PZT 圧電センサによる CFRP 積層板の衝撃荷重同定* (第 2 報, 実験による検証)

田 島 賢 典^{*1}, 松 本 賢^{*1}, 福 永 久 雄^{*2}

Impact Force Identification of CFRP Laminated Plates Using PZT Piezoelectric Sensors (2nd Report, Experimental Verification)

Masanori TAJIMA, Satoshi MATSUMOTO and Hisao FUKUNAGA^{*3}

^{*3} Department of Aeronautics and Space Engineering, Tohoku University,
6-6-1 Aramaki, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

The present paper shows an experimental verification of the impact force identification method developed in the author's previous paper⁽¹⁾. First, the outline of the impact force identification method⁽¹⁾ based on the relationship between an impact force and the corresponding strain responses is described. In order to discuss the validity of the present method, an impact force identification system is constructed for CFRP laminated plates with PZT piezoelectric sensors. Once an impact acts on the plates, the system that consists of several sensor networks and signal processors can identify both the location and the history of the impact. The experimental results with the plates under two different support conditions are reported. According to the identified results of force location and history, the validity of the present method is verified, and the influence of the modeling error in the finite element model is also discussed.

Key Words: Impact Force Identification, CFRP Laminated Plate, PZT Piezoelectric Sensor, Inverse Problem, Impact Experiment

1. 緒 言

比強度・比剛性に優れた CFRP 積層板は航空宇宙分野を始めとしてさまざまな分野でその使用が拡大している。CFRP 積層板は従来の金属材料に比べ、動的挙動や破壊形態が複雑である⁽²⁾。特に面外荷重の作用により目視による検出が困難な内部損傷を起こすことが知られており、さらなる適用の拡大には安全性確保が重要な課題となっている。しかし、X 線や超音波などを用いた従来の非破壊検査法では、内部損傷の検出には膨大な時間と費用がかかるため、より簡便で信頼性の高い手法が求められている。そうした要求にこたえる技術として実時間で構造物の健全性を監視することを目的とした構造ヘルスマモニタリング⁽³⁾⁽⁴⁾が注目されている。構造ヘルスマモニタリングとは、構造にセンサ・ネットワークと損傷診断等の診断アルゴリズムを付加し、計測情報より構造の健全性診断を自動的に行う技術である。構造の健全性判断を行う上で、特に構

造に作用した荷重の情報は非常に有用であり、正確な荷重の情報は構造の損傷の予測につながる。本論文では、航空機などに用いられる CFRP 積層板を対象とした衝撃荷重同定問題について実験的に検討を行う。

著者らは、前報⁽¹⁾において CFRP 積層板に作用する衝撃荷重とひずみ応答の関係を定式化し、その逆問題として衝撃荷重同定手法の定式化を行った。また、衝撃荷重同定の数値シミュレーションを行い、同定法の有効性を示した。本報では前報で行った定式化をもとに、PZT ひずみセンサを用いた衝撃荷重同定システムを構築し、CFRP 積層板を用いた衝撃荷重同定実験により、本手法の実構造物への適用可能性を検証する。

2. 衝撃荷重同定法

2 章では、第 1 報⁽¹⁾で示した衝撃荷重同定法を要約して示す。

2-1 衝撃荷重とひずみ応答 図 1 に示される矩形平板の非減衰強制振動のモード座標系における支配方程式は次式で表される。

$$\ddot{\xi}_i(t) + \omega_i^2 \xi_i(t) = \{\phi_i\}^T \{r_f\} f(t) \cdots \cdots (1)$$

ここで、 ξ_i 、 ω_i および $\{\phi_i\}$ はそれぞれ、 i 次のモード変位、固有角振動数および固有振動モードを表す。

* 原稿受付 2004 年 3 月 19 日。

^{*1} 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-1)。

^{*2} 正員、東北大学大学院工学研究科。

E-mail: fukunaga@ssl.mech.tohoku.ac.jp

$\{\xi\}$ と $\{\phi\}$ はそれぞれ, $\{\xi\} = [\xi_1 \ \xi_2 \ \cdots \ \xi_n]^T$, $\{\phi\} = [\phi_1 \ \phi_2 \ \cdots \ \phi_n]$ で表されるモード変位ベクトルおよび固有モードマトリックスである. $[\]^T$ は転置行列を表す. $f(t)$ は荷重履歴を表す連続関数である. $\{r_f\}$ は荷重位置を表す単位ベクトルで, 荷重が作用する自由度に対応する成分のみ 1 であり, 他の成分は零となっている. 式(1)を Duhamel 積分により解き, 離散時間 $T = j\Delta t$ ($j=1, 2, \dots, k$) を導入し, 各区間において荷重を線形近似すると, 衝撃荷重の時間履歴 $\{\tilde{f}\}$ と発生したひずみ応答の時間履歴 $\{\tilde{\varepsilon}\}$ は次式で関係付けられる.

