

基盤入射地震動推定に用いる非線形地盤パラメータの大域的探索法による同定

Global optimization of nonlinear ground parameters for the backward estimation of incident seismic wave

酒井久和

Hisakazu SAKAI

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)

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. Two global optimization method, CHC (a nontraditional genetic algorithm) and SCE-UA (shuffled complex evolution) method, 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 these results show the availability of the parameter estimation method for the backward calculation of incident wave.

Key Words : global optimization, nonlinear 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。(以後、入射地震動および入射波は E または 2E 成分であることを意味し、観測波 (E+F) とは区別する。) 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、カルマンフィルター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或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を、最適パラメータの探索問題と捉えて、局所解を有する問題においても有効とされる大域的探索法に基づいて同定する。大域的探索法として、GA、GA と局所的探索法の組み合わせ法¹²⁾、SCE-UA 法 (shuffled complex evolution method)、マルチスタート法¹³⁾等が挙げられるが、Duan ら^{14),15)}や田中丸¹⁶⁾は河川流出分野で多くのパラメータの同定問題において、SCE-UA 法の有効性を示している。本研究では、大域的探索法のうち、GA の 1 手法で効率性を重視した CHC、および、Duan らによって有効性が示されている SCE-UA 法の 2 手法を適用する。ただし、これらの探索法では、数十から数万回もの個体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¹⁷⁾を用いて計算時間の軽減を図る。

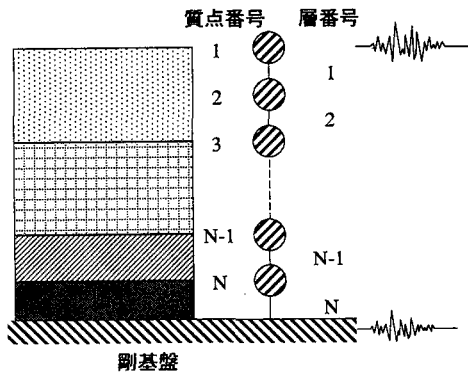


図-1 解析概念図および解析モデル

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。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

2.1 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、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、 $\ddot{y}_i(m)$ 、 $\ddot{x}_i(m)$ はそれぞれ、 m 番目の観測記録の加速度値、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。

2.2 大域的探索法の適用

本研究では、上記の地盤特性パラメータの同定問題に

大域的探索法として、CHC および SCE-UA 法を適用する。以下にそれぞれの概略を示す。

(1) CHC^{18), 19)}

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)、異種間交叉 (heterogeneous recombination)、大変動突然変異 (cataclysmic mutation) の略語である。CHC は基本的な単純遺伝的アルゴリズム (SGA:simple genetic algorithm) 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18), 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、個体群の収束にしたがって緩和する。

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の操作で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。ただし、個体中の遺伝子を初期化する割合は拡散率 r に従って、その値はランダムに決定される。また、拡散率は0.35程度の値が用いられる。

(2) SCE-UA 法^{14)~16), 20)}

SCE-UA 法は、Duan ら¹⁴⁾によって提案された方法で、シンプレックス法にランダム探索、GA に類似した競争進化、新たに開発された集団混合の概念を組み合わせた大域的探索法である。計算プロセスの概略を以下に示す。詳細は文献14)を参照されたい。

- ①現実的な解空間の中から、ランダムに解候補を多数選択する。
 - ②各々、 m 個の解候補からなる p 組の集団を形成する。
 - ③各々の集団について、 q 個のサンプルを抽出し、シンプレックス法による局所探索法で解の改良を α 回行う。
 - ④③の操作を β 回行った後、集団を混合して、各々の集団が有している情報を反映した新しい集団を形成する。
 - ⑤既定条件を満足するまで②~④の操作を繰り返す。
- ここに、Duan ら²⁰⁾は、数値実験の結果に基づいて、 $m=2n+1$ 、 $q=n+1$ 、 $\alpha=1$ 、 $\beta=2n+1$ を推奨している。ただし、 n は未知パラメータの数である。

