I-A 137　静的な応答による既存構造物の構造同定に関する研究

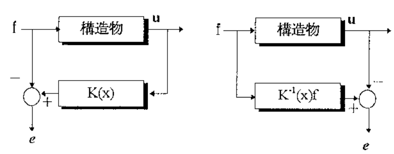
オリエンタル建設㈱　正会員　水田　敦　　茨城大学　ﾌｪｰﾛｰ　岩松　幸雄
茨城大学　正会員　呉　智深　　茨城大学　正会員　原田　隆郎
㈱富貴沢建設コンサルタント　　片柳　聡

1．はじめに

現在、剛性という要因を判断指標として構造物の健全度の判定を行う方法として、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構造同定手法の研究が活発に行われている。しかし、動的な構造同定手法の場合、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や、構造物の大型化や複雑化に伴う解析精度の低下等が考えられる。一方で、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。また、静的な応答は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、外部の負荷状況および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。そこで、本研究では静的な構造同定手法を用いることにより、構造物の剛性の低下している位置とさらに材料レベルの弾性係数あるいは、要素レベルの剛性の健全率δk_jを同定する方法についての検討を行う。同定を行うにあたり、計算量や同定するパラメータ数を減少させるために、局所的な構造同定手法を用いた構造物の離散化手法の適用によって、非線形最適化問題の定式化を行う。そして、ニューラルネットワークのエネルギー最小化原理を利用して、組み合わせ最適化問題としてパラメータを同定する。

2．静的な応答による局所的な構造同定手法の定式化

静的な情報を用いた構造同定手法は、実構造物で静的試験を行うことによって得られる応答と、その実構造物を数学的に非常に正確に再現したモデルを用いて、有限要素解析によって得られる応答の誤差（図１）とで、非線形最適化問題として設定する。構造物は、載荷荷重の大きさや荷重の載荷位置を変えることにより、独立した刺激の形で得られる静的試験に依存すると考えられている。そこで、本研究では非線形最適化問題の定式化を行うにあたり独立した刺激の回数 nlc を考慮する。



1）応力誤差　　2）変位誤差
図１　実構造物とモデルの応答誤差

ひびわれや傷といった目視による情報を利用して、構造物の劣化箇所をある程度推定することは可能である。このようにして、同定したい要素の位置を推定することにより、同定するパラメータの数を減らし計算量やノイズの影響を減らすことができると考えられる。これを局所的な構造同定手法と呼び、局所的な同定方法の定式化を行う。

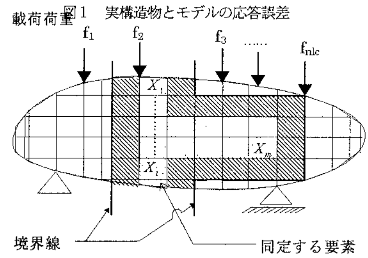


図２　静的縮小法を用いた局所構造同定離散化モデル

$$J_{r1}=\frac{1}{2}\sum_{h=1}^{nlc}\left[\alpha_h\sum_{s=1}^{n_d}\left\{\left(\sum_{j=1}^{m}\sum_{t=1}^{n_d}K_{j,s,t}\cdot\delta k_j\cdot u_{h,t}+\sum_{j=m+1}^{ne}\sum_{t=1}^{n_d}K_{j,s,t}\cdot u_{h,t}\right)-f_{h,s}\right\}^2\right] \tag{1}$$

ここで、α_hはｈ回目載荷試験の信頼度、n_dは構造システムの総自由度、ne は構造システムの総要素数、$K_{j,s,t}$はｊ番目要素より全体剛性マトリクスへの寄与であり、全体剛性マトリクスと同次元である。さらに静的縮小法を用いることにより剛性マトリックスの次元を減らし、健全率を推定したい位置（$X_1,\cdots,X_m$)のみ、構造同定を行うことが可能である。ただし、境界線に囲まれた斜線部分の要素は健全であるが、目的関数の設定上、同定する要素内に定数として存在している。この手法を用いることにより、図３のように境界線に囲まれた要素と未測定変位のみを同定すればよい。

剛性方程式において、全節点変位ベクトル$\{u\}$を二つに分け、対応して［K］,｛f｝を表す。この時、網掛けされた要素の節点の変位ベクトル$\{u_1\}$、$\{u_1\}$以外の節点変位ベクトル$\{u_2\}$とする。
ここで静的縮小法を用いることによって式(1)から次のような剛性方程式を導くことができる。

$$\{f^*\}=[K^*]\{u_1\}\qquad \{f^*\}=\{f_1\}-[K_{12}][K_{22}]^{-1}\{f_2\}\qquad [K^*]=[K_{11}]-[K_{12}][K_{22}]^{-1}[K_{21}] \tag{2}$$

