

GA を用いた基盤入射地震動推定のための 非線形地盤特性値の同定

酒井久和

正会員 博士(工学) 若築建設(株) 技術本部技術研究所 (〒153-0064 東京都目黒区下目黒二丁目 23-18)

筆者らはこれまでに、時間領域で基盤入射地震動を推定する手法に関して基礎的研究を進め、基盤の観測記録から入射波成分を分離できることを確認している。本手法を実問題に適用し、高精度の入射波を推定するためには、適正な地盤の震動特性の設定が必要不可欠であるが、大自由度非線形系の震動特性を同定する手法は未だ確立されていない。本論文では、基盤入射地震動の推定に用いる大自由度非線形系の地盤特性値を遺伝的アルゴリズム (GA: genetic algorithms) に基づいて探索する。ここで、応答計算に非反復時間積分法を用いて膨大な計算時間を軽減し、実用的な手法とする。まず、数値解析例を通じて適用性を検証する。さらに、実問題への適用例として兵庫県南部地震のポートアイランドアレー観測記録を対象にした解析を行う。

Key Words : genetic algorithm, optimization, model parameter, time integration, input ground motion

1. はじめに

地盤-構造物系の地震応答解析を行う場合には、基盤における入射地震動が必要であり、この入射地震動として地表面や地中部の観測記録から推定された加速度波形がしばしば採用されている。この場合、一般に波形の推定は解析コード“SHAKE”¹⁾に代表される周波数領域での重複反射理論に基づいて行われ、地盤の非線形性は等価線形化手法により近似される。しかし、レベル2地震動のような強震時には、地盤はひずみレベルで 10^2 のオーダー以上の大ひずみが発生することが予想され、このような大ひずみレベルでは等価線形化手法の適用限界をすでに越えていると考えられている²⁾。

そこで、筆者らは、全応力モデルではあるが、時間領域で地盤の非線形性を考慮に入れて、基盤入射地震動を推定する方法³⁾ (以後、基盤入射地震動推定を入射波逆算、その方法を入射波逆算法と呼ぶ) を提案している。ただし、この計算法は計算誤差による解の発散性が強く、地表面を観測点とした場合の基盤入射地震動の推定法として実問題に適用するまでには至っていない。しかしその一方で、入射波逆算法には観測点の深度が深い場合に計算誤差が抑制される特性があり³⁾、地中における観測記録から基盤入射地震動を分離する問題には適用できることから、筆者らはポートアイランドのアレー観測地点を対象に数値実験を行い、高精度の推定結果を得ている⁴⁾。

ただし、この解析例では、地盤特性値を観測記録と整合するよう試行錯誤で選定し、その地盤特性値を正として解析精度を検証するにとどまっている。

上述のように入射波逆算法では、数値的に基盤入射地震動の高精度な推定が行えるために、実問題での入射波の推定精度は、設定した地盤パラメータの精度に大きく依存すると考えられる。すなわち、入射波の推定精度を上げるためには、適正な地盤パラメータを設定することが必要不可欠となる。

一方、振動系の動的パラメータ同定に関して、近年、カルマンフィルタや遺伝的アルゴリズム (GA: genetic algorithm) を用いて多くの研究がなされている^{5)~11)}。しかし、その適用性の検証は少自由度の非線形系や多自由度線形系に限られており、非線形な大自由度系の動的パラメータを同定する方法は未だ確立されていない。これは、多くの未知パラメータを同定する場合に解の唯一性が保証されず、適正な解を求めることが困難であることも一因となっている。

そのため、現在のところ、入射波逆算用の地盤特性値は観測記録に整合するよう試行錯誤により選定しているが、解析モデルが大自由度となる場合には、設定すべきパラメータの数も増大し、適正な地盤特性値の選定が非常に難しく多大な人的労力を要するのが現状である。

そこで、本論文では、入射波逆算に用いる非線形地盤特性値の探索問題を、最適パラメータの同定問題と捉え

てGAを適用する。ただし、GAでは、数十から数千世代に渡って個体群の評価を行う必要があることから、評価に時刻歴応答計算を伴う場合には、大自由度非線形系では膨大な計算時間を要し、実用的ではない。このため、応答計算部分は非反復時間積分法^{12),13)}を用いて計算時間の軽減を図る。

本論文では、まず、入射波逆算に用いる地盤特性パラメータの同定方法について解説する。つぎに、数値解析例を通じてパラメータの同定精度を調べる。さらに、同定値を用いて入射波逆算を行い、基盤入射波推定に用いる地盤特性値の探索方法としての適用性を検証する。最後に、実問題への適用例として、兵庫県南部地震のポートアイランド地点での入射波逆算問題における地盤特性パラメータを同定する。ただし、入射波の逆算方法については、文献3)を参照されたい。

2. 地盤震動特性の最適同定問題

(1) 同定の概要

本研究では、基盤入射地震動推定用の地盤特性値の選定を目的として、図-1に示すような鉛直アレー記録が観測されている場合に、2つの観測点に挟まれる地盤特性値の最適同定を行う。ここで、振動系は地盤を地層構造および解析対象とする周波数を考慮して離散化し、図-1に示すような1次元の集中質点系にモデル化する。以下に、パラメータ同定時における解候補の妥当性の評価方法を示す。

①鉛直アレー記録のうち、深度が深い方の記録を基盤波として上記のモデルの地震応答解析を行う。

②深度の浅い方の観測点において、観測記録と時刻歴応答加速度の算定値を比較し、それらの波形の整合度により解候補の評価を行う。

ここで、解候補の評価値 J_p を次のように定義する。

$$J_p = \sum_{m=1}^M (\ddot{x}_i(m) - \ddot{y}_i(m))^2 / \sum_{m=1}^M \ddot{y}_i^2(m) \quad (1)$$

ここに、 $\ddot{y}_i(m)$ は観測記録の m 番目の加速度値、 $\ddot{x}_i(m)$ はそれと同時刻の絶対応答加速度の算定値を表し、下付の添え字 i は質点番号、 M は観測記録のデータ数を意味する。

式(1)は、当該位置の観測記録と応答加速度が完全に一致する場合に評価値が0となる関数で、評価値が小さいほど2つの波形の整合度が高いことを示す。この意味において、以後、 J_p を解候補の評価値とともに観測波の再現精度とも呼ぶことにする。

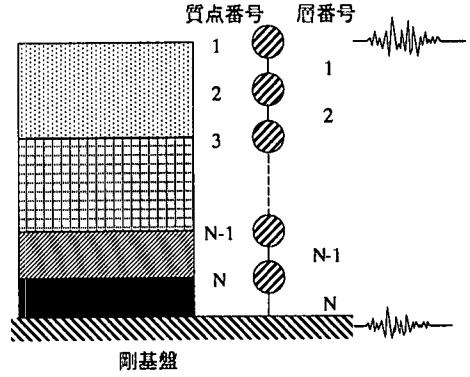


図-1 解析概念図および解析モデル

(2) GAの適用

本研究では、上記の地盤特性パラメータの同定問題にGAを適用する。ここではまず、GAの概要を示し、つぎに、本研究で採用したGAの一手法であるCHCの説明を行う。

a) GAの概要^{14),15)}

GAは生物の遺伝的な進化の法則を模倣し、工学の分野に適用した学習のアルゴリズムで、解候補の集団の中から解候補のグループを多数抽出し、評価の良いものだけを遺伝的に後世へ残して最終的に最も適した解を得ようとする方法である。このアルゴリズムは、初期値の影響が少なく大域的探索に有効であり、離散化最適化問題や組み合わせ最適化問題の有効な手法として、近年種々の工学分野で応用されている。地震工学の分野では、例えば、ライフラインの最適復旧戦略^{16)~18)}や構造物の動的パラメータ同定⁷⁾などへの適用事例がある。

