

和歌山工業高等専門学校 正会員 辻原 治
豊橋技術科学大学 学生員 ○ 橋本 健司

1. はじめに 本研究では、構造が不確定な地盤において、複数の地点で地震動観測記録が得られたときに、地盤を確率有限要素モデルで表し、未観測点における地震動のパワースペクトルを推定する方法を提示し、数値計算によりその妥当性を検討する。

2. 解析手法 いま、地盤構造が不確定な地域において、 $n-1$ 個の地点で地震動観測記録が得られており、これらの記録と地盤の情報から、任意地点 n での地震動強度を推定する問題を考える。周辺の地盤構造がすべてわかっておれば、地盤を有限要素モデルに置換し、地点 k での観測記録から、地点 n の応答が次式で得られる。

$$U_n(f) = H_{nk}(f)U_k(f) \quad (1)$$

ここに、 $U_n(f)$ 、 $U_k(f)$ は、それぞれ地点 n 、 k における地震動のフーリエスペクトルであり、 $H_{nk}(f)$ は 2 点間の周波数伝達関数である。また、地点 n のパワースペクトルは次式で表される。

$$\begin{aligned} S_n(f) &= |U_n(f)|^2/T \\ &= |H_{nk}(f)U_k(f)|^2/T \\ &= |H_{nk}(f)|^2 S_k(f) \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $S_n(f)$ 、 $S_k(f)$ は、地点 n 、 k のパワースペクトルであり、 T は継続時間である。式 (2) において、 $H_{nk}(f)$ を確率変数からなる関数として一次近似法を適用すると、 $S_n(f)$ の期待値および分散は次式で得られる [1]。

$$E[S_n(f)] = |H_{nk}(f; \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N)|^2 S_k(f) \quad (3)$$

$$\text{Var}[S_n(f)] = \sum_{i=1}^N c_i^2(f) \text{Var}[x_i] + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1(j \neq i)}^N c_i(f)c_j(f) \text{Cov}[x_i, x_j] \quad (4)$$

ここに、 x_1, x_2, \dots, x_N は確率変数であり、 $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N$ はそれらの期待値である。本研究では、地盤震動解析手法として有限要素法を用いるので、要素の動特性値および節点入力を確率変数として扱うことができる。また、式 (4) の c_i は次式で表される [2]。

$$c_i(f) = \frac{\partial S_n(f)}{\partial x_i} = 2|H(f; \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N)| \cdot S_k(f) \cdot \frac{\partial |H(f; \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N)|}{\partial x_i} \quad (5)$$

式 (3)、(4) の $E[S_n(f)]$ 、 $\text{Var}[S_n(f)]$ は地点 k の地震動記録をもとに推定したものであり、それぞれ $S_{nk}(f)$ 、 $\sigma_{S_{nk}}^2(f)$ とおくと、 $n-1$ 個の観測記録を同時に考慮して推定される地点 n のパワースペクトルの最確値 $\bar{S}_n(f)$ は次式で表される [3]。

$$\bar{S}_n(f) = \frac{\sum_{k=1}^{n-1} P_k(f) S_{nk}(f)}{\sum_{k=1}^{n-1} P_k(f)} \quad (6)$$

ここに、 $P_k(f)$ は重み係数であり、次式で表される。

$$P_1(f) : P_2(f) : \dots : P_{n-1}(f) = \frac{1}{\sigma_{S_{n1}}^2(f)} : \frac{1}{\sigma_{S_{n2}}^2(f)} : \dots : \frac{1}{\sigma_{S_{nn-1}}^2(f)} \quad (7)$$

また、式 (6) で得られる最確値 $\bar{S}_n(f)$ の 2 乗平均誤差 $\sigma_{\bar{S}_n}(f)$ が次式で表される [3]。

$$\sigma_{\bar{S}_n}(f) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n-1} P_k(f) \{S_{nk}(f) - \bar{S}_n(f)\}^2}{(n-2) \sum_{k=1}^{n-1} P_k(f)}} \quad (8)$$

3. 数値計算結果および考察 解析に用いた有限要素モデルを図-1に示す。表-1に示すような動特性の異なる3種類の物性からなり、モデルの側方および底面は粘性境界とした。ここでは、手法の妥当性を検討するために実際の地震動記録を用いず、模擬地震動観測記録を次のように作成した。すなわち、El Centro地震波(1940)NS成分の最大振幅を50galとした水平動が、鉛直下方から入射したときのモデルの地表面での応答を求め、それぞれにrms強度で10%のホワイトノイズを付加したものを観測記録のかわりに用いた。解析周波数帯は1.0~10.0Hzとした。

