

周波数領域における線形多自由度系の分割同定

A SUBSTRUCTURE METHOD FOR IDENTIFICATION OF
LINEAR MULTI-DEGREE-OF-FREEDOM SYSTEM IN FREQUENCY DOMAIN

沢田 勉*・山本 英史**・平尾 潔***・辻原 治****

By Tsutomu SAWADA, Hidefumi YAMAMOTO, Kiyoshi HIRAO and Osamu TSUJIHARA

A substructure method is formulated for identification of linear multi-degree-of-freedom system (MDOF) in frequency domain. The structure is decomposed into several subsystems which are independently identified from upper to lower subsystems. The identification problem is solved by using modified successive linear programming method. It is found from numerical examples that the substructure method is very effective for identification of MDOF system which has high degree-of-freedom.

1. はじめに

本研究は、線形多自由度系の分割同定法を周波数領域で定式化し、数値計算結果をもとにその有効性を検討したものである。

近年、地震時の構造動特性の解明や既存構造物の損傷度評価を目的として、各種振動系の同定に関する研究が盛んに行われるようになった。振動系の同定手法を大別すると、時間領域の解析と周波数領域の解析になる。前者は時刻歴としての観測記録そのものを基準とし、後者は観測記録より得られるスペクトルや周波数伝達関数を基準として、系パラメータを同定する方法である。

時間領域の同定法としては、Udwadia 等¹⁾、Beck等²⁾、星谷等^{3)~6)}、丸山等⁷⁾、松井等^{8), 9)}、土岐等^{10), 11)}、その他^{12), 13)} 数多くの研究がなされている。特に、星谷等が提案した拡張カルマンフィルタによる逐次同定法は、観測記録にノイズが含まれる場合にも解の安定性が良いこと、データをシーケンシャル処理するため計算容量が少なくすむことなどから、振動系の同定のみならず他分野にも応用されており^{14)~16)}、この方面の最近の研究の主流になってきている。

他方、周波数領域の同定法としては、Udwadia 等¹⁷⁾、Mcverry¹⁸⁾、星谷等¹⁹⁾、辻原等²⁰⁾ の研究があ

*	工博 徳島大学助教授	工学部建設工学科	(〒770 徳島市南常三島町 2-1)
**	徳島大学大学院	工学研究科	(〒770 徳島市南常三島町 2-1)
***	工博 徳島大学教授	工学部建設工学科	(〒770 徳島市南常三島町 2-1)
****	工修 和歌山工業高等専門学校講師	土木工学科	(〒644 和歌山県御坊市名田町野島 77)

る。この種の研究は、古典制御理論に立脚したものであり、パラメータの同定の際に、周波数領域における伝達関数やスペクトルの一致を基準とした評価関数を用いるものである。この方法は、観測記録に含まれるノイズの処理法が明確でないこと、高次モードパラメータや減衰係数の同定に問題があることなどの理由から、最近ではあまりなされていない。しかし、周波数領域の解析法は、同定に用いる評価関数が簡単であり、既往の非線形最適化手法を直接適用できるという利点がある。一般の振動解析においては、時間領域と周波数領域の解析は表裏一体であり、特に、周波数領域の解析から系の固有振動数や減衰係数に関する情報が直接得られるという長所もある。また、上部構造物と地盤を一体とした同定問題を考える場合には、連続体としての地盤の同定に周波数領域の解析が用いられることがあるため^{21)・22)}、上部振動系にも同じ解析法を用いれば、全体としての整合性が保たれるということも考えられる。このようなことより、本研究では、線形多自由度系の同定問題を周波数領域で解析する。

ところで、多自由度系の同定においては、上述のような問題点以外にも、次のような問題が生じる。すなわち、系の自由度の数が増大すると、同時に同定すべきパラメータの数が増加するため、解の精度及び収束性が劣化したり、同定不能になる点である。これは時間領域の解析法にもあてはまるが、振動数領域の解析では、特に記録にノイズが含まれる場合、高振動数領域のスペクトルにその影響が顕著に現れるため、同定精度が極端に悪くなる。したがって、一度に同定すべきパラメータの数は少ないほうが良い。

