

地盤係数の不確定性を考慮した地震時地盤応答解析 — 点推定法による数値解析の効率化 —

SEISMIC GROUND RESPONSE ANALYSIS CONSIDERING UNCERTAINTY OF GROUND COEFFICIENT
- AN EFFICIENT UNMERICAL ANALYSIS USING POINT ESTIMATE METHOD -

池本敏和* 北浦 勝**

By Toshikazu IKEMOTO and Masaru KITaura

In seismic response analysis of a layered ground, fixed values, e.g. mean values of soil parameters have been used. There is, however, essentially randomness in soil parameters of the ground, as well as errors in measuring them. Therefore, it is necessary to take into account such uncertainty in soil parameters in analyzing the seismic ground response. This paper deals with a probabilistic approach for evaluating earthquake response of the layered ground. The method requires only two or three point functions for each variable. We examine the precision of the results obtained by this method, comparing those by Monte Carlo simulation. The method is applied to evaluating response of the ground with linear and equivalent linear stress-strain curves of soil. The results obtained by the method have good agreement with those by Monte Carlo simulation.

Key Words : uncertainty, point estimates method, Monte Carlo simulation, seismic ground response

1. まえがき

土質や岩盤など地盤を対象とする各種構造物に対する設計値の算定に際し、地盤係数のばらつきが問題となる場合がある。従来の地震時地盤応答解析においては地盤係数、例えば密度や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った。しかし、これらの地盤係数にはそれぞれ自身が本来持っている不確定性や、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。

信頼性の考え方は特に土質工学の分野で顕著な発展を遂げているが¹⁾⁴⁾、地震工学の分野でも近年この考え方を取り入れた研究が行なわれている。例えば、地盤の地震応答に関しては、東畑・Ronteixの、N値から推定したせん断波速度の誤差が地盤の地震応答解析結果に及ぼす影響に関する研究⁵⁾、日比野・河村の、せん断波速度および地盤の剛性、減衰のひずみ依存曲線の不確定性を考慮した軟質地盤の地震応答に関する研究⁶⁾、末富らの、地盤物性の揺らぎが地盤の伝達関数へ及ぼす影響に関する研究⁷⁾、北浦・池本の、土質係数と地震動強さの不確定性を考慮した盛土の信頼性解析⁸⁾などが挙げられる。このほか、地震動そのものを時間・空間の関数としてとらえる確率過程論的研究⁹⁾¹⁴⁾、Loh・Hwang¹⁵⁾の、地震動の空間的不確定性を考慮したパイプラインの応答に関する研究も行なわれている。

また、地盤物性値のばらつき程度の同定を確率論的に推定する手法なども提案されている¹⁶⁾¹⁸⁾。さらに、摂動法を取り込んだ解析法もある。摂動法は小さな不確定性を有する確率変数を考え、解を変数の展開式の形で表せることを仮定し、高次項を無視することにより求める近似解法である。したがって、この方法によれば、小さな不確定性を有する解は十分精度よく求まるであろうが、大きな不確定性を有する解の信頼性には問題があるものと考えられる。

ところで地盤の地震応答解析に不確定要素を考慮すると、地表面での地震応答は確率変数として表される。また一般に土木の実用分野で使われている関数は解析的でなく、簡単に微分形で表せない場合が多い。このような場合の不確定性を考慮した地盤の応答解析法の一つに、モンテカルロ・シミュレーション法がある。この方法では、シミュレーション回数を増すことにより、解の精度を高められる反面、計算機の演算速度が大幅に改善された現在においても、解を得るまでの演算が膨大である。一方、点推定法は比較的短い演算時間で解の精度を上げられるという点で、摂動法やモンテカルロ法に代わる有力な方法である。そこで本研究

* 正会員 金沢大学技術官 工学部土木建設工学科 (〒920金沢市小立野 2-40-20)

** 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920金沢市小立野 2-40-20)

では、点推定法を用いた地盤係数の不確定性を考慮した地震応答解析法を提案する。点推定法を用いて地盤係数の組み合わせを行なうとき、以下の3方法を考える。1) 従来の点推定法、2) 簡略化した点推定法、3) ラテン方格法を利用した点推定法。これらから得られる結果をモンテカルロ法の結果と比較・検討する。このようにして、精度を考慮した各手法の適用範囲について検討することが本研究の目的である。

2. 解析手法とモデル地盤

2.1 解析手法

本解析では、モンテカルロ法（以下MCSと称す）と従来からの点推定法（PEM）、簡略化した点推定法（SPEM）、ラテン方格法を取り入れた点推定法（LPEM）をそれぞれ比較検討の対象とする。PEM、SPEM、LPEMでは、確率変数の確率密度関数をわずかに数点にのみ値を持つ確率質量関数に置換する。この置換の際、2点と3点による近似を行なった。点推定法をFig.1に示す。地盤が数層から成る場合、点推定法における地盤第*m*層の確率変数の重み（ここでは各層の重みの合計が1となるように表示してある）はFig.2に示すようになる。

