モード拡張法を組み込んだ補強リブ構造変更
シミュレーション*鞍谷 文 保^{*1}, 島 田 哲 夫^{*2}
山 野 惟 夫^{*3}, 小 川 武 範^{*4}Structural Modification Procedure with Mode Shape Expansion
for Rib StiffenersFumiyasu KURATANI^{*5}, Tetsuo SHIMADA,
Tadao YAMANO and Takenori OGAWA^{*5} Faculty of Education, Wakayama University,
930 Sakaedani, Wakayama-shi, Wakayama, 640-8510 Japan

This paper proposes a procedure for predicting the modal data of a thin plate structure with a rib stiffener even when the rib is attached to any location where mode shapes are not measured. The proposed procedure is based on the structural dynamics modification (SDM) method and the mode shape expansion method is incorporated to estimate the mode shape data at the unmeasured points. In the expansion process, a submodel for the area where the ribs will be attached is used instead of the whole structure model. Numerical results from a plate structure with the two L-shaped ribs show that the proposed procedure produces the accurate predictions of the modal data using the estimated mode shape data at the unmeasured points. In addition, the mode shape data is estimated accurately from the submodel with free boundary condition. Furthermore, the proper number of analytical modes to be combined in the expansion process can be determined from the condition number of the modal matrix of the submodel.

Key Words: Modal Analysis, Finite Element Method, Measurement, Structural Dynamics Modification, Mode Shape Expansion, Rib Stiffener, Condition Number, Boundary Condition

1. 緒 言

薄板構造物の振動・騒音を低減するために、補強リブを取り付けるリブ構造化が行われている。リブ構造化においては、適正なリブ配置やリブ寸法を定める必要があり、そのためにリブ補強後の振動特性を簡易に予測する方法が求められている。

リブ補強後の振動特性を再解析や再実験なしに簡易に予測する方法として、SDM (Structural Dynamics Modification) 法⁽¹⁾を基礎とした構造変更シミュレーションがある⁽²⁾⁽³⁾。この方法は、有限要素法 (FEM) 解析や実験モード解析で得られた補強前の薄板構造物のモード特性 (固有振動数、振動モード) と補強リブの質量・剛性行列だけから補強後のモード特性を予測する。予測精度を向上させるために、FEM 解析で用いられるシェル要素を導入し、リブ形状や取付け状態を正確にモデル化することが試みられた⁽⁴⁾。しかし、補

強前のモード特性として実験データを用いた場合には、センサなどの問題でリブ取付け点における回転自由度データが利用できないため、予測精度が悪くなった。そこで前報⁽⁵⁾では、モード拡張法を導入し、実験データとして利用可能な回転自由度データを推定することで予測精度を向上させた。

しかし、リブ配置の最適化を検討するためには、リブ取付け位置が測定点だけに制限されることは問題である。また前報では、モード拡張法を SDM 法に組み込む上での検討が不十分であった。

そこで本報では、前報を拡張し、補強リブが測定点以外の位置に取り付けられた場合でも、補強後のモード特性の予測が可能な補強リブ構造変更シミュレーション法を提案する。そのために、モード拡張法を用いて測定点以外のリブ取付け位置での実験データを推定する。ここで導入するモード拡張法は、リブ取付け候補領域だけをモデル化した部分モデルの振動モードの重ね合わせとして実験データを推定するので、重ね合わせるモードの数を与える必要がある。そこで、推定精度が高くなるときの重ね合わせるモードの数を決定するための指標を提示する。基礎的検討として、数値例により提案方法の有用性を検証するとともに、部分モデルの境界条件の影響についても検討する。

* 原稿受付 2004 年 9 月 17 日。

^{*1} 正員、和歌山大学教育学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷 930)。^{*2} 正員、和歌山大学システム工学部。^{*3} 兵庫教育大学学校教育学部 (〒673-1494 兵庫県加東郡社町下久米 942-1)。^{*4} 正員、兵庫教育大学学校教育学部。

