

# 周波数依存型等価線形化法による 不整形地盤の震動特性について

古本吉倫<sup>1</sup>・杉戸真太<sup>2</sup>・八嶋 厚<sup>3</sup>

<sup>1</sup>岐阜大学工学部社会基盤工学科 助手 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

<sup>2</sup>岐阜大学流域圏科学研究センター教授 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

<sup>3</sup>岐阜大学工学部社会基盤工学科 教授 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

周波数依存型等価線形化法により、土の非線形な応力とひずみの関係を線形関係に置き換え、周波数領域における 2 次元 FEM 地盤震動解析を行った。その際、従来の等価線形化法では周波数に無関係に決められていた等価ひずみをひずみのフーリエ振幅に応じて周波数ごとに設定することとした。傾斜基盤を持つ不整形地盤モデルの下部基盤面に SH 波を入力して、基盤から地表面への伝達関数を計算したところ、特に地盤材料が軟弱で入力大きい場合、周波数依存型等価線形化法による解析では、従来の等価線形化法による解析と大きく異なる伝達関数の周波数特性が得られた。

**Key Words** : seismic response analysis, inclined base layer, frequency-dependent equivalent strain

## 1. はじめに

地震動は堆積地盤において増幅することが一般に知られている。盛土や構造物基礎の地震による被害は地盤の震動と深く関わっているため、精度の高い地盤震動解析法を研究し開発する必要がある。

これまで 1 次元の地盤震動解析の分野においては、1972 年に P.B.Schnabel, J.Lysmer, H.B.Seed<sup>1)</sup> によって開発された等価線形化法による地盤震動解析プログラム SHAKE が、一般的に広く使用されてきた。さらに 1975 年に J.Lysmer, T.Udaka, C.Tsai, H.B.Seed によって 2 次元有限要素法に拡張された FLUSH<sup>2)</sup> は、盛土や不整形地盤などの地盤応答解析や土と構造物の動的相互作用の解析プログラムとして多くの使用実績がある。FLUSH は、SHAKE と同様、等価線形化手法を用いて土の剛性と減衰特性のひずみとの非線形関係を等価な線形関係に置き換え、周波数領域で連立方程式を解く。

ところで、SHAKE や FLUSH の用いているこれまでの等価線形化法では、これまでも指摘されているように、地盤が軟弱で入力地震動が大きい、すなわち比較的ひずみレベルの大きな解析では、特に高周波数領域において地震動増幅率を過小評価することがある。そこで、杉戸ら<sup>3)</sup> は、SHAKE での等価線形化法においては周波数に依存せずに一律に定義されていた等価ひずみを、ひずみの周波数依存性に着目してひずみ波形のスペクトル強度に応じて与えるべきと考え、等価ひずみを各周波数毎に規定した周波数依存型等価線形化法 (FDEL) を

開発し、その効果を確認している。

一方、FLUSH における等価線形化の扱いは SHAKE と同様であるから、1 次元の解析の場合と同様、地震動レベルが大きくて軟弱地盤の場合には高周波数領域で増幅率を過小評価してしまうことが考えられる。そこで著者ら<sup>?)</sup> は、1 次元の地盤震動解析プログラム SHAKE から FDEL への改良方法と同様に、ひずみの周波数依存性に着目して FLUSH を改良し、周波数依存型等価線形化手法による新たな 2 次元 FEM 地盤震動解析法を提案している。

ここでは周波数依存型等価ひずみの適用性に関する基本的な考察を行うために、傾斜基盤をもつ仮想地盤モデルを用いて、SH 波の伝達関数を計算し、1 次元解析との比較を行いながら、等価線形化手法の違いによる地盤震動特性の変化を検討した。なお以下、2 次元 FEM に拡張された本手法を FDEL-FEM と呼ぶことにする。

## 2. 周波数依存型等価ひずみの導入

杉戸ら<sup>3)</sup> の方法に従い、周波数依存型等価ひずみを導入する。各周波数毎にそれぞれのひずみ波形に寄与する度合いに応じて、適切なせん断剛性と減衰定数を与える周波数依存型の等価ひずみを次式のように定義する。

$$\gamma_f(\omega) = C \gamma_{max} \frac{F_\gamma(\omega)}{F_{\gamma_{max}}} \quad (1)$$