このような観点より、本研究では、周波数領域における線形多自由度系の同定に分割法を導入する。この方法では、全体系はいくつかの部分系に分割され、各部分系は上部より順次独立に同定される。このとき、ある部分系の同定の際に、それより上部の部分系に含まれるパラメータは精度よく同定されていると仮定される。このため、上部系の同定において生じる誤差が下部系に伝播するという欠点がある。しかし、本文で示されるように、全体系を一括して同定する場合に比べ、精度及び収束性は大幅に改善される。数値計算では、線形8自由度系を用いた場合の一括同定と分割同定の結果が比較され、同定精度に及ぼすノイズの影響も検討される。

線形多自由度系の同定に分割法を導入した研究として、Koh らの研究²³⁾がある。この研究では、拡張カルマンフィルタによる線形多自由度系の同定問題に分割法が導入されている。本研究は、分割法概念を周波数領域で定式化し、より具体的な形でその有用性を示したものである。

2. 線形多自由度系の分割同定法の定式化

図-1(a) に示すようなせん断型線形多自由度系において、各質点の質量 $m_1, \dots, m_n$ は既知とし、ばね定数 $k_1, \dots, k_n$, 及び減衰係数 $c_1, \dots, c_n$ を同定する問題を考える。分割同定法では、図-1(a) に示す全体系をいくつかの部分系に分割する。このとき、次の仮定が設けられる。

- (1) 各部分系の境界にある質点(図-1(b) では p 点及び $q+1$ 点)では地震計による観測記録が得られている。
- (2) 各部分系は上部より同定され、着目する部分系(これを第 J 部分系とする)の系パラメータを同定する際には、それより上部の系に含まれるばね定数 k_i と減衰係数 c_i は精度よく推定されている。このことは、各部分系に含まれる質点の数が少数(高々4~5)ならば可能と考えられる。

このような状況のもとに、第 J 部分系のばね定数と減衰係数を同定する問題を定式化する。第 J 部分系では最上質点 m_p にそれより上部にある系の慣性力 $-\sum_{i=1}^{p-1} m_i \ddot{z}_i$ が加わることを考慮すると、系の運動方程式は次のようになる。

$$[M] \{\ddot{z}(t)\} + [C] \{\dot{z}(t)\} + [K] \{z(t)\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ =質量行列、 $[C]$ =減衰行列、 $[K]$ =剛性行列、 $\{f(t)\}$ =外力項、 $\{z(t)\}$ =第J部分系に含まれる各質点の絶対変位であり、それぞれ次式ようになる。

$$[M] = \begin{bmatrix} m_p & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & m_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_p & -C_p & & \\ -C_p & C_p+C_{p+1} & -C_{p+1} & \\ & \ddots & \ddots & \\ -C_{r-1} & C_{r-1}+C_r & -C_r & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & -C_{q-1} & C_{q-1}+C_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_p & -k_p & & \\ -k_p & k_p+k_{p+1} & -k_{p+1} & \\ & \ddots & \ddots & \\ -k_{r-1} & k_{r-1}+k_r & -k_r & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & -k_{q-1} & k_{q-1}+k_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\{f(t)\} = \begin{Bmatrix} -\sum_{i=1}^{p-1} m_i \ddot{z}_i(t) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ C_q \dot{z}_{q+1}(t) + k_q z_{q+1}(t) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\{z(t)\} = \{z_p(t), \dots, z_r(t), \dots, z_q(t)\}^T \quad (6)$$

ここで、式(5)右辺第1行の $\ddot{z}_i(t)$, $i=1 \sim p-1$, は第J部分系より上部に含まれる各質点の絶対加速度応答であり、この $\ddot{z}_i(t)$ またはそのフーリエ変換 $\ddot{z}_i(\omega)$ は、前述の仮定(1) および(2) より既知となる(後述)。式(1)をフーリエ変換して、周波数領域で表示すると次式ようになる。

$$[A(\omega)] \{\ddot{z}(\omega)\} = \{F(\omega)\} \quad (7)$$

ここで、 $\ddot{z}(\omega)$ は $\ddot{z}(t)$ のフーリエ変換であり、 $[A(\omega)]$, $\{F(\omega)\}$ はそれぞれ次式ようになる。