$$\{\tilde{\varepsilon}_{(i)}\} = [G^{(i)}]\{\tilde{f}\} \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

ただし,

$$\{\tilde{\varepsilon}_{(i)}\} = [\varepsilon_{(i)}(\Delta t) \ \varepsilon_{(i)}(2\Delta t) \ \cdots \ \varepsilon_{(i)}(k\Delta t)]^T \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$\{\tilde{f}\} = [f(\Delta t) \ f(2\Delta t) \ \cdots \ f(k\Delta t)]^T \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

式(2)および式(3)において, 指標 i は x, y あるいは xy のいずれかを表している. 変換行列 $[G^{(i)}]$ は荷重の作用位置とひずみ応答の計測位置によって決定され, 荷重履歴 $\{\tilde{f}\}$ には依存しない性質を持つ. 式(2)は衝撃荷重とひずみ応答の関係を表し, 衝撃荷重同定法の基礎式となる.

2.2 PZT 圧電素子による動的ひずみ計測 本研究ではひずみ計測のため, PZT 圧電素子が配置されたフィルム回路基板 SMART Layer⁽⁵⁾(米国 Acellent 社製)を使用する. SMART Layer は CFRP 積層板内に積層され, ひずみ計測が可能となっている. SMART Layer 内の PZT 圧電素子の形状は図2に示すような半径 r の円盤状であり, 3 軸方向に分極処理されている. 素子厚 h は素子径に比べ十分に薄く平面応力状態にあり, 1-2 面内で圧電体内部のひずみは一定, 弾性および圧電性は等方であると仮定する. ひずみの発生に伴う PZT 圧電素子の出力電荷 $Q_{PZT}(t)$ は比例定数 C_{PZT} を用いて, 次式のように面内ひずみの和に比例する形式で表される.

$$Q_{PZT}(t) = C_{PZT}\{\varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)\} \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

本研究では, PZT 圧電素子の出力電荷をチャージ

アンプにより電圧に変換・増幅して計測するため, PZT 圧電素子からの出力電圧と発生したひずみ量の関係は次式となる.

$$V_{PZT}(t) = G_{PZT}\{\varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)\} \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

$V_{PZT}(t)$ は出力電圧であり, G_{PZT} は校正試験により決定される変換定数である. PZT 圧電素子の 1, 2 軸を矩形平板に設定した座標系の x, y 軸に一致させ配置すると PZT ひずみセンサで計測されるひずみ応答 $\{\tilde{\varepsilon}\}$ は式(2)より次式のように表せる.

$$\{\tilde{\varepsilon}\} = \{\tilde{\varepsilon}_{(x)}\} + \{\tilde{\varepsilon}_{(y)}\} = [G]\{\tilde{f}\} \quad \cdots \cdots \cdots (7)$$

ただし,

$$[G] = [G^{(x)}] + [G^{(y)}] \quad \cdots \cdots \cdots (8)$$

2.3 衝撃荷重履歴同定法 $m(\geq 3)$ 個のひずみセンサを用いてひずみ応答 $\{\tilde{\varepsilon}_i\}$ ($i=1, 2, \dots, m$) を計測する場合, 荷重の作用位置が既知であるとする荷重履歴同定は次の最小化問題に帰着される.

$$\min_{\tilde{f}} F = \sum_{i=1}^m \|\{\tilde{\varepsilon}_i\} - [G_i]\{\tilde{f}\}\|^2 + \alpha \|\nabla\{\tilde{f}\}\|^2 \quad \cdots (9)$$

ここで, $\nabla\{\tilde{f}\}$ は $\{\tilde{f}\}$ の導関数の差分近似を表し, α は重み係数を表している. また, $\|\cdot\|$ はベクトルのユークリッドノルムを表す. 式(9)において, 第1項のみの最小二乗問題では, 問題の性質が良くないため, ひずみ応答に誤差が含まれる場合, 大きく振動した荷重履歴が同定されてしまう. 式(9)の第2項は解の安定化のための荷重履歴に対する制約項を意味する. 式(9)を荷重が平板に対して引張り(負)とならぬように $\{\tilde{f}\} \geq 0$ の制約を加え, 二次計画法を用いて解き荷重履歴同定を行う.

