直交異方性積層板上に作用する点衝撃荷重の荷重履歴簡便同定方法^{*1}

A Simple Method for Identifying Force Histories of Point Impact Forces on Orthotropic Laminated Plates

関 根 英 樹^{*2}・佐 藤 正 喜^{*2}・小 野 崎 徹^{*2}

Hideki SEKINE, Masaki SATO and Tohru ONOZAKI

Key Words : Composite Material, Orthotropic Laminated Plate, Identification, Point Impact Force, Force History

Abstract : The inverse technique has been developed for the problem of force histories identification of point impact forces on orthotropic laminated plates. In a previous paper, the authors presented a simple method for identification of multiple impact forces acting on simply supported orthotropic laminated plates. The method utilized measured values of acceleration to predict point impact forces which resulted in the laminated plate response. This paper describes an attempt to extend the method to clamped orthotropic laminated plates and identify force histories of point impact forces. In addition, this paper explores an iterative method to identify accurately force histories using a reduced number of measurement points. Several numerical examples are performed to ascertain effectiveness of the method to clamped laminated plates, the effect of the number of measurement points on the identification results for boundary conditions and validity of the iterative method.

1. 結 言

先進複合材料は高比強度・高比剛性の点において非常に優れた性質を有することから、厳しい軽量化が要求される航空宇宙機の構造材料としてその適用が拡大しつつある。航空宇宙機の主構造材の一つである複合材料積層板は、面外方向からの衝撃荷重に対して弱く、鳥や宇宙デブリなど異物の衝突によって層間はく離などの損傷を受ける可能性がある。このような状況下で、航空宇宙機の運用中の安全性を確保するためには、ヘルスマモニタリングの概念による機体に対する健全性の監視が重要となる。また、機体の健全性の監視を迅速に行うためには、衝撃荷重の履歴および衝撃荷重が作用した位置に関する情報を実時間で得ることが極めて重要である。

点衝撃荷重を対象とした荷重同定に関する従来の研究としては、逆解析手法を用いて、等方性はりや等方性板および棒の外部応答から荷重履歴を同定する方法¹⁻⁷⁾が提案されている。また、等方性板に作用する1点衝撃荷重を対象に、荷重履歴や荷重の大きさのみでなく荷重位置の同定をも行った研究⁸⁻¹⁰⁾も報告されている。さらに、文献11)においては、直交異方性積層板上の複数点に作用する衝撃荷重の荷重位置・履歴を、加速度情報より実時間で簡易に同定する方法が提案されている。そこでは、積層板が単純支持された場合に限定しており、提案した同定方法の他の支持条件に対する有効性については検討していない。また、同定方法の実用性を考慮すれば、計測点数は少ない方が望

ましいが、少ない計測点数の場合には、同定精度は保証されていない。

そこで、本研究では、前報¹¹⁾で周辺単純支持直交異方性積層板に限定していた点衝撃荷重の簡易同定法を、周辺固定支持直交異方性積層板に対しても適用できるように拡張した。周辺単純支持および周辺固定支持直交異方性積層板上の複数点に作用する衝撃荷重の荷重履歴同定の数値計算例を通して、本同定方法の周辺固定支持積層板に対する有効性、および各境界条件において計測点数が同定精度に及ぼす影響について検討した。また、計測点数を減少させた場合に生じる同定誤差を反復計算により補正し、少ない計測点数で精度良い同定結果を得る方法についても検討した。

2. 点衝撃荷重の荷重履歴同定式および反復法

2.1 同定基礎式 直交異方性積層板と x, y 座標系を第1図に示す。ここでは、積層板上の N 個の任意点に衝撃荷重を受ける場合の応答を考える。ただし、衝撃荷重は点衝撃荷重であるとする。古典積層理論を用いると、積層板の運動方程式は次式で与えられる。

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \sum_{n=1}^N f_n(t) \delta(x - x_n) \delta(y - y_n) \quad (1)$$

