

# 擬似スペクトル法による不整形地盤の 地震応答解析とその評価

神山 眞<sup>1</sup>・松川忠司<sup>2</sup>・吉田 勝<sup>3</sup>・佐藤 勉<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 東北工業大学教授 工学部土木工学科 (〒982 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

<sup>2</sup>正会員 東北工業大学助手 工学部土木工学科 (〒982 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

<sup>3</sup>学生会員 東北工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒982 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

擬似スペクトル法による不整形地盤の地震応答解析結果およびその評価が述べられる。ここでは、面外震動問題 (SH) が対象とされる。最初に、SH波を対象とした擬似スペクトル法のアルゴリズムが簡単に示される。この中で、他の数値解析法に対する擬似スペクトル法の特徴が与えられるとともに、擬似スペクトル法における仮想境界の取り扱いが述べられる。次に、幾つかの典型的な不整形地盤モデルの解析結果が例示される。これらの解析結果では加速度応答波形に加え、地盤内応力の応答波形が示される。最後に、非定常スペクトル、表面波の分散理論などの分析から、それらの応答波形には表面波が存在すること、その加速度振幅、応力振幅は工学的に無視できない大きさとなることが指摘される。

**Key Words :** *irregular ground, earthquake response, pseudo-spectral method, surface wave, acceleration, stress, dispersion*

## 1. はじめに

1995年兵庫県南部地震を契機として、不整形地盤の地震時挙動の重要性が再び論議されるようになってきた。この問題は、観測、解析の両面から追究する必要があるが、解析の面では、幾何学的な不整形性と地盤物性の非線形とのカップリングなど2次元の範囲内でも多くの未説明の問題を残しつつも、3次元的不整形性の影響に最近の関心は移ってきているようである。一方、地震工学の観点から不整形性の影響を論議する場合、二つの視点が必要であると考えられる。一つは、加速度など地震動の大きさそのものに対する影響である。他は、ひずみ、応力といったテンソル量に対する影響である。特に、後者の視点は、不整形地盤の近傍で何故地震被害が多いかという問題を解く際の隠されたカギになると思われる。その意味から、加速度などのベクトル量に加え、非線形問題への拡張を含めて、応力、ひずみの時刻歴応答を効果的に算定可能な解析法が望まれる。本研究では、その候補としての擬似スペクトル法 (Pseudo-spectral Method)<sup>1)</sup>をとりあげた。これまで、不整形地盤の地震応答解析法としてFDM, FEM, BEMなど各種の方法が用いられているが、擬似スペクトル法は爆破地震動の解析に多く用いられている

一方<sup>2)</sup>、地震工学の分野では最近利用の例<sup>3)</sup>があるものの、あまり利用されていない。本文では、上記の観点からの擬似スペクトル法の有効性を検討する目的を兼ねて、面外震動問題 (SH波) を対象に行なった典型的な不整形地盤モデルの地震応答解析結果について報告する。

## 2. 擬似スペクトル法

擬似スペクトル法は波動伝播の運動方程式を構成する空間微分を波数領域に変換 (スペクトル化) するとともに、時間微分を差分近似して解を時間領域で数値的に求める方法である。波数領域では運動方程式を構成する弾性定数の空間変化が良好に処理できる。また、波数領域での空間微分はFDMの近似度を無限に高くした精度をもつので、FDMやFEMなどの解析法に比較して、空間座標の離散化を粗くすることが可能である<sup>4)</sup>。さらに、スペクトル変換はFFTを利用して効率的に行なうことができ、アルゴリズムも比較的簡単である。特に、時刻歴応答では加速度、速度、変位、ひずみ、応力の算定を各時間ステップでサイクリックに行なうので、必然的に多くのパラメータの解を与えるという特徴がある。ただし、FFTを利用してフーリエ変換、逆変換を行な

う際、FFT特有のwraparound現象が生じるので計算領域の境界で擬似スペクトル法特有の境界処理が必要である。

いま、図-1の座標系を参照して面外震動問題(SH波)を考える。このとき、運動方程式は次のようになる。

$$\rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (1)$$

ここに、 $u_y$  : y方向の変位、 $\sigma_{xy}$ 、 $\sigma_{zy}$  : 図-1の応力成分、 $\rho$  : 密度、 $f_y$  : 単位体積当たりの物体力、 $t$  : 時間、 $x, z$  : 図-1の座標。

式(1)による各種パラメータの時刻歴応答は次の一連の操作を各時間ステップで繰り返すことにより求めることができる。

○応力  $\sigma_{xy}$ 、 $\sigma_{zy}$  の空間分布をフーリエ変換するとともに、それに波数を乗じたものをフーリエ逆変換して、波数領域で応力の空間微分を算定する。

