

(31) 構造物の動的パラメータ同定へのGAの適用

～構造物の地震時挙動と入力動の推定にむけて～

IDENTIFICATION FOR DYNAMIC CHARACTERISTICS OF STRUCTURES BY USED OF GA

護 雅史* 林 康裕**

Masafumi MORI Yasuhiro HAYASHI

It is necessary for the future aseismic design of buildings to simulate the seismic response of buildings damaged by big earthquakes and to evaluate the input motions into those buildings. In this paper, the identification for dynamic characteristics of existing buildings in the frequency domain by use of Genetic Algorithm (GA) is done to evaluate the input motions and the seismic response of buildings. The identification problem is supposed to be one of the optimization problems. With identified values by GA, some system functions for the evaluation of input motions and the seismic response of buildings are calculated. It is indicated that this identification method is efficient for the evaluation of input motions and the seismic response of buildings.

Keywords : identification of structures, GA, input motion, seismic response of buildings

1. はじめに

近年、釧路沖地震、三陸はるか沖地震、兵庫県南部地震など、大規模な地震が多発しており、その度に大きな被害が各地で生じている。特に1995年兵庫県南部地震においては、大都市での直下型地震ということもあり、数多くの建物が被災した。このような大きな地震で被災した建物の応答（特に、損傷の過程と損傷の程度）や入力地震動を評価することは、今後の耐震設計を考えていく上で重要である。

ある建物への入力地震動を評価する方法としては、他の地点での観測記録から、観測地点と建物立地地点の地盤モデルを仮定して、一次元波動論等により推定・評価する方法がある。そして、建物の応答についても、この推定入力地震動を用いた建物の地震応答解析によって推定することができる。しかし、本論では、当該建物内で地震観測が行われている場合を対象として、直接観測されていない建物の応答や入力地震動を推定することを考える。もちろん、自由地盤での観測記録が直接得られる場合もあるが、都市部では建物が密集し、むしろ自由地盤での観測記録が得られない場合の方が一般的である。また、建物内での地震観測についても、代表的な限られた場所で観測することが一般的であるし、現実的である。すなわち、全ての階の最大加速度や最大層間変形等を、直接得ることはできない。このような状況の下で、得られる限られた地震観測記録から、地震時の建物応答や入力動を推定する方法が必要となる。

そこで、本研究では、建物内で得られている地震観測記録から、建物への入力動と建物の応答の推定を行なう。推定の流れは図1.1に示すように、まず建物のある2点（ここでは最上階と1階（あるいは基礎部）と

* 清水建設 和泉研究室 (〒100 東京都千代田区幸町 2-2-2 富国生命ビル 27F)

