

(54) 地盤定数のばらつきを考慮した地盤の地震応答とその効果的解析法

金沢大学工学部 池本敏和
 金沢大学工学部 北浦 勝
 金沢大学大学院 鶴来雅人

1 まえがき

従来の地盤の地震応答解析においては地盤定数、例えば密度、せん断弾性係数などを確定量として取り扱うのが一般的である。しかし、これらの地盤定数にはそれ自身が本来持っているばらつきやそれを推定する際に生じる誤差といった不確定な要素が含まれている。最近では、これらの不確定要素を考慮した地震応答解析を試みる研究が行われつつある¹⁾。本研究では地盤定数の不確定性に着目し、これが地盤の地震応答解析結果にどのような影響を及ぼすかについて検討を行うとともに、不確定要素を考慮した地盤の地震応答を効果的に解析する方法を提案する。

2 解析概要

〔重複反射理論〕

本解析では基盤面からの入射波の振幅が1の場合に対する地表面での振幅の大きさを求める。その際、マトリックスによる重複反射理論を適用した²⁾。表層が $n-1$ 層からなり、基盤層が第 n 層である地盤において、入射波の振幅が1の場合、地表面での振幅の絶対値 $U_1(\omega)$ は、

$$U_1(\omega) = \frac{2}{\sqrt{[R_{n-1}(1,1)]^2 + [R_{n-1}(2,1)/G_n k_n]^2}} \quad \text{----- (1)}$$

と表される。ここで $R_{n-1}(1,1)$ 、 $R_{n-1}(2,1)$ はそれぞれ $[R_{n-1}]$ の第1行第1列および第2行第1列の係数である。第 n 層から上層に向かってSH波が鉛直に入射する場合、第 $n-1$ 層における $[R_{n-1}]$ は

$$[R_{n-1}] = [S_{n-1}] [S_{n-2}] \text{-----} [S_1] \quad \text{----- (2)}$$

$$[S_m] = \begin{bmatrix} \cos k_m H_m & (\sin k_m H_m) / (G_m k_m) \\ -G_m k_m \sin k_m H_m & \cos k_m H_m \end{bmatrix} \quad \text{----- (3)}$$

となる。ここで、 k_m ; 波数 (ω/c_m) c_m ; 第 m 層内でのせん断波速度 ω ; 円振動数
 G_m ; 第 m 層でのせん断弾性係数 H_m ; 第 m 層の層厚

〔ばらつきの考慮〕

本解析では、ばらつきをもつ地盤定数として、せん断波速度を決定する密度とせん断弾性係数を想定している。地盤定数のばらつきはMonte Carlo Simulation (以下MCSとする)により考慮した。そして地盤の地震応答の効果的解析法として2点によるPoint Estimate Method(以下PEM2とする)および3点によるPoint Estimate Method(以下PEM3とする)を取り上げた。それぞれの概要を以下に示す。

MCS 密度とせん断弾性係数については簡単のために正規分布に従うと仮定する。計算手順は次の通りである。

- ①層ごとに密度とせん断弾性係数をそれぞれ100個づつ準備する。合計10,000通りの組合せができる。
 - ②第1層において密度の第 i 番目の値を、せん断弾性係数の第 j 番目の値を選ぶときは、他の層においてもその層で準備されている第 i 番目の密度と第 j 番目のせん断弾性係数を選ぶ。
 - ③こうして得られた地盤に対して $U_1(\omega)$ を求める。
 - ④②以下の手順を i が100、 j が100となるまで繰返す。
- このようにして、地表面における応答倍率の平均値は、

$$E[U_1(\omega)] = 100^{-2} \sum_{i=1}^{100} \sum_{j=1}^{100} [U_1(\omega, \rho_{(1,1)}, \rho_{(2,1)}, \dots, \rho_{(n-1,1)}, G_{(1,j)}, G_{(2,j)}, \dots, G_{(n-1,j)})] \quad (4)$$

と表わせる。ここに、 $U_1(\omega, \rho_{(1,1)}, \dots, G_{(1,j)}, \dots)$ は密度が層ごとの第 i 番目の値であり、せん断弾性係数が第 j 番目の値に対する $U_1(\omega)$ を意味する。

PEM2 本法では各層の密度とせん断弾性係数の組合せとして平均値±標準偏差の2点の組合せ、すなわち1層につき4通りの組合せで検討した。地盤全体としては 4^{n-1} 通り ($n-1$; 表層の数) の組合せである。このとき地表面での応答倍率の平均値を図1a)のようにそれぞれ $1/4$ の重みを用いて求めた。すなわち、

$$E[U_1(\omega)] = 2^{-2(n-1)} \sum_{m=1}^{n-1} \sum_{l=1}^2 \sum_{j=1}^2 [U_1(\omega, \rho_{(m,l)}, G_{(m,j)})] \quad (5)$$