ただし、 $C$  : 係数

$\gamma_{max}$  : ひずみの時刻歴波形の最大値

$F_\gamma(\omega)$  : ひずみ波形のフーリエスペクトル  
 $F_{\gamma_{max}}$  : ひずみ波形のフーリエスペクトルの最大値

係数  $C$  は、周波数軸上で等価ひずみの全体のレベルを調整するものであり、例えば  $F_\gamma(\omega)/F_{\gamma_{max}} = 1.0$ ,  $C = 0.65$  とすると、SHAKE と同等になる。

ここでは、土の非線形な応力-ひずみ関係を Hardin-Drnevich モデル<sup>4)</sup>を用いて表現する。式 (1) の周波数依存型等価ひずみを適用すると土のせん断剛性  $G$ , 減衰定数  $h$  は周波数の関数として次式で与えられる。

$$G(\omega)/G_{max} = 1/\{1 + \gamma_f(\omega)/\gamma_\gamma\} \quad (2)$$

$$h(\omega)/h_{max} = \{\gamma_f(\omega)/\gamma_\gamma\}/\{1 + \gamma_f(\omega)/\gamma_\gamma\} \quad (3)$$

ここに  $G_{max}$  は初期せん断剛性,  $h_{max}$  は最大減衰定数,  $\gamma_\gamma$  は規準化ひずみ (=  $\tau_{max}/G_{max}$ ),  $\gamma_f(\omega)$  は周波数依存型の等価ひずみをそれぞれ表すものとする。

このとき、ひずみに依存せずポアソン比  $\nu$  が一定であると仮定すれば、平面ひずみ条件下における応力とひずみ関係式は以下のように書ける。

$$(\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau)^T = D (\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \gamma)^T \quad (4)$$

$$D = \begin{pmatrix} \frac{2G^*(1-\nu)}{1-2\nu} & \frac{2\nu G^*}{1-2\nu} & 0 \\ \frac{2\nu G^*}{1-2\nu} & \frac{2G^*(1-\nu)}{1-2\nu} & 0 \\ 0 & 0 & G^* \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$G^* \equiv G(\omega) + i2\omega h(\omega) \quad (6)$$

### 3. 傾斜基盤を持つ不整形地盤の震動特性

#### (1) 解析に用いた地盤モデル

図-1 に示す傾斜基盤を持つ不整形地盤の震動特性について考察する。長さ 80m, 深さ 30m を 500 個の有限要素で分割し、基盤の傾斜角を 1/4 とした。表-1 に示す P 波および S 波の速度構造を与え、減衰  $h$  に下限値を設け 5% とした。左右両側に粘性境界を配置し、領域内における波動の反射を吸収している。なお、底面は固定境界とした。

表-1 解析ケースと各領域の材料特性

	Vs(m/s)	Vp(m/s)	密度 (kg/cm <sup>3</sup> )
Region-1	200	800	1.9
Region-2	600	2400	1.9

#### (2) 周波数依存型等価線形化法に基づく FEM 地盤震動解析

神戸ポートアイランド鉛直アレー観測システムで得られた観測記録 (GL-83m, NS 成分) を最大加速度 600 m/sec<sup>2</sup> に振幅調整し、地盤モデル (図-1) の底面に入射

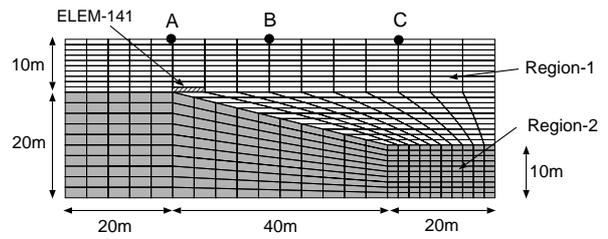


図-1 傾斜基盤を持つ不整形地盤の有限要素メッシュ

した。前節で導入した周波数依存型等価ひずみによる FEM 解析 (FDEL-FEM) に加え、従来の等価ひずみによる解析 (FLUSH 相当) も行った。さらに、比較のため、初期剛性, 初期減衰定数 (=5%) のみを用いて繰り返し計算を行わない解析 (以下線形解析と表記する) も行った。

