

遺伝的アルゴリズムを援用した構造物の振動応答予測モデル構築

堀井宏祐[†] 三木光範^{††}
小泉孝之^{††} 辻内伸好^{††}

本論文では、遺伝的アルゴリズム(GA)を援用した、統計的エネルギー解析法(SEA)による構造物の振動応答予測モデル構築法を提案する。SEAは構造物の振動応答の予測手法の1つであり、GAはSEA予測モデルを構成するSEAパラメータ同定に適用される。提案手法はテスト構造物と実建造物に対する振動応答予測によって評価された。その結果、GAによって同定されたパラメータによって構成された予測モデルは、従来の理論式によって構築された予測モデルよりも高精度の予測結果を得た。また、従来の実験的に予測モデルを構築する手法と比較して、加振試験に要する負荷の低減が得られた。

Genetic Algorithm Aided Modeling for Structures' Vibration Response Prediction

HIROSUKE HORII,[†] MITSUNORI MIKI,^{††} TAKAYUKI KOIZUMI^{††}
and NOBUTAKA TSUJIUCHI^{††}

In this paper, a genetic algorithm (GA) aided modeling for structures' vibration response prediction by the statistical energy analysis (SEA) is proposed. The SEA is a prediction method of structures' vibration response. The GA is applied to identify the SEA parameters, which constitute the SEA prediction model. The proposed method was evaluated by vibration response prediction of test structures and a real structure. As the result, the SEA prediction model which consisted of parameters identified by the GA obtained more precise prediction result than the current SEA prediction model constructed by theoretical formulas. Furthermore, the loads of experiments for constructing the prediction model are reduced than those of current experimental approach.

1. はじめに

巨大プラントから、ハードディスクまで、規模の大小を問わず、人工物の設計、製造において振動対策は重要な問題として認識されている。振動対策を行うためには、対象構造物における振動源から構造要素への振動の伝播を把握し、構造要素の振動応答を推定する必要がある。対象構造物に振動を付加した際の構造要素の振動応答を予測することによって、振動源の適切な設置位置、振動対策が必要な部位を計画することができる。

統計的エネルギー解析法(Statistical Energy Analysis, SEA)は宇宙構造物の振動応答予測手法としてLyonらによって提案された⁵⁾。その特徴は、対象構造

物を解析要素に分割、モデル化し、振動エネルギーを解析要素間のパワーフローとして理解する点にある。SEAモデルを適用する状況は、設計段階での机上の振動予測と、完成後の実構造物における振動対策に分けられる。設計段階での振動予測モデルは、構造要素の形状や材質、要素間の結合形式によって、理論式に基づいて導き出され、宇宙構造物や船舶の概念設計において有効な成果が得られている⁶⁾。一方、実構造物の振動応答予測モデルは、理論式から導き出すことが困難である。なぜなら、製造時の加工誤差や理想的でない結合状態が予測誤差につながり、誤差の積み重ねが全体的な大きな誤差につながるためである。そのため、実構造物においては、対象構造物に対する加振試験によって振動応答を計測し、予測モデルが構築される^{7),8)}。しかし、各解析要素に振動を加え、振動応答を高精度に計測することは、複雑な構造物においては負荷が高く困難である。

本研究では、SEAによる振動応答予測モデル構築

[†] 同志社大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Doshisha University

^{††} 同志社大学工学部

Faculty of Engineering, Doshisha University

に遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) を援用することを提案する．提案手法は理論式により得られた予測モデルを初期の基準値として，振動応答予測と加振試験で計測された振動応答が一致するように，GA をもちいて予測モデルを修正する．この手法によって，少ない計測データから正確な予測モデルを構築し，加振試験に要する負荷の低減を図る．

2. 統計的エネルギー解析法

本章では，SEA の基礎理論について概説し，SEA モデルの構築法について述べる．

2.1 統計的エネルギー解析法の基礎理論

まず，SEA の基礎理論について概説し，SEA の 2 要素系パワーフロー平衡式を導出する．次に，多要素系のパワーフロー平衡式へと拡張する．

SEA では，系の振動の記述にエネルギー (パワー) をもちいて，入力，内部損失，伝達パワーの釣合いで系の状態を把握する．SEA モデルは複数の要素で構成され，各要素は複数の振動モードが一様に分布し，かつ同程度に励起されたエネルギー状態にあると仮定する．この仮定によって要素間の伝達パワーは隣接する要素間のエネルギーの差に比例し，内部損失パワーは要素のエネルギーに比例するものとして扱うことが可能となる．伝達パワーの比例定数を結合損失係数 (Coupling Loss Factors, CLF)，内部損失パワーの比例定数を内部損失係数 (Internal Loss Factors, ILF) と呼ぶ．そして，要素間のパワーフローの平衡関係を定式化し，それを解くことによって各要素の持つエネルギーを算出する．算出された各要素のエネルギーから，振動，音圧状態を算出することができる．

