I－A 138　分散構造同定システム構築に関する基礎的研究

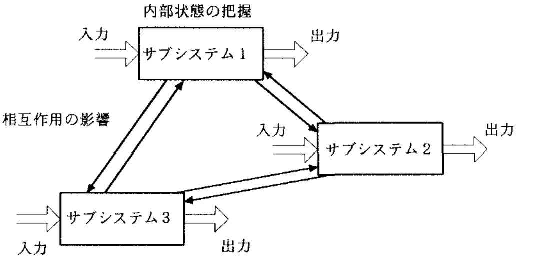
茨城大学　学生員　三宅博之　　茨城大学　フェロー　岩松幸雄
茨城大学　正会員　呉 智深　　茨城大学　正会員　原田隆郎

１．　はじめに

既存構造物の健全性診断技術や合理的な補修・耐震補強などを行うための維持管理システムを確立する気運が高まっている中、構造同定やモニタリング手法に関する研究はますます盛んになっていくと思われ、現在まで様々な構造同定手法が提案されているが、構造物の複雑さ、材料・構造システムの不確実性、観測データの制限等の問題が数多く残されている。例えば、解析手法自身の問題により同定において大きな解析誤差やノイズが含まれるのはすべてに共通の問題であり、膨大な計算により正確な同定結果を得られないこともしばしばある。そこで本論文ではまず、分散構造同定モデルの概念を提案し、各サブシステムの運動支配方程式に静的縮小法を適用することによって定式化を行う。また、各サブシステムの同定に関して、観測によって得ることが困難な固有モードは使用せず、固有振動数のみを使うことによる構造同定の適用を試みる。さらに構造物劣化度の構造同定過程においてニューラルネットワークを適用した。

２．　分散構造同定法の概念

高い精度で構造同定するためには、構造物を構成する要素間の相互作用の影響等、不確実な部分の状態把握が必要になる。ところで、大規模なシステムの複雑な結び付きをサブシステムに分散させることにより、システムをモデル化し制御する大規模システム理論[1)]がある。この理論を今回の構造同定に取り入れることにより局部的な作用の全体に対する影響を的確に表現でき、推定誤差の増大によるノイズの発生を抑えることができる。



図－１　分散構造同定システムの概念図

３．サブシステムの支配方程式

本研究では特に、サブシステム相互作用の影響を考慮に入れた精度の高い構造同定を行うために構造物を同定したい部分u_1、その他の部分u_2という２つのサブシステムに分割し、静的縮小法の適用によって定式化を行った。構造モデルは、多自由度非減衰の自由振動を例に挙げる。この構造物の運動方程式は、

$$[M]\{\ddot{u}\}+[K]\{u\}=0 \tag{1}$$

と書け、この構造物を同定対象部分、その他の部分に分割する。図－１において、サブシステム１が同定対象部分とすると、サブシステム２，３はそれぞれサブシステム１に対して相互作用の影響を与えるサブシステムとしてまとめて扱うことになる。すなわち変位ベクトル$\{u\}$、各マトリックスはそれぞれ、

$$\{u\}=\begin{Bmatrix}u_1^i\\u_2^i\end{Bmatrix},\qquad [M]=\begin{bmatrix}M_{11}&M_{12}\\M_{21}&M_{22}\end{bmatrix},\qquad [K]=\begin{bmatrix}K_{11}&K_{12}\\K_{21}&K_{22}\end{bmatrix} \tag{2}$$

とできる。また、同定すべき部分（実際構造物では劣化している場所）は、容易に限定することはできないので、分割した要素１つ１つを順次、同定対象部分として扱っていくことにする。式（２）における、iはサブシステムの数とする。式（２）を（１）に代入し、次に境界上の変位を内部変形と関連づけ未知数を減らすためにRitz式、

$$\{u\}=\begin{Bmatrix}u_1^i\\u_2^i\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}[I]\\-[K_{22}]^{-1}[K_{21}]\end{bmatrix}\{\dot{q}\} \tag{3}$$

を導入した結果を整理すると（１）式は、

$$[M^*]\{\ddot{q}_i\}+[K^*]\{q_i\}=0 \tag{4}$$

として、局所的な情報を重視した構造物の挙動を表現できる。

４．各サブシステムの同定手法[2)]

まず、先述の構造物の運動方程式を固有値問題に帰着することにより、その構造物の固有振動数、固有ベクトルを用いて構造物の挙動を表すことができる。これまでの構造同定では普通、この２つの構造パラメータを用いることにより、構造同定を行うわけだが、固有ベクトルを観測することは観測ノイズなど様々な雑音により正確なものを得るのは困難となる。そこで今回は固有振動数のみによる構造同定を提案する。

