

(53) 地震動増幅に地盤物性値の不確定性が及ぼす影響に関する研究

旭化成工業株式会社 ○園田一博
 豊橋技術科学大学大学院 木田秀人
 豊橋技術科学大学 正員 栗林栄一

1. 序論

地盤の地震動応答解析を行う際に、地盤の物性値および力学的特性を把握することは重要であるが、地盤は一般にかなり不均質であり、また、物性値を算出する際にも誤差が生じる。従って、一般に確定量として扱われている地盤物性値は、ある程度のばらつきを持っている。本論文では、これらの地盤物性値のばらつきおよび推定誤差に着目し、これらの物性値を確率変数とした際に地盤の地震動応答解析に及ぼす影響について検討する。

2. 解析モデル

本解析では、現在豊橋技術科学大学で行われている強震観測の3ヶ所の地震計設置地点（3層地盤 (MODEL1)、4層地盤 (MODEL2)、9層地盤 (MODEL3)）とMODEL3の表層を等価な2層に置換した地盤 (MODEL4) およびモデル地盤として基盤と表層の振動インピーダンス比の変化を考慮した3種類の2層地盤（振動インピーダンス比 $\alpha=0.16$ (MODEL5)、 $\alpha=0.36$ (MODEL6)、 $\alpha=0.60$ (MODEL7)）の計7種類の地盤を対象としており、減衰定数は5%とする。なお基盤層は確定量とした。

3. 地盤物性値の不確定性の考慮

せん断波速度を決定する地盤物性値として密度とせん断弾性係数があるが、松尾らによれば、土の密度のばらつきは変動係数（以下図中では COV とする）にして0.02~0.08と、比較的小さいことから考慮の対象外とした。一方N値の変動係数は0.3程度であること

表1-1 地盤物性値 (MODEL1)

	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)	せん断波速度の 平均値 (m/sec)
第1層	1.70	6,108	5.0	187.6
第2層	2.10	35,828	26.5	408.9
基盤層	2.50 *	91,837 *	-	600.0 *

表1-2 地盤物性値 (MODEL2)

	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)	せん断波速度の 平均値 (m/sec)
第1層	1.63	3,066	3.8	135.8
第2層	2.05	20,961	8.2	316.5
第3層	2.06	38,321	5.3	426.9
基盤層	2.50 *	91,837 *	-	600.0 *

表1-3 地盤物性値 (MODEL3)

	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)	せん断波速度の 平均値 (m/sec)
第1層	1.75	6,118	5.0	185.1
第2層	1.63	4,156	5.7	158.1
第3層	1.95	10,400	6.6	228.6
第4層	2.02	19,158	3.3	304.9
第5層	2.10	43,394	1.1	450.0
第6層	1.80	7,336	1.3	199.8
第7層	1.80	9,526	1.3	221.7
第8層	2.10	35,827	26.8	408.9
基盤層	2.50 *	91,837 *	-	600.0 *

表1-4 地盤物性値 (MODEL5, MODEL6, MODEL7)

インピーダンス 比 α	MODEL 種別		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)	せん断波速度の 平均値 (m/sec)
0.16	MODEL5	1層	1.60	3,673	50.0	150.0
0.36	MODEL6	1層	1.80	16,530	50.0	300.0
0.60	MODEL7	1層	2.00	41,327	50.0	450.0
-	-	基盤	2.50 *	91,837 *	-	600.0 *

(注) * 確定量

から、N値と土のせん断波速度の回帰式から推定されるせん断弾性係数は、ある程度ばらつきを有していると思われ、本解析は変動係数を0.1~0.3に設定した。また土の確率分布形状は、密度、一軸圧縮強度等は、正規分布に従うことが明らかになっていることから、せん断弾性係数についても簡便のため正規分布に従うと仮定する。

4. 解析手法

本解析では、重複反射理論を用いて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。表層が地表から順に第1層、第2層からなり、基盤層が第n層である地盤において、地表面での振幅は ω の関数となり、入射波の振幅が1の場合、

