

反共振周波数変化に基づく CFRP 積層梁のはく離領域の判定*

稲田 貴臣 *1, 島村 佳伸 *2
轟 章 *2, 小林 英男 *2

Delaminated Domain Location of CFRP Laminated Beams Using Anti-Resonance Frequency Change

Takaomi INADA, Yoshinobu SHIMAMURA,
Akira TODOROKI and Hideo KOBAYASHI

Recently composite laminated structures have been applied to many structures of vehicles. Because of its low interlaminar strength, delamination can be generated in the structures easily by external impact forces. Since the existence of delamination degrades compression stiffness of the structures, it is very important to identify delamination nondestructively. In the present study, we propose the delaminated domain location method of CFRP laminated beams using anti-resonance frequency change. The anti-resonance frequencies on a frequency response function are changed from an intact state by existence of delamination. The criteria for judging existence of a delamination between the actuation point and the measurement point on vibration test is devised. The present method is applied to delaminated domain location of CFRP laminated beams and the effectiveness of the present method is shown.

Key Words: Composite Material, Laminated Construction, Delamination, Anti-Resonance Frequency, Delamination Detection

1 緒 言

CFRP をはじめとする繊維強化プラスチックは金属等の従来材料と比較して比強度・比剛性の面で優れており、航空宇宙分野をはじめとする大型構造への適用が進んでいる。FRP は積層構造で利用されることが多い。しかし、積層構造では層間強度が低いいため、外部衝撃等による層間のはく離の形成が問題となる。一般に層間のはく離は目視困難であり、構造の圧縮強度・剛性を大きく低下させるため、非破壊的にその位置・大きさを同定することが重要となる。そこで近年、損傷による構造の動特性変化を利用した損傷同定手法が注目されている⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。

積層構造では層間のはく離以外にも繊維破断やマトリックス割れといった損傷が考えられ、実際にはこれらの損傷を伴った状態ではく離が形成される。繊維破断を伴うはく離では剛性低下が明確であるため、FEM 解析等において積層断面のはく離を緻密にモデル化する

必要はなく、断面全体が一様に剛性低下したモデルとして近似可能である。この場合、低次モードの固有振動数変化から CFRP 積層片持ち梁の剛性低下部分の位置等を同定可能であることが明らかにされている⁽¹⁾。固有振動数はモード解析で簡単に求めることができるため、損傷同定パラメータとして有望視されている^{(1),(5)}。しかし、マトリックス割れのみを伴う軽微なはく離では明確な剛性低下は生じず、はく離による固有振動数変化量も一様な剛性低下として近似可能な場合とは異なる⁽⁸⁾。その結果、低次モードの固有振動数変化だけでは CFRP 積層片持ち梁に存在するはく離の位置を同定できない場合がある⁽⁶⁾。また、はく離の種類に関わらず、両端固定梁のような対称構造では、はく離位置に関する梁の固有振動数変化も対称となるため、固有振動数変化のみによるはく離位置同定は不可能である。このような対称構造におけるはく離位置同定を可能にするためには、固有振動数以外にはく離の存在領域を大まかに判定できるパラメータが必要である。

損傷の有無のみを判定可能なパラメータとして、反共振周波数変化の利用が検討されている⁽⁹⁾。共振周波数がモード解析時の加振位置や応答測定位置に依存しな

*原稿受付 2001 年 2 月 20 日。

*1 正員, 東京工業大学大学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

*2 正員, 東京工業大学大学院理工学研究所
E-mail: tinada@ginza.mes.titech.ac.jp

い全体項であるのに対して、反共振周波数はこれらの位置に依存して変化する局所項であり、共振周波数(固有振動数)と同様にモード解析で求めた周波数応答関数から簡単に特定できる。均質対称梁の解析においてその有効性が明らかにされているが、対称構造における周波数応答関数の対称性を利用するため、対称構造以外への適用は不可能であり、複合材料積層構造のはく離領域判定に対する有効性も不明である。

本研究では、対称構造以外への適用性も考慮し、健全状態からの反共振周波数変化に基づくはく離領域の判定手法を考案し、それを対称構造である両端固定梁と非対称構造である片持ち梁のはく離領域の判定に適用し、その有効性を検証した。

