

静的な応答による構造システムの剛性劣化に関する分散化構造同定法

Decentralized identification on structural element stiffnesses of large-scale structures from static responses

原田隆郎*・呉 智深**・市來佐都子***

Takao HARADA, Zhishen WU and Satoko ICHIKI

*正会員 工修 茨城大学助手 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1)

**正会員 工博 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1)

***正会員 工修 株式会社 CRC ソリューションズ (〒136-8581 東京都江東区南砂 2-7-5)

In this paper, a decentralized identification approach is developed, in which a whole structure is partitioned into several sub-structures. It is realized that the proposed decentralized identification approach can be used to identify the structural element stiffnesses of large-scale complicate structures through iterative computation based on the localized structural identification approach. Through some numerical simulations, the efficiency and generality of the proposed identification approach are demonstrated. Moreover, the adaptability of Hopfield neural network solution is also discussed in this paper.

Key Words : static identification, structural element stiffnesses, neural network, decentralized identification

キーワード : 静的構造同定, 構造要素剛性, ニューラルネットワーク, 分散化構造同定

1. はじめに

最近、非合理的な設計・施工や経年劣化による多くの構造物の劣化・脆化が報告されており、これによる被害も深刻化している。そして、このような数多くの大規模な脆弱構造物に関して、経済的にかつ精度よくその健全性を診断するための有効な同定手法の開発が要求されている。これに対して、物理的計測より得られた既存構造物の各種応答を入力データとして、構造内部の劣化状況や構成材の材質変化を逆に解析するといった構造同定法に関する研究が行われている。

このような、構造物の剛性を同定するための方法として、構造物に動的な刺激を与えることによって得られるデータを利用した動的構造同定手法がある。しかし、対象とする構造物の質量、減衰特性、剛性のすべてに関連づけられている動的な構造同定の場合、測定データにおけるノイズの内在やモデル内のパラメータの不確定な挙動、構造物の大型化や複雑化に伴う解析精度の低下等の課題が考えられる。一方、動的な応答における定常応答や過渡応答の前兆として考えられるのが静的な応答である。静的な応答とは、変位計のような計測機器を構造物に設置し、プルーフロード試験のような実車による載荷試験を行った場合に計測されるたわみなどの変形量である。このような静的な応答は計測誤差以外のノイズの影響が比較的少なく、あらかじめ大型構造物の内部状況を把握することが可能であると考えられる。このた

め、外部の負荷状況や測定方法の面において、静的な手法を用いることで動的な手法の問題点を補うことができる。さらに、動的同定法と比較して十分な精度を有する静的応答変位の測定が可能になっている現状を考慮して、静的構造同定法の実用性の意義が高まっていくと思われる。まだ、数編の論文しか見当たらない現状ではあるが、静的な応答による構造システムのパラメータ同定に関する研究が、この十数年間において行われるようになっている^{1)~3)}。しかし、これまでの研究では、同定能力の高度化、計測データの制限と誤差による同定法の限界、最小化問題の求解過程などの面において課題が残されている。

そこで著者らは、有限要素法より離散化された構造物に対して、剛性の低下している位置と要素レベルの剛性の劣化率を同定する非線形最適化問題に関する研究を行い、静的変位応答による離散化構造同定法の提案を行った^{4)~7)}。この構造同定法では、静的縮小法を用いた局所構造同定法の提案を行うとともに、求解法として安定性を有する相互結合型ニューラルネットワークを適用し、さらに未測定変位の予測アルゴリズムを提案することで同定能力の向上を図った。

本研究では、この離散化構造同定法を一般適用レベルまで高度化するために、複雑な構造システムを同定するための分散化構造同定法を提案する。具体的には、既に提案されている局所構造同定法と未測定変位の予測アルゴリズムを複数の同定部分系に適用し、各部分系の相

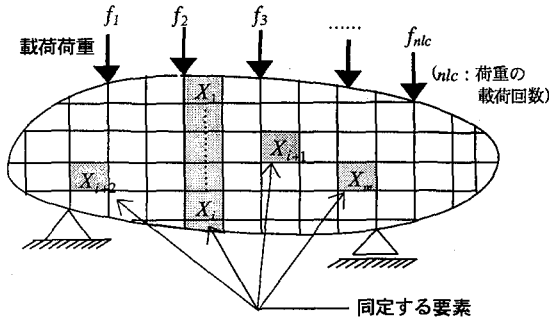


図-1 全体構造同定離散化モデル

相互作用を考慮しつつサイクリックに同定を行うことで、複数箇所の剛性劣化を同定する。そして、数値シミュレーションを行うことにより、分散化構造同定法の同定精度の確認を行うとともに、変位未測定節点を有する場合について分散化構造同定法の有効性を確認し、より一般的な状況下における同定手法の適用性について検討を行った。また、測定変位に誤差が含まれる場合の分散化構造同定法の安定性を検討する第一段階として、応答変位の測定誤差が剛性劣化の同定結果に与える影響について検討した。

2. 静的応答構造同定法の数値解析モデル

本研究では、複雑な構造システムの分散化構造同定法を開発するため、既に提案している静的変位応答による離散化構造同定モデル⁷⁾を利用する。よって、本章では既往の全体構造同定モデルや局所構造同定モデル、さらに未測定変位の予測アルゴリズムについて概説する。

2.1 全体構造同定

有限要素によってモデル化された自由度 n_d 個、要素 n_e 個の実構造物に関して、 h 回目の静的荷重を受けたとき、負荷 $\{f\}_h$ (節点力) と変位応答 $\{u\}_h$ (節点変位) の関係は次式のように表現される。

$$[K(\delta k_j)]\{u\}_h = \{f\}_h \quad (1)$$

$h = 1, \dots, nlc, \text{ and } j = 1, \dots, m$

ここで、 $[K(\delta k_j)]$ は同定未知パラメータ (対象要素の構成材料のヤング率や要素レベルの剛性の劣化低下率) で、合計 m 個の劣化要素 ($\delta k_1, \delta k_2, \dots, \delta k_m$) を有する $n_d \times n_d$ の剛性マトリックスである (図-1)。ただし、 $0 \leq m \leq n_e$ である。また、 nlc は荷重の載荷回数である。

一般に有限要素モデルの各自由度に対応するすべての場所での変位を測定することは、ほとんど不可能なことである。そこで、この問題を解くために、変位応答を式(2)のように測定して既にわかっている変位 $\{u\}_h^{kn}$ と未知の変位 $\{u\}_h^{ukn}$ とに分けることにする。

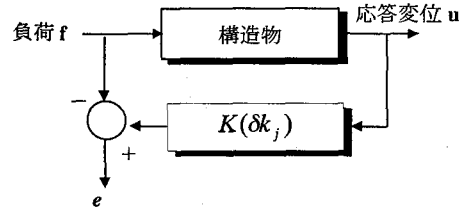


図-2 実構造物とモデルの応答誤差 (応力誤差関数)

$$u_h = \begin{pmatrix} u_h^{kn} \\ u_h^{ukn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