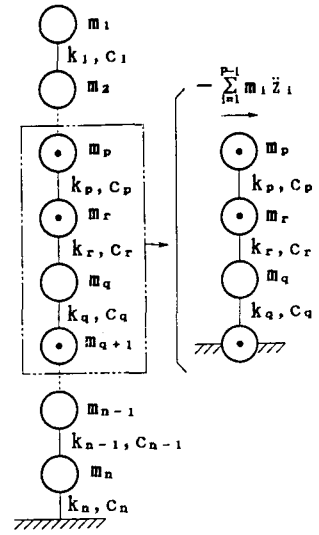
$$[A(\omega)] = [-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K]] \quad (8)$$

$$\{F(\omega)\} = \begin{Bmatrix} \omega^2 \sum_{i=1}^{p-1} m_i \ddot{z}_i(\omega) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ (i\omega C_q + k_q) \ddot{z}_{q+1}(\omega) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

ここで、式(9)の $\{F(\omega)\}$ に含まれる $\ddot{z}_i(\omega)$ と $\ddot{z}_{q+1}(\omega)$ は、前述の仮定(1)及び(2)により既知である。すなわち、仮定(1)より、第J部分系の下境界質点 m_{q+1} で観測記録 $\ddot{z}_{q+1}(t)$ が得られているから、式(9)の最後の行の $\ddot{z}_{q+1}(\omega)$ は既知である。また、式(9)の第1行目に含まれる $\ddot{z}_i(\omega)$, $i=1 \sim p-1$, は、仮定(1)及び(2)より既知となる。なぜなら、第p質点より上の全体系について式(1)の運動方程式を考えたとき、式(9)の第1行目が0になる(すなわち最上質点ではこの項がなくなる)こと、及び第J部分系より上部の系に含まれる系パラメータが既知である(仮定(2))ことより、式(7)から $\ddot{z}_i(\omega)$, $i=1 \sim p-1$ を求めることができる。式(7)より、第J部分系の絶対加速度応答のフーリエ変換 $\{\ddot{z}(\omega)\}$ が次のように得られる。

$$\{\ddot{z}(\omega)\} = [A(\omega)]^{-1} \{F(\omega)\} \quad (10)$$

上式より、第J部分系に含まれる任意の質点 m_r の加速度応答 $\ddot{z}_r(t)$ のフーリエ変換 $\ddot{z}_r(\omega; a)$ が得られる。こ



(a) 全体系 (b) 部分系
図-1 線形多自由度系モデル

の $\ddot{z}_r(\omega; a)$ は、式(8) 及び(10)からわかるように、同定すべきパラメータ k_i 及び $c_i, i=p, \dots, q$ を含んでいる。以下では、これらのパラメータを一般的に α で表すことにする。

一方、第 J 部分系の第 r 質点で絶対加速度記録 $\ddot{z}_r(t)$ が得られているとき、そのフーリエ変換 $\ddot{z}_r(\omega)$ は容易に計算できる。このとき、同定問題の基準となる評価関数は次式のようにになる。

$$\varepsilon(a) = \sum_{k=1}^{N_f} |\ddot{z}_r(\omega_k; a) - \ddot{z}_r(\omega_k)|^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

ここで、 ω_k は離散化した k 番目の角振動数点、 N_f は振動数点の数、添字 r は第 r 質点を意味する。また、対象とする第 r 質点は最上質点 p と一致してもよい。上式は、式(10)より得られる第 r 質点の $\ddot{z}_r(\omega_k; a)$ と、実際の絶対加速度応答記録より得られる $\ddot{z}_r(\omega_k)$ の残差平方和を最小にするような未知パラメータ α を決定する基準である。