2.4 衝撃荷重位置同定法 本研究では, 荷重位置同定法として次に示す二通りの同定法について検討する.

2.4.1 ひずみ応答の相反関係を利用した荷重位置同定法 荷重の作用位置を平板上の任意の位置 (x_e, y_e) に推定すると, 変換行列 $[G]$ の性質から二点のひずみ応答 $\{\tilde{\varepsilon}_i\}$, $\{\tilde{\varepsilon}_j\}$ の間に次の相反関係が得られる⁽⁶⁾.

Fig. 1 Square plate under impact force

Fig. 2 Shape of PZT device

$$[G_i]\{\varepsilon_i\}=[G_i]\{\varepsilon_j\} \cdots \cdots \cdots (10)$$

式(10)の両辺の差を荷重の推定位置と実際の作用位置とのずれを表す誤差ベクトルとして定義すると、衝撃荷重位置同定問題は次の最小化問題に帰着される。

$$\min_{x_e, y_e} E = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{\| [G_i]\{\varepsilon_i\} - [G_j]\{\varepsilon_j\} \|^2}{\| [G_j]\{\varepsilon_j\} \|^2} \cdots \cdots (11)$$

本論文では、式(11)による荷重位置同定法を手法 1 と呼ぶ。

2・4・2 ひずみ応答の計測値と解析値の直接比較に基づく荷重位置同定法 任意の推定荷重位置 (x_e, y_e) において、式(9)より荷重履歴同定を行い、荷重履歴 $\{\hat{f}_e(x_e, y_e)\}$ を得ると、式(2)によりひずみ応答の推定値が得られる。したがって、次の誤差ベクトルが定義できる。

$$\{e_i(x_e, y_e)\} = [G_i]\{\hat{f}_e(x_e, y_e)\} - \{\varepsilon_i\} \cdots \cdots (12)$$

式(12)において、右辺第 1 項はセンサからの解析応答を、第 2 項は実際に計測されるセンサ応答である。本研究では、式(12)の誤差ベクトルを基準化したものを最小とする荷重位置を荷重の作用位置として決定する。したがって、真の荷重位置は次の最小化問題の解として与えられる。

$$\min_{x_e, y_e} E = \sum_{i=1}^m \frac{\| [G_i]\{\hat{f}_e(x_e, y_e)\} - \{\varepsilon_i\} \|^2}{\| \{\varepsilon_i\} \|^2} \cdots \cdots (13)$$

式(13)による衝撃荷重位置同定法を手法 2 と呼ぶ。

本研究では、荷重の作用位置を有限要素モデルの節点上に限定し、式(11)、(13)の最小化問題を各節点についてパラメトリックに計算し、荷重位置同定を行う。

3. 衝撃荷重同定実験概要

3 章では、2 章で示した衝撃荷重同定法の実用性について検証するため、PZT ひずみセンサを用いた衝撃荷重同定システムおよび衝撃実験の概要について示

す。

3・1 衝撃荷重同定システム 同定実験に使用する供試体の概観図を図 3 に示す。また、試験片の寸法と積層構成を表 1 に、各層の材料定数を表 2 に示す。本研究では、使用する 2 種類の供試体のうち、パラレスト積層のものを CFRP1、擬似等方性積層のものを CFRP2 と呼ぶ。各供試体の下面 2 層めおよび 3 層めの間には、PZT ひずみセンサ $[d_{31}=175(\text{pC/N})]$ を 4 個配置した SMART Layer が積層され、ひずみ計測が可能になっている。センサのおおよその配置は図 3 に示すとおりであり、詳細配置を表 3 に示す。本研究では、供試体の支持条件として、片持支持と四隅固定支持の 2 種類を採用する。片持支持の場合、供試体の一边を 30 mm ($y=270 \sim 300$ mm) にわたり、ジグにより固定支持する。四隅固定支持の場合、供試体の四隅 (30 mm 四方) をジグによって固定支持する。