また、構造物の静的な変位応答などの情報を用いた構造同定手法として、応力誤差関数をもとにした静的構造同定モデルの構築を行った。応力誤差とは、実構造物で静的荷重試験を行った場合の負荷と、その負荷に対する応答変位によって計算される節点力 (構造物の剛性を仮定し有限要素解析によって求める) との誤差である (図-2)。ここでの未知パラメータは、同定する要素の剛性劣化低下率を表すパラメータ $\delta k_j = (\delta k_{j1}, \delta k_{j2}, \dots, \delta k_{jm})$ と未測定変位 $\{u\}_1^{ukn}, \{u\}_2^{ukn}, \dots, \{u\}_{nlc}^{ukn}$ とを同定しなくてはならない。従って、 h 回目の負荷の荷重ベクトルと有限要素モデルによって計算された節点力ベクトルの差異による応力誤差関数は式(3)のように表される。

$$e_h(\delta k_j, \{u\}_h^{ukn}) = \left(\sum_{j=1}^m [K_j](1 - \delta k_j) + \sum_{j=m+1}^{n_e} [K_j] \right) \begin{pmatrix} \{u\}_h^{kn} \\ \{u\}_h^{ukn} \end{pmatrix} + \{f\}_h \quad (3)$$

ここで、 $[K_j]^e$ は要素 j より寄与された全体剛性マトリックスと同様な $n_d \times n_d$ 次元を有する剛性マトリックスであり、構造全体の剛性マトリックス $[K_j]$ と区別するために、「要素 (element)」の e を用いて表現した。また、変位ベクトルは測定された変位 $\{u\}_h^{kn}$ と未測定節点の変位 $\{u\}_h^{ukn}$ に分けられている。この誤差関数を一般的な最適化問題として定式化すると式(4)のようになる。

minimize

$$J_{r1} = \frac{1}{2} \sum_{h=1}^{nlc} \alpha_h \left\| \left(\sum_{j=1}^m [K_j](1 - \delta k_j) + \sum_{j=m+1}^{n_e} [K_j] \right) \begin{pmatrix} \{u\}_h^{kn} \\ \{u\}_h^{ukn} \end{pmatrix} + \{f\}_h \right\|$$

subject to

$$0 \leq \delta k_j \leq \overline{\delta k_j} \quad (4)$$

ただし、 α_h は h 回目の試験における測定値の相対的信頼性を反映する重み係数であり、荷重方法や荷重の作用位置など実際の試験方法の影響を総合的に評価して決

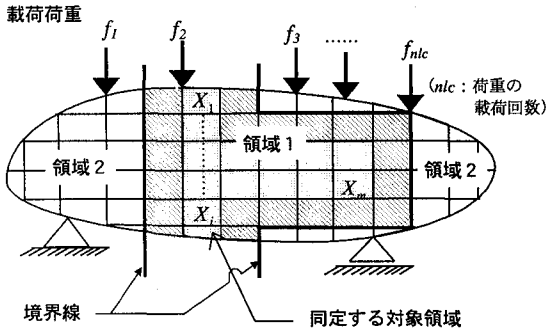


図-3 局所構造同定離散化モデル

定する必要があるが、本論文における後述のシミュレーションでは試験回数は1回 ($n_{lc}=1$) としている。 δk_j は j 番要素の劣化率の上限値である。また、構造要素 j の供用開始時や健全状態下の劣化率を零として、劣化後の剛性と、初期状態下の剛性の比を健全率 $1 - \delta k_j$ と考えている。一方、式(4)の J_{r1} を次の式(5)のように書き直すことができる。

$$J_{r1} = \frac{1}{2} \sum_{h=1}^{n_k} \alpha_h \sum_{s=1}^{n_s} \left\{ \left(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_i} K_{j,s,i} \cdot (1 - \delta k_j) \cdot u_{h,s,i} + \sum_{j=m+1}^m \sum_{i=1}^{n_i} K_{j,s,i} \cdot u_{h,s,i} \right) - f_{h,s} \right\}^2 \quad (5)$$

さらに、式(3)と式(4)に準ずるため、未測定変位 $\{u\}_h^{unk}$ を節点番号 $1 \sim n_1$ とし、測定変位 $\{u\}_h^{kn}$ を節点番号 $n_1+1 \sim n_d$ とすると、式(5)は次式のように整理される。

$$J_{r1} = \frac{1}{2} \sum_{h=1}^{n_k} \alpha_h \sum_{s=1}^{n_s} \left\{ \left(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_i} K_{j,s,i} \cdot (1 - \delta k_j) \cdot u_{h,s,i} + \sum_{j=1}^m \sum_{i=n_1+1}^{n_d} K_{j,s,i} \cdot (1 - \delta k_j) \cdot u_{h,s,i} \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{j=m+1}^m \sum_{i=1}^{n_i} K_{j,s,i} \cdot u_{h,s,i} + \sum_{j=m+1}^m \sum_{i=n_1+1}^{n_d} K_{j,s,i} \cdot u_{h,s,i} \right) - f_{h,s} \right\}^2 \quad (6)$$

2.2 局所構造同定

大型構造物に関する同定問題に対して、全体構造の各要素あるいは全体構造をすべて同定対象と考えると、計算時間や同定能力の制限でしばしば問題が生じることになる。また、局所的なノイズやその他の誤差が全体の同定結果に対して卓越してしまう可能性もある。そこで、構造物の劣化領域を特定できれば、全体構造物の中の部分領域を限定して同定し、ノイズや誤差の発生を避けることができる。

ここでは、静的縮小法⁹⁾を用いることにより剛性マトリックスの次元を減らす。そして、上記の全体同定方法と同様に、劣化していると推定された位置 ($X_1, \dots, X_m$) のパラメータだけに限り同定を行う。図-3のように境界線に囲まれた部分を同定対象とする領域1、その他の部分を同定対象としない領域2として、有限要素支配方程式である式(1)を式(7)のように書き直す。

$$\begin{bmatrix} [K_{11}(\delta k_j)] & [K_{12}] \\ [K_{12}] & [K_{22}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_1\} \\ \{u_2\} \end{Bmatrix}_h = \begin{Bmatrix} \{f_1\} \\ \{f_2\} \end{Bmatrix}_h \quad (7)$$

同定する要素はすべて領域1に含まれていることにする。ただし、 $[K_{12}]$ 、 $[K_{21}]$ にも同定パラメータの影響をなくさせるため、境界線に隣接する要素を非同定要素とする。領域2の節点変位を消去することによって、式(8)のような $\{f^*\}$ 、 $[K^*]$ という次元の縮小された形で、領域1の節点変位のみに関する支配型方程式を導くことができる。

$$\{f^*\}_h = [K^*] \{u_1\}_h \quad (8)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \{f^*\}_h &= \{f_1\}_h [K_{12}] [K_{22}]^{-1} \{f_2\}_h \\ [K^*] &= [K_{11}(\delta k_j)] - [K_{12}] [K_{22}]^{-1} [K_{21}] \end{aligned} \quad (9)$$

