

統計的応答変化判定法による学習損傷データ不要の損傷診断法* (複合材料積層構造のはく離診断問題への適用)

岩崎 篤^{*1}, 轟 章^{*2}
島村佳伸^{*2}, 小林英男^{*2}

Unsupervised Structural Damage Diagnostic Method Using Judgement of Change of Response Surface by Statistical Tool (Application for Damage Detection of Composite Structure)

Atsushi IWASAKI, Akira TODOROKI,
Yoshinobu SHIMAMURA and Hideo KOBAYSHI

Most of the structural health monitoring systems adopts parametric method based on modeling or non-parametric method such as artificial neural networks. The former method requires modeling of each structures and latter method requires a large number of data for the training. The modeling and data for the training demands high costs, and it is impossible to obtain training data of damaged state of in-service structure. By the present method, damages are detected by judging statistical difference of data of intact state and present state. The method requires data of un-damaged state and does not require the complicated modeling and a large number of data for training.

As an example, the present study deals monitoring of delamination detections of a composite beam. The damages are detected from the change of strain data measured on the specimen surface by the statistical tools such as Response Surface and F-Statistics. As a result, the new method successfully diagnoses the damage without using modeling and data of damaged state.

Key Words : Smart Structure, Damage Diagnosis, Response Surface, Statistical tool

1. 緒 論

構造物，機器に各種センサーを取り付け，その構造機器全体の健全性を常時検査する構造ヘルスマニタリング手法が近年注目されている^(1,4)．とくに，近年のトンネル内のコンクリートはく離事故や，首都高速道路の老朽化に見られるように，稼働中のインフラストラクチャーの破壊を常時診断することは重大事故防止の観点からも必要不可欠である．しかしながら現状においては，これらの作業は多くは目視点検などの現場点検に頼っており，多大なコストを要求する上に迅速な損傷報告は困難である．そこで本研究では，既存構造物のヘルスマニタリングに適した損傷診断手法についての提案を行いその実験的検証を行う．

一般的な損傷同定手法としては，構造機器をモデル化し伝達関数を導出するパラメトリック法，構造の伝達関数が不要なノンパラメトリック法がある．パラメトリック法としては局所フレキシビリティ法⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いた損傷検知，電気ポテンシャル法⁽⁷⁾などが提案され

ている．また，ノンパラメトリック法としては，ニューラルネットワークを用いる方法⁽⁸⁾⁽⁹⁾や，応答曲面法⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を用いる方法が提案されている．これらに示されるような手法では，損傷を示す特徴量を何らかのシステムにより判定・推定し，実測により得られた特徴量との比較により判定を行うという手続きがとられており，そのため，特徴量の変動から損傷をほぼ正確に同定することが可能である．しかしながら，これらの手法は実構造のモデル化による伝達関数の導出，損傷時データによる学習などの多くのコストを要求する作業を必要とする上，さらに既存構造に対しては，多種多様な構造が存在する上に破壊の実験が不可能であることから，現状では不可能に近い．そこで既存構造に適用可能でかつ，簡便な損傷診断法が望まれている．本研究では構造が健全な状態でのセンサー間の関係を表す応答曲面と現在のセンサー間の関係の応答曲面の変化を統計的検定手法で検知する手法を用いた損傷時の構造情報を必要としない損傷診断法についての提案を行う．

また本研究では，応答曲面比較による損傷診断法の実施例として，複合材料梁の層間はく離検出に本法を適用し，その有効性の実験的検証を行った．

*原稿受付

^{*1} 準員，東京工業大学大学院 (〒441-8580 東京都目黒区大岡山 1-12-2) .

^{*2} 正員，東京工業大学 .