2.3 非反復時間積分法¹⁷⁾の適用

2.1 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^{21} 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、CHC や SCE-UA 法では数十から数万もの評価を個体に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で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17)を参照されたい。

3. 数値解析例

3.1 解析条件

(1) 地盤の復元力特性

土の復元力モデルは、Hardin-Drnevich モデル²²⁾や Ramberg-Osgood モデル²³⁾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^{24),25)}、西村・室野²⁶⁾、熊崎ら²⁷⁾、福嶋ら²⁸⁾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。

$$\tau_i = \frac{G_{0i} \gamma_i}{1 + |\gamma_i / \gamma_{ri}|^{\delta_i}} \quad (2)$$

ここに、 τ_i 、 G_{0i} 、 γ_i 、 γ_{ri} 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_{0i} 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。

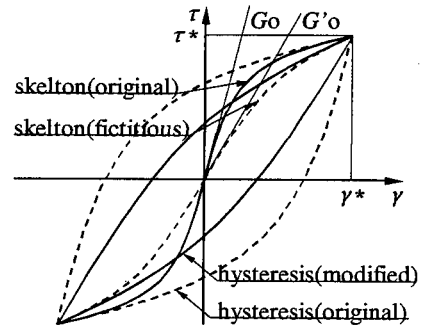


図-2 履歴曲線の概念図

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

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、 $h-\gamma$ 曲線に適合するように仮定の初期せん断剛性が変化する双曲線モデル (石原ら²⁹⁾、図-2参照) を採用する。また、ここで、 $h-\gamma$ 曲線の離散データ自体を特定しようとする、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。

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

地盤パラメータの推定手法を実地盤に適用するにあたり、微小ひずみ時のせん断波速度は既知であることが多く、また、微小ひずみ時のせん断波速度が一樣な地盤内においても、深度方向に復元力特性が変化する場合は少なくない。一樣なせん断波速度とモデル化された地層において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} を変化させる方法、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、本研究では①の方法を採用する。

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

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

ここに、 c_i 、 ϕ_i 、 σ_{mi} 、 $\tau_{\max i}$ 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。

(2) 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 自由度集中質点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、地盤特性値のうち、せん断波速度 V_s 、単位体積質量 ρ_s を既知、粘着力 c_i 、内部摩擦角 ϕ_i 、最大減衰定数 $h_{\max i}$ 、および、フィッティング係数 δ_{Ai} 、 δ_{Bi} 、Rayleigh 減衰定数 α 、 β 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、

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_i	20.0
最大減衰定数 : h_{maxi}	0.30
係数 ($G-\gamma$, 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

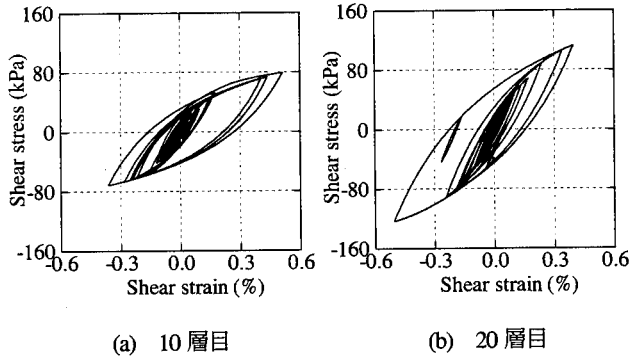


図-3 応力-ひずみ関係

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-3に示す。

(3) 観測記録

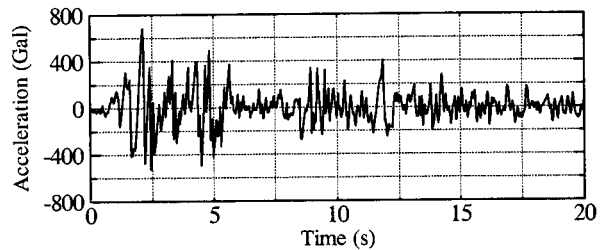
後述の3.3では、入射波逆算法における本手法の適用性を検証する目的で、本節の同定パラメータを用いた入射波逆算を行い、その逆算精度を調べる。そのため、入射波成分が既知な観測波を採用する必要がある。パラメータ同定に用いる基盤観測波はつぎの手順で作成する。