E-mail: kuratani@center.wakayama-u.ac.jp

2. 理 論

2.1 構造変更シミュレーション リブ補強前の薄板構造物の固有角振動数 ω_r と振動モード $\{\phi\}_r$ は、次式の固有値問題を解くことで求まる。

$$[K^P]\{\phi\}_r - \omega_r^2[M^P]\{\phi\}_r = \{0\} \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $[M^P]$ と $[K^P]$ はそれぞれリブが取り付けられる前の薄板構造物の質量行列と剛性行列である。補強リブを取り付けたリブ補強後の固有角振動数 $\bar{\omega}_j$ と振動モード $\{\bar{\phi}\}_j$ は、式(1)に補強リブの質量行列と剛性行列を加えた次式の固有値問題を解くことで求まる。

$$([K^P] + [\Delta K^R])\{\bar{\phi}\}_j - \bar{\omega}_j^2([M^P] + [\Delta M^R])\{\bar{\phi}\}_j = \{0\} \cdots \cdots (2)$$

ここで、 $[\Delta M^R]$ と $[\Delta K^R]$ はそれぞれ補強リブ単体の質量行列と剛性行列である。

SDM 法を基礎とした構造変更シミュレーション法（以下、SDM 法と呼ぶ）の利点は、式(2)の大自由度の固有値問題を直接解くことなしに、リブ補強後のモード特性（固有振動数、振動モード）を予測できることである。SDM 法では、補強後の薄板構造物の振動モード $\{\bar{\phi}\}_j$ は補強前の振動モード $\{\phi\}_r$ の重ね合わせで、次のように表されると仮定する。

$$\{\bar{\phi}\}_j = \sum_{r=1}^N \xi_r^j \{\phi\}_r = [\Phi]\{\xi\}_j \cdots \cdots (3)$$

ここで、 ξ_r^j は補強前の振動モードを重ね合わせるときの各モードの重みで、 $[\Phi]$ と $\{\xi\}_j$ はそれぞれモード行列と重み係数ベクトルである。補強前の振動モードをモード質量が 1 となるように正規化した後、式(3)を式(2)に代入する。さらに、左からモード行列の転置 $[\Phi]^T$ を掛けて直交性を考慮することで、次式のモード座標系の方程式が得られる。

$$([\omega^2] + [\Phi]^T[\Delta K^R][\Phi])\{\xi\}_j - \bar{\omega}_j^2([I] + [\Phi]^T[\Delta M^R][\Phi])\{\xi\}_j = \{0\} \cdots \cdots (4)$$

ここで、 $[I]$ は $[\Phi]$ の要素として採用する補強前の振動モードの数 N_r と同じ次元の単位行列で、 $[\omega^2]$ は補強前の固有角振動数 ω_r の二乗を要素とする対角行列である。リブ補強後の固有角振動数 $\bar{\omega}_j$ は、式(4)の小自由度の固有値問題を解くことで求まる。

式(4)中の補強前の固有角振動数 ω_r と振動モード $\{\phi\}_r$ は、式(1)の固有値解析結果だけでなく、実験モード解析で抽出された ω_r と $\{\phi\}_r$ を用いることができる。実験データを用いた構造変更シミュレーションの

特長の一つは、固有振動数の変化を知るだけなら、実験で測定する振動モードは図1に示すようなリブ取付け点におけるデータだけでよく、構造全体の詳細な実験が必要ないことである。本報では、実験で得られた固有角振動数と振動モードで式(4)を構築することを前提とする。

2.2 補強リブの縮小行列 補強リブのモデル化精度を上げるために、リブを有限要素法（FEM）解析で用いられるのと同じシェル要素でモデル化すると、図1のように離散化した節点のいくつかは取付け面の面内にはない。このままでは対応する実験データがなく、式(4)を構築できない。そこで前報⁽⁵⁾で述べたように、静縮小法を用いて補強リブの質量行列と剛性行列を取付け点の自由度に縮小する。ここでは最終的に導かれた式だけを示すが、次式で縮小された $[\Delta M^R]$ と $[\Delta K^R]$ が算定できる。

$$\left. \begin{aligned} [\Delta M^R] &= [M_{cc}^R] - [M_{cu}^R K_{uu}^{R-1} K_{uc}^R] \\ &\quad + [K_{cu}^R K_{uu}^{R-1}] [M_{uu}^R K_{uu}^{R-1} K_{uc}^R - M_{uc}^R] \\ [\Delta K^R] &= [K_{cc}^R] - [K_{cu}^R K_{uu}^{R-1} K_{uc}^R] \end{aligned} \right\} \cdots (5)$$

