

擬似スペクトル法による不整形地盤の 非線形地震応答解析

神山 眞¹・福地桂一²・松川忠司³

¹東北工業大学工学部環境情報工学科教授
(〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

E-mail:mkamiyam@tohtech.ac.jp

²元東北工業大学院生 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

E-mail:fukuchi@tohtech.ac.jp

³東北工業大学工学部環境情報工学科助手 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

E-mail:matukawa@tohtech.ac.jp

グリッド点をチドリに配した擬似スペクトル法による非線形地震応答解析法を新たに開発した。これは等価線形化法の簡易性を援用した繰り返し収束による非線形解析法である。各点のひずみ時刻歴を追跡した剛性、ダンピングの非定常変動を設定しながら、時刻歴解析を実施して、応答結果が最終的に収束するまで繰り返す方法である。ここでは、この手法の第1の適用例として二次元不整形地盤を対象とした面外震動問題(SH波)が扱われる。この方法を数種類の典型的な不整形モデル地盤に適用して、地盤の非線形性による応答結果が分析される。それによれば大幅に非線形となる不整形地盤では減衰による効果が大きく、不整形構造により二次的に生成される表面波の振幅は線形地盤のそれより小さくなることがわかった。

Key Words : *Nonlinear response, irregular ground, strong motion, pseudo-spectral method strain, stress, equivalent linear method*

1. はじめに

筆者らは不整形地盤の地震動挙動を種々の観点から明らかにすべく擬似スペクトル法を用いた解析を試みてきている¹⁾。擬似スペクトル法はFDM、FEM等と比べ、空間座標の離散化を粗くすることができること、加速度、速度、変位、ひずみ、応力などの時刻歴を同時に与えるmulti attribute²⁾な解析であることなど、不整形地盤の地震応答を検討する上で利点を有している。特に、第2の利点は剛性や減衰係数といった材料定数にひずみ依存性を導入することを可能にすることから、擬似スペクトル法は非線形地震応答解析への拡張が容易な手法と位置づけることができる。擬似スペクトル法をS波の一次元地震応答を適用した非線形応答解析法については既に報告した³⁾。そこで等価線形化法の考えを援用した繰り返し収束法による非線形地震応答が与えられた。本報告はこの方法にならない、擬似スペクトル

法を二次元不整形地盤の非線形地震応答へ適用した結果を述べたものである。

2. 擬似スペクトル法の適用

擬似スペクトル法(Pseudo-Spectral Method, PSM)は地盤震動を支配する運動方程式の空間微分をフーリエ変換およびフーリエ逆変換の利用により空間領域から波数領域に変換して解くとともに、時間微分を中央差分で近似して、各種の運動パラメータの時刻歴を時々刻々と求める数値計算法である¹⁾。ここでは面外震動問題(SH波)を対象として二次元不整形地盤の非線形地震応答への擬似スペクトル法の適用を簡単に説明する。

面外震動問題では図-1に示すような二つの応力と変位により運動方程式が構成されるが、この運動方程式は粒子速度と二つの応力を主パラメータとした次のような連立微分方程式に変換される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} = \begin{bmatrix} 0 & 1/\Delta x & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{u} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/\Delta z \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{u} + \mathbf{f}_y \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{u} = [\dot{u}_y \quad \sigma_{xy} \quad \sigma_{zy}]^T$

式(1)は変位、応力を求めるグリッド点を空間的に離散化してかつ時間微分を中央差分で近似変換して、時間ステップをチドリに進めながら加速度、速度、変位、ひずみ、応力の時刻歴を逐次数値的に算定することができる¹⁾。その際、変位（速度、加速度）、応力を算定するグリッド点の空間的な離散化も図-2に示すようなチドリ方式（staggered）で設定することにより媒質物性の空間変動が著しい場合でも安定した数値解が算定可能である。