2.1.1 2 要素系パワーフロー平衡式

図 1 に示す 2 要素で構成される系の定常状態における要素 1 と要素 2 のパワーフロー平衡式は，次式のように表される．

$$\begin{cases} Elem.1 : P_{i1} = P_{l1} + P_{12} \\ Elem.2 : P_{i2} = P_{l2} + P_{21} \end{cases} \quad (1)$$

ここで， P_{i1} ， P_{i2} は各要素への外部からの入力パワー， P_{l1} ， P_{l2} は各要素における内部損失パワー， P_{12} ， P_{21} は要素間の伝達パワーである．中心角周波数を ω ，帯域幅 $\Delta\omega$ における要素 j のエネルギーを E_j ，内部損失係数を η_j とすると，内部損失パワー P_{lj} は次式で表される．

$$P_{lj} = \omega\eta_j E_j \quad (2)$$

また，帯域幅 $\Delta\omega$ 内における要素 j のモード数を N_j とすると，平均モードエネルギー E_{mj} は次式で

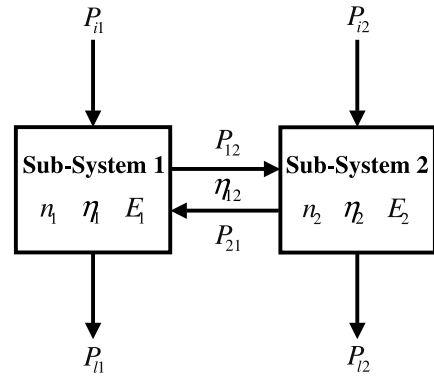


図 1 2 要素系におけるパワーフロー関係

Fig. 1 Power flow relationship between two sub-systems.

表される．

$$E_{mj} = \frac{E_j}{N_j} \quad (3)$$

要素 j から k への結合損失係数を η_{jk} とすると，要素間の伝達パワー P_{jk} は次式で表される．

$$P_{jk} = -P_{kj} = P'_{jk} - P'_{kj} \quad (4)$$

$$P'_{jk} = \omega\eta_{jk} E_j = \omega\eta_{jk} N_j E_{mj} \quad (5)$$

また，結合損失係数 η_{jk} と η_{kj} との関係は， $\eta_{jk} N_j = \eta_{kj} N_k$ で表すことができ，要素間の伝達パワー P_{jk} は次式となる．

$$\begin{aligned} P_{jk} &= \omega\eta_{jk} N_j (E_{mj} - E_{mk}) \\ &= \omega\eta_{jk} N_j \left(\frac{E_j}{N_j} - \frac{E_k}{N_k} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

したがって，式 (1) のパワーフロー平衡式は次式で表される．

$$\begin{cases} P_{i1} = \omega\eta_1 E_1 + \omega\eta_{12} N_1 \left(\frac{E_1}{N_1} - \frac{E_2}{N_2} \right) \\ P_{i2} = \omega\eta_2 E_2 + \omega\eta_{21} N_2 \left(\frac{E_2}{N_2} - \frac{E_1}{N_1} \right) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \omega \begin{bmatrix} (\eta_1 + \eta_{12})N_1 & -\eta_{12}N_1 \\ -\eta_{21}N_2 & (\eta_2 + \eta_{21})N_2 \end{bmatrix} \\ \times \begin{bmatrix} E_1/N_1 \\ E_2/N_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} P_{i1} \\ P_{i2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

中心角周波数，内部損失係数，結合損失係数，モード数を SEA パラメータと呼び，これらによって振動応答予測モデルが構築される．式 (8) に任意の入力パワー，すなわち振動源や騒音源からのエネルギーを入力することによって，各要素のエネルギー状態を算出することができる．

2.1.2 多要素系パワーフロー平衡式

前項で示した 2 要素系パワーフロー平衡式を， N 個

の要素で構成される系に拡張すると、パワーフロー平衡式は次式となる。

$$\omega \begin{bmatrix} H_1 N_1 & -\eta_{12} N_1 & \dots & -\eta_{1N} N_1 \\ -\eta_{21} N_2 & H_2 N_2 & \dots & -\eta_{2N} N_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\eta_{N1} N_N & \dots & \dots & H_N N_N \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_1/N_1 \\ E_2/N_2 \\ \vdots \\ E_N/N_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{i1} \\ P_{i2} \\ \vdots \\ P_{iN} \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここで、

$$H_j = \eta_j + \sum_{k \neq j}^N \eta_{jk} \quad (10)$$

式 (9) より、2 要素系の場合と同様に、任意の入力パワーが与えられれば、各要素のエネルギー状態が算出できる。算出されたエネルギー状態から、各要素の振動、音圧状態が算出される。