2 はく離領域判定の原理

2.1 反共振周波数 反共振とは異なる固有モード同士の位相が逆であるために打ち消しあう現象のことであり、物理的には構造の任意点の応答が極小となる状態を意味する。

図 1 に有限要素法で求めた、全長 200mm、板厚 1.45mm、積層構成 $[0_2/90_2]_S$ の両端固定梁を 427Hz で加振した際の振動形状を示す。ただし、縦軸と横軸はそれぞれ梁の最大たわみ、梁の全長で正規化した。解析で使用した一方向 CFRP ラミナの材料定数を表 1 に示す。なお、解析の際の加振位置は左端から 10mm(0.05)の位置とした。ここで、括弧内の数字は梁の全長で正規化した値である。

図 1 に示す 427Hz における振動形状は主として 1 次モードと 2 次モードの混合で形成されており(図中参照)、左端から 60mm(0.3)付近の点 A の変位がゼロになる。実際には 1 次、2 次以外のモードも混入するために厳密にはゼロとはならないが、図 2 に示す点 A のたわみの周波数応答上では 427Hz 付近に溝が生じる。周波数応答上のこの溝を反共振点、そのときの周波数を反共振周波数と呼ぶ。ここで、加振周波数が異なると 1 次モードと 2 次モードの混合割合が変化し、図 1 の点 A のように変位がゼロとなる位置(節)も変化する。例えば、加振周波数を 427Hz から徐々に 2 次の共振周波数(757Hz)まで上昇させる場合、2 次モードの割合の増加にしたがい節の位置は右端側に移動し、最終的に梁中央の 2 次モードの節と一致する。したがって、加振点が同一の場合にも、梁のたわみを測定する梁長手方向の位置(応答点)が異なると反共振周波数は異なる。

2.2 3 自由度質量バネ系モデルによる推論 両端固定梁のような対称構造では、はく離位置に関する

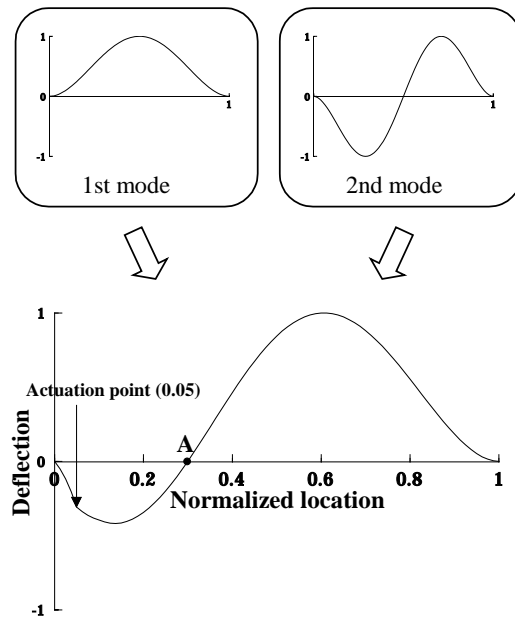


Fig.1 Vibration shape of a CFRP fixed-fixed end beam (Frequency=427Hz)

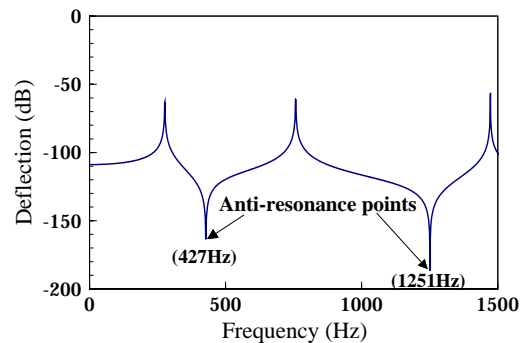


Fig.2 Deflection frequency response of the CFRP beam at point A

Table1 Material properties of unidirectional CFRP lamina

Longitudinal modulus E_1	91.5 GPa
Transverse modulus $E_2 (=E_3)$	8.5 GPa
Longitudinal shear modulus $G_{12} (=G_{13})$	4.3 GPa
Transverse shear modulus G_{23}	3.15 GPa
Major Poisson's ratio $\nu_{12} (= \nu_{13})$	0.31
Transverse Poisson's ratio ν_{23}	0.35
Density ρ	1466 kg/m ³