ここで、 D_{ij} は面外剛性、 w はたわみ、 ρ は板の密度、 h は板厚、 t は時間を示す。また、 $f_n(t)$ および (x_n, y_n) は第 n 番目の点衝撃荷重の荷重履歴および荷重位置を示し、 $\delta(x)$ はデルタ関数を示す。

^{*1} 平成 11 年 8 月 31 日原稿受理

^{*2} 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻

第1図 点衝撃荷重を受ける積層板

境界条件は周辺単純支持と周辺固定支持の二とおりについて考えるものとし、おのおの次式で与えられる。

(i) 周辺単純支持の場合

$$\begin{aligned} x=0, \quad a: w &= D_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \\ y=0, \quad b: w &= D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + D_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

(ii) 周辺固定支持の場合

$$\begin{aligned} x=0, \quad a: w &= \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \\ y=0, \quad b: w &= \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

次に、 $X=x/a$, $Y=y/b$ と無次元化して、各境界条件に対する積層板の固有振動モード $g_{ij}(X, Y)$ を次式で仮定する。

(i) 周辺単純支持の場合

$$g_{ij}(X, Y) = \sin(i\pi X) \sin(j\pi Y) \quad (4)$$

(ii) 周辺固定支持の場合

$$\begin{aligned} g_{ij}(X, Y) &= \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \phi_{kl}^{ij} [\cos\{(k-1)\pi X\} \\ &\quad - \cos\{(k+1)\pi X\}] \\ &\quad \times [\cos\{(l-1)\pi Y\} - \cos\{(l+1)\pi Y\}] \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、式(5)における ϕ_{kl}^{ij} は、積層板の自由振動解析における ij 次の固有モードベクトルを示す。

仮定した固有振動モードは、それぞれ境界条件を満足することを考慮して、たわみを固有振動モードの線形関数として次式のように表す。

$$W(X, Y, t) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \bar{W}_{ij}(t) g_{ij}(X, Y) \quad (6)$$

ここに、

$$W(X, Y, t) = \frac{w(X, Y, t)}{h}, \quad \bar{W}_{ij}(t) = \frac{\bar{w}_{ij}(t)}{h} \quad (7)$$

得られたたわみを積層板の運動方程式に代入し、 ω_{ij} を積層板の固有角振動数とすると、次式が得られる。

$$\sum_{n=1}^N F_n(t) g_{ij}(\xi_n, \eta_n) = A_{ij}(t) \quad (8)$$

ここで、

$$\xi_n = \frac{x_n}{a}, \quad \eta_n = \frac{y_n}{b}, \quad F_n(t) = \frac{4f_n(t)}{\rho h^2 ab} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} A_{ij}(t) &= 4 \int_0^1 \int_0^1 \left(\frac{d^2 W(X, Y, t)}{dt^2} \right. \\ &\quad \left. + \omega_{ij}^2 W(X, Y, t) \right) g_{ij}(X, Y) dX dY \end{aligned} \quad (10)$$

式(8)は、時刻 t における点衝撃荷重の荷重位置・荷重履歴

第2図 加速度計測点数

歴と積層板のたわみ・加速度の間に成立する関係であり、点衝撃荷重の同定における基礎式となる。また、式(8)は、いずれの境界条件においても成立するため、周辺固定支持の場合においても、点衝撃荷重の簡易同定法は適用可能であることがわかる。

式(10)の $A_{ij}(t)$ は加速度・たわみ情報から決定される値であるが、たわみ情報は加速度情報を積分すれば求めることができるため、計測情報としては加速度のみで十分である。ここでは、第2図に示すように、無次元化した X , Y 座標の区間 l に等分割された格子点での積層板の加速度を計測するものとする。計測点数は板内部の格子点総数の $(l-1)^2$ であり、積層板の周辺での加速度は零とする。第2図の例では、 $l=5$ で計測点数は16点である。各計測点における加速度の計測情報をもとに台形公式による数値積分を行い $A_{ij}(t)$ を求める。