本研究に用いた、あるいは提案する手法は以下のようなものである。

<MCS>

各層ごとに密度とせん断弾性係数のための数値（本文ではこの2変数を地盤係数と呼ぶ。）をそれぞれ*q*個ずつ準備する。確率変数から地盤係数のための数値をランダムに抽出して、抽出した順に並べる。第1層において密度の第*i*番目の値を選ぶときは、第1層のせん断弾性係数も第*i*番目の値を選ぶ。また、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*i*番目のせん断弾性係数を選ぶ。こうして得られた地盤に対して応答を求める。以上の手順を*i*が1から*q*になるまで繰り返す。このようにして、地表面における円振動数 ω に対する応答倍率 $U_1(\omega)$ の平均値を以下のように求める。

$$E[U_1(\omega)] = q^{-1} \sum_{i=1}^q [U_1^*(\omega, \rho(1,i), \rho(2,i), \dots,$$

$$\rho(n-1,i), G(1,i), G(2,i), \dots, G(n-1,i)]$$

ここで、*n*-1は表層数、*q*はシミュレーション回数である。また、 $U_1^*(\omega, \rho(1,i), \dots, \rho(n-1,i), G(1,i), \dots, G(n-1,i))$ は密度が層ごとの第*i*番目の値かつ、せん断弾性係数が第*i*番目の値に対する $U_1(\omega)$ を意味する。なお、シミュレーション回数*q*は3.1の検討によって1,000とした。

<PEM2>

確率変数の密度関数ある確率質量関数で置き換えることがこの種の近似法の基本である。点推定法はモンテカルロ法に代わる有望な方法であり、各確率変数に対する密度関数の数点を計算するだけで、テイラー展開の2次項に比較しうる正確さを有し、かつ非解析関数へも適用可能である。

本解析法では、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はFig.2.a)のようにそれぞれ 0.25^{n-1} の重みを用いて求めた。

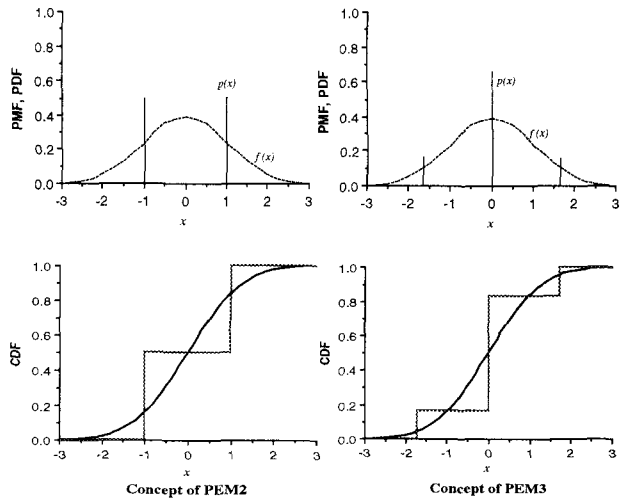


Fig.1 Probability density/mass and cumulative distribution functions.

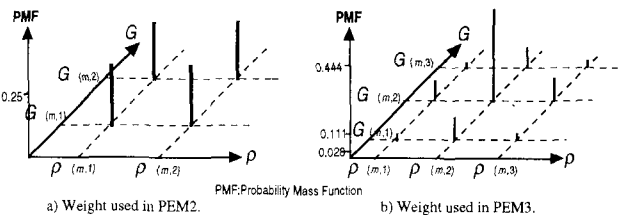


Fig.2 Probability mass functions of soil parameters.

$$E[U_1(\omega)] = 0.25^{n-1} \sum_{i_1=1}^2 \sum_{i_2=1}^2 \dots \sum_{i_{n-1}=1}^2 \sum_{j_1=1}^2 \sum_{j_2=1}^2 \dots \sum_{j_{n-1}=1}^2 [U_1^*(\omega, \rho(1, i_1), \rho(2, i_2), \dots, \rho(n-1, i_{n-1}), \dots, G(1, j_1), G(2, j_2), \dots, G(n-1, j_{n-1}))]$$

ここで、 $\rho(m, 1) = \rho_{mM} - \sigma_{\rho m}$ 、 $\rho(m, 2) = \rho_{mM} + \sigma_{\rho m}$ 、 $G(m, 1) = G_{mM} - \sigma_{Gm}$ 、 $G(m, 2) = G_{mM} + \sigma_{Gm}$ である。 ρ_{mM} 、 G_{mM} は第 m 層の密度、せん断弾性係数の平均値、 $\sigma_{\rho m}$ 、 σ_{Gm} は第 m 層の密度、せん断弾性係数の標準偏差である。