** 工博 清水建設 和泉研究室 (〒100 東京都千代田区幸町 2-2-2 富国生命ビル 27F)

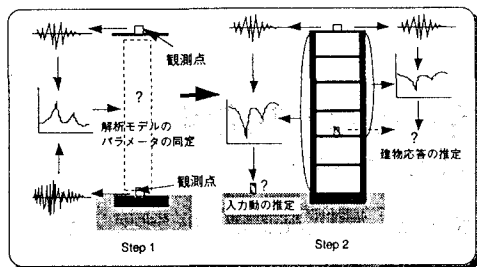


図 1.1 入力動と建物応答推定のフロー図

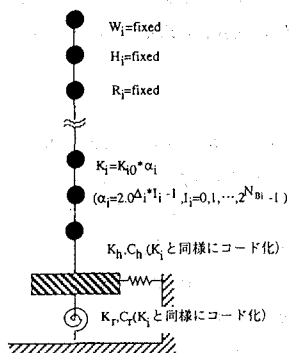


図 2.1 セン断型線形多質点系 SR モデル

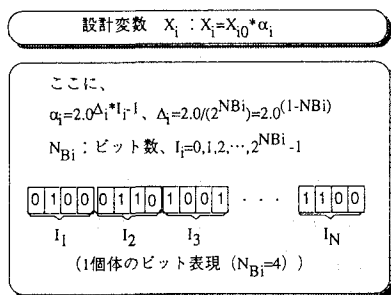


図 2.2 設計変数のコード化

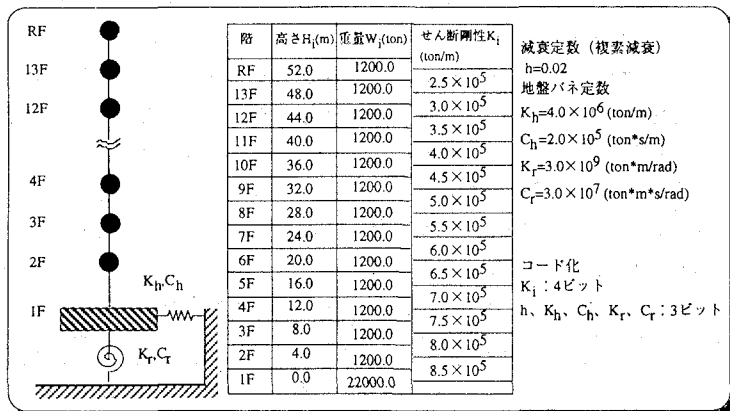


図 3.1 対象解析モデルの諸元

仮定する。) で得られている地震観測記録から求められる伝達関数をもとに、建物の解析モデルのパラメータの同定を行う (Step1)。次に、同定された解析モデルと観測記録から入力動や建物応答の推定を行なう (Step2)。建物の解析モデルのパラメータの同定については、同定問題を最適化問題と捉え、近年最適化手法の一つとしても注目を集めている遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm) を用いて行なっている。また、解析モデルは、建物と地盤の相互作用効果を考慮して、せん断型線形多質点系 SR (スウェー・ロッキング) モデルを用いる。

2. 入力動と建物応答の推定手法について

解析モデルとしては図 2.1 に示すように、せん断型線形多質点系 SR モデルを用いる。建物内で得られた地震観測記録から入力動を推定するためには、一般に建物と地盤間の相互作用効果を考慮する必要があるため、建物と地盤間に並進方向と回転方向の地盤バネとダッシュポットを設ける。また、上部構造は 1 本棒でモデル化し、質量は各階、1 質点に集中させた。さらに、各階の慣性力による基礎の回転を考慮するために、曲げ剛性は無限大とした。上部構造の減衰は複素減衰とし、一定の減衰定数を与えた。

また、各質点の重量 W_i 、回転慣性 R_i 、地上からの高さ H_i は既知量とし、設計変数には、各層のせん断バネ剛性 K_i と上部構造の減衰定数 h 、及び地盤の並進バネ剛性 K_h 、粘性減衰係数 C_h 、地盤の回転バネ剛性 K_r 、粘性減衰係数 C_r とする。ただし、GA に組み込む際には、図 2.2 に示すように、各設計変数 X_i をそれぞれの基準値 X_{i0} の係数 (α_i) 倍、 $X_i = X_{i0} \times \alpha_i$ として表現し、その係数 α_i を 2 進数にコード化している。コード化は、係数 α_i が区間 $[2^{-1}$

(=0.5), 2^1 (=2.0)) の値をとるものとして、指数部分を $2N^{Bi}$ (N^{Bi} : ビット数) 分割することにより行なう。

なお、以降では、最初に設定した建物の解析モデルを「対象解析モデル」、そのパラメータの値を「正解値」、また、同定によって得られる、入力動や建物応答の推定に用いる解析モデルを「推定用解析モデル」、そのパラメータを「推定値」と呼ぶ

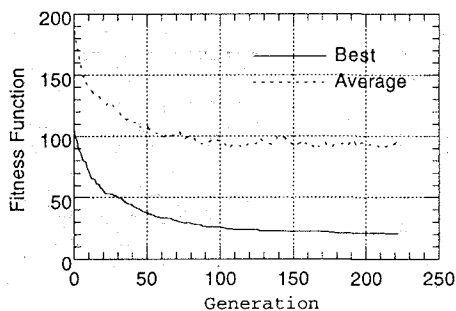


図 3.2 GA の探索状況

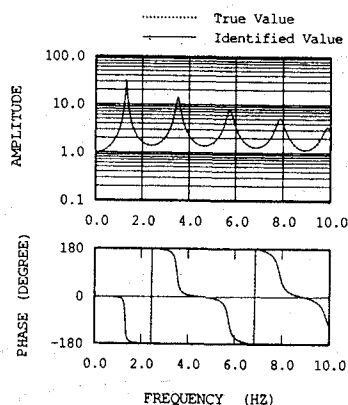


図 3.3 同定結果 (R 階 / 1 階)

