

# 擬似スペクトル法による地盤の非線形地震応答解析

福地 桂一<sup>1</sup>・神山 眞<sup>2</sup>・松川 忠司<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 東北工業大学大学院生 土木工学専攻 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町 35 番 1 号)  
<sup>2</sup> 正会員 工博 東北工業大学教授 工学部土木工学科 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町 35 番 1 号)  
<sup>3</sup> 正会員 東北工業大学助手 工学部土木工学科 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町 35 番 1 号)

本報告は、簡易な新しい時間領域の非線形地震応答手法について述べたものである。軟弱地盤や強震時に液状化が見られる場合では、地盤剛性の低下と減衰比の増加により非線形応答が生じる。このような非線形応答を正確に求めることが重要視されていることから、擬似スペクトル法を用いた時間領域の非線形地震応答手法が開発される。1995年兵庫県南部地震のポートアイランドにおける鉛直アレー強震記録を用いて、実測の強震記録と等価線形手法及び本手法の応答結果が比較され、本手法の有用性が検証される。

**Key Words :** seismic response , nonlinear , non-stationary variation , pseudo-spectral method

## 1. まえがき

1995年兵庫県南部地震 ( $M_j=7.2$ ) では、戦後最大の被害もたらされた。また、液状化という現象も見られたことから、これまでの地震応答手法よりも正確に液状化にも対応した地震応答手法の開発が求められている。現在、一般的に用いられている地盤の地震応答手法は等価線形という簡易的な非線形地震応答手法である。しかし、地盤のひずみが大きくなる強震時では、土の応力とひずみの関係は非線形かつ非定常であり、地盤が軟弱な場合や強震時において液状化が見られる場合では、等価線形地震応答手法で実際の地震応答を正確に求めることは不可能である。また、地盤剛性と地盤減衰特性の動的な変動に関して未知の部分が多く存在するため、等価線形応答手法よりも高度な地震応答手法の開発は困難をかかえているのが現状である。本研究では新しく地盤剛性と減衰比の非定常変動を考慮した簡易な非線形地震応答手法を開発し、それを兵庫県南部地震の際にポートアイランドで得られた鉛直アレー強震記録に適用して、地震応答と強震記録とを比較して本手法の妥当性を検討した。

## 2. ポートアイランド観測点

ポートアイランドの鉛直アレーシステムが埋設されている地盤の検層柱状図を図-1に示す。地表(0m)と地中深さ16m、32m、83mに埋設された強震計が1995年兵庫県南部地震の本震と余震を見事に捉らえている。そ

の上、本震には非線形応答が顕著に見られたことから、深さ83mで得られた加速度記録を基盤波として用い、深さ32m、16m、地表の3観測点における応答を等価線形地震応答解析と本研究で開発した非線形地震応答解析で求め、その二つを実際に得られた強震記録と比較した。

## 3. 擬似スペクトル法

一次元の非線形地震応答を時間領域で求めるため、本研究では擬似スペクトル法(PSM)を用いた。擬似スペクトル法は二次元、三次元地盤の地震応答手法として多

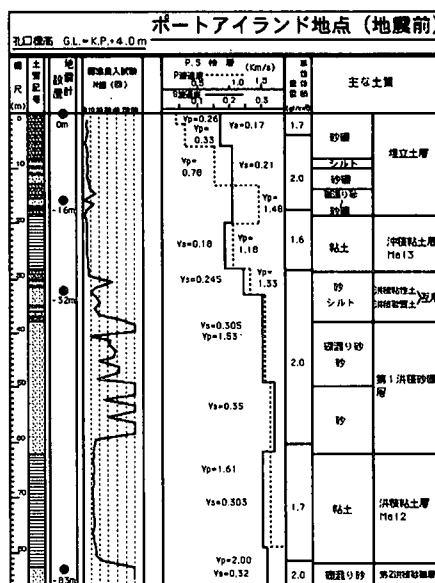


図-1 ポートアイランド検層柱状図

く用いられるが、二次元地盤の非線形地震応答への拡張を念頭に置いて、一次元地盤でもPSMを適用した。PSMの詳細は文献<sup>1)</sup>に譲るが、ここでは非線形な時間領域応答への適用が容易なように、グリッド点は加速度、応力(ひずみ)の算定点をチドリに設定する方式とした。これにより、非線形な物性変化が非定常に生じる計算処理でも発散することなく履行することが可能となった。