全体構造同定と同様にして、このときの目的関数は式(10)のように設定できる。

$$J_{r2} = \frac{1}{2} \sum_{h=1}^{n_k} \alpha_h \sum_{s=1}^{n_s} \left\{ \left(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_i} K_{j,s,i} \cdot (1 - \delta k_j) \cdot u_{h,s,i} \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{j=m+1}^m \sum_{i=1}^{n_i} K_{j,s,i} \cdot u_{h,s,i} + \sum_{j=m+1}^m \sum_{i=n_1+1}^{n_d} K_{j,s,i} \cdot u_{h,s,i} \right) \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^{n_1} \left([K_{12}] [K_{22}]^{-1} [K_{21}] \right)_{s,i} \cdot u_{h,s,i} - \left(\{f_1\}_h - [K_{12}] [K_{22}]^{-1} \{f_2\}_h \right)_{s,i} \right\}^2 \quad (10)$$

ここで、 n_e は最大同定可能な要素数であり、 p_e 、 n_1 はそれぞれ境界要素を含む全同定領域要素数および境界節点を含む領域1の総自由度である。

2.3 相互結合型ニューラルネットワークによる構造同定離散化モデル

2.1 および 2.2 で定式化された離散化構造同定の最小値問題を解く求解アルゴリズム (最小化法) として、相互結合型ニューラルネットワークを活用する。ニューラルネットワークは自己組織化能力による学習能力をもち、従来、組み合わせ数の膨大さから適応が困難であった最適化問題の求解アルゴリズムとして有効であると報告されている^{9),10)}。

ここでは、ニューラルネットワークにおけるエネルギー最小化の原理を利用して最適化問題を解く。エネルギー最小化の原理では、ニューラルネットワークのエネルギー関数と最適化問題のエネルギー関数を比較し、最適解とエネルギーの最小点を一致させることで解を求める。つまり、エネルギーを減少させるようにニューラルネットワークが自らの状態を遷移させるプロセスが、最

適化のプロセスになる。この原理に基づき、ある規範の最適化を図りたいとき、相互結合型ニューラルネットワークを用いることができる。

このときのニューロンモデルは式(11)および(12)で表すことができる。

$$u_i = \sum_j W_{ij} X_j + I_i \quad (11)$$

$$X_i = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \tanh \left(\frac{u_i}{T_0} \right) \right\} \quad (12)$$

ここで、 u_i は他のニューロンからの入力の総和であり、 X_i はニューロン i の出力、 W_{ij} は i 番目のニューロンから j 番目のニューロンへのシナプス荷重 ($W_{ij}=W_{ji}$, $W_{ii}=0$)、 I_i はニューロン i のしきい値 (自己バイアス) と呼ばれる。また、 T_0 は伝達関数の温度定数である。式(11)で、ニューロン i が他のニューロン j からの出力を受け、そのニューロン i が式(12)により他のニューロン j へ出力される。この2式の繰返しによりネットワークは状態変化していく。

しかしながら、式(6)では第1項部分において未知数同士の積となるためニューロンの2乗を設定しなければならず、相互結合型ニューラルネットワークには適用できない。したがって、ここでは問題を簡単にするため、式(6)における未知数は m 個の要素の劣化率 δk_j ($j=1, \dots, m$) のみとし、すべての変位を測定変位として扱う。まず、健全率 $1 - \delta k_j$ を式(13)のようにニューロン表現を行なうことにする。

$$1 - \delta k_j = \sum_w A_w X_{jw} \quad (13)$$

一方、ニューラルネットワークにおけるエネルギー関数 (2次元) は式(14)のように表せる。

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{jw} \sum_{j'w'} W_{jw'j'w} X_{jw} X_{j'w'} - \sum_{jw} I_{jw} X_{jw} \quad (14)$$

(1) 全体構造同定における重みとしきい値

式(13)を式(5)に代入しその式を展開・整理して、式(14)と比較してニューラルネットワークの重み $W_{jw'j'w}^{r1}$ としきい値 I_{jw}^{r1} を導出すると、式(15a)、(15b)のようになる。

$$W_{jw'j'w}^{r1} = -\sum_{h=1}^{n_c} \alpha_h \left[\sum_{s=1}^{n_d} \left\{ \left(\sum_{t=1}^{n_d} K_{j,s,t} \cdot A_w \cdot u_{h,t} \right) \left(\sum_{t=1}^{n_d} K_{j',s,t} \cdot A_{w'} \cdot u_{h,t} \right) \right\} \right] \quad (15a)$$

$$I_{jw}^{r1} = -\sum_{h=1}^{n_c} \alpha_h \left[\sum_{s=1}^{n_d} \left\{ \left(\sum_{t=1}^{n_d} K_{j,s,t} \cdot A_w \cdot u_{h,t} \right) \left(\sum_{j=m+1}^{n_c} \sum_{t=1}^{n_d} K_{j,s,t} \cdot u_{h,t} - f_{h,s} \right) \right\}^2 \right] \quad (15b)$$

(2) 局所構造同定における重みとしきい値

全体構造同定と同様にニューラルネットワークの概念を導入し、式(10)に式(13)を代入し、式(14)と比較する。こうして式の展開、整理を行うと、重み $W_{jw'j'w}^{r2}$ としきい値 I_{jw}^{r2} は次のように導かれる。

$$W_{jw'j'w}^{r2} = -\sum_{h=1}^{n_c} \alpha_h \left[\sum_{s=1}^{n_d} \left\{ \left(\sum_{t=1}^{n_d} K_{j,s,t} \cdot A_w \cdot u_{h,t} \right) \left(\sum_{t=1}^{n_d} K_{j',s,t} \cdot A_{w'} \cdot u_{h,t} \right) \right\} \right] \quad (16a)$$

$$I_{jw}^{r2} = -\sum_{h=1}^{n_c} \alpha_h \left[\sum_{s=1}^{n_d} \left\{ \left(\sum_{t=1}^{n_d} K_{j,s,t} \cdot A_w \cdot u_{h,t} \right) \left(\sum_{j=m+1}^{n_c} \sum_{t=1}^{n_d} K_{j,s,t} \cdot u_{h,t} - \sum_{t=1}^{n_d} [K_{12} [K_{22}]^{-1} [K_{21}]]_{s,t} \cdot u_{h,t} - \{ \{ f_h^1 \} - [K_{12} [K_{22}]^{-1} \{ f_h^2 \}]_s \} \right) \right\} \right] \quad (16b)$$

2.4 未測定変位の予測アルゴリズム

2.3 で設定した相互結合型ニューラルネットワークによる構造同定離散化モデルでは、すべての変位を入力値として取り扱うこととした。しかしながら、実際の構造物において荷重応答変位をすべて測定することは非常に困難である。そこで、未測定変位を直接同定パラメータとして求める方法ではなく、予測アルゴリズムによって推定する方法を採用する。ただし、構造物の劣化箇所の変位応答は構造同定に大きく影響することになるので、構造物の劣化箇所は目視や仮定により、ある程度特定できるものとし、その周囲の変位応答は測定できるものとする。それ以外の測定できない部分に関しては予測アルゴリズムで変位を予測し、すべての節点変位の情報で便宜的に揃っているものとする。