<PEM 3>

本方法では各層の密度とせん断弾性係数の平均値、および平均値 $\pm C \times$ 標準偏差の3点の組合せ、すなわち1層につき9通りの組合せを考える。地盤全体としては 9^{n-1} 通りの組合せである。このときの重みづけは Fig. 1 b) のようである。

$$E[U_1(\omega)] = 0.028/4^{n-2} \sum_{i_1=1}^2 \sum_{i_2=1}^2 \dots \sum_{i_{n-1}=1}^2 \sum_{j_1=1}^2 \sum_{j_2=1}^2 \dots \sum_{j_{n-1}=1}^2 [U_1^*(\omega, \rho(1, 2i_1-1), \dots, \rho(n-1, 2i_{n-1}-1), G(1, 2j_1-1), \dots, G(n-1, 2j_{n-1}-1))] \\ + 0.111/2^{n-2} \sum_{i_1=1}^2 \sum_{i_2=1}^2 \dots \sum_{i_{n-1}=1}^2 [U_1^*(\omega, \rho(1, 2i_1-1), \dots, \rho(n-1, 2i_{n-1}-1), G(1, 2), \dots, G(n-1, 2))] \\ + 0.111/2^{n-2} \sum_{j_1=1}^2 \sum_{j_2=1}^2 \dots \sum_{j_{n-1}=1}^2 [U_1^*(\omega, \rho(1, 2), \dots, \rho(n-1, 2), G(1, 2j_1-1), \dots, G(n-1, 2j_{n-1}-1))] \\ + 0.444 [U_1^*(\omega, \rho(1, 2), \dots, \rho(n-1, 2), G(1, 2), \dots, G(n-1, 2))]$$

ここで、 $\rho(m, 1) = \rho_{mM} - C\sigma_{\rho m}$ 、 $\rho(m, 2) = \rho_{mM}$ 、 $\rho(m, 3) = \rho_{mM} + C\sigma_{\rho m}$ 、 $G(m, 1) = G_{mM} - C\sigma_{Gm}$ 、 $G(m, 2) = G_{mM}$ 、 $G(m, 3) = G_{mM} + C\sigma_{Gm}$ である。また確率変数が正規分布の場合には、 C を簡単に計算でき、1.73となる。

<SPEM 2、SPEM 3>

本方法ではPEM 2、PEM 3と同様に1層につき2点、3点の組合せを考える。ただし第2層目より深い地盤の組合せは第1層目の組合せと同じである。したがって、解析回数は地盤層数に関係なくSPEM 2では4通り、SPEM 3では9通りである。この仮定は深さ方向への確率変数の独立性を無視しようとすることに相当する。この仮定により解析回数を極端に減らし、演算の効率化をはかろうとしている。

<LPEM 2、LPEM 3>

ここでは、ラテン方格法の中の単純ランダムサンプリング法に基づき、各層の地盤係数の組み合わせを行なう。したがって、LPEM 2、LPEM 3での地盤組み合わせ個数はそれぞれ点推定法の近似点の数、すなわち2と3の倍数となる。事前の検討結果から、解が安定するための最小の倍数を計算したところ、倍数を3とした場合に最もよい結果が得られた。したがってラテン方格法による地盤係数の組み合わせ数はLPEM 2は6、LPEM 3は9となる。

LPEM 2を例に単純ランダムサンプリング法について簡単に説明する。各層の密度とせん断弾性係数は点推定法によって r 個 (LPEM 2は2個づつ) の離散変数で表される。 Q をサンプリングしたい数とすると、 Q は r の倍数となっていなければならない。本研究ではこの倍数を3としたとき最もよい結果が得られたことから、サンプリング数は $Q = 3r$ ($= 3 \times 2 = 6$) となる。 Q 個のサンプリングできる確率変数の中から、1個づつをランダムに取り出す方法が単純ランダムサンプリング法である。同様にLPEM 3では $r=2$ で、 $Q = 3 \times 3 = 9$ となる。PEMやLPEMでは、確率変数間の相関が既知である場合にその相関を考慮した解析も可能となるが、土質係数間の相関についての情報が無いことから、ここでは変数間を独立として扱った。

2.2 地盤応答解析法

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²⁰⁾。その際、線形及び等価線形化による重複反射理論を適用した。

確率変数の分布形状は正規分布に従うと仮定し、解析を行なった。なお、地盤内の確率変数を対数正規分布で近似することがあるが、この場合にも本解析法を拡張することは容易である。

