

有限次数近似モデルに基づく 橋桁の非定常空気力同定の適用性

岩本政巳¹・藤野陽三²

¹正会員 工博 名古屋工業大学助教授 社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

²フェロー Ph.D. 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

自由振動法に基づく橋桁の非定常空気力同定手法として、著者らは風洞実験により得られたモード情報から有限次数近似モデルの係数パラメータを直接推定する方法を提案している。本研究では、ある偏平箱桁についての風洞実験結果から非定常空気力の同定を行い、本手法の適用性を検討した。

その結果、比較的精度の低い実験データからでもかなり良好なモード情報再現値と非定常空気力係数が得られることが分かった。また、同定に用いる評価関数の重み係数設定においては、モード情報の残差に基づく最尤法の適用が有効であることを示した。

Key Words : identification, unsteady aerodynamic force, bridge deck, finite state approximate formulation, experimental data

1. はじめに

自由振動法に基づく橋桁の非定常空気力同定に関連して近年議論されている事柄のひとつに、空気力係数同定の一意性問題がある。自由振動法では一般に、まず実験で得られた自由振動波形から減衰、剛性マトリクスあるいは振動モード情報を同定し、次にそれらから非定常空気力係数を算出するという手順をとる。一意性問題はこの第2段階、すなわち無次元風速（無次元振動数）の関数としての非定常空気力係数を特定する際に発生する。空力振動時の各モード分枝の固有振動数は一般には異なるため、同一風速で観測される各モード分枝の無次元振動数は一致しない。そのため、特定すべき空気力係数の数は波形の持つ情報の数を超えてしまい、一意的に空気力係数を求めることができないのである。

この問題を回避する方法はいくつか提案されている。空力的連成の比較的小さい低中風速域に限定して振幅の小さい連成振動成分を無視する方法^{1),2)}、得られたモード情報を無次元風速ごとに再整理して空気力係数を算定する方法³⁾、非定常空気力の有限次数近似モデルを用いる方法^{4),5)}等である。

非定常空気力の有限次数近似モデル⁶⁾⁻⁸⁾は風速や

振動数に依存しない有限個の定係数パラメータによって特徴づけられている。同モデルに基づく空気力同定においては、空気力係数を1点ずつ求める（ノンパラメトリックな）従来の手法とは異なり、それら定係数パラメータを対象としたパラメトリック同定を行うこととなる。そのため、同定の一意性問題は理論的に起こり得ない。また、この空気力モデルは一般減衰振動を前提として定式化されており、高風速時の鉛直たわみモード分枝に関するもの等、大減衰の振動データに対しても整合性のある空気力同定が行えるという特長を持っている。

著者ら⁹⁾はこれまで、有限次数近似モデルに基づく橋桁の非定常空気力同定手法について、定式化と数値シミュレーションによる検討を行ってきた。しかし、風洞実験結果を対象とした同定は実施しておらず、従来の方法とは基本的に異なる本手法の実用面については不明の点も多い。

そこで本研究では、以前行った風洞実験で得られた一連のモード情報データを例題として取り上げ、本手法によるモード情報の再現性、非定常空気力係数の同定精度等を検証した。また、実データの前処理、評価関数における重み係数の設定法といった、実用上の問題点、留意点についても検討を行った。

表-1 風洞実験ケース¹⁾

		ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
質量 [kg/m]		3.35	4.19	4.82	4.19
極慣性 [kg・m ² /m]		0.0338	0.0423	0.0486	0.0612
固有振動数 [Hz]	たわみ	2.58	2.57	2.82	2.55
	ねじれ	5.22	5.13	5.23	5.06
対数減衰率	たわみ	0.0217	0.0306	0.0100	0.0172
	ねじれ	0.0235	0.0303	0.0187	0.0182
発振風速 [m/s]		15.5	17.6	18.9	19.5
同定に使用した データセット数	たわみ	11	28	28	28
	ねじれ	15	39	31	34
無次元風速の上限		13.4	14.7	13.3	15.6