梁の固有振動数変化も対称となるため、固有振動数変化に基づき対称軸に関して対称な 2 つの同定結果を得ることはできるが、正解がどちらであるのかは判定できない。そこで本研究では正解を判定するための手法

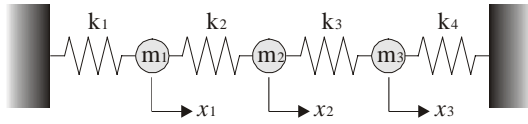


Fig.3 3 dof mass-spring model

として、反共振周波数変化に基づくはく離領域判定手法を検討する。

はく離の位置と反共振周波数変化の関係について、図3に示す簡単な力学モデルで考える。図3は、3つの質点 ($m_1 \sim m_3$) と4つのバネ ($k_1 \sim k_4$) からなる3自由度質量バネ系モデルであり、両端を固定とした。図3に示す系が自由振動する際の運動方程式は、力のつりあいから次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3+k_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 m_1, m_2, m_3 はそれぞれ質点 m_1, m_2, m_3 の質量であり、 k_1, k_2, k_3, k_4 はそれぞれバネ k_1, k_2, k_3, k_4 のバネ定数である。式(1)の解を複素指数関数の形で仮定して式(1)に代入すると、系の特性行列[G]が得られる。

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -\Omega^2 m_1 + k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & -\Omega^2 m_2 + k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & -\Omega^2 m_3 + k_3 + k_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

共振周波数(固有振動数)が系の特性行列[G]の行列式を0とする Ω (周波数)であるのに対して、加振点が*i*点で応答点が*j*点の周波数応答関数の反共振周波数は、特性行列の*j*行目と*i*列目を除いた余因子行列の行列式を0とする Ω として求めることができる⁽⁹⁾。ここでは、加振点を質点 m_1 、応答点を質点 m_2 とした場合の周波数応答関数の反共振周波数を利用して、はく離位置と反共振周波数変化の関係を検討する。

まず、健全な場合を考える。式(2)において $m_1=m_2=m_3=m, k_1=k_2=k_3=k_4=k$ と置き換え、2行目と1列目を除いた余因子行列から反共振周波数を計算すると次式となる。

$$\Omega_{Intact} = \sqrt{\frac{2k}{m}} \quad (3)$$

本研究では、この健全状態における系の反共振周波数を基準とし、この基準周波数からの変化に基づきはく離領域を判定する。

次に、はく離がある場合を考える。ここで、はく離はバネ定数の低下として近似する。反共振周波数に対するはく離位置の影響を調べるため、(a)バネ k_2 のバネ定数が他のバネよりも20%低い場合 ($k_2=0.8k$)、(b)バネ k_3 のバネ定数が他のバネよりも20%低い場合 ($k_3=0.8k$) の2通りを考える。健全な場合と同様に計算すると、(a)の場合の反共振周波数は

$$\Omega_{Damaged(k_2)} = \sqrt{\frac{2k}{m}} (= \Omega_{Intact}) \quad (4)$$

となり、これは健全な場合と一致する。一方、(b)の場合の反共振周波数は

$$\Omega_{Damaged(k_3)} = \sqrt{\frac{1.8k}{m}} (< \Omega_{Intact}) \quad (5)$$

となり、健全な場合よりも低下する。

以上より、任意の加振点 - 応答点間にはく離が存在しても、その周波数応答関数上の反共振周波数は健全状態に比べて変化しないが、加振点 - 応答点間の外にはく離が存在する場合には、健全状態よりも反共振周波数が低下することがわかる。逆に言えば、健全状態からの反共振周波数変化に基づき、はく離の存在領域を判定可能である。ただし、3自由度質量バネ系においてははく離をバネ定数低下とした場合の推論結果であり、検証が必要である。