Email: atodorok@ginzamestitech.jp

$$y = \beta_0 + \sum_{m=1}^k \beta_m x_m \quad (3)$$

2. 応答曲面比較による損傷診断

2.1 損傷診断概要 構造の損傷は、その構造部位のセンサーデータや固有振動数に変化をもたらすため、厳密に境界条件を一致させ測定を行うことができれば、ひずみなどのセンサーデータを比較し差があることを検出することで、損傷の発生を検知する事が可能である。しかしながら、センサー出力は構造の環境や負荷状態の変動により動的に変化するため、単純にセンサーデータを比較し、その絶対値の差を検出するだけでは損傷同定は不可能である。そこで本研究では、健全な状態でのセンサー出力間の関係と、損傷発生後のセンサー出力間の関係の変化を検出することにより損傷発生の判定を行う。このことにより、単に数値の大きさを比較する手法では不可能な境界条件（外力、温度、拘束条件等）の変化する構造の損傷診断が可能となる。本手法ではセンサー出力間の関係式として応答曲面を用い、損傷発生による応答曲面の変化を統計検定で検出することで損傷診断を行う。

2.2 応答曲面法 応答曲面法とは、品質工学分野における最適化に適用されている手法であり、実験計画、近似関数への回帰、最適化を含む。応答曲面とは説明変数 x_i と被説明変数 y との関係を表す近似関数である。一般的にその関係は次式で表される。

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_l) + \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 ε は誤差、 l は説明変数数である。応答曲面の関数系としては多項式近似する場合が多く、様々な変数変換を行うことで複雑な関数に近似可能となる。応答曲面法の利点は、最小二乗法を用いているため近似関数の各係数の推定精度を統計的手法により評価できる点、回帰モデルの修正が容易に可能である点、実験計画の実施により近似精度の高い応答曲面を効率よく作成できる点にある。

2.3 最小二乗法 簡略化のため、次式のように2次多項式近似する場合を考える。

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^l \beta_j x_j + \sum_{j=1}^l \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^{l-1} \sum_{j=i+1}^l \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

応答曲面法では、この係数 β の不偏推定値 b を最小二乗法から導出する。式(2)において $x_j, x_j^2, x_i x_j$ を新たに x_m ($m > l$) とおくと、式(2)は次式に線形化される。

ここで k は置換後の説明変数の数である。この様に式(2)に示される高次多項モデルは線形重回帰モデルへと変換することができる。式(3)から、最小二乗法を用いて多項式の回帰係数を推定する。 n 個 ($n > k$) のデータ点とその評価値 y_i ($i=1 \sim n$) が実験あるいは解析によって与えられている場合、 $k+1$ 個の係数の重回帰モデルは次式で表現される。

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (4)$$

ここで、式(4)の各変数はマトリックス表示すると以下ようになる。

$$Y = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{Bmatrix}, \beta = \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{Bmatrix}, \varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで Y は n 個の測定された応答、 X は n 個の実験点の集合である。 β は重回帰係数ベクトルであり、 ε は誤差ベクトルである。最小二乗法からの β の不偏推定値 b は次式となる。

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (7)$$

2.4 応答曲面の係数検定 応答曲面作成の際には、最小二乗法から求められた各回帰係数の有意性検定を行い、減少法によって回帰を悪化させる項を削減し、最良回帰式を選定する。各回帰係数の有意性は T 検定を用いることで判断できる。有意性判定は i 番目の回帰係数に対し、その係数が回帰に無効であるという帰無仮説を設定し、仮説検定することにより行われる。仮説は i 番目の係数に対し次式で設定される。

$$\beta_i = 0 \quad (8)$$

一般に回帰誤差 ε が平均 0、分散 σ^2 の正規分布に従うとの仮定の下で β の不偏推定値 b を求めると、各回帰係数に関する t 値は t 分布に従うことが知られている。 t 値は次の式で与えられる⁽¹⁰⁾。

$$t_i = \frac{b_i}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2 / (n-p)}{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)}}} \quad (9)$$

有意水準を α とおいた場合，式(8)の仮説は次式で棄却される．

$$t_i > t_{\alpha/2, n-k-1} \quad (10)$$

この検定を元に，帰無仮説が採択された回帰係数のうち， t 値が一番小さいものを項自体が不要であると見なして変数を削除する．この操作を不要な係数が存在しなくなるまで繰り返すことにより，近似精度の高い応答曲面を導出する．