ここで、右辺は補強リブの $[M^R]$ と $[K^R]$ の部分行列で、添字 c はリブモデルの節点の内、薄板に取り付く節点の自由度（結合自由度）を表し、添字 u はそれ以外の自由度（未結合自由度）を表す。

2.3 部分モデルを用いたモード拡張法 前報で、補強リブを平面シェル要素でモデル化した場合に、SDM 法の予測精度を向上させるためには、リブ取付け点における実験データとして回転自由度を含む 6 自由度のデータが必要であることを示した。そこでモード拡張法⁽⁶⁾⁽⁷⁾を導入し、リブ取付け面に垂直な方向の並進自由度データを参照し、未測定自由度のデータを推定した。本報では前報を拡張し、測定点だけでなく、測定点以外のリブ取付け候補点における並進と回転の自由度データを推定することで、リブが測定点以外の位置に取り付けられた場合にも SDM 法による予測

Fig.1 Thin plate structure with a rib stiffener

を可能とする。

モード拡張法では、推定しようとする未測定点での実験データを解析モデルの振動モードの重ね合わせで推定する。その特長は、推定しようとする未測定点と同じ節点位置および未測定自由度と同じ自由度を有する解析モデルがあればよいことで、モデルアップデートなどで解析モデルの固有振動数を実験データに合わせる必要はない。この特長を生かし、モード拡張で用いる解析モデルとして、構造全体ではなく図2に示すようなリブ取付け候補領域と測定点をモデル化した部分モデルを用いる。部分モデルを用いる利点は、モデル化の容易さと実験の簡素化である。

モード拡張法では、実験で得られた振動モード（実験モード）は、部分モデルの FEM 解析で得られた振動モード（解析モード）の重ね合わせで、次のように表されると仮定する。

$$\{\phi^x\}_r = \sum_{i=1}^{N_e} \gamma_i^r \{\phi^A\}_i = [\Phi^A] \{\gamma\}_r, \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\{\phi^x\}_r$ は実験モード、 $\{\phi^A\}_i$ と γ_i^r はそれぞれ解析モードと重ね合せるときの各モードの重み、さらに N_e は重ね合せる解析モードの数を表す。また、 $[\Phi^A]$ と $\{\gamma\}_r$ はそれぞれ部分モデルの解析モードを要素とするモード行列と重み係数ベクトルである。

重ね合せる解析モードの重みは、次のようにして決める。式(6)を次式のように、実際に測定した測定点における自由度（測定自由度）と推定しようとする未測定点における自由度（未測定自由度）に分ける。

$$\begin{Bmatrix} \phi_m^x \\ \phi_u^x \end{Bmatrix}_r = \begin{Bmatrix} \Phi_m^A \\ \Phi_u^A \end{Bmatrix} \{\gamma\}_r, \dots\dots\dots (7)$$

ここで、添字 m と u はそれぞれ測定自由度と未測定自由度を表す。式(7)の上側の測定自由度に関する式だけを取り出し

$$\{\phi_m^x\}_r = [\Phi_m^A] \{\gamma\}_r, \dots\dots\dots (8)$$

左から測定自由度だけのモード行列の一般逆行列 $[\Phi_m^A]^*$ を掛けると

Fig.2 Submodel for the mode shape expansion

$$\{\gamma\}_r = [\Phi_m^A]^* \{\phi_m^x\}_r, \dots\dots\dots (9)$$

が得られ、重み係数が求まる。なお、ここでは一般逆行列として特異値分解による一般逆行列⁽⁸⁾を用いた。

式(9)を式(7)に代入し整理することで、実験データとして利用できる未測定自由度のデータと測定自由度のスムージングされたデータを得るための次式が導かれる。

$$\begin{Bmatrix} \phi_m^E \\ \phi_u^E \end{Bmatrix}_r = \begin{Bmatrix} \Phi_m^A & \Phi_m^{A*} \\ \Phi_u^A & \Phi_m^{A*} \end{Bmatrix} \{\phi_m^x\}_r, \dots\dots\dots (10)$$