GAはまだ発展途上の手法で、多種多様な方法が開発されているが、ここではまず、基本的なGAとして単純遺伝的アルゴリズム(SGA:simple genetic algorithm)について説明する。

GAでは、解候補は個体、その集団は個体群と呼ばれ、各個体は複数個の遺伝子の線列としての染色体によって特徴づけられる。さらに、以下のようなプロセスを経ることにより、効率的に設定条件下での最適解を得ることができる。(図-2参照)

- ① 個体の初期集団を生成する。
- ② 個体の評価をもとに個体の取捨選択を行う。
- ③ 個体間相互の遺伝子の組み替え(交叉)や遺伝子中の値を他の値に置き換える(突然変異)等の操作を経て、新たな解候補としての個体群を再生する。
- ④ ②, ③の作業を個体もしくは個体群の評価に対して設定した条件を満足するまで繰り返す。

b) CHC^{14),19)}の採用

CHCとはEshelmanが提案したGAであり、2世代エリート選択(cross generational elitist selection)、異種間交

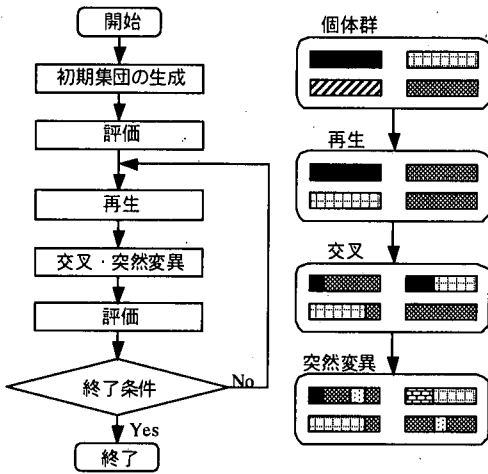


図-2 SGA の概念図

又 (heterogeneous recombination) , 大変動突然変異 (cataclysmic mutation) の略語である. CHC は前述の SGA と比較して, 単純性を犠牲にする代わりに効率性を向上させた手法である. つぎに, CHC の 3 つの基本操作について簡単に説明を加える. ただし, 詳細は文献(14), (19) に譲る.

① 2 世代エリート選択

古い世代の個体群と新しく交叉により生成した個体群の中から, 優れた評価値を示す個体を順に選択する. この操作により, 評価値の高い個体が確実に保存されるとともに, より大きな個体群中の多様性が保たれる.

② 異種間交叉

2 つの親の遺伝子が類似していない場合に, 異なる遺伝子の半分を相互に交換する. これにより, 個体の多様性が確保される. ただし, 親の類似を規定する異なる遺伝子の数は, 個体群が収束するにしたがって緩和する. たとえば, 図-2 の右フローの交叉における 4 つの個体のうち, 左上と右下のような類似の個体の交叉は, 個体群が収束して条件が緩和されるまで行われず, その他の組み合わせの交叉で世代が進行する.

③ 大変動突然変異

突然変異を各世代の更新時には行わず, ①②の操作を行っても, 個体群が改善されない場合に, 評価値の最も良い個体とその遺伝子の一部を初期化した個体をもとに新たな個体群を生成する. ここで, 最良評価値を示す個体の遺伝子のうち, 初期化する割合 (拡散率 r) に応じて値をランダムに決める. また, 拡散率は 0.35 程度の値が用いられる.

(3) 非反復時間積分法^{12), 13)}の適用

(1) 節で示したように, 本最適同定問題では各個体の評価において, 時刻歴応答解析を行う必要があるが, この

際使用する時間積分法には以下の特性がある. 中央差分法等の陽解法では, 収束計算を行うことなく陽に高精度の解を得ることができる反面, 解の安定性が厳しく, 最高次モードに対しても解の安定性を保証する計算時間間隔を採用しなければならない. 一方, Newmark の β^{20} 法等の陰解法では, 系が非線形な場合に収束計算を行わなければ運動方程式が満足されず, 十分な精度の解が期待できないものの, 解の安定性は陽解法に比べ良好である.

数十自由度の非線形な系に対して, 時刻歴応答解析を行う場合, 現在の計算機能力からすれば, 上記のいずれの手法を用いても, 計算時間は小さく全く問題とならない. しかし, GA では数十から数万世代にも渡って多数の個体に評価を下さなければならないことから, 大自由度の場合に時刻歴応答解析に要する計算時間が全体では膨大なものとなり, 一般的な時間積分法を用いては実用的な同定はできない. したがって, 本研究では応答解析の逐次積分法として非反復時間積分法を採用し, 計算時間の軽減を図る. ここで, 非反復時間積分法は, 中央差分法の解析精度と Newmark- β 法の解の安定性を利用して, 収束計算を行わずに低周波成分の解の精度を保証しつつ解の安定性を向上させる時間積分法で, この手法により, 振動系や収束条件によって異なるが数倍から数十倍の計算時間の軽減が可能である. 詳細は参考文献 12), 13) を参照されたい.

3. 数値解析例

(1) 解析条件

a) 地盤の復元力特性

土の復元力モデルは, Hardin-Drevecich モデル²¹⁾ や Ramberg-Osgood モデル²²⁾ が従来より広く一般に使用されている. また, 近年, より実地盤の動的復元力特性に対して適合性の良いモデルとして, 例えば, 吉田ら^{23), 24)}, 西村・室野²⁵⁾, 熊崎ら²⁶⁾, 福嶋ら²⁷⁾ が, 繰り返し三軸試験等によって得られた $G-\gamma$ (せん断剛性-ひずみ) 曲線や $h-\gamma$ (減衰定数-ひずみ) 曲線にフィッティングするよう骨格曲線や履歴曲線を改良したモデルを提案している. 本研究では, これらの中から骨格曲線として, パラメータの数が少なく, 大ひずみ領域においても $G-\gamma$ 曲線との適合度の良い福嶋らのモデルを採用する. 次式にその骨格曲線を示す.

