

GA を用いた非線形多自由度系の震動特性の同定

酒井久和

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

非線形多自由度振動系の動的パラメータ同定する問題に遺伝的アルゴリズム (genetic algorithms : GA) を適用する。解析対象として、鉛直アレーで観測記録が得られている2つの深度に挟まれる地盤を想定し、非線形履歴劣化型モデルの震動特性を同定する。特性値の評価は、深い方の観測点の記録を入射波として時刻歴応答解析を行い、上方の観測点における計算値と観測記録の適合度に基づいて行う。震動特性を同定する問題に GA を適用する場合、各個体に対して非線形な時刻歴応答計算を行う必要があり、膨大な計算時間が要求される。本研究では、逐次積分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。数値解析例を通じて解析精度の検証を行い、本手法の有効性の確認する。

Key Words : genetic algorithms, identification, dynamic parameter, time integration, versatile model

1. はじめに

地盤一構造物系の地震応答解析を行う場合には、基盤における入力地震動が必要となるが、この入力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き、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、ひずみレベルが 10^2 のオーダー以上に及ぶ場合もあり、その適用性が疑問視されている。

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、基盤入力地震動を推定する方法²⁾(以後、提案法と呼ぶ)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力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、提案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る³⁾ことから、ポートアイランドのアレー観測記録から基盤入射波を分離する問題に適用し、高精度の推定結果を得ている³⁾。ただし、この場合、設定した地盤の動的物性値は解析精度の検証のために与えたものであり、実際の地盤に対して妥当な値を採用しているとは言い難い。

上述のように提案法では、設定された地盤条件における基盤入力地震動を非常に高精度に推定できる。すなわち、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し、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。

近年、振動系の動的パラメータ同定に関して、カルマンフィルタや遺伝的アルゴリズム (GA : genetic algorithms) を用いて多くの手法が提案されている^{4)~7)}。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。また、GA では、数十から数千、数万の世代に渡って多くの個体に評価を下さなければならない。したがって、大自由度非線形系に対する震動特性を同定する問題に GA を適用すると、解析に膨大な計算時間を要して実用的でない。そこで本研究では、応答計算部分に非反復時間積分法⁸⁾を用いて計算時間を軽減し、非線形大自由度振動系の震動特性を同定する問題に GA を適用する。

2. 地盤震動特性の同定問題

(1) 同定問題の概要

本研究では、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を対象として、2つの観測点に挟まれる地盤の震動特性を同定する。ここで、地盤特性として、各層の単位体積重量、初期のせん断波速度を既知、それ以外の復元力に関する特性値等を未知とする。

まず、地盤を地層構造および解析対象周波数を考慮して離散化し、図に示すような1次元の集中質点系にモデル化する。つぎに、各質点間の地盤特性の同定を行うが、このとき、解の妥当性を評価する必要がある。本研究では、鉛直アレー記録のうち、下方の記録を入射波とした地震応答解析を行い、上方の応答加速度の算定値と観測

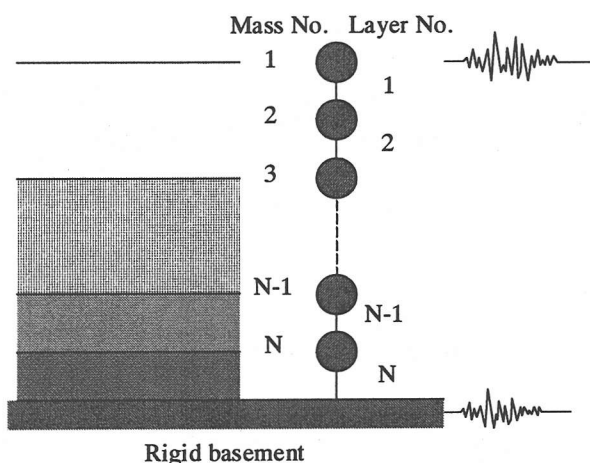


図-1 解析概念図および解析モデル

記録との波形の整合度により解の妥当性の評価を行う。ここで、評価関数 J を次のように定義する。

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

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)の評価関数は、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 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。