要素のエネルギーを均一な線形要素と仮定しているため、振動速度および音圧をもちいることにより、構造要素、音場要素のエネルギーは次式で表すことができる。

$$\begin{cases} \text{Struc. Elem. : } E_{St} = M \langle v^2 \rangle \\ \text{Acous. Elem. : } E_{Ac} = M \frac{\langle p^2 \rangle}{Z_0^2} \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 M は要素の質量、 $\langle v^2 \rangle$ は振動速度の空間 2 乗平均、 $\langle p^2 \rangle$ は音圧の空間 2 乗平均、 Z_0 は音場の媒質の固有音響抵抗である。

したがって、式 (9) から各要素のエネルギーが算出され、式 (11) によって振動、音圧状態が算出される。

2.2 SEA モデルの構築法

SEA モデルの構築法は、理論式に基づいて机上でパラメータを算出する理論的手法と、実際の対象構造物に対して加振試験を行い、振動応答を計測して算出する実験的手法に分類される。

理論的手法では、要素の形状や材質、結合要素の種類、要素間の結合形式によって、パラメータが算出される。しかし、理論的手法によって構築された解析モデルでは、予測誤差が大きく、利用法は対象構造物のパワーフローの傾向の把握に限定される。

精度の高い解析モデルを構築するためには、実験的手法によりパラメータを算出する必要がある。代表的な実験的手法として、パワー注入法があげられる¹⁾。パワー注入法では、各要素に振動を付加したときのエ

ネルギー状態を計測し、パラメータを算出する。以下、2 要素系を例にパワー注入法によるパラメータ算出法を示す。

2 要素系パワーフロー平衡式 (8) をモード数 N_j をもちいずに表すと、次式となる。

$$\omega \begin{bmatrix} (\eta_1 + \eta_{12}) & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & (\eta_2 + \eta_{21}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{i1} \\ P_{i2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

要素 j に振動を加えたときに計測される、要素 k のエネルギー状態を E_{kj} とすると、要素 1, 2 に振動を加えたときのパワーフロー平衡式は、それぞれ次式となる。

$$\omega \begin{bmatrix} (\eta_1 + \eta_{12}) & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & (\eta_2 + \eta_{21}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{i1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\omega \begin{bmatrix} (\eta_1 + \eta_{12}) & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & (\eta_2 + \eta_{21}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_{12} \\ E_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ P_{i2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

上式をまとめると、下式の内部損失係数と結合損失係数を未知数とする連立方程式となる。

$$\omega \begin{bmatrix} E_{11} & E_{11} & -E_{21} & 0 \\ 0 & E_{11} & -E_{21} & -E_{21} \\ -E_{12} & -E_{12} & E_{22} & 0 \\ 0 & -E_{12} & E_{22} & E_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_{12} \\ \eta_{21} \\ \eta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{i1} \\ 0 \\ 0 \\ P_{i2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

この手法では、各要素に振動を加え、その際のすべての要素におけるエネルギー状態を高精度に計測する必要がある。要素数の多い複雑な構造物を対象とすると、試験回数が増大し、非常に負荷の高い算出法である。実験的手法の実際の運用においては、計測値からのパラメータ算出式を近似することによって、計測点数を削減し、試験の負荷を低減する手法が提案されているが、近似の妥当性や適用範囲は明確でなく、手法の厳密性と構築されるモデルの安定性、実用性はトレードオフの関係があり、運用者に深い経験と知識が

要求される⁴⁾。

3. 遺伝的アルゴリズムの応用

本研究では、GA を援用して SEA モデルを構築する手法を提案する。提案手法は、理論的手法により算出した内部損失係数と結合損失係数（以下、損失係数と総称する）を初期の基準値として、予測値と加振試験の計測値が一致するように GA をもちいて損失係数の修正を行う。損失係数は $0 \leq \eta \leq 1$ の実数値であるため、実数値をそのまま染色体として扱うことができる。実数値 GA を適用する。実構造物においては製造時の加工誤差や部材の結合状態の不安定さが、理論的手法による SEA モデルの構築を困難にしており、局所的探索法による微小な修正では不十分であり、大域的探索法である GA が適切な探索法であるといえる。以下、GA および実数値 GA について概説し、SEA モデル構築への応用について述べる。

3.1 遺伝的アルゴリズム

GA は、生物進化の原理に着想を得て考案されたアルゴリズムであり、確率的探索、学習、最適手法として、幅広い分野で応用されている²⁾。

GA は、選択 交叉 突然変移のサイクルを 1 世代として、解候補集団に対して、遺伝的操作とよばれる操作を何世代にもわたって適用することによって、良好な個体を生み出し、解を得る。基本的な処理の手順を以下に示す。

- (1) 初期集団生成：一定数の個体をランダムに生成し、初期集団とする。
- (2) 選択：各個体の適合度を計算し、適合度に基づいた一定の規則によって、親となる個体を選択する。
- (3) 交叉：選択された親個体の染色体を交叉させて、次世代の子個体を生成する。
- (4) 突然変移：一定確率によって、子個体の染色体の一部を変化させる。