ここで $\rho_{(m,1)} = \rho_{Mm} - \sigma_{\rho m}$, $\rho_{(m,2)} = \rho_{Mm} + \sigma_{\rho m}$

$G_{(m,1)} = G_{Mm} - \sigma_{Gm}$, $G_{(m,2)} = G_{Mm} + \sigma_{Gm}$

ρ_{Mm} , G_{Mm} ; 第 m 層の密度、せん断弾性係数の平均値

$\sigma_{\rho m}$, σ_{Gm} ; 第 m 層の密度、せん断弾性係数の標準偏差

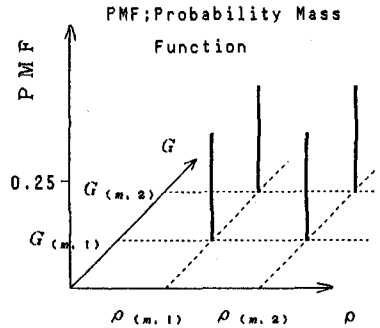


図1a) PEM2の重みづけ

PEM3 各層の密度とせん断弾性係数の平均値および平均値± $C \times$ 標準偏差 (C ; 定数) の3点の組合せ、すなわち1層につき9通りの組合せで検討した。地盤全体としては 9^{n-1} 通り ($n-1$; 表層の数) の組合せである。このときの重みづけは図1b)のようである。すなわち、

$$E[U_1(\omega)] = 3^{-2(n-1)} \left\{ (1/4) \sum_{m=1}^{n-1} \sum_{l=1}^2 \sum_{j=1}^2 [U_1(\omega, \rho_{(m,l)}, G_{(m,j)})] \right. \\ \left. + \sum_{m=1}^{n-1} \sum_{l=1}^2 [U_1(\omega, \rho_{(m,2l-1)}, G_{(m,2)})] + \sum_{m=1}^{n-1} \sum_{j=1}^2 [U_1(\omega, \rho_{(m,2)}, G_{(m,2j-1)})] \right. \\ \left. + 4 [U_1(\omega, \rho_{(m,2)}, G_{(m,2)})] \right\} \quad (6)$$

ここで $\rho_{(m,1)} = \rho_{Mm} - \sigma_{\rho m}$, $\rho_{(m,2)} = \rho_{Mm}$, $\rho_{(m,3)} = \rho_{Mm} + \sigma_{\rho m}$

$G_{(m,1)} = G_{Mm} - \sigma_{Gm}$, $G_{(m,2)} = G_{Mm}$, $G_{(m,3)} = G_{Mm} + \sigma_{Gm}$

C ; 定数で、Rosenblueth³⁾ によれば $C=1.73$ である。

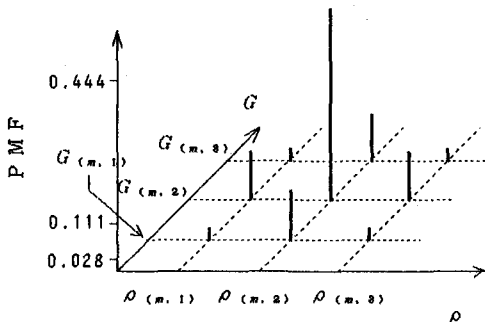


図1b) PEM3の重みづけ

表1 解析に用いた地盤データ

	密度の平均値 (t/m ³)	せん断弾性係数の平均値 (tf/m ²)	層厚 (m)
第1層	1.9	4,020	3.8
2	1.9	3,241	3.6
3	1.4	3,648	12.2
4	1.9	5,805	0.9
5	1.4	3,634	11.5
6	1.9	5,026	5.0
7	1.9	6,867	6.0

〔解析モデル〕

解析に用いた地盤は7層からなる第4種地盤である。その地盤データを表1に示す。また、基盤層は $\rho_b = 2.5(t/m^3)$ 、 $G_b = 63,766(tf/m^2)$ の確定量とした。なお、解析には NEC社製PC9801VXを使用した。