(2) GA の適用

本研究では、上記の震動特性を同定する問題を最適化問題と捉え、GA を適用する。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的アルゴリズムで、解候補の集団の中から解候補のグループ（個体と呼ばれる）を多数抽出し、評価の良いものだけを遺伝的に後世に残して、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、地震工学の分野では、ライフラインの最適復旧戦略^{9)~11)}や構造物の動的パラメータ同定⁹⁾などへの適用事例が報告されている。

GA については、多種多様な方法が開発されているが、本研究では、効率性を重視した CHC を採用する。

CHC^{(12), (13)} 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。これら 3 つの操作について、以下に簡単に説明する。

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。

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。

(3) 非反復時間積分法⁸⁾の適用

前述のように、本同定問題では各個体の評価時に、時刻歴応答解析を行う。非線形多自由度系の時刻歴応答解析を行う場合、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 ⁽⁴⁾法等の陰解法では、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反面、解の安定性は陽解法に比べて良好である。

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、計算時間は差程大きいものではない。しかし、GA では何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、大自由度系の場合には全体として時刻歴応答解析に要する計算時間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た方法で、収束計算を行わずに低周波成分の解の精度を保証し、解の安定性を向上させる方法である。詳細は参考文献8)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

振動系の復元力特性として、Baber と Wen が提案した万能型劣化復元力モデル¹⁵⁾を採用する。この場合、 i 層

目（質点間）の復元力特性は次式で示される。

$$\tau_i = G_{0i} \phi_i, \quad \phi_i = \alpha_i \gamma_i + (1 - \alpha_i) z_i,$$

$$z_i = (A_i \dot{\gamma}_i - v_i (\beta_i |\dot{\gamma}_i| z_i|^{n_i-1} z_i + \lambda_i \dot{\gamma}_i |z_i|^{n_i})) / \eta_i \quad (2)$$

ここに、 τ_i , G_{0i} , ϕ_i は、質点間のせん断応力、初期せん断剛性、非線形復元力特性で、 α_i , γ_i , z_i はそれぞれ、降伏比、せん断ひずみ、せん断履歴ひずみを示す。ただし、 β_i , λ_i , A_i , η_i , v_i , n_i は非線形劣化履歴パラメータで、 A_i , η_i , v_i は次式による。

$$A_i = A_{i0} - \delta_A \varepsilon_i, \quad \eta_i = \eta_{i0} + \delta_\eta \varepsilon_i, \quad v_i = v_{i0} + \delta_v \varepsilon_i \quad (3)$$

ここに、 A_{i0} , η_{i0} , v_{i0} は初期値で、本研究では $A_{i0} = \eta_{i0} = v_{i0} = 1$ とし、 ε_i は履歴エネルギーで次の微分方程式を満たす。

$$\dot{\varepsilon}_i = (1 - \alpha_i) G_{0i} z_i \dot{\gamma}_i \quad (4)$$

b) 解析モデル

本数値解析例では、基盤までの深度が 20m と 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、それぞれ、地層を 2m ピッチで分割して、10 および 20 集中質点系にモデル化する。

本同定問題においては、地盤パラメータのうち、せん断波速度 V_{Si} , 単位体積質量 ρ_i を既知、Rayleigh 減衰定数 α_i , β_i , および、7 つの非線形劣化履歴パラメータ (α_i , β_i , λ_i , δ_{Ai} , δ_η , δ_v , n_i) を未知とする。

c) 観測記録

基盤の観測記録は、El Centro(1950)NS 波の振幅を 2 倍に調整した波形を採用し、地表面では、時刻歴応答解析により求めた波形が観測されていると仮定した。ただしこのとき、震動特性は全層同一で、表-1 に示す値を採用した。また、観測記録は、継続時間 20 秒、計算時間間隔 2/1,000 秒での応答結果を 1/100 秒間隔で抽出している。それぞれの加速度波形を図-3 に示す。

d) その他

本研究の GA では、全層の未知パラメータを直列に並べて個体とするが、そのパラメータの値は、各々約 230 個の離散化されたサンプルデータの中から抽出する。表-1 にサンプルデータの範囲を示す。ここで、データの有効数字の桁数は、最小値のオーダーを表す。参考のため、それぞれのケースに上記の地震動を入射した場合の最下層における応力-ひずみ関係を図-2 に示す。