2.3 解析モデル

解析モデルとして、Fig.3 に示す表層地盤を考える。4つのモデルの地盤係数の平均値をTable 1 に示す。道路橋設計示方書による地盤種別では、Model 1は1種地盤、Model 2、Model 3は2種地盤、Model 4は3種地盤に区分される。また、基盤層は $\rho_n=2.2(t/m^3)$ 、 $G_n=62,500(tf/m^2)$ の確定値とした。各層の確率変数の変動係数については、統計資料の整理結果などから、密度の変動係数は0.07~0.13、せん断弾性係数のそれは0.1~0.3の範囲と考えた。

3. 解析結果

3.1 MCSのシミュレーション回数

提案した各点推定法の有効性を実証するには、まずMCSのシミュレーション回数による解の安定性を照査することが不可欠である。そこで地盤の1次元震動解析を行ない、1次ピークに対する振動数応答倍率とそのときの固有振動数に注目して、モンテカルロ法のシミュレーション回数と解析結果との比較を行なった。結果をFig.4(a)~(d)に示す。Fig.4(a)はModel 1を対象に線形解析およびHardin, Drnevichによる地盤剛性や減衰のひずみ依存性を考慮した等価線形解析の共振時における1次ピークの固有振動数の平均値と標準偏差を示す。また同図(b)はModel 1の応答倍率について、同様に(c)はModel 4の固有振動数について、(d)は応答倍率についての結果をそれぞれ示す。図中の実線は平均値を、破線は標準偏差を表す。これらより、50、100回のシミュレーションでは平均値、標準偏差ともに解は安定せず、1,000回以上のシミュレーションにおいて解の安定性が認められた。したがって今回対象とした地盤では、モンテカルロ法のシミュレーション回数は1,000回とした。

3.2 地盤係数の不確実性が地盤の地震応答解析結果に及ぼす影響

前述したように密度の変動係数を0.07~0.13に、せん断弾性係数のそれを0.1~0.3の範囲でパラメトリックに変化させ、地盤応答を求めた。MCSにより求めた共振時の地表面での応答倍率と固有振動数の関係をFig.5(a)~(d)に示す。紙面の都合で、Model 1の線形及び等価線形解析の結果のみを掲載した。実線は平均値を、破線は平均値±標準偏差を、一点鎖線は変動係数を示している。

Fig.5(a), (b)に注目すると、密度自身は本来持っている不確実性の程度が小さいこともあって、結果への影響はほとんどないといえる。一方Fig.5(c), (d)では、せん断弾性係数の変動係数の増加に伴い、平均値や標準偏差は大きく変化している。Fig.5(c), (d)からはわかりにくいですが、数値結果より等価線形解析では、せん断弾性係数の変動係数が0.3のところ、応答倍率の変動係数は0.35、固有振動数のそれは0.21であり、両者には0.14の差がある。

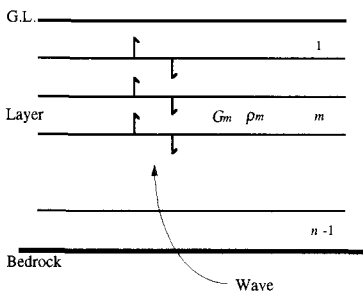


Fig.3 General view of seismic wave propagation.

Table 1 Model grounds.

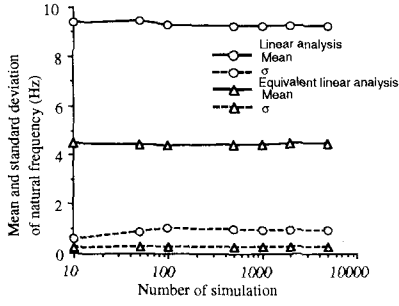
Model 1			
Layer No.	Density(t/m^3)	Shearing modulus of elasticity(tf/m^2)	Thickness (m)
1	1.6	3,600	3.0
2	1.8	11,250	3.0
Bedrock	2.2	62,500	---

Model 2			
Layer No.	Density(t/m^3)	Shearing modulus of elasticity(tf/m^2)	Thickness (m)
1	1.6	3,600	3.0
2	1.8	11,250	3.0
3	1.6	3,600	3.0
4	1.8	11,250	3.0
Bedrock	2.2	62,500	---

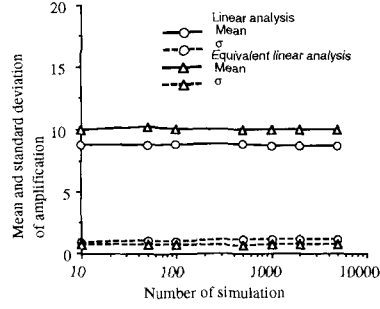
Model 3			
Layer No.	Density(t/m^3)	Shearing modulus of elasticity(tf/m^2)	Thickness (m)
1	1.9	3,455	3.6
2	1.9	6,700	4.0
3	1.9	5,957	6.4
4	1.9	7,570	5.6
Bedrock	2.2	62,500	---