数値計算では、節点番号が34,56,89,133,166,188の6節点で観測記録が得られているものとし(以後、これらの節点を観測点と呼ぶこととする)、節点111の地震動パワースペクトルを推定することとした。図-2には、あらかじめ求めておいた節点111のパワースペクトルの真値を示す。以下に、有限要素のヤング係数のみが独立にばらつくものとし、変動係数を0.1としたときの解析結果を示す。図-3は、それぞれの観測点から推定したパワースペクトルの誤差の絶対値である。観測点が節点111から離れるにしたがって、推定精度が悪化する傾向が表されている。図-4,5に、それぞれ、6個の観測点における記録を同時に考慮し、式(6)から得られる節点111のパワースペクトルとその推定誤差を示している。一観測点のみから推定する場合(図-3)と比較し、推定精度が大きく改善されていることがわかる。また、図-6には、式(8)から得られる節点111のパワースペクトルの2乗平均誤差を示している。これは図-5の推定誤差と対応しており、式(6)で得られるパワースペクトルの最確値の信頼性が式(8)によってある程度評価できることを裏づける結果が得られた。

4. まとめ 複数の地盤震動観測記録を同時に考慮し、任意地点における地震動のパワースペクトルの統計量を推定する手法を提示し、数値計算により妥当な結果が得られることを確認した。

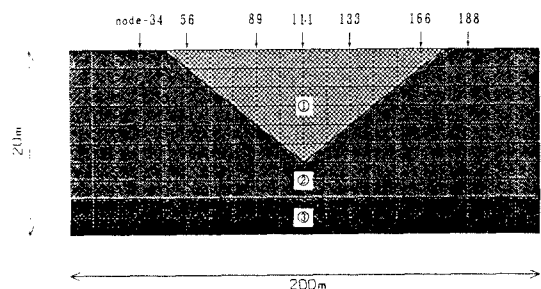


図-1 地盤の有限要素モデル

表-1 要素の物性諸元

層	単位体積重量 (t/m^3)	S波速度 (m/sec)	ヤング係数 (t/m^2)	ポアソン比	Q値
①	1.3	150	8.1×10^4	0.35	10
②	1.6	250	2.7×10^4	0.33	20
③	1.8	350	5.9×10^4	0.30	20
基礎	2.0	1500	1.2×10^6	0.30	30

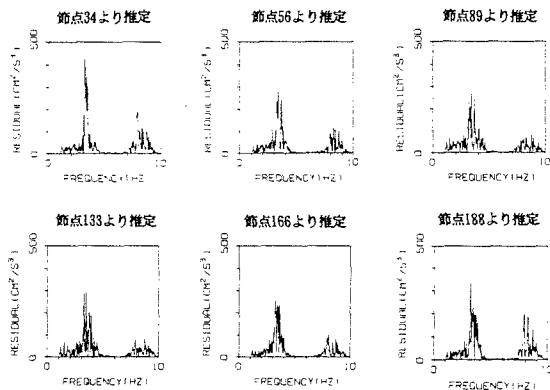


図-3 一観測点から推定した節点111のパワースペクトルの誤差

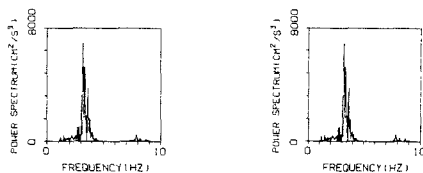


図-2 節点111のパワースペクトルの真値

図-4 多点観測記録から推定した節点111のパワースペクトル

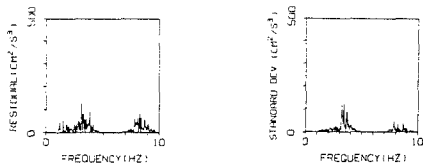


図-5 多点観測記録から推定した節点111のパワースペクトルの誤差

図-6 多点観測記録から推定した節点111のパワースペクトルの2乗平均誤差

参考文献

- [1] Ang, Tang 著:伊藤, 亀田訳, 土木のための確率・統計の基礎, 丸善, 1977年
- [2] 辻原:地震動強度の空間伝達特性評価に関する基礎的検討, 土木学会第47回年次学術講演会, 1991年
- [3] 一瀬:誤差論, 培風館, 1970年