- ①上記の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。

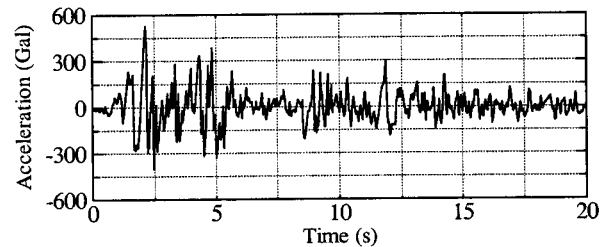
ただし、基盤面以深の地盤は、質量密度 $\rho=2.0\text{t/m}^3$ 、せん断波速度 $V_s=350\text{m/s}$ の線形弾性体とする。地表面の観測記録は、継続時間20秒、計算時間間隔2/1,000秒の時刻歴応答結果を1/100秒間隔で抽出したデータである。図-4に②の入射波(2E)および③の地表面、基盤面の応答加速度波形を示す。

(4) 解析ケースおよびその他の条件

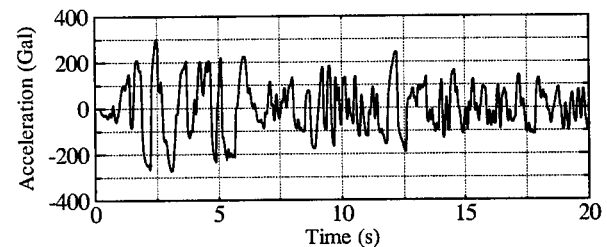
本解析例では、地盤特性値を同一とする地層の分割方法により、表-2に示すように3つの解析ケースを想定す



(a) 入射波 (Target.I)



(b) 基盤面



(c) 地表面 (Target.S)

図-4 観測波形

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(°) : ϕ_i	0.0 ~ 50.0
最大減衰定数 : h_{maxi}	0.100 ~ 0.400
係数 ($G-\gamma$, fitting) : δ_{Ai}	-0.300 ~ 0.300
: δ_{Bi}	0.500 ~ 1.500
Rayleigh 減衰定数 : α_i	0.0000 ~ 1.0000
: β_i	0.00000 ~ 0.0050

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。

本研究の同定では、全層の未知パラメータを直列に並べ、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_{maxi} 、 c_i 、 ϕ_i に関しては、一般的