2.2 点衝撃荷重の荷重履歴同定式 積層板上の複数点に作用する衝撃荷重の荷重位置が既知である場合について、荷重履歴を求めることを考える。

一般に、積層板上の N 点に衝撃荷重が作用する場合、同定すべき未知数は荷重履歴 $F_1(t), \dots, F_N(t)$ の N 個である。式(8)の同定基礎式を用いると $F_1(t), \dots, F_N(t)$ を求める問題は、次式で示される N 元連立1次方程式を解く問題に帰着する。

$$\begin{cases} F_1(t)g_{11}(\xi_1, \eta_1) + \dots + F_N(t)g_{11}(\xi_N, \eta_N) = A_{11}(t) \\ F_1(t)g_{12}(\xi_1, \eta_1) + \dots + F_N(t)g_{12}(\xi_N, \eta_N) = A_{12}(t) \\ \vdots \\ F_1(t)g_{pq-1}(\xi_1, \eta_1) + \dots + F_N(t)g_{pq-1}(\xi_N, \eta_N) = A_{pq-1}(t) \\ F_1(t)g_{pq}(\xi_1, \eta_1) + \dots + F_N(t)g_{pq}(\xi_N, \eta_N) = A_{pq}(t) \end{cases} \quad (11)$$

(ただし、 $p \times q = N$)

例えば、積層板上の任意の1点に衝撃荷重が作用する場合、荷重履歴 $F_1(t)$ は次式で求められる。

$$F_1(t) = \frac{A_{11}(t)}{g_{11}(\xi_1, \eta_1)} \quad (12)$$

また、積層板上の任意の2点に衝撃荷重が作用する場合、次式により $F_1(t), F_2(t)$ が求められる。

$$\begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}(\xi_1, \eta_1) & g_{11}(\xi_2, \eta_2) \\ g_{12}(\xi_1, \eta_1) & g_{12}(\xi_2, \eta_2) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_{11}(t) \\ A_{12}(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

2.3 少ない計測点の場合における同定精度改善方法 前報で提案した点衝撃荷重の簡易同定法¹¹⁾において、精

度良い同定を行うためには式(10)の $A_{ij}(t)$ を正確に求めなくてはならない。そのためには、極めて数多くの計測点での加速度情報を用いて数値積分誤差を排除しなければならないが、実用性を考慮すると、できるだけ少ない計測情報から同定を行う必要がある。文献12)においては、静荷重負荷時のたわみ計測情報を用いた積層板の曲げ剛性同定に反復法を適用することにより、少ないたわみ計測点数の場合においても精度良い同定が可能となることが報告されている。

本研究では、荷重履歴同定に対して反復法を用いることにより、計測点数減少に起因する同定誤差を補正することを試みる。

第3図に反復法のフローチャートを示す。まず、計測された加速度 $\ddot{w}(t)$ より $A_{ij}(t)$ を計算し、荷重履歴 $f_n(t)$ を同定する。得られた $f_n(t)$ は式(10)の数値積分による誤差を含んでいる。この $f_n(t)$ を用いて積層板の応答解析を行い、たわみ $\tilde{w}(t)$ ・加速度 $\tilde{\ddot{w}}(t)$ を計算する。計測された加速度 $\ddot{w}(t)$ と応答解析による加速度 $\tilde{\ddot{w}}(t)$ 、および計測された加速度を積分することで得たたわみ $w(t)$ と応答解析によるたわみ $\tilde{w}(t)$ の差をそれぞれ $\Delta\ddot{w}(t)$, $\Delta w(t)$ とし、式(10)に代入すると $\Delta A_{ij}(t)$ が計算できる。先ほどの $A_{ij}(t)$ とこの $\Delta A_{ij}(t)$ の和 ($A_{ij}(t) + \Delta A_{ij}(t)$) を新たに

第3図 反復法のフローチャート

$A_{ij}(t)$ と置き直し、この新たな $A_{ij}(t)$ を用いて再度、荷重履歴 $\tilde{f}_n(t)$ の同定を行う。このように、同定された荷重履歴が収束するまで反復計算を行い、同定誤差を補正する。

