

梁に作用する非定常な衝撃荷重の同定

An Identification of Non-stationary Impact Force on the Beams

柴田俊文*・須藤敦史**・三上 隆***・荏澤憲吉****

Toshifumi SHIBATA, Atushi SUTOH, Takashi MIKAMI and Noriyoshi NIRASAWA

- * 学生員 修士 (工学) 北海道大学大学院工学研究科博士後期課程 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
 ** 正会員 博士 (工学) 株式会社地崎工業 技術開発部 主任研究員 (〒105-8488 東京都港区西新橋2-23-1)
 *** 正会員 工 博 北海道大学大学院工学研究科教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
 **** 正会員 博士 (工学) 北海道大学大学院工学研究科助教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

In impact analysis, system identification techniques have increasingly become an important research topic for safety evaluation of structures. In most system identification approaches, the information on input and output response must be known. However, it is difficult to accurately measure the input information. This paper is concerned with a method for estimating the impact load from deformation and strain responses on the beams. An estimation algorithm is based on the Kalman filter, which has been a powerful tool to solve the identification problems for non-stationary state parameters. Numerical examples of simulation with and without noise using two transfer matrices based on Markov process are considered. The comparison of the identified and the true time histories of impact force shows the usefulness of the proposed algorithm.

Key Words: identification, impact force, Kalman filter, Markov process, stochastic method

1. はじめに

設計時に衝撃的な荷重を用いる構造物として落石覆工や落石防護工が挙げられ、1.落石の発生条件とその規模の推定 2.落石により生じる衝撃力の推定 3.大規模な落石に対する安全照査法 などの問題が指摘¹⁾されている。

しかし落石の発生やその規模は、斜面形状、勾配、地質、植生などの素因と降雨、積雪、地下水の凍結融解、地震などの誘因が複雑に関連する現象であるため特定できないのが現状である。

また、衝撃荷重の推定式は数多くの理論もしくは実験評価式が提案されているが、個々の落石の規模や形態が異なることなどの理由により、その正確な推定は容易ではない。

加えて、安全性の照査のために耐用年数内における規模毎の落石発生確率が必要となるが、現状ではこのようなレベルまで落石荷重を評価するのは困難である。したがって、落石荷重の評価のためには落石覆工や落石防護工の変形などから、その衝撃荷重を推定する逆解析的なアプローチが設計上重要となってくる。

そこで本論文では、衝撃力の正確な評価に対する基礎検討として、衝撃荷重を受ける構造モデル及びそのパラメータは既知とし、カルマンフィルタ^{2),3)}を基本とした時間領域の同定手法により、作用する衝撃荷重の同定を行っている。

このような構造システムにおける入力値の同定問題に対して、地震動ではカルマンフィルタを用いた時間領域の同定^{4),5),6)}や数学的逆算に基づく方法による推定⁷⁾が行われている。

ここで地震動や衝撃荷重は非定常性もしくは不規則な変動を示し、それらの作用した構造物の応答は非線形かつ時間依存性が強いのが一般的である。カルマンフィルタは条件付き最尤推定法であり、対象とする系が非定常特性を示す場合には、観測ノイズの除去が効率的に行えず追従性に劣ると指摘されている。これに対し忘却係数を設定して過去の観測ノイズの影響を除去し、非定常な構造モデルのパラメータ推定^{8),9)}を行う研究が報告されている。しかし、衝撃荷重のように不規則な変動を示す衝撃荷重の同定問題に対しては、周波数領域における推定が多く、時間領域における同定の研究事例^{10),11)}は少な

いのが現状である。

本論文では、まず衝撃応答解析のマルコフ性をカルマンフィルタにおける二種類の変換行列として設定し、解析精度の検証を行っている。次に、それらの変換行列に対して、時間の影響を減少させる係数（以下影響度係数と称する）を乗じて、観測値の重要度を間接的に表現し、衝撃荷重の同定解析を行っている。加えて、落石覆工などの衝撃荷重を受ける構造物の安全照査には、有限要素法による衝撃応答解析を行い、部材細部の変位や応力などの評価を行う場合が多くなってきているため、最後に汎用有限要素法との組み合わせを提示し、実解析への拡張性の検討を行っている。

2. カルマンフィルタによる解析

2.1. カルマンフィルタ

カルマンフィルタは状態方程式と観測方程式で構成されており、未知状態量の事前分布を得られる観測値により更新し、事後分布を推定する条件付き最尤推定法である。ここでカルマンフィルタを離散化すると以下の式となる。

$$\mathbf{x}_t = \Phi_{t-1} \mathbf{x}_{t-1} + \Gamma_{t-1} \mathbf{w}_{t-1} \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{H}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t \quad (2)$$