ことにする。

次に評価関数の設定方法について述べる。本論においては、まずはじめに、建物内の地震観測記録を用いることを前提として、最上階-1階間の伝達関数をターゲットとした、推定用解析モデルのパラメータの同定を行なう。評価関数 J は (1) 式に示すように、正解値から得られる伝達関数 $H_0(\omega)$ に対する、推定値から得られる伝達関数 $H(\omega)$ の誤差を用いることにする。ただし、伝達関数の谷部等、値が小さくなる部分の誤差評価も同等に行うために、誤差の常用対数を用いている。

$$J = \sum_{i=1}^N \log_{10} (|H(\omega_i) - H_0(\omega_i)| + 1) \quad (\text{ここに、} N \text{ は振動数の分割数を示す。}) \quad (1)$$

また、対象振動数領域を 0~10Hz として同定を行う。

3 同定結果と入力動、建物応答の推定

3.1 同定結果

ここでは、同定結果について示す。対象解析モデルは、図 3.1 に示すように、高さが約 50m 相当の中層建物である。モデルの諸元を図中に示す。また、GA のコード化は、せん断バネ剛性 K_i が 4 ビット、減衰定数 h 、地盤バネ定数 K_b 、 C_b 、 K_f 、 C_f が 3 ビットとする。従って、各個体のビット数は 67 ビットとなる。同定に用いた GA の制御パラメータは、文献 [6]、[8] 等を参考にして、個体数 80、交叉率 0.40、突然変異率 0.01、世代数は約 220 世代で、エリート保存戦略を採用している。また、振動数の分割数は $N=500$ ($\Delta f=0.02\text{Hz}$) としている。

図 3.2、図 3.3 に推定用解析モデルの同定結果を示す。図 3.2 は GA による探索状況を示す。横軸は世代数、縦軸は評価関数値で、各世代の最小値 (実線) と平均値 (点線) の推移を、それぞれ 10 回の試行の平均値で示している。これより、ほぼ 150 世代あたりで収束していることがわかる。ただし、正解値までには至っていない。また、図 3.3 は推定用解析モデルより得られた伝達関数 (実線) を、対象解析モデルより得られる伝達関数 (点線) と一緒に示したもので、10 回の試行の中で最も評価関数値が小さくなった結果 (以降、「最良推定値」と呼ぶ。) について示している。これより、3 次のピークでそのピーク値にわずかに差があるものの、対象振動数領域では精度良くフィッティングできていることがわかる。