図-1 に示す地盤モデルの地表面にあたる節点 A, B, C について、基盤から各点への水平成分の伝達関数を示す (図-2)。A 地点は、地中傾斜基盤面の頂上付近の直上にあたる点で、B 地点は、地中傾斜基盤面中間地点の直上、C 地点は、地中傾斜基盤面の先端付近の直上に相当する。

図-2(a), (b), (c) は、線形解析による A, B, C 各地点における基盤から地表への伝達関数である。図中、灰色の太線は左右自由地盤の伝達関数を示し、実線は 2 次元解析による伝達関数を、破線は 2 次元解析と同じ深さの成層地盤を仮定し 1 次元解析を行った場合の伝達関数をそれぞれ示す。

A 地点において、左側自由地盤の伝達関数の卓越周波数付近において、2 次元解析の伝達関数は卓越周波数を持ち、左側自由地盤の伝達関数付近に第 2 次卓越周波数を持つ。逆に、C 地点では、右側自由地盤の伝達関数の卓越周波数付近において、2 次元解析の伝達関数は卓越周波数を持ち、左側自由地盤の伝達関数付近に第 2 次卓越周波数を持つ。

一方、傾斜の中間地点にあたる B 地点において、2 次元解析の伝達関数では、左右両自由地盤の卓越周波数の影響が同程度発生している。これは、同じ深さの成層地盤を仮定した 1 次元解析による伝達関数は、左右自由地盤の卓越周波数のほぼ中間に卓越周波数を持つのに対し、顕著な相違と言える。

このように、2 次元解析による地表面上の A, B, C 各点における伝達関数は、左右自由地盤の 2 つの固有モードの合成となり、左右自由地盤のうち距離の近い方の伝達関数の影響がより大きくなると考えられる。

図-2(d), (e), (f) は、従来の等価線形解析 (FLUSH 相当) による A, B, C 各地点における伝達関数である。卓越周波数が線形解析の場合と比べやや低周波側に移動

