

(46)不整形地表面の地震動への影響評価—2次元SH波地震動解析—

(財)電力中央研究所 佐藤清隆

1. まえがき

地質構造的な不整形性は、表層地震動の局所的な増幅特性に強い影響を与え、波動の継続時間の増加に関与することがわかっている¹⁾。本報告では、不整形な地形が地震動に及ぼす影響を把握するため、AL法と摂動法の2つの数値解析手法を用いて求めた周波数一波数スペクトルを比較するとともに、地盤応答計算に適用される摂動法の限界について検討した。

2. 解析手法

図1に示すように、対象とする媒質はせん断波速度 V_2 、密度 ρ_2 の等方均質の半無限地盤上にせん断波速度 V_1 、密度 ρ_1 の等方均質の堆積層で構成されている。周波数 ω で図面に直交する水平 y 方向成分の平面SH波が、 z 方向から入射角 θ_0 で x - z 平面に平行に入射したときの表層の変位を $u_1(x,z)$ 、下層の変位を $u_2(x,z)$ とすると、AL法²⁾により地表および表層の水平方向の不整形性が x 方向に周期長さ L (地盤モデルの長さ)で繰り返されるものと仮定することによって、有限個の離散化した水平方向波数の平面波の重ね合わせで以下のように近似される。ただし、簡略のために時間項 $\exp(-i\omega t)$ を省略する。

$$u_{1N}(x,z) = 2 \sum_{n=-N}^N A_n^{(1)} \cos \nu_n^{(1)} z e^{ik_n x} \quad , \quad u_{2N}(x,z) = e^{ik_0 x - i\nu_0 z} + \sum_{n=-N}^N A_n^{(2)} e^{ik_n x + i\nu_n^{(2)} z} \quad (1)$$

ここで、 k_0 、 ν_0 は入射波の波数の x 、 z 成分であり、 $\nu_n^{(0)}$ は各層の鉛直成分の波数を示し、 $\nu_n^{(0)} = (\omega^2/V_2^2 - k_0^2)^{1/2}$ のような関係がある。また、離散化した水平方向の波数は、 $k = k_0 + 2\pi n/L$ ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) で表され、式中の $A_n^{(0)}$ は散乱係数を示す。

同様な層構造で、剛基礎上の不整形地表面を有する単層地盤の応答を考える。摂動法により地表の変位の一次近似解 v は、次式のように表現される³⁾。

$$v^I(k,f) = \frac{1}{\cos \gamma H} \delta(k-k_0) + f(k-k_0) \gamma_0 \frac{\sin \gamma H}{\cos \gamma_0 H \cos \gamma H} \left(\frac{kk_0 - k_0^2}{\gamma \gamma_0} \right) v^0(k_0, H) \quad (2)$$

ここで、 γ は $\gamma = (\omega/V_s)^2 - k^2$ 、 $\text{Im}(\gamma) \geq 0$ の関係を示し、 V_s は複素せん断波速度、 $V_s = V_s^0(1+iD_s)$ で与えられる。 V_s^0 は弾性せん断波速度で、 D_s は媒質の材料減衰定数である。また、 δ はデルタ関数で与えられる。

3. 地盤応答における不整形地表面の影響

(1) 地盤モデル

ここでは3種類の不整形モデル、すなわち連続COS型の地形(MS)、単一のCOS型の地形(SS)およびランダムな地形(R)について検討した。MSモデル、SSモデルの両者について、2種類のCOS波長を検討した。これ

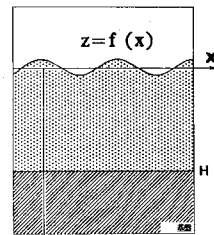


図1 不整形地盤モデル

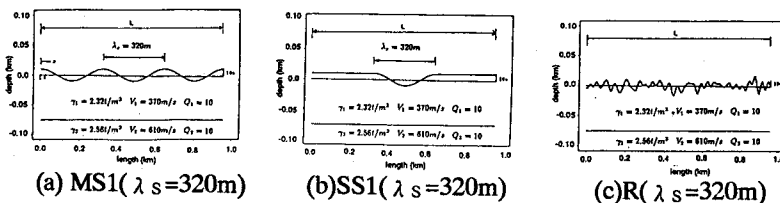


図2 解析モデル

表1 地盤モデルのケース

	MS 1	MS 2	SS 1	SS 2	R
地表面の形状	連続COS型	同左	単一COS型	同左	ランダム型
地形の波長	320m	80m	320m	80m	ランダム