まず、離散化された構造モデルにおいて、変位測定節点の節点番号の後に変位未測定節点の節点番号が続くように整理し、添字 kn で変位測定節点に関する量、添字 ukn で変位未測定節点に関する量を表すと、式(1)は式(17)のように分割される。

$$\begin{bmatrix} K_{knkn} & K_{knukn} \\ K_{uknukn} & K_{uknukn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{kn} \\ u_{ukn} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{kn} \\ f_{ukn} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

K_{knkn} , K_{knukn} , f_{kn} を Cholesky 分解¹¹⁾すると式(18)になる。

$$\begin{aligned} K_{knkn} &= L_{knkn} D_{knkn} L_{knkn}^T \\ K_{knukn} &= L_{knkn} D_{knkn} L_{knkn}^T U_{knukn} \\ f_{kn} &= L_{knkn} D_{knkn} L_{knkn}^T V_{kn} \end{aligned} \quad (18)$$

ただし、 L は下三角マトリクス、 D は対角マトリクスで

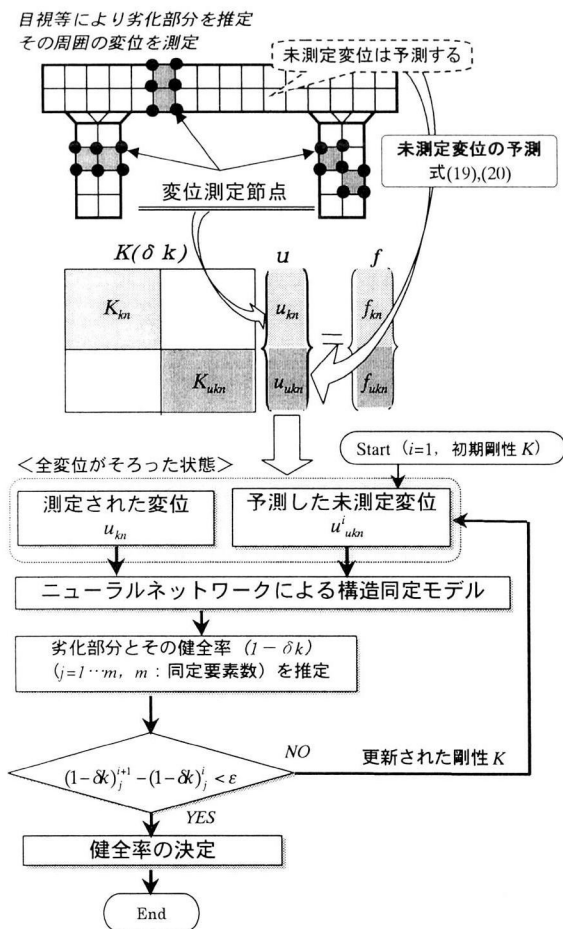


図-4 予測変位を用いた繰返し同定過程の流れ

あり、 U と V はマトリックスとベクトルである¹²⁾。これらを式(17)に代入すると、式(19)のような未測定変位のみに関する次元が縮小された剛性方程式が得られ、これを用いて未測定変位を予測する。

$$[K^*] \{u_{ukn}\} = \{f^*\} \quad (19)$$

ここで、

$$\begin{aligned} K^* &= K_{ukn ukn} - K_{ukn kn} U_{kn} \\ f^* &= f_{ukn} - K_{ukn kn} V_{kn} \end{aligned} \quad (20)$$

次に、式(19)で求められた未測定変位 u_{ukn} と既知の測定変位 u_{kn} を用いて、構造同定モデルを繰返し利用することで健全率 $1-\delta k_j$ を同定する(図-4)。つまり、有限要素離散化モデルにおいて初期剛性 K を与え、1回目($i=1$)の未測定変位を予測する。その予測変位と測定変位を入力情報として提供し、2.3で設定した相互結合型ニューラルネットワークによる構造同定離散化モデルによって同定解析を行う。さらに、1回目の同定結果に基づき2回目の未測定変位を予測し、2回目の同定結果を求める。この流れにおいて $i+1$ 回目の健全率と i 回目の健全率がある許容誤差範囲 ε になったところで同

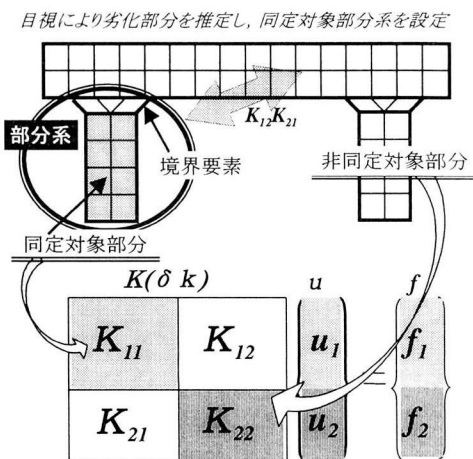


図-5 分散化構造同定のための局所化

定終了とする。これは、繰返し過程によって予測変位と同定する要素剛性の健全率を次第に真値近傍の近似値に収束させるアルゴリズムを示している。

3. 分散化構造同定法の提案

構造物の複雑性が増す昨今、現実問題として構造物の全応答変位の測定は困難であることや、計算能力などの限界がある。また、局所的なノイズやその他の誤差が全体構造の同定結果に対して卓越してしまう可能性もある。このような欠点を解決しようとする一つの手法として挙げられるのが分散化構造同定である。分散化構造同定法は、はじめ構造物の全体系をいくつかの適当な部分系に分割し、それぞれについて有限要素法を用いて解析し、部分系の特性が分かった上で、それらを合成して全体の構造特性(本研究では、構造物の剛性)を得ようとする部分構造合成法¹³⁾ともいえるものである。これにより、原理的には大規模・複雑構造物に関係なく構造同定を行うことができる。

本研究では、前出の構造同定数値解析モデルにおける局所構造同定法および未測定変位の予測アルゴリズムの有効性を踏まえ⁷⁾、これらを応用した分散化構造同定法の提案を行う。

今、目視等の点検結果により構造システムの数ヶ所に劣化部分が推定され、それぞれの劣化部分を含む幾つかの部分系が設定されたとする。この各部分系に局所構造同定法を適用すると、特性行列 $[K_{I2}]$ と $[K_{2I}]$ により同定対象部分系に非同定対象部分系の影響を表現することができる(図-5)。つまり、非同定対象部分に存在する剛性劣化は局所化の過程で反映される。次に、ある部分系の局所同定結果を反映させて、別の部分系の局所同定を行うという同定過程をすべての部分系に対してサイクリックに繰返す(図-6)。最終的に、すべての部分系の同定結果が収束まで繰返しを実行し、健全率 $1-\delta k_j$ を同定する。また、同定対象部分系に未測定変位節