#### 4.非線形地震応答手法

地震応答解析を行う上で、図-1に示すような検層柱状図から得られる地盤内のVsと密度の値を用いて解析されるが、問題は地盤内のせん断剛性と減衰のひずみ依存性と非定常な変動をどのように取り扱うかにある。

##### (1) 等価線形地震応答手法

現在、一般的に用いられる地震応答手法は等価線形地震応答手法である。この等価線形法は、応答を求める際に用いるせん断剛性Gと減衰比hの算定において、経験的に地盤層内で得られる最大ひずみの65%に当たるところのGとhを定常値として用いている。しかし、ひずみ増大時における軟弱地盤では、せん断剛性率のひずみ依存性における急激な減少と、減衰比のひずみ依存性における増加が非定常に生じるため、等価線形法ではこのような影響を受けた地震動挙動を正確に求めることは不可能と考えられる。

##### (2) 非線形地震応答手法

正確な非線形地震応答を求めるため有効応力、全応力の双方の応力状態に対して逐次積分型の応答解析手法が多く提案されている。このような流れの中で、本手法は全応力型でせん断剛性G、減衰比hの各点の非定常なひずみ依存変動を考慮してPSMで時間領域の応答を求める簡易型の非線形応答手法と位置付けることができる。全体の計算処理のフローを図-2に示す。このフローに即して本手法の特徴を述べれば、一つは各点のひずみ時間変動をコンプレックスエンベロップにより包絡線として求めること、二つにはそのひずみ時間変動に対応させてG、hのひずみ依存曲線を利用しながら、G、hの非定常な時間変動を応答計算に組み込むこと、三つにはG、hの非定常時間変動を考慮して時間領域の応答計算をPSMで実行すること、そして四つには最終の応答計算が収束するまで繰り返し処理がなされることである。これらの特徴に見られるように本手法は従来多用される応力-ひずみの履歴を逐次時間ごとに追跡する手法とは根本的に異なるものである。

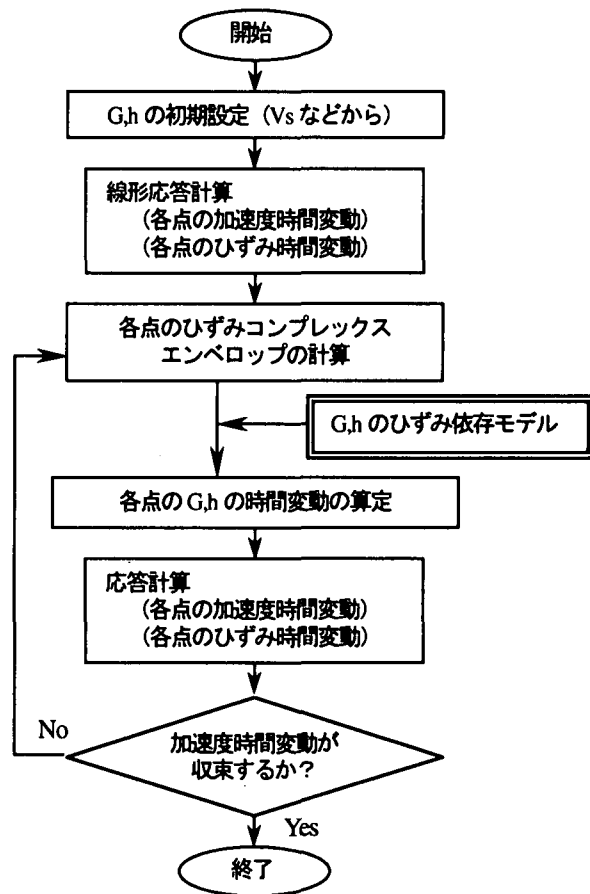


図-2 計算処理のフロー

##### (3) G、hのひずみ依存性モデル

図-2に示したように本手法を構成する重要な要素の一つはG、hのひずみ依存モデル(ひずみ依存曲線)である。このモデルとしては各所で明らかにされている要素試験や現地試験による結果を適宜用いることができる。ここで対象としているポートアイランド地点に対しては0~16mの地盤に対して図-3のG、hのひずみ依存モデル