3.2 実数値遺伝的アルゴリズム

通常、GA においては、個体は 2 値 $\{0, 1\}$ のビット列で表現される。しかし、実数値を扱う問題においては、大域探索性能には優れているものの、他の探索手法と比較して、十分な解精度が得られないことが指摘されている。そのため、実数値 GA とよばれる、実数値ベクトルによって個体を表現する GA が提案されている。実数値 GA が通常の 2 進コード型 GA と異なる点は、交叉操作にある。2 進コード型 GA では、個体間のビット列の交換によって交叉が行われる。一方、実数値 GA においては、実数値ベクトルの単純な

交換では新たな実数値を生成することができず、親個体の持つ実数値から新たな実数値を生成する手段が必要となる。

本研究では、実数値 GA の交叉方法の 1 つである、BLX- α を採用する³⁾。BLX- α は、親個体として選択された 2 個体間の各変数の区間 I を、任意に設定される定数 α によって αI に拡張した区間から、一様乱数によってランダムに子個体の実数値ベクトルが生成される。BLX- α は親個体が離れて存在している場合、子個体は広い範囲に生成され、親個体が近くに存在している場合、子個体の生成範囲も狭まる特徴を持つ。したがって、探索の収束にともなって局所的な探索となり、精度の高い解が生成されやすくなる。

3.3 SEA モデル構築への応用

SEA モデルを構成するパラメータの中でも、特に内部損失係数と結合損失係数の精度が、振動応答予測の精度に大きな影響を与える⁸⁾。そこで本研究では、内部損失係数と結合損失係数を GA を援用して同定する。 N 個の要素で構成される SEA モデルの損失係数行列 L を下式に示す。

$$L = \begin{bmatrix} \eta_{11} & \eta_{12} & \dots & \eta_{1N} \\ \eta_{21} & \eta_{22} & \dots & \eta_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \eta_{N1} & \dots & \dots & \eta_{NN} \end{bmatrix} \quad (16)$$

N 個の要素で構成される SEA モデルは、 $N \times N$ の損失係数行列を同定しなければならないが、結合損失係数 η_{jk} と η_{kj} との関係は、 $\eta_{jk} N_j = \eta_{kj} N_k$ で表されるので、同定しなければならない結合損失係数は半減することができる。上三角要素を同定すればすべての損失係数が算出できる。よって提案手法では上三角要素の損失係数を染色体として、GA で同定する。また、直接結合していない要素間の結合損失係数は 0 であるため、染色体から取り除く。

次に、提案手法における SEA モデル構築の手順について述べる。まず、対象構造物に対して加振試験を行い、ある要素に注入パワー P を与えたときの、全要素のエネルギー状態 E を測定する。次に理論式によって損失係数行列を求め、得られた理論的な損失係数の上下 30% の範囲に GA の初期集団を生成する。パワーフロー平衡式 (9) に注入パワーの実測値 P と染色体を代入することによって予測エネルギー X を算出し、下式を目的関数として、エネルギー状態の実測値 E との 2 乗誤差を最小化する。なお、損失係数以外の SEA パラメータは理論式で算出した値をもちいる。

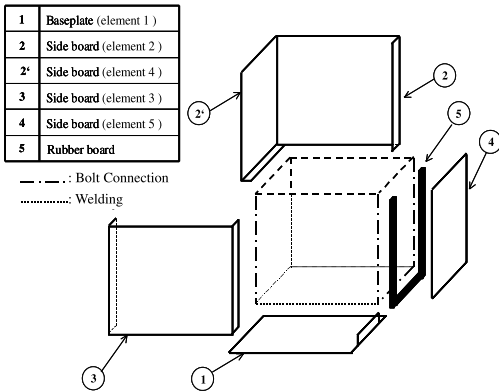


図 2 テスト構造物の構成

Fig. 2 System of test structure.

$$F(X) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{E_i - X_i}{E_i} \right)^2} \quad (17)$$

パワー注入法ではすべての解析要素に対する加振試験と高精度な振動応答計測が要求されるのに対して、提案手法では限られた加振試験データから SEA モデルを構築することができる。理論的手法より正確な SEA モデルを実験的手法より低コストで構築できることが提案手法の特徴である。

4. テスト構造物の SEA モデル構築

本章では、提案手法である GA を援用した SEA モデル構築法を、テスト構造物を対象とした振動応答予測により評価する。

4.1 テスト構造物の構成とモデル化

テスト構造物は、鋼板を材料とした 5 面マス型構造である。鋼板は溶接、折り曲げ、ボルト結合によって接合されている。SEA モデルは構造物の各面を分割して、5 つの要素で構成される。図 2 に構成図を示す。鋼板の 1 枚 (要素 5) はボルトによって着脱可能で、ゴム板を挟める構造を持つが、ゴム板は SEA モデルの要素に含まれない。ゴム板は、振動を減衰することによって、要素間の不完全な接合状態を再現する役割を持つ。また、加振試験の結果、テスト構造物では構造要素の振動が音場エネルギーとして伝達されにくいことを確認したため、音場要素は SEA モデルに含まない。