3. 同定問題の解析法

前述の式(11)で与えられる最小化問題を解くにあたり、従来より、各種の最適化手法が用いられているが、これら手法のうち反復線形計画法(SLP法)はアルゴリズムが簡単であるので手軽に使えるという利点がある。特に、振動系の同定問題のように制約条件を持たない最小化問題では、各段階の解が線形計画法(LP法)を用いなくとも容易に得られるので非常に簡単である。また、この方法は初期値の影響を受けにくく、大域的な解が得られる可能性が高いという長所もある。しかし、SLP法は、ほかの方法に比べ最適解の近傍での収束性が悪いという欠点を持っている。本研究では、SLP法の欠点である最適解近傍での収束性を改善した改良反復線形計画法(MSLP法)²²⁾を用いて式(11)を解く。

式(11)を未知パラメータ α の適当な初期値 $a^{(0)}$ のまわりでテーラー展開して3次以上の項を省略すると次式のようにになる。

$$\varepsilon(a^{(0)} + \Delta a) \approx \varepsilon(a^{(0)}) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial a_i} \right)^{(0)} \Delta a_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial a_i \partial a_j} \right)^{(0)} \Delta a_i \Delta a_j \quad (12)$$

ここで、上付添字(0)は初期値での値を示し、 $\Delta a_i, \Delta a_j$ は増分量、 $N=2n$ は同定すべきパラメータの数である。また、上式に含まれる偏微分係数は次式のようにになる。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial a_i} = \sum_{k=1}^{N_f} \left(\frac{\partial g_{rk}}{\partial a_i} \cdot g_{rk}^* + g_{rk} \cdot \frac{\partial g_{rk}^*}{\partial a_i} \right) \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial a_i \partial a_j} = \sum_{k=1}^{N_f} \left(\frac{\partial^2 g_{rk}}{\partial a_i \partial a_j} \cdot g_{rk}^* + \frac{\partial g_{rk}}{\partial a_i} \cdot \frac{\partial g_{rk}^*}{\partial a_j} + \frac{\partial g_{rk}}{\partial a_j} \cdot \frac{\partial g_{rk}^*}{\partial a_i} + g_{rk} \cdot \frac{\partial^2 g_{rk}^*}{\partial a_i \partial a_j} \right) \quad (14)$$

ただし、*は共役複素数を表し、 g_r は次式のようなものである。

$$g_r = \ddot{z}_r - \ddot{z}_r^* \quad (15)$$

MSLP法は、式(12)が Δa の2次関数の形であることに着目して、これをSLP法により解こうとするものである。式(12)の表示を簡単にするために、次のような変数変換を行う。

$$x_i = \Delta a_i \quad (16)$$

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial a_i} \right)^{(0)} = \beta_i \quad (17)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial a_i \partial a_j} \right)^{(0)} = \gamma_{ij} \quad (18)$$

これらの記号を用い、定数項 $\varepsilon(a^{(0)})$ は最小化とは無関係であるのでこれを省略すると、式(12)は次式のようになる。

$$E = \sum_{i=1}^N \beta_i x_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} x_i x_j \rightarrow \min \quad (19)$$

式(19)をテラー展開して線形化すると次式ようになる。

$$E^{(1)} \approx E^{(0)} + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial E}{\partial x_i} \right)^{(0)} \Delta x_i \rightarrow \min \quad (20)$$

ここで、上式に含まれる偏微分係数は次式ようになる。

$$\left(\frac{\partial E}{\partial x_i} \right)^{(0)} = \beta_i + \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} x_j \quad (21)$$

式(20)は、次のmove limitの制約下で、LP法を用いて解くことができる。

$$-\{x_i\} \leq \Delta x_i \leq \{x_i\} \quad (22)$$

ここで、 $\{ \}$ は微小な正值で、例えば $\{=0.02$ のように与えられる。

ところで、上述のLP問題を解く際に、制約条件が式(22)のみであることを考慮すると、増分量 Δx_i は以下のように簡単に求まる。

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial E}{\partial x_i} \right)^{(0)} \geq 0 \text{ のとき} & \Delta x_i = -\{x_i\} \\ \left(\frac{\partial E}{\partial x_i} \right)^{(0)} < 0 \text{ のとき} & \Delta x_i = \{x_i\} \end{cases} \quad (23)$$