ここで、 Φ_t は遷移行列、 $\mathbf{x}_t$ は状態ベクトル、 Γ_t 、 $\mathbf{H}_t$ は変換行列、 $\mathbf{y}_t$ は観測ベクトルである。また $\mathbf{w}_t$ 、 $\mathbf{v}_t$ はシステムノイズ、観測ノイズを表し、次式で示されるように統計的性質は正規分布で示される。

$$E[\mathbf{w}_t] = 0, E[\mathbf{v}_t] = 0 \quad (3)$$

$$E\left[\begin{Bmatrix} \mathbf{w}_t \\ \mathbf{v}_t \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{w}_\tau \\ \mathbf{v}_\tau \end{Bmatrix}^T\right] = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_t & 0 \\ 0 & \mathbf{R}_t \end{bmatrix} \delta_{t\tau} \quad (4)$$

$\delta_{t\tau}$ はクロネッカのデルタ関数、 $\mathbf{Q}_t$ はシステムノイズの分散、 $\mathbf{R}_t$ は観測誤差分散である。ここに、状態量の初期推定値を $\hat{\mathbf{x}}_0$ 、その共分散を $\mathbf{P}_0$ として、式(1)による状態量の最小分散推定値を示すと、カルマンフィルタのアルゴリズムとして以下の式を得ることができる。

$$\bar{\mathbf{x}}_t = \Phi_{t-1} \hat{\mathbf{x}}_{t-1} \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_t = \Phi_{t-1} \mathbf{P}_{t-1} \Phi_{t-1}^T + \Gamma_{t-1} \mathbf{Q}_{t-1} \Gamma_{t-1}^T \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \bar{\mathbf{x}}_t + \mathbf{P}_t \mathbf{H}_t^T \mathbf{R}_t^{-1} (\mathbf{y}_t - \mathbf{H}_t \bar{\mathbf{x}}_t) \quad (7)$$

$$\mathbf{P}_t = (\mathbf{M}_t^{-1} + \mathbf{H}_t^T \mathbf{R}_t^{-1} \mathbf{H}_t)^{-1} \quad (8)$$

ここで $\hat{\mathbf{x}}_{t-1}$ 、 $\mathbf{P}_{t-1}$ は次式で示される。

$$E[\mathbf{x}_{t-1}] = \hat{\mathbf{x}}_{t-1} \quad (9)$$

$$E[(\mathbf{x}_{t-1} - \hat{\mathbf{x}}_{t-1})(\mathbf{x}_{t-1} - \hat{\mathbf{x}}_{t-1})^T] = \mathbf{P}_{t-1} \quad (10)$$

2.2. 状態方程式と変換行列

衝撃荷重を状態量とし、かつ有限要素法との組み合わせ²⁾を考えるため、状態方程式は定常性を示すものと仮定する。式(1)を $\Gamma_{t-1} = 0$ 、 $\Phi_{t-1} = \mathbf{I}$ に変更すると式(11)となる。

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{I} \mathbf{x}_{t-1} \quad (11)$$

ただし、 $\mathbf{I}$ は単位行列を表す。式(11)より式(6)の第二項目は0となり $\bar{\mathbf{x}}_t = \hat{\mathbf{x}}_{t-1}$ 、 $\mathbf{M}_t = \mathbf{P}_{t-1}$ となる。式(11)のように状態方程式を定常と仮定したため、カルマンフィルタにおける状態量推定アルゴリズムでは、観測方程式を各状態量の推定点において偏微分した変換行列を求めなければならない。そこで式(12)に示すように差分近似を用いて変換行列 $\mathbf{H}_t$ のベクトル成分 h_{ij} を求める³⁾。

$$h_{ij} = \frac{y_i(\mathbf{x} + \mathbf{e}_j \Delta x_j)_t - y_i(\mathbf{x})_t}{\Delta x_j} \quad (12)$$

ここで Δx_j は $\mathbf{x}$ の j 番目の微小増分、 $\mathbf{e}_j$ は j 番目の要素が1の単位ベクトルであり、 y_i は $\mathbf{y}$ の i 番目の要素を表す。観測ベクトルと状態ベクトルの関係が非線形の場合はその相互の関係に依存して変換行列の値は変化するが線形の場合は一定となる。

2.3. マルコフ性を考慮した変換行列

カルマンフィルタのような逐次推定法では、衝撃荷重や地震動のような非定常性を示す状態量に対して、安定した推定と観測ノイズの除去能力はトレードオフの関係⁹⁾にある。

ここで、本解析では状態方程式が定常であるため、観測方程式から変換行列を算出する。この変換行列は感度係数を意味しており、現時点における過去の観測値の影響度を示している。

また、衝撃荷重は過去の状態に依存することより、式(13)に示すようにマルコフ過程¹⁴⁾として表される。

$$\begin{aligned} P\{\mathbf{x}(\tau_t) \leq \mathbf{x}_t \mid \mathbf{x}(\tau_1) = \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}(\tau_t) = \mathbf{x}_{t-1}\} \\ = P\{\mathbf{x}(\tau_t) \leq \mathbf{x}_t \mid \mathbf{x}(\tau_t) = \mathbf{x}_{t-1}\} \end{aligned} \quad (13)$$