4.2 実数値遺伝的アルゴリズムにおける染色体表現

テスト構造物の SEA モデルは 5 つの要素で構成されるため、 5×5 の損失係数行列を提案手法により同定する。各要素は同じ材料であるため、内部損失係数 η_i は同じである。また、直接結合していない要素間の

結合損失係数は 0 なので、損失係数行列 L は下式となる。

$$L = \begin{bmatrix} \eta_i & \eta_{12} & \eta_{13} & \eta_{14} & \eta_{15} \\ \eta_{21} & \eta_i & 0 & \eta_{24} & \eta_{25} \\ \eta_{31} & 0 & \eta_i & \eta_{34} & \eta_{35} \\ \eta_{41} & \eta_{42} & \eta_{43} & \eta_i & 0 \\ \eta_{51} & \eta_{52} & \eta_{53} & 0 & \eta_i \end{bmatrix} \quad (18)$$

3 章で述べたように、損失係数行列の上 3 角要素のみを同定すればよいので、実数値 GA によって同定する損失係数は 9 つとなる。したがって、染色体表現は以下のとおりとなる。

$$[\eta_i, \eta_{12}, \eta_{13}, \eta_{14}, \eta_{15}, \eta_{24}, \eta_{25}, \eta_{34}, \eta_{35}]$$

4.3 実験結果

提案手法と理論的手法により構築された SEA モデルの予測値を、加振試験により得られた実測値との比較によって評価する。振動が問題となる 31.5 [Hz] から 1,000 [Hz] までを解析対象周波数とした。加振試験は、テスト構造物のゴム板を挟まない状態と、挟んだ状態のそれぞれに対して、小型インパルスハンマにより各要素を加振したときの全要素の加速度応答を測定した。

提案手法において GA は、目的関数の改善が完全に行われなくなるまで、500 世代の探索を行った。理論的手法による SEA モデル構築には、文献 6) による理論式をもちいた。なお、2 章において、理論的手法では予測誤差が生じやすいことを指摘したが、テスト構造物は加工精度が高く、結合誤差が微小であるため、予測精度評価の比較対象としている。

4.3.1 ゴム板を挟まないテスト構造物の振動応答予測

テスト構造物のゴム板を挟まない状態における、提案手法による SEA モデル構築には、要素 1 の加振試験データをもちいた。提案手法および理論的手法により構築した SEA モデルの要素 1, 2, 3 と要素 5 の間の結合損失係数の値を図 3 に示す。構築した SEA モデルによる振動応答予測の例として、要素 3 を加振したときの要素 1 の振動応答の予測値と実測値を図 4 に示す。また、要素、周波数帯域ごとの予測値と実測値との平均誤差を、提案手法により構築した SEA モデルについては図 5 に、理論的手法により構築した SEA モデルについては図 6 にそれぞれ示す。

提案手法により構築した SEA モデルは、一部の低周波数帯域を除き、すべての要素において良好な予測結果を得ている。また、理論的手法により構築した SEA モデルと比較して、予測誤差が半分程度に低減

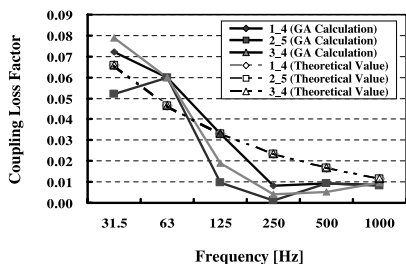


図3 テスト構造物（ゴム板なし）における結合損失係数値
Fig.3 Value of coupling loss factor at test structure (without rubber board).

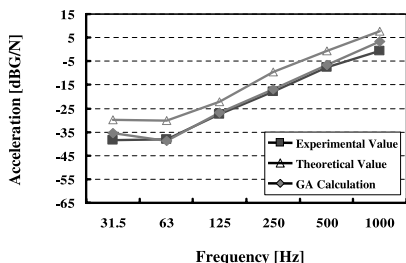


図4 テスト構造物（ゴム板なし）において、要素3を加振した際の要素1の振動応答
Fig.4 Vibration response of element 1 at hammering element 3 (without rubber board).

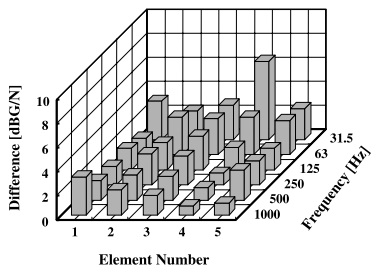


図5 テスト構造物（ゴム板なし）における、GAによって構築したSEAモデルと、計測値との振動応答の平均誤差
Fig.5 Average difference of vibration response between SEA model by GA and experimental value (without rubber board).