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

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列の係数、 $[R_{n-1}]$ の第2行第1列の係数である。ここで、第n層から上層に向かってSH波が鉛直に入射する場合を考える。この時、

$$[R_{n-1}] = [S_{n-1}] [S_{n-2}] \cdots [S_1]$$

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

k_m : 波数 (ω/c_m) c_m : 第m層内でのせん断波速度

H_m : 第m層の層厚 G_m : 第m層でのせん断弾性係数

である。

また、ばらつきの評価方法として、本解析ではモンテカルロ法（以下 MCSと略す）を採用した。地表面における応答倍率の平均値は、

$$E[U_1(\omega)] = \frac{1}{10000} \sum_{i=1}^{10000} [U_1(\omega, G(1,i), G(2,i) \cdots, G(n-1,i))]]$$

と表せる。この式において、 $U_1(\omega, G(1,i), G(2,i) \cdots, G(n-1,i))$ は、せん断弾性係数が層ごとの第i番目の値に対する $U_1(\omega)$ を意味する。

しかし、モンテカルロ法は、確率変数を扱う際に有効な方法である反面、数多くの計算を必要とするため、計算時間が増加するという難点がある。そこで、本論ではモンテカルロ法とともに、Point Estimate Method（以下PEMと略す）を採用した。この方法は確率密度関数を数点でのみ値を持つ確率変数に置換することによって、解析回数を減らすことができる方法であり、今回は2点による方法を用いた。各層のせん断弾性係数の組み合わせとして、平均値±標準偏差の2点の組み合わせ、すなわち1層つき2通りの組み合わせで検討した。

$$E[U_1(\omega)] = \frac{1}{2^{n-1}} \sum_{i_1=1}^2 \sum_{i_2=1}^2 \cdots \sum_{i_{n-1}=1}^2 [U_1(\omega, G(1, i_1), G(2, i_2), \dots, G(n-1, i_{n-1}))]$$

ここで、 $G(1, i_1)$ 、 $G(2, i_2)$ 、 \dots 、 $G(n-1, i_{n-1})$ は、それぞれ以下のように表される。

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

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

G_{Mm} ：第 m 層のせん断弾性係数の平均値

σ_{Gm} ：第 m 層のせん断弾性係数の標準偏差

5. 解析結果

各地盤モデルについて、MCS より求めた地表面での応答倍率の平均値と周波数の関係を求めた。その一例を図1に示す。これより MCSにより解析した共振周波数における応答倍率が、変動係数の増加と共に減少していることが分かる。これは、変動係数が大きくなると共振点からはずれた点で解析する回数が多くなるためと考えられる。また、各周波数ごとの応答倍率の変動係数は、せん断弾性係数のばらつきの程度に応じて0.05~0.35程度の値を取り、周波数によっても変化する。MODEL5~7を比較してみると(図2参照)MODEL7での応答倍率の変動係数は最大でも0.15程度であるのに対して、MODEL6で0.25、MODEL5で最大0.35と、振動インピーダンス比の値が小さいほど応答倍率の変動係数が増加する。これは、せん断弾性係数のばらつきの影響は基盤に対して表層が軟弱であるほど地表面の応答倍率の不確定性に与える影響が大きいことを示している。

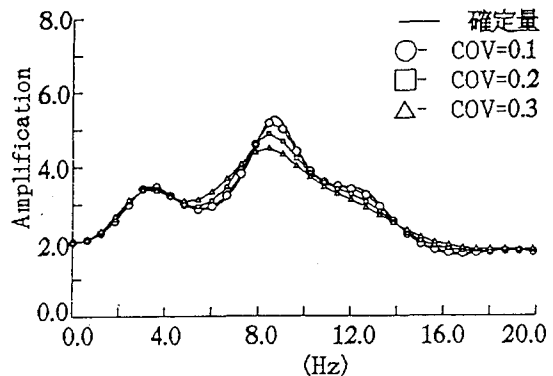


図1 MCSより求めた応答倍率と周波数の関係 (MODEL1)

次にMCSで得られた結果をもとにPEMとの比較検討を行う。一例として、図3、4を見てみると、PEMは確定量の応答倍率と比較して、せん断弾性係数の変動係数が小さいときには比較的良く共振点を表すが、変動係数の増加にともない、高周波数領域になるほど共振点がずれていく傾向が見られる。これは、せん断弾性係数のばらつきの度合いが大きいほど、従来の共振点からはずれた点で解析を行うためと考えられる。また、層数の変化が、PEMに与える影響について検討するために、PEMのMCSに対する応答倍率の相対誤差を各周波数ごとに求