上述の擬似スペクトル法の計算法ではひずみ（ひずみ速度）から応力（応力速度）が式(1)の第2式、3式により算定されるが、その際の剛性 μ は非定常な時間変動をもたせることが可能である。また、ここでの擬似スペクトル法では媒質の非弾性による減衰効果も非定常な時間変動をもつパラメータとして導入可能である¹⁾。このように剛性係数、減衰係数に非定常な時間依存性を導入することができることから、もしひずみの絶対値の時間変動と剛性係数、減衰係数のひずみ依存性が与えられれば、ひずみの絶対値の非定常な時間変動に応じた剛性係数、減衰係数の時刻歴が定まり、これにより非線形応答が可能となる³⁾。文献3)で述べているように、これは等価線形化法の基本アイデアに対して剛性係数、減衰係数の時間変動性を導入するように拡張したものであり、等価線形化法と同様に繰り返し収束技法で最終の非線形地震応答の解が求められる。この算定過程はフローチャートとして図-3に与えられている。ただし、面外震動の二次元不整形地盤を対象としたとき、剛性係数、減衰係数にひずみ依存性を導入する過程（図-3のphase IV, V）で2種類のせん断ひずみを考慮する必要がある。その際のひずみ依存性を決定する方法として二つのひずみ成分に対して独立に行う方法、時刻ごとに絶対振幅の大きいひずみ成分のみを対象として行う方法などが考えられる。これは地盤媒質の動的物性における異方性に関わる重要な問題であるが、ここでは最初の試みとして剛性係数、減数係数のひずみ依存性の等方性を仮定して、後者の方法、すなわち、各グリッド点における時刻ごとの二つのひずみ成分の内の絶対振幅の大きいもので剛性係数、減衰係数のひずみ依存性を定める方法によった。この方法によると、図-3のフローチャートにおける繰り返しは後述のモデル地盤程

