

I - B 254 等価線形法における周波数ごとのひずみ振幅を考慮した地震応答解析

中央大学理工学部 学生員 本山 隆一
同 上 正会員 國生 剛治

1. はじめに

地盤の地震応答解析で実務上よく用いられている等価線形法は、地盤の非線形挙動を線形に近似する方法である。つまり、絶えずひずみレベルに依存して変化している地盤の材料物性を、有効ひずみに対応した一定値として計算している。しかしそれでは、地震のような不規則波動に対する地盤の震動応答をよく再現しているとは言えない。特に非線形性が強い地盤での解析では、解析結果と地震観測結果を比較すると、高振動数成分がよく一致しないことが知られている。理論的には、非線形の応力-ひずみ関係を追いかけてながら逐次積分を行う非線形解析法の方が、このような等価線形解析より精度が高いと言える。しかし、等価線形法は解析効率の面から2、3次元問題での実務的ニーズが高い。等価線形法の改良については既に杉戸らの方法¹⁾がある。本研究では杉戸らの方法とは異なり、地震波形に含まれる周波数とその時に生じるひずみ振幅が反比例するとの近似に基づき、各ひずみ振幅ごとにそれに応じた剛性、減衰を与える一次元等価線形地震応答解析をDYNEQ²⁾の改良プログラム(DYNEQ-MOD)を用いて行い、その適応性を検討する。

2. 解析手法

解析手法の概要を図1に示す。まず地盤条件と等価ひずみの初期値を設定しその初期ひずみに対して各層の初期せん断剛性G、減衰定数hを決める。次に重複反射理論により伝達関数を計算し、それと入力地震波のフーリエスペクトルを用い各層の応答スペクトルを求め、ひずみ時刻歴 $\gamma(t)$ を算出する。これより、微小時間増分 Δt でのひずみの増分を $\Delta\gamma$ と表し、 $\Delta\gamma$ の絶対値の時間tまでの累計 $\sum|\Delta\gamma|$ とtとの関係を描くと図1-①のようになる。この関係を勾配Aの直線で近似できるとすると、図1-①に示すようにピーク振幅が γ_a のひずみ波形と周期Tとの関係は次式のようになる。 $A = \gamma_a / (T/4) = 4f\gamma_a$ となる。結局 $\gamma_a = A/4f$ により、ひずみ振幅 γ_a と振動数 f が関係づけられることになる。このようにして各周波数ごとに等価ひずみ振幅を求め、それに対するせん断剛性、減衰を与えていく。これを収束条件を満たすまで繰り返し計算する。

3. 解析結果

本研究で解析に用いた地震記録は、兵庫県南部地震（1995年1月17日）の際に関西電力高砂発電所(TKS)の構内において実施されている鉛直アレーにより観測された加速度記録の主要動部分を含む20秒間のデータを用いた。ひずみに対する剛性G、減衰hを与える際に國生らによる定式化³⁾を用いた。なお地震波形はGL-100mに入力した。図2は、3回目の繰り返し時のGL-44mでの図1-①に対応したひずみと、累計 $\sum|\Delta\gamma|$ の時刻

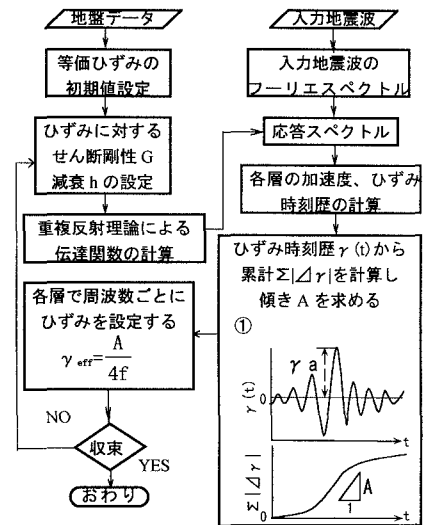


図-1 地震応答解析のフロー

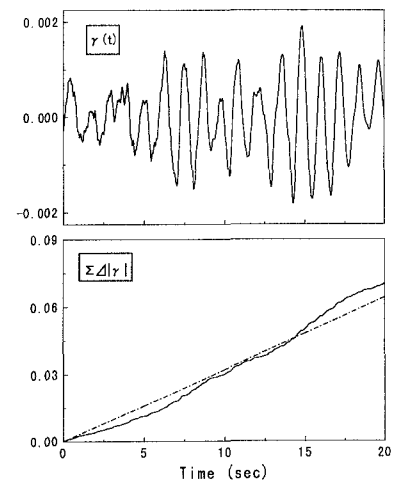


図-2 GL-44mでのひずみと累計の時刻歴

キーワード：等価線形法、等価ひずみ、周波数

中央大学理工学部土木工学科（東京都文京区春日1-13-27 Tel. 03-3817-1799 Fax 03-3817-1803）

歴を示している。ここで一点鎖線は計算に使用した累計 $\Sigma |\Delta \gamma|$ と t の関係に対する近似直線である。これにより累計 $\Sigma |\Delta \gamma|$ と時間 t との関係は、ほぼ一定の傾き A で近似できることが分かる。

