

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^{††}

[†] 同志社大学大学院工学研究科 ^{††} 同志社大学工学部

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。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、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、実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^{††}

[†] Graduate School of Engineering, Doshisha University

^{††} Faculty of Engineering, Doshisha University

In this research, a genetic algorithm (GA) aided modeling for structures' vibration response prediction by the statistical energy analysis (SEA) is proposed. 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

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¹⁾。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。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。そのため、実構造物においては、対象構造物に対する加振実験によって振動応答を計測し、予測モデルが構築される。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実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、実験に要する負荷の低減をはかる。

2 統計的エネルギー解析法

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、伝達パワーの釣合で系の状態を把握する。伝達パワーの比例定数を結合損失係数、内部損失パワーの比例定数を内部損失係数と呼ぶ。中心角周波数 ω 、内部損失係数 η_j 、結合損失係数 η_{jk} 、モード数 N_j 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。 N 要素系パワーフロー平衡式は次式となる。

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

ここで、

$$H_j = \eta_j + \sum_{k \neq j}^N \eta_{jk} \quad (2)$$

式 (1) より、任意の入力パワー P_i が与えられれば、各要素のエネルギー状態 E 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。

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、SEA モデルを構成するパラメータである、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 GA を援用して同定する。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。GA の特徴として、多点同時探索による確率的大域探索である点と、目的関数の微分値を必要とせず、目的関数が連続である必要が無い点があげられる。提案手法は、解候補を代入して多要素系パワーフロー平衡式を解き、目的関数を評価するため、GA が適切な手法であるといえる。

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。

$$L = \begin{bmatrix} \eta_1 & \eta_{12} & \dots & \eta_{1N} \\ \eta_{21} & \eta_2 & \dots & \eta_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \eta_{N1} & \dots & \dots & \eta_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

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、 $\eta_{jk} N_j = \eta_{kj} N_k$ であらわされるので、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、上 3 角要素のみを同定すれば、すべての損失係数が算出できる。よって本研究では、上 3 角要素の損失係数を染色体とする。

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実験を行い、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 (1) 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、下式を適合度関数として、エネルギー状態の実測値 E との 2 乗誤差を最

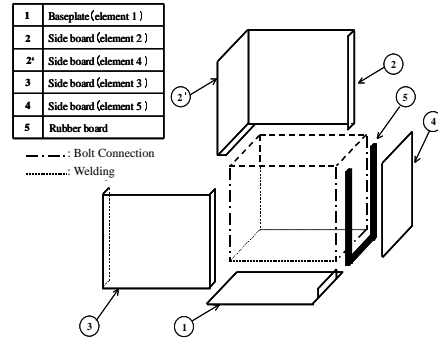


図 1: System of Test Structure.

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。

$$Fitness = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{E_i - X_i}{E_i} \right)^2} \quad (4)$$

4 テスト 構造物の振動応答予測

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。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 1 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もつが、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もつ。

提案手法による SEA モデル構築には、要素 1, 5 を加振した結果をもちいた。理論的手法による SEA モデル構築には、文献²⁾による理論式をもちいた。

テスト構造物のゴム板を挟んだ状態における、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 2 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 3 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 4 に、理論的手法により構築した SEA モデルについては図 5 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

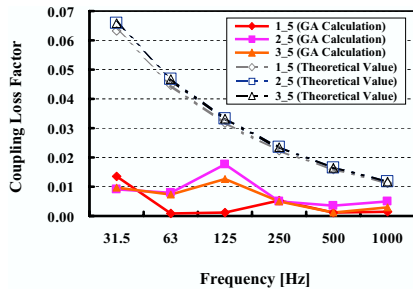


図 2: Value of Coupling Loss Factor at Test Structure with Rubber Board.

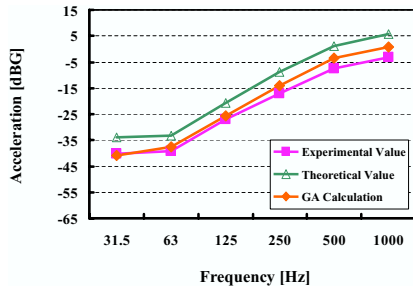


図 3: Vibration Response of Element 1 at Hammering Element 3 with Rubber Board.