同定された荷重履歴の収束判定には次式を用いる。

$$\left| \frac{\tilde{f}_n^m(t) - \tilde{f}_n^{m-1}(t)}{\tilde{f}_n^m(t)} \right| < \epsilon \quad (14)$$

ここで、 $\tilde{f}_n^m(t)$ は m 回目の反復計算において同定された荷重履歴である。ただし、 $\tilde{f}_n^0(t) = f_n(t)$ とする。

3. 数値計算結果および考察

本同定方法によって同定された荷重履歴の同定精度評価指標として、次式で定義される $\Delta f_n(t)$ を用いる。

$$\Delta f_n(t) = \frac{|f_n^{\text{exact}}(t) - f_n(t)|}{f_n^{\text{exact}}(t)} \times 100 [\%] \quad (15)$$

ここで、 $f_n^{\text{exact}}(t)$ は n 番目の点衝撃荷重に対する正解の荷重履歴を示す。同定精度評価の際には正解の荷重負荷開始時刻から負荷終了時刻までの $\Delta f_n(t)$ の平均値、 Δf_n^{ave} で評価するものとする。

数値計算例としては、炭素繊維/エポキシ樹脂複合材料を考え、積層構成 $[0_2/90]_s$ の直交異方性積層板を対象にする。計算に用いた一方向材の材料定数および積層板の具体的寸法を第1表に示す。ここで、 E_L : 繊維方向のヤング率、 E_T : 繊維と垂直方向のヤング率、 G_{LT} : せん断係数、 ν_L : 繊維方向のポアソン比である。

積層板の自由振動解析において、自由振動の固有振動モードが式(4)で与えられる周辺単純支持の場合は正解の固有角振動数が得られる。一方、自由振動の固有振動モードが式(5)で与えられる周辺固定支持の場合は固有角振動数の収束を考慮し、 $K \times L = 7 \times 7$ を用いた。

積層板の応答解析における式(6)の項数としては、周辺単純支持および周辺固定支持のいずれの場合でも、高周波の影響を除去するものと仮定してたわみの収束性のみを考慮し、 $I \times J = 7 \times 7$ を用いた。また、積層板の初期条件として荷重負荷前はたわみ・加速度ともに零で静止しているものとする。

与える点衝撃荷重に関しては、点衝撃荷重を半波の正弦パルスで仮定し、第2表に示す2種類の荷重を考えた。

3.1 点衝撃荷重の荷重履歴同定 周辺単純支持あるいは周辺固定支持の直交異方性積層板を対象とし、点衝撃荷重の荷重位置が既知の場合について、荷重履歴の同定を行う。

第1表 材料定数

$E_L = 142$ [GPa], $E_T = 10.8$ [GPa], $G_{LT} = 5.49$ [GPa], $\nu_L = 0.3$, $\rho = 1,600$ [kg/m ³] $a = 100$ [mm], $b = 100$ [mm], $h = 1$ [mm]
--

第2表 点衝撃荷重

Force number: n	Loading point (ξ_n^{exact} , η_n^{exact})	Max. load [N]	Period [ms]
1	(0.6, 0.4)	1,000	0.4
2	(0.3, 0.7)	750	0.3

第4図 計測点数が荷重履歴の同定精度に及ぼす影響（1点衝撃荷重）

第6図 計測点数が荷重履歴の同定精度に及ぼす影響（2点衝撃荷重）

第5図 1点衝撃荷重の荷重履歴同定結果（周辺固定支持，計測点数：25点）

第7図 2点衝撃荷重の荷重履歴同定結果（周辺固定支持，計測点数：25点）

ただし、各計測点での加速度は $20 \mu\text{s}$ 毎に計測誤差なく計測できるものとし、得られた $A_u(t)$ を用いて $\Delta T = 20 \mu\text{s}$ 毎に同定を行う。