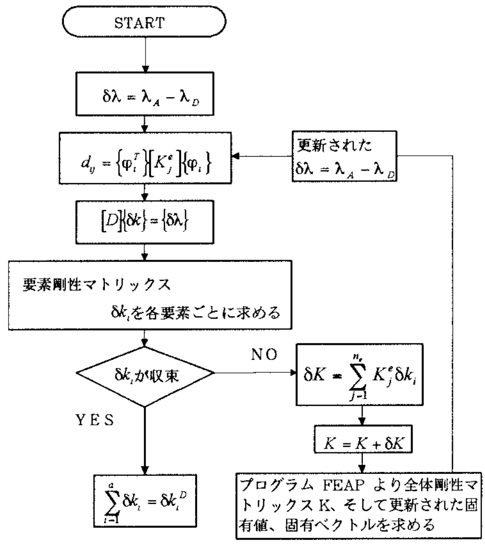
構造物の運動方程式を固有値問題に帰着することにより、（１）式は、次のように表せる。

$$\left(\left[K\right]-\{\lambda\}\left[M\right]\right)\{\varphi\}=0 \qquad (5)$$

次に構造物を、有限要素法による要素に分割し、この各要素の固有振動数により構造同定を行う。構造物が劣化した時に変化する固有振動数と局部的な要素の剛性変化を結びつけるために、剛性マトリックスの変化を独立した構造要素によって表現する。つまり劣化した構造物から観測された振動数の変化量と各要素の剛性マトリックスとを結びつけるためには、固有ベクトルと全体の剛性マトリックスにおける局部的な情報を持った行列Dを用いて、

$$\left[D\right]\{\delta k\}=\{\delta\lambda\} \qquad (6)$$

と表現できる。この方法を用いた構造同定に至るまでの手順が図－２のフロー図に書かれている。

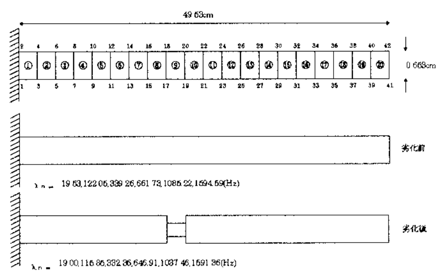


図－２　構造同定の手順

５．ニューラルネットワークによる最適化手法の提案と検証

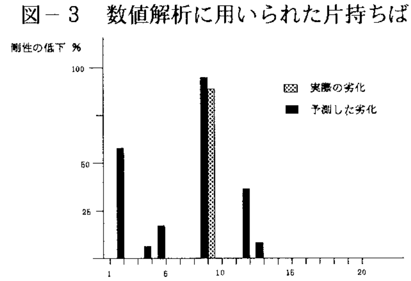
式（６）において、各要素の剛性マトリックスの変化量、固有振動数の変化量の関係が示されている。固有ベクトル、要素に関する剛性マトリックスによって作られる行列Dが正方行列（分割した要素数と入力する観測固有振動数の数が等しいとき）であればこの逆行列を求めることにより要素剛性マトリックスを知ることができるが正方行列にならない場合（現実的にこのようになる場合が多い）、この式は最適化手法によって解かなければならない。行列Dをm行n列、$\{\delta k\}$をn次ベクトル、$\{\delta\lambda\}$をm次ベクトルとし、また評価関数を$|D\delta k-\delta\lambda|^2\rightarrow 0$とおき、$\delta k_j=X_j=A\sum_{m=1}^{P}V_{jm}$とし、$\{\delta k\}$をニューラルネットワークを用いて解く。

$$\sum_{i=1}^{m}\left(\sum_{j=1}^{n}d_{ij}X_j-\lambda_i\right)^2=\sum_{i=1}^{m}\left(\sum_{j=1}^{n}\sum_{m=1}^{P}d_{ij}AV_{jm}-\lambda_i\right)^2 \qquad (7)$$



図－３　数値解析に用いられた片持ちばり

図－４は全体構造同定によるもので実際構造物では劣化していない場所でノイズが発生している。我々はこれを分散構造同定法を取り入れることによりノイズを抑える効果を確認できた。



図－４　全体構造同定による同定結果

６．まとめ

本研究では、ニューラルネットワークを適用することにより分散構造同定手法の構築を行った。この同定結果は、構造物の診断指標ばかりでなく、シミュレーション解析のための入力パラメータにも適用されることが期待できる。

＜参考文献＞

１）　田村坦之（1986）：大規模システム、昭晃堂

２）　Hassiotis and Jeong （1995） Identification of Stiffness Reduction Using Natural Frequencies :JOURNAL OF ENGINEERING MECHANICS　pp.1106-1113