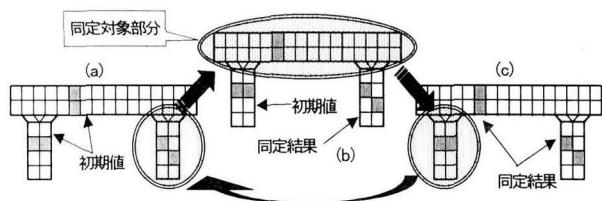


図-6 サイクリック同定の概念

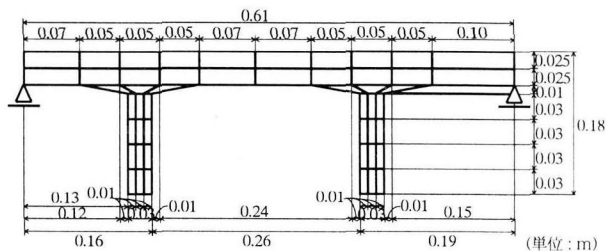


図-8 橋梁モデルの寸法

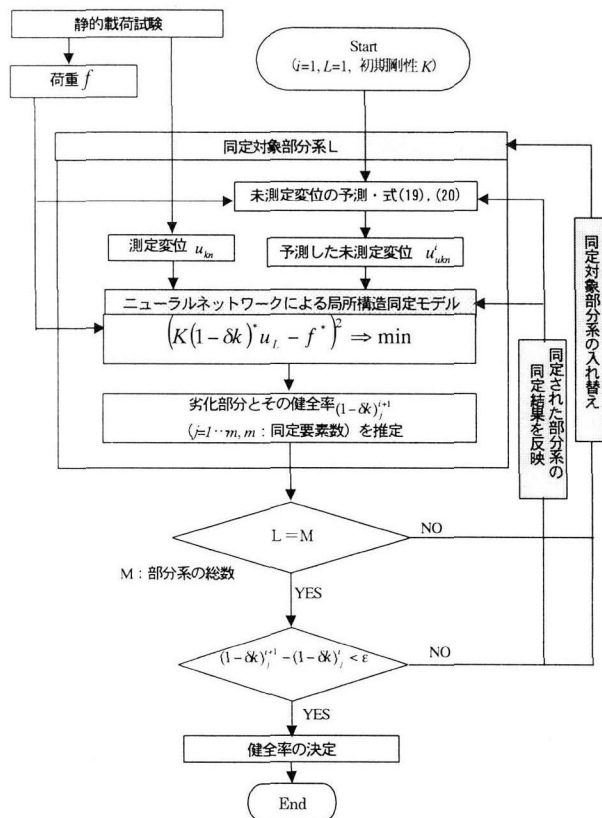


図-7 分散化構造同定法の処理の流れ

点が存在する場合は、未測定変位の予測アルゴリズムを適用することで対応する。

図-7 に分散化構造同定法の処理の流れを示す。局所構造同定とサイクリック同定によって各部分系の相互作用を考慮しつつ同定を行うことができ、未測定変位の予測アルゴリズムによって測定変位の不足に対応できる。

4. 数値シミュレーション

本研究で提案する分散化構造同定法について数値シミュレーションによって有用性を検討した。本数値シミュレーションでは、モデルの入力値である測定変位や載荷荷重は、すべて FEM による数値解析より導出された数値計算値であり、実験等による実測値ではない。具体的には、数値シミュレーションで用いた構造モデルに一定の劣化状態を設定し、静的荷重を載荷した場合の変位応答の数値計算値を入力値として利用することとした。

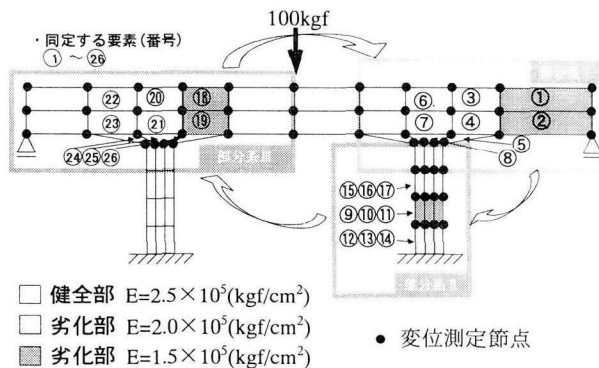


図-9 劣化要素および同定要素(番号)の設定

また、本シミュレーションでは、離散化された構造要素の劣化の度合いを表す指標を健全率 $1 - \delta_k$ で表す。例えば、構造物のある要素の剛性が全く劣化していないときの健全率を 1.00 と表し、剛性が 40% 劣化している場合の健全率を 0.60 と表す。そして、要素ごとの健全率を表すニューロンの数は 400 個、ニューロンの係数 A_w は 0.0025 と設定した。すなわち、健全率は 0~1.00 まで 0.0025 刻みで表現される。なお、ニューラルネットワークにおける伝達関数の初期温度 T_0 は 0.3 と設定した。

本数値シミュレーションで用いた構造モデルは、節点数 73、要素数 50 に離散化された 2 次元橋梁モデルであり、形状寸法は図-8 に示すとおりである。なお、劣化を設定した要素とその大きさ、さらに構造同定を行う際に設定すべき部分系と同定対象となる要素(番号)については、以下で示す個々のシミュレーションで詳述する。

また、繰返し同定過程において健全率が収束したと判定する値 ε は、1 サイクル前の健全率との差が 0.01 以内に収まった場合とした。

4.1 分散化構造同定法の有用性の検証

ここでは、分散化構造同定法の有用性を確認するため、局所構造同定法との同定精度の比較を行う。

図-8 に示す橋梁モデルにおける劣化要素は、図-9 に示すように①と②、⑨~⑪、⑬と⑭の合計 7 要素を $E=2.0 \times 10^5$ (kgf/cm²) の健全率 0.80 とし、⑫~⑭の 3 要素を $E=1.5 \times 10^5$ (kgf/cm²) の健全率 0.60 とした。そして、これらの劣化要素部分を含む一定の領域を、構造同定を行う際の部分系 I~III として、図-9 に示すように設定した。