3 周波数応答解析手順

健全状態からの反共振周波数変化に基づくはく離領域判定の有効性を検証するため、汎用有限要素法ソフト ANSYS Rev.5.6 を利用して CFRP 積層梁の周波数応答解析を実施した。本研究では単一の層間にはく離が存在する場合を想定し、両端固定梁においてははく離の位置と反共振周波数変化の関係を検証するとともに、反共振周波数変化に基づくはく離領域判定基準を考案し、対称構造である両端固定梁と非対称構造である片持ち梁においてその有効性を検証する。

解析で使用した両端固定梁の有限要素モデルを図4に示す。図4において、積層構成は $[0_2/90_2]_s$ 、長さ L 、幅 b 、厚さ h はそれぞれ 200mm、19mm、1.45mm とした。一部の片側 0/90 層間がはく離した状態を模擬するため、積層シェル要素を用いて積層構成が $[0_2/90_4]$ と $[0_2]$ の2つの梁を作成し、積層構成が $[0_2/90_2]_s$ となるようにこれらを上下に重ねる。このとき、上側の梁 ($[0_2/90_4]$) の節点を梁下面、下側の梁 ($[0_2]$) の節点を梁上面に配置し、上下の要素の節点を同一位置に配置する。そして、はく離部以外では上下の要素の節点同士を完全に

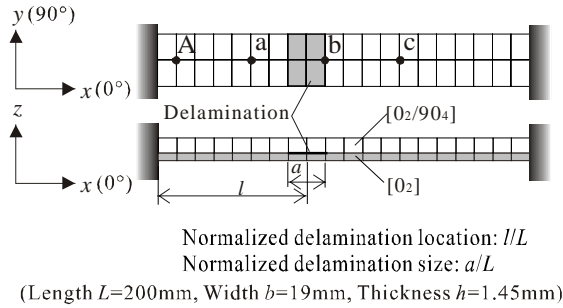


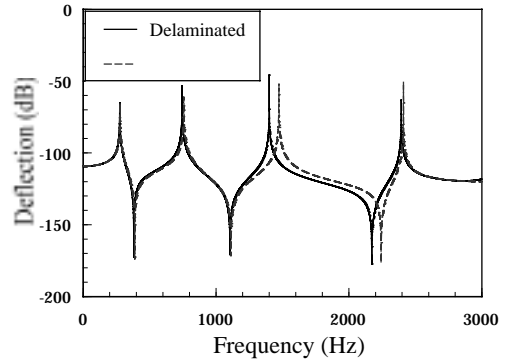
Fig.4 Delaminated beam model for FEM (fixed-fixed end beam)

結合し、はく離部では上下の梁が同位相で振動するように節点の z 方向変位の自由度のみを拘束し、一部の片側 $0/90$ 層間がはく離した CFRP 積層梁を模擬した。はく離部ではその他の自由度拘束はないため、はく離上下の梁はそれぞれ独立に伸縮可能である。本来ならばはく離部上下の梁が別々に変位する場合の接触問題を考慮した有限要素モデルを利用すべきであるが、本研究で検討する範囲内でははく離部上下の梁が別々に変位するようなモードは発生せず、解析結果に対するモデル化の影響はほとんどないため⁽¹⁰⁾、本研究でははく離部の z 方向変位自由度のみを拘束する簡易モデルを利用した。なお、マトリックス割れのみを伴う軽微なはく離を対象としているが、梁の動特性に対する 90° 層のマトリックス割れの影響は小さいと考えられるため、このモデルでは考慮していない。要素には 8 節点四角形要素の積層シェル要素 (shell99) を使用し、上下の梁をそれぞれ長手方向 (x 方向) を 20 分割、幅方向 (y 方向) を 2 分割した。総要素数は 80、総節点数は 330 である。解析で使用した一方向 CFRP ラミナの材料定数は表 1 と同一である。便宜上、はく離の位置、大きさはそれぞれ梁の全長で正規化した値 l/L , a/L で表現する。例えば、図 4 の場合には、はく離位置、大きさはそれぞれ順に 0.4, 0.1 となる。

