

Pseudo-Spectral Method による不整形地盤の地震応答アニメーション

東北工業大学 学生会員 ○佐藤 勉  
 々 正会員 神山 眞  
 々 々 松川 忠司

1. はじめに

現在、不整形地盤に対する地震時挙動の調査、研究が盛んに行われている。その中で、不整形地盤の影響の大きさは、加速度、速度などのベクトル量、また応力、ひずみなどのテンソル量で表され、特にテンソル量は、不整形地盤付近での地震被害を解明する際の、重要な手がかりを提供するものと考えられている。そこで本研究では、ベクトル量、テンソル量を同時に求められる解析法として Pseudo-Spectral Method を取り上げ、P-SV 波（面内震動問題）、SH 波（面外震動問題）を対象に不整形地盤の地震応答解析を行う。そして、その解析結果のうち、P-SV 波（面内震動問題）の加速度応答、ひずみ応答をアニメーションにより表し、不整形地盤内の波動伝播機構を視覚的に明らかにすることを試みた。

2. Pseudo-Spectral Method

Pseudo-Spectral Method は、空間領域の運動方程式の微分を波数領域に変換（スペクトル化）して処理する方法である。波数領域では、運動方程式の弾性定数の取扱いが簡単となるため、座標の離散化を大きくすることが可能となる。また波数領域への変換は、FFT を利用することで効率的に行うことができる。

ここでは、図 1 の座標系を参照して、P-SV 波（面内震動）問題を考える。いま、P-SV 波を対象とした運動方程式は次のようになる。

$$\rho \ddot{U}_x = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (1)$$

$$\rho \ddot{U}_z = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (2)$$

ここに、 $U_x, U_z$  は変位の  $x, z$  成分、 $\sigma_{xx}, \sigma_{zz} (= \sigma_{zz}), \sigma_{zx}$  はそれぞれ応力の  $xx, xz (= zx), zz$  成分、 $f_x, f_z$  は単位体積当たりの物体力の  $x, z$  成分、 $\ddot{U}_x, \ddot{U}_z$  は  $U_x, U_z$  の時間に関する 2 階微分（加速度）、 $\rho$  は密度、 $x, z$  は座標。

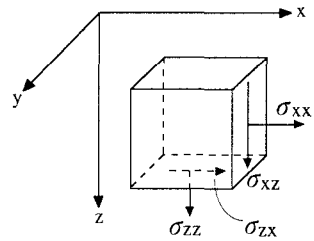


図 1 座標系

このとき、Pseudo-Spectral Method は次のステップで時間応答を求めるものである。

- ・ 式(1),(2)の座標に関する微分をフーリエ変換して、波数領域の方程式を求める。さらに、これをフーリエ逆変換して、任意の時間  $t = n\Delta t$  の加速度  $\ddot{U}_x(n\Delta t), \ddot{U}_z(n\Delta t)$  を求める。ここに、 $\Delta t$  は時間ステップ。
- ・ 式(1),(2)の時間微分を差分で近似して、時間ステップを前進させた時刻での速度  $\dot{U}_x[(n+1/2)\Delta t], \dot{U}_z[(n+1/2)\Delta t]$ 、変位  $U_x[(n+1)\Delta t], U_z[(n+1)\Delta t]$  を求める。
- ・ 変位  $U_x[(n+1)\Delta t], U_z[(n+1)\Delta t]$  に対して、フーリエ変換、フーリエ逆変換を適用して、ひずみ  $e_{xx}, e_{zz} (= e_{zz}), e_{zx}$  を求める。
- ・ ひずみ  $e_{xx}, e_{zz}, e_{zx}$  にせん断弾性係数、Lame の定数を適用して応力  $\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{zx}$  を求める。

以上の操作を時間ステップごとに繰り返して、加速度、速度、変位、ひずみ、応力の時間応答履歴を求めていく。

3. 解析結果および考察

本研究では、様々な不整形をもつ 2 次元の地盤構造を考え地震応答解析を行った。その中から、ここでは、図 2 のような基盤が盆状になっている不整形地盤の地震応答解析結果を示す。地震動の入射波は、卓越周期 0.3sec、最大振幅 100gal の SV 波タイプの Ricker Wave を基盤から鉛直に入射させた。また、この時の応答計算を、水平方向 128 個、鉛直方向 64 個のグリッド点、グリッド点の座標の離散化を 5m、時間ステップ 0.001sec で Pseudo-Spectral Method により行った。そして、その応答結果から、各時間の地盤内振幅