さらに状態量が m 時刻の状態まで依存すると仮定すれば離散時間の m 重マルコフ連鎖として式(14)で示される。

$$\begin{aligned} P\{\mathbf{x}_t = k \mid \mathbf{x}_0 = i_0, \dots, \mathbf{x}_{t-m} = i_{t-m}, \dots, \mathbf{x}_{t-1} = i_{t-1}\} \\ = P\{\mathbf{x}_t = k \mid \mathbf{x}_{t-m} = i_{t-m}, \dots, \mathbf{x}_{t-1} = i_{t-1}\} \end{aligned} \quad (14)$$

ここで m は自然数であり、現時点の事象の起こる確率は m 時刻以前の状態には無関係であることを示している。

次に m 重マルコフ連鎖の考えに基づく二種類の変換行列を以下に示す。ここで p は観測点数を表し、また変換行列(1)、(2)の右肩に type1、type2 をそれぞれ付した。

(1) 変換行列(1)

$$H_1^{type1} = \begin{bmatrix} h_{11} & 0 & \dots & 0 \\ h_{21} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{p1} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$H_2^{type1} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & 0 & \dots & 0 \\ h_{21} & h_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{p1} & h_{p2} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$H_m^{type1} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1m} & 0 & \cdots & 0 \\ h_{21} & \cdots & h_{2m} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{p1} & \cdots & h_{pm} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_k^{type1} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & h_{1(k-n+1)} & \cdots & h_{1k} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & h_{2(k-m+1)} & \cdots & h_{2k} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & h_{p(k-n+1)} & \cdots & h_{pk} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

変換行列(1)が時刻 k で $m \times p$ 個の値を乗じているのに対して変換行列(2)では式(16)に示すように m 個の列に分割して解析を行う。つまり時刻 k で m 個の変換行列を用いて並列的に処理するため m 回カルマンフィルタで計算を行うことになる。

$$\mathbf{H}_k^{type2} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & h_{1k} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & h_{2k} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & h_{pk} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_k^{type2} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & 0 & h_{1(k-1)} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & h_{2(k-1)} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & h_{p(k-1)} & 0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_k^{type2} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & h_{1(k-m+1)} & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & h_{2(k-m+1)} & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & h_{p(k-m+1)} & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

それに対し変換行列(2)では、まず式(16)の第一の行列が時刻 k の値のみを同定、その後第二の行列が時刻 $k-1$ の値を同定、と m 回繰り返すので時刻 k の推定値には k 列目の要素の情報のみで解析を行うことになる。

本解析では変換行列の大きさで過去の観測値の重要度を考慮するため、式(15)、(16)に対して後ろから式(17)の影響度係数を乗じる。

$$\gamma_s = \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & 0 & & \\ & & & \gamma_{k-m+1} & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & \gamma_k \\ & & & & & & 0 \\ & 0 & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\gamma_r = a^{k-r}, \quad r = k, k-1, \dots, k-m+1 \quad (18)$$

また、改めて変換行列を式(17)、(18)を用いて $\mathbf{H}_{st} = \mathbf{H}_t \cdot \boldsymbol{\gamma}_s$ とすると、カルマンフィルタの推定式は(19)、(20)となり、観測誤差の影響を減少させるゲインを含むアルゴリズムとなっている。

$$\hat{\mathbf{x}}_i = \bar{\mathbf{x}}_i + \mathbf{P}_i \mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} (\mathbf{y}_i - \mathbf{H}_i \bar{\mathbf{x}}_i) \quad (19)$$

$$P_t = (M_t^{-1} + H_{st}^T R_t^{-1} H_{st})^{-1} \quad (20)$$

3. 数値計算例

3.1. 数値解析モデル

解析に用いた構造モデルは L/h (梁の長さ/高さ)=6.67、 b/h (梁の幅/高さ)=0.52、 E/G (弾性係数/せん断弾性係数)=2.4、 c (縦波の速度) $=0.35 \times 10^6$ (cm/sec) で、図-1 に示すように両端単純支持梁の中央に衝撃荷重が作用するものを用い、あらかじめ解析により得られた応答値を観測値として衝撃荷重を同定する。なお観測点は梁中央の一点のみ ($p=1$) とした。

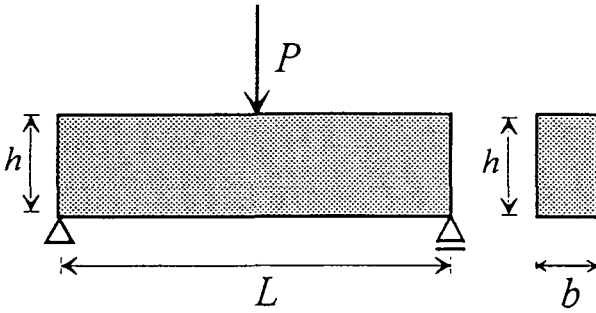


図-1 解析モデル

応力波の伝播特性が良好な Timoshenko 梁理論に基づき有限要素法で離散化したプログラム⁵⁾において、片側半分を 20 要素に分割したモデルを用いて解析を行った。また、時間積分法は Newmark β 法を採用した。

3.2. 変換行列の比較

m 重マルコフ連鎖に基づく二種類の変換行列を用い、かつ観測値として梁中央の変位及びひずみの波形 (図-2) を用いた衝撃荷重の同定精度の比較を行う。ここでモード解析法を用いて求めた解を厳密