2.5 F 検定による応答曲面同等性検定 二つの応答曲面の同等性の検定は，分散性検定である F 検定で行う．その手法を以下に示す．

2.5.1 F 検定値 F_0 の導出 検定を行う二つの応答曲面の標本データ数をそれぞれ n_1, n_2 (総データ $n = n_1 + n_2$)，自由度を $p(k+1)$ とし，2つの応答曲面を次式に定義する．

$$\begin{aligned} Y_1 &= X_1 \beta_1 + \varepsilon_1 \\ Y_2 &= X_2 \beta_2 + \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (11)$$

ここで同等性の帰無仮説として"2つの応答曲面の回帰係数行列が等しい"との仮説を設定する．仮説の定義式を以下に示す．

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 \quad (12)$$

また，対立仮説は次式で定義される．

$$H_1: \beta_1 \neq \beta_2 \quad (13)$$

2標本の誤差項 ε が互いに独立であり，かつ同じ分散を持つと仮定した場合，仮説から検定統計量 F の実現値 F_0 は次式で定義される．

$$F_0 = \frac{SSE_0 - SSE_{12} * \frac{n-2p}{p}}{SSE_{12}} \quad (14)$$

ここで SSE は応答曲面の残差平方和を示しており，次式で定義される．

$$SSE_i = Y_i^T Y_i - b_i^T X_i^T Y_i \quad (15)$$

ここで添え字の 0 は全点，12 は標本 1, 2 の総和をそれぞれ示している．この F_0 は両応答曲面が類似するほど小さい値をとり，異なる度合いが大きいほど大きな値をとる．2 応答曲面同等性棄却の F の境界値については次章で述べる．

2.5.2 仮説棄却領域 二つの等しい応答曲面による F の実現値 F_0 は一般的に応答曲面の自由度 p と 2 応答曲面のデータ総数 n に依存する F 分布 $F(p, n-2p)$ に従う．このため 2 応答曲面の同等性は，有意水準を定め，式(12)に示される同等性仮説の棄却領域を設定することで，検定することが可能である．次式に有意水準を α とした場合の同等性仮説の棄却領域を示す．

$$F_0 > F^\alpha \quad (16)$$

したがって，二つの応答曲面の同等性検定を行う場合，2 応答曲面から式(14)に従い求めた F_0 が F^α を越えた場合に同等性が棄却される．この様に応答曲面同等性の棄却領域は有意水準，応答曲面モデルのみから決定可能である．

また，統計検定上この有意水準 α を第一種の過誤（仮説成立時に仮説を棄却する過誤）と呼び，診断精度検証は有意水準を固定し，第二種の過誤（対立仮説成立時に仮説を採択する過誤）の精度から検証を行う．そのため第二種の過誤を $1 - \beta$ とした場合， $1 - \beta$ を検定力と呼び，検定力(power)から精度の検証を行う．

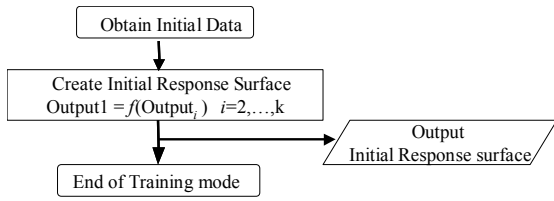
2.6 損傷診断手順 損傷検知はセンサー間の関係を表す応答曲面の損傷による変化を検知することで行う．以下にその手順を示す．

(1) 学習モード

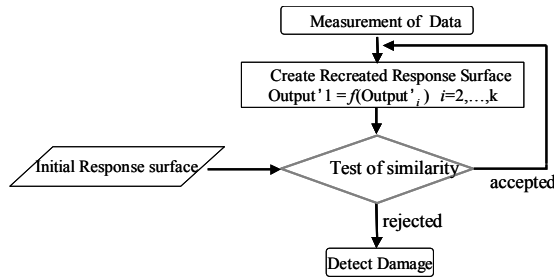
学習モードはモニタリング開始前に必要なプロセスであり，構造が正常な状態における応答曲面の導出を行う．まず，正常時の構造の負荷状態，温度等境界条件を変化させ複数回の測定を行い，複数のデータ組を取得する（図 1(a)中）．そして，この正常時の測定データから応答曲面を作成し，これを基準応答曲面とする（図 1(a)中）．応答曲面は任意のセンサーの測定値を被説明変数，そのセンサーに隣接する他のセンサーの測定値を説明変数とし，センサーごとに一つ作成する．学習モードで作成した基準応答曲面は損傷診断の基準となるため，以降保持する．