2.4 重ね合せるモード数の決定

モード拡張法で推定された振動モードデータの精度は、式(8)で用いる部分モデルの解析モードの数に影響を受ける。重ね合せるモードの数が少なければ、実際に測定された振動モードの形状を正確に表すことができず、推定精度は悪くなる。一方、重ね合せるモードの数を多くし、測定された振動モードの形状を正確に表そうとすると、重ね合せるモードの数が測定点数よりも多くなり、式(9)において一般逆行列を用いても物理的に意味のある一意的な重み係数が求まらない。そこで、測定点の状況に応じて適切な重ね合せるモードの数を決めることで、振動モードデータの推定精度が高くなると考えられる。

本報では、重ね合せるモードの数を決めるための指標として、測定自由度と同じ自由度の解析モードを要素とする式(8)のモード行列 $[\Phi_m^A]$ の条件数を用いる。モード行列の条件数は、実験モード解析において測定点や測定位置の適切さを評価する指標⁽⁹⁾、あるいは大自由度の行列を小自由度の行列に縮小するときの選択自由度の適切さを評価する指標⁽¹⁰⁾として用いられた例がある。条件数は、モード行列の特異値分解で得られる特異値の最大値 $\mu_{largest}$ と最小値 $\mu_{smallest}$ の比として、次式のように定義される。

$$\kappa([\Phi]) = \frac{\mu_{largest}}{\mu_{smallest}} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、モード行列の条件数が1に近いなら、解析モードは互いに独立で一意的な重み係数が求まる。そこでモード行列の条件数の変化を眺め、条件数が余り大きくならない範囲でなるべく多くのモードを採用すればよいと考えられる。なお条件数を求める場合に、すべての測定自由度におけるモードデータの値が0に近いモードが含まれると最小特異値が0に近くなってしまい、条件数が正しく評価できない。そこで本報では、あらかじめ測定自由度と同じ自由度のモードデータの

値がすべて 0 に近いモードをモード行列から取り除いて条件数を求める。

なお、測定点を多くして多くの解析モードを用いる場合には、別の問題として振動モードの測定誤差の影響が現れる。その対策の一つとして、既報⁷⁾で提案した MAC (Modal Assurance Criterion) 値を基に、重ね合わせる解析モードを決定するモード選択法の適用が考えられる。

2.5 計算手順 モード拡張法を組み込んだ補強リブ構造変更シミュレーションの計算手順をまとめる。

- ① 測定点およびリブ取付け候補点を含む部分モデルを作成し、解析モードを算出する。
- ② 部分モデルで定義した測定点で実験モードを測定する。
- ③ モード拡張でリブ取付け候補点における実験モードを推定する。
- ④ リブをモデル化し、質量・剛性行列を算定する。
- ⑤ 静縮小で取付け点の自由度に縮小した補強リブの質量・剛性行列を求める。
- ⑥ 推定した実験モードと縮小した質量・剛性行列から SDM 法でリブ補強後のモード特性を予測する。

3. 数 値 例

提案したモード拡張法を組み込んだ補強リブ構造変更シミュレーション法の有用性を検証する。本研究の目的は実験モードベースの構造変更シミュレーション法を提案することであるが、本報では数値例で基礎的検討を行う。

数値例では、図 3 に示す 2 枚の L 型鋼を補強リブとして取り付けた薄板構造物を取り上げた。最初に有限要素法 (FEM) 解析で、補強リブを取り付ける前のモード特性と補強リブを取り付けたときのモード特性を算出した。補強リブを取り付ける前のモード特性は真の実験データとして、補強リブを取り付けたときのモード特性は構造変更シミュレーションの真値として用いた。薄板構造物と補強リブの材料特性は、ヤング率 $E = 193\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ 、密度 $\rho = 7870\text{kg/m}^3$ とした。なお FEM 解析においては、薄板構造物と補強リブを平面シェル要素でモデル化し、境界条件は薄板構造物の両下端を完全固定とした。

3.1 真の実験データを用いた SDM モード拡張法で推定した実験データを用いた SDM 法の予測精度を評価する前に、FEM 解析で得られた真の実験データを用いて SDM 予測計算を行う。ここで予測されたモード特性は、モード拡張法で推定した実験データを用いた SDM 法の予測精度を評価するときに用いる。