$$\tau_i = \frac{G_0 \gamma_i}{1 + |\gamma_i / \gamma_n|^{0.1}} \quad (2)$$

ここに, τ_i , G_0 , γ_i , γ_n はそれぞれ, せん断応力, 初期せん断弾性係数, せん断ひずみ, 規準ひずみ, 下付けの

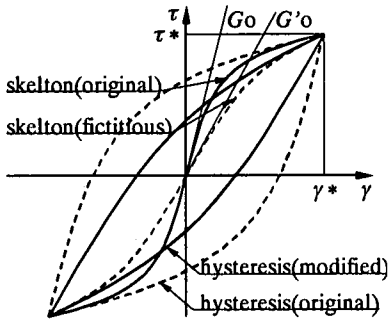


図-3 履歴曲線の概念図

添え字 i は i 層目の成分を意味する。ここで、規準ひずみは、割線せん断剛性が G_0 の $1/2$ となるときのひずみで、 δ_i は次式で定義されている。

$$\delta_i = \delta_{Ai} \log_{10}(\gamma_i / \gamma_{ri}) + \delta_{Bi} \quad (3)$$

ここに、 δ_{Ai} 、 δ_{Bi} はフィッティングパラメータである。

次に履歴曲線として、以下の2つのモデルを採用する。

- ① Hardin-Drebnich モデルに Masing 則を適用したモデル。
- ② 石原ら²⁰⁾によって提案された $h-\gamma$ 曲線に適合するよう仮定の初期せん断剛性を変化させた双曲線モデル。(図-3参照)

ここで、②だけでなく①のモデルも採用したのは、一般に使用頻度の高い修正 Hardin-Drebnich²⁰⁾を構成モデルの選択肢の中に入れるためである。また、②で $h-\gamma$ 曲線の離散データ自体を特定しようとすると、未知パラメータの数が増大して適切でないことから、本研究では h のひずみ依存性をせん断剛性 G を介して次式で計算する。

$$h_i = h_{maxi} (1 - G_i / G_{0i}) \quad (4)$$

ここで、①と②のモデル選択は、個体中の h_{maxi} のみを用い、その符号により判別し、負の場合に①のモデル、正の場合に②のモデルが採択されたものとする。ただし、①の場合、 h_{maxi} の値自体には意味がない。

また、一様なせん断波速度とモデル化された地層に対して、深度方向の復元力特性を変化させる方法として、①規準ひずみを変化させる方法、②その層での平均的なせん断波速度を満たしたまま、各細分割層の G_{0i} が変化させる方法、が考えられるが、次式のような定式化を行うことにより、①は②よりもパラメータの数を抑制できること、隣り合う細分割層における復元力特性の漸次変化の表現が容易なことから、①の方法を採用する。

$$\gamma_{ri} = \tau_{maxi} / G_{0i} \quad (5)$$

表-1 地盤特性値 (Target)

パラメータ	Case.1
粘着力(kN/m ²) : c_i	19.6
内部摩擦角(°) : ϕ	20.0
最大減衰定数 : h_{maxi}	0.30
係数 ($h-\gamma$, fitting) : δ_{Ai}	0.00
: δ_{Bi}	1.00
Rayleigh 減衰定数 : α_i	0.010
: β_i	0.002
単位体積質量(t/m^3) : ρ_i	1.8
せん断波速度(m/s) : V_{Si}	200

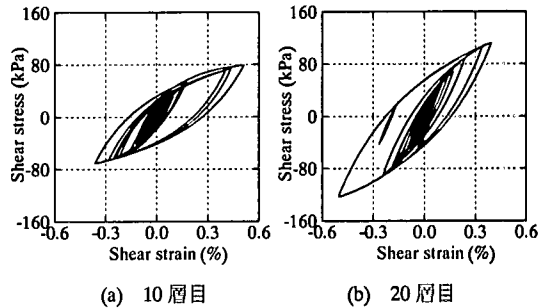


図-4 応力-ひずみ関係

$$\tau_{maxi} = c_i + \sigma_{mi} \tan \phi_i \quad (6)$$

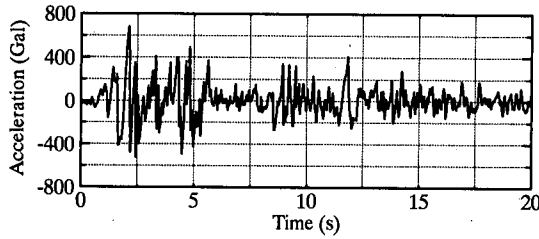
ここに、 c_i 、 ϕ 、 σ_{mi} 、 τ_{maxi} はそれぞれ、粘着力、内部摩擦角、平均拘束圧 ($K_0=0.5$)、せん断強度を表す。

b) 解析モデル

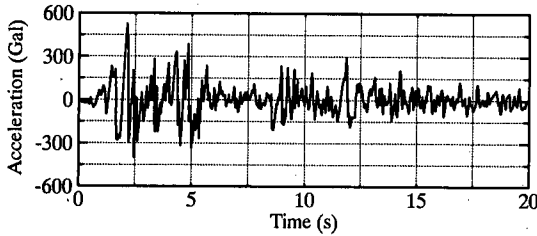
本章では、基盤までの深度が 40m の地盤において、基盤面と地表面において加速度記録が観測されている場合を想定し、地層を 2m ピッチで分割した 20 自由度集中質量系モデルに対して解析を行う。また、パラメータの最適同定問題においては、地盤特性のうち、せん断波速度 V_{Si} 、単位体積質量 ρ_i を既知、粘着力 c_i 、内部摩擦角 ϕ 、最大減衰定数 h_{maxi} 、および、フィッティング係数 δ_{Ai} 、 δ_{Bi} 、Rayleigh 減衰定数 α_i 、 β_i の計 7 つのパラメータを未知とする。ただし、地表における観測記録を算定する際には、地盤特性として表-1に示す値を全層に適用する。したがって、表中の ρ_i 、 V_{Si} を除く値が後のパラメータの最適同定の Target となる。参考のため、この系に次項の地震動を入射した場合、上から 10 層目、20 層目 (最下層) の応力-ひずみ関係を図-4に示す。

c) 観測記録

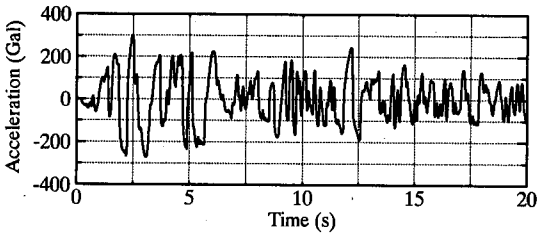
本章の後節(3)では、入射波逆算法における本手法の適用性を検証する目的で、地盤特性の同定パラメータを用いた入射波逆算を行い、解析精度を確かめる。したがって、解析モデルへの入射波が既知である方が都合が良いことから、パラメータ同定に用いる基盤観測波はつぎの



(a) 入射波 (Target.I)



(b) 基盤面



(c) 地表面 (Target.S)

