

I-B 195 不均質物性値を割り付けた表層地盤から得られる空間変動特性

日本技術開発 正会員○ 中村 博一
宮崎大学工学部 正会員 原田 隆典
東京大学生産技術研究所 正会員 山崎 文雄

1. はじめに 地動の観測記録をより詳細に説明するために、決定論的な地盤構造だけでは説明しきれない不確定現象の理解が重要になってきており、そのため従来成層均質と仮定されてきた地球内部構造に対しては不均質性の影響が徐々に考慮され始めている¹⁾。また地盤構造を確率論的に取り扱うことによりその不均質性を定量化できることから、近年確率論的手法を用いて地盤構造の持つ様々なスケールの不均質性が推定されている。本研究では、特に1層地盤でモデル化が可能な表層地盤の物性値が水平方向に変動している場合における地盤応答の空間相関に着目し、摂動近似解を用いてこの空間相関特性の解析的な傾向について調査した。また工学的に重要と考えられる数百メートルまでの地点間距離を考慮して、地盤物性値に不均質性を割り付けた有限要素解析により摂動近似解の適用範囲およびその精度について考察した。

2. 不均質1層地盤応答の摂動近似解 伝播行列法を用いることにより地盤物性値の摂動を考慮した波動方程式から1層地盤応答の1次近似解を求めることができる^{2),3)}。地盤のP波・S波速度の不均質性が等しく、これらと比較して密度の不均質性が非常に小さい場合、上下動を拘束したP-SV波³⁾に対して地表面での絶対変位応答の振動数-波数パワースペクトルは、均質項と不均質項のカップリングを考慮することにより一般に次のような簡単な式として得られる。

$$S_{xx}^B(\kappa, \omega) = \left[K_{AP}^{\delta} \delta(\kappa - \kappa_0) - 2K_{AP}^{\Delta} \bar{\Delta}_S(\kappa - \kappa_0) \right]^2 S_{xx}^B(\omega) \quad (1)$$

$$K_{AP}^{\delta} = 1 / \cos \left(\frac{c_P}{c_S} v_{AP} H \right), K_{AP}^{\Delta} = \frac{v_{AP0}^2 + \kappa \kappa_0}{v_{AP}^2 - v_{AP0}^2} \left\{ 1 / \cos \left(\frac{c_P}{c_S} v_{AP} H \right) - 1 / \cos \left(\frac{c_P}{c_S} v_{AP0} H \right) \right\} \quad (2)$$

ここで、 ω は角振動数(rad/sec)、 κ および v_{AP} は各々水平および鉛直方向の波数(rad/m)、 $\bar{\Delta}_S$ は地盤物性値の不均質性を表すフーリエスペクトル、 c_J ($J = P, S$)は均質地盤に対する複素弾性波速度、 $\kappa_0 = \omega/c$ 、 v_{AP0} は $\kappa = \kappa_0$ における鉛直波数である。また c および $S_{xx}^B(\omega)$ は各々基盤における入力地震動の入掛の伝播速度およびパワースペクトル、 H は表層地盤の厚さである。さらに本研究では鉛直入射波($\kappa_0 = 0$)に対する不均質地盤応答を考慮し、この場合 $\kappa = 0$ で(1)の係数は、

$$K_{AP}^{\delta} = 1 / \cos \left(\frac{\omega}{c_S} H \right), K_{AP}^{\Delta} = \frac{1}{2} \frac{\omega}{c_S} H \sin \left(\frac{\omega}{c_S} H \right) / \cos^2 \left(\frac{\omega}{c_S} H \right) \quad (3)$$

となり、(1)の均質項と不均質項の間にはカップリングが生じていることがわかる。また基盤入力地震動が定常確率過程でかつ不均質表層地盤が均質確率場の場合には、地表面での応答は定常均質確率波となり、したがって振動数-波数パワースペクトル(1)から、振動数-空間パワースペクトル $P_{xx}^S(\xi, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}^S(\kappa, \omega) e^{i\kappa\xi} d\kappa$ が、そしてこのスペクトルの正規化により不均質地盤応答の空間相関を表すコヒーレンス関数 $\gamma_{xx}^S(\xi, \omega) = |P_{xx}^S(\xi, \omega)| / |P_{xx}^S(0, \omega)|$ を求めることができる。

