

## 非線形震動解析における等価線形化手法の適用性

京都大学防災研究所 正員 土岐憲三  
 京都大学防災研究所 正員 佐藤忠信  
 京都大学防災研究所 正員 清野純史  
 京都大学工学部 ○学生員 浅田承扶

1.はじめに 本研究では、非線形挙動を呈する水平成層の表層地盤に、鉛直下方からS波が入射した場合の表層地盤の挙動を考察する。周波数特性の異なる地震波を入力したときの非線形時間逐次計算と等価線形化解析の結果の相違点について検討を加え、等価線形化手法の適用限界を調べる。

2.非線形履歴特性の等価線形化 等価せん断弾性定数は各ひずみサイクルのピーク値と原点を結ぶ直線の傾きとして求められ、等価減衰定数は次式により定義されている<sup>(1)</sup>。

$$h_{eq} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W_n}{W_n}$$

ここに $\Delta W_n$ は非線形履歴復元力特性を持つ要素が1サイクル当りに損失するエネルギー量、 $W_n$ は1サイクル当りに受渡されるエネルギー量の絶対値である。これらの定義にしたがってバイリニアモデル<sup>(2)</sup>およびパーサタイルモデル<sup>(3)</sup>の等価線形化を行った。パーサタイルモデルで解析する際に問題となるのはパラメータ $\alpha$ 、 $\beta$ の値であるが、それらは原位置地盤から採取した粘土についての動的単純せん断試験結果<sup>(4)</sup>より得られた剛性低下曲線と減衰曲線の値を参考にして決定した。

3.非線形時間逐次計算と等価線形化手法の解析結果 表層地盤の条件及び入力地震波やその入力強度を変化させた場合の、非線形時間逐次計算と等価線形化手法の解析結果を比較検討する。その際に用いたモデル地盤は図-1に示すものであり、比較方法として以下の2つの場合を考えた。

- (1) 同一入力地震波における入力強度の影響
- (2) 同一入力強度における入力地震波の影響

(1) 同一入力地震波における入力強度の影響を調べるにあたっては入力地震波として1940年のインペリアル・バレイ地震のEl Centroにおける地震記録（以下El Centroと略す）を用いた。入力強度は50gal, 100gal, 150galと変化させた。その結果を図-2に示す。

ここで図-2の縦軸は深さ、横軸は最大応答加速度を示している。図-2(a)のバイリニアモデルでは、50gal入力の際は両手法ともほぼ一致しているが、入力強度が大きくなるにつれて差が大きくなることからわかる。特に150gal入力では、等価線形化手法は非線形解析を過小評価することになる。この原因としては、等価線形化手法で用いられる有効ひずみの変換値である「有効ひずみ/最大ひずみ」の値が不適切であったことが考えられる。

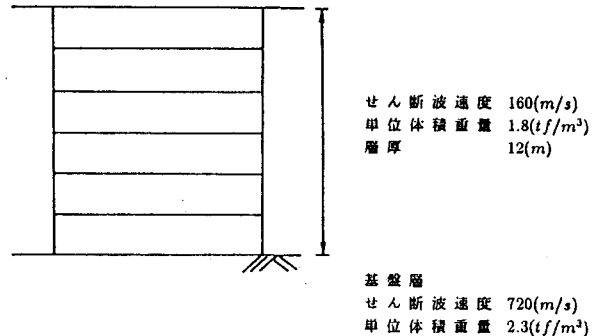


図-1 モデル地盤 1 (一層地盤)