図-5 観測波形

ような手順で作成する。

①上記 b)の 20 質点系の解析モデルの基盤部に 1 質点を加え、底面を粘性境界にした 21 質点系のモデルを作成する。

②新たに作成した 21 質点系モデルに El Centro(1940)NS 波の振幅を 2 倍に調整した波形を 2E 波とした時刻歴応答解析を行う。

③地表面および基盤面の質点の時刻歴応答加速度 (E+F) を観測記録とする。

ただし、基盤面以深の地盤は、質量密度 $\rho=2.0\text{t/m}^3$ 、せん断波速度 $V_s=350\text{m/s}$ の線形弾性体とする。地表面の観測記録は、継続時間 20 秒、計算時間間隔 2/1,000 秒の時刻歴応答結果を 1/100 秒間隔で抽出したデータである。図-5に②の入射波(2E)および③の地表面、基盤面の応答加速度波形を示す。

d) 解析ケースおよびその他の条件

本解析例では、地盤特性値を同一とする地層の分割方法により、表-2に示すように 3つの解析ケースを想定する。ここで、1層あたりの未知数の数は 7 であることから、各ケースの未知数の総数は、Case.1~3 でそれぞれ、70、28、7となる。

本研究の GA では、全層の未知パラメータを直列に並

表-2 解析ケース

解析ケース	仮定条件
Case.1	4m 毎に地盤特性値が異なる。
Case.2	10m 毎に地盤特性値が異なる。
Case.3	全層同一の特性値。

表-3 サンプルデータの範囲

粘着力(kN/m^2)	c_i	0.0 ~ 980.0
内部摩擦角($^\circ$)	ϕ_i	0.0 ~ 50.0
最大減衰定数	$h_{\max i}$	-0.001,
		0.100 ~ 0.400
係数 ($h-\gamma$, fitting)	$\delta_{A i}$	-0.300 ~ 0.300
	$\delta_{B i}$	0.500 ~ 1.500
Rayleigh 減衰定数	α_i	0.0000 ~ 1.0000
	β_i	0.00000 ~ 0.0050

表-4 最良評価値が 5%以下になる世代数および評価値

解析ケース	世代数	個体の評価値 (観測波の再現精度)
Case.1	38	4.7%
Case.2	6	4.7%
Case.3	3	4.4%

べ、これを個体とする。パラメータの値は、表-3の範囲内で離散化された各々、約 100 個のサンプルデータの中からランダムに抽出する。ここで、データの有効数字の桁数は最小値のオーダーを意味する。また、サンプルデータの範囲において、 $h_{\max i}$ 、 c_i 、 ϕ_i に関しては、一般的な土の特性値^{28)~30)}からデータ範囲を少し広げて設定した。ただし、規準ひずみは式(5)、(6)において、 $10^{-4} \leq \gamma_i \leq 5.0 \times 10^{-3}$ の範囲^{29),30)}にある c_i 、 ϕ_i の組み合わせのみが解として有効であるとする。次に、 $\delta_{A i}$ 、 $\delta_{B i}$ に関しては、土は低ひずみ領域では非線形性が小さく、これらの値が応答に及ぼす影響は小さいと考えられることから、高ひずみ領域における値を既往の研究成果^{31)~34)}から算出し、各々の値の範囲を設定した。また、Rayleigh 減衰 α_i 、 β_i の最大値は、それぞれ単独作用した場合に、0.5Hz、10Hz で約 16%の減衰定数に相当する。また、解析に用いる個体群サイズ N は既往の研究¹⁹⁾より効果的とされている 50、拡散率 r は 0.35、各個体の評価時に行う時刻歴応答解析の計算時間間隔は 2/1,000 秒とする。

(2) 解析結果

本章における解析は、式(1)の評価関数値が 5%以下の個体が生成されるまで計算を継続する。このとき、各ケースの世代数および最良の個体の評価値を表-4に、それぞれの個体に対して各成分の Target (表-1) との比、または差を図-6に示す。ただし、図中の層番号は図-1に

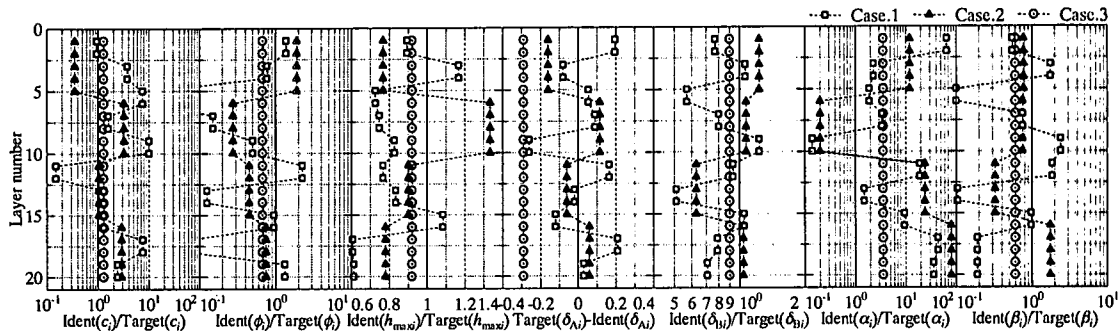


図-6 地盤特性の Target と同定値の関係

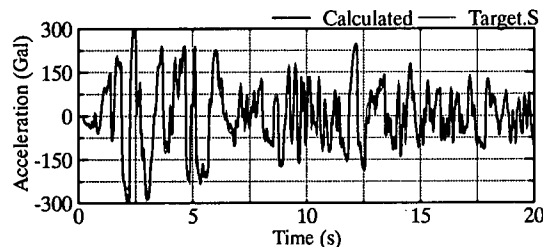


図-7 地表面の観測記録(Target.S)と時刻歴応答加速度 (Calculated)の比較(Case.1)

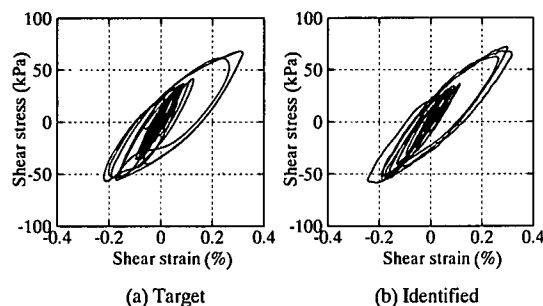


図-8 応力-ひずみ関係 (全層平均)

示すように上方から順に番号付けしている。また、Case.1の場合について、地表面における観測波 (Target.S) と同定した地盤特性値をもとに算定した時刻歴応答加速度 (Calculated) を図-7に示す。

まず、地盤特性値に関しては、図-6より、全層を同一特性値と仮定した Case.3 の場合に、 c_i 、 $h_{max,i}$ 、 $\delta_{B,i}$ などの一部のパラメータで比較的精度の良い同定が行えているが、全体的には、パラメータの値が Target と数倍異なるものまで存在し、個々の地盤特性値の同定という観点からは実用レベルにない。しかしその一方、観測点における加速度記録と応答加速度との関係は、図-7より、振幅のピーク時に計算波と観測波とが若干異なる箇所も見られるが、全体的には2波の判別が困難なほど波形が一致し、観測波形の再現精度は非常に良いことが分かる。

次に、振動系の復元力特性の同定精度について検証するため、Case.1 における設定値および同定値に基づいた

表-5 解析ケース

解析ケース	解析モデル	地盤特性値を変動させる地層
Case.4.1	Case.1	深度 0~4m の層
Case.4.2	Case.1	深度 20~24m の層
Case.4.3	Case.1	深度 36~40m の層
Case.4.4	Case.3	全層