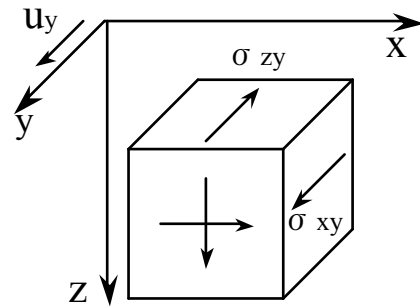


図-1 面外震動問題荷おける座標系

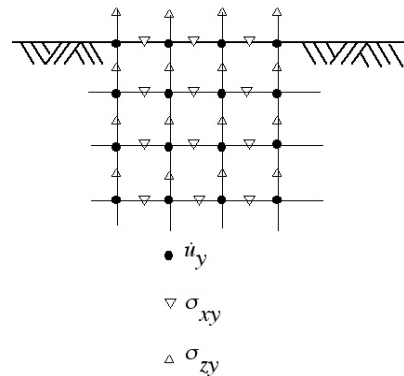


図-2 グリッド点のチドリ設定の模式図

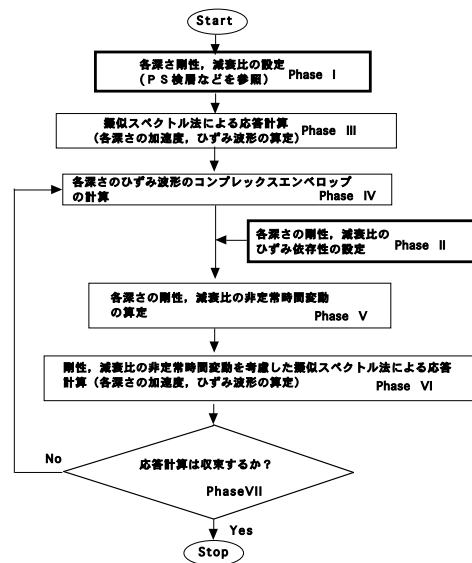


図-3 応答計算のフローチャート

度のグリッド点数と解析時間では5回程度の繰り返し回数で応答結果がほぼ収束した。

3. モデル地盤を対象とした適用例

種々の構造と地盤材料のモデル地盤を対象として数種の入力地震動を入力して応答計算を実施したが、

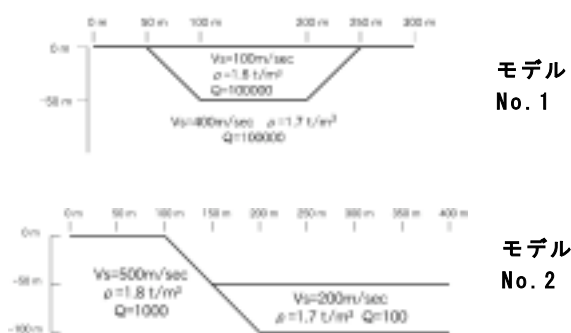


図-4 応答計算のモデル地盤

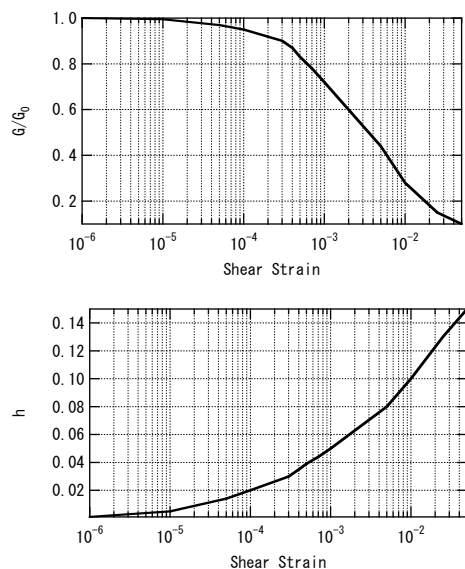


図-5 堆積層のひずみ依存性

ここでは紙数の関係から代表的な適用例のみを示す。**図-4**にモデル地盤の地盤構造を示す。例示するのは対称な盆状構造もつ不整形地盤（モデルNo. 1）と非対称な不整形地盤（モデルNo. 2）である。また、これらのモデル地盤は基盤上の堆積層のみが非線形物性を有するとしており、それらの堆積層の剛性と減衰比のひずみ依存性は**図-5**に示す通りである。なお、入力地震動はすべてSH波の鉛直入射によるものであり、最大振幅100gal、中心周期0.3秒のRicker waveの時刻歴である。以下では、二つのモデル地盤を対象とした非線形応答結果を線形応答の結果と比較して不整形地盤における非線形地震応答の特徴を簡単に分析する。

図-6はモデルNo. 1地盤での地表の代表的な地点における加速度時刻歴を線形応答と非線形応答を比較して示したものである。モデルNo. 1地盤はVs比が1/4と基盤に対する対積層の軟弱度のコントラストが大きく設定されているため、不整形の存在で二次的に生成される表面波の振幅が大きく、かつ長時間にわたって水平方向での反射伝播を繰り返している

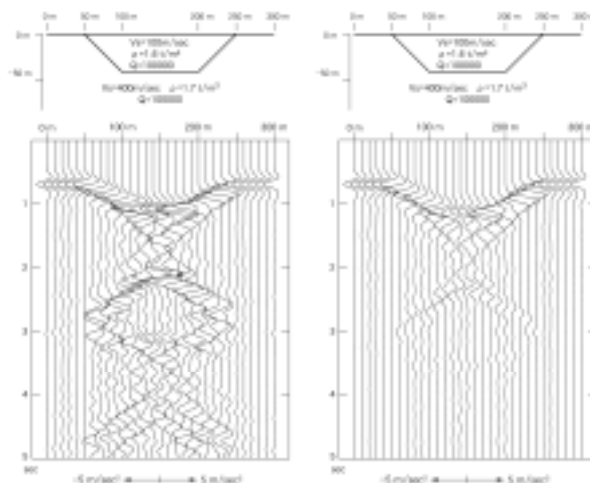


図-6 モデルNo. 1 地盤の応答結果
(左：線形応答，右：非線形応答)

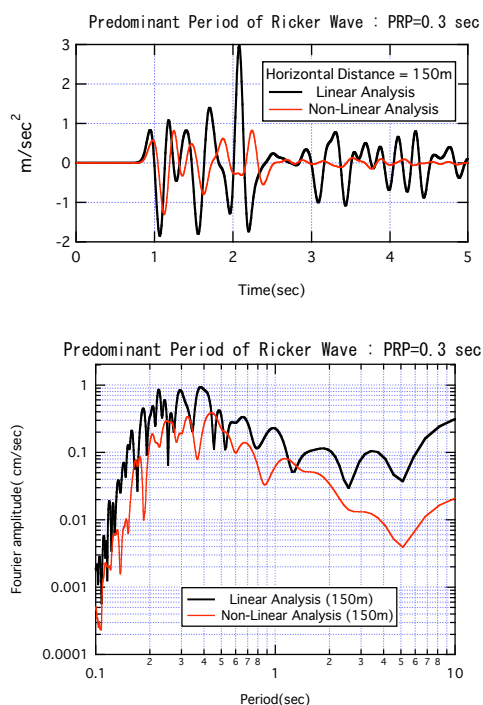


図-7 モデルNo. 1 地盤の中心（150m）の応答結果
(上：波形比較，下：スペクトル比較)

ことがわかる。ところが、非線形応答では表面波の応答が非常に小さくなっていることが注目される。このことを対積層の中心点の地表(150m地点)で波形とスペクトルで比較したのが**図-7**である。**図-7**の波形での比較から鉛直方向の応答に比較して二次的に生成される表面波の挙動が線形応答と非線形応答で大きく異なっていることが明らかである。また、スペクトルの比較から非線形応答では線形応答に比して、卓越周期が長周期側に伸びること、増幅度が小さくなることが示されている。