図3は、地表での本研究、SHAKE の加速度時刻歴の解析結果を実測波形と比較したものである。ただしこの時刻歴は主要動部分についてのみ示してある。ここで SHAKE の解析では、我々が適当な値として最大ひずみに対する有効ひずみへの換算係数を 0.5 として計算した。本研究の解析結果は SHAKE ではあまりよく再現されていない高い振動数の部分が再現されていることがわかる。しかし、加速度の大きさを見るとかなり大きく評価しているのが分かる。さらに位相についてみるとずれている部分があるのが分かる。次に入力波形に対する地表の伝達関数を計算し、本研究によるもの、実測、及び換算係数を考慮した SHAKE によるものを比較して図4に示す。本研究によるものは、一次ピークの出現位置とその時の値は実測とほぼ等しいが、2次ピークをかなり大きく評価しているのが分かる。しかし、ある程度振動数が高いところでも SHAKE に比べて伝達関数のピークの値の落ち方は緩やかで、SHAKE よりも実測に対する再現性は良いと考えられる。これにより SHAKE での問題点の改良が期待できそうである。

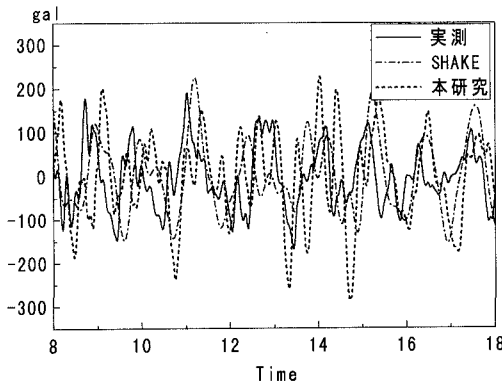


図-3 時刻歴の比較

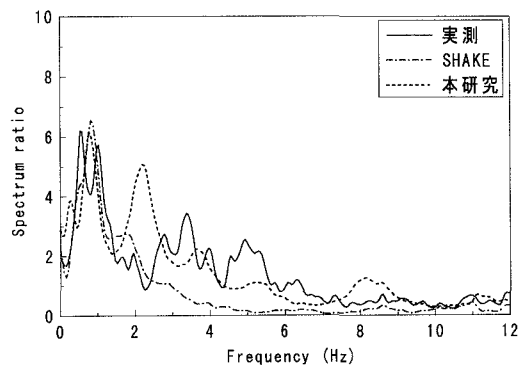


図-4 伝達関数の比較

4. まとめ

兵庫県南部地震の際、関西電力高砂発電所構内で観測された加速度記録を用いて、周波数とひずみが反比例するとの関係（基準ひずみ $= A/4f$ ）に基づき周波数ごとに等価ひずみを求め、そのひずみに対応した剛性、減衰を与えていく一次元等価線形地震応答解析を行い次のような結果を得た。

- (1) 加速度時刻歴の解析結果において高い振動数成分を再現してはいるが、実測波形と比べると加速度の値をかなり大きく評価している。
- (2) 伝達関数はある程度高い振動数においても SHAKE に比べピーク値の落ち方が緩やかであるが、実測と比べると値をかなり大きく評価している部分がある。

(1),(2)より、累計 $\Sigma |\Delta \gamma|$ と時間 t との関係から傾き A の値を求める際に、実際は累計の時刻歴には凹凸がかなりあるために直線で近似する際の誤差が低周波数部分で大きくなると考えられる。

今後は、加速度を大きく評価することや位相のずれなどの原因を明らかにし、より精度の高い解析結果が得られるように等価ひずみを与える式などについて解析手法を検討していきたい。

謝辞 今回、本研究に用いた地震データを提供していただいた関西電力(株)建設部、ならびに関西地震協議会、及び数値解析のご指導いただいた佐藤工業(株)の吉田望様、末富岩雄様に感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 杉戸真太、合田尚義、増田民夫(1994)；周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察、土木学会論文集 No.493,Ⅲ-27,pp49-58
- 2) 吉田望、末富岩雄(1996)；DYNEQ：等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム、佐藤工業(株)技術研究所報、pp61-70
- 3) 國生剛治、本山隆一(1998)；等価線形解析の大ひずみレベルへの適用の試み、第33回地盤工学研究発表会（投稿中）