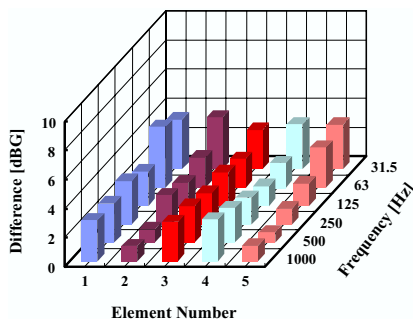


図 4: Average Difference of Vibration Response between SEA Model by GA and Experimental Value with Rubber Board.

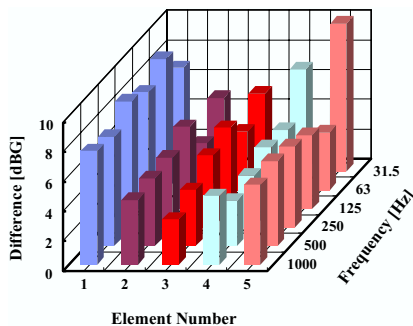
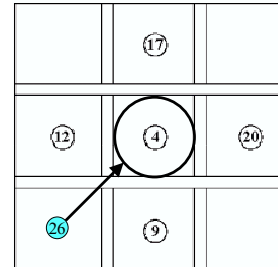
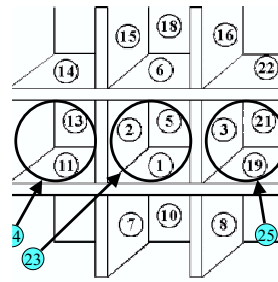


図 5: Average Difference of Vibration Response between SEA Model by Theoretical Value and Experimental Value with Rubber Board.



○ Structural Element
● Acoustical Element

図 6: System of Real Structure.

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 実建造物の振動応答予測

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予測を行う。SEA モデルの構成図を図 6 に示す。

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 7, 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。

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 モデルの予測値も概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、高い予測精度が得られている。軽量鉄骨間仕切壁においては、理論

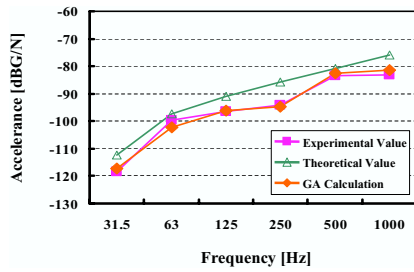


図 7: Vibration Response of Concrete Wall.

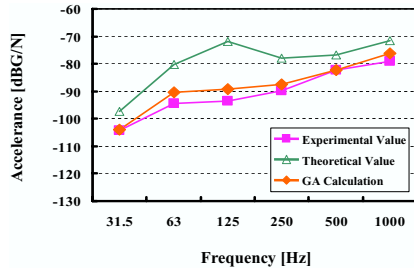


図 8: Vibration Response of Steel Partition Wall.

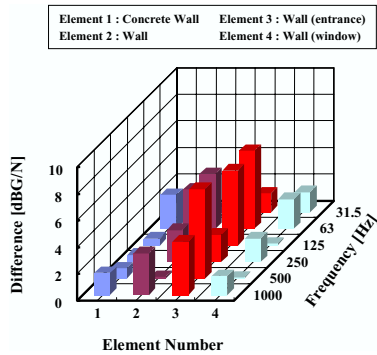


図 9: Average Difference of Vibration Response between SEA Model by GA and Experimental Value at Real Structure.

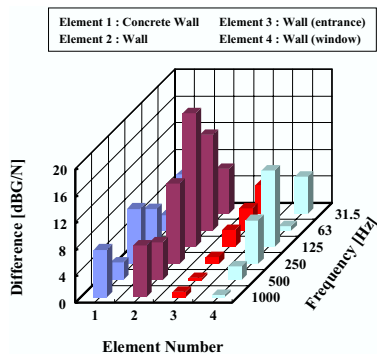


図 10: Average Difference of Vibration Response between SEA Model by Theoretical Value and Experimental Value at Real Structure.

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、全ての周波数帯域で精度良く予測できている。図 9, 図 10 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 モデルより、すべての要素において高精度の予測値を得ていることが確認できる。

本研究では、対象構造物の 1 室における 4 要素のみ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も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といえる。

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実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、加振実験に要する負荷の低減が得られた。

謝辞

本研究は文部科学省からの補助を受けた同志社大学学術フロンティア研究プロジェクトにおける研究の一環として行った。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) Lyon, R.H. and DeJong, R.G. Theory and Applications of Statistical Energy Analysis, 1995.
- 2) 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.