この式を利用して、剛性方程式の応力誤差関数の最小二乗推定式より非線形最適化問題の定式化を行った。

$$J_{r2}=\frac{1}{2}\sum_{h=1}^{nlc}\left[\alpha_h\sum_{s=1}^{n_l}\left\{\left(\sum_{j=1}^{m}\sum_{t=1}^{n_l}K_{j,s,t}\cdot\delta k_j\cdot u_{h,t}+\sum_{j=m+1}^{ne}\sum_{t=1}^{n_l}K_{j,s,t}\cdot u_{h,t}+\sum_{j=ne+1}^{pe}\sum_{t=1}^{n_l}K_{j,s,t}\cdot u_{h,t}+\sum_{t=1}^{n_l}\left([K_{12}][K_{22}]^{-1}[K_{21}]\right)_{s,t}\cdot u_{h,t}\right)-\left(\{f_h^1\}-[K_{12}][K_{22}]^{-1}\{f_h^2\}\right)_s\right\}^2\right] \tag{3}$$

３．Hopfield 型モデルの運用および同定モデルの検証

組み合わせ最適化問題として hopfield 型ニューラルネットワークを用いて、非線形最適化問題の式(2)、式(3)より、hopfield 型モデルのエネルギー関数式(4)と比較して重みとしきい値を設定することによりパラメータの同定を行う。ただし、本研究では節点変位に関しては有限要素解析で得られたたわみを用いることで、全て既知なものとして同定を行っている。

$$E(X)=-\frac{1}{2}\sum_{jw}\sum_{j'w'}W_{jwj'w'}X_{jw}X_{j'w'}-\sum_{jw=1}^{n}h_{jw}\cdot X_{jw} \tag{4}$$

設定した重みとしきい値を用いて構造物の局所的な劣化部の同定を行い健全性を評価するため、有限要素モデルによるシミュレーションを行った。

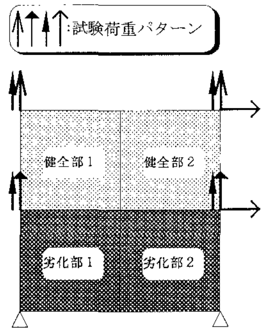


図３　局所構造同定モデル

本研究では最適解を得るために、対象モデルの全要素数、同定要素数、試験回数、さらにはニューラルネットワークで問題になる各種パラメータの設定を変更するなどして比較検討を行った。まず局所構造同定モデルとして図３のモデルを用いる。考慮する試験回数を増やして、弾性係数の劣化度の変化について見てみると、考慮する試験回数を増やすにつれ、推論値が徐々に理論値に近づくことが確認できた。さらに静的縮小法を用いた局所構造同定モデルとして図５のモデルを用いる。このモデルは、劣化部３と健全部９の１２要素からなる単純２次元梁である。このモデルに対して、同定要素数３に対して矢印で示すような荷重条件を考慮して構造同定を行った。同定する範囲が少ないため、計算を行う時間がモデルの要素全体を考慮した場合よりも短縮できることが確認できた。また図６は、このときのネットワークの推論値と理論値との比較である。このモデルでは、考慮する試験回数を増やしても、ネットワークの推論値と理論値との差はほとんど変わらず、最適解に近い値を示していることがわかった。

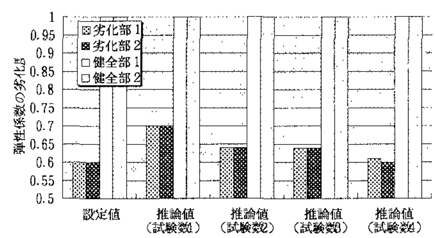


図４　試験回数を考慮した理論値と推論値の比較

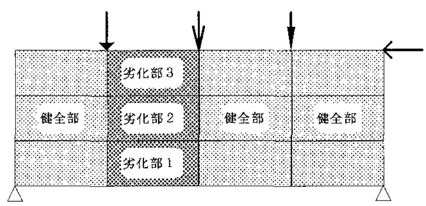


図５　静的縮小法を用いた局所構造同定モデル

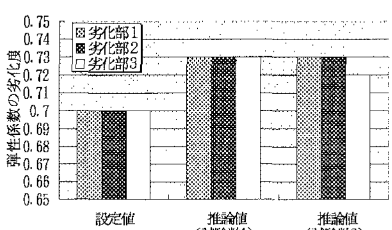


図６　静的縮小を用いた場合の推論値と理論値の比較

４．おわりに

本研究では、静的な情報による逆解析手法を用いて、構造物の健全性の評価指標として弾性係数に着目して、構造同定を行うための定式化を行った。定式化を行うにあたり、同定を行う量や時間を軽減するために、局所構造同定という考え方を用いて同定を行う定式化を行った。さらに、非線形最適化問題として定式化したものを、組合せ最適化問題として構造同定を行った。今後の課題としては、同定する要素の各節点を全て測定することは不可能と言えるので、今回既知としてあつかった未測定節点変位に関しても同定が可能な目的関数の設定を行う。

【参考文献】　片柳　聡　　水田　敦　：静的な応答による既存構造物の構造道程に関する研究
平成７年度　茨城大学工学部卒業論文　　1996.3