Model 4			
Layer No.	Density(t/m^3)	Shearing modulus of elasticity(tf/m^2)	Thickness (m)
1	1.9	4,020	3.8
2	1.9	3,241	3.6
3	1.4	3,648	12.2
4	1.9	5,816	0.9
5	1.4	3,634	11.5
6	1.9	5,026	5.0
7	1.9	6,867	6.0
Bedrock	2.2	62,500	---

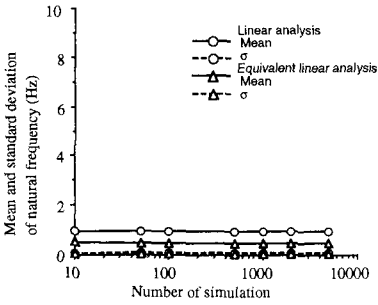
1 $tf/m^2 = 9.8$ kPa



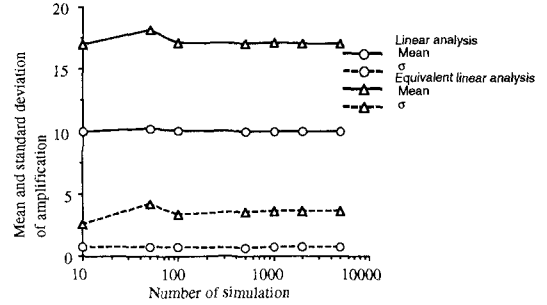
(a) Natural frequency for model 1 ground.



(b) Amplification for model 1 ground.

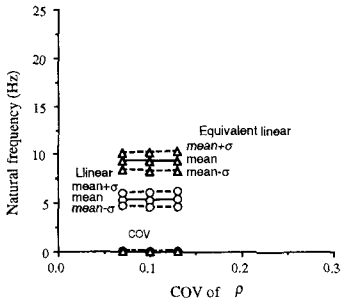


(c) Natural frequency for model 4 ground.

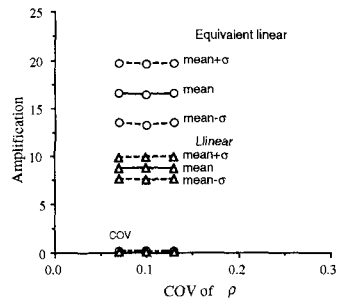


(d) Amplification for model 4 ground.

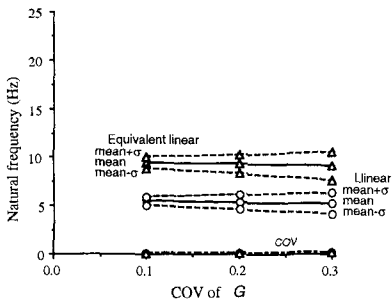
Fig.4 Analytical results for number of simulation.



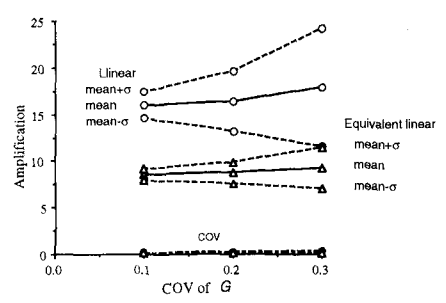
(a) Natural frequency vs. COV of ρ .



(b) Amplification vs. COV of ρ .



(c) Natural frequency vs. COV of G .



(d) Amplification vs. COV of G .

Fig.5 Distribution of natural frequency and amplification for model 1 ground.

3.3 解析結果

各手法によって求めた地盤の固有振動数及び応答倍率のそれぞれの平均値と標準偏差をMCSによって求めたそれらの値で除し、これを相対誤差と定義した。解析結果より得られた相対誤差を、Fig.6、7にまとめた。また、このときの演算時間をTable 2に掲載した。ここでは、演算時間の効率化を目的としているので、4時間以上要した解析結果については除外した。