全層の平均的な応力-ひずみ関係を図-8(a),(b)にそれぞれ示す。

図より、同定パラメータに基づく全層の平均的な応力-ひずみ関係は、Target と比べて大ひずみレベルの履歴減衰が若干小さいが、応力-ひずみ関係の最大、最小折り返し点や中ひずみレベルの履歴等、Target の履歴を精度良く再現できていることが分かる。この応力-ひずみレベルの同定精度が良好であることが、上記の波形の再現精度の高い一因であると考えられる。

(3) パラメータの感度解析

前節では、地盤パラメータの同定精度が不十分であるにもかかわらず、観測波や応力-ひずみ履歴の再現精度が良いことを示したが、本節では、その原因を検討する目的で、観測波の再現精度に対する各地盤パラメータの感度解析を行う。解析は、前節で同定した Case.1 および Case.3 の同定されたパラメータ群(図-6参照)に対して、サンプルデータ (表-3) の範囲内で1つのパラメータのみを変動させて行う。解析ケースを表-5に、各パラメータの観測波の再現精度に対する感度を図-9に示す。ただし、パラメータ p_k に対する観測波の再現精度 J_p の感度 D_k は、次式で表される³⁵⁾。

$$D_k = \left| (p_k / J_p) \cdot (\partial J_p / \partial p_k) \right| \quad (7)$$

ここで、 D_k の値が大きいかは、 J_p のパラメータ p_k に対する感度が高いことを意味する。

各パラメータに対する観測波の再現精度の感度に関しては、図-9より、パラメータが全層同一値を採る Case.4.4

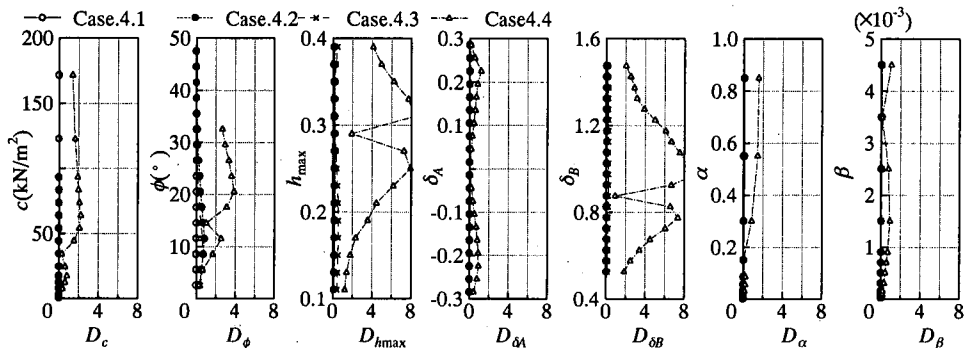


図-9 観測波の再現精度に対する各パラメータの感度

の h_{max} , δ_{Bi} が相対的に感度が高くなっており、これらについては、図-6の Case.3 ように比較的精度良いパラメータ同定が行えている。しかし、その他、特に地層を細分化して未知パラメータの数が増えた場合には、全体的に感度は低く、個々のパラメータが観測波の再現精度に及ぼす影響が小さいことが分かる。また、上記のパラメータの感度特性の他にも、本研究では、 c_i と ϕ_i , α_i と β_i など、相関が強いパラメータを同定の対象としていることも、解の唯一性が保証されず、観測波の再現精度が良好でも、同定値が Target と大きく異なる原因となっていると考えられる。

(4) パラメータおよび基盤入射波の同定精度

本節では、本最適同定手法の入射波逆算法への適用性を検討する目的で、同定されたパラメータで入射波逆算を行い、基盤入射地震動の逆算精度を検証する。このとき、入射波の逆算精度は、観測波形の再現精度を示す式(1)と同様の考えに基づき、次式で定義する。

$$J_i = \sum_{m=1}^M (\ddot{x}(m) - \ddot{y}(m))^2 / \sum_{m=1}^M \ddot{y}^2(m) \quad (8)$$

ここに、 $\ddot{y}(m)$, $\ddot{x}(m)$ はそれぞれ、 m 番目の Target の加速度、入射波の逆算加速度を表し、 M はデータ数を意味する。

前節 Case.1~3 で算定した地盤特性の同定値を用いて、入射波逆算を行う。ただし、計算時間間隔 2/1,000 秒、サンプル間隔 1/100 秒、継続時間 20 秒とする。また、基盤面以深の地盤条件は、観測波算定時と同じく $\rho=2.0\text{t/m}^3$, $V_s=350\text{m/s}$ の線形弾性体とする。各ケースの入射波の逆算精度を表-6に表し、Case.1 で逆算した入射波を Target とともに図-10に示す。

さらに、10m 毎に地盤特性が異なる Case.2 と同じ条件で、初期個体群の異なる 10 ケースで同定を行い、観測波の再現精度 5% 以下になる 10 組のパラメータを求める。表-7に各ケースの観測波の再現精度およびそのパラメ

表-6 入射波の逆算精度

解析ケース	Case.1	Case.2	Case.3
逆算精度	1.1%	0.6%	0.3%

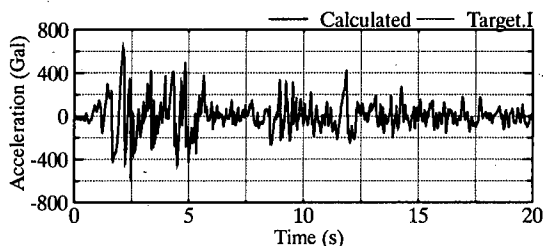


図-10 基盤入射地震動の逆算波形(Case.1)

表-7 観測波の再現精度および入射波の逆算精度(%)

解析ケース	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
再現精度	2.9	4.4	4.3	3.6	4.7
逆算精度	0.7	0.7	0.7	0.9	0.6
解析ケース	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10
再現精度	4.4	4.4	3.1	3.9	4.8
逆算精度	1.1	0.7	0.8	0.7	0.6

ータを用いた入射波逆算による逆算精度を表す。

表-6, 表-7より、入射波の逆算精度は上記のいずれのケースにおいても 0.3~1.1%の範囲内にあり、非常に高精度な入射波の推定が行えていることが分かる。また、入射波の逆算精度は、地盤特性探索時の観測波の再現精度 4.4~4.7% (表-4), 2.9~4.8% (表-7) をそれぞれのケースで上回る傾向が見られる。ちなみに、Case.1 で 23 世代目の観測波の再現精度は 20.0% であるが、この地盤特性を用いた入射波の逆算精度は 3.5% と、精度が格段に向上している。また、入射波の逆算精度が 1.1% と最も低い Case.1 の場合でも、図-10より、逆算波形と Target 波形は判別が困難なほど、波形の整合度は高い。したがって、本最適同定手法が基盤入射地震動逆算のための地盤特性値の設定法として有効であることが確認された。