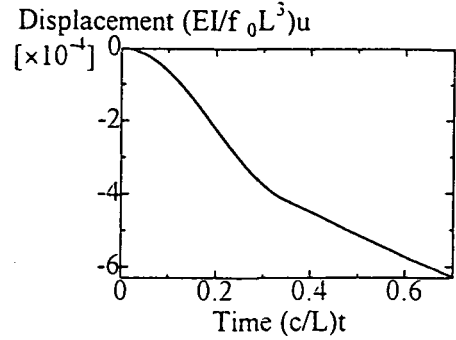


図-2(a) 正弦波の衝撃荷重の観測波形 (変位)

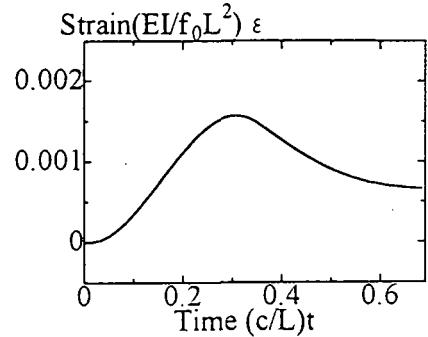
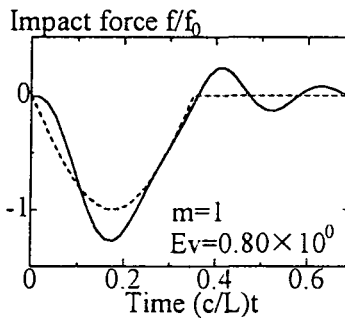
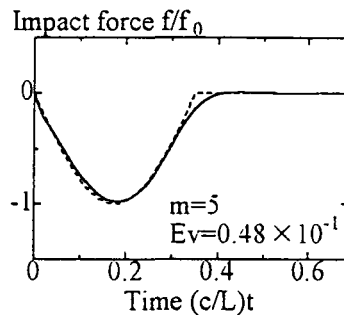


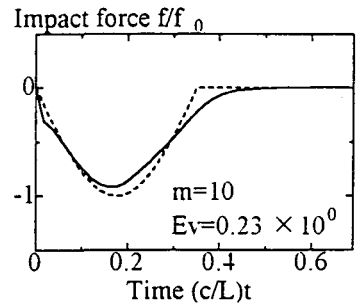
図-2(b) 正弦波の衝撃荷重の観測波形 (ひずみ)



(a) $m=1$ の結果

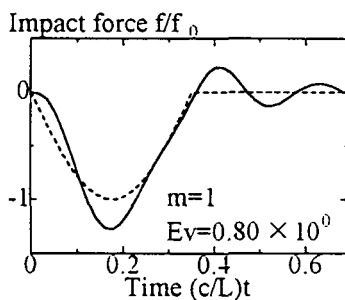


(b) $m=5$ の結果

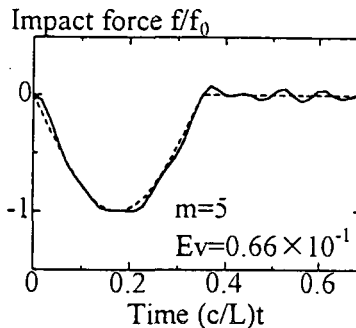


(c) $m=10$ の結果

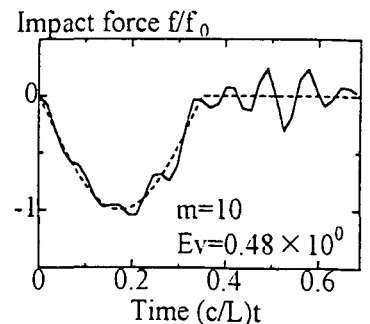
図-3 変位を使用した際の影響時間数の影響 (変換行列(1))



(a) $m=1$ の結果

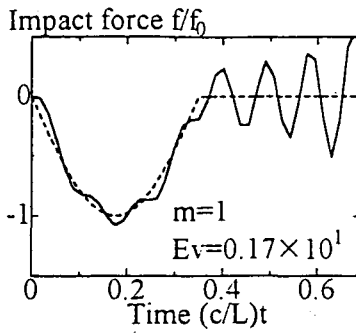


(b) $m=5$ の結果

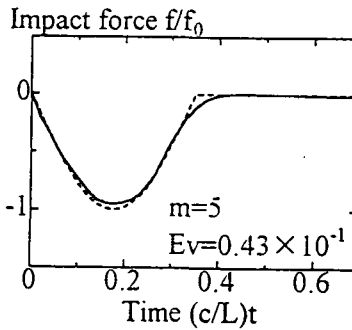


(c) $m=10$ の結果

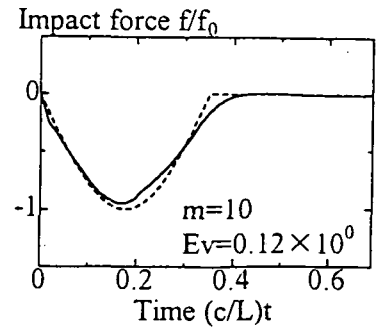
図-4 変位を使用した際の影響時間数の影響 (変換行列(2))