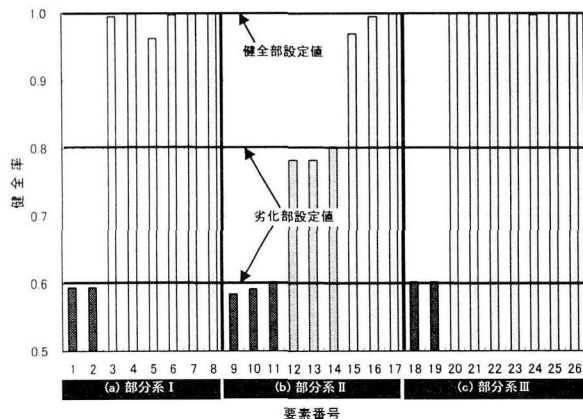


図-10 局所構造同定法による同定結果

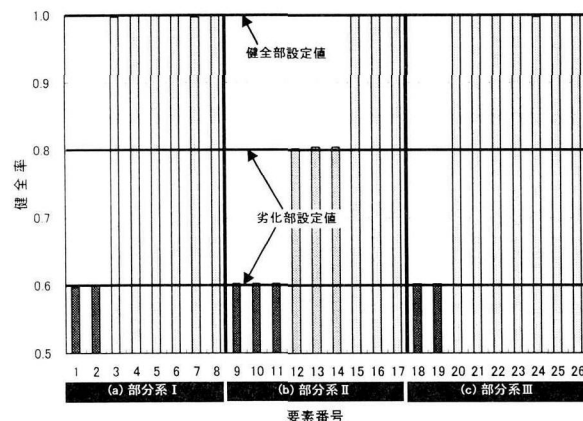


図-11 分散化構造同定法による同定結果

また、この各部分系の同定対象となる要素は、部分系Ⅰを8要素(要素①～⑧)、部分系Ⅱを9要素(要素⑨～⑰)、部分系Ⅲも9要素(要素⑱～⑳)とした。

荷重条件としては、梁上部中央に1回のみの100kgfの荷重を負荷する($nlc=1$)。入力値である節点変位は、先に述べたようにFEM数値解析によって得ることとし、得られた変位応答には誤差は含まれないものと仮定した。なお、このシミュレーションでは、各同定対象部分系に含まれるすべての節点の変位が準備されており、変位未測定節点はないものとした。

まず、このモデルについて図-9における部分系Ⅰについて局所構造同定を行った。この場合、部分系ⅡおよびⅢに含まれる劣化については健全として扱われる。図-10中の(a)の部分に同定結果を示す。同様に、部分系Ⅱ、部分系Ⅲに対して同定を行った場合の結果を、それぞれ図-10中の(b)の部分および(c)の部分に示す。同定結果としては、健全部である要素番号⑤、⑮において設定値との差がそれぞれ0.0375、0.03となり、比較的大きい差が現れた。また、劣化部では設定値0.60の要素番号⑨、⑩において、どちらも設定値との差が0.0175となった。次に、分散化構造同定法のシミュレーションとして、図-9に示すように部分系Ⅰ、部分系Ⅱ、部分系Ⅲの

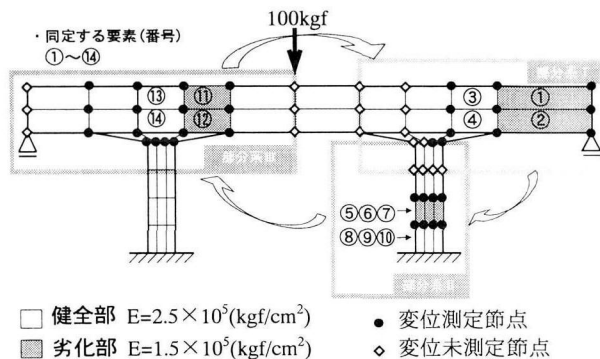


図-12 劣化要素および同定要素(番号)の設定

順にサイクリックに同定を行った。部分系Ⅰを同定する際には、部分系ⅡおよびⅢに含まれる要素はすべて健全として解析が行われるが、2回目以降の同定には先の同定結果を反映させた繰返し同定であることから、すべて要素が18サイクルで収束し、設定値とほぼ同程度の同定結果が得られた。最終同定結果を図-11に示す。同定結果としては、各要素の健全率の設定値との最大誤差は0.005であった。図-10の局所構造同定の結果と比較しても、例えば部分系Ⅱについてみると、健全率を0.6と設定した要素番号⑨、⑩、⑪については、設定値との差がすべて0.0025と減少しているとともに、健全率を0.8と設定した要素番号⑫、⑬についても、設定値との差がすべて0.0025に減少している。さらに、健全率の設定値1.0とした健全部(要素番号⑤、⑮)においては、誤差が解消され、設定値と一致した。

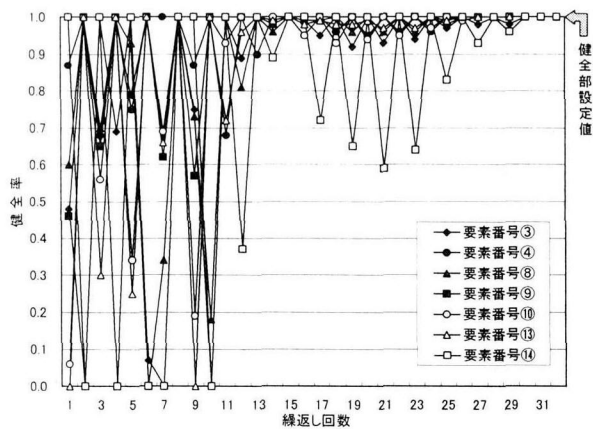
以上のことより、本研究で提案した分散化構造同定法による同定精度の向上が確認できた。

4.2 変位未測定節点がある場合の分散化構造同定法の有用性の検証

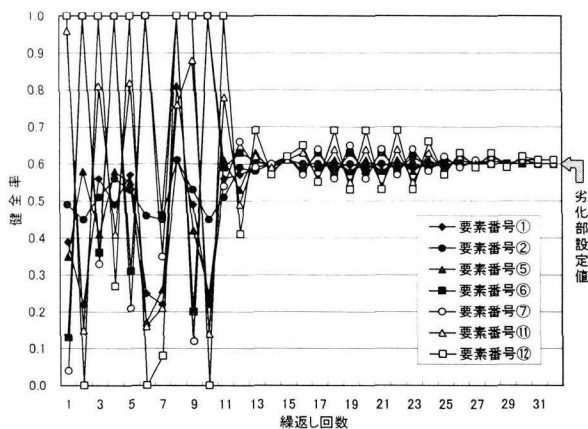
ここでは、分割された部分系の対象領域内において応答変位が測定できない節点がある場合のシミュレーションを行い、未測定変位の予測アルゴリズムを付加した分散化構造同定法の有用性を確認する。

橋梁モデルにおける劣化要素は、図-12に示すように①と②、⑤～⑦、⑪と⑫の合計7要素を $E=1.5 \times 10^5$ (kgf/cm²)の健全率0.60と設定した。そして、これらの劣化要素部分を含む一定の領域を、構造同定を行う際の部分系Ⅰ～Ⅲとして、図-12に示すように設定した。また、この各部分系の同定対象となる要素は、部分系Ⅰを4要素(要素①～④)、部分系Ⅱを6要素(要素⑤～⑩)、部分系Ⅲを4要素(要素⑪～⑭)とした。

荷重条件としては、先のシミュレーションと同様に梁上部中央に1回のみの100kgfの荷重を負荷するものとする($nlc=1$)。入力値である節点変位はFEM数値解析によって得ることとし、得られた応答変位には誤差は含まれないものと仮定した。ここで、このシミュレーション