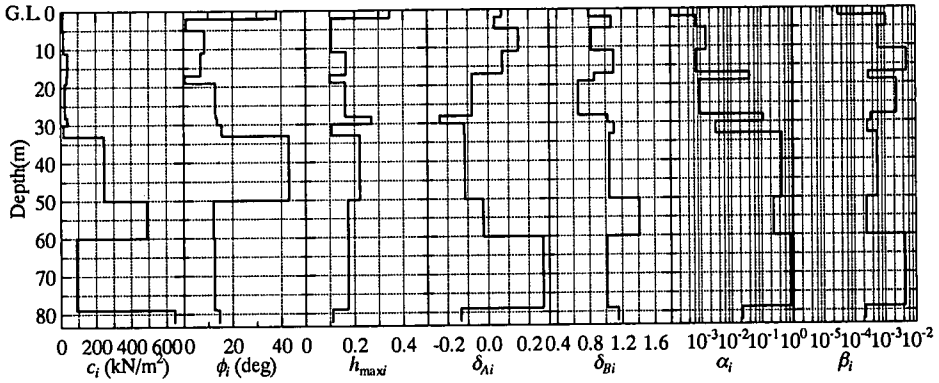


図-12 地盤特性パラメータの同定値

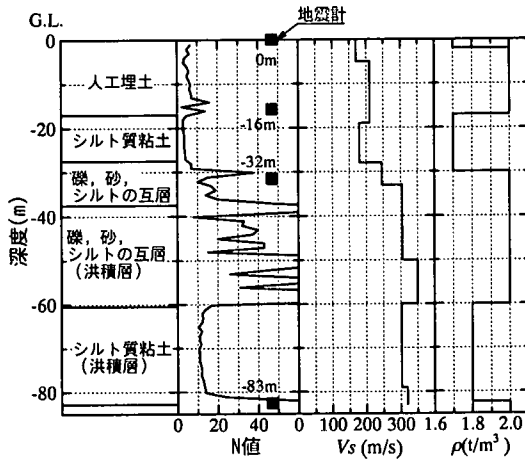


図-11 土質柱状図

4. ポートアイランド基盤入射地震動の推定

本章では、実問題のような大自由度非線形系に対して本同定手法の適用性を検討する目的で、実際のアレー観測点において入射波逆算用の地盤特性値の同定を試みる。

(1) 解析モデル

解析は、ポートアイランド北西部に神戸市開発局が設置したアレー観測地点³⁶⁾を対象に行う。図-11に当該地点の土質柱状図を示す。ここで、解析の対象周波数を20Hzまでとして、地表から基盤(G.L.-83m)までの地層を70の集中質点系にモデル化する。ただし、 V_s および ρ がともに同値である地盤に対しては同一の特性値を有するものと仮定し、全体を12組のグループに分類する。

(2) 入射波逆算用の最適パラメータ同定

パラメータの同定方法として、近接する2つの観測記録に挟まれる領域を、下方の観測記録を入力として順次評価する方法と、最下層の記録を入力として全領域を複数の記録で評価する方法が考えられる。具体的には、前

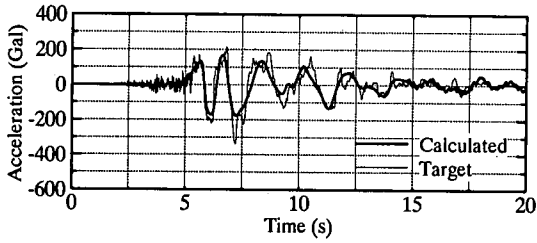
者は次に示す①~③、後者は④⑤のプロセスを経るものとする。

- ① G.L.-16mの観測記録を入力として、G.L.で応答を評価し、G.L.~G.L.-16m間のパラメータを同定する。
- ② ①の同定値を確定したものととして、G.L.-32mの観測記録を入力、G.L.-16mで応答を評価して、G.L.-16m~32m間のパラメータを同定する。
- ③ ①②の同定値を確定したものととして、G.L.-83mの観測記録を入力、G.L.-16mで応答を評価して、G.L.-32m~83m間のパラメータを同定する。
- ④ G.L.-32mの観測記録を入力、G.L., -16mの2地点で応答を評価し、G.L.~32m間のパラメータを同定する。
- ⑤ ④の同定値をランダムに作成する初期個体群の個体の1つとして、G.L.-83mの観測記録を入力、G.L., -16m, -32mの3地点で応答を評価し、G.L.~83m間のパラメータを同定する。

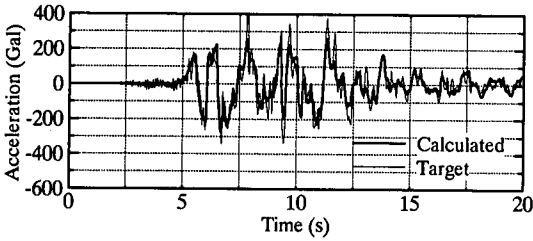
ここに、前者の方法は、①~③の段階において個々の観測記録の再現性は良好であったが、G.L.~83mまでの全領域に対してG.L.-83mの観測記録を入力した場合に、G.L.やG.L.-16mの観測記録の再現精度が悪化したことから、本章における同定は、後者の方法に基づいたものを示す。ただし、後者の④は、⑤に先立って大自由度での計算を低減し、計算時間を短縮するために行った。

パラメータの同定は、個体群サイズ50、拡散率0.35で、時刻歴応答解析は、計算時間間隔2/1000秒、継続時間20秒で行う。ただし、地震観測記録はそれぞれの深度で観測されたNS成分とする。また、G.L.-83mの記録は地震計埋設時の設置誤差が大きいことが指摘されていることから、方向補正された加速度³⁷⁾を採用する。

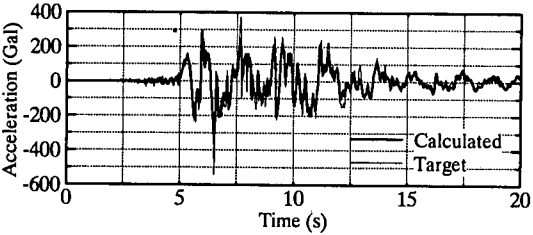
地盤特性パラメータの同定結果を図-12に、各観測深度での時刻歴応答加速度の計算波形と観測記録を図-13に示す。ちなみに、上記は世代数2,000のときの結果で、このとき、3観測波の再現精度の平均は20.0%、計算時間は約20時間(PentiumIII-933MHz(Linux, g77))であった。参考のため、再現精度の平均値の履歴を図-14に示



(a) G.L.