(2) モニタリングモード

モニタリングモードでは現状における応答曲面の導出を行い，基準応答曲面と比較による損傷検知を行う．まず，学習モードと同一のセンサーでデータの測定を行う（図 1(b)）．そして同様に応答曲面を作成し，これを測定応答曲面とする（図 1(b)）．そしてこの基準・測定の両応答曲面の同等性を F 検定を用いて統計的に検定する（図 1(b)中）．同等性が棄却された場合にセンサー間の関係が変化し，すなわち構造の状態が変化しと判定し，損傷の発生を診断する．



(a) Flow of training mode



(b) Flow of monitoring mode

Fig.1 Flow of damage detection

3. 表面ひずみ変動を用いた層間はく離検出

本研究では統計的診断手法の実験的検証として、複合材料梁の層間はく離検出を行った。層間はく離の発生に起因する表面ひずみの変動を利用し、はく離の検出を試みる。

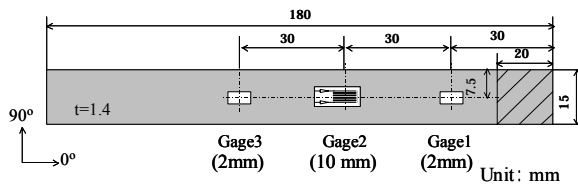


Fig.2 Specimen configuration

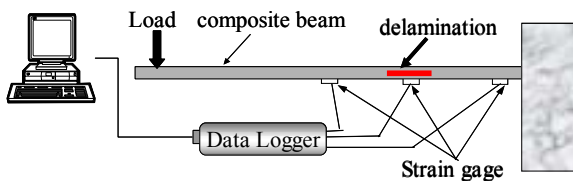


Fig.3 Experimental setup

3.1 試験片および実験方法 本実験で用いた試験片は厚さ 1.4mm の複合材料梁であり、その形状を図 2 に示す。材料には三菱レイヨン製一方向 CFRP プリプレグ M150ST を用い、これを 1.1MPa × 130 × 1h の成形条件でホットプレスで積層した。積層構成は $[0_2/90_2]_s$ である。測定はひずみゲージで行うとし、試験片は梁中央付近に 10mm のゲージ(Gage2)を取り付け、周辺データ測定用として他の部分には 2mm のゲージ(Gage1,3)を取り付けた。実験では、図 2 中の斜

線部を面で保持し、図 3 に示されるように梁左端に任意の負荷を与え、複数のデータ組を取得した。また、層間はく離は 3 点曲げにより試験片中央のゲージ下に作成する。はく離は 90°層のマトリクス割れを起点として 0°/90°層間に発生するため、はく離長さ a は上下 0°/90°層間のはく離の和とし、図 4 のように定義した。

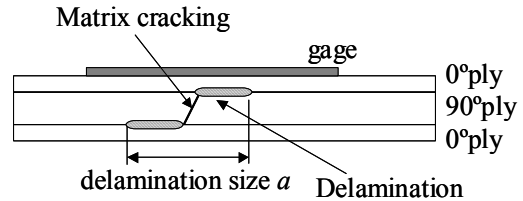


Fig.4 Schema of delamination

3.2 応答曲面 複合材料梁の層間はく離同定問題では、中央のゲージのひずみ測定値 ε_2 を周囲のゲージのひずみ測定値 $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ から回帰する応答曲面の同等性検定を行い、損傷診断を行った。基準応答曲面、測定応答曲面ともに、次式に示す 2 次の応答曲面を用いた。応答曲面の自由度は 6 である。

$$\varepsilon_2 = \beta_0 + \beta_1 \varepsilon_1 + \beta_2 \varepsilon_3 + \beta_3 \varepsilon_1^2 + \beta_4 \varepsilon_1 \varepsilon_3 + \beta_5 \varepsilon_3^2 \quad (17)$$