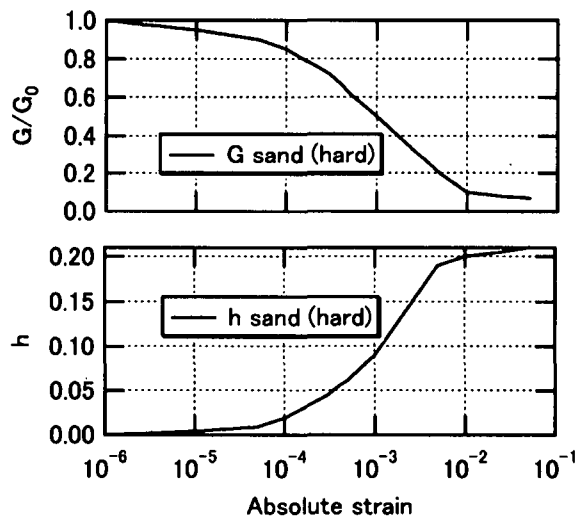


図-3 せん断剛性G(上)と減衰比h(下)のひずみ依存モデル(深さ0m~16m)

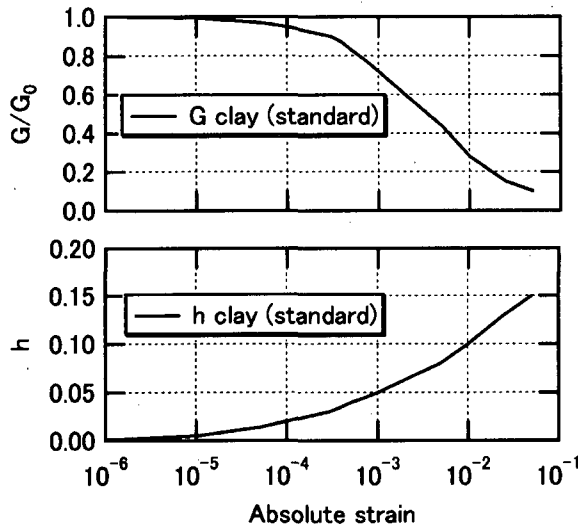


図4 せん断剛性G(上)と減衰比h(下)のひずみ依存モデル (深さ17m~83m)

ル、それ以深の地盤では図4のモデルを採用している。これらは既往の要素試験<sup>2)</sup>や逆解析<sup>3)</sup>の結果を参照して設定されたものである。なお、等価線形手法の適用でも同じG、hのひずみ依存モデルを採用した。

## 5.解析結果

非線形地震応答と等価線形地震応答で求めた波形を実測波形と比較してみる。ここではNS成分のみを比較する。また、応答波形のフーリエスペクトルを求めることで、周波数領域における一致についても検証してみる。なお、対象とした周期帯域は0.08~10秒である。

まず、図5~7は実測加速度記録と深さ83mの観測記録を入力として求めた深さ0m、16m、32mでの等価線形応答、本手法の応答波形を比較したものである。図5~7の加速度波形において、等価線形応答(EquiLinear)は地盤層内の最大ひずみの65%に相当するGとhを定常値として用いていることから、地表では振幅が実測(Observed)よりも全体的に大きく出ている。一方、本手法の非線形応答(NonLinear)は、時間領域でGとhを算定していることから、全体的にかなり良い波形の一致が見られる。特に、本手法による応答加速度波形は実測加速度波形と全体的に位相の対応がよいことがわかる。等価線形応答では正確に表わせなかったコーダ部分における減衰が、実際の波形を良く追従しているのがわかる。

図8~9のスペクトルの比較では、等価線形応答よりも非線形応答の方が、より正確な卓越周期を表わしているのがわかる。これらの図の比較からもわかる通り、Gとhを時間領域で求めた非線形地震応答手法は、より正確な地震応答を可能にしていることが明白である。