PEM2、PEM3の結果に注目すると、すべての地盤において平均値の相対誤差は1%以内である。標準偏差の相対誤差については、平均値ほど精度は高くはないものの最大で20%前後と比較的高い精度を得ることができた。すなわちPEMによる解は精度が高く、層数に関係なく安定していることがわかる。しかし演算時間は地盤層数の増加に伴ない増加する。手法別に精度を比較すると、全体としてはPEM2,3が優れているといえる。しかし例えば、PEM2では層数によって 4^{n-1} ($n-1$:表層数)の組合せ回数が必要とするため、Model 4の7層地盤の場合には、47回のシミュレーションを行なうことになり、Table 2からもわかるように、線形解析では解を得るまでにMCSの約16倍、等価線形解析では4時間以上の約160倍以上も演算時間が必要となる。これは、PEMは層数の制約を強く受けていることを表しており、層数の多い地盤に適用する場合には、PEMは十分な計算効果を期待できないと言える。

SPEM2、SPEM3の結果によれば、Fig.6に示す線形解析の範囲では平均値で4%の誤差である。しかし、等価線形解析では精度の低下がみられ、平均値の相対誤差は5~30%と大きいことがわかる。また、SPEM2、3から求まる標準偏差の相対誤差は、SPEM2で0~90%、SPEM3で0~60%の範囲内にある。これは、SPEMでは解析回数が少ないため、すべての層の地盤係数が小さい、あるいは大きな組み合わせによる解析結果が全体の誤差に影響したため、と考えられる。

一方、SPEMは2.1で説明したように表層数に関係なく、SPEM2では4通りの、SPEM3では9通りの組合せを計算するのみの解析法のため、演算時間の短縮に関してはその効果が期待される。Table 2からわかるように、SPEMのMCSに対する演算時間比は、SPEM2で約1/110~1/200、SPEM3で約1/70~1/120程度であり、演算時間が相当に短縮されている。以上見たように、固有振動数と応答倍率の平均値の誤差は大きくても30%で

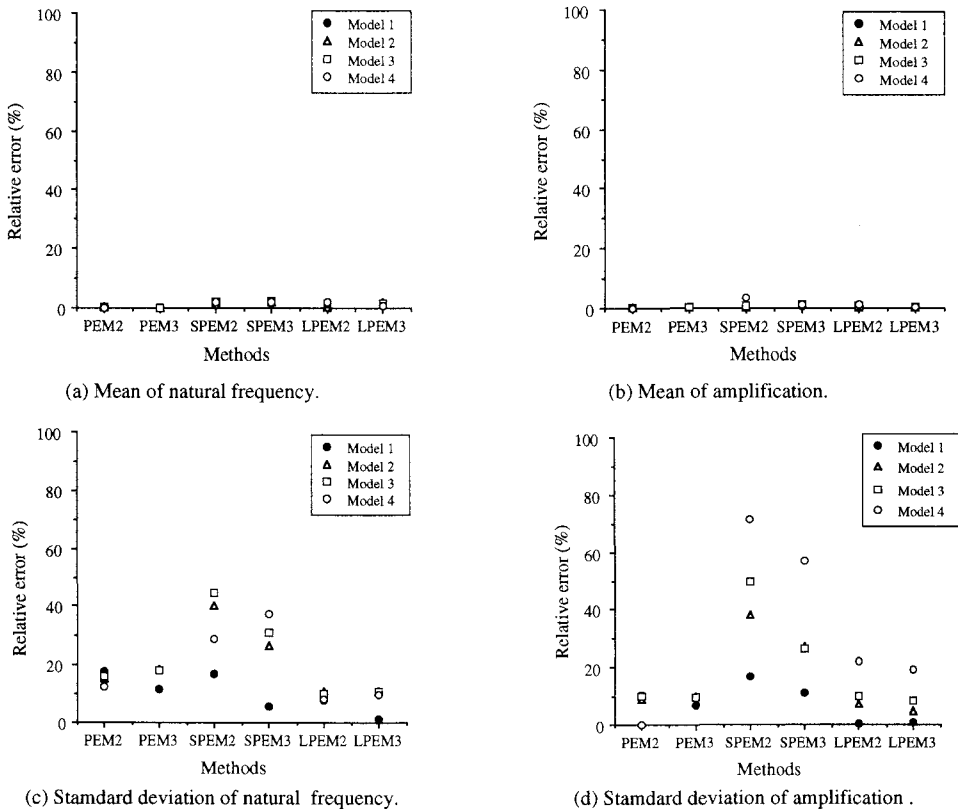
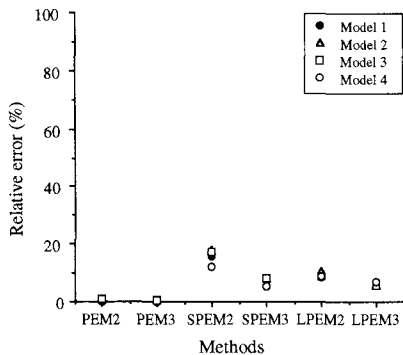
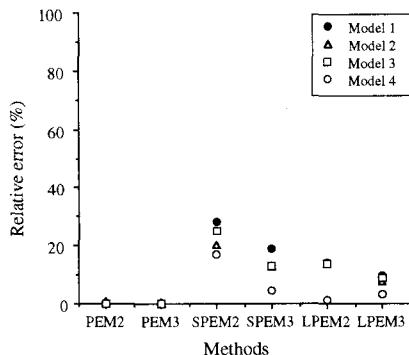