供試体の有限要素モデルを図 4 に示す。収束特性の検討結果より、解析には、支持条件に依らず、 x, y 軸方向に 10 分割した 100 要素 121 節点で構成されるモデルを使用する。解析要素には 4 節点板曲げ要素を用いており、各節点の自由度は面外変位および x, y 軸周りの回転自由度の 3 自由度である。ジグによって固定されている領域は、片持支持の場合には 91~100 番

Table 1 Specification of plates

CFRP1	CFRP2
Geometry (Rectangular)	
Length = 299.8[mm] Width = 299.8[mm]	Length = 300.2[mm] Width = 299.8[mm]
Stacking sequence	
$[45_2/-45_4/45_2]$	$[0_2/45_2/-45_2/90_2]$

Table 2 Properties of lamina

Thickness	0.125 mm
E_L	142 GPa
E_T	10.8 GPa
G_{LT}	5.49 GPa
Poisson Ratio	0.30
Density	1600 kg/m ³

Table 3 Sensor locations [mm]

	CFRP1	CFRP2
Sensor 1	(85, 89)	(85, 91)
Sensor 2	(212, 89)	(213, 89)
Sensor 3	(86, 215)	(87, 217)
Sensor 4	(212, 217)	(212, 217)

Fig.3 Shape of CFRP laminated plates and sensor distribution

要素に対応し、四隅固定指示の場合には四隅要素(1, 10, 91 および 100 番要素)に対応している。これらの要素を構成する節点の自由度をすべて固定とすることで境界条件のモデル化を行う。

次に本研究で構築した固定システムを図5に示す。本システムは、PZT ひずみセンサが埋め込まれた CFRP 積層板、ジグ、チャージアンプ(小野測器製 CH-1100)、デジタルオシロスコープ(横河電機製 DL 708 E)、インパルスハンマ(小野測器製 GK-3100)およびパーソナルコンピュータにより構成されている。ハンマによる衝撃荷重の作用はオシロスコープのトリガ機能により検出される。発生したセンサ出力はチャージアンプで変換増幅された後、オシロスコープを経て、コンピュータに取り込まれ、同定処理が開始される。センサ応答取り込み後、式(11)あるいは式(13)による荷重位置同定を有限要素モデルの節点上でパラメトリックに実施し、荷重位置を同定する。同定された荷重位置で式(9)に基づき荷重履歴同定を実施し、最後に同定結果の出力を行う。なお、計測時間は $T=7.0\text{ms}$ 、サンプリング時間は $\Delta t=0.1\text{ms}$ 、式(9)の荷重履歴の制約項にかかる重み係数は $\alpha=0.7 \times 10^{-12}$ とする。

3・2 衝撃試験 3・2 節では、衝撃荷重とひずみ応答関係式(7)の妥当性を検証するため行った衝撃試験について述べる。衝撃試験は、片持支持された CFRP 1 を対象に、図4(a)の14番節点にインパルスハンマにより衝撃荷重を作用させる。打撃により発生したひずみ応答を図4(a)の45番要素(板下面)に貼付した二軸ひずみゲージ(NEC 三栄製, N 22-FA-5-120-11-VS 1)により計測する。インパルスハンマからの荷重応答と式(7)よりひずみ応答の解析値を求め、計測応答と比較することで式(7)の妥当性を検証する。

衝撃試験により得られたひずみ応答と解析により得られたひずみ応答の結果およびインパルスハンマによる衝撃荷重の履歴を図6(a)に示す。また、使用する固有振動モードを30次、50次、100次に変えた際のひずみ応答の解析値を図6(b)に示す。なお、図6(a)のひずみ応答の解析値は50次までの固有振動モードを使用しており、図6(b)は全応答のうち、0.5~1.2 ms の立上りのひずみ応答を示している。なお、1.2 ms 以降の応答はモード数に依らず、ほぼ一致していた。図6(b)より、50次まで考慮して解析を行うことで十分に収束したひずみ応答が得られることがわか

Fig. 4 Finite element model

Fig. 5 Impact force identification system (in case of four-corners clamped support)