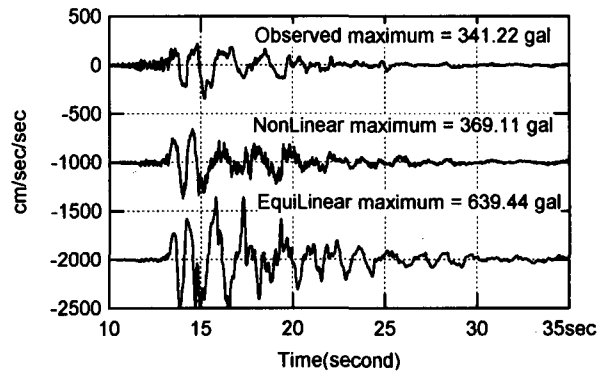


図5 NS成分 深さ0mにおける加速度波形の比較

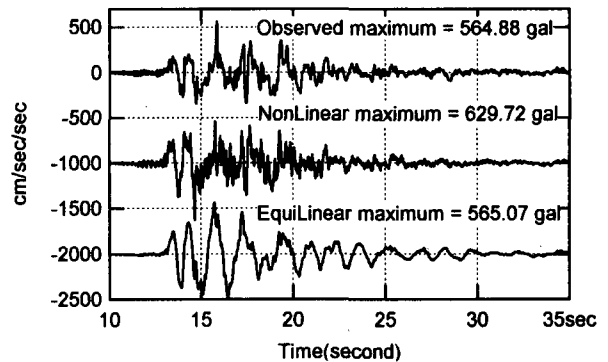


図6 NS成分 深さ16mにおける加速度波形の比較

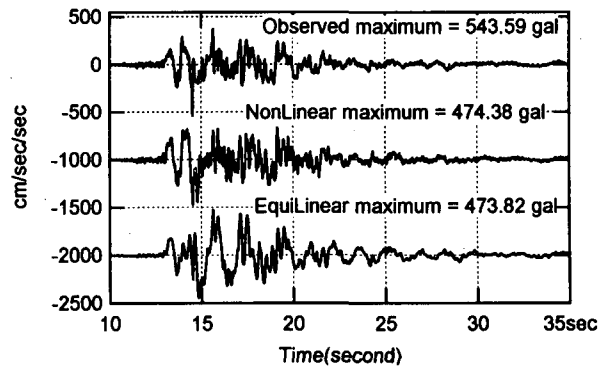


図7 NS成分 深さ32mにおける加速度波形の比較

図11は、逐次計算における収束状況を加速度波形で示したものである。繰り返し回数(Iteration)が多くなるに従い、波形が収束に向かっているのがわかる。特に、繰り返し回数が10回と20回の波形では、ほとんど差異が見られないことから、本手法における繰り返し回数は10回程度でも十分であることがわかる。同様に、繰り返し計算に応じた時間領域におけるGの変化を深さ14mについて示したものが図12である。計算の繰り返し回数が多くなるに従い、Gも収束に向かっているのがわかる。