3 解析結果

3.1 地盤定数の不確実性が地盤の地震応答解析結果に及ぼす影響

MCS により求めた密度およびせん断弾性係数と、それらの平均値の組合せによって得られる共振時の地表

面での応答倍率の関係を図2 a)、b)に示す。図中には参考のために地盤定数を確定量として扱った場合の応答倍率を併記してある。これより、地盤定数の不確定性を考慮するとその変動係数の大きさに対して地盤の地震応答も0.07~0.25の変動係数をもってばらつくことがわかる。また、密度およびせん断弾性係数の変動係数が大きくなると応答倍率が小さくなる傾向があることがわかる。この原因として次のことが考えられる。図3はある1層の地盤について密度と応答倍率の関係を示したものである。密度の変動係数が0.1の場合、MCSによる個々の応答倍率値は密度の平均値に対する応答値のまわりに分布している。これに対して変動係数が0.3の場合、MCSによる応答倍率は全体的に小さい値に片寄って分布していることから、上記のような傾向が現れると考えられる。

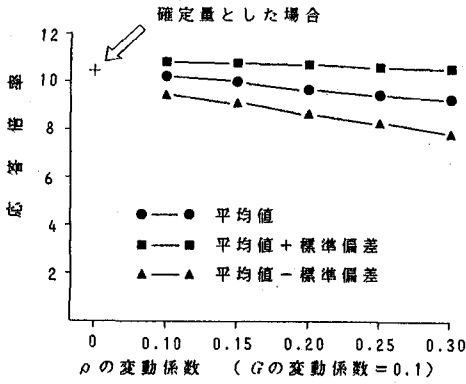


図2 a) 密度の変動係数と応答倍率の関係 (MCS)

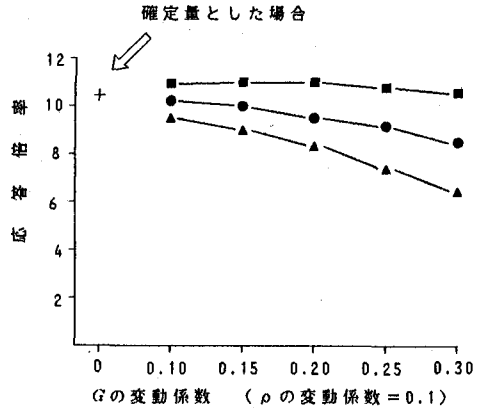


図2 b) せん断弾性係数の変動係数と応答倍率の関係 (MCS)

3.2 効果的解析法

本解析では MCSで得られた結果をもとに効果的解析法との比較検討を行う。PEM2、PEM3により求めた密度およびせん断弾性係数の変動係数と、それらの平均値の組合せによって得られる共振時の地表面での応答倍率の関係を図4 a)、b)および図5 a)、b)に示す。また密度に関して、PEM2、およびPEM3による応答倍率と MCSのそれとの相対誤差を表2にまとめる。これより、密度の変動係数が0.1の場合、応答倍率の平均値および平均値±標準偏差

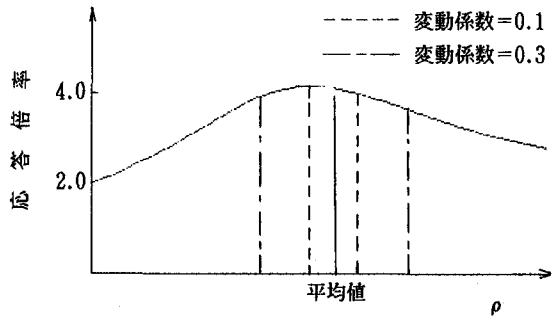


図3 単位体積重量と応答倍率の関係

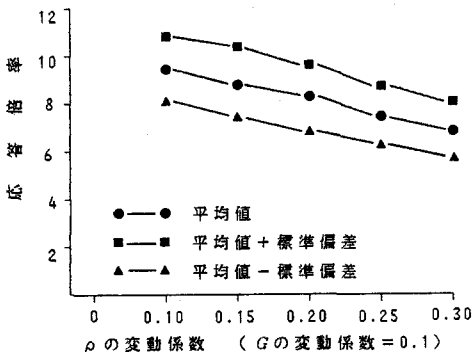


図4 a) 密度の変動係数と応答倍率の関係 (PEM2)

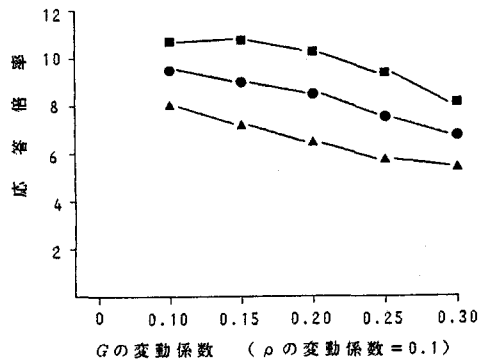


図4 b) せん断弾性係数の変動係数と応答倍率の関係 (PEM2)