○式(1)から当該時間ステップの加速度  $\ddot{u}_y[n\Delta t]$  を求め、時間微分の差分近似からタイムステップを進めた時刻での速度  $\dot{u}_y[(n+1/2)\Delta t]$ 、変位  $u_y[(n+1)\Delta t]$  を求める。ここに、 $\Delta t$  は時間きざみ。

○変位  $u_y[(n+1)\Delta t]$  の空間分布にフーリエ変換および逆変換を適用してひずみ  $e_{xy}$ 、 $e_{zy}$  の空間分布を求める。さらに、構成則を用いて応力  $\sigma_{xy}$ 、 $\sigma_{zy}$  を求める。

上のような操作の時間きざみ毎の繰り返しから変位、速度、加速度、ひずみ、応力の時刻歴が求められるが、ここで計算領域の境界としての仮想境界からの人工的な反射とFFTのwraparound現象を除くため、特別な処理が必要である。このための方法として、Cerjanら<sup>5)</sup>の提案した減衰境界が用いられることが多い。ただし、筆者らの試行ではこの方法は周期依存性が強く、爆破地震動のような短周期帯の狭帯域での応答では効果があるものの、地震工学で対象とする広い周期帯域では必ずしも有効でないことがわかった。ここでは、Daiら<sup>6)</sup>の提案したone way sponge filterが周期依存性が少ないことから、これを筆者らが独自に修正したものを仮想境界フィルターとして用いた。

### 3. 解析結果の例

多くの種類の不整形地盤モデルを対象に応答計算を実施した。ここでは、紙面の関係から図-2に示すような表面層が1層で、1箇所の傾斜基盤を有する簡単な不整形地盤を例に解析結果を示す。ここで示す結果はすべて中心周期0.3秒で、最大振幅100ガルの

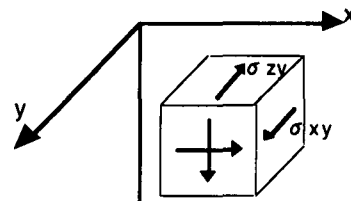


図-1 座標系

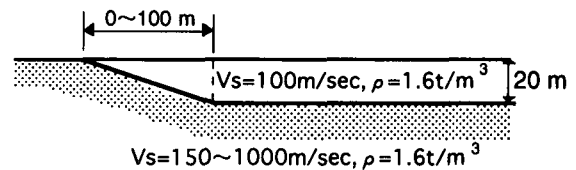


図-2 解析対象の不整形地盤モデル

Ricker wave型の加速度波が基盤から鉛直に入射したときの応答計算によるものである。なお、傾斜基盤の勾配、基盤のS波速度は図-2に示す範囲で変化させて各種のケースの応答計算を行なった。これらの応答解析では区間座標の離散化は5m、水平方向128、鉛直方向64のグリッド点で、時間刻みは0.001~0.0025secの範囲で基盤のS波速度に応じて変化させて行なった。

図-3は地表の代表的地点における加速度応答波形を示した例である。垂直入射による鉛直方向の重複反射に加え、傾斜基盤から発生した波動が水平方向に伝播している様子が明瞭にみられる。しかも、水平伝播による後続の相の加速度振幅はかなりの大きさを有する。図-4は図-1の応力成分  $\sigma_{xy}$  の地表における時刻歴応答を示したものである。当然であるが、この応力成分は地表でも0とならない。その振幅は水平伝播に対応した相で大きくなり、工学的に無視できない大きさとなることがわかる。このような工学的に無視できない大きさの加速度、応力を有する波動は明らかに傾斜基盤の存在により二次的に発生した表面波(Love波)である。そのことを示したのが図-5である。図-5は傾斜基盤終端から水平に300m離れた地点の地表から深さ27.5mまでの代表的深さでの加速度応答波形を示したものである。後続の相は軟弱な表面層のみで大きく、地中での位相が同じであり、表面波の特徴が明瞭にみられる。同様に、300m地点の深さ方向の応力成分  $\sigma_{zy}$  の時間履歴を示したものが図-6である。この応力成分は図-1の別の応力成分と異なり、地中浅部で大きくなり、地中構造物の地震時挙動、液状化の解析など地震工学の観点から重要となることがわかる。