3.1.1 1点衝撃荷重 ここでは、1点衝撃荷重の場合についての荷重履歴同定を行った。

(i) 周辺単純支持の場合^{*3}：第4図における実線に、周辺単純支持において、加速度計測点数が荷重履歴の同定精度に及ぼす影響を示す。ここでは、計測点数を4点、9点、16点、25点および36点と変化させた場合について、同定精度評価指標 Δf_1^{ave} を示した。周辺単純支持の場合において、本数値計算例での1点衝撃荷重の荷重履歴を精度良く同定するためには、16点の計測点数が最低限必要であることがわかる。

(ii) 周辺固定支持の場合：第4図における点線に、周辺固定支持において、加速度計測点数が荷重履歴の同定精度に及ぼす影響を示す。周辺固定支持の場合において、本数値計算例での1点衝撃荷重の荷重履歴を精度良く同定するためには、25点の計測点数が最低限必要であることがわかる。ここで、第5図に、周辺固定支持の場合の、25

点計測における荷重履歴の同定結果を示す。同定された荷重履歴と正解の荷重履歴は一致しており、周辺固定支持の場合において良好な同定結果が得られていることがわかる。

3.1.2 2点衝撃荷重 ここでは、2点衝撃荷重の場合についての荷重履歴同定を行った。

(i) 周辺単純支持の場合：第6図における実線に、周辺単純支持において、加速度計測点数が荷重履歴の同定精度 Δf_n^{ave} に及ぼす影響を示す。 Δf_1^{ave} および Δf_2^{ave} は16点以上の計測点数でほぼ零に収束している。このことから1点衝撃荷重の場合と同様に、16点の計測点数を用いれば、2点衝撃荷重における荷重1、荷重2は十分精度良く同定できることがわかる。

(ii) 周辺固定支持の場合：第6図における点線に、周辺固定支持において、加速度計測点数が荷重履歴の同定精度 Δf_n^{ave} に及ぼす影響を示す。周辺固定支持の場合において25点の計測点数を用いれば、1点衝撃荷重の場合と同様に、2点衝撃荷重の場合も十分精度良く同定できることがわかる。ここで、第7図には、周辺固定支持の場合の、25点計測における荷重履歴の同定結果を示す。同定された荷重履歴と正解の荷重履歴は、荷重1、荷重2ともにほぼ一致しており、いずれの荷重履歴も高精度に同定されて

^{*3} 文献11)では、直交異方性積層板を対象として、点衝撃荷重の荷重位置と荷重履歴を同時に同定する場合について取り扱ったものであり、正解の荷重位置が同定された場合に対応する。

第8図 減少させた計測点数が荷重履歴の同定精度に及ぼす影響 (1点衝撃荷重, 周辺単純支持)

第10図 減少させた計測点数が荷重履歴の同定精度に及ぼす影響 (1点衝撃荷重, 周辺固定支持)

第9図 1点衝撃荷重の荷重履歴同定結果 (周辺単純支持, 計測点数: 9点)

第11図 1点衝撃荷重の荷重履歴同定結果 (周辺固定支持, 計測点数: 16点)

いることがわかる。

以上より, 本同定方法は周辺固定支持積層板にも適用可能であることがわかった。また, 荷重履歴を精度良く同定するために必要な加速度計測点数は, 境界条件によって異なることがわかった。本研究で対象とした1点, 2点衝撃荷重の荷重履歴を精度良く同定するためには, 周辺単純支持の場合は16点, 周辺固定支持の場合は25点の計測点数が最低限要求される。境界条件によって精度良い同定に必要な計測点数に差があるのは, 各境界条件で固有角振動数が異なることが理由の一つとして考えられる。すなわち, 積層板の固有角振動数が大きいほど, 各計測点の時間に対する挙動変化が大きくなり, 式(8)の同定基礎式における $A_{ij}(t)$ を精度良く近似するためには, より多くの計測点数が必要になるということである。このため, 周辺単純支持積層板よりも固有角振動数の大きくなる周辺固定支持積層板を対象とした場合は, 精度良い同定のために, より多くの計測点数が要求されると考えられる。