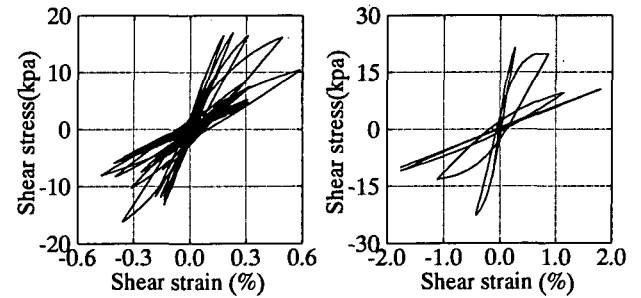
GA における個体群の総数 N は、既往の研究を参考に 10 質点系および 20 質点系とも 50 とし、初期個体群はサンプルデータの中からランダムに抽出して作成する。また、大変動突然変異における拡散率を 0.35、時刻歴応答解析における計算時間間隔を 2/1,000 秒と設定する。

(2) 解析結果および考察

前節の条件で、地盤の震動特性値を同定した結果、10 質点系では世代数約 8,800、20 質点系では世代数約 13,500 で評価関数値 10% を下回った。このうち、10 質

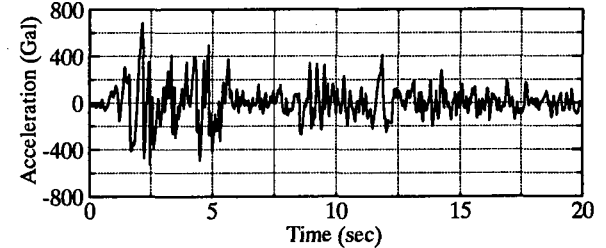
表-1 地表面加速度記録作成時の震動特性の設定値およびサンプルデータの範囲

	設定値	データ範囲
Rayleigh 減衰定数 : α_i	1.0	0.00 ~ 66.00
: β_i	0.001	0.0000 ~ 6.600
劣化履歴パラメータ : α_i	0.05	0.0000 ~ 1.0000
: β_i	95.0	0.0 ~ 1000.0
: λ_i	5.0	0.0 ~ 1000.0
: δ_{Ai}	5.0	0.0 ~ 1000.0
: δ_η	20.0	0.0 ~ 1000.0
: δ_v	20.0	0.0 ~ 1000.0
: n_i	1	1 ~ 55

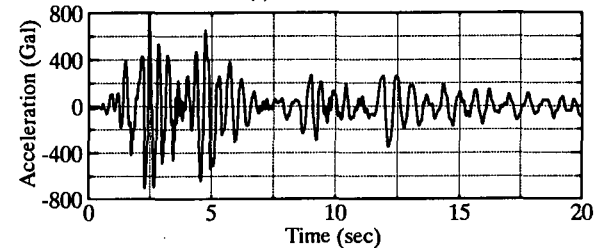


(a) 10 質点系 (b) 20 質点系

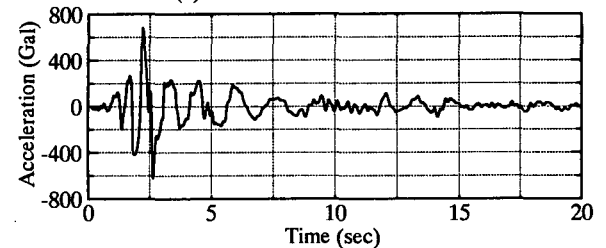
図-2 最下層の応力-ひずみ関係



(a) 基盤面



(b) 地表面 (10 質点系)



(c) 地表面 (20 質点系)