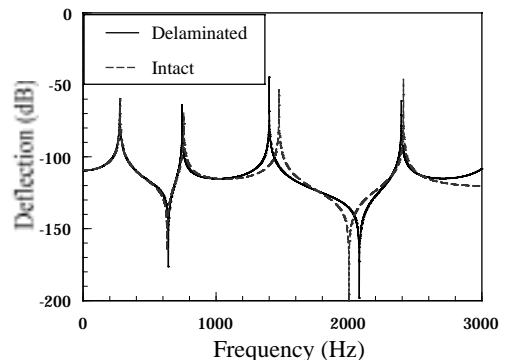
はく離位置と反共振周波数変化の関係を検証するため、 $x/L=0.05$ の位置を加振点 (点 A)、周波数範囲を 0~3000Hz、ステップ幅を 1Hz として両端固定梁の周波数応答解析を実施した。また、反共振周波数変化に基づくはく離領域判定の有効性を検証する際も、図 4 と同様の手順で両端固定梁モデルと片持ち梁モデルを作成し、周波数応答解析を実施した。ただし、片持ち梁については周波数範囲を 0~2500Hz、ステップ幅を 0.5Hz として解析を実施した。

4 解析結果と考察

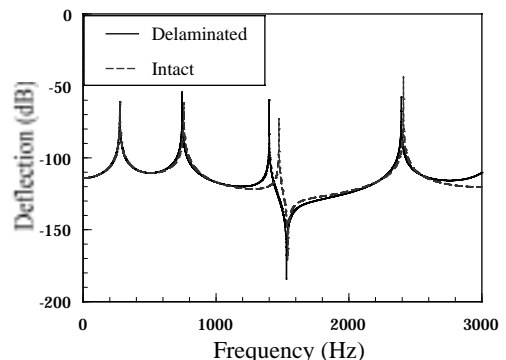
4.1 はく離位置と反共振周波数変化の関係 反共振周波数変化に基づくはく離領域判定の有効性を検証するため、図 4 の点 a~c におけるたわみの周波数応答を健全な場合と比較した結果を順に図 5(a)~(c)に示す。図 5 において、縦軸はたわみ (dB)、横軸は周波数 (Hz) であり、健全な場合を破線、はく離がある場合を実線で示した。ここで、点 a, b, c の座標は順に



(a) Node-a ($x/L=0.25$)



(b) Node-b ($x/L=0.45$)



(c) Node-c ($x/L=0.65$)

Fig.5 Deflection frequency response changes caused by delamination

$x/L=0.25, 0.45, 0.65$ である。

図 5(a)~(c)より、はく離発生に伴い全体項である共振周波数（固有振動数）は応答点に関係なく等しく低下する。これに対して、局所項である反共振周波数変化量は応答点ごとに異なる。

はく離は点 A-a 間ではなくその外側に存在することから 図 5(a)に示した点 a のたわみの周波数応答では、健全状態に比べて反共振周波数が低下している。一方、はく離は点 A-c 間には存在することから、図 5(c)に示した点 c のたわみの周波数応答では、健全状態に比べて反共振周波数がほとんど変化していない。これらは 2.2 節で示した 3 自由度質量バネ系による推論と一致しており、反共振周波数変化に基づき加振点 - 応答点間のはく離の有無を判定可能であることが示された。

ここで、点 b のたわみの周波数応答に着目すると、健全状態に比べて反共振周波数の上昇が確認できる。点 b は加振点側からみてはく離終端部の点であり、損傷が層間のはく離の場合に固有に見られる現象である。はく離終端部に限らず、その周辺でも反共振周波数が上昇することを確認した。

4.2 はく離領域の判定 任意の加振点 - 応答点間の周波数応答関数上の反共振周波数変化に基づき、はく離の有無を判定可能であることが明らかとなった。そこで本研究では反共振周波数変化に基づくはく離領域判定基準を考案し、それを対称構造である両端固定梁、ならびに非対称構造である片持ち梁のはく離領域判定に適用し、有効性を検証する。

4.2.1 判定基準 反共振周波数変化に基づくはく離の有無の判定を明確にするため、次に示す無次元化パラメータ D を導入する。

$$D_{ij} = \frac{\Delta f_{A,ij}}{|\Delta f_{R,i}| + |\Delta f_{R,j}|} \times 100 \quad (i \geq 1, j = i + 1) \quad (6)$$