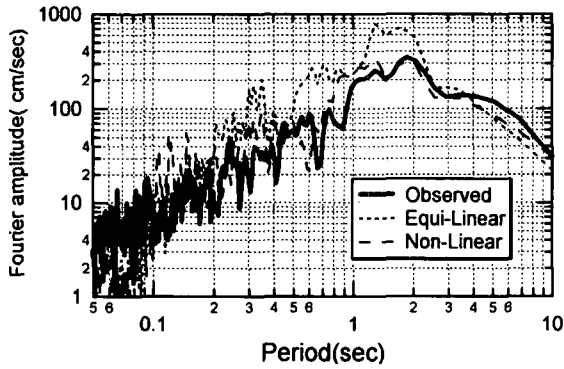


図-8 NS成分 深さ0mにおけるスペクトルの比較

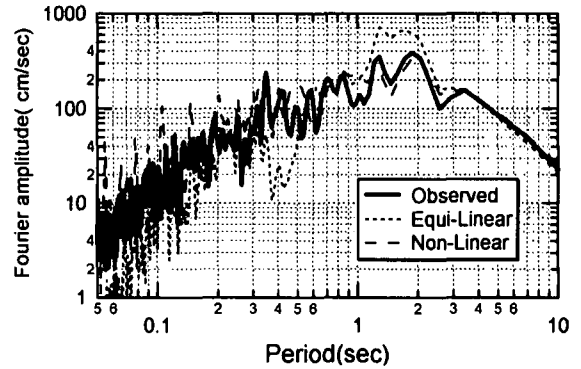


図-9 NS成分 深さ16mにおけるスペクトルの比較

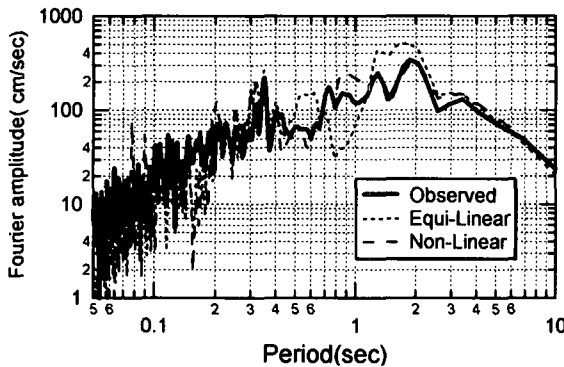


図-10 NS成分 深さ32mにおけるスペクトルの比較

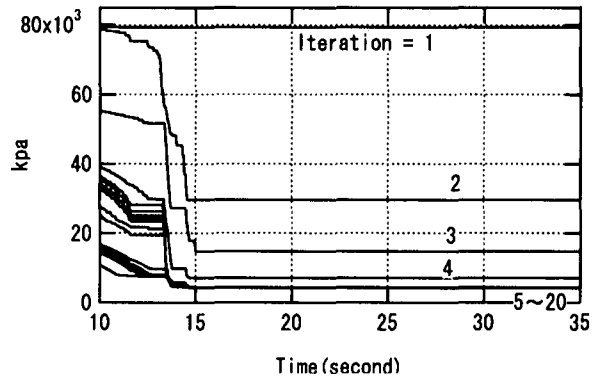


図-12 NS成分 深さ14mにおける  
逐次数値解析によるGの変化

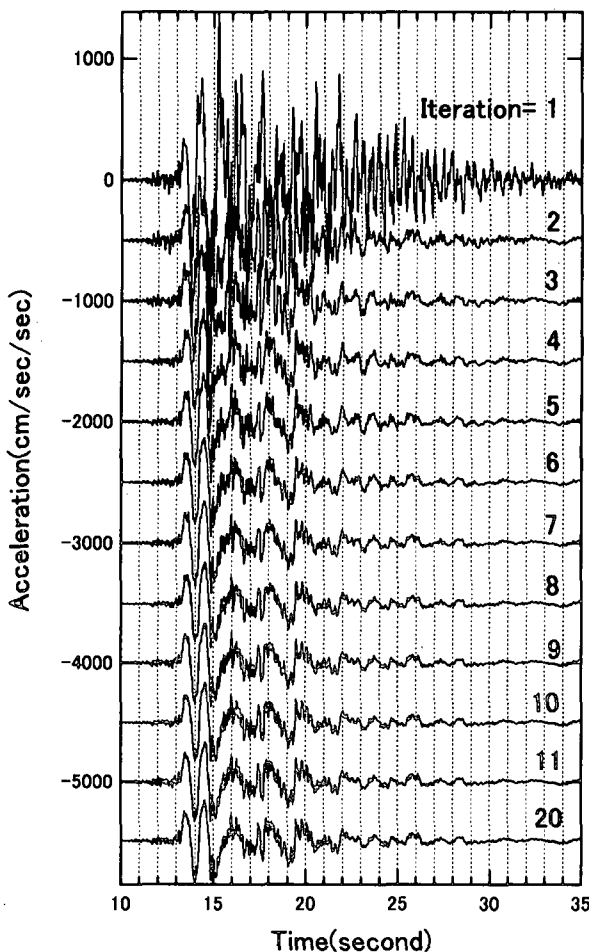


図-11 NS成分 深さ0mにおける逐次数値解析の比較

## 6. 結論

以上の結果より、本手法による非線形地震応答手法は等価線形地震応答手法よりも優れていることが確認された。よって、強震動を予測する上で、このようなG、hの非定常変動を導入した非線形地震応答手法は有用な手段となることが示唆される。

また、本手法においてせん断剛性と減衰比のひずみ依存性は、室内試験で得られている各種のモデルを用いることにより、汎用性をもたせることも可能である。

本研究は鉛直アレーという一次元解析のもとで行われ、且つ、地盤が水平成層構造のものと仮定して応答計算を行った。今後、二次元解析で、不整形地盤にも対応した応答解析手法へと発展させたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 神山 眞：短周期表面波による構造ダイナミクスと震害メカニズムに関する研究，平成11年度科学研究費補助金「基盤研究C」研究成果報告書，研究課題番号10650468，2000。
- 2) Kenji Ishihara：Soil Behavior in Earthquake Geotechnics, Oxford Science Publications, 1996
- 3) 神山 眞，吉田 勝：鉛直アレー強震記録による地盤剛性ならびにダンピングの非定常変動の解析，土木学会論文集，No.647/I-51, pp.379-394, 2000。