る。また、図 6(a) より、ひずみ応答の解析値は計測値とよく一致しており、式 (7) の衝撃荷重とひずみ応答の関係が妥当であることが示された。

3・3 PZT ひずみセンサの校正試験 2・2 節において、PZT 圧電素子から発生するひずみ値と出力電圧の関係を示した。3・3 節では、式 (6) による PZT ひずみセンサのモデル化の妥当性およびひずみ値と出力電圧を関係付ける比例定数 G_{PZT} の決定について校正試験を通じて検証する。PZT ひずみセンサの校正は、片持支持した CFRP 1 を用い、センサ 2 (図 3 参照) と同一位置で板下面に貼付した二軸ひずみゲージの出力電圧とを比較することで行った。計測された応答として 14 番節点 (図 4 参照) に衝撃を加えた場合の出力電圧を図 7(a) に示す。各節点を打撃試験し、得られた応答のピーク値をそれぞれ比較して式 (6) の変換定数 G_{PZT} を求めた結果、平均値は $G_{PZT} = -2.31 \times 10^4 [V]$ であった。得られた G_{PZT} を用いて、PZT ひずみセンサによるひずみ応答をひずみゲージにより得られたひずみ応答に換算し、比較した結果を図 7(b) に示す。この結果から、PZT 圧電素子からの出力電圧が面内ひずみの和に比例するとした式 (6) の PZT ひ

ずみセンサモデルが妥当であることがわかる。

4. 衝撃荷重同定実験結果

4 章では、3 章で示した衝撃荷重同定システムを用いた同定実験の結果を示す。検討を行う荷重位置は供試体縁上、PZT センサ上および固定支持部分の節点を除く節点 (片持支持の場合: 68 点、四隅固定支持の場合: 73 点) とし、衝撃を与えた節点とシステムが同定した節点の番号が一致した場合に荷重位置同定に成功したものとす。

4・1 片持支持での同定実験 まず始めに、支持条件が片持ちの場合の同定結果を示す。衝撃荷重位置同定結果を表 4 ならびに図 8 に示す。図 8 では、荷重位置同定に失敗した節点およびその際に同定された荷重位置をそれぞれ、×印ならびに●印により示す。なお、位置同定に成功した節点については、表記を省略している。表 4 より、CFRP 1 および CFRP 2 ともに約 90% の節点で荷重位置同定が正しく行われている。また、手法 1 と 2 を比較するとひずみ応答の計測値と解析値を直接比較する手法 2 の荷重位置同定法が良い結果が得られていることがわかる。また、図 8 よ

(a) Comparison of measured and calculated strain responses

(b) Calculated strain responses using different modal number

Fig. 6 Results of impact test

(a) Output voltages of strain gauge and PZT

(b) Comparison of measured responses

Fig. 7 Calibration of PZT sensor

り、位置同定に失敗した荷重位置は支持部付近に集中して見られ、正しい荷重位置の近隣節点が同定されることがわかる。

次に、図8(b)のA点およびB点の節点における荷重履歴同定結果を図9にそれぞれ示す。図9(a)には、式(9)において、荷重履歴の導関数に制約を加えない場合、すなわち $\alpha=0.0$ の場合の荷重履歴同定結果も示されている。図9(a)より、荷重履歴の導関数に対する制約の有無に依らず、同定された荷重履歴はインパルスハンマによって計測された履歴とよく一致している。この場合、荷重履歴の導関数に対する制約の効果はほとんど見られないが、これは計測されたひずみ応答に誤差があまり含まれず、逆問題の性質が大きく悪化しなかったためと考えられる。CFRP2を供試体として使用した場合[図9(b)]も、同様に計測値とよく一致した荷重履歴が同定されている。したがって、荷重位置同定に成功した場合、荷重履歴も正確に同定されることがわかる。荷重位置同定に失敗した節点でも、有限要素モデルにおける境界条件等を改

良のしひずみ応答の解析値を高精度化することで、荷重同定の高精度化が可能になると考えられる。

4.2 四隅固定支持での同定実験 次に、四隅固定支持状態で行った衝撃荷重同定実験について、荷重位置同定結果を表5および図10に示す。図10の表記法は、4.1節と同様である。表5より、支持条件が四隅固定支持の場合でも、手法に依らず90%以上の節点に対して正しく荷重位置が同定されている。手法1と2を比較すると、すべての場合で手法2のほうが精度の良い同定結果が得られている。特に、CFRP1ではすべての節点で位置同定に成功している。また、図10より、同定に失敗した荷重位置は支持部付近に集中して見られ、荷重位置同定に失敗した場合でも正しい荷重位置の近隣節点が同定されることがわかる。したがって、片持支持条件の場合と同様、ひずみ応答の計測値と解析値を直接比較することで、より精度の良い荷