図-3 観測波形

点系について、世代数 8,800 の震動特性の推定精度を図-4 に、同定した震動特性値に基づいた最上質点の応答

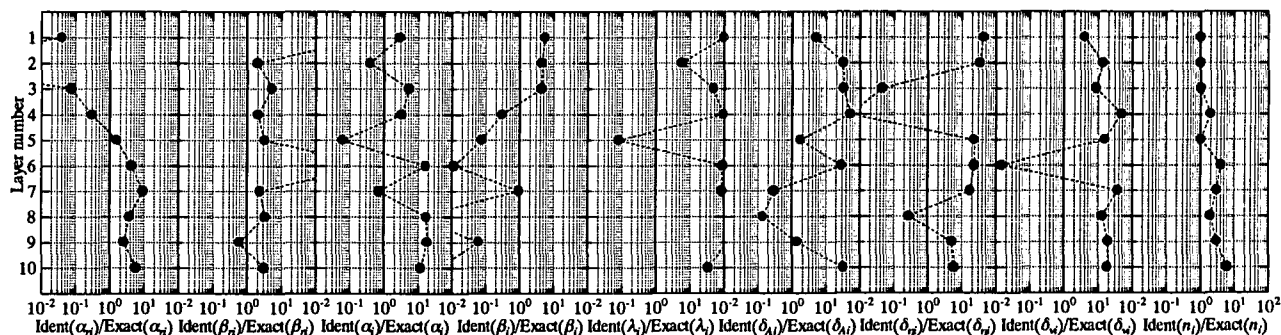


図-4 震動特性の推定精度

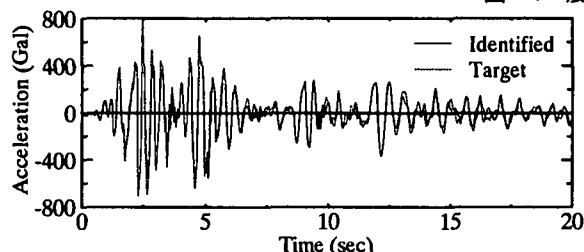


図-5 同定した震動特性に基づく観測点での応答加速度

加速度を図-5に示す。参考のため、図中に target となる観測波を波線で示す。ちなみに、この場合の評価関数は 9.9%である。

図-4より、パラメータの同定値は、地表面観測波を作成したときの設定値と比較して、ほぼ全てのパラメータにおいて大きく異なっており、震動特性値の同定精度は良くない。この解析例の場合、地表面における応答加速度が観測波と完全に一致するには、表-1の設定値が唯一の解であるかもしれないが、未知数の数が大きいことから、2つの波形を近似する解は多数存在することが想定される。したがって、実地盤における問題に適用した場合に、既知としている土の単位体積質量やせん断波速度の精度、モデル化による誤差、ノイズの混入等を考慮すると、2つの観測波にとって妥当な地盤の震動特性値の組み合わせは、幾種類も存在するものと考えられる。

つぎに、同定された震動特性に基づいて算定した地表面応答加速度は、図-5に示すように主要動の振幅が若干小さくなっているものの、位相については非常に高精度に再現されていることが分かる。したがって、観測波を再現するという観点からは、適切な震動特性が同定されたと考えられる。

4. まとめ

本研究では、遺伝的アルゴリズムおよび非反復時間積分法を地盤の震動特性を同定する問題に適用し、数値解析例を通じてその有用性について検討を行った。その結果、観測波形を十分な精度で再現する地盤特性を同定できることから、本手法の有用性が確認された。

今後、実問題への適用性を検証するとともに、より効率的な遺伝的アルゴリズム手法を採択する必要がある

と考える。

参考文献

- 1) Schnabel, P.B., J. Lysmer and H.B. Seed : SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, *EERC Report*, Vol.72, No.12, University of California, Berkley, 1972.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.1997.
- 11) 能島暢品 : 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.
- 12) L.J. Eshelman : 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.
- 13) 坂和正敏, 田中雅博 : 遺伝的アルゴリズム, 朝倉書店, 1995.
- 14) Newmark, N. M. : A method of computation for structural dynamics, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE85, No.EM3, pp.67-94, 1959.
- 15) Baber, T.T. and Wen, Y.K. : Random vibration of hysteretic degrading systems, ASCE, *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol.107, No.EM6, 1981.