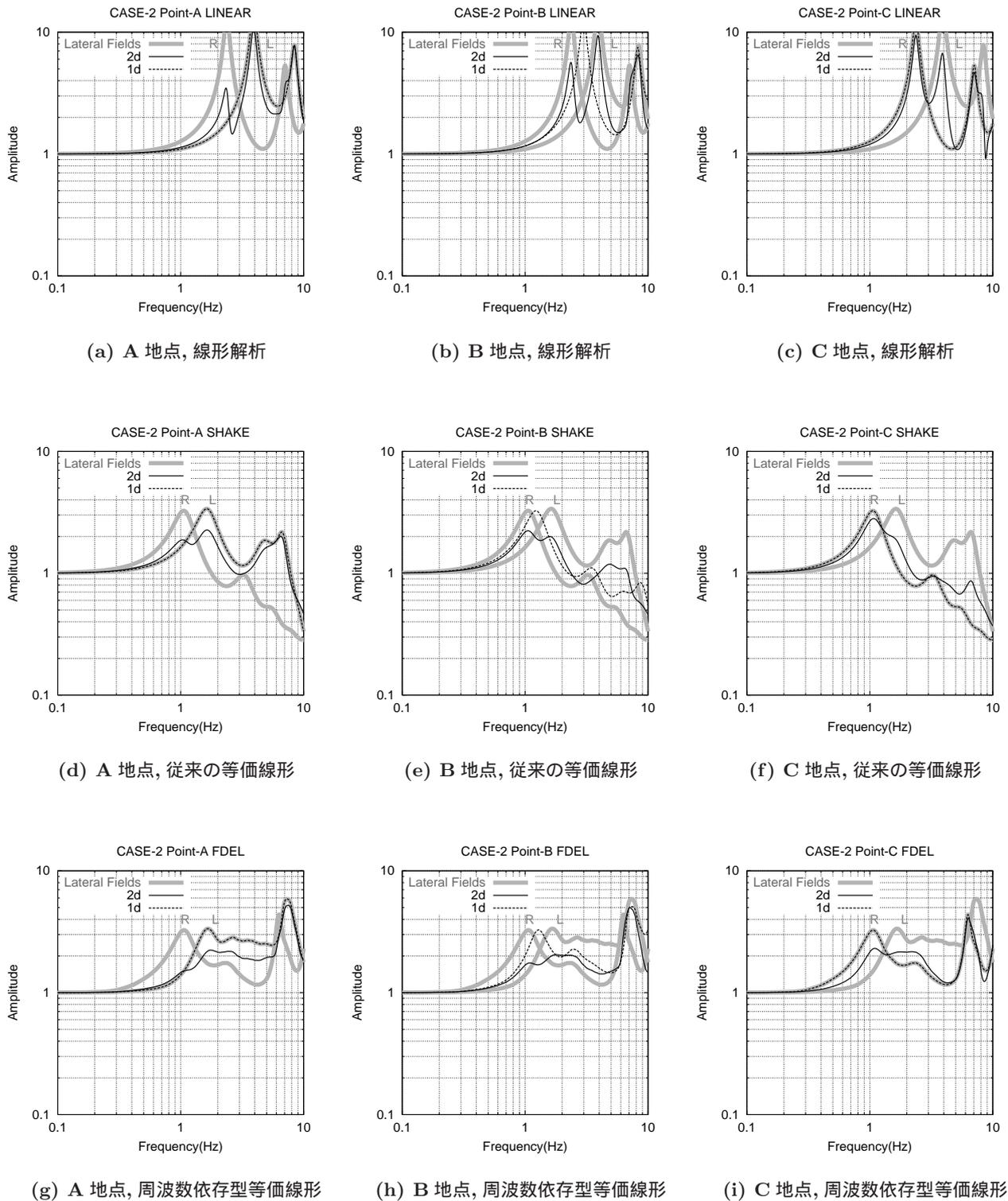
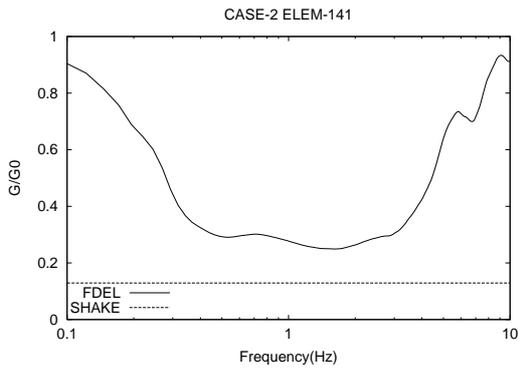


図-2 各節点における水平成分の伝達関数

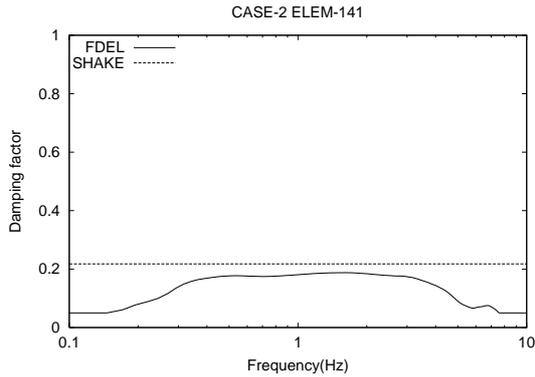
するが、線形解析による結果と同様である。すなわち、2次元伝達関数は、左右自由地盤の卓越周波数付近に2つの卓越周波数を持つ。

図-2(g), (h), (i) は、周波数依存型等価線形解析(FDEL-FEM)によるA, B, C各地点における伝達関数である。他の解析と同様、2次元伝達関数は、1次元解

析に比べて複雑な周波数特性となり、左右自由地盤の卓越周波数付近に2つの卓越周波数を持つ。また、従来の等価線形解析と同様、卓越周波数が線形解析の場合と比べやや低周波側に移動するが、高周波数領域において伝達関数の増幅率が従来の等価線形化法に比べ大きな値となり、むしろ、線形解析の値に近い。換言すると、従