ここでは、補強リブ取付け位置ごとに図 3 に示す 21 点で X、Y、Z 方向の並進と軸まわりの回転の 6 自由度すべてが測定されたと想定した。各リブは、平面シェル要素を用いて X 方向 20 分割、Y 方向と Z 方向それぞれ 2 分割し、105 節点 (21 節点 $\times$ 5 節点) を持つようにモデル化した。その後 630 自由度 (105 節点 $\times$ 6 自由度) の質量・剛性行列を X 軸に平行なリブ底面中央の 21 個の節点 (結合節点) における 126 自由度 (21 節点 $\times$ 6 自由度) の質量・剛性行列に縮小することで、測定自由度との整合性を図った。SDM 予測計算は、補強前の 1 次から 20 次までの 20 個の実験モードを用いて、リブ取付け間隔 $L=160\text{mm}$, 200mm , 240mm の 3 箇所について行った。

図 4 に、最初の 15 個のモードについて SDM 法による固有振動数の予測結果と FEM 解析による再解析結果の比較を示す。図において、すべてのリブ取付け間隔のすべてのモードで予測誤差は 5% 以下である。さらに、各リブ取付け間隔における 15 モードの約半分は、予測誤差が 1% 程度と小さくなっている。した

Fig.3 Thin plate structure model with the rib stiffeners

Fig.4 Errors in natural frequencies predicted by SDM using the exact mode shape data

がって、SDM 法でリブ補強後の固有振動数を精度よく予測できるといえる。

3・2 部分モデルを用いたモード拡張 リブ取付け面に垂直な方向の並進自由度データを参照し、未測定点の実験データを推定するときに、部分モデルを用いることの可能性と部分モデルの境界条件の影響について検討する。また、推定精度が高くなるときの重ね合わせる解析モードの数を決定するための指標として、モード行列の条件数を用いることの妥当性を調べる。

ここで用いた部分モデルを図5に示す。部分モデルはリブ取付け位置の詳細な検討が可能なように、平面シェル要素を用いてY方向に細かく分割し、231節点(21節点×11節点)を持つようにモデル化した。材料特性と板厚は全体モデルと同じである。部分モデルの境界条件としては、典型的な境界条件として、次の3条件を検討した。

- 周辺自由：4辺すべてで拘束なし
- 単純支持：Y軸に平行な両端を単純支持
- 完全固定：Y軸に平行な両端を完全固定

3・2・1 測定点数 21 点の場合 図5に示すX方向21点、Y方向3点の測定点において、Z方向の並進自由度データだけが測定されたと想定した。そのデータを参照し、3種類の境界条件で求めた解析モードを用いて、1次から20次までの20個のモードについて21点×11点における6自由度の振動モードデータを推定した。モード拡張に用いる解析モードの数は、10から40まで5ずつ増やした。なお周辺自由の境界条件では、重ね合わせる解析モードに6個の剛体モードを含めた。これは、前報⁹⁾で剛体モードを含めない場合には推定精度が悪くなったためである。

図6に重ね合わせた解析モードの数に対する推定誤差の変化を、図7に条件数の変化を示す。図6の縦軸は、推定された振動モードデータとFEM解析で求めた真の実験データとの差である。その値は、対応するモードごとに求めた成分間(モードごとに最大成分が1となるように正規化)の差の絶対値和を、成分の数で割った値の1次から20次までの20個のモードの平均値である。横軸は、測定点に対応する節点のZ方向並進自由度データがすべて0に近い(ここでは、モード質量が1となるように正規化したときに絶対値が 1×10^{-5} 以下になる)モードを除いたあとの重ね合わせた解析モードの数である。なお、周辺自由の場合は剛体モードを含めた数である。図6において、すべての境界条件で推定誤差は重ね合わせるモードの数の増加とともに安定に減少していることがわかる。一方、条件数はゆっくりと増加しているが、ここで用いた最大モード

数40まででは、それほど急激な増加は見られない。したがって、実験モードに測定誤差が含まれない場合には、測定点と重ね合わせる解析モードの関係で決まる条件数が10を超えない程度の範囲では、多くのモードを重ね合わせることで推定精度が高くなるといえる。

部分モデルの境界条件が振動モードの推定精度に及ぼす影響については、各境界条件とも40個のモードを重ね合わせたときの推定誤差の最小値を比較すると、同程度である。したがって、顕著な違いは見られない。