(b) G.L.-16m



(c) G.L.-32m

図-13 各観測深度における時刻歴応答加速度と観測記録

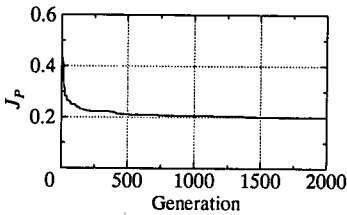
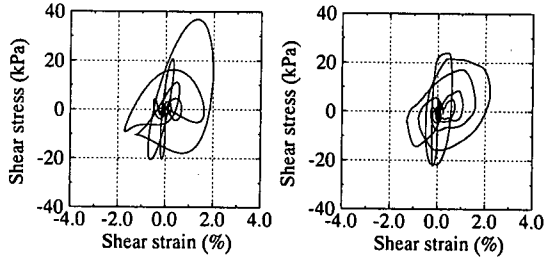


図-14 評価値の履歴

す。

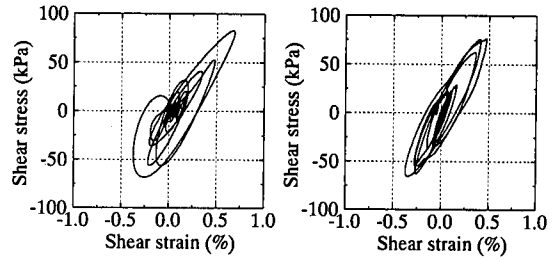
まず、図-12より、地盤特性パラメータの同定値のうち、 c_i 、 ϕ_i に関しては、図-11においてN値が比較的大きい層で、大きなせん断耐力となる値を示しており、また、液状化した埋立土層や洪積粘土層では、それを挟む層と比べ、小さなせん断耐力を示すなど、概略的には土質柱状図と整合する結果となっている。ただし、個々のパラメータの同定精度については、3章の数値解析例において観測波形の再現精度が5%以下と、本検討より精度が高い場合に、同定精度が実用レベルに達していないことから、本検討においても、他の応答解析等で用いる地盤パラメータとして、妥当な値を同定しているとは限らない。

次に、観測地点の再現波形の精度について、図-13(a)



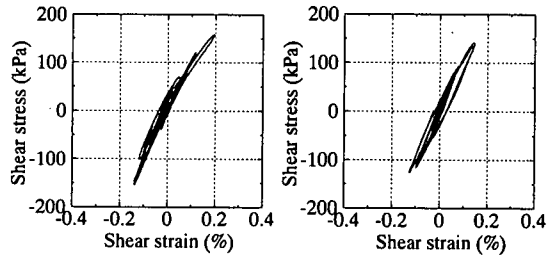
(i) 風間らの算定結果 (ii) 本手法による同定結果

(a) G.L.~16m



(i) 風間らの算定結果 (ii) 本手法による同定結果

(b) G.L.-16m~32m



(i) 風間らの算定結果 (ii) 本手法による同定結果

(c) G.L.-32m~83m

図-15 各層の応力-ひずみ関係

より、地表面では、主要動以後の高周波成分については観測記録をほとんど再現できていないが、波形は周期、振幅とも概ね一致している。G.L.-16mについては、図-13(b)に示すように、全体的に観測波と応答波形の整合度は良いが、高周波成分による波のピーク値は応答加速度の方がかなり小さい。G.L.-32mでは、図-13(c)より、G.L.-16mと同様に応答加速度の波のピーク値が過小評価される傾向は見られるものの、G.L.-16mの場合ほど顕著ではなく、全体的に観測波を高精度に再現していることが分かる。

ここで、同定したパラメータの妥当性を検証する目的で、風間ら³⁸⁾が観測記録から算定した各観測記録間(G.L.~16m, G.L.-16m~32m, G.L.-32m~83m)における平均のせん断応力-ひずみとの比較を行う。風間らが算定した応力-ひずみ関係、および、本検討で同定した応力-ひずみ関係を図-15に示す。

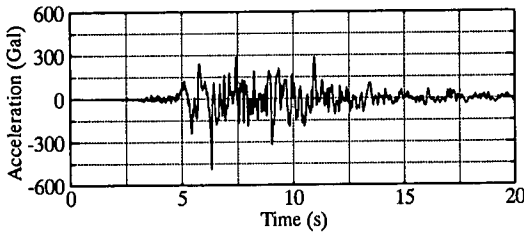


図-16 基盤入射地震動の推定波形(E)

G.L.~16m の層においては、図-15(a)より、本同定手法による応力-ひずみ関係は、風間らの算定結果に比べて、最大せん断応力は小さくなっているが、最小せん断応力、最大、最小ひずみレベルは同程度の値を示しており、また、せん断剛性の経時変化を見ると初期に大きな剛性を示した後、徐々に剛性が低下している様子が再現されている。ここで、本検討は全応力解析であり、かつ、双曲線モデル用いていることから、本来、G.L.~16m の層のように液化化を生じるような地盤には適用できない。しかし、本検討では、この層を4つに細分化してそれぞれの層に独自の復元力特性を持たせることで、全体として液化化した応力-ひずみ関係と比較的特性の似た応答が表現されていると考えられる。

G.L.~16m~32m および G.L.~32m~83m の層については、図-15(b), (c)より、剛性やひずみレベル、履歴減衰の大きさ等、概略的には精度良く近似が行えていることが分かる。

以上、本同定手法では、数十自由度の実地盤を対象として、上記のように観測波形や応力-ひずみ関係を精度良く再現する地盤パラメータを同定できることが確かめられた。また、3章の解析例より、この同定値を用いて入射波逆算法により求めた基盤入射地震動は、観測波の再現精度より高精度であると想定される。参考のため、逆算した基盤入射地震動(E)を図-16に示す。

5. 結論

時間領域において基盤入射地震動を推定する際に非線形な地盤特性値を設定する必要があるが、本研究では、この地盤特性値を探索する問題をパラメータの最適同定問題としてGAを適用した。このとき、GAにおける個体評価の際に行う時刻歴応答解析に非反復時間積分法を採用し、計算時間の大幅な削減を図っている。さらに、本同定手法の妥当性を検証する目的で数値解析を実施し、以下のような成果を得た。

① 20集中質点系の解析モデルに対して、本最適パラメータ同定手法を用いた場合に、個々のパラメータ自体の同定精度は実用レベルに達していないが、全層の平

均的な応力-ひずみ関係は精度良く再現が可能であった。さらに、観測記録と整合度の良い十数組の異なる地盤特性パラメータを探索し、その地盤特性値を用いて基盤入射地震動を推定した結果、探索されたいずれのパラメータを用いても基盤入射地震動が高精度に推定できることが確認された。

- ② 1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドのアレー観測地点を対象に集中70質点系にモデル化し、地盤特性値の最適同定を実施したところ、各観測深度における加速度記録および観測深度間の平均的な応力-ひずみ関係を十分な精度で再現する地盤特性値の探索が可能であることから、大自由度非線形系に対しても適用可能であることが分かった。
- ③ ①, ②より、実際の鉛直アレー観測地点を対象にして、基盤入射地震動を時間領域で逆算する場合のパラメータを探索する手法として、本最適パラメータ同定手法が有効であることが確かめられた。