3.2 計測点数を減少させた場合の点衝撃荷重の荷重履歴同定 周辺単純支持あるいは周辺固定支持の直交異方性積層板を対象とし, 点衝撃荷重の荷重位置が既知の場合について, 加速度計測点数を減少させて荷重履歴の同定を行う。

ただし, 計測点数に関しては, 3章1節における数値計算結果より, 周辺単純支持で16点, 周辺固定支持で25点の計測点数が最低限必要であることがわかっている。従って, 周辺単純支持では16点以下, 周辺固定支持では25点以下の計測点数に対して数値計算を行うものとする。その際は, 同定に反復法を用いない場合および反復法を用いた場合の同定結果の比較から反復法の有効性を検証する。

また, 反復法を用いた場合は計算時間が増加する可能性があるため, ここでは各計測点での加速度が $40 \mu\text{s}$ 毎に計測誤差なく計測できるものとし, 得られた $A_{ij}(t)$ を用いて $\Delta T = 40 \mu\text{s}$ 毎に同定を行うものとした。さらに, 式(14)における ϵ は, $\epsilon = 0.05$ とした。

3.2.1 1点衝撃荷重 ここでは, 1点衝撃荷重の場合について荷重履歴同定を行った。

(i) 周辺単純支持の場合: 第8図に, 周辺単純支持の場合において, 計測点数が荷重履歴の同定精度に及ぼす影響を示す。この結果より, 9点に計測点数を減少させても, 反復法を用いることで精度良い同定が可能となることがわかる。ここで, 第9図に, 周辺単純支持の場合の9点計測における荷重履歴の同定結果を示す。反復法を用いることにより荷重履歴のピーク値はほぼ正解が得られており, この結果からも反復法の有効性がわかる。

第12図 減少させた計測点数が荷重履歴の同定精度に及ぼす影響 (2点衝撃荷重, 周辺単純支持)

第14図 減少させた計測点数が荷重履歴の同定精度に及ぼす影響 (2点衝撃荷重, 周辺固定支持)

第13図 2点衝撃荷重の荷重履歴同定結果 (周辺単純支持, 計測点数: 9点)

第15図 2点衝撃荷重の荷重履歴同定結果 (周辺固定支持, 計測点数: 16点)

(ii) 周辺固定支持の場合: 第10図に, 周辺固定支持の場合において, 計測点数が荷重履歴の同定精度に及ぼす影響を示す。この結果より, 16点に計測点数を減少させても, 反復法を用いることにより, Δf_n^{ave} が5%程度以下の同定が可能となることがわかる。ここで, 第11図には, 周辺固定支持の場合の16点計測における荷重履歴の同定結果を示す。この図から, 反復法により荷重履歴ピーク値付近で同定精度の改善がなされていることがわかる。

3.2.2 2点衝撃荷重 ここでは, 2点衝撃荷重の場合について荷重履歴同定を行った。

(i) 周辺単純支持の場合: 第12図に, 周辺単純支持の場合において, 計測点数が荷重履歴の同定精度に及ぼす影響を示す。この結果より, 9点に計測点数を減少させても, 反復法を用いることにより, 荷重1, 荷重2とも大幅な同定精度改善がなされることがわかる。ここで, 第13図に, 周辺単純支持の場合の9点計測における荷重履歴の同定結果を示す。反復法を用いない場合は, 同定結果に正解値と大きなずれが生じているが, 反復法を用いた場合は, 同定誤差が補正され, 荷重履歴はほぼ正解値が得られることがわかる。

(ii) 周辺固定支持の場合: 第14図に, 周辺固定支持の場合において, 計測点数が荷重履歴の同定精度に及ぼす影

響を示す。この結果より, 16点に計測点数を減少させても, 反復法を用いることで, 精度良い同定が可能となることがわかる。ここで, 第15図に, 周辺固定支持の場合の16点計測における荷重履歴の同定結果を示す。この場合も, 反復法の使用により同定精度が向上しており, その有効性がわかる。