(a) $m=1$ での結果

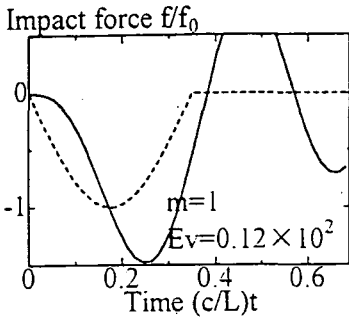


(b) $m=5$ での結果

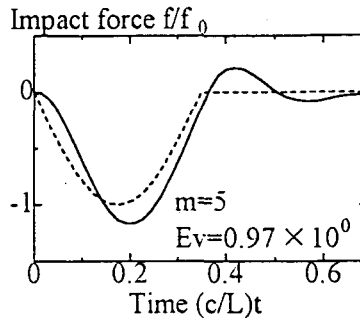


(c) $m=10$ での結果

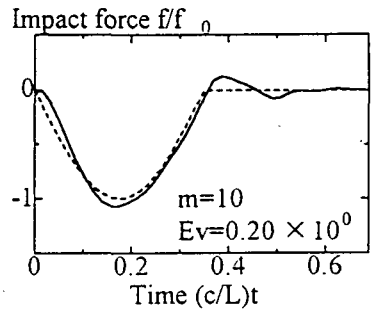
図-5 ひずみを使用した際の影響時間数の影響 (変換行列(1))



(a) $m=1$ での結果



(b) $m=5$ での結果



(c) $m=10$ での結果

図-6 ひずみを使用した際の影響時間数の影響 (変換行列(2))

解とする。同定を行った結果のグラフでは以後縦軸に衝撃荷重、横軸に時間を無次元化して示し、実線を同定した衝撃荷重、破線を厳密解として示す。ここで f_0 は厳密解の絶対値の衝撃荷重最大値、 I は断面二次モーメント、 u は変位、 ε はひずみである。また同定精度の評価関数として式(21)を設定し、図中にその値を示した。

$$Ev = \sum_{i=1}^N (x_{i,ex} - \hat{x}_i)^2 \quad (21)$$

なお N は状態量の数、 $x_{i,ex}$ は時刻 t における厳密解の値である。

最初にマルコフ過程における影響時間数 m の影響を求めるため、 $m=1, 5, 10$ として同定した結果を図-3 から図-6 にそれぞれ (a)、(b)、(c) として示す。ここで、入力した衝撃荷重は正弦波を用いている。なお初期条件は $Ev < 1$ を基準に値を変化させて解析を行い、観測値として変位を用いた場合は P_0 (初期推定誤差共分散行列) = 10、ひずみを用いた場合は $P_0 = 100, 10$ (変換行列(1)、(2)) を採用し、またいずれの解析においても R_i (観測誤差分散) = 1.0×10^{-6} 、 $\hat{x}_0$ (初期推定値入力) = 0 を使用している。また変位を用いた場合は応答値に 10 を

乗じて解析を行った。

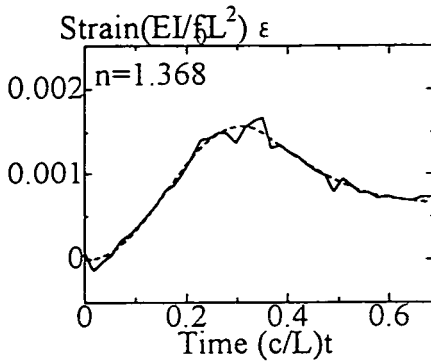
$m=5$ で良好な同定値が得られているが、変換行列(2)でひずみを用いている場合は $m=10$ で精度良い結果が得られている (図-6(c))。一般的に影響時間数 m が最適な大きさを越えた場合は、過去の情報が過剰に用いられるため、推定値の精度が低下していると考えられる。

3.3. 観測誤差の影響

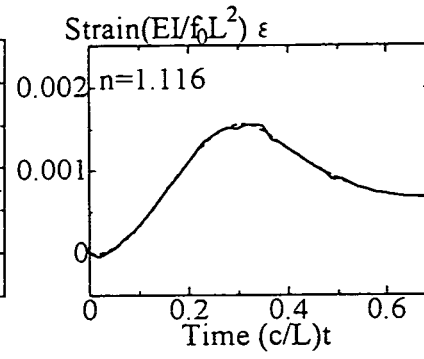
次に、観測誤差の影響を検討するために、図-7 に示す応答波形であるひずみに正規分布する白色ノイズを付加して解析を行った。なお実線はノイズを考慮しているひずみの波形、破線はノイズを加えていないものである。ここで影響時間数 m は変換行列(1)では $m=5$ 、変換行列(2)では $m=10$ を用いている。式(22)の n を分散 (Va で表示) とともにノイズの指標とし、図-7(a)、(b)、(c) の 3 種類の値を用いて解析を行った。

$$n = \frac{|\varepsilon + \text{noise}|_{\max}}{|\varepsilon|_{\max}} \quad (22)$$