2. 風洞実験データ

(1) 風洞実験の概要

同定に用いたのは、明石海峡大橋箱桁案のひとつである、偏平箱桁の部分模型（桁幅 $B = 0.293\text{m}$ ）を対象とした風洞実験データ¹⁾である。鉛直たわみ z 、ねじれ θ の 2 自由度同時加振をバネ支持した模型に対して行い、その後の自由振動波形を計測した。文献¹⁾においても非定常空気力の同定を行っているが、同定した減衰、剛性マトリクスから非定常空気力係数を直接算定している点が、有限次数近似モデルによる手法とは異なる。この従来法では、同定の一意性問題を解消するために、空力的連成が十分に小さいという仮定を導入している。そのため同実験は、フラッターが発生する以前の低中風速域を対象として行った。また、より高い無次元風速域での空気力を得るために、表-1に示すような模型の質量と極慣性を増やした 4 ケースについて実験を行っている。風速の刻みはケース 1 で 2m/s 、その他のケースでは 1m/s とし、1 風速について 2、3 回の計測を行った。なお、この橋桁断面については、強制振動法による空気力の測定が別途行われている⁹⁾。

(2) モード情報の抽出

有限次数近似モデルに基づく非定常空気力同定においては、まず第 1 段階として、風洞実験により得られた自由振動波形からモード特性を抽出する。

本実験データに関しては、文献¹⁾においてすでに、拡張カルマンフィルタ¹⁰⁾による振動波形からの減衰、剛性マトリクスの同定を行っている。そこで本研究では、これらの特性行列データをそのまま利用して固有値解析を行い、モード情報を求めることとした。その結果は、風速 U 、振動数と減衰を表すラプラス変換パラメータ s およびモード形状を表す複素振幅

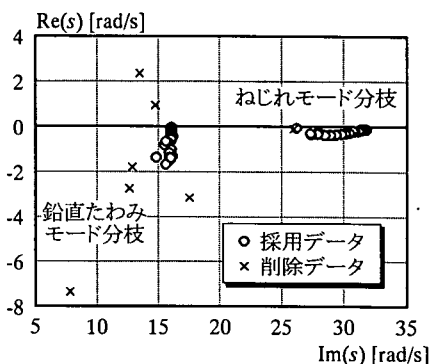


図-1 データチェック状況例（ケース 4）

比 ϕ を一組とするデータセットの群として整理した。複素振幅比 ϕ は、複素モードベクトル q_0 の鉛直たわみ成分 z_0/B とねじれ成分 θ_0 の比として、次式で定義した。

$$\phi = \begin{cases} B\theta_0/z_0 & (\text{鉛直たわみモード分枝}) \\ z_0/B\theta_0 & (\text{ねじれモード分枝}) \end{cases} \quad (1)$$

すなわち、各分枝の主要振動成分で基準化した他振動成分の値である。たとえばねじれモード分枝の場合、ねじれ振動成分を 1 としたときの鉛直たわみ成分値となる。

続く第 2 段階においては、風速や振動状態に依存しない定数である有限次数近似モデルの係数パラメータをデータセット群全体から一括同定する。この点が、ある風速あるいは無次元風速における鉛直たわみ、ねじれ各モード分枝に関する情報ひとつずつを一組とし、空気力係数と対応する無次元振動数を 1 点ずつ求めていく従来手法とは大きく異なる。データセット群の中に大きな誤差を持つデータセットがごく少数含まれているだけでも、同定結果全体

表-2 無風時振動特性の比較 (ケース4)

		1自由度同定値	2自由度同定値	2自由度同定値 1自由度同定値
固有振動数 [Hz]	たわみ	2.550	2.547	0.999
	ねじれ	5.061	5.044	0.997
対数減衰率	たわみ	0.01720	0.02258	1.313
	ねじれ	0.01821	0.02816	1.546

の精度を下げてもうともあり得る。そのため、第2段階の同定に先立ち、誤差の大きいと考えられるデータセットを取り除いておく必要がある。

実験データに基づく本解析では、図-1に示す例のようにデータセット群をケースごとにグラフ表示しながら、削除するモードデータを選択した。sおよびφの値の連続性をグラフ上でチェックし、明らかに実験データの傾向から逸脱していると考えられるデータセットを削除していった。図中の×印は削除したデータセットを示している。なお、ねじれモード分枝上にある削除データはφの精度に問題があったものである。最終的に、表-1中に示した数からなるデータセット群を、第2段階の非定常空気力同定に用いることとした。

本手法では、第2段階の同定において鉛直たわみ、ねじれモード分枝に関するデータをペアで取り扱わず、一括処理する。そのため、各モード分枝のデータセットの数が必ずしも同じである必要はない。よって、1回の計測から得られた各モード分枝に関するデータセットのうち、誤差の大きい片方のみを削除するといった、柔軟なデータ処理が可能となる。事実、高風速領域における鉛直たわみモード分枝のデータセットでは誤差が大きく、その多くを削除した。空力減衰が非常に大きくすぐに減衰してしまうため、同定が困難だったと考えられる。ただし、鉛直たわみモード分枝の振動数は比較的低いため、無次元風速 $\bar{U} = U/Bf$ ($f = |s|/2\pi$: 振動数) の上限値はいずれのケースにおいても鉛直たわみモード分枝の方が高かった。表-1中には同定される非定常空気力の適用可能範囲の上限も示しているが、これは低い方の無次元風速上限値、すなわちねじれモード分枝の上限値である。