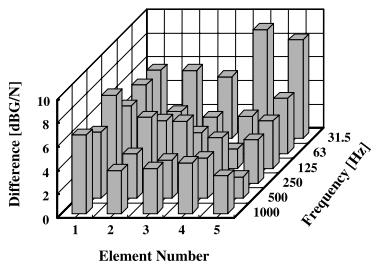


図6 テスト構造物（ゴム板なし）における、理論的手法によって構築したSEAモデルと、計測値との振動応答の平均誤差
Fig.6 Average difference of vibration response between SEA model by theoretical value and experimental value (without rubber board).

され、提案手法の優位性が確認できる。

4.3.2 ゴム板を挟んだテスト構造物の振動応答予測

テスト構造物のゴム板を挟んだ状態における、提案手法によるSEAモデル構築には、要素5の加振試験データをもちいた。提案手法および理論的手法により構築したSEAモデルの要素1, 2, 3と要素5の間の結合損失係数の値を、図7に示す。構築したSEAモデルによる振動応答予測の例として、要素3を加振したときの要素1の振動応答の予測値と実測値を図8に示す。また、要素、周波数帯域ごとの予測値と実測値との平均誤差を、提案手法により構築したSEAモデルについては図9に、理論的手法により構築したSEAモデルについては図10にそれぞれ示す。

ゴム板を挟んだ要素間では振動が大きく減衰されるが、提案手法により同定された結合損失係数は、ゴム板の装着に対応した適切な値を得ている。また、理論的手法により構築したSEAモデルでは、ゴム板を挟まない場合と比較して、予測精度が大幅に低下しているが、提案手法では、ゴム板を挟まない場合と変わらない予測精度を得ている。このことから、提案手法は加工精度の低い構造物においても適切なSEAモデルを構築できると考えられる。

5. 実建造物のSEAモデル構築

本章では提案手法によって実際の建造物のSEAモデルを構築する。ただし、対象構造物の強度に問題があり、床面以外への加振を行うことができなかったため、理論的手法により構築されたSEAモデルの、提案手法による改善についての検証とする。

5.1 実建造物の構成とモデル化

地上5階の鉄筋コンクリート構造建造物の1室を振動応答予測の対象とする。部屋は床面、コンクリート壁、軽量鉄骨間仕切壁、入口側壁、窓側壁で構成されている。床面に設備機器を設置することを想定し、床面を加振したときの各要素の振動応答解析を行う。

SEAモデルの構成図を図11に示す。対象とする部屋を中心とした、周囲の天井、床、壁面を構造要素とする。要素番号1, 6, 11, 14, 19, 22が床面、要素番号2, 7, 15がコンクリート壁、要素番号3, 8, 16が軽量鉄骨間仕切壁、要素番号4, 9, 12, 17, 20が入口側壁、要素番号5, 10, 13, 18, 21が窓側壁をそれぞれ示している。また、振動応答予測を行う構造要素（要素番号2, 3, 4, 5）に接触している空間を音場要素（要素番号23, 24, 25, 26）として、SEAモデルは26の要素で構成される。

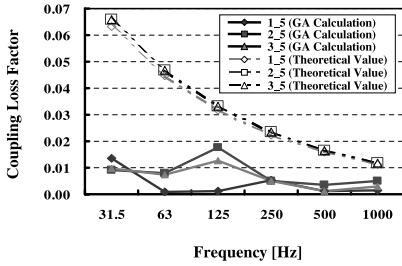


図 7 テスト構造物（ゴム板あり）における結合損失係数値
Fig. 7 Value of coupling loss factor at test structure (with rubber board).

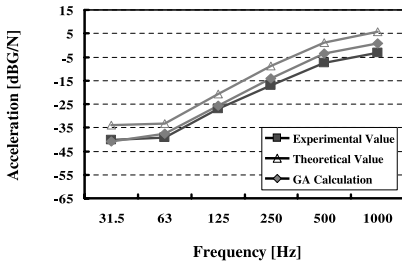


図 8 テスト構造物（ゴム板あり）において、要素 3 を加振した際の要素 1 の振動応答
Fig. 8 Vibration response of element 1 at hammering element 3 (with rubber board).

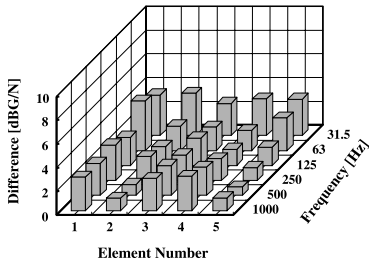


図 9 テスト構造物（ゴム板あり）における、GA によって構築した SEA モデルと、計測値との振動応答の平均誤差
Fig. 9 Average difference of vibration response between SEA model by GA and experimental value (with rubber board).