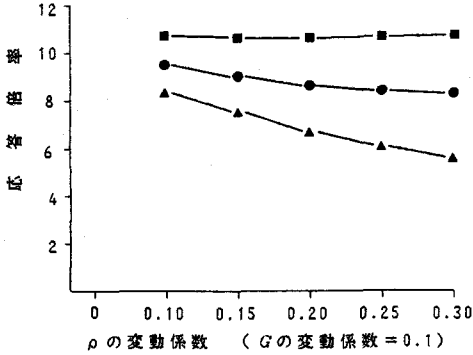


図5 a) 密度の変動係数と応答倍率の関係 (PEM3)

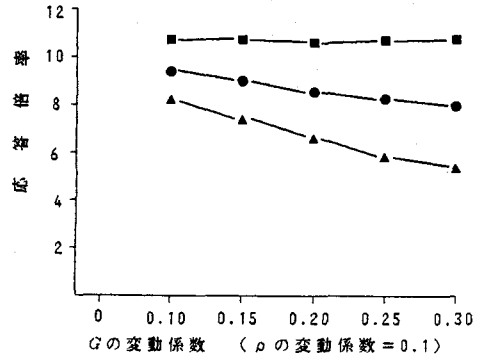


図5 b) せん断弾性係数の変動係数と応答倍率の関係 (PEM3)

差の MCSとの相対誤差はPEM2、PEM3いずれも小さかった。一方、変動係数が0.3の場合、PEM3では平均値-標準偏差のMCSとの相対誤差はPEM2と同程度であったが、平均値、平均値+標準偏差についてはPEM2に比べてかなり小さくなっている。また、せん断弾性係数については紙面の都合上省略したが、同様のことが言える。PEM3で平均値+標準偏差の相対誤差が小さく、平均値-標準偏差のそれが大きいのは次のような理由によるものと考えられる。すなわち、MCSに比べ、PEM3では解析回数が極端に少ないために、PEM3の応答倍率の平均値は小さくなり、標準偏差は大きく評価される。そのため図2 a)、図5 a)を重ね合わせるとわかるように、平均値-標準偏差はより小さくなり、MCSとの相対誤差は大きくなる。一方、平均値+標準偏差はMCSの結果に近い値を示すことになる。また応答倍率に及ぼす影響は、密度もせん断弾性係数もほとんど同じであると言える。

演算時間については、表3のようにPEM2はMCSの1/1600、PEM3はMCSの1/800にまで短縮できる。以上の結果より演算の精度、および演算時間の両面から考え合わせると、PEM3は地盤定数の不確定性を効果的に評価できる手法になり得ることがわかった。

4 まとめ

地盤定数の不確定性の程度に応じて地表面での応答倍率はかなりばらついていることがMCSの解析結果から明らかとなった。今後は地盤定数の不確定性を考慮した地震応答解析が工学上重要な課題となることが考えられる。また今回、地盤定数の不確定性を効果的に評価できる手法として2点によるPoint Estimate Methodと3点によるPoint Estimate Methodを取り扱った。その結果、演算の精度、演算時間の両面から考えると、3点によるPoint Estimate Methodが地盤定数の不確定性を評価する上で効果的な手法になり得ると言える。

〔参考文献〕

- 1) 例えば、原田 隆典・否笠 友紀：確率特性を有する地盤の応答と地震動の空間-時間特性について、土木学会第43回学術講演梗概集，pp.976~977,1988.
- 2) 土岐 憲三：構造物の耐震解析，技報堂出版，pp.82~90, 1981.
- 3) Rosenbleuth, E: Point Estimates for Probability Moments, Proc. of National Academy of Science, Vol.72, No.10, pp.3812~3814, 1975.

表2 MCSとの相対誤差

ρ の変動係数	Method	平均値	平均値-標準偏差	平均値+標準偏差
0.1	PEM2	7.3%	14.9%	0.6%
	PEM3	7.1%	13.8%	1.2%
0.2	PEM2	15.4%	22.2%	9.9%
	PEM3	11.1%	22.9%	1.5%
0.3	PEM2	25.7%	27.4%	24.4%
	PEM3	12.1%	29.6%	0.8%

表3 演算時間の比較 (1振動数あたり)

確定量	MCS	PEM2	PEM3
0.16sec.	24min.12sec.	0.9sec.	1.8sec.