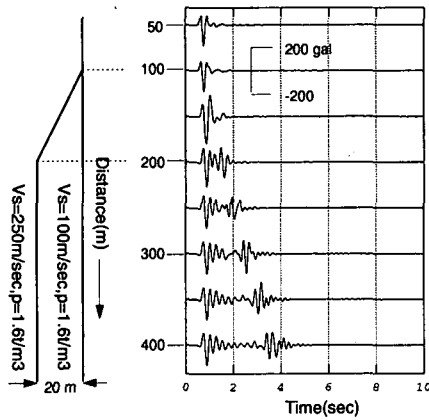


図-3 加速度応答波形

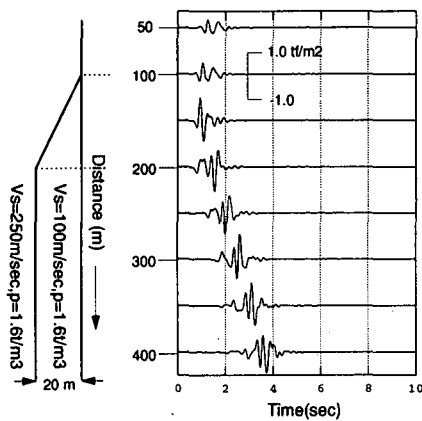


図-4 応力  $\sigma_y$  の応答波形

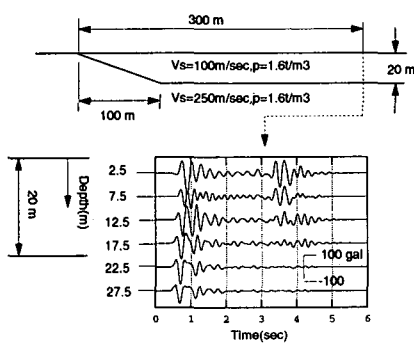


図-5 地中の加速度応答波形

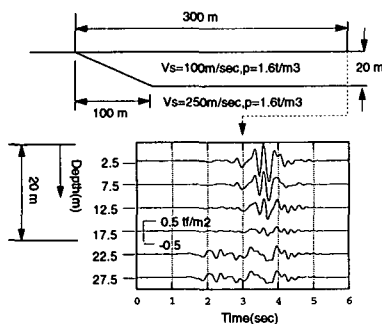


図-6 地中の応力  $\sigma_y$  応答波形

一方、図-7は図-3の加速度応答波形に対して基盤のS波の速度を500m/secとしたときの地表の加速度応答波形を示したものである。後続の表面波による相の振幅が大きくなるとともに、継続時間も長くなっていることがわかる。このような基盤と表面層とのインピーダンス比の違いの影響を比較するため、傾斜構造は同じで基盤のS波速度のみが変化した時の傾斜基盤終端から水平に300m離れた地表の加速度応答波形を並べて示したのが図-8である。この図から表面層と基盤の速度コントラストが大きくなるにつれ、後続の相の勢力が最初のS波の重複反射の部分に比較して相対的に大きくなるのが明瞭に理解できる。しかも、これには二つの原因が寄与してことが図-8からわかる。一つは表面層と基盤の速度コントラストが大きくなるにつれ表面波の励起そのものが大きくなることである。二つは、表面層と基盤の速度コントラストが大きくなるとS波の重複反射の震動継続時間が長くなるので、S波の重複反射の相と表面波の相が重なることである。不整形地盤における実体波と二次的表面波の重なりによる大振幅発生の可能性については兵庫県南部地震における震災の帯の成因に関連して指摘されているが、その可能性は入射波の継続時間の長さとともに、表面層と基盤のインピーダンス比に強く関係することがわかる。

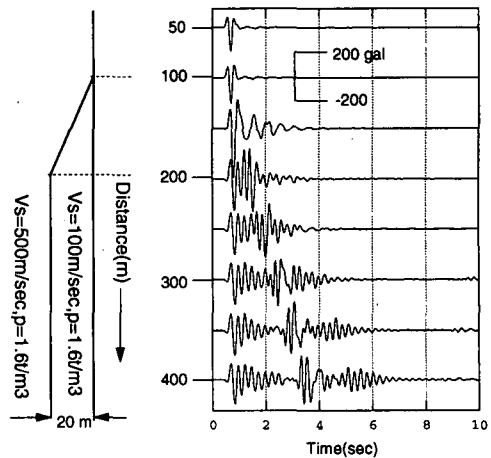


図-7 加速度応答波形 (基盤S波速度500m/sec)

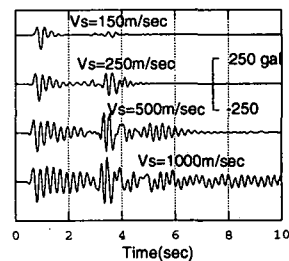


図-8 基盤のS波速度の違いによる加速度波形の比較

次に、基盤傾斜の角度の影響を加速度応答波形について示したのが図-9である。図-9は図-7と同じ基盤のS波速度で基盤傾斜が直角の場合である。図-9から傾斜が直角で鉛直下方からの入射であっても、基盤急変箇所でのS波の回折の影響から二次的表面波が発生されることがわかる。

