

京都大学防災研究所 正員 清野 純史
 京都大学防災研究所 正員 土岐 憲三
 京都大学防災研究所 正員 佐藤 忠信
 京都大学大学院 学生員 福井 基史

1. はじめに 不整形地盤上の地震動は、不整形境界面での波動の局所的な回折、散乱、屈折、反射などにより大きく変動する。従来、表層地盤の震動解析には重複反射理論に代表される1次元波動論がよく用いられてきたが、これは地盤の不整形性による波動エネルギーの局所的な集中に起因する諸現象を十分に表現し得ないことから、この不整形地盤の震動特性を把握するための種々の解析手法が提案されてきた¹⁾。ここでは、Aki & Larner による離散化波数法²⁾を3次元境界面へ拡張した Horike³⁾、大堀⁴⁾の手法を用い、地盤の不整形形状の変化や2次元解析と3次元解析の違いが周波数応答倍率や応答波形に与える影響を調べた。

2. 解析手法 3次元弾性体内の運動方程式に変位ポテンシャル ϕ, ψ を導入することにより、波動方程式を満足する波動解を得ることができる。この波動解は以下のように表すことができる。

$$\phi^i = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{A^i(k_x, k_y)e^{i\nu_p z} + B^i(k_x, k_y)e^{-i\nu_p z}\} e^{i(k_x x + k_y y)} e^{i\omega t} dk_x dk_y \quad (1)$$

$$\psi_j^i = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{A_j^i(k_x, k_y)e^{i\nu_s z} + B_j^i(k_x, k_y)e^{-i\nu_s z}\} e^{i(k_x x + k_y y)} e^{i\omega t} dk_x dk_y \quad (2)$$

ここに、 ϕ^i, ψ^i ($i = 1, 2$) の i はそれぞれ堆積層、基盤層を表し、 ψ_j ($j = 1, 2$) の j はベクトルポテンシャル ψ の成分⁴⁾を表す。 A^i, B^i, A_j^i, B_j^i は未知散乱係数、また、 k_x, k_y はそれぞれ x 方向、 y 方向の波数、 ν_p, ν_s はそれぞれ P 波、S 波の z 方向の波数である。これらのポテンシャル量を用いて、境界での応力、変位の連続条件や地表での境界条件を満足させるように方程式をたてることにより、波数に関する無限積分方程式を得る。そして、以下のような不整形地盤境界 $z = \zeta(x, y)$ が周期長さ L_x, L_y で繰り返されるような条件

$$\zeta(x + mL_x, y + nL_y) = \zeta(x, y) \quad (m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (3)$$

を加えることにより、波数の無限積分を無限級数和にすることができる。さらに、打ち切り波数を設定し、フーリエ変換を援用して未知散乱係数の関係式を解くことにより A^i, B^i, A_j^i, B_j^i が求まるので、この係数の値を代入した後の有限級数和の式を用いることにより、与えられた周波数における任意地点での応答を求めることができる。