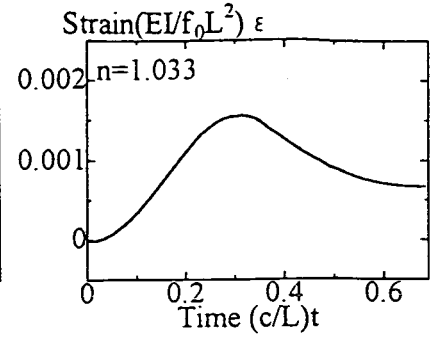
$Ev < 1$ を基準とすると図-8、図-9 よりノイズの分散が 1.0×10^{-9} 以下で衝撃荷重の同定が可能であることがわかる。また、変換行列(1)では観測ノイズの平滑化の能力が優れている。



(a) $Va=1.0 \times 10^{-8}$ での波形

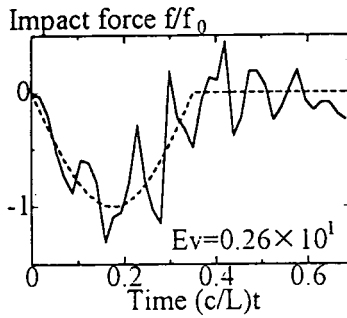


(b) $Va=1.0 \times 10^{-9}$ での波形

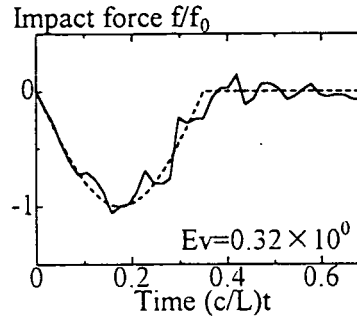


(c) $Va=1.0 \times 10^{-10}$ での波形

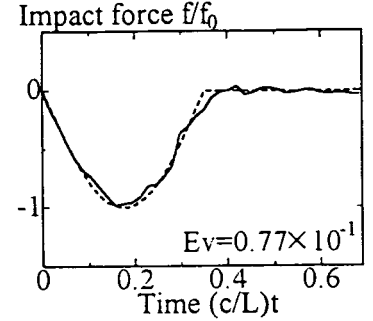
図-7 観測誤差を考慮したひずみの波形



(a) $Va=1.0 \times 10^{-8}$ での結果

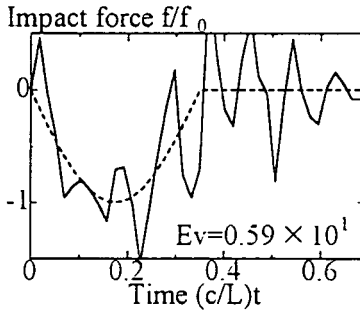


(b) $Va=1.0 \times 10^{-9}$ での結果

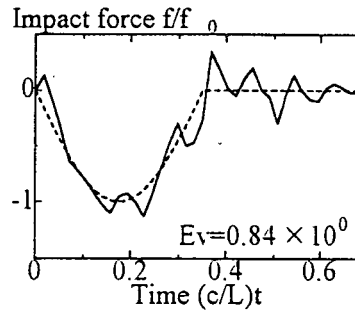


(c) $Va=1.0 \times 10^{-10}$ での結果

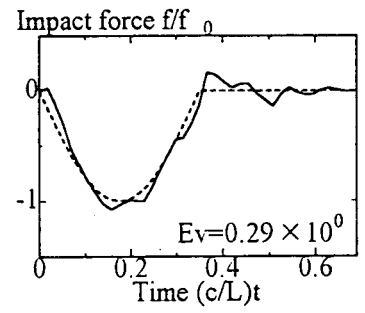
図-8 観測誤差を考慮した結果 (変換行列(1))



(a) $Va=1.0 \times 10^{-8}$ での結果



(b) $Va=1.0 \times 10^{-9}$ での結果

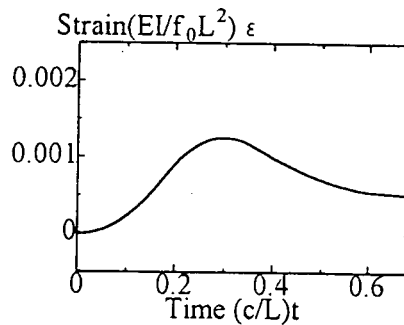


(c) $Va=1.0 \times 10^{-10}$ での結果

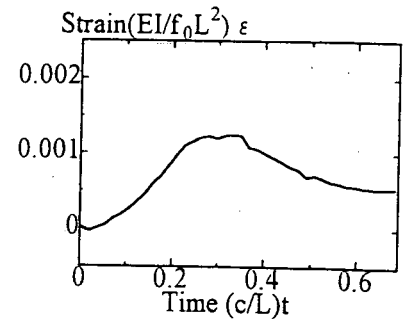
図-9 観測誤差を考慮した結果 (変換行列(2))