分布を表すスナップショットを、時間間隔 0.01sec で 0.5 ~ 2.49sec までの計 200 個作成した。このスナップショットを用いてアニメーションを作成するわけだが、ここでは、動的な表現ができないため、アニメーションを構成する代表的な時間のスナップショットを用いて、波動の地盤内伝播様子を報告する。実際のアニメーションは、発表当日パソコンを用いて上映する。ちなみに、アニメーションを作成する際のツールとして、一般に市販されているアニメーション作成ソフトを使用した。

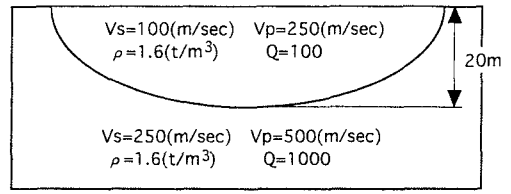


図 2 解析対象とした地盤

図 3、図 4 は、それぞれ水平加速度、鉛直加速度の応答を表すスナップショットである。この図から、入射波が表面層内で重複反射していることと、基盤が傾斜している付近から二次的な波動が発生し、表面層内を伝播している様子が観察できる。また、図 5 のひずみ  $\epsilon_{xx}$  成分の応答から、傾斜基盤で二次的に発生した波動は、地盤内に地割れなどの原因にもなる引張りと圧縮の力を発生させていることがわかる。これらのことから、二次的に発生した波動は、レイリー波であることが理解できる。

今回、このアニメーションの作成により、地盤内に発生する各パラメーターの伝播様子や発生機構を明瞭に見ることができ、不整形地盤が地震時にもたらす影響を視覚的に表すことができた。

(参考文献) 1) D. Kosloff, M. Reshef and D. Loewenthal ; BSSA, Vol.74, No.3, pp.875-891, June 1984

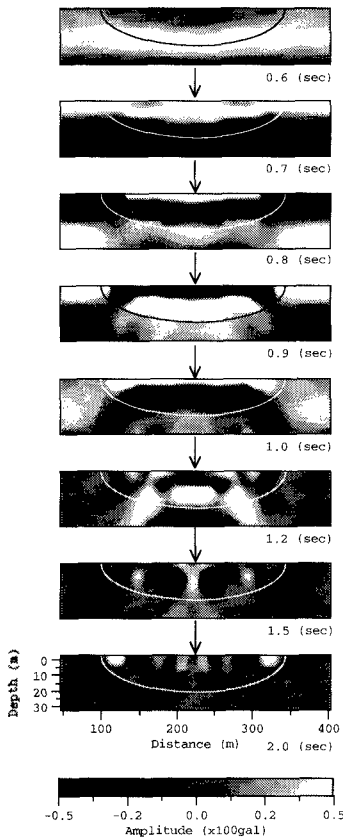


図 3 水平加速度の応答

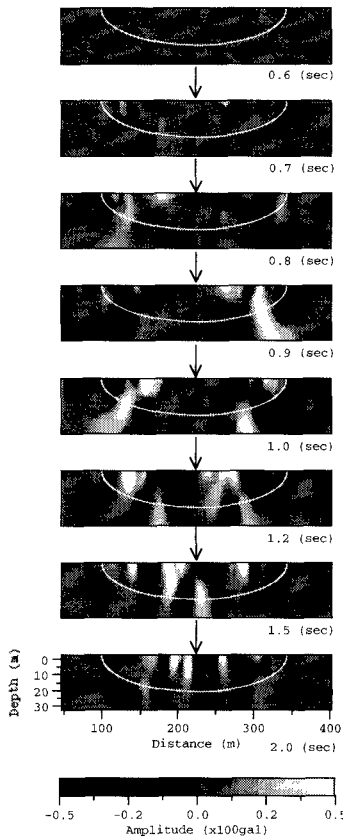


図 4 鉛直加速度の応答

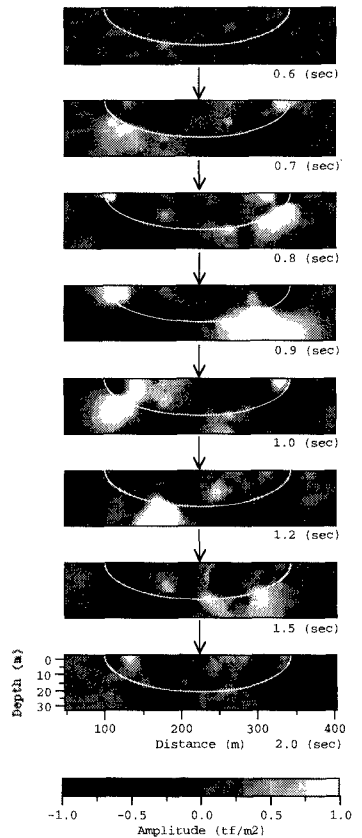


図 5 ひずみ  $\epsilon_{xx}$  の応答