以上より, 反復法は, 1点衝撃荷重, 2点衝撃荷重および境界条件を問わず有効であり, 反復法を用いることにより計測点数を減少させた場合においても精度良い同定が可能となることが示された。

4. 結 言

本研究では, 周辺単純支持および周辺固定支持直交異方性積層板上の複数点に作用する衝撃荷重の荷重履歴同定方法を確立した。また, 各境界条件において計測点数が同定精度に及ぼす影響について検討した。さらに, 同定するときに反復法を用いることにより, 加速度計測点数を減少させた場合における同定精度の改善について検討した。

数値計算例では, 周辺単純支持および周辺固定支持の直交異方性積層板を対象とし, 点衝撃荷重の荷重位置が既知の場合について荷重履歴の同定を行った。本研究で対象とした1点, 2点衝撃荷重については, 周辺単純支持の場合

は16点, 周辺固定支持の場合は25点の計測点数を用いれば精度良い同定が可能であった。この結果, 本同定方法は, 積層板の境界条件が周辺固定支持の場合に対しても有効であること, また, 境界条件によって精度良い同定を行うために最低限要求される計測点数は異なることがわかった。

次に, 荷重履歴同定に反復法を適用した場合について検討した。反復法により, 1点, 2点衝撃荷重を問わず, 周辺単純支持の場合は9点に, 周辺固定支持の場合は16点に計測点数を減少させても精度良い同定が可能となった。この結果, 反復法は計測点数を減少させた場合における同定精度改善に有効であることが示された。

参 考 文 献

- 1) Doyle, J. F.: An Experimental Method for Determining the Dynamic Contact Law, *Exp. Mech.*, **24** (1984), pp. 10-16.
- 2) Doyle, J. F.: Further Developments in Determining the Dynamic Contact Law, *Exp. Mech.*, **24** (1984), pp. 265-270.
- 3) Zhu, J. and Lu, Z.: A Time Domain Method for Identifying Dynamic Loads on Continuous Systems, *J. Sound Vib.*, **148** (1991), pp. 137-146.
- 4) Busby, H. R. and Trujillo, D. M.: Solution of an Inverse Dynamics Problem Using an Eigenvalue Reduction Technique, *Comput. Struct.*, **25** (1987), pp. 109-117.
- 5) Hollandsworth, P. E. and Busby, H. R.: Impact Force Identification Using the General Inverse Technique, *Int. J. Impact Eng.*, **8** (1989), pp. 315-322.
- 6) 井上裕嗣, 渡辺隆一, 渋谷寿一, 小泉 堯: 逆たたみ込み法による衝撃力の測定, 非破壊検査, **37** (1988), pp. 337-342.
- 7) 放生明廣, 茶谷明義, 上村文人: 畳み込み積分による衝撃力推定法, 機論, **55**, A (1989), pp. 477-482.
- 8) Yen, C. S. and Wu, E.: On the Inverse Problem of Rectangular Plates Subjected to Elastic Impact, Part I: Method Development and Numerical Verification, *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, **62** (1995), pp. 692-698.
- 9) Yen, C. S. and Wu, E.: On the Inverse Problem of Rectangular Plates Subjected to Elastic Impact, Part II: Experimental Verification and Further Applications, *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, **62** (1995), pp. 699-705.
- 10) Jones, R. T., Sirkis, J. S. and Friebele, E. J.: Detection of Impact Location and Magnitude for Isotropic Plates Using Neural Networks, *J. Int. Mater. System Struct.*, **7** (1997), pp. 90-99.
- 11) 佐藤正喜, 小野崎徹, 関根英樹, 福永久雄: 直交異方性積層板における複数衝撃荷重の簡便な同定方法の提案, 機論, **64**, A (1998), pp. 2677-2685.
- 12) Fukunaga, H., Sekine, H. and Okada, K.: Stiffness Identification of Symmetrically Laminated Plates Using Bending Deflection, *Mater. Sci. Research Int.*, **2** (1996), pp. 93-98.