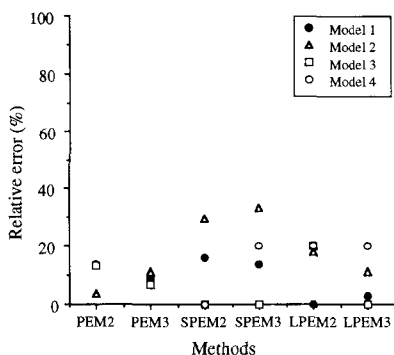
Fig.6 Relative errors in linear analysis.



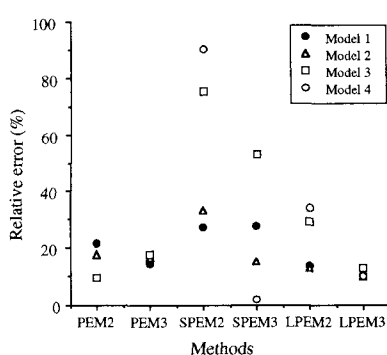
(a) Mean of natural frequency.



(b) Mean of amplification.



(c) Standard deviation of natural frequency.



(d) Standard deviation of amplification.

Fig.7 Relative errors in equivalent linear analysis.

あるから、平均値の評価には SPEMでも実用上十分であるといえる。しかし標準偏差の相対誤差に対しては、その値が大きく、未だ手法改良の余地が残されているものと考えられる。

つぎにLPEM2、LPEM3の結果に注目すると、線形及び等価線形解析の平均値の誤差はLPEM2で15%以下、LPEM3で10%以下である (Fig.6(a), (b), 7(a), (b))。標準偏差は固有振動数で約20%と (Fig.6, 7(c)), SPEM2、SPEM3のそれに比較して10%程度の誤差の向上がみられる。また、線形解析における固有振動数と応答倍率の平均値の誤差は2%以内と十分な精度を有していることがわかる。一方、MCSに対するLPEMの演算時間比は、LPEM2では約1/70~1/120、LPEM3では約1/50~1/90である。この方法では、演算時間を考えながらラテン方格法の組合せ個数を

Table 2 Ratio of CPUtime of each method to that of MCS.

Model ground	Method	Linear		Equivalent linear	
		CPU time min.	Method/ MCS sec.	CPU time min.	Method/ MCS sec.
Model 1	MCS	38.9	1	6	16.9
	PEM2	0.8	1/48	6.1	1/61
	PEM3	3.3	1/11	30.7	1/12
	SPEM2	0.3	1/129	3.2	1/118
	SPEM3	0.5	1/77	2.8	1/134
	LPEM2	0.4	1/97	4.5	1/83
	LPEM3	0.5	1/77	6.3	1/59
Model 2	MCS	1	0.3	13	1.1
	PEM2	15.4	1/3	3	24.1
	PEM3	6	22.4	82	50.5
	SPEM2	0.4	1/150	6.3	1/124
	SPEM3	0.7	1/86	8	1/97
	LPEM2	0.5	1/120	10.1	1/77
	LPEM3	0.7	1/86	14	1/55
Model 3	MCS	1	0.5	14	8.5
	PEM2	15.2	1/48	3	37.8
	PEM3	6	26.5	87	23.3
	SPEM2	0.4	1/151	6.7	1/126
	SPEM3	0.7	1/86	8	1/105
	LPEM2	0.5	1/121	7.7	1/110
	LPEM3	0.7	1/86	11.6	1/73
Model 4	MCS	1	29.4	45	20
	PEM2	24	27	more than 4hrs.	more than 4hrs.
	PEM3	more than 4hrs.	16.4	more than 4hrs.	more than 4hrs.
	SPEM2	0.5	1/178	13.5	1/201
	SPEM3	1	1/89	22.5	1/120
	LPEM2	0.7	1/127	23.8	1/114
	LPEM3	1	1/89	47	1/57