式(6)において、 $\Delta f_{R,i}, \Delta f_{R,j}$ はそれぞれ健全な場合に対する i 次、 j 次共振点の移動量（共振周波数変化量，Hz）であり、 $\Delta f_{A,ij}$ は i 次と j 次共振点の間に存在する反共振点の移動量（反共振周波数変化量，Hz）である。図 5(a),(b)より、加振点 - 応答点間にはく離が存在する場合には、反共振周波数はほとんど変化しない ($\Delta f_{A,ij} \approx 0$) が上昇する ($\Delta f_{A,ij} > 0$) ため、 D 値はほとんどゼロ、または正となる。一方、図 5(c)より、加振点 - 応答点間ではなくその外にはく離が存在する場合の反共振周波数は低下する ($\Delta f_{A,ij} < 0$) ため、 D 値は負となる。したがって、任意の加振点 - 応答点間の健全時の周波数応答関数とはく離後の周波数応答関数から計算したパラ

メータ D の値に基づき、はく離領域の判定が可能である。

4.2.2 両端固定梁への適用 両端固定梁のような対称構造では、はく離の大きさ (a/L) を一定とした場合はく離位置 (l/L) に関する固有振動数変化が梁中央に関して対称となるため、例えば $l/L=0.3$ と $l/L=0.7$ のように、梁中央からの距離が等しい 2 つの解から固有振動数変化のみで正解を判定することは不可能である。そのため、反共振周波数変化に基づき、はく離が梁中央に関して左右いずれの領域に含まれるのかを判定する必要がある。

図 4 と同様の手順で作成した両端固定梁モデルを利用して、はく離の大きさは一定 ($a/L=0.1$) で位置を $l/L=0.1 \sim 0.9$ まで 0.1 おきに变化させて周波数応答解析を実施後、たわみの周波数応答からパラメータ D を計算し、はく離の存在する領域を判定する。ただし、両端固定梁では梁中央 ($x/L=0.5$) が健全な場合の 2 次モードの節と一致するため、梁中央では 2 次共振点と反共振点を検出できない。そこで、図 6 に示すように、梁を領域 A ($0 < x/L < 0.45$) と領域 B ($0.45 < x/L < 1$) の 2 つの領域に分割し、境界上の点 ($x/L=0.45$) のたわみの周波数応答を利用して、はく離の存在領域を判定する。なお、加振点は $x/L=0.05$ とし、領域 A が加振点 - 応答点間にほぼ収まるようにした。領域 A にはく離が存在する場合には D 値がほとんどゼロ、または正となり、領域 B にはく離が存在する場合には D 値が負になると推測される。

9 通りのはく離それぞれについて、パラメータ D を計算した結果を図 7 に示す。図 7 において縦軸は D 値、横軸ははく離位置 (l/L) であり、 D_{12} は 1-2 次共振点間に存在した反共振点の移動量、 D_{34} は 3-4 次共振点間に存在した反共振点の移動量である。図 7 より、はく離が領域 A に存在する場合、すなわち、 $l/L=0.1, 0.2$ の場合の D 値は微小で、 $l/L=0.3, 0.4$ の場合の D 値は一部を除いて大きく正となることが確認できる。一方、はく離が領域 B に存在する場合、すなわち、 $l/L \geq 0.5$ の場

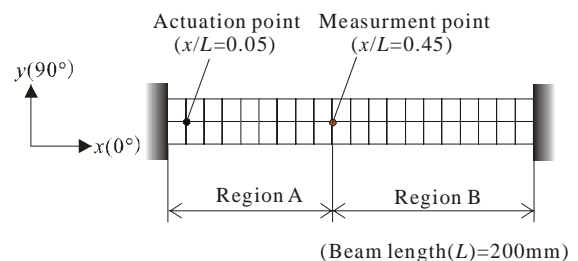


Fig.6 Configuration of FEM model (fixed-fixed end beam)

合には全ての D 値が大きく負となることが確認できる。以上より、全ての場合において、加振点 - 応答点間のはく離の有無に応じて D 値は適切に変化しており、対称構造である両端固定梁に対する本手法の有効性が示された。