ここで ε_i はゲージ i におけるゲージひずみ、 β_i は回帰係数である。応答曲面は梁左端に強制変位で負荷を与えて 15 点のひずみデータ組を取得し、そのデータから最小二乗法で作成している。また、各係数に T 検定で検定を行い、減少法で最適な応答曲面の導出を行った。

3.3 仮説棄却領域 二つの応答曲面が同等である場合、 F_0 の確率分布は応答曲面の自由度とデータ点数に依存する F 分布 $F(p, n-2p)$ に従う。今回 15 点のひずみデータ組から 2 次の応答曲面(式(17))を作成するため、自由度、総データ点数はおのおの 6, 30 であり、 F_0 は $F(6,18)$ に従うはずである。図 5 に無損傷時の F_0 の確率分布の実験値と $F(6,18)$ を示す。実験値は 15 組の測定データから基準応答曲面を作成後、同一のセンサーから再度 15 組の測定を行い測定応答曲面を作成し、両者の同等性検定を行い求めている。試行回数は 2000 である。図に示されるように、実験値と理論値は両者はよい一致を示した。このように、同一状態の構造からの応答曲面を比較した場合、応答曲面は同等であり、 F_0 の確率分布は応答曲面の自由度とデータ点数に依存する F 分布 $F(p, n-2p)$ に従うことが確認された。実験値が $F(6,18)$ に従っているため、以降 F 分布 $F(6,18)$ より F_0 の限界水準を求める。今回

は一般的によく用いられる有意水準 $\alpha=0.01$, $\alpha=0.05$ の両有意水準を利用した．ここで各限界水準は $F^{0.05}_{6,18}=2.66$, $F^{0.01}_{6,18}=4.02$ である．実験値から求められた F_0 がこの値を超えた場合に同等性を棄却し損傷が発生，越えなかった場合に同等性を採択し無損傷と診断する．

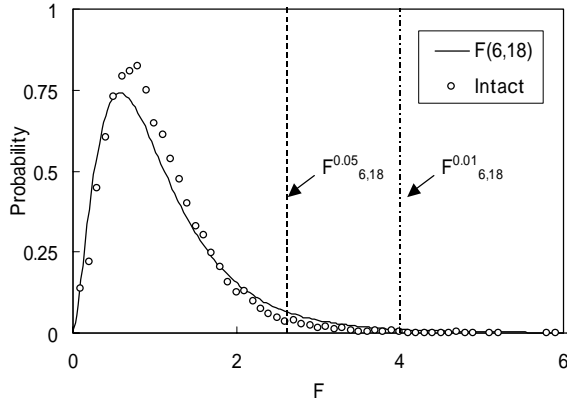


Fig.5 F-distribution of intact specimen

3.4 診断精度 ここでは本手法による損傷診断精度の検証のため，3.3 節で求めた仮説棄却領域を用い，複合材料梁試験片に作成した層間はく離損傷の検知を行い，検定力 $1-\beta$ について考察を行った．損傷発生後の F_0 は，無損傷状態の試験片から 15 組の測定データを取得し基準応答曲面を作成後，はく離を作成し，その後同一のセンサーから同様に 15 組のデータを測定し測定応答曲面を作成，この両応答曲面の同等性検定を行い求めている．

まず，はく離発生後の F_0 の確率分布導出を行う．はく離は，その寸法は連続量であるが，確率分布を作成するには同一の属性を持った多数のデータが必要である．そのためここでは，2mm 以上のはく離を対象に 2mm ごとに水準化して 4 つに分類し，確率分布の導出を行った．寸法の水準は，はく離無しを含め 5 水準である．各寸法領域における試行回数を表 1 に示す．図 6 に各寸法水準における F_0 の確率分布を示す．図中には参考として無損傷時の F 分布 $F(6,18)$ と有意水準 1% での限界水準 $F^{0.01}_{6,18}$ を併せて示す．