一方、このような不整形地盤において二次的に発生される表面波の分散性を分析するため、非定常スペクトルを求めた例が図-10である。図-10は図-7の水平距離400mでの加速度応答波形の非定常スペクトルである。明らかに、後続の表面波は二つの相に分化している。この原因をさぐるため、図-7の地盤構造のうちフラットな部分の平行層地盤で期待されるLove波の理論分散曲線と理論増幅スペクトルを求めたのが図-11、12である。ここで、理論増幅スペクトルはMedium Response<sup>7)</sup>として求めている。ここでの入射波が0.3秒の中心周期のRicker waveで与えられているので、全体に0.2~0.3秒の周期が卓越しているが、図-10、11、12の比較から、後続の二つの相はそれぞれLove波の基本モードと高次一次モードの群速度に対応していることがわかる。

#### 4. むすび

SH波を対象に擬似スペクトル法による不整形地盤の応答解析結果の例を示した。ここで対象とした簡単なモデルの結果から擬似スペクトル法は地震工学の解析目的にとって有効であることがわかった。特に、本文の解析から、不整形地盤で生じる表面波は加速度、応力の大きさから工学的に重要な意味をもつことが指摘できる。その大きさは基盤と表面層との速度コントラストに影響されるとともに、実体波の重複反射と表面波の重なり合いにも支配される。

#### 参考文献

- 1) Kosloff, D. et al.: BSSA, Vol.74, No.3, pp.875-891, 1984
- 2) Furumura, T. and Takenaka, H.: Geophy. J. Int. Vol.124, pp.820-832, 1996
- 3) 古村孝志, 額額一起: 第1回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.83-86, 1996
- 4) Fornberg, B.: GEOPHYSICS, Vol.52, No.4, pp.483-501, 1987
- 5) Cerjan C. et al.: GEOPHYSICS, Vol.50, No.4, pp.705-708, 1985
- 6) Dai, N. et al.: BSSA, Vol.84, No.1, pp.185-191, 1994
- 7) Harkrider, D.G.: BSSA, Vol.54, No.2, pp.627-679, 1964

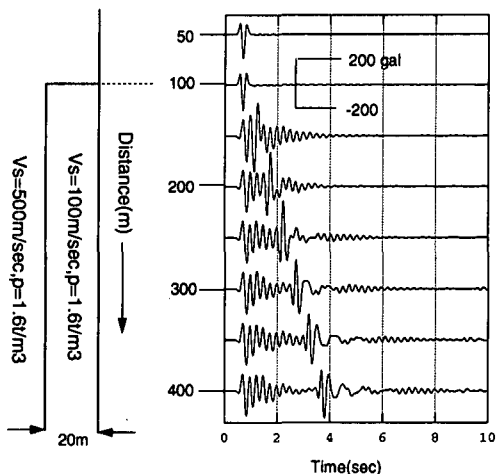


図-9 基盤傾斜が直角の加速度応答波形

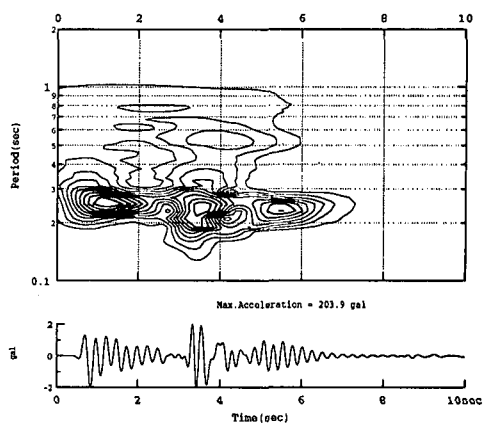


図-10 非定常スペクトル (図-7の400mの加速度波形)

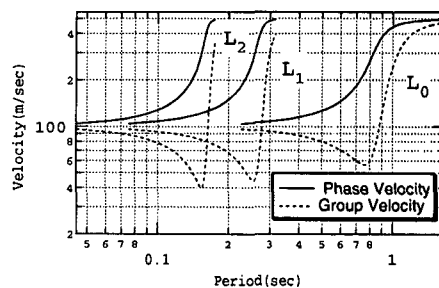


図-11 Love波の理論分散曲線

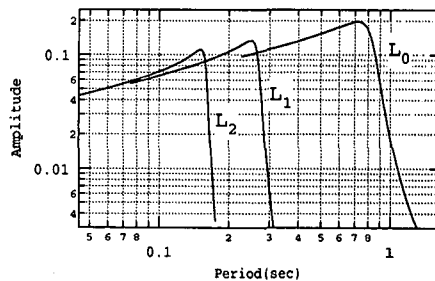


図-12 Love波の増幅スペクトル