

Ⅲ－36

擬似スペクトル法による不整形地盤の応答解析

東北工業大学	正会員	神山 眞
々	々	松川 忠司
々		佐藤 勉

1 はじめに

1995年兵庫県南部地震以来、不整形地盤の地震被害に及ぼす影響の大きさが再び注目されるようになってきた。その際、不整形地盤の影響の大きさは主に加速度などベクトル量で評価されている。これに対して、筆者らは地震被害に直結する不整形地盤の影響の大きさはベクトル量よりも、むしろ応力、ひずみなどのテンソル量にあると考えている。その意味から、加速度などとともに応力などのテンソル量が同時に求められる multi-attribute な不整形地盤の数値解析法を模索してきた。これまで、不整形地盤の地震応答解析として FEM、BEM、FDM などが用いられてきたが、これらはベクトル、テンソルを同時に求める multi-attribute な解析目的に必ずしも適していない。一方、Pseudo-spectral method（擬似スペクトル法）¹⁾ はその意味からの multi-attribute な解析法である。ここでは、擬似スペクトル法の有効性を検討する目的から、簡単な不整形地盤を対象に予備的な地震応答解析を行ったので、その結果を報告する。

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）して、解を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ため、他の方法に比し、空間座標の離散化を粗くすることが可能である。また、スペクトル変換は FFT を利用して効率的に行うことができ、アルゴリズムも比較的簡単である。さらに、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うので、multi-attribute な解析結果を与える。

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、 σ_{xy} 、 σ_{zy} : 図1の応力成分、 ρ : 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ステップを繰り返すことに求めることができる。

○応力 σ_{xy} 、 σ_{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。

○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 σ_{xy} 、 σ_{zy} を求める。

3 解析結果の例

ここでは、予備的な解析として図2のような簡単な不整形地盤の地震応答解析結果を示す。図2の基盤に中心周期 0.3 秒で、最大振幅 100 ガルの Ricker wave が真下から入射したときの応答を求めた。このときの解析は空間座

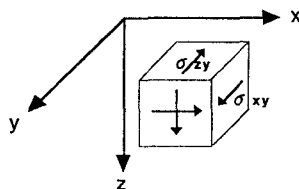


図1 座標系

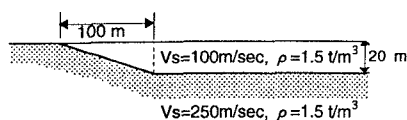


図2 解析対象の不整形地盤

標の離散化は5m、タイムステップは0.002 秒、水平方向256 個、鉛直方向128 個のグリッド点で行った。

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ものである。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 σ_y 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は傾斜基盤から水平に400m離れた地点の地表から深さ87.5mの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。一方、図6は代表的時刻の加速度振幅の空間分布をSnap shot として示したものである。傾斜基盤において表面波が発生される過程が明瞭に観察される。

(参考文献) 1) D. Kosloff, M. Reshef and D. Loewenthal, BSSA, Vol., No.3, pp.875-891, 1984

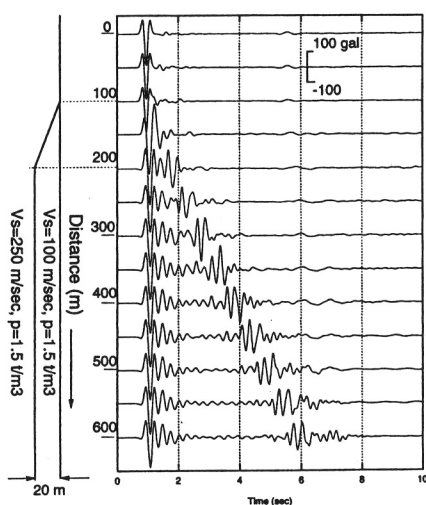


図3 加速度応答波形

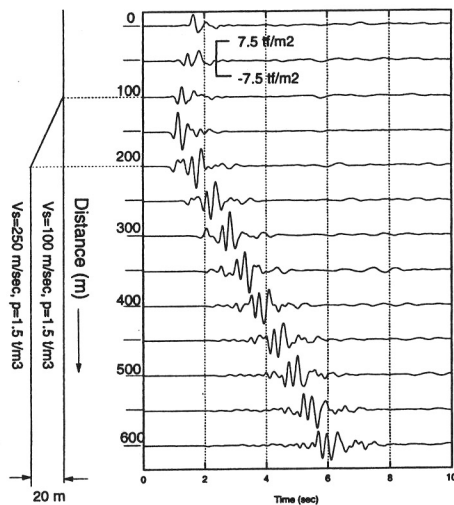


図4 応力 σ_y の応答波形

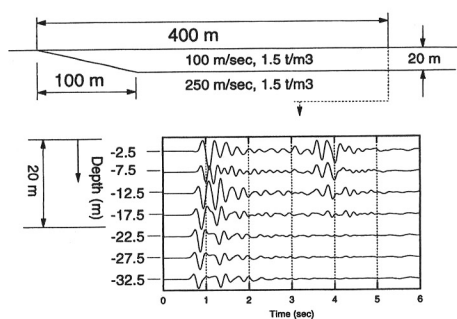


図5 地中の加速度応答波形

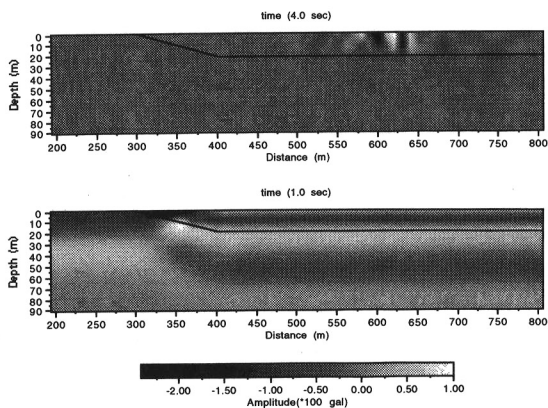


図6 加速度のSnapshot (時刻1.0秒および4.0秒)