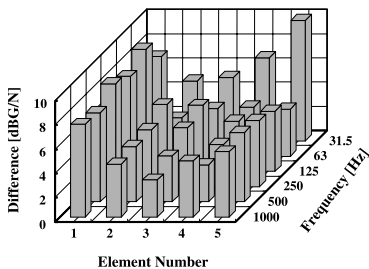
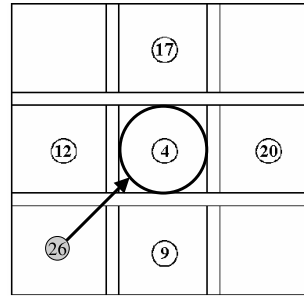
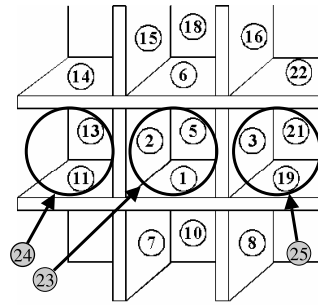


図 10 テスト構造物（ゴム板あり）における、理論的手法によって構築した SEA モデルと、計測値との振動応答の平均誤差
Fig. 10 Average difference of vibration response between SEA model by theoretical value and experimental value (with rubber board).



○ Structural Element
● Acoustical Element

図 11 実建造物の構成
Fig. 11 System of real structure.

5.2 実験結果

提案手法と理論的手法により構築された SEA モデルの予測値を、加振試験により得られた実測値との比較によって評価する。前章と同様に、振動が問題となる 31.5 [Hz] から 1,000 [Hz] までを解析対象周波数とした。加振試験はスレッジハンマ型インパルスハンマにより床面を加振したときの、他の要素の振動応答を測定した。

提案手法において GA は、目的関数の改善が完全に行われなくなるまで、500 世代の探索を行った。本実験においては、1 つの床面の加振データのみが利用できる測定データであったため、解析要素数と比較して計測データが少なく、GA の試行ごとに得られた解にばらつきが生じた。そこで提案手法による SEA モデル構築には、10 回の試行により得られた値の平均値を損失係数としてもちいた。理論的手法による SEA モデル構築には、文献 6) による理論式をもちいた。

構築した SEA モデルによる振動応答予測のうち、コンクリート壁と軽量鉄骨間仕切壁での予測値と実測値を図 12、図 13 に示す。また、要素、周波数帯域ごとの予測値と実測値との平均誤差を、提案手法により構築した SEA モデルについては図 14 に、理論的手法により構築した SEA モデルについては図 15 にそ

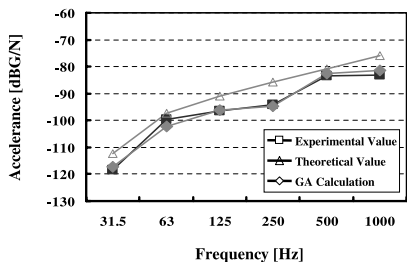


図 12 コンクリート壁の振動応答
Fig. 12 Vibration response of concrete wall.

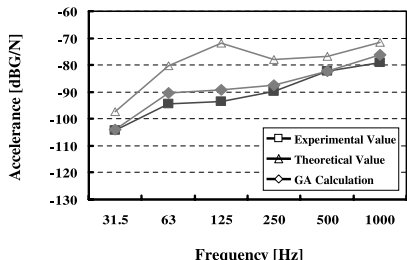


図 13 軽量鉄骨間仕切壁の振動応答
Fig. 13 Vibration response of steel partition wall.

れぞれ示す。

コンクリート壁においては、理論的手法により構築した SEA モデルの予測値もおおむね実測値と一致しているが、250 [Hz] 帯域で最大 8 [dBG/N] の誤差が生じている。一方、提案手法により構築した SEA モデルの予測値の実測値との誤差は、平均で 3 [dBG/N] 以内に収まり、理論的手法により算出された損失係数の修正が適切に行われていることが確認できる。軽量鉄骨間仕切壁においては、理論的手法により構築された SEA モデルの予測値の実測値との誤差は、平均で 8 [dBG/N]、最大で 21 [dBG/N] と予測精度が低い。これは、床面と軽量鉄骨間仕切壁との結合状態が、理想状態である直角結合に比べると弱い結合になっているためであると考えられる。一方、提案手法により構築した SEA モデルの予測値は実測値をもとにパラメータの同定を行っているため、部材の結合状態にかかわらず、すべての周波数帯域で誤差の改善がなされている。図 14、図 15 から、提案手法により構築された SEA モデルが、理論的手法により構築された SEA モデルの予測誤差をおおむね改善していることが確認できる。要素 4 の入口側壁における予測誤差が悪化しているが、加振試験データが少ないためであり、解析要素数の多い構造物においては、複数の要素に対する加振試験データをもちいることによって、予測精度の向上が得られると考えられる。

本実験では対象構造物の 1 室における 4 要素のみ

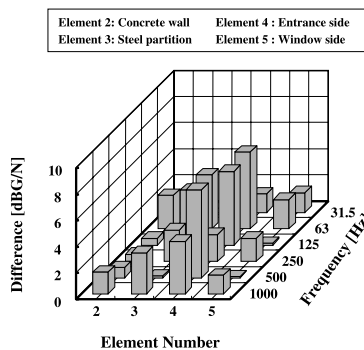


図 14 実建造物における、GA によって構築した SEA モデルと、計測値との振動応答の平均誤差

Fig. 14 Average difference of vibration response between SEA model by GA and experimental value at real structure.