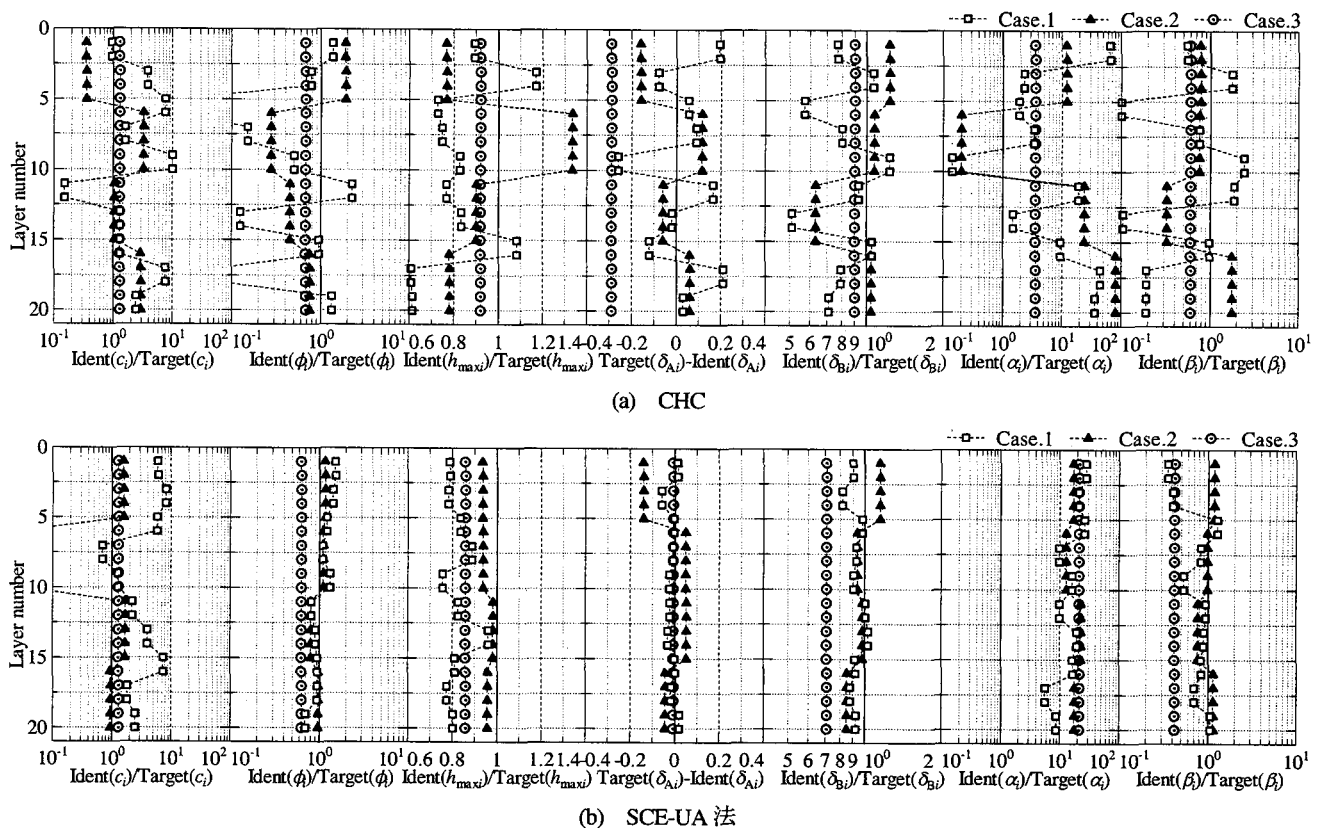


図-5 地盤特性のTarget と同定値の関係

な土の特性値^{29)~31)}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、 $10^{-4} \leq \gamma_t \leq 5.0 \times 10^{-3}$ の範囲^{30),31)}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、 δ_{Ai} 、 δ_{Bi} 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^{32)~35)}から算出し、各々の値の範囲を設定した。また、Rayleigh 減衰 α 、 β 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。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秒とし、継続時間を20秒とする。その他の同定時のパラメータとして、CHCでは、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を採用する。SCE-UA法では、Duanら²⁰⁾が推奨する各集団の個体数 $m=2n+1$ 、サンプル数 $q=n+1$ 、反復回数 $\alpha=1$ 、 $\beta=2n+1$ (2.2(2)参照)とし、集団数 p は既往の研究¹⁶⁾で良好な結果を得ている20とする。ただし、 n は未知パラメータの数を意味する。

3.2 解析結果

CHCおよびSCE-UA法に基づいて最適パラメータの同定を行った場合の、式(1)の評価関数値が5%以下の個体が生成されたときの個体の評価回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-5に示す。ただ

表-4 最良評価値が5%以下になる評価回数および評価値

		Case.1	Case.2	Case.3
CHC	評価回数	1800	300	150
	評価値	4.7%	4.7%	4.4%
SCE-UA 法	評価回数	31020	6840	600
	評価値	4.1%	4.2%	4.3%