はく離の発生により F の確率分布は無損傷時の F 分布 $F(6,18)$ から明確に変化しており，高い確率で F_0 が限界水準を超えていることがわかる．表 2 に各はく離水準における F_0 の平均値を示す．はく離寸法の増大，すなわち構造状態の変化の増大に伴い F_0 値のピークは 1.3 から 206.8 へと徐々に増大している．このことから仮説棄却領域を設定することにより，限界水

準からその変動を検知できること，損傷量の増大ともない，検定力が上昇すると言える．有意水準 α の検定力に与える影響を調査するため，有意水準ごとの各水準のはく離の検定力を求めた．結果を図 7 に示す．実験の結果，有意水準 1% で 6mm 以上のはく離で 80% 以上，5% で 4mm 以上で 85% 以上と両有意水準ともに本手法を用いることで高い検定力で損傷診断を行うことができることが確認された．また，有意水準に関して 1%，5% とともに高い検定力を得られていることから，第 1 種の過誤を低減するよう有意水準 1% で検定を行うべきであることと言える．

Table 1 Region of delamination length and number of experiments

Delamination length[mm]	Number of times os experiment
0	2000
2<a 4	180
4<a 6	180
6<a 8	144
8<a 10	108

Table 2 Average of F_0 of each size region

Delamination length[mm]	Average of F_0
Intact	1.3
2<a 4	11.0
4<a 6	49.9
6<a 8	84.5
8<a 10	206.8

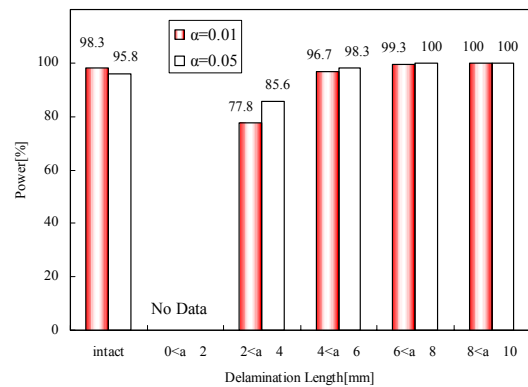


Fig.7 Result of detection of delamination

4. 結 論

センサーデータ間の応答曲面の差異判定に統計的検定手法である F 検定を利用することで，損傷時の学習データを必要とせず，無損傷時のデータと現在の測定値のみから損傷診断を行う手法の提案を行った．本手法を用いて表面ひずみデータをパラメータとした複合材料梁の層間はく離診断の実験的検証を行い，そ