らは、それぞれ地盤の固有周期に対する基本波長に近い波長(320m)と四分の一波長(80m)である。本報告では、不整形な5ケースの地盤モデルを各々MS1、MS2、SS1、SS2、Rとしている(表1、図2)。

ランダムな地形 $f(x)$ は、次式を使って確率過程でシミュレートされる。

$$f(x) = 2 \sum_{j=1}^n \sqrt{S_{ff}(k_j) \Delta k} \cos(kx - \phi_j) \quad S_{ff}(k) = \frac{\sigma_{ff}^2}{\pi k_u^2} \cos^2\left(\frac{m\pi k}{k_u}\right) \quad (3)$$

ここで、 $S_{ff}(k_j)$:波数スペクトル、 $\Delta k: 2\pi/L$ 、 ϕ :ランダム位相角、波数スペクトルのパラメータは、 $m=2$ 、 $k_u=2\pi/\lambda_u$ ($\lambda_u=320m$)、 $\sigma_{ff}=10\%$ の値を仮定する。

地盤構造は、メンフィス市の代表的な簡易地盤モデルを用いた⁴⁾。

(2) 入力地震動

次式のように定義されるRicker Wavelet波(図3)が、入力地震動として用いられる。

$$R(t) = \frac{\sqrt{t_p}}{2} (a - 0.5) e^{-a} \quad \text{ここで} \quad a = \frac{|\pi(t - t_s)|^2}{t_p} \quad , \quad t_p: \text{入力波}$$

の中心周期(=0.81秒)、 t_s :入力波の最大瞬間時刻(=5.0秒)、他の条件を継続時間: $T=20.24$ 秒、時間ステップ: $\Delta t=0.02$ 秒とした。

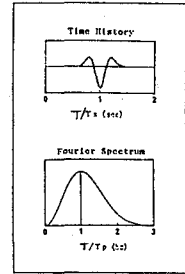


図3 入力波

(3) AL法による地盤応答

1) 解析条件

モデルは、地盤モデルの長さ $L=960m$ 、 x 方向のサンプリング数 $n_s=192$ 、基盤の深さ $GL=-75m$ で、土質物性は、図2中に示す単位体積重量 γ_i 、せん断波速度 V_i 、 Q 値を用いた。解析条件は、入射角 $\theta_0=0^\circ$ 、散乱最大波数 $N=30$ 、解析最大周波数 $f_{max}=10Hz$ である。

2) 解析結果

a. MSモデル

不整形地形によって発生する散乱波の応答特性を検討するために、AL法によって求められた周波数-波数領域のスペクトル振幅を、図4に示す。MS1では、モデル長さ $L(=960m)$ を基本波長とする水平成分の波数 $N=0, \pm 3, \pm 6, \pm 9$ で、スペクトル振幅が認められる。ここで、波数ゼロは水平方向に無限大の波長、すなわち鉛直下方から到来した実体波の応答波動成分を意味しており、周波数1.2Hzの一次ピークは表層地盤の固有周波数を示す。また、波数 ± 3 は波長320mを示し、COS型の不整形地表面の波長に一致し、波数 $\pm 6, \pm 9$ は、各々、この波長の半波長160m、3分の1波長107mに相当する。これらの波動成分は、すべて不整形地表面に起因する散乱波成分を意味する。波数 ± 3 におけるスペクトル振幅のピークより、波長320mの波動成分の卓越周波数が1.4Hz(ここでは、以後 f_{r1} と呼ぶ)に認められ、水平方向の見かけ伝播速度が $f_{r1} \times \lambda = 1.4 \times 320 = 448m/s$ の波動が卓越していることを示している。

同様にMS2の場合には、散乱波の波動成分は波数 $\pm 12, \pm 24$ にスペクトル振幅が認められ、これは、各々、不整形地表面の波長 λ_s と同一波長80mおよび半波長40mに等しい波長を示す。波長80mのスペクトル振幅は4.9Hz($=f_{r2}$)にピークが現れ、この波動の見かけ伝播速度は392m/sが卓越していることがわかる。したがって、両モデルの散乱波動は、その波長が不整形地表面の