(a) 健全部



(b) 劣化部

図-13 サイクリック同定による健全率の推移

では、図-12 の中で●印で示される節点の変位応答は FEM 数値解析によって得られたものを利用し、◇印（変位未測定節点）で示される節点の変位応答については不明であるとして解析する。そして、未測定変位の予測アルゴリズムによって繰返し計算を行い、未測定変位を予測しながら分散化構造同定を行った。

サイクリック同定は、部分Ⅰ、部分Ⅱ、部分Ⅲの順に行った。結果として、すべての要素がサイクリックな同定過程において繰返し回数 32 回で収束を示し、設定値とほぼ同程度の同定結果が得られた。図-13 は同定対象要素のサイクリック同定による健全率の推移である。健全部および劣化部ともに、かなりばらつきのある途中結果ではあるが、繰返し回数を重ねていくと次第に設定値（健全部：1.00、劣化部：0.60）に近づいている。このことは、本研究で提案した分散化構造同定法におけるサイクリック同定の有効性を示している。さらに、最終同定結果を図-14 に示す。劣化部の最大誤差は 0.01 であり、健全部では設定値と全く一致した。よって、同定対象領域内に未測定変位が含まれているケースでも、未測定変位の予測アルゴリズムを局所構造同定に組み込むことで剛性劣化が精度良く同定できることがわかった。

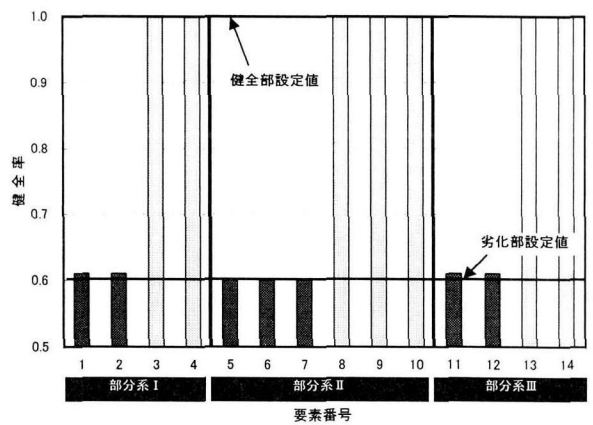


図-14 未測定変位を含む場合の分散化構造同定法による同定最終結果

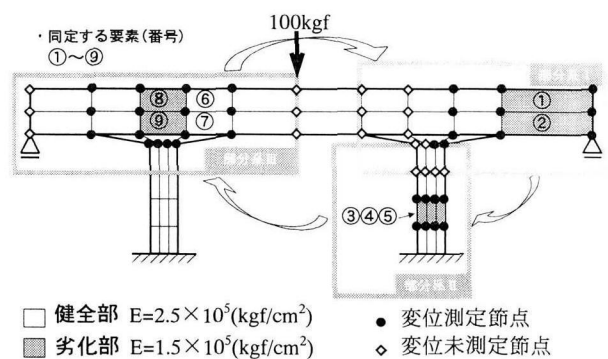


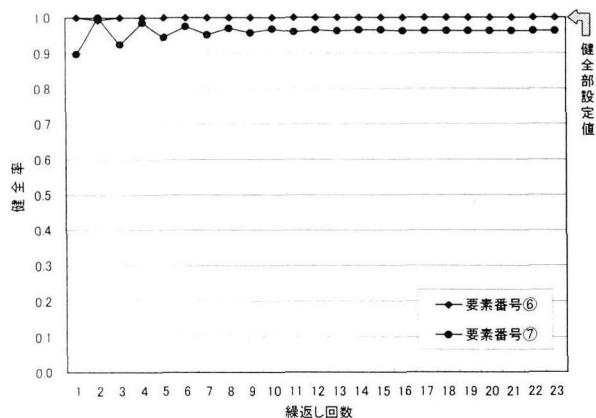
図-15 劣化要素および同定要素(番号)の設定

4.3 応答変位が誤差を含む場合の分散化構造同定法の安定性に関する検討

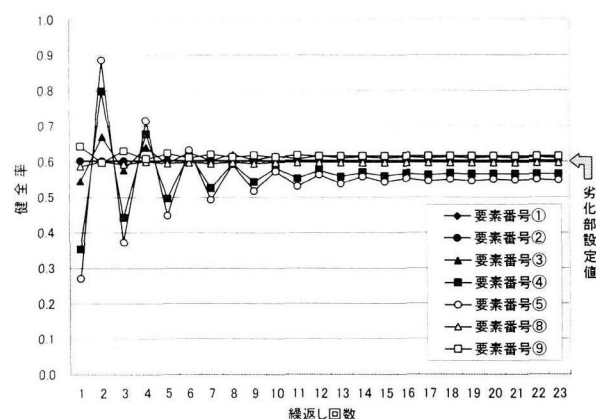
実際構造物での载荷試験において得られる静的応答変位（たわみなど）の測定値には、少なからず計測誤差が含まれてしまう。ここでは、本研究で提案する分散化構造同定法の安定性を確認するための第一段階として、変位測定節点の変位応答に任意の誤差を与え、その応答変位を用いて同定を行った場合の同定結果に及ぼす影響を調査する。そして、今後、より一般的で詳細な誤差に関する検討を実施するための事前検討とする。

橋梁モデルにおける劣化要素は、図-15 に示すように要素番号①～⑤、⑧、⑨の合計 7 要素を $E=1.5 \times 10^5$ (kgf/cm²) の健全率 0.60 と設定した。そして、これらの劣化要素部分を含む一定の領域を、構造同定を行う際の部分系Ⅰ～Ⅲとして、図-15 に示すように設定した。また、この各部分系の同定対象となる要素は、部分系Ⅰを 2 要素（要素①～②）、部分系Ⅱを 3 要素（要素③～⑤）、部分系Ⅲを 4 要素（要素⑥～⑨）とした。

荷重条件としては、これまでのシミュレーションと同様に梁上部中央に 1 回のみの 100kgf の荷重を負荷するものとする ($nlc=1$)。入力値である節点変位は FEM 数値解析によって得ることとし、得られた応答変位には著者が任意に $\pm 5\%$ の誤差を与えた。具体的には、図-15



(a) 健全部



(b) 劣化部

図-16 サイクリック同定による健全率の推移

の中で●印で示される節点の変位応答は、これまでと同様に FEM 数値解析によって得られた変位を利用し、この得られた応答変位の $\pm 5\%$ を計測誤差として、各節点の変位応答に著者らが任意に与えた。◇印(変位未測定節点)で示される節点の変位応答については不明であるとして解析した。そして、未測定変位の予測アルゴリズムによって繰返し計算を行い、未測定変位を予測しながら分散化構造同定を行った。

サイクリック同定は、部分Ⅰ、部分Ⅱ、部分Ⅲの順に行った。すべての要素がサイクリックな同定過程において繰返し回数 23 回で収束した。図-16 は同定対象要素のサイクリック同定による健全率の推移である。健全部(図-16(a))はそれほど大きなばらつきはないが、傾向としては一定値に収束している。また、劣化部について(図-16(b))は、はじめは大きかった同定結果のばらつきが、繰返し回数を重ねていくと次第に収束している。