謝辞：本研究を行うにあたり、京都大学の清野純史助教、竹中工務店の恒川裕史氏、理化学研究所の新井洋博士、岐阜大学の能島暢呂助教授、ならびに本誌査読員の方々には、大変貴重なご助言、ご指摘を頂きました。また、東北大学の風間基樹助教授には、ポートアイランドアレー観測地点の応力-ひずみ関係のデータを頂きました。ここに各位に対して記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, *EERC Report*, Vol.72, No.12, University of California, Berkeley, 1972.
- 2) 国生剛治, 本山隆一: 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, pp.773-774, 1998.
- 3) 酒井久和, 澤田純男, 土岐憲三: 時間領域での基盤入力地震動の推定法に関する基礎的研究, *土木学会論文集*, No.577, pp.53-64, 1997.
- 4) 酒井久和, 澤田純男, 土岐憲三: ポートアイランドにおける時間領域での基盤入力地震動の推定, *土木学会論文集*, No.612, pp.373-378, 1999.
- 5) 須藤敦史, 星谷勝: EK-WLI-FEMを用いた動的パラメータ同定, *土木学会論文集*, No.477, pp.97-100, 1993.
- 6) 瀧本幸, 星谷勝: カルマンフィルタを用いた非線形構造物の同定, *土木学会論文集*, No.556, pp.179-187, 1997.
- 7) Toki, K., Sato, T. and Kiyono, J.: Identification of structural parameters and input ground motion from response time histories, *Proc. of JSCE*, No.410, pp.243-251, 1989.
- 8) 須藤敦史, 星谷勝, 柳河勇: 絶対応答波形を用いた地震入力とシステムパラメータ同定, *構造工学論文集*, Vol.41A, pp.709-716, 1995.
- 9) 星谷勝, 丸山収: 非線形構造系の地震時挙動特性の同定, *土木学会論文集*, No.386, pp.397-405, 1987.

- 10) 護雅史, 林康裕: 構造物の動的パラメータ同定への GA の適用, 第 4 回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.179-184, 1995.
- 11) 野田茂, 久保田秀樹: 非線形履歴劣化多自由度系の振動特性の同定, 第 3 回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.195-209, 1993.
- 12) 酒井久和, 澤田純男, 土岐憲三: 収束計算を行わない動的非線形 FEM のための時間積分法, 土木学会論文集, No.507, pp.137-147, 1995.
- 13) Sakai, H., Sawada, S. and Toki, K.: Non-iterative Computation Scheme for Analysis of Nonlinear Dynamic System by Finite Element Method, *Proc. of 11th WCEE*, No.956, 1996.
- 14) 坂和正敏, 田中雅博: 遺伝的アルゴリズム, 朝倉書店, 1995.
- 15) 日本建築学会構造委員会, 応用力学運営委員会, 時系列現象モデル小委員会: 時系列系の基礎と応用シンポジウム資料集, 1999.2.
- 16) 佐藤忠信, 一井康二: 遺伝的アルゴリズムを用いたライフライン網の最適復旧戦略に関する研究, 土木学会論文集, No.537, pp.245-256, 1996.
- 17) 杉本博之, 片桐章憲, 田村亨, 鹿汀麗: GA によるライフライン系被災ネットワークの復旧プロセス支援に関する研究, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.517-524, 1997.
- 18) 能島暢呂: GA を用いたブロック分割による大規模システムの安全設計, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp.3217-3222, 1998.
- 19) Eshelman, L.J.: The CHC adaptive search algorithm: How to have safe search when engaging in nontraditional genetic recombination, *Foundations of Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann Publishers, pp.265-283, 1991.
- 20) Newmark, N.M.: A method of computation for structural dynamics, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE85, No.EM3, pp.67-94, 1959.
- 21) Hardin, B.O. and Dmевич, V.P.: Shear modulus and damping in soils, Measurement and parameter effects, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.98, No.SM6, pp.603-624, 1972.
- 22) Jennings, P.C.: Periodic response of a general yielding structure, *Proc. of ASCE*, EM2, pp.131-163, 1964.
- 23) 吉田望, 辻野修一, 石原研而: 地盤の 1 次元非線形解析に用いる土のせん断応力-せん断ひずみ関係のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1639-1640, 1990.
- 24) Ishihara, K., Yoshida, N. and Tsujino, S.: Modeling of stress-strain relations of soils in cyclic loading, *Proc. of 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, pp.373-380, 1985.
- 25) 西村昭彦, 室野剛隆: GHE モデルと簡易な履歴則を用いた土の非線形モデルの提案と実験的検証, 地震工学研究発表会講演論文集, Vol.25, pp.309-312, 1999.
- 26) 熊崎幾太郎, 杉山武, 上田稔, 長谷川英明: 瞬間変形係数のひずみ依存性を考慮した履歴モデル, 土木学会第 53 回年次学術講演会概要, Vol.3, pp.176-177, 1998.
- 27) 福島研一, 岡本晋, 坂下克之, 立石章, 志田智之: 大きなひずみレベルでの動的相互作用問題に適用可能な地盤非線形モデルの提案, 地震工学研究発表会講演論文集, Vol.25, pp.449-452, 1999.
- 28) 足立紀尚, 龍岡文夫: 土の力学 (III) - 圧密・せん断・動的解析 -, 新体系土木工学, Vol.18, 1981.
- 29) 沿岸開発技術センター: 埋立地の液状化対策ハンドブック (改訂版), 1997.
- 30) 土木学会: 地震動・動的物性, 動的解析と耐震設計, Vol.1, 技報堂出版, 1989.
- 31) 上田稔, 熊崎幾太郎, 鈴木隆, 永坂英明: 兵庫県南部地震のポートアイランドにおける地盤地震応答の全応力非線形解析によるシミュレーション, 地震工学研究発表会講演論文集, Vol.25, pp.325-328, 1999.
- 32) 岩崎敏男, 常田賢一, 吉田精一: 沖積粘性土の動的変形・強度特性について, 第 15 回土質研究発表会, pp.625-628, 1980.
- 33) 横田耕一郎, 龍岡文夫: 不攪乱洪積粘土のせん断変形係数について, 土木学会第 32 回年次学術講演梗概集, Vol.3, pp.257-258, 1982.
- 34) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 高木義和: 地盤の動的変形特性に関する実験的研究 (II), 土木研究所報告, Vol.153-2, 1980.
- 35) 新井洋, 時松孝次: システム同定, 時系列系の基礎と応用シンポジウム資料集, pp.79-87, 1999.
- 36) 神戸市開発局: 兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査 (ポートアイランド, 六甲アイランド) 報告書, 1995.
- 37) 関口宏二, 杉戸真太, 岡二三生, 八嶋厚, 田口洋輔, 加藤要一: 兵庫県南部地震における鉛直アレー強震記録に基づく地震動非線形増幅特性と地盤震動解析法の検討, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.109-116, 1996.
- 38) 風間基樹, 柳沢栄司, 稲富隆昌, 菅野高弘, 稲垣紘史: アレー観測記録から推定した神戸ポートアイランドの地盤の応力-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.547, pp.171-182, 1996.

(2000.8.10 受付)

PARAMETER ESTIMATION FOR NONLINEAR DYNAMIC GROUND PROPERTIES USING GENETIC ALGORITHM FOR BACKWARD CALCULATION OF INCIDENT SEISMIC WAVE

Hisakazu SAKAI

Although nonlinear dynamic ground properties are necessary for a backward calculation to identify an incident wave in time domain, it is difficult to select the suitable parameters for a set of vertical array records. GA (Genetic Algorithm) and the non-iterative time integration method are applied to the parameter selection. Numerical examples are conducted to examine the accuracy of the identified incident wave, and dynamic ground parameters at Port Island vertical array point are computed to verify the applicability for a large-degree-of-freedom. These results show the availability of the parameter estimation method for the backward calculation of incident wave.