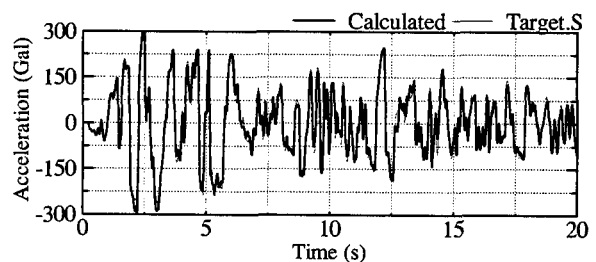


図-6 地表面の観測記録(Target.S)と時刻歴応答加速度(Calculated)の比較(CHC, Case.1)

し、図中の層番号は図-1に示すように上方から順に番号付けしている。また、CHCの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-6に、評価値と評価回数の履歴を図-7に示す。

まず、地盤特性値の同定精度については、図-5より、CHCでは、全層を同一特性値と仮定したCase.3の場合に、 c_i 、 h_{max} 、 δ_{Bi} 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。しかし、全体的には、パラメ

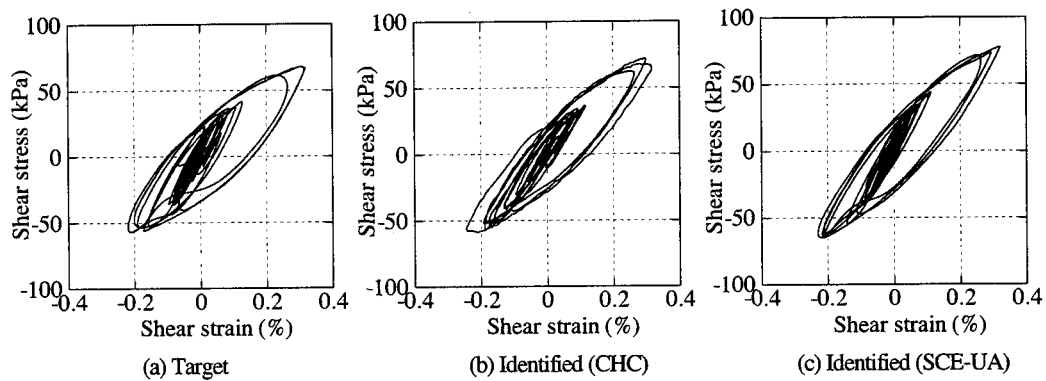


図-8 応力-ひずみ関係 (全層平均)

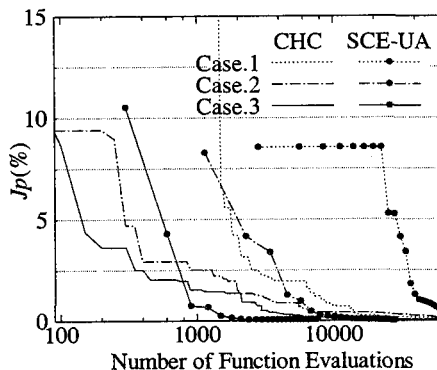


図-7 評価値と評価回数

一タの値が Target とオーダーの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。一方、SCE-UA 法の場合には、CHC に比べて特に Case.1 や Case.2 で各層ごとの同定値のばらつきが小さく、全体的に同定精度が良好であるものの、この方法でも一部のパラメータの同定精度が悪く、個々の同定値が実用レベルにあるとは言えない。しかしその一方で、観測点における加速度記録と応答加速度については、再現精度が最も悪い CHC の Case.1 の場合でも、図-6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ている。上記のように、同定値が Target と大きく異なっているにもかかわらず、観測波の再現精度が良好である原因として、未知パラメータの最適値以外の組み合わせに対して評価値が最小化、つまり、観測波の再現性が最も良い状態になったためと考えられる。同定パラメータの解の精度については、本解析では、未知パラメータの数が多く、さらに、 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から、解の唯一性が保証されていないことになる。