上式より x_i の増分量 Δx_i が求まると、次の過程では、

$$x_i^{(1)} = x_i^{(0)} + \Delta x_i \quad (24)$$

を初期値として同様の過程を繰り返す。そして、 x_i の増分量 Δx_i が微小、すなわち x_i が収束した時点で式(20)の最小化問題が解けたことになり、次にこうして得られた x_i の最適値 x_i^* を $a^{(1)}$ における最適変化量 Δa_i^* として、 a_i が次のように修正される。

$$a_i^{(1)} = a_i^{(0)} + \Delta a_i^* \quad (25)$$

以上の過程を繰り返すことにより、グローバルな最適解が得られる。

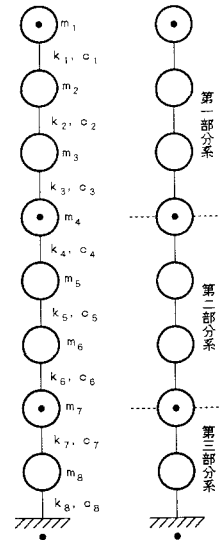
4. 数値計算及び考察

図-2に示す線形8自由度系を対象として、ばね定数及び減衰係数を同定する。図において、●印は地震計の設置点であり、これらの点で観測記録が得られていると仮定する。表-1には、同定に用いた線形8自由度系の諸元を表す。ここでは、解析法の有効性を検討することを目的とするため、実際の観測記録は用いず、入力加速度波としてEl Centro地震波を用い、周波数領域で応答計算した後にフーリエ逆変換を行い、これを観測波形として用いた。なお、MSLP法による繰り返し回数は100回、評価関数において対象にしたスペクトルの周波数領域は0.1～20.0 Hz

とし、この間を100等分した振動数点について式(11)を計算する。以下では、一括同定と分割同定の精度の比較、初期値と同定精度の関係、及び観測記録に含まれるノイズが同定精度に及ぼす影響を、数値計算により検討した。

(1) 一括同定と分割同定の比較

図-2に示す線形8自由度系を一括同定した場合と3つの部分系に分割して同定した場合の精度を比較する。ただし、同定の際の初期値は、表-1の真値の1.3倍とした。一括同定においては、図-2(a)に示す全体系のばね定数 $k_1 \sim k_8$ 、減衰係数 $c_1 \sim c_8$ が同時に同定される。このときの評価関数は、質点 m_1, m_4, m_7 について式(11)を立て、それらを合計したものを用いた。他方、分割同定では、各部分系の評価関数としてそれぞれ



(a) 全体系 (b) 部分系

図-2 数値計算モデル

(●印は地震計設置位置)

m_1, m_4, m_7 の記録を用い、上部系より順次独立にパラメータを同定した。同定の際の収束判定は、連続するくり返しにおける評価関数(式(11))の差が微小な値 ε 以下になるとき、くり返しを終了するという基準に拠った。しかし、数値計算では、 ε として非常に小さな値($\varepsilon=10^{-6} \sim 10^{-8}$)を与えたため、MSLP法におけるグローバルな繰返しは、一括同定、分割同定とも、前述のように100回となった。なお、本計算例では、一括同定と分割同定の精度比較を目的とするため、記録にノイズは付加していない。図-3及び図-4はそれぞれ、一括同定した場合と分割同定した場合の結果である。これらの図において、図(a)はばね定数、図(b)は減衰係数であり、横軸はばね定数または減衰係数の値を、縦軸は質点番号を示す。また、図中の点線、実線及び太線はそれぞれ、初期値、収束値及び真値に対応する。図-3の一括同定結果においては、ばね定数の精度は第5質点～第7質点で極端に悪く、また、減衰係数の精度も全体的に非常に悪くなっている。これに対し、図-4の分割同定結果では、ばね定数は精度よく推定されており(実線と太線がほぼ重なっている)、また減衰係数の誤差も数%程度である。ただし、減衰係数の誤差は下の部分系で若干大きくなっており、上の部分系からの誤差が下に伝播しているようである。なおこれらの計算に要したCPU時間は、一括同定(図-3)で2900秒、分割同定(図-4)で130秒程度である(FACOM M-380)。