3・2・2 測定点数 11 点と 13 点の場合 図8に示す2つの測定点セット(測定点数11点と13点)において、Z方向の並進自由度データだけが測定されたと想定した。推定するデータは、前項と同じ21点×11点での6自由度の振動モードデータである。重ね合せ

Fig.5 Submodel for the mode shape expansion

Fig.6 Errors in the estimated mode shape data (21 measurement points per line)

Fig.7 Condition numbers (21 measurement points per line)

るモードの数は、10 から 30 まで 2 ずつ増やした。

図 9 に推定誤差の変化を、図 10 に条件数の変化を示す。図 9 において、測定点数 11 と 13 のどちらの場合もすべての境界条件で推定誤差は重ね合わせるモードの数の増加とともに減少する。しかし、さらに重ね合わせるモードの数を増やすとすべての場合に推定誤差がそれぞれの最小値になった後、増加する傾向にあることがわかる。これは、前項の測定点数 21 の場合と大きく異なる。したがって、測定点数が少ない場合には、推定精度を高くするためには適切な数の解析モードを重ね合わせる必要があり、そのためにモードの数を決める必要があることがわかる。

図 9 と図 10 において、例えば、測定点数 13 で境界条件が周辺自由の場合では、重ね合わせるモードの数が 24 のときに推定誤差が最小となっている。一方、対

Fig.8 Measurement points

Fig.9 Errors in the estimated mode shape data (11 & 13 measurement points per line)

Fig.10 Condition numbers (11 & 13 measurement points per line)

応する条件数の変化は、重ね合わせるモードの数が 22 と 24 の間で急激に増加している。他の場合も推定誤差が最小となるときに重ね合わせるモードの数の近傍で、条件数が急激に増加する傾向にあることがわかる。したがって、条件数の変化を調べることで、適切な重ね合わせるモードの数を決めることが可能だといえる。

測定点数が 11 で周辺自由の場合、推定誤差の最小値が他の場合と比べて大きくなっている。また、重ね合わせるモードの数が少ないときから条件数も大きくなっている。これは周辺自由の場合、図 8 の測定点数 11 では測定点数が不足しているために、多くのモードを重ね合わせるができず、推定誤差が大きくなったと考えられる。したがって、推定精度を高くするためには多くのモードを重ね合わせた方がよいが、そのためには適切な数の測定点数が必要であるといえる。

部分モデルの境界条件が振動モードの推定精度に及ぼす影響については、測定点数が 13 の場合の各境界条件の推定誤差の最小値を比較すると、同程度である。したがって、前項と同様に顕著な違いは見られない。

3.3 推定された実験モードを用いた SDM 前節で推定した振動モードデータを用いて SDM 法で予測計算を行い、モード拡張法の推定精度が SDM 法の予測精度に及ぼす影響を調べる。ここで用いるデータは、測定点数 13 の場合に各境界条件で誤差が最小となったときの振動モードデータとした。

ここでは、推定された振動モードデータを用いた SDM 法の予測結果を 3.1 節の FEM 解析で得られた真の実験モードを用いた SDM 予測結果と比較した。SDM 予測計算は、3.1 節と同じ 1 次から 20 次までの 20 個のモードを用いて、リブ取付け間隔 $L=160\text{mm}$, 200mm , 240mm の 3 箇所について行った。 $L=160\text{mm}$ と 240mm は、図 3 に示す左側のリブの底面中央の結合節点が図 5 の端からそれぞれ 120mm と 80mm の位置になる（右側のリブも同様）ので、リブが測定点以外の位置に取り付けられた場合に相当する。

図 11 に、真の実験モードを用いた SDM 予測結果との相対予測誤差を示す。境界条件が周辺自由と単純支持の場合は、リブ取付け間隔 $L=200\text{mm}$ の 1 次モードを除いて予測誤差が 2% 以下である。さらに、各リブ取付け間隔における 15 モードの半分以上は、1% 以下の小さな誤差となっている。境界条件が完全固定の場合は、すべてのリブ取付け間隔の 4 次モードに予測誤差の大きいものが見られるが、それを除けば周辺自由、単純支持の場合と同程度である。したがって、リブが測定点以外の位置に取り付けられた場合でも、前節で推定された振動モードデータを用いて真の実験デ

Fig.11 Relative errors in natural frequencies predicted by SDM using the estimated mode shape data (□: free, ▒: supported and ■: fixed)