つぎに、評価値に対するパラメータの探索効率については、図-7より、規定の評価値を 5%とした場合には、いずれのケースも CHC の方が SCE-UA 法より少ない評価回数で結果が得られている。しかし、評価値 2~3%以下では、CHC は評価値の改善スピードが著しく鈍化するのに対して、SCE-UA 法は鈍化の程度が小さく、規定評

価値を小さくすればするほど、SCE-UA 法の優位性が増すことが分かる。これは、田中丸らの研究¹⁶⁾ (未知パラメータ数 $n=16$) でも同様の傾向が示されている。ただし、 n が 7 (Case.3)、28 (Case.2)、70 (Case.1) と大きくなるにしたがい、CHC と SCE-UA 法の評価値がクロスする際的评价回数が多くなり、かつ、その時の評価値が小さくなる傾向が見られる。ここで、本同定の目的が基盤入射地震動の高精度の推定にあり、3.3 で後述するが、図-9のように入射波の逆算精度が 1.6%でも実用上十分に高精度であること、同一パラメータによる入射波の逆算精度は観測波の再現精度より格段に精度が良いこと、観測波の再現精度として 1%を下回る評価値は実用上必要でないこと、を考慮すると未知パラメータの数が少ない場合や CHC で解の改良が停留する場合を除き、SCE-UA より CHC の方が有効であると考えられる。

ここではさらに、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図-5の CHC、SCE-UA 法の同定値に基づいた全層の平均的な応力-ひずみ関係を図-8(a)~(c)にそれぞれ示す。ただし、全層の平均的な応力、ひずみは、各層上下端に作用するせん断応力の総和、および、基盤と地表面の相対変位を全層厚で除して求めた。

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、CHC、SCE-UA 法のいずれの場合も、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。

3.3 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。

表-5 入射波の逆算精度

解析ケース	Case.1	Case.2	Case.3
CHC	1.1%	0.6%	0.3%
SCE-UA 法	0.7%	0.5%	0.4%

表-6 観測波の再現精度および入射波の逆算精度 (CHC)

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%

表-7 観測波の再現精度および入射波の逆算精度 (SCE-UA 法)

解析ケース	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
再現精度	3.3%	4.9%	3.9%	3.6%	3.1%
逆算精度	0.6%	0.4%	1.0%	0.5%	1.0%
解析ケース	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10
再現精度	3.4%	3.1%	4.8%	3.8%	3.3%
逆算精度	0.4%	0.3%	0.7%	1.0%	1.6%

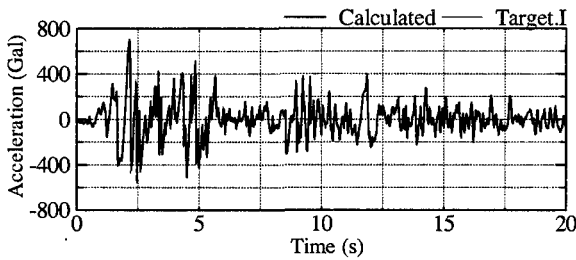


図-9 基盤入射地震動の逆算波形 (SCE-UA, Case. 2.10)

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

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。ただし、各々の加速度は粘性境界下端での入射波(2E)である。

前節 Case.1~3 で算定した CHC および SCE-UA 法による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-5に表す。

表-5より、入射波の逆算精度は、CHC、SCE-UA 法の方法に関わらず、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。

ここではさらに、Case.2 と同じ、10m 毎に地盤特性が異なる条件において、CHC と SCE-UA 法で初期個体群

の異なる各々10 ケースの同定を行い、観測波の再現精度 5%以下になる計 20 組のパラメータを求める。表-6、7 に各ケースの観測波の再現精度およびそのパラメータを用いた入射波逆算による逆算精度を表す。参考のため、本計算例で最も入射波の逆算精度が悪い SCE-UA、Case.2.10 のケースにおいて、逆算した入射波を Target とともに図-9に示す。