3. 4. 影響度係数の比較

観測値における過去の影響を考慮するために式(18)に示した影響度係数の検討を行う。なお、この解析では非定常性の追従性を比較するために、一回微分が不連続な頂点を有する三角形の衝撃荷重を仮定している。ひずみ波形 (図-10(a)、(b)) を用い、前小節同様変換行列(1)では $m=5$ 、変換行列(2)では $m=10$ を用いている。図-11から図-14の(b)には観測誤差 (分散 1.0×10^{-8}) を考慮している結果、(a)には観測



(a) 観測誤差を考慮していない波形



(b) 観測誤差を考慮した波形

図-10 三角形の衝撃荷重のひずみ波形

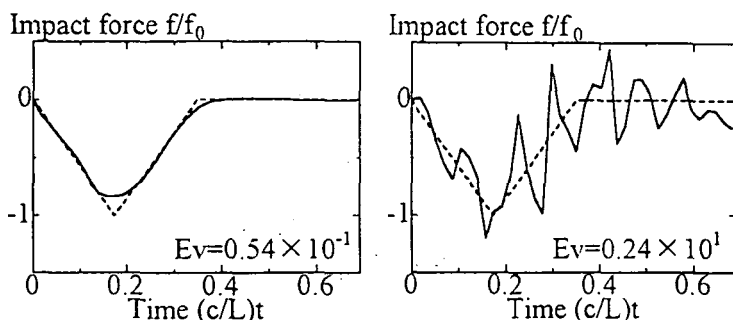
誤差を考慮していない結果を示す。従来の変換行列(1)では頂点部の同定精度が低いが、影響度係数を考慮することで同定精度が向上しており、ノイズを有する観測値を用いた場合においても良好な結果が得られている。

それに対して変換行列(2)では、影響度係数を考慮していない場合頂点部の結果が良好であるのに対し、考慮すると同定精度は変換行列(1)と比べて劣る結果となった。またノイズの平滑化の能力は向上しているにもかかわらず、同定精度は変換行列(1)と比べて劣る結果となった。

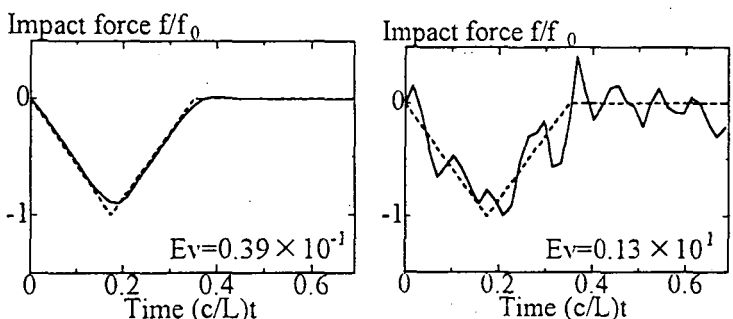
変換行列(2)では係数を乗ずることによりノイズの平滑化能力に重点をおいたアルゴリズムになっていることがわかる。

4. 汎用有限要素法による解析

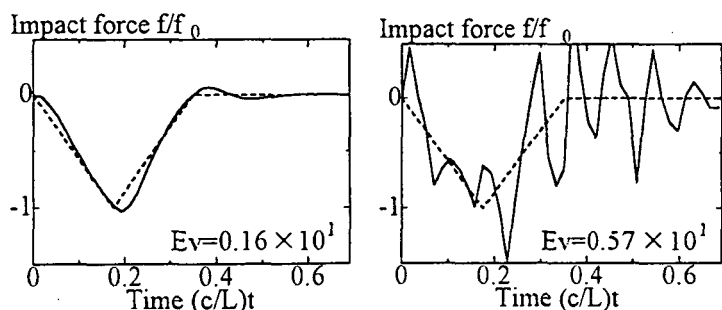
カルマンフィルタによる衝撃荷重の同定や構造物の動特性推定など、実用解析への応用を目的とし、汎用有限要素法（本研究では DIANA を使用）との組み合わせを行い、拡張性の検討を行っている。解析に用いた構造モデルは、両端単純支持梁の中央に正弦波の衝撃荷重が作用するものを用い、



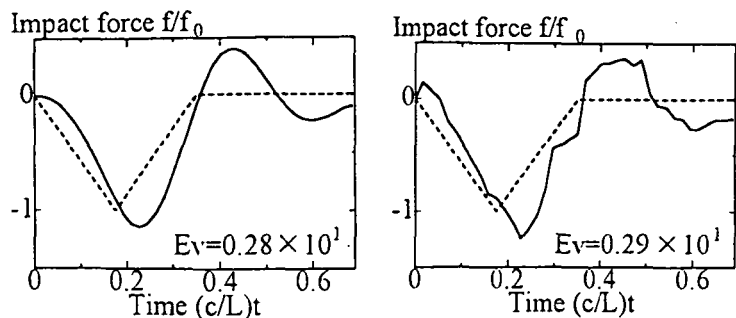
(a) 観測誤差を考慮していない結果
(b) 観測誤差を考慮した結果
図-11 変換行列(1)での結果（影響度係数なし）