3. 地盤の不均質性および有限要素解析 本研究では、地点間距離が離れるほど地盤物性値間の相関が単調に小さくなる地盤の不均質性を表すために、ガウス型波数パワースペクトル $S_{xx}^A(\kappa) = \sigma_0^2 (a/\sqrt{4\pi}) \exp(-a^2\kappa^2/4) = [\bar{\Delta}_S(\kappa)]^2$ を採用した。波数パワースペクトルとそのスペクトルに対するランダム位相を考慮したフーリエ成分波の重ね合わせによりシミュレートされた確率場は数値誤差の範囲内で完全に等価である。そこで表-1に示す地盤物性値を平均値とした不均質地盤を表すために、各不均質地盤パラメータ(相関距離 a 、変動係数 σ_0)に対して、摂動解析ではスペクトルを直接利用し、有限要素解析ではそのスペクトルからシミュレートされた確率場を均質地盤物性値に割り付けた地盤物性値を用いた。

摂動解析解(1)の適用範囲およびその精度を2次元不均質地盤応答の空間変動に基づいて調査するために、P-SV波に対する有限要素解析コードSuperFLUSH⁴⁾を用い、各節点の上下動を拘束した厚さ30m(=10@1m+10@2m)の有限要素地盤モデル(水平方向は200要素、各土柱の物性値は一定値、1次の卓越振動数は2.5Hz、各要素は平面ひずみ要素、底面は半無限剛体基盤、左右端はエネルギー伝達境界)について解析した。

本研究では解析を容易にするために水平方向の地盤物性値のみを不均質としており、有限要素解析を摂動解析と同一条件下で行うために、不均質地盤の相関距離と比較して各有限要素の幅を十分に小さく(0.2倍以下)、地盤モデル全体の幅を十分に大きく(10倍以上)とっている。そのためこの有限要素解析の結果は統計的に定常均質な不均質地盤応答を示し、時空間的に不規則な地盤応答はエルゴード性を持つと仮定した。つまりこの場合、1回の解析で1組の不均質地盤パラメータに対する地盤応答が得られること

表-1 不均質地盤モデルのパラメータの値

Parameters	Symbols	Values
Density (t/m ³)	ρ	1.8
Mean P-wave velocity (m/s)	c_{P0}	1530
Mean S-wave velocity (m/s)	c_{S0}	300
Poisson's ratio	ν	0.48
Correlation function	S_{xx}^A	Gaussian
Correlation length (m)	a	variable
Coefficient of variation	σ_0	variable
Intrinsic damping ratio	D	0.05

になる。一方、水平・鉛直方向ともに不均質性を持つ地盤の応答解析⁵⁾も行われているが、その場合鉛直方向に不均質な地盤の定常均質応答を得るためにはアンサンブル平均をしなければならず、そのような解析は解析時間などを考慮するとまだ現実的ではないと考えられる。

4. 不均質表層地盤応答の空間変動 前述した不均質地盤の摂動・有限要素解析により、地盤応答の空間相関を記述するコヒーレンス関数が得られ、対象とする振動数・地点間距離の範囲(各々0~10 Hz, 0~300 m)に関してこれらのコヒーレンス関数は、一般に単調減少関数ではないが、どちらかという点地点間距離よりも振動数に関して大きく変動することがわかった。そこで摂動・有限要素解析により得られた不均質地盤応答の空間相関を評価するために、本研究ではコヒーレンス関数を直接用いる代りに、ガウス型指数関数で表されるコヒーレンス関数モデル

$$\gamma_{xx}(\xi, f) = \exp \left\{ -\xi^2 / q^2(f) \right\} \quad (4)$$

を特徴づける振動数依存の相関距離 q を用いる。この相関距離は応答の各振動数成分波の相関が高い範囲を表す振動数のみの関数であり、この空間相関に対する評価を容易にする。以下ではこの相関距離 q を用いて不均質地盤パラメータ(変動係数、相関距離)に関する地盤応答の空間相関特性を議論するとともに摂動・有限要素解析の結果を比較する。

図-1は摂動・有限要素解析により得られた $a=50$ m, $\sigma_0=22.5\%$ に対する不均質地盤応答の相関距離を直接比較した例である。この図からもわかるように、摂動解析と比較して有限要素解析による空間相関は小さくなるが、両解析ともに空間相関は地盤の卓越振動数付近で減少するということが、また空間相関は不均質地盤の相関距離・変動係数が大きくなるにつれて小さくなる傾向を示すということが本研究でわかった。

不均質地盤パラメータの関数として摂動・有限要素解析の結果の違いをみるために、その違いを表す指標として次式の L_2 ノルム差を用いる。

$$D_{PF}(\sigma_0; a) = \sqrt{\int_f \log^2 \{q_P(f, \sigma_0)/q_F(f, \sigma_0)\} df / \int_f \log^2 \{q_F(f, \sigma_0)\} df}$$