表-6、7 より、全てのケースで地盤特性探索時の観測波の再現精度を入射波の逆算精度が上回っていることが分かる。ちなみに、Case.1 で再現精度 20.0% の CHC の地盤特性を用いた入射波の逆算精度が 3.5%、再現精度 8.5% の SCE-UA 法の地盤特性を用いた入射波の逆算精度が 2.3%と、再現精度に比べて逆算精度が格段に向上している。また、図-9に示すように、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ことから、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かめられた。

4. 結論

地盤の弾塑性を考慮して時間領域で精度良く基盤入射地震動を推定するためには、非線形な地盤特性値を設定する必要がある。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 の 1 手法で効率性を重視した CHC、および、河川流出分野で多数のパラメータの探索に対して有効性が示されている SCE-UA 法の 2 種類の大域的探索法を適用した。また、探索時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、20 集中質点系の解析モデルに対して数値解析を実施し、以下のような成果を得た。

- ① 本最適パラメータ同定手法では、個々のパラメータ自体の同定精度はオーダーが異なるものまで存在し、実用レベルに達していない。しかし、個々のパラメータの同定精度が悪いにも関わらず、全層の平均的な応力-ひずみ関係は、精度良く再現できていることが確かめられた。
- ② 本解析例においては、未知パラメータ数が少ない場合に、SCE-UA 法は CHC より少ない評価回数で観測波の再現精度が高いパラメータを同定できるが、未知パラメータが多くなるにしたがって、CHC の方が効率性で優位になる傾向が見られた。
- ③ CHC、SCE-UA 法ともに、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明らかになった。また、この際、基盤入射波の推定精度は、同定時における観測記録の再現精度より大幅に精度が良くなる傾

向が見られた。

- ④ ①, ③より, 本同定手法が, 基盤入射地震動推定のための地盤特性値の探索手法として有効であることが確認された。

謝辞: 本研究を行うにあたり, 京都大学の清野純史助教授, 竹中工務店の恒川裕史氏, 防災科学技術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, 査読委員各位には, 大変貴重なご助言, ご指摘を頂きました。ここに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, Berkley, 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動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) Wang, Q.J. : The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Research*, Vol.28, No.4, pp.1015-1031, 1992.
- 13) Johnston, P.R. and Pilgrim, D. : Parameter optimization for watershed models, *Water Resources Research*, Vol.12, No.3, pp.477-486, 1976.
- 14) Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V.K. : Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Research*, Vol.28, No.4, pp.1015-1031, 1992.
- 15) Sorooshian, S., Duan, Q. and Gupta, V.K. : Calibration of rainfall-runoff models: application of global optimization to the Sacramento soil moisture accounting model, *Water Resources Research*, Vol.29, No.4, pp.1185-1194, 1993.
- 16) 田中丸治哉: タンクモデル定数の大域的探索, 農業土木学会論文集, No.178, pp.103-112, 1995.
- 17) 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.
- 18) 坂和正敏, 田中雅博: 遺伝的アルゴリズム, 朝倉書店, 1995.
- 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) Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V.K. : Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, *Journal of Hydrology*, No.158, pp.265-284, 1994.
- 21) Newmark, N.M. : A method of computation for structural dynamics, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE85, No.EM3, pp.67-94, 1959.
- 22) Hardin, B.O. and Drnevich, 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.
- 23) Jennings, P.C. : Periodic response of a general yielding structure, *Proc. of ASCE*, EM2, pp.131-163, 1964.
- 24) 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.
- 25) 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.
- 26) 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.
- 27) 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.
- 28) 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.
- 29) 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.
- 30) 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.
- 31) 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.
- 32) 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.
- 33) 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.
- 34) 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回年次学術講演概要集, Vol.3, pp.257-258, 1982.
- 35) 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.

(2001年4月20日受付)