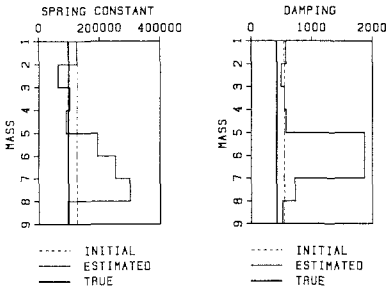
以上のことより、本研究で提示した分割同定法は、収束性及び精度の面で優れ、また、計算時間も大幅に低減されることがわかった。

(2) 初期値と同定精度の関係

本研究のような同定問題を扱う場合には、未知パラメータの初期値を真値にどの程度近づければ解が真値に収束するかを知ることが重要である。そこで、図-2に示す線形8自由度系を一括同定した場合と分割同定した場合について、それぞれ初期値を変化させて、収束値がどの程度真値に近づくかを検討した。なお、この計算例においても、ノイズを含まない観測記録を用いている。表-2及び表-3には、一括同定した場合と分割同定した場合の初期値と同定精度の関係を示した。ただし、これらの表における初期値/真値は、同定すべきすべてのパラメータの初期値が真値の何倍であるかを示す比である。また、表中の記号は同定精度(誤差)により次のように区分している。

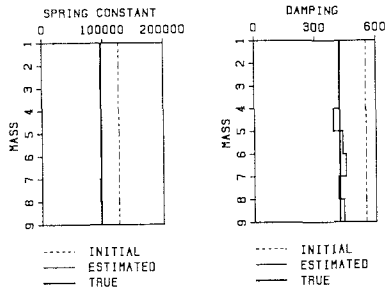
表-1 数値計算モデルの諸元

質点番号	質量 $m \times 10^3$ [kg]	真 値	
		ばね定数 $k \times 10^6$ [kg/cm]	減衰係数 c [kg·s/cm]
1	0.185	0.968	423.178
2	0.185	0.968	423.178
3	0.185	0.968	423.178
4	0.185	0.968	423.178
5	0.185	0.968	423.178
6	0.185	0.968	423.178
7	0.185	0.968	423.178
8	0.185	0.968	423.178



(a) ばね定数 (b) 減衰係数

図-3 同定結果(全体系、一括同定、ノイズ0%)



(a) ばね定数 (b) 減衰係数

図-4 同定結果(部分系、分割同定、ノイズ0%)

◎：誤差5%以内，○：誤差 5～10% 以内，
 △：誤差10～20% 以内，▲：誤差20～50% 以内，
 ×：誤差50% 以上

表-2の一括同定では、ばね定数は初期値が真値の0.8～1.2 倍の時精度よく推定されている。これに対し、表-3の分割同定では、初期値が真値の0.8～1.7 倍と、より広範囲でばね定数の同定精度が良くなっている。また、減衰係数の精度についても、分割同定のほうが一括同定に比べて格段に良くなっている。これらのことより、全体系を分割同定することにより、同定の可能性が高くなること、すなわち、より広範囲の初期値を用いても、精度の良い同定ができることがわかった。