以上の結果より、推定用解析モデルにより精度よく建物の振動特性を再現できることが確認された。

3.2 入力動と建物応答の推定結果

本節では、推定用解析モデルを用いて、入力動、および建物応答の推定を行う。入力動や建物応答は、観

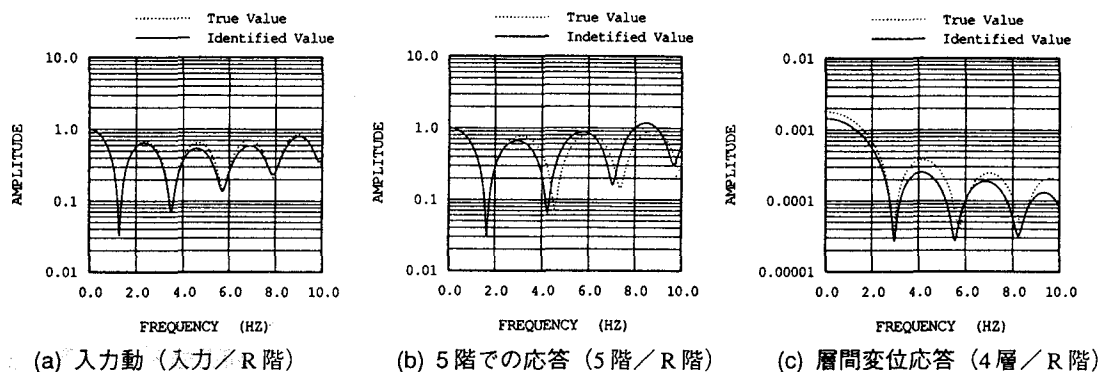


図 3.4 最良推定値を用いた場合の入力動、及び建物応答の推定結果

測記録と観測成分に対する伝達関数から求められることから、本論文では、3.1節で得られている推定用解析モデルを用いて伝達関数を求め、対象解析モデルから得られる伝達関数と比較することにする。

3.2.1 最良推定値を用いた場合の推定結果

最良推定値（全試行の中での最も評価関数が小さくなった時のパラメータの値）を用いた場合の推定用解析モデルの入力動と建物応答推定結果を図3.4に示す。図中の実線が最良推定値から求められる伝達関数の振幅であり、点線が正解値から求めたものである。図3.4 (a) は推定用解析モデルの入力動推定のための伝達関数（入力/R 階）を示している。これより、4Hz 以降の振動数領域で振幅値に2～3割の差があるものの、全般的な入力動の推定精度は高いと言える。また、図3.4 (b) は、推定用解析モデルの応答を推定するための伝達関数（5階/R 階）を示している。この結果を見ると、約1.6Hz 付近の谷部は精度良く推定されているが、それ以上の振動数では谷部の振幅値ばかりでなく、振動数にも差が生じている。また、図3.4 (c) は、4層の層間変位のR 階に対する伝達関数（4層/R 階）を示しているが、この結果も、図3.4 (b) と同じ様な傾向を示しており、さらに推定精度が低くなっている。以上の結果より、対象振動数領域での入力動の推定が可能であるが、建物の応答推定については、推定精度に大きな誤差が生じることがわかった。

建物の応答の推定において推定精度に差が生じた原因を探るために、ここでは推定値について検討する。図3.5は解析モデルについての正解値（●）と最良推定値（○）のせん断バネ剛性分布を示している。図中の実線、一点鎖線はそれぞれ正解値*0.7、正解値*1.3の値を示している。この結果から、せん断バネ剛性は正解値と、30%以上の誤差があり、図3.3の伝達関数の誤差と比べて大きいことわかる。また、図3.6は0Hz～10Hzに含まれる振動モードを示した結果であり、(a) 1次、2次モードと (b) 3次、4次モードを分けてそれぞれ正解値と比較して示してある。これを見ると、応答の推定結果と対応して、1次は正解値のモードと比較的良好に合っているが、2次～4次では1階とR階では正解値とほぼ一致しているものの、中間階では若干の差が生じている。この結果は、中間階の建物応答の推定が精度良くできなかったことと対応している。これらの結果から、上部構造におけるせん断バネ剛性分布の同定精度の悪さが、一次のピーク振動数以上の振動数領域での応答推定精度を悪くしている原因と考えられる。

そこで一つの解決策として、各試行で得られている推定値の平均値（以降では、「平均推定値」と呼ぶ。）を用いる方法を考えてみる。山中ら¹⁸⁾は、微動のアレイ観測結果からS波速度構造を同定する問題にGAの適用を試み、20回の試行により得られた解の平均値が、正解値とほぼ等しくなるとしている。以下では、平均推定値を用いた建物応答の推定について検討する。