図-1 に示すような3次元不整形境界面を持つ2層構造の基盤層から、平面SH波が鉛直入射する場合の地表での応答を考える。

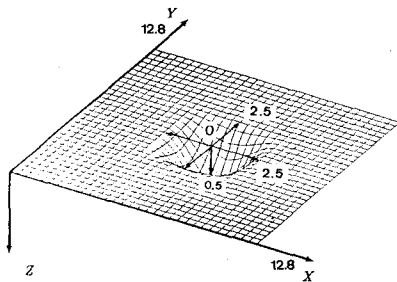


図-1 3次元不整形境界面

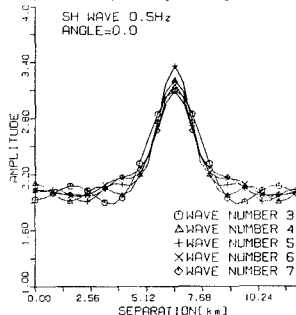


図-2 打ち切り波数ごとの応答倍率

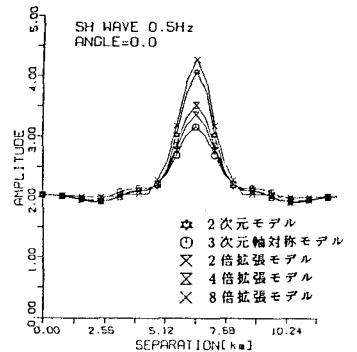


図-3 各地盤モデルの応答倍率

表-1 計算時間の比較

打ち切り波数	計算機	計算時間
$N_x = N_y = 3$	ワークステーション(NWS-3260)	25分
$N_x = N_y = 4$	ワークステーション(NWS-3260)	80分
$N_x = N_y = 5$	ワークステーション(NWS-3260)	5時間以上
$N_x = N_y = 6$	京大汎用大型計算機(富士通M-780)	28分
$N_x = N_y = 7$	京大汎用大型計算機(富士通M-780)	65分

基本モデル地盤(軸対称モデル)の地盤の密度は堆積層(上層)で $1.8t/m^3$ 、基盤層(下層)で $2.4t/m^3$ 、波の伝播速度は堆積層で $v_{s1} = 1.00km/s$, $v_{p1} = 1.87km/s$ 、基盤層で $v_{s2} = 1.73km/s$, $v_{p2} = 3.00km/s$ ⁴⁾とし、不整形長さ L_x, L_y は $12.8km$ とした。打ち切り波数は図-2および表-1の結果を考慮して $N_x = N_y = 6$ とした。また、2次元解析と3次元解析の結果を比較するために、図-1に示した3次元モデル地盤の堆積層の中心を通りy軸に垂直な断面と同形状の2次元モデル地盤での地震動応答も計算した。

3. 解析結果 地盤形状の変化による影響を考察するために、図-1のモデル地盤をy方向に2倍、4倍、8倍拡張したモデル地盤で周波数応答倍率を計算した。その結果を示したものが図-3である。入力周波数は $0.5Hz$ である。2次元解析では地盤を奥行き方向に無限長と考えているので、3次元モデルの地盤の奥行きが拡張されるほど堆積層上での応答倍率が2次元解析の結果に近くなる。本解析に用いた地盤形状および地盤物性値に関する限りでは、y方向に8倍拡張したモデルが2次元解析とほぼ同様の結果を示している。

さらに、2次元モデル地盤と図-1に示す軸対称モデル地盤に中心周期 $1.2sec$ のベル型の周波数特性を持つRickerの波が鉛直入射したときの時刻歴応答を図-4(a)に示す。観測点は図の下に示す5点を選んだ。2次元解析の結果には○印をつけている。同様の解析を2倍拡張モデルと4倍拡張モデルについて行ったものが図-4(b), (c)である。堆積層の厚い地点では波の伝播速度の関係で主要動が遅れて到達し、その後散乱波のfocusing等の影響で波の振幅が大きくなるとともに震動継続時間の伸長がみられる。どちらの図においても、2次元解析と3次元解析の応答波形は特に堆積層上で観測される波形の後続波に大きな違いが現れており、盆地形状を持つ地形の震動解析を2次元モデルで行う場合にはこの点に留意する必要がある。

また、同じ3次元モデルにおいても軸対称モデルと2倍拡張モデル、4倍拡張モデルでは後続波の継続の様子が異なる。本計算例では2倍拡張モデルの後続波が最も顕著に現れており、軸対称モデルと4倍拡張モデルはほぼ同様の震動性状を呈している。軸対称モデル、4倍拡張モデルでも2次元解析と比較すると後続波がかなり明瞭に現れているが、2倍拡張モデルほど大きな振幅を持たない。2次元モデルと3次元モデルの応答波形の相違は解析上の本質的な違いに起因するが、2倍拡張モデルの後続波が軸対称モデル、4倍拡張モデルのそれよりも大きく励起されていることから、この後続波の消長には、x方向とy方向の不整形性長さの比が関与する可能性のあることを示唆している。



図-4 時刻歴応答の比較

2次元モデル(○)と(a)軸対称(b)2倍拡張(c)4倍拡張

参考文献 1) Koketsu: JSCE, No.437/I-17, pp.1-18, 1991. 2) Aki and Larnier: Jour. of Geophys. Res., Vol.75, pp933-954, 1970. 3) Horike: J. Phys. Earth, Vol.38, pp.261-284, 1990. 4) 大堀: 東大博論, 1990.