(a) 観測誤差を考慮していない結果
(b) 観測誤差を考慮した結果
図-12 変換行列(1)での結果（影響度係数あり）



(a) 観測誤差を考慮していない結果
(b) 観測誤差を考慮した結果
図-13 変換行列(2)での結果（影響度係数なし）



(a) 観測誤差を考慮していない結果
(b) 観測誤差を考慮した結果
図-14 変換行列(2)での結果（影響度係数あり）

あらかじめ解析により得られた梁中央のひずみを観測値として衝撃荷重を同定している。

ここで $m=5$ とし変換行列(1)を使用し、解析を行った結果を図-15 に示す。なおこの解析の諸元は図-3(b)に対応する。

安定した推定結果が得られていることより、汎用有限要素法を用いたカルマンフィルタによる衝撃荷重の同定は可能であることがわかる。しかし解析が終了するまでに多大な時間を必要とすることが課題である。

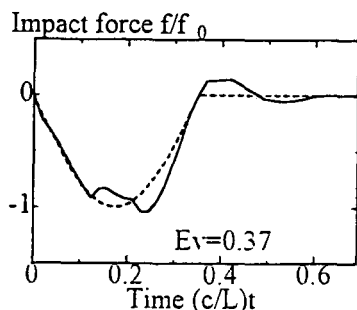


図-15 汎用有限要素法を用いた結果

5. 結論

本論文では、衝撃力の正確な評価を目的として、カルマンフィルタを用いた衝撃荷重の同定解析を行っている。また、汎用有限要素法との組み合わせを提示し、実解析への適用性を検討した結果、以下に示す結論が得られた。

- (1) カルマンフィルタを用いることで、非定常性を有する衝撃荷重の時間領域における同定が基本的に可能である。
- (2) 変換行列(1)では影響度係数で過去の観測値における感度を同時に評価しているため、安定した同定結果が得られるが、変換行列(2)では影響度係数を考慮していない場合は非定常性の追従性が発揮されているためノイズの平滑化機能は低い。加えて、今回の解析での最適な影響時間数 m は変換行列(2)を使用してひずみを用いた場合では $m=10$ 、他の例では $m=5$ であった。
- (3) 影響度係数を用いた場合には、さらに同定精度の向上が図られるが、その最適な大きさなどの検討は今後の課題である。
- (4) 解析時間の短縮の検討が必要ではあるが、汎用有限要素法を用いたカルマンフィルタによる衝撃荷重の同定は可能である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，1983.
- 2) Jazwinshki, A.H : Stochastic process and filtering theory, Academic Press, 1970.
- 3) 星谷勝, 齊藤悦郎：建設技術者のためのデータ解析と応用 カルマンフィルタを中心として，鹿島出版会，1991.
- 4) Toki, K., Sato, T. and Kiyono, J. : Identification of structural parameters and input ground motion from response time histories, *Proc. of the Japan Society of Civil Engineers*, No.410/I-12, pp.243-251, 1989.
- 5) 須藤敦史, 星谷勝, 柳河勇：絶対応答を用いた地震動入力とシステムパラメータ同定，構造工学論文集, Vol.41A, pp.709-716, 1995.
- 6) 丸山収, 星谷勝：構造系に対する入力地震動の同定, 第19回地震工学研究発表会講演概要, pp.145-148, 1987.
- 7) 酒井久和, 澤田純男, 土岐憲三：時間領域での基盤入力地震動の推定法に関する基礎的研究，土木学会論文集, No.577/I-41, pp.53-64, 1997.
- 8) 佐藤忠信, 竹井賢二：構造物の非定常動特性の漸化型同定法，土木学会論文集, No.577/I-41, pp.65-73, 1997.
- 9) 佐藤忠信, 竹井賢二：適応型カルマンフィルタの構築とその応用，土木学会論文集, No.584/I-42, pp.163-173, 1998.
- 10) Ching-Shih Yen and Enboa Wu : On Inverse Problem of Rectangular Plates Subjected to Elastic Impact, Part II : Experimental Verification and Further Application, *Journal of Applied Mechanics*, Vol.62, pp.699-705, 1995.
- 11) Keeyoung Choi and Fu-Kuo Chang : Identification of Impact Force and Location Using Distributed Sensors, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol.34, No.1, pp.136-142, 1996.
- 12) 須藤敦史, 星谷勝：EK-WLI法と有限要素法を用いた逆解析，土木学会論文集, No.466/I-19, pp.177-185, 1992.
- 13) W.G.Yeh : Review of Parameter Identification Procedures in Groundwater Hydrology (The Inverse Problem), *Water Resources Research*, 22(2), pp.95-108, 1986.
- 14) 森村英典, 高橋幸雄：マルコフ解析，日科技連, 1995.
- 15) 桑邊和幸, 三上隆, 佐伯昇：FEMによるTimoshenko梁の衝撃応答解析，土木学会北海道支部論文報告集, 第51号(A), pp.56-59, 1995.

(1998年4月24日受付)