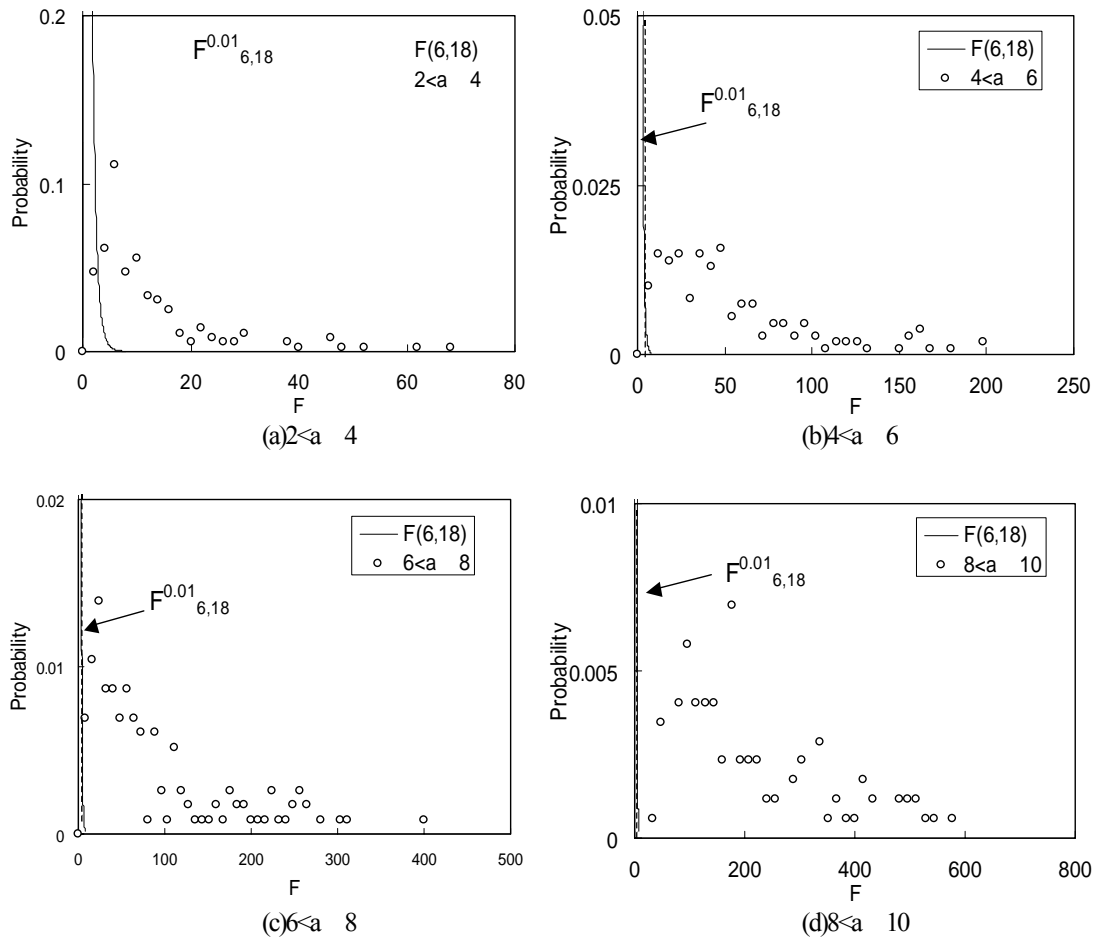


Fig.6 F-distribution of damaged specimen

の有効性を実験的に実証した。その結果，得られた結論は以下ようになる。

- (1) 統計的診断手法である F 値による検定を用いてセンサーデータ間の応答曲面の差異判定を行うことで，健全状態の測定データと現在値のみから構造の損傷診断が行えることを示した。
- (2) 本手法では検定時の仮説棄却領域を，有意水準と応答曲面モデルの定数のみから決定する。そのため，本手法では損傷時の構造状態を考慮することなく，損傷判定を行うことが可能であることを示した。
- (3) 健全状態での F 分布に対し有意水準 1% の F 検定を行うことで，高い精度で複合材料梁の層間は離検出を行うことができることを確認した。

参考文献

- (1) 岩崎, 轟, 島村, 小林, 機論, A-67, 656(2001-4), pp.177-182
- (2) A.E.Aktan, 他 2 名, Smart Mater. Structure, 7(1998), 674-692
- (3) J.P.Darryü, A.L.Philip, Smart Mater. Structure, 7(1998), 627-636
- (4) R.L.Idriss, 他 3 名, Smart Mater. Structure, 7(1998), 209-216
- (5) 邊, 山口, 福田, 青木, K.C.Park, 機論, A-66, 644(2000-4)
- (6) K.C.Park and C.A.Felippa, J of Applied Mechanics, 65-1(1998), pp.242-249.
- (7) 大路, 久保, 阪上, 機論, A-51, 467(1985)
- (8) 邊, 西, 黄, 藤川, 機論, A-62, 602(1996-10)
- (9) 朝倉, 他 2 名, 機論, C-62, 596(1996)
- (10) R.H.Myers, D.C.Montgomery "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments", John Wiley & Sons, Inc., (1995)
- (11) 稲田, 島村, 轟, 小林, 中村, 機論, A-65, 632(1999)