一方、図-2 (b)のバーサタイルモデルでは、非線形解析と等価線形化手法との相違はあまりみられない。

(2) 同一入力強度における入力地震波の影響を調べるにあたり前述のEl Centro、1952年のArvin Tahachapi地震のTaftにおける地震記録（以下Taftと略す）、および1968年の宮城沖地震の八戸における地震記録のうち最初の30秒をカットしたもの（以下Hachinoheと略す）を用いた。図-3は入力強度を100galにしたときのEl Centro, Taft, Hachinoheの結果である。この図から、非線形解析と等価線形化手法との差はあまりないことがわかる。これはひずみレベルが約 $5.0 \times 10^{-4}$ であり、ほぼ線形領域内の現象としてとらえることができるからである。また、バーサタイルモデルにおいてもバイリニアモデルと同様の結果が得られた。

(3) そこで、モデル地盤を図-4のように変えて、入力地震波としてTaftを用い、入力強度を150galとして解析を行った。その結果、等価線形化手法の方が地表面で約800galという大きな応答を示し、一方非線形解析は約400galを示した。ここでひずみレベルを検証すると両者とも約 $6.0 \times 10^{-3}$ である。即ち、ひずみレベルは同じであっても応答加速度は大きく違いが生じる。これは先述の通り有効ひずみを算出する際の変換値に起因すると考えられる。以上より等価線形化手法の適用限界は有効ひずみを算出する際の変換値に大きく依存しており、それをより厳密に求めることにより等価線形化手法の適用限界は更に向上すると思われる。また、実際的な剛性低下率や等価減衰定数の決定も重要である。

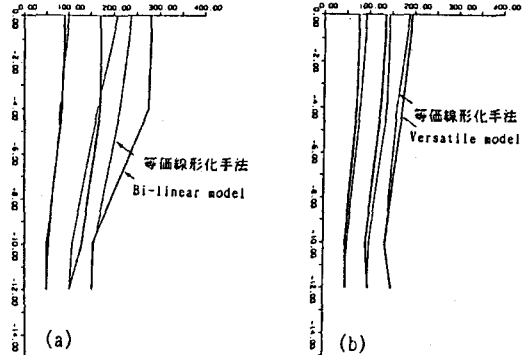


図-2 非線形解析と等価線形化手法による最大応答加速度の深さ方向の分布

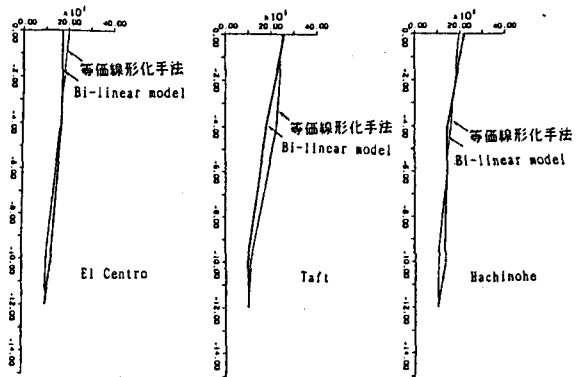


図-3 各入力地震波の非線形解析と等価線形化手法による最大応答加速度の深さ方向の分布

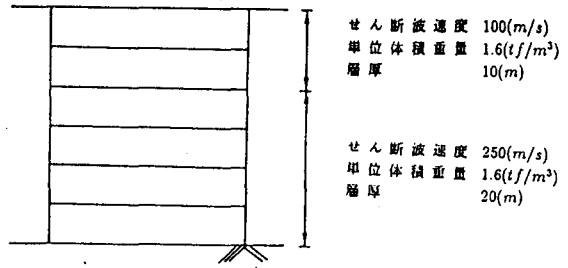


図-4 モデル地盤 2 (軟弱地盤)

参考文献：(1) 土木学会編；動的解析と耐震設計、第1巻、地震動動的物性、pp.84-91

(2) Yi-Kwei Wen; Journal of the Engineering Mechanics Division, Method for Random Vibration of Hysteretic Systems, Vol. 102, NO. EM, pp. 249-263, 1976

(3) 佐藤忠信；地盤の非線形挙動を考慮した波動伝播特性に関する研究、京都大学学位申請論文

(4) 原昭夫；構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム日本建築学会基礎構造系震動小委員会