波長 λ_s に依存し、見かけ伝播速度は表層地盤のせん断波速度に近似するラブ波成分が卓越することがわかる。

b. SSモデル

図5に示すようにSS1のスペクトル振幅は、発生する散乱波が明らかに一定の見かけ速度で伝播している事を示している。この散乱波動は、SS1ではMS1と同じ波動成分(f_{p1})を含んでおり、見かけ速度は448m/sにほぼ等しい。SS2ではMS1およびMS2と同じ波動成分(f_{m1} , f_{m2})を含んでおり、周波数1.4Hzから4.9Hzの範囲で見かけ速度は448m/sから392m/sへ変化する分散性の波動を示す。

c. Rモデル

図6に示すように、地表面のランダム型の不整形により、散乱波の波長もランダムに多成分の波が発生している。不整形地表面のランダム関数の波数スペクトルの基本波長が320m($=\lambda_s$)であることから、この波長を基本波長とする1/2, 1/3...の波長の散乱波が発生している。また、これらの散乱波は表層のせん断波速度以上、基盤のせん断波速度以下の見かけ速度を有するラブ波が卓越するため、その周波数成分は $V_s/320=1.2\text{Hz}$ 以上である。また、散乱波の中にはSSと同様に分散性のある見かけ速度で伝播性を示しているものがある。したがって、Rの散乱波は、MSとSSの散乱波の両方の特性を持ち合わせている。

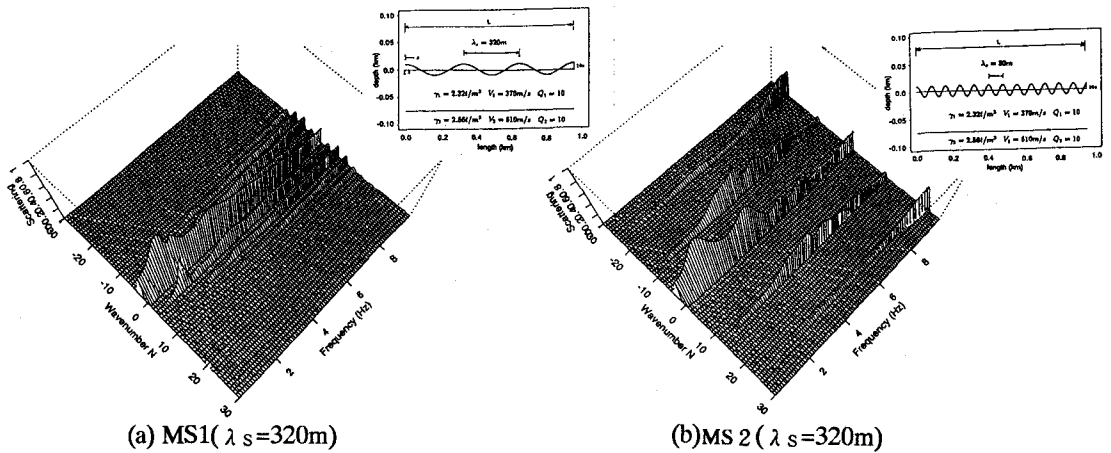


図4 スペクトル振幅

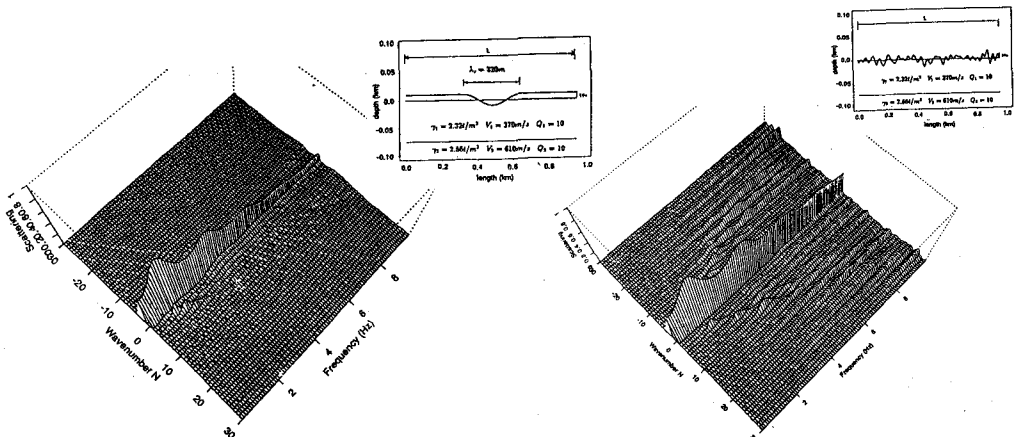


図5 スペクトル振幅 (SS1)