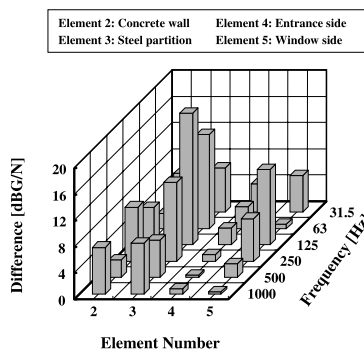


図 15 実建造物における、理論的手法により構築した SEA モデルと、計測値との振動応答の平均誤差

Fig. 15 Average difference of vibration response between SEA model by theoretical value and experimental value at real structure.

で振動応答予測を行っているが、同構造の部屋であれば、同一の SEA モデルが適用できる。また、実測値をもとに SEA パラメータの同定を行うため、理論式が明らかでない特殊な部材や結合状態を持つ構造物においても SEA モデルを構築できる点が提案手法の特徴である。

6. おわりに

本研究では GA を援用した、SEA による振動応答予測モデル構築法を提案した。提案手法は、理論的手法により算出された SEA パラメータと、対象構造物に対する加振試験によって計測された振動応答データを利用して、実数値 GA によって高精度の SEA パラメータを算出する。提案手法をテスト構造物と実建造物に対する振動応答予測モデル構築に適用した結果、理論的手法と比較して、高精度の予測結果が得られた。

また、少ない実験データから正確な予測モデルが構築できることから、実験的手法と比較して、加振試験に要する負荷の低減が得られた。

今後は複雑な構造物の予測精度向上手法についての、さらなる検討を行う必要があると考える。

謝辞 なお本研究は文部科学省からの補助を受けた同志社大学の学術フロンティア研究プロジェクト「知能情報科学とその応用」における研究の一環として行った。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Bies, D.A. and Hamid, S.: *In Situ* Determination of Loss and Coupling Loss Factors by the Power Injection Method, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.70, No.2, pp.187-204 (1980).
- 2) Davis, L.: *The Handbook of Genetic Algorithms* (1990).
- 3) Eshelman, L.J. and Schaffer J.D.: Real-Coded Genetic Algorithms and Interval Schemata, *Foundations of Genetic Algorithms*, Vol.2, pp.187-202 (1993).
- 4) Lalor, N.: Practical Consideration for the Measurement of Internal and Coupling Loss Factors on Complex Structures, ISVR Technical Report, No.182 (1990).
- 5) Lyon, R.H. and DeJong, R.G.: *Theory and Applications of Statistical Energy Analysis* (1995).
- 6) 入江良彦：SEA 法による固体伝搬音解析，日本音響学会誌，Vol.48, No.6, pp.433-444 (1992).
- 7) 鎌田 実，Lalor, N.，Stimpson, G.J.: 統計的エネルギー解析法によるエンジン・自動車振動騒音解析，自動車技術，Vol.47, No.6, pp.77-83 (1993).
- 8) 鎌田 実，山崎 徹，竹原 賛：統計的エネルギー解析法の自動車振動予測への適用に関する基礎的検討，自動車技術会論文集，Vol.28, No.4 (1997).

(平成 15 年 11 月 13 日受付)

(平成 16 年 1 月 26 日再受付)

(平成 16 年 3 月 2 日採録)



堀井 宏祐 (正会員)

2002 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。現在，同志社大学大学院工学研究科特別研究員。並列計算，数値シミュレーション，進化的計算に関する研究に従事。博士（情報科学）。



三木 光範 (正会員)

1974 年大阪市立大学大学院博士課程修了。現在，同志社大学工学部知識工学科教授。進化的計算とその並列化および知的なシステムの設計に関する研究に従事。工学博士。IEEE，日本機械学会等各会員。超並列計算研究会代表。



小泉 孝之

1969 年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。現在，同志社大学工学部エネルギー機械工学科教授。モード解析，振動・騒音制御に関する研究に従事。工学博士。日本機械学会，自動車技術会等各会員。



辻内 伸好

1982 年神戸大学大学院工学研究科修士課程修了。現在，同志社大学工学部機械システム工学科教授。振動制御，構造物の動特性同定に関する研究に従事。博士（工学）。日本機械学会，自動車技術会等各会員。