増加させることによって、さらに精度の向上が期待できるものと考えられる。

以上、本解析の地盤の範囲における平均値の誤差は十数%程度であり、工学的には許容できるものと考えられる。

4. 結論

本研究では、地盤係数の不確定性が地盤の応答に及ぼす影響を求める効率的解析法を提案し、その精度を論じた。

本研究で得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

- 1) 点推定法(PEM)による地盤の固有振動数と応答倍率の解析では、安定したよい精度が得られる。表層数が増加すると大幅に演算時間も増加するため、演算時間短縮という目的は達成できないものの、層数の少ない地盤での解析にPEMは威力を発揮する。
- 2) 簡略化した点推定法(SPEM)による解析では、線形解析の平均値のみ高い精度で求められる。しかし、等価線形解析による平均値や線形・等価線形解析による標準偏差の誤差が大き過ぎることなどから、これらの解析への本推定法の適用には問題があるといえる。
- 3) ラテン方格法を利用した点推定法(LPEM)による解析では、点推定法(PEM)による精度に比較的近い精度が得られた。また、LPEMではモンテカルロ法(MCS)と比べ演算時間を極端に短縮させることができた。今後さらにラテン方格法による組み合わせに関する改良の余地も残されていることから、この方法は実用上有効な解析法であるといえる。

最後に解析を分担していただいた向川泰弘氏(福井県庁)に感謝いたします。なお、解析には金沢大学総合情報処理センター内の富士通社製、FACOM-M 760/20を用いた。

参考文献

- 1) 松尾稔：地盤工学 ー信頼性設計の理念と実際ー、技報堂出版、pp.62-64、1984。
- 2) M. Matsuo and A. Asaoka : Bayesian calibration of embankment safety under earthquake loading, Structural Safety, pp.53-65, Vol.1 No.1, 1982.
- 3) 浅岡顕・田中達司：多点推定理論による斜面安定の信頼性の数値解析, 第18回土質工学研究発表会, pp.1299-1300, 1983.
- 4) G. B. Baecher : Simplified geotechnical data analysis, Reliability theory and its application in structure and soil mechanics, pp.257-277, Martinus nijhoff publishers, 1983.
- 5) 東畑郁生・Stephane Ronteix : N 値から推定した V_s の誤差が地盤の地震応答解析結果に及ぼす影響, 第23回土質工学研究発表会講演梗概集, pp.825-828, 1988.
- 6) 日比野浩・河村壮一：物性の不確定性を考慮した軟質地盤の地震応答性状, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.721-722, 1988.
- 7) 末富岩雄・中村晋：地盤物性の不均質性が地盤の応答へ及ぼす影響に関する一検討, 第21回日本地震工学研究発表会, pp.97-100, 1991.
- 8) 北浦 勝・池本敏和：土質定数と地震動強さのばらつきを考慮した盛土の信頼性解析, 土木学会論文集, 第400号, III-10, pp.123-130, 1988.
- 9) 盛川 仁・亀田弘行：既知波形を含む条件付確率場のシミュレーション理論, 都市耐震センター研究報告, 別冊第8号, 1991.
- 10) 川上英二：一地点の観測記録を含む地震波形の時空間関数のシミュレーション, 土木学会論文集, 第410号, I-12, pp.435-443, 1989.
- 11) Harada, H. and Fugasa, T. : Seismic response characteristics of stochastic ground, 第8回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.427-432, 1990.
- 12) 山崎文雄：確率場の数値シミュレーションと有限要素解析, 日立造船技報, 第48巻, 第1号, pp.189-194, 1988.
- 13) Vanmarcke, E. : Random fields, MIT press, 1983.
- 14) G.I. Schueller and M. Sinozuka : Stochastic methods in structural dynamics, pp. 93-133, Martinus nijhoff publishers, 1987.
- 15) C.H.Loh and Y.S.Hwang : Pipeline response to spatial variation of seismic waves, earthquake behavior of pipeline, storage, telecommunication, and transportation facilities, PVP-Vol.162, pp.145~150, 1989.
- 16) 須藤敦史・星谷 勝：EK-WLI法と有限要素法を用いた逆解析, 土木学会論文集, 第446号, I-19, pp.177-185, 1992.
- 17) 本城勇介・森嶋 章：地下水浸透流解析モデルのパラメーター推定：推定の不確実性とその予測への影響, 土木学会論文集, 第400号, III-10, pp.215-224, 1988.
- 18) 鈴木 誠・石井 清：拡張カルマン・フィルターによる土質係数の空間分布推定, 土木学会論文集, 第406号, III-11, pp.71-78, 1989.
- 19) Rosenblyuth, E. : Point estimates for probability moments, Proceedings of the national academy of science, Vol.72, No.10, pp.3812-3814, 1975.
- 20) 土岐憲三：構造物の耐震解析、技報堂出版、pp.82-90、1981。
- 21) B.O. Hardin and V.P. Drnevich: Shear modulus and damping in soils, Proceedings of ASCE, Vol.98, No. SM7, pp.667-692, 1972.

(1993年9月16日受付)