(3) ノイズが同定精度に及ぼす影響

ノイズが同定精度に及ぼす影響を見るために、図-2に示す線形8自由度系を分割同定した場合について、観測記録にノイズが2%含まれる場合と、含まれない場合の同定精度を比較した。ノイズは、帯域巾が0.1～20Hzの有帯域ホワイトノイズとし、前述の応答計算より得られた各質点の加速度時刻歴のrms 値を基準として、それらの2%のrms 振幅をもつように設定した。なお、初期値は前述と同様真値の1.3 倍とした。図-5は2%のノイズを含む観測記録を用いた場合の同定結果である。図-4（ノイズ0%）と図-5の比較より、観測記録にノイズが含まれる場合、最上部の部分系（第1部分系）の同定精度は比較的良好であるが、下の部分系で同定精度がかなり劣化することがわかる。これは、最上部の部分系における同定精度がノイズの影響で若干低下し、それにより生じた誤差が下部系に伝播し増幅したためである。このように、本研究で提案した分割同定法は、記録にノイズが含まれる場合、下部の部分系の同定精度がかなり悪くなるという欠点をもっている。

5. 結 論

本研究では、せん断型線形多自由度系をいくつかの部分系に分割し、各部分系を周波数領域において逐次同定する手法を提示し、数値計算によりその妥当性を検討した。本研究で得られた結果を要約すれば以下のようになる。

表-2 初期値と同定精度（一括同定）

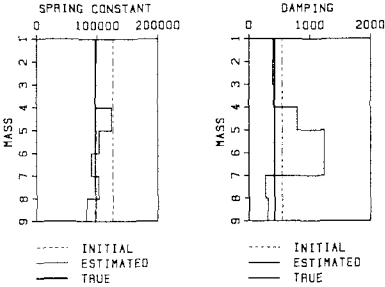
初期値 真 値	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8
0.7	×	▲	▲	▲	▲	▲	○	○	▲	▲	×	×	▲	▲	▲	▲
0.8	○	○	○	○	○	○	○	○	▲	○	○	○	○	△	△	○
0.9	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○
1.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×
1.3	▲	▲	○	○	×	×	×	×	○	△	△	▲	×	×	×	▲

○：誤差 5% 以内 ○：誤差 5～10% 以内
 △：誤差10～20% 以内 ▲：誤差20～50% 以内
 ×：誤差 50% 以上

表-3 初期値と同定精度（分割同定）

初期値 真 値	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8
0.5	○	▲	▲	▲	○	×	▲	×	△	△	×	▲	▲	▲	▲	▲
0.6	▲	○	▲	○	△	×	×	×	△	▲	▲	▲	▲	×	×	×
0.7	○	○	○	△	△	○	×	▲	△	△	×	×	×	×	×	×
0.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	▲
0.9	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	▲	△	▲	△	△
1.6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	▲	△	△	○	△
1.7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	▲	△	△	○	△
1.8	▲	△	○	×	×	×	×	×	△	×	×	×	×	×	×	×
1.9	▲	△	○	▲	×	×	×	×	△	×	×	×	×	×	×	×
2.0	△	○	○	▲	×	×	×	×	△	×	×	×	×	×	×	×

○：誤差 5% 以内 ○：誤差 5～10% 以内
 △：誤差 10～20% 以内 ▲：誤差 20～50% 以内
 ×：誤差 50% 以上



(a) ばね定数 (b) 減衰係数

図-4 同定結果（部分系，分割同定，ノイズ2%）

- (1) セン断型線形多自由度系をいくつかの部分系に分割して同定することにより、解の収束性及び精度が大幅に改善される。また、計算時間も8自由度系で1/20程度に短縮される。
- (2) 分割法を用いることにより、精度よく同定できる初期値の範囲が広がる。

以上のように、本研究では、分割同定法を定式化し、数値計算に基づいてその有用性を示した。しかし、数値計算例の(3)で示したように、この分割同定法は、観測記録にノイズが含まれる場合、下部の部分系の同定精度がかなり劣化するという欠点がある。これを改良する方法として、スペクトルを平滑化してノイズの影響を低減することや、各部分系をほかの部分系と独立に同定すること等が考えられる。これらについては、現在検討中であり、別途報告する予定である。

