 \quad \text{——⑦}$$

ここで、ω_0, h は、1質点系の固有円振動数、減衰定数である。従って、地下構造物内の機器の加速度応答の最大値 $S_{T,P}$ は、次式により求まる。

$$S_{T,P} = \gamma_{T,P}\left(Q(\omega_0)\cdot G(\omega_0) + \int_0^{\omega_0} G(\omega)\,d\omega\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{——⑧}$$

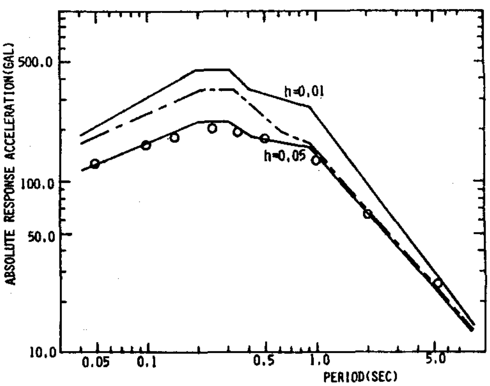


図−4　地下構造物の周波数伝達関数

3試算例　通常の構造物設計用加速度応答スペクトル（図−2）として、片山博士(2)らのものを用いた。⑧式の$G(\omega)$を入力地震動のパワースペクトル$G_I(\omega)$と考えれば、S_{TP}は、与えた応答スペクトル値S^*_{TP}となるから、⑧式の逆演算により、入力地震動のパワースペクトルが次式より求まる。（図−3のAは、⑨式によって求めた入力地震動のパワースペクトルである。）

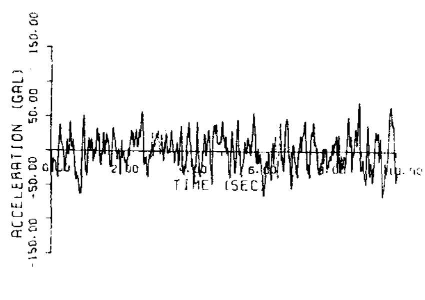
$$G_I(\omega_0) = \frac{1}{Q^*(\omega_0)}\left[\left(\frac{S^*_{TP}}{\gamma^*_{TP}}\right)^2 - \int_0^{\omega_0} G_I(\omega)\,d\omega\right] \quad \text{——⑨}$$

地下構造物の周波数伝達関数H_Sを図−4に示すもの(3)を用いると$G(\omega) = G_I(\omega)\cdot|H_S(\omega)|^2$、すなわち地下構造物の床の加速度応答のパワースペクトルは、（図−3のB）のように求まる。求まった$G(\omega)$と⑧式から、地下構造物内の機器の平均応答スペクトルが得られる。（図−5は、P=50%, T=10秒, h=0.05, 0.01とした場合の地下構造物内の機器の平均加速度応答スペクトルである）



図−5　機器の平均加速度応答スペクトル

4.考察　機器の加速度応答スペクトル値は、振動数が高い領域（振動数2Hz以上）では、構造物設計用応答スペクトルのものの約7割の値をとっている。これは地下構造物が、図−4に示すような1種のローパスフィルターの特性を持っているからである(3)。以上の計算法を確かめるために、



図−6　地下構造物の床の加速度時刻歴

地下構造物の床の加速度応答のパワースペクトル（図−3のB）から、継続時間10秒の定常加速度時刻歴を20波発生させ（例えば図−6）、各々の波に対する機器の加速度応答スペクトルを計算し、その平均値をプロットした（図−5の○印）。図からもわかるように確率論的手法で作り出したものとよく一致しており、本手法の有用性が確かめられている。

(1) Erik H. Vanmarcke：Proc. of ASCE, Vol.98, No. EM2, PP425〜446, 1972

(2) 片山，岩崎，佐伯；土木学会論文報告集，第275号，PP29〜39，1978

(3) 原田，久保，片山：東京大学生産技術研究所報告 Vol.29 第5号，1981