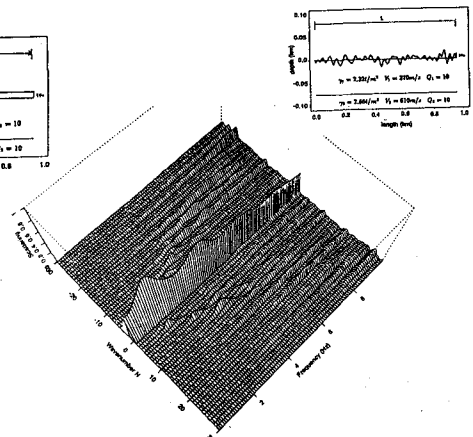


図6 スペクトル振幅 (R)

(4) 摂動法による地盤応答

1) 解析条件

摂動法では、地盤の減衰効果が弾性体地盤と異なるため、実体波を示す波数ゼロのスペクトル振幅の一次ピーク値が水平成層地盤の振幅と一致するように、各モデルに対して減衰定数を推定した。 $D_s = 0.15$ (MS1、MS2)、 $D_s = 0.25$ (SS1、SS2)、 $D_s = 0.10$ (R)

2) 解析結果

a. MSモデル

図7に示すように、摂動法による散乱波は、MS1では波数 ± 3 ($\lambda = 320\text{m}$)の波動成分において唯一発生し、理論式からもわかるように不整形地表面の波数特性にダイレクトに依存する。

b. SSモデル

AL法によるSSの散乱波スペクトルのように一定の見かけ速度で伝播する分散性のラブ波は、散乱波スペクトルに現れない。したがって、摂動法では、SSのような単一のCOS型の不整形地表面に鉛直入射した場合、表層で発生する散乱波の伝播はシミュレートできない。

c. Rモデル

図8に示すように、摂動法によって得られたRの散乱波のスペクトル振幅は、AL法と同様な特徴を示している。減衰効果の違いにより、振幅値はそれほど一致していないが、波数一周波数特性は良く一致した特徴を示す。

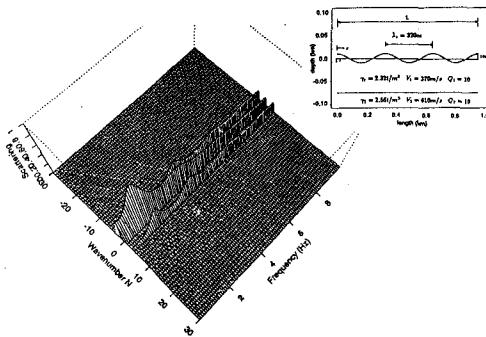


図7 スペクトル振幅 (MS1)

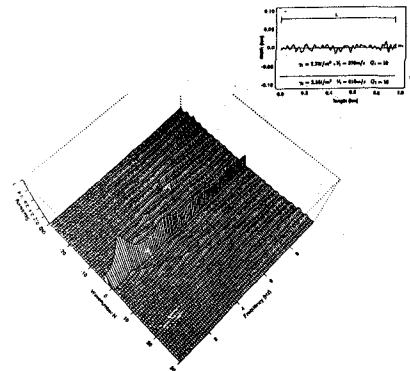


図8 スペクトル振幅 (R)

5. 結論

解析の結果、不整形地表面の地震動の散乱特性は、地形の形状に依存する事がわかった。また、摂動法は、AL法とのCPUタイムで比較すると、数百分の一という短時間で解析できることが有効であり、散乱波の波動エネルギーの空間的分布の定性的評価に役立つといえる。

6. 謝辞

解析において、当時ニューヨーク州立大学客員教授兼NCEEER所長で、現在プリンストン大学教授の篠塚正宣先生には多大な御援助を頂いた。解析手法に関して、宮崎大学教授原田隆典先生貴重な、(株)清水建設大崎研究室の吉田一博氏には御助言、御協力を頂いた。心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1)K.Aki etc, "Influence of small lateral variations of a soft surficial layer on seismic ground motion", S.D.E.E, Vol.9, No.6, 1990.
- 2)K.Aki and K.Larner, "Surface Motion of a Layered Medium Having an Irregular Interface Due to Incident Plane SH Waves", J.G.R., vol.75, no.5, 1970.
- 3)T.Harada, "Seismic Response of Stochastic Ground", First International Conference on Computational Stochastic Method.
- 4)H.Desai, S.Ahmad, E.S.Gazetas and M.R.Oh, "Study of Site Response at a Selected Memphis Site", Technical Report NCEER-90-0023, October 1990.