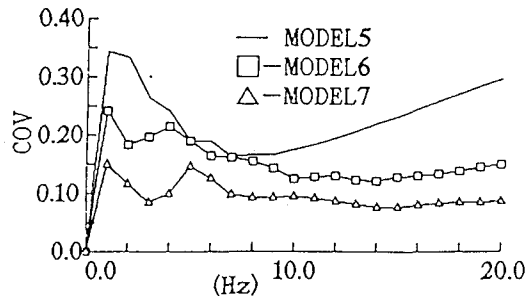


図2 MODEL5~7の応答倍率の変動係数と周波数の関係 (COV=0.3)

めた。一例としてMODEL3およびMODEL4について検討を行う。(図5参照)これを見ると、MCSに対する相対誤差はMODEL4の方が大きく、他のMODELについても層数が少ないほどPEMの精度が低下している。これは、層数が少なくなると応答解析の解析回数も少なくなることが原因と思われる。また、インピーダンス比の変化によるPEMの精度は、振動数によって変化がみられた。

6. 結論

1) 今回対象とした地盤および変動係数の範囲においては、地表面での応答倍率は地盤物性値のばらつきの度合いに応じて0.05~0.35の変動係数を持ち、各周波数ごとに変化する。

2) 共振周波数では地盤物性値の変動係数の増加にともない、従来行われている地盤物性値を確定量としたときの解析手法よりも応答倍率が減少する傾向にある。

3) 振動インピーダンス比の値が低い地盤ほど、地盤物性値のばらつきが応答倍率の不確定性に与える影響は大きい。

4) MCSと比較したときのPEMによる解析は、表層の数が少なく地盤物性値の変動係数が大きくなるほど精度が低下する傾向が高振動数領域ほど顕著に現れ、インピーダンス比、振動数の違いによってもその精度に変化がみられた。しかし、低振動数では比較的精度の良いこと、計算時間が大幅に短縮できることなどから、不確定性の影響を考慮するには有効な手法であると思われる。

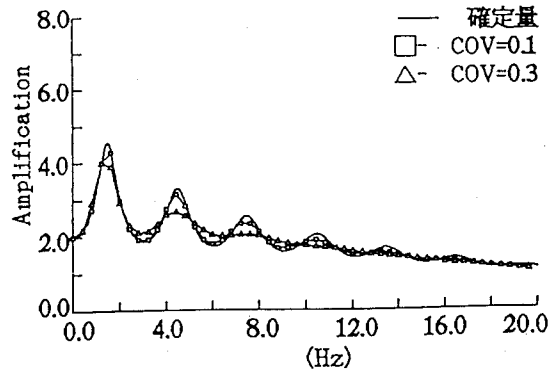


図3 MCSより求めた応答倍率と周波数の関係 (MODEL6)

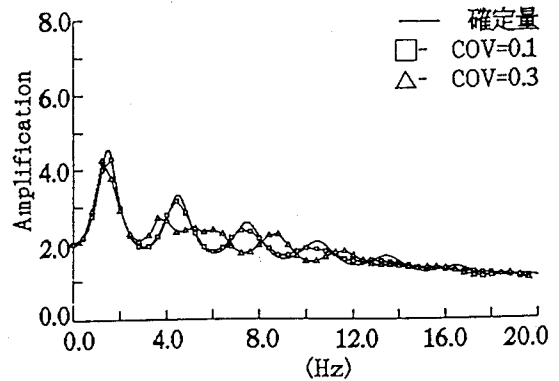


図4 PEMより求めた応答倍率と周波数の関係 (MODEL6)

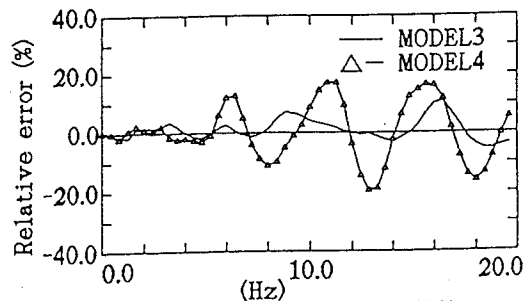


図5 PEMのMCSに対する相対誤差と周波数の関係 (COV=0.3)

参考文献

- 1) 松尾 稔 : 地盤工学—信頼性設計の理念と実際—、技報堂出版、1981
- 2) Rosenbleuth.E : Point estimate for probability moments, Proceedings of the National Academy of Science, Vol.72, No10, pp3812~3814, 1975