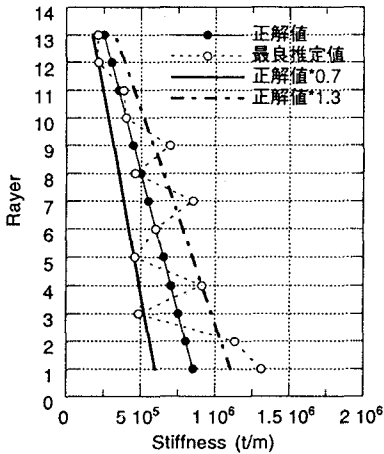


図 3.5 セン断剛性バネの最良推定値

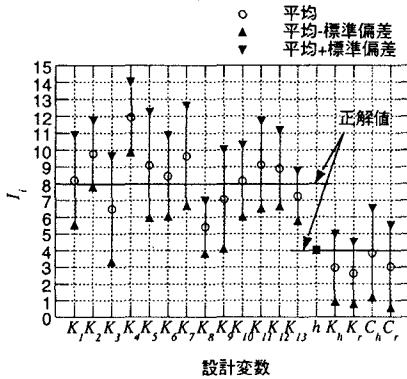


図 3.7 推定値の平均とばらつき

3.2.2 平均推定値を用いた場合の推定結果

図 3.7 は推定用解析モデルで得られた解集団の平均推定値 (○印) と標準偏差を示したものである。母集団は各試行で得られているベスト 10 の推定値 (すなわち、10 個体 × 10 試行 = 100 個体) を用いている。これより、減衰定数は必ず正解値が得られているが、せん断バネ剛性とスウェイ及びロッキングバネは結果のばらつきが大きいことがわかる。また、平均推定値 (○印) を用いることによって、せん断バネ剛性の同定精度が向上していることがわかる。

図 3.8 は平均推定値による伝達関数 (実線) を、正解値による伝達関数 (点線) と一緒に示したものである。これより、建物の振動特性の同定については最良推定値を用いた場合と同じように精度良く同定できていることがわかる。また、図 3.9 は (a) 入力動 (入力 / R 階) と (b) 5 階での応答 (5 階 / R 階)、及び (c) 4 層の層間変位応答 (4 層 / R 階) の推定結果を示している。これらの結果から、入力動については、高振動数領域の推定精度が向上していることがわかる。また、各階の応答推定については、図 3.4 と比較して、谷部の振動数や振幅値に僅かに差はあるが、精度は改善されている。また、層間変位応答の推定は、谷部の振動数については入力動と同様、精度が改善されているが、振幅値については、まだ全振動数領域にわたって正解値の方が 2 倍程度大きくなっている。ただし、層によって大幅な改善が見られた場合もあった。

以上の結果から、平均推定値を用いることにより、せん断バネ剛性分布の精度の改善が図られ、ひいては応答の推定精度も向上させることがわかった。

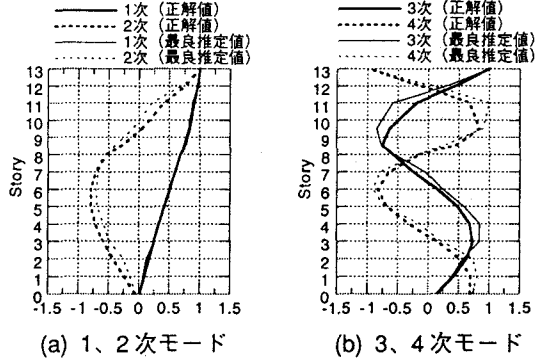


図 3.6 振動モード図

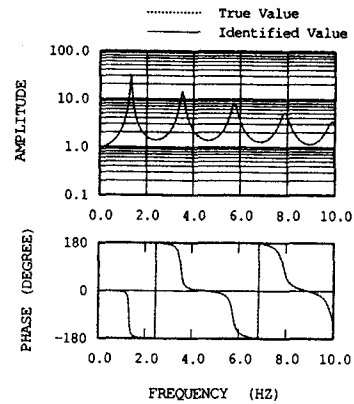


図 3.8 平均推定値を用いた場合の同定結果 (R 階 / 1 階)