ータを用いた場合とほぼ同じ精度で固有振動数が予測できているといえる。

以上のことより、部分モデルを用いたモード拡張法で実験データとして利用可能な振動モードデータが十分に推定可能である。その結果、補強リブが測定点以外の位置に取り付けられた場合でも、本報で提案するモード拡張法を組み込んだ補強リブ構造変更シミュレーション法で精度よくリブ補強後のモード特性が予測可能であるといえる。

なお、部分モデルの境界条件の影響は、適切な数の解析モードを重ね合せたときにはモード拡張さらにSDM予測においてもそれほど大きくない。したがって、設定の容易さからも部分モデルの境界条件としては周辺自由がよいと考えられる。

4. 結 言

本報では、補強リブが測定点以外の位置に取り付けられた場合でも、補強後のモード特性の予測が可能な補強リブ構造変更シミュレーション法を提案した。測定点以外のリブ取付け点の実験データを推定するために、部分モデルを用いたモード拡張法を組み込んだ。モード拡張法の推定精度を向上させるために、重ね合わせる解析モードの数を決定するための指標として、部分モデルのモード行列の条件数を用いた。また、部分モデルの境界条件の影響についても検討した。

数値例で提案方法の有用性および境界条件の影響について検討した結果、以下のことが明らかになった。

(1) 補強リブが測定点以外の位置に取り付けられた場合でも、提案方法で精度よくリブ補強後のモード特性が予測できる。

(2) 部分モデルを用いたモード拡張法で、実験データとして利用可能な未測定点での振動モードデータが十分に推定可能である。ただし、推定精度を高くするためには多くのモードを重ね合せた方がよいが、そのためには適切な数の測定点数が必要である。

(3) モード拡張において、測定点数が少ない場合には適切な数の解析モードを重ね合わせる必要がある。そのモードの数は、部分モデルのモード行列の条件数の変化を調べることで決定することが可能である。

(4) 部分モデルの境界条件の影響は、モード拡張さらにSDM予測においてもそれほど大きくない。したがって、設定の容易さからも部分モデルの境界条件としては周辺自由がよい。

謝 辞

本研究の一部は平成 15・16 年度文部科学省科学研究費補助金 基盤研究(C)(2) (課題番号 15560198) の助成を受けたものである。記して謝意を表する。

文 献

- (1) Formenti, D. and Welaratra, S., Structural Dynamics Modification- An Extension to Modal Analysis, SAE paper No.811043, Oct.(1980).
- (2) Tayeb, M.M. and Williams, E.J., Rib Stiffeners for Use in Structural Dynamics Modification, Proc. 6th International Modal Analysis Conference, (1988), 1094-1099.
- (3) Wallack, P., Skoog, P. and Richardson, M., Comparison of Analytical and Experimental Rib Stiffener Modifications to a Structure, Proc. 7th International Modal Analysis Conference, (1989), 965-973.
- (4) Schwarz, B.J. and Richardson, M.H., Structural Modifications using Higher Order Elements, Proc. 15th International Modal Analysis Conference, (1997), 313-318.
- (5) 鞍谷文保・山野惟夫・小川武範, シェル要素でモデル化された補強リブの構造変更シミュレーション, 機論, 68-676, C(2002), 3479-3485.
- (6) O'Callahan, J., ほか 3 名, An Efficient Method of Determining Rotational Degrees of Freedom from Analytical and Experimental Modal Data, Proc. 4th International Modal Analysis Conference, (1986), 50-58.
- (7) 鞍谷文保・岩壺卓三・沖田耕三, 数値解析の援用による回転自由度モードの推定 (重ね合わせるモードの選択に関する検討), 機論, 62-603, C(1996), 4205-4211.
- (8) 中川 徹・小柳義夫, 最小二乗法による実験データ解析, (1989), 76, 東京大学出版会.
- (9) Penny, J.E.T., Friswell, M.I. and Garvey, S.D., The Automatic Choice of Measurement Locations for Dynamic Testing, Proc. 10th International Modal Analysis Conference, (1992), 30-36.
- (10) O'Callahan, J. and Li, P., An Automatic Selection of Reduced Degrees of Freedom, Proc. 12th International Modal Analysis Conference, (1994), 481-485.