ここで、たわみの周波数応答ではなく、ひずみの周波数応答を利用する場合の本手法の有効性を検証する。ひずみは構造との一体化が容易な圧電フィルムセンサ等で測定可能であり、近年注目されている構造スマート化⁽¹¹⁾の点からもひずみの周波数応答で判定できることが望ましい。

たわみの場合と同様に、 $x/L=0.45$ で測定したひずみの周波数応答から 9 通りのはく離それぞれについてパラメータ D を計算した結果を図 8 に示す。図 8 より、はく離位置に関係なく D_{12} の値は相対的に小さく、 D_{12} のみでははく離の有無を正しく判定できない可能性が高い。しかし、 D_{34} については図 7 に示すたわみの周波数応答を利用した場合と同様にはく離位置に応じて適切に変化しており、少なくとも 2 つ以上の反共振点の反共振周波数変化を利用することで、はく離領域の判

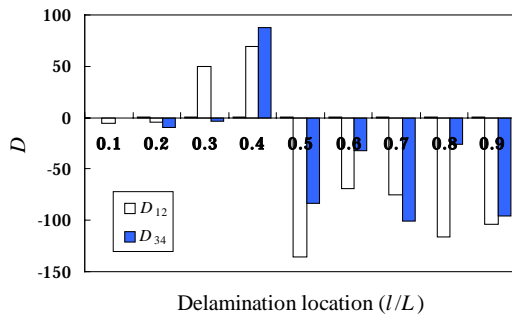


Fig.7 Anti-resonance frequency changes calculated from the deflection frequency responses at $x/L=0.45$ (shown in parameter D)

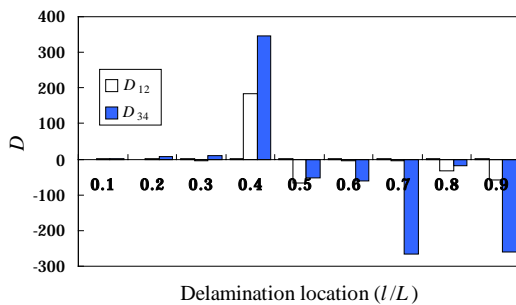


Fig.8 Anti-resonance frequency changes calculated from the strain frequency responses at $x/L=0.45$ (shown in parameter D)

定が可能である。

4.2.3 片持ち梁への適用 両端固定梁の場合と同様に、はく離の大きさは一定 ($a/l=0.1$) で位置を $l/L=0.1 \sim 0.9$ まで 0.1 おきに变化させて周波数応答解析を実施後、たわみの周波数応答からパラメータ D を計算し、はく離の存在する領域を判定する。図 9 に示すように梁中央よりも固定端側の領域 A と自由端側の領域 B に梁を分割し、境界上の点 ($x/L=0.5$) のたわみの周波数応答からはく離が存在する領域を判定する。領域 A にはく離が存在する場合の D 値はほとんどゼロ、または正の値を示し、領域 B にはく離が存在する場合の D 値は負の値を示すと推測される。

9 通りのはく離それぞれについて、パラメータ D を計算した結果を図 10 に示す。図 10 において縦軸はパラメータ D の値、横軸ははく離位置 (l/L) であり、 D_{12} 、 D_{23} 、 D_{45} はそれぞれ 1-2 次共振点間、2-3 次共振点間、4-5 次共振点間に存在した反共振点の移動量である。図 10 より、はく離が領域 A に存在する場合、すなわち、 $l/L=0.1, 0.2, 0.3$ の場合の D 値は微小で、 $l/L=0.4$ の場合の D 値はすべて正となることが確認できる。一方、

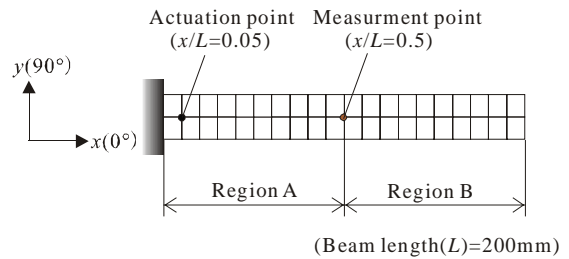


Fig.9 Configuration of FEM model (cantilever beam)