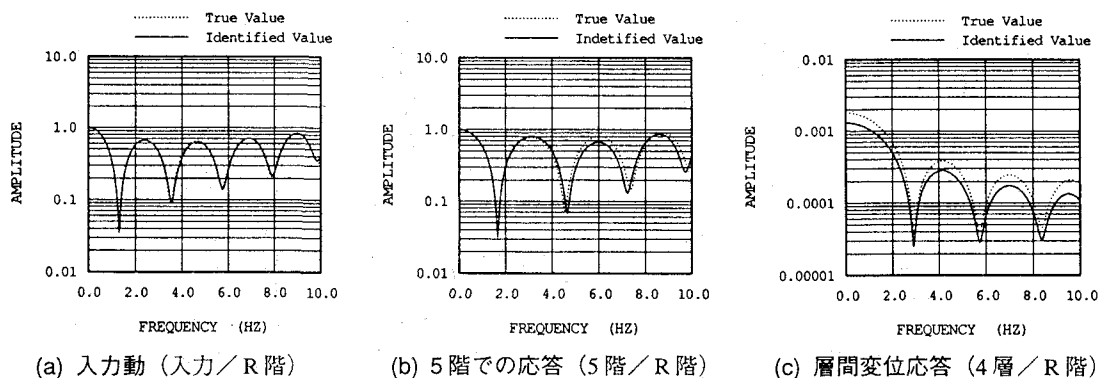


図3.9 平均推定値を用いた場合の入力動、及び建物応答の推定結果

4. まとめ

本論では、建物内で得られている地震観測記録から、建物への入力動と観測点以外の建物応答を推定する手法を示した。そして、中層建物の解析モデルを用いて、推定手法の適用性について検討した。解析モデルは、上部構造を線形多質点系モデルとし、基礎には相互作用効果を考慮した地盤バネ（スウェー・ロッキングバネ）を取り付けている。まずはじめに、解析モデルの高さ、重量、及び回転慣性を既知量として、バネ剛性や減衰の同定を最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズム（GA）を用いて行った。そして、入力動と建物応答の推定は、得られた推定用解析モデルから、推定に必要な伝達関数を求めることにより行った。

そして、GAの全試行の中の最良推定値を用いた場合と、各試行におけるベスト10の推定値の平均値（平均推定値）を用いた場合の2通りで推定を行い、正解値と比較することにより本手法の適用性を検討した。そして、以下のことを明らかにした。

- (1) 入力動に対する伝達関数を推定する場合、平均推定値を用いる場合はもちろんのこと、最良推定値を用いた場合でも、精度の高い入力動の推定が行えることがわかった。
- (2) 建物応答を推定する場合、数回から十数回の試行から得られる平均推定値を用いて推定した方が、精度の良い結果が得られることがわかった。

今後は実観測記録への適用性について検討する予定である。

参考文献

- [1] 北野宏明、ほか：遺伝的アルゴリズム、遺伝的アルゴリズム2、産業図書
- [2] 星谷 勝、ほか：建築技術者のためのデータ解析と応用、鹿島出版会（1991）
- [3] 長松昭男：モード解析、培風館（1990）
- [4] 柴田明徳：最新 耐震構造解析、森北出版（1994）
- [5] David E. Goldberg：Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley（1989）
- [6] J. J. Grefenstette：Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms, IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-16, No.1, pp.122-128, 1986
- [7] John J. Grefenstette：A User's Guide to GENESIS 1.2ucsd, 1987
- [8] 山中浩明、石田 寛：遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析、日本建築学会構造系論文集、No.468, pp.9-17, 1995年2月
- [9] 杉本博之：GAの工業設計の応用にむけて トラス構造物の離散的最適設計を例として、数理科学、No.353, 1992年11月
- [10] 尾田十八：GAの構造設計問題への応用法、日本機械学会 [No.930-43] 講習会教材、pp19-29, 1992年6月
- [11] E.F. Udawadia and D.K. Sharma, and P.C. Shah：Uniqueness of damping and stiffness distribution in the identification of soil and structural systems, ASME, Vol.45, pp181-187, 1978
- [12] G.H. Mcverry：Structural Identification In The Frequency Domain From Earthquake Records, EESD, Vol.8, pp.161-180, 1980
- [13] 沢田 勉、ほか：周波数領域における線形多自由度系の分割同定、構造工学論文集、Vol.39A, pp.773-781, 1993年3月
- [14] 沢田 勉、ほか：せん断型線形多自由度系の同定問題の周波数領域における解法に関する一考察、構造工学論文集、Vol.32A, pp.739-748, 1986年3月
- [15] 松島 学、ほか：ロッキング振動を伴う構造物の同定、第20回地震工学研究発表会講演概要、pp.477-480, 1989年7月