(a) 剛性低下率



(b) 減衰定数

図-3 剛性低下率と減衰定数

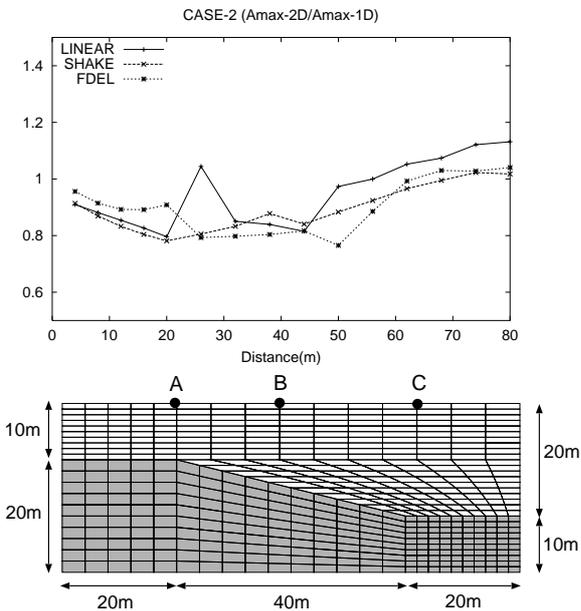


図-4 地表面における最大加速度と同じ深さの整形地盤との比

来の等価線形化法による解析 (FLUSH) では、高周波数領域において増幅率が低下すると言える。この結果は、一次元 (SHAKE, FDEL) における数値解析で確かめられている知見と整合する。

図-3 は、図-1 に示す地盤モデルにおいて、傾斜基盤の頂上付近にあたる要素 (ELEM-141) について、剛性低下率 ( $G/G_0$ )、減衰定数  $h$  をそれぞれ周波数軸上にプロットしたものである。両ケースとも、周波数依存型等価線形化法 (図中 FDEL) による解析例では、低周波数 (0.3Hz 以下) と高周波数領域 (3Hz) 以上ではほとんど剛性の低下が見られない。中周波数 (0.3Hz ~ 3.0Hz) 付近において剛性が低下しているが、従来の等価線形化法 (図中 SHAKE) による解析例の方が、さらに剛性が小さい。逆に減衰定数は、従来の等価線形化法による解析例では、周波数依存型等価線形化法による解析例を上回り、過大な評価となっている。

図-4 は、2次元解析における地表面の各節点における最大加速度と同じ深さの地層モデルを仮定した1次元解析における地表面での最大加速度の比をとり、水平面に沿ってプロットしたものである。線形解析の例では、傾斜基盤の先端の直上 (A 地点) 付近で最大加速度が卓越している。一方、2種類の等価線形化法については、周波数依存型等価線形化法による結果の方が従来の等価線形化法による結果よりも概ね大きくなる。

#### 4. おわりに

周波数依存型等価ひずみを定義し、周波数領域における2次元 FEM 解析に導入した。この際、等価ひずみをひずみのフーリエ振幅に応じて設定することとし、1次元解析 FDEL と同様の定義を行った。傾斜基盤を持つ不整形地盤の地盤震動解析を行ったところ、地震動の増幅特性は、剛性および減衰定数などの材料特性の他に、地層構造の幾何学的条件にも大きく左右されることがわかった。今後は、各要素に生じるひずみの空間的な偏りの有無や、それにより生じる地震動伝播特性の変化などについて詳しく調べる必要があると考えている。

#### 参考文献

- 1) P.B.Schnabel, J.Lysmer and H.B.Seed: SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, EERC, 72-12, 1972.
- 2) J.Lysmer, T.Udaka, C.-F.Tsai and H.B.Seed: FLUSH a computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems, EERC, 75-30, 1975.
- 3) 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫: 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.No493/III-27. pp.49-58.1994.6.
- 4) B.O.Hardin and V.P.Drnevich: Shear modulus and damping in soils, ASCE, Vol.98, SM6,SM7, pp.667-692, 1972.
- 5) Y.Furumoto, M.Sugito, A.Yashima: Frequency-Dependent Equivalent Linearized Technique for FEM Response Analysis of Ground, 12WCEE, 2000.2 in Auckland, New Zealand(CD-ROM)

(2003.10.10受付)