ここで、 q_P と q_F は各々摂動・有限要素解析に対する(4)の振動数依存相関距離であり、この L_2 ノルム差が大きいくほど両解析結果が異なる。また本研究では L_2 ノルム差を求めるために2.5 Hz(1次の卓越振動数)以上の振動数範囲を用いた。この理由は、この振動数以下で地盤応答がほぼコヒーレント(完全相関の場合 q は無限大)であり、 L_2 ノルム差を求めるためにこの範囲を用いることは適切でないと考えたためである。

図-2は不均質地盤パラメータに関する摂動・有限要素解析の L_2 ノルム差である。この図より L_2 ノルム差の傾向は地盤の相関距離に関しては明かでないが、地盤の変動係数に関してはその増加につれて大きくなる傾向がみられる。また両解析結果は $a=50$ m, $\sigma_0=22.5\%$ の場合に最大の L_2 ノルム差を示しているが、この場合でも図-1よりこれらの振動数依存性は類似の傾向を示しており値もほぼ合っていることから、本解析の範囲内では両解析結果はよい一致を示していることがわかる。

5. まとめ 不均質地盤の摂動・有限要素解析手法を示し、地盤応答の振動数依存相関距離を用いて両解析結果を比較した結果、本研究で考慮した地盤の不均質性の範囲内で摂動近似解(1)は充分に有限要素解析による結果と調和的であることがわかった。したがって1層地盤でモデル化が可能な表層地盤構造を持つような建設サイトでは有限要素解析よりもむしろ摂動解析が非常に有用な武器となりうるものと考えられる。なおここで考慮した水平方向の地盤の不均質性は、既往の研究^{6,7)}で用いられている地盤の不均質性のかなりの範囲をカバーするように選んだ。

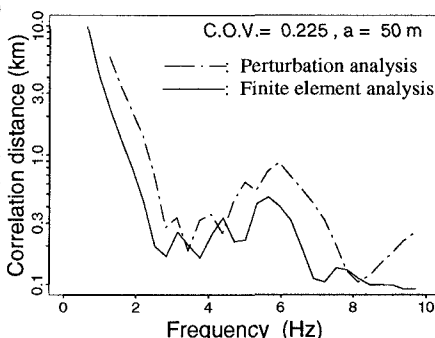


図-1 水平方向の不均質地盤に対する摂動解析と有限要素解析により得られた振動数依存相関距離

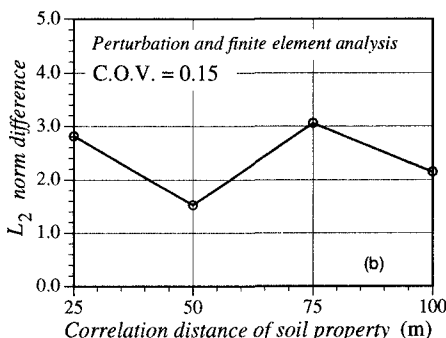
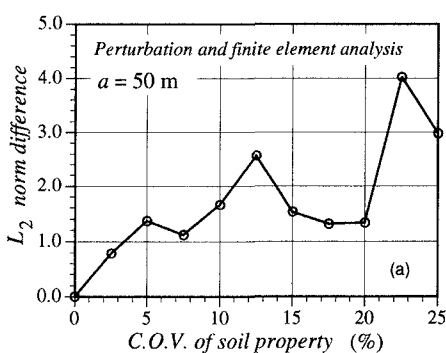


図-2 不均質地盤の変動係数および相関距離に関する摂動解析と有限要素解析の結果の L_2 ノルム差

参考文献

- 1) Wu, R.-S. & K. Aki, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 128, Nos. 1/2, pp. 1-6, 1988.
- 2) Kennett, B. L. N., *Geophys. J. R. astr. Soc.*, Vol. 27, pp. 301-325, 1972.
- 3) 原田隆典・否笠友紀, 宮崎大学工学部研究報告, No. 36, pp. 31-39, 1990.
- 4) 構造計画研究所, *Super FLUSH*, 使用説明書, 1988.
- 5) Sato, T. & H. Kawase, *Proc. Int. Symposium Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Vol. I, pp. 257-262, 1992.
- 6) Fenton, G. A. & E. H. Vanmarcke, *Proc. 4th Int. Conf. Seismic Zonation*, EERI, Vol. II, pp. 669-676, 1991.
- 7) 神田克久・源栄正人, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 476, pp. 85-94, 1995.