Table 4 Success rate of location identification (cantilever support)

	Method1	Method2
CFRP1	89.7% (61/68)	92.6% (63/68)
CFRP2	85.3% (58/68)	97.1% (66/68)

Fig. 8 Results of location identification (cantilever support)

Fig. 9 Results of force history identification (cantilever support)

重位置同定が可能であるといえる。さらに、有限要素モデルを改良することでひずみ応答の解析値の精度が向上すれば、荷重位置同定のさらなる高精度化が可能であるといえる。

図 10(b)の A 点ならびに B 点における荷重履歴同定結果を図 11(a)ならびに(b)に示す。荷重位置同定は両節点ともに成功している。図 11(a)からわかるように、重み係数 α を $\alpha=0.0$ として、荷重履歴の導関数ノルムに制約を加えなかった場合には、同定された履歴は計測された履歴の周りで大きく振動している。しかし、 $\alpha=0.7 \times 10^{-12}$ として制約を加えた場合には振動が抑制され十分に滑らかな履歴が得られており、計測された履歴でほぼ一致した履歴が同定されていることがわかる。一方、図 11(b)の場合には、荷重履歴同定結果は計測値よりかなり小さくなっている。四隅固定支持の実験では、簡易なジグにより試験片を固定したため、片持支持の場合と比べてモデル化誤差の影響によるひずみ応答誤差が増大したと思われる。

Fig. 10 Results of location identification (four-corners clamped support)

そのため、正しい荷重位置が同定されたにもかかわらず、同定された荷重履歴に計測値とのずれが見られたものと考えられる。

5. 結 言

本論文では、衝撃荷重とひずみ応答の関係式に基づいた衝撃荷重同定法について、埋込み形センサを用いて衝撃荷重同定システムを構築し、CFRP 積層板を用いた衝撃荷重同定実験により手法の有効性を検証した。その結果得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 本研究で構築した衝撃荷重同定システムは CFRP 積層平板に作用する衝撃荷重同定に対して有効で、高精度な衝撃荷重および履歴の同定が可能である。
- (2) センサ応答誤差等により逆問題の性質が悪化

Table 5 Success rate of location identification (four-corner clamped support)

	Method1	Method2
CFRP1	94.5% (69/73)	100.0% (73/73)
CFRP2	90.4% (66/73)	93.2% (68/73)

(a) At location "A"

(b) At location "B"

Fig. 11 Results of force history identification (four-corners clamped support)

する場合, 荷重履歴の導関数ノルムに対する制約は履歴同定結果の改善に有効である。

高精度な衝撃荷重同定を行うためには, 正確な有限要素モデルの構築が必要であるが, 既存のモデル修正手法を組み合わせることにより高精度な同定が可能であると考えられる。

なお, 本研究の一部は文部科学省科研費 15360045 およびスズキ財団の研究助成を受けた。

文 献

- (1) 田島賢典・松本賢・福永久雄, PZT 圧電センサによる CFRP 積層板の衝撃荷重同定(第 1 報, 衝撃荷重同定の定式化と数値シミュレーション), 機論, **70**-699, A (2004), 1566-1573.
- (2) Cantwell, W. J. and Morton, J., Comparison of the Low and High Velocity Impact Response of CFRP, *Composites*, **20** (1989), 545-551.
- (3) Harrison, C. and Butler, R., Locating Delaminations in Composite Beams Using Gradient Technique and A Genetic Algorithm, *AIAA J.*, **39**-7 (2001), 1383-1389.
- (4) Fukunaga, H., Hu, N. and Chang, F. K., Structural Damage Identification Using Piezoelectric Sensors, *Int. J. Solids Struct.*, **39** (2002), 393-418.
- (5) Lin, M. and Chang, F. K., *The 13th Annual ASC Technical Conference on Composite Materials*, Baltimore, MD (1998), 89-101.
- (6) Yen, C. S. and Wu, E., On Inverse Problem of Rectangular Plates Subjected to Elastic Impact, Part I: Method Development and Numerical Verification, *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, **62** (1995), 699-705.
- (7) Friswell, M. I. and Mottershead, J. E., "*Finite Element Model Updating in Structural Dynamics*", (1996), 158-227, Kluwer Academic Pub., Dordrecht.