謝 辞

本論文の作成に当たり、(株)浅沼組 山本 悦司氏(元 徳島大学建設工学科4回生)の協力を得たことを記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Udwadia, F.E. and Shah, P.C. : Identification of structures through records obtained during earthquake ground motion, ASME, Journal of Engineering for Industry, pp.1347-1362, 1976.
- 2) Beck, J.L. and Jennings, P.C. : Structural identification using linear model and earthquake records, EESD, Vol. 8, pp. 145-160, 1980.
- 3) 星谷・斉藤：拡張カルマンフィルターを用いた同定問題の各種振動系への応用，土木学会論文集，第339号，pp.59-67, 1983年.
- 4) 星谷・斉藤：線形多自由度系の動特性の推定，土木学会論文集，第344号/I-1, pp.289-298, 1984年.
- 5) 星谷・斉藤：常時微動記録を用いたEK-WGI法による建物の動特性の推定，土木学会論文集，第350号/I-2, pp.263-270, 1984年.
- 6) 星谷・丸山：非線形構造系の地震時挙動特性の同定，土木学会論文集，第386号/I-8, pp.397-405, 1987年.
- 7) 丸山・相沢・星谷：ARMAモデルによる既存構造物の動特性の同定，土木学会論文集，第416号/I-13, pp.439-447, 1990年.
- 8) 松井・栗田：応答加速度波を用いた構造特性の同定，構造工学論文集, Vol. 35A, pp. 689-698, 1989年.
- 9) Matui, K. and Kurita, T. : Sensitivities of parameters due to model errors and measurement noises in structural identification problems, Proc. of JSCE, No.422/I-14, pp.145-154, 1990.
- 10) 土岐・佐藤・生木：自己回帰・移動平均法による構造物の動的パラメータの推定，京都大学防災研究所年報，第21号, B-2, pp.1-12, 1978年.
- 11) Toki, K., Sato, T. and Kiyono, J. : Identification of structural parameters and input ground motion from response time histories, Proc. of JSCE, No.410/I-12, pp.243-251, 1989.
- 12) 塩田：拡張カルマンフィルターによる振動系の同定に関する基礎的研究，徳島大学卒業論文，1989年.
- 13) 沢田・平尾・成行・小山：構造物-基礎系の同定に関する一考察，土木学会中国四国支部第42回研究発表会講演概要集, I-22, 1990年.
- 14) 鈴木・石井：拡張カルマンフィルターによる土質定数の空間分布推定，土木学会論文集，第406号，pp.71-78, 1989年.

- 15) 須藤・星谷：拡張カルマンフィルターの基本的考察とEK-WLI法の提案，土木学会論文集，第437号/I-17, pp.203-211, 1991年.
- 16) 須藤・星谷：EK-WLI法と有限要素法を用いた逆解析，土木学会論文集，第446号/I-19, pp.177-185, 1992年.
- 17) Udwadia, F.E. and Sharma, D.K. and Shah, P.C. : Uniqueness of damping and stiffness distribution in the identification of soil and structural systems , ASME, Vol.45, pp.181-187, 1978.
- 18) Mcverry, G.H. : Structural identification in the frequency domain from earthquake records , EESD, Vol. 8, pp.161-180, 1980.
- 19) 星谷・千葉・丸山：周波数領域の観測データを用いた建物の動特性の推定，土木学会第41回年次学術講演会概要集，I-361, 1986 年.
- 20) 辻原・沢田：線形多自由度系同定問題における改良SLP の開発，第2回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集，pp.105-110, 1991年.
- 21) 辻原・沢田・谷：鉛直アレー観測記録による地盤振動特性値の同定，構造工学論文集，Vol.36A, pp.747-756, 1990 年.
- 22) 沢田・辻原・平尾・山本：地盤のS波速度とQ値の同定問題におけるSLP 法の改良とその適用，土木学会論文集，第446号/I-19, pp.205-213, 1992 年.
- 23) Koh, C.G. , See, L.M. and Balendra, T. : Estimation of structural parameters in time domain - A substructure approach , EESD, Vol. 20, pp.787-801, 1991.
- 24) 大崎：地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1976年.

(1992年9月21日受付)