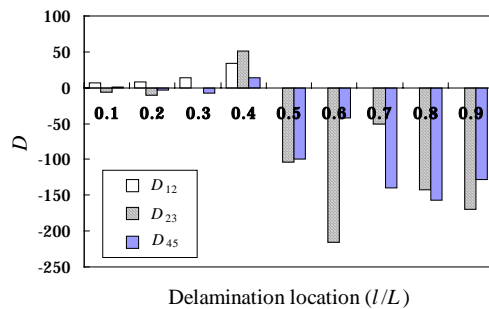


Fig.10 Anti-resonance frequency changes calculated from the deflection frequency responses at $x/L=0.5$ (shown in parameter D)

はく離が領域 B に存在する場合、すなわち、 $l/L \geq 0.6$ の場合には全ての D 値が大きく負となることが確認できる。なお、 $l/L=0.5$ のように、はく離部が加振点 - 応答点間に半分しか含まれない場合の D 値は負となる。

以上より、非対称構造である片持ち梁においても、反共振周波数変化に基づくはく離領域判定の有効性が示された。

本稿では両端固定梁、片持ち梁ともにはく離の大きさを一定 ($a/L=0.1$) として反共振周波数変化に基づくはく離領域判定の有効性を検証したが、実機への適用を検討する段階ではく離の大きさが変わった場合の有効性検証も必要であり、今後検討する予定である。

5 結 言

CFRP 積層梁を対象として 健全な場合とはく離がある場合の梁の周波数応答解析を実施し、はく離位置と反共振周波数変化の関係を明らかにするとともに、反共振周波数変化に基づくはく離領域の判定手法を考案した。そして、対称構造である両端固定梁と非対称構造である片持ち梁のはく離領域判定に本手法を適用し、その有効性を検証した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 任意の加振点 - 応答点間の周波数応答関数において、健全な場合に比べて反共振周波数がほとんど変化しないか上昇した場合には加振点 - 応答点間にはく離が存在、反共振周波数が低下した場合には加振点 - 応答点間の外にはく離が存在すると判定可能である。
- (2) 対称構造である両端固定梁の対称軸周辺で梁を 2 つの領域に分割し、その境界上の応答点における反共振周波数変化に基づき、はく離領域判定が可能であることを明らかにした。また、非対称構造である片持ち梁においても同様に、はく離領域判定が可能であることを明らかにした。

謝辞：本研究は平成 12 年度科学研究費補助金（特別研究員奨励費、自己励振スマート複合材料によるヘルスマニタリング）の一部によるものである。

参考文献

- (1) 邊, 西, 黄, 藤川, 機論 A, 62, 602(1996), 2338-2343
- (2) 邊, 山口, 福田, 青木, K. C. Park, 機論 A, 66, 644(2000), 721-726
- (3) 金原, 影山, 鈴木, 大沢, 伊出, 材料, 43, 487(1994), 476-481
- (4) 荻, 福永, 亀山, 日本複合材料学会誌, 26, 6(2000), 236-242
- (5) 例えば, A Chukwujekwu Okafor, K Chandrashekhara and Y P Jiang, *Smart Mater. Struct.*5, (1996), pp.338-347
- (6) 稲田, 島村, 轟, 小林, 中村, 機論 A, 65, 632(1999), 776-782
- (7) F. Lalande, Z. Chaudhry, F. P. Sun and G. A. Rogers, *J. Intelligent Material Systems and Structures*, 7(1996), 176-181
- (8) 稲田, 島村, 轟, 小林, 日本複合材料学会誌, 27, 6(2001), 264-270
- (9) 安藤, 戸井, 大久保, 機構論, 97-1(1997), 99-100
- (10) M. Mitrovic, G. Carman, G. Hickman and Y. Bar-Cohen, *Proceedings of the ASME Material Division*, 69, 1(1995), 371-379
- (11) 例えば, Abu S Islam and K. C. Craig, *Smart Mater. Struct.* 3(1994), 318-328