一方、**図-8**はモデルNo. 2地盤での同様な応答結果を比較して示したものである。このモデルではVs

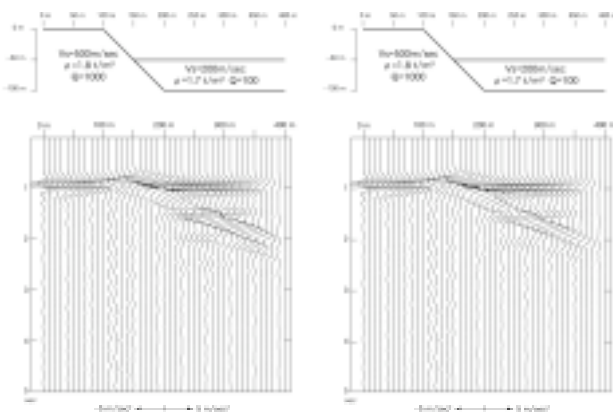


図-8 モデル No. 2 地盤の応答結果
(左：線形応答，右：非線形応答)

比が 1/2.5 と基盤に対する対積層の軟弱度のコントラストがモデル No. 1 地盤に比較して小さく設定されていることに加え，非対称な不整形性のために対積層で発生するひずみの振幅が小さく，二次的に生成される表面波の挙動に線形応答と非線形応答で大きな違いはみられない．このことを代表的な堆積層での地表点(250m 地点)で波形とスペクトルの両面から比較したのが図-9 である．この場合も，線形と非線形の応答結果の違いは小さいものの，二次的な表面波の応答が鉛直方向の応答に比較して非線形性の効果により強く影響を受けることが示されている．

4. むすび

新たに開発された擬似スペクトル法による不整形地盤の非線形地震応答結果から堆積層の非線形化は不整形構造により二次的に生成される表面波の振幅を小さくする効果をもっていることが確認された．多くの地盤構造を対象とした解析を重ねることにより更に広範な結論を得たいと考えている．

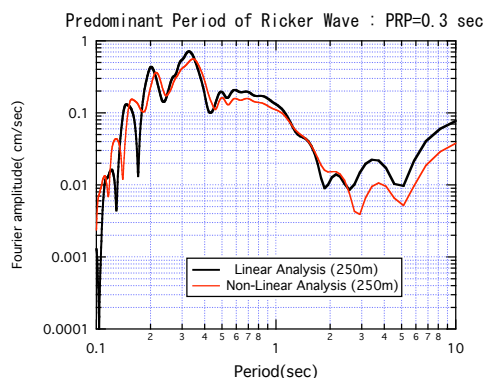
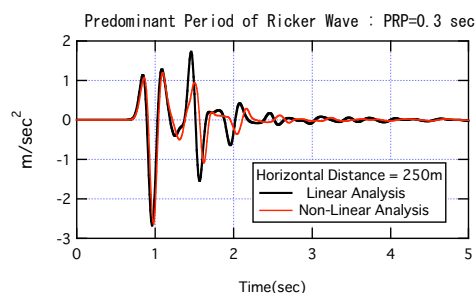


図-9 モデル No. 2 地盤の 250m 地点の応答結果
(上：波形比較，下：スペクトル比較)

参考文献

- 1) 神山 眞，佐藤 勉，鈴木猛康：不整形地盤の地震応答における短周期表面波の工学的重要性に関する研究，土木学会論文集，No.682/I-56, pp. 225-243, 2001.
- 2) Chen, H. W. and McMechan, G. A.: Computation of multi-attribute seismic wavefields by solution of the elastodynamic equations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.82, pp.1134-1143, 1992. Blevins, R.D.: *Flow-Induced Vibration*, 2nd ed., Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- 3) 神山 眞，松川忠司，福地桂一：擬似スペクトル法による地盤の非線形地震応答解析，第11回日本地震工学シンポジウム論文集，CD-ROM, pp. 1-7, 2002.

(2003. 9. 11 受付)

NONLINEAR RESPONSE ANALYSES OF IRREGULAR GROUNDS BY THE PSEUDO-SPECTRAL METHOD

Makoto KAMIYAMA, Keiichi FUKUCHI and Tadashi MATSUKAWA

This paper deals with nonlinear response analyses of irregular ground using the pseudo-spectral method. We formulated an iterative numerical method for analyzing nonlinear earthquake response of irregular grounds. It is based on the idea of the so-called equivalent linear method as well as on the efficiency of calculation peculiar to the pseudo-spectral technique. The method was applied to several model grounds with horizontal irregularity, showing that the nonlinear effects are especially remarkable for surface waves that are secondarily generated due to irregular parts of ground.