次に、最終同定結果を図-17 に示す。設定値との差の比較的大きい要素として、劣化部の要素④、⑤では、設定値(0.60)との差がそれぞれ 0.035、0.0525 となった。また、健全部の要素⑦では、設定値(1.00)との差が 0.0375 となった。測定変位にあらかじめ与えた誤差の影響で、

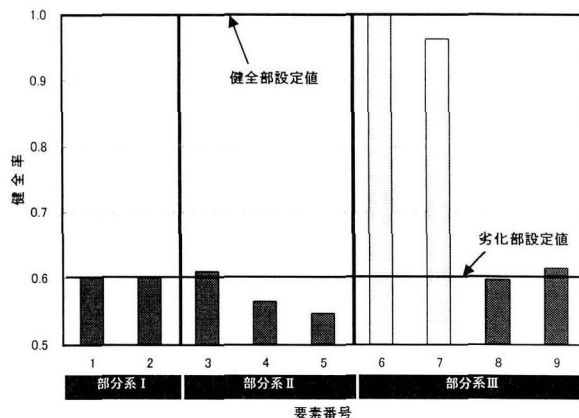


図-17 応答変位が誤差を含む場合の分散化構造同定法による同定最終結果

いくつかの要素の同定精度は下がったものの、いずれも工学的な誤差(5%)程度であり、今回のシミュレーションで設定した測定誤差のケースでは、提案した分散化同定法の安定性が確認できた。このことは、構造の局所化とサイクリック同定を組み合わせた分散化構造同定法の有効性によるものであると同時に、求解アルゴリズムとして利用した相互結合型ニューラルネットワークの適応性の高さによるものと考えられる。

以上より、今後、より一般的で詳細な誤差の検討が必要ではあるものの、同定対象領域内の測定変位に誤差が含まれるケースでも、本研究で提案した分散化構造同定法が計算モデルとして安定性があることの可能性が見いだせた。

5. おわりに

本研究では、離散化構造システムの要素レベルの健全性(健全率)を同定する離散化構造同定法を一般適用レベルまで高度化するために、構造システムの局所化とサイクリック同定を併用した分散化構造同定法を提案した。そして、分散化構造同定法の同定精度の確認を行うとともに、変位未測定節点を有する場合について数値シミュレーションを行い、分散化構造同定法の有効性を確認した。また、測定変位に誤差が含まれる場合の同定法の安定性について議論するために、測定誤差を考慮した一部のケースについて同定精度の検討を行った。以下に、本研究の結論をまとめる。

- ① 大規模で複雑な構造システムに対する効果的な構造同定のための分散化構造同定法について検討し、分散化構造同定法が、局所構造同定法とサイクリック同定の併用によって実現できること示した。
- ② 分散化構造同定法と局所構造同定法の同定精度を比較した結果、局所構造同定を用いた各部分系の同定では、構造物を部分系に分割しても、非同定対象

部分に劣化要素が入っていることで、同定結果に誤差が生じてしまい、分散化構造同定法による同定結果の精度が高いことが確認できた。

- ③ 同定対象領域内に未測定変位が含まれている場合の分散化構造同定法の有用性を検討した結果、未測定変位の予測アルゴリズムを組み込むことで健全率が精度良く同定できることが分かった。
- ④ 同定対象領域内の測定変位に誤差が含まれる場合において、一部の限定されたケースのシミュレーションを行った結果、いくつかの要素の同定精度は下がったものの、いずれも工学的な誤差程度であることが確認でき、構造の局所化とサイクリック同定を組合せた手法の有効性、求解アルゴリズムとして利用した相互結合型ニューラルネットワークの適応性や操作性の高さの影響であることが推察された。

なお、今後の課題としては、分散化構造同定法における部分領域の分割方法の検討、様々な構造形式への適用性の確認、さらに実構造物に関する適用性の確認などが挙げられる。特に、今回のシミュレーションでは限定した一部のケースしか検討を行わなかった計測誤差に関する検討では、より一般的で詳細な誤差の検討について実施する必要がある。そして、これらを解決することで、本研究で提案する分散化構造同定法は、より実用的な構造同定解析手法として活用できると思われる。

参考文献

- 1) Sanayei, M. and Scampoli, S. F. : Structural element stiffness identification from static test data, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.117, No.5, pp.1021-1036, 1991.5
- 2) Banan, M. R., Banan, M. R. and Hjelmstad, K. D. : Parameter estimation of structures from static response - I. Computational aspects, *Journal of Structural Engineering*, Vol.120, pp.3243-3258, No.11, 1994.11
- 3) Banan, M. R., Banan, M. R. Hjelmstad, K. D. : Parameter estimation of structures from static response - II. Numerical simulation studies, *Journal of structural engineering*, vol.120, pp.3359-3283, No.11, 1994.11
- 4) Wu, Z. S., Iwamatsu, S. and Harada, T. : Computational modeling on parameter estimation of large scale structures from static responses, *Proceedings of The Third Asian-Pacific Conference on Computational Mechanics*, Vol.2, pp.1105-1110, 1996.9
- 5) 呉 智深, 佐々木雄一, 原田隆郎, 岩松幸雄 : 相互結合型ニューラルネットワークによる離散化構造同定法の開発, *計算工学講演会論文集*, Vol.2, pp.781-784, 1997.5
- 6) 市来佐都子, 呉 智深 : 剛性劣化の離散化構造同定法に関する未測定変位の予測アルゴリズム, *計算工学講演会論文集*, Vol.3, pp.531-534, 1998.5
- 7) 呉 智深, 市来佐都子, 原田隆郎 : 静的な応答による複雑構造システムの剛性劣化に関する離散化構造同定法, *土木学会応用力学論文集*, Vol.3, pp.65-74, 2000.8
- 8) 鷲津久一郎他 : 有限要素法ハンドブック I - 基礎編, 培風館, 1984.12
- 9) 構造工学委員会 AL (人工生命) 技術の構造システム最適化への応用に関する研究小委員会 : 新しい構造システム最適化手法 - 人工生命技術の応用 -, *土木学会論文集*, No.543/I-36, pp.1-18, 1996.7
- 10) 矢川元基 : 計算力学と CAE シリーズ 12 - ニューラルネットワーク, 培風館, 1992.5
- 11) Sanayei, M. and Onipede, O. : Damage assessment of structural using static test data, *AIAA Journal*, Vol.29, No.7, pp.1174-1179, 1991.7
- 12) Adeli, H. and Kamal, O. : Concurrent analysis of large structure - I. Algorithms, II. Applications, *Computers and Structures*, Vol.42, No.3, pp.413-424, pp.425-432, 1992.
- 13) 長松昭男, 大熊政明 : 部分構造合成法, 培風館, 1991.1

(2001年9月14日受付)