(3) 無風時振動データの誤差の影響

橋桁の空気力同定に限らず、構造物等の構造同定においては、質量等いくつかの構造パラメータを既知量として取り扱うことが多い。しかし、これらのパラメータも実際には計測量であり、誤差を含んでいる。その誤差は当然ながら、同定精度に対しても

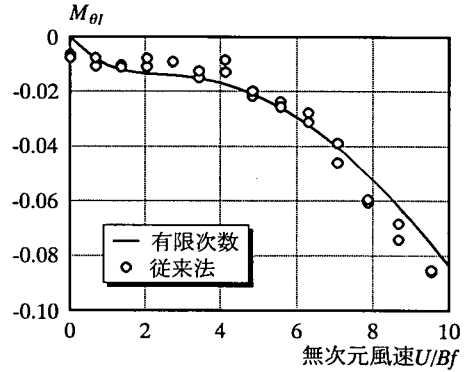


図-2 誤差のあるデータからの同定例 (ケース4)

影響を及ぼす。

橋桁の空気力同定においては一般に、空気密度や桁幅、質量、極慣性といった基本パラメータのほか、無風時の振動パラメータである固有振動数と構造減衰を既知として取り扱う。ここでは後者の影響について着目する。本実験で得られたデータにおいては、後者のパラメータについて比較的大きな誤差が存在し、またその誤差が及ぼす影響の程度が空気力同定の手法によって異なるためである。

本実験における無風時振動パラメータは、鉛直たわみ、ねじれの1自由度加振後の自由振動波形から求めている。このとき、パラメータ同定は1自由度系として行い、構造的な連成は無視している。表-1に示しているのはこの1自由度系としての同定結果結果であり、空気力同定においてもこれらの数値を用いた。一方、空気力同定のための2自由度自由振動実験の一環として、無風時の計測も行っている。この波形については、有風時の波形と同様2自由度系としての同定を行った。得られる固有振動数および構造減衰は本来、1自由度系としての同定結果と一致するはずである。しかし、表-2に示す例のとおり、本実験データでは両者に比較的大きな差異が生じていた。また、2自由度同定においてはある程度の構造的な連成振動成分も認められた。

このような状況下で同定した非定常空気力係数の例を図-2に示す。無風時振動特性の誤差によって、

空気力係数同定値にゼロシフトが生じていることが分かる。この現象は空気力係数と対応する無次元振動数を1点ずつ求めていく従来の手法では問題とはならない。図-2のような空気力係数のプロットデータを単純にシフト処理することで容易に補正できる上、そうした処理を行っても精度の低下が起こらないからである。

一方、有限次数近似モデルに基づく空気力同定においては状況がかなり異なる。本手法で再現された非定常空気力係数は、有限次数近似モデルの定式化上の特性から、必ず原点を通る。したがって、図-2にも示されるとおり、ゼロ風速付近で不自然なカーブが生じる。この複雑な関数形状を比較的低いモデル次数で近似する必要が生じるため、全体的な同定精度は低下することとなる。前節でも述べたとおり、こうした入力データの局所的な誤差が同定結果全体の精度低下を引き起こすのである。また、係数パラメータ同定後の段階ではゼロシフトの補正をすることができない。入力データを補正して、再度係数パラメータ同定を行う必要がある。

入力データの補正は、振動波形から求めた減衰、剛性マトリクスあるいは振動モード情報を対象に行うことができる。本研究では前者を対象とした。1自由度加振後の自由振動波形から求めた無風時の特性マトリクスを基準とし、たとえば剛性マトリクスについては、次式の K_U^* を固有値解析に用いた。

$$K_U^* = K_{SDOF} + (K_U - K_{U-0}) \quad (2)$$

ここに、 K_{SDOF} は1自由度波形から求めた無風時の剛性マトリクス(対称行列)である。また、 K_U および K_{U-0} は2自由度波形から求めた剛性マトリクスであり、前者は有風時、後者は無風時のものを示している。減衰マトリクスについても同様の補正を行った。なお、2自由度波形から求めた無風時の特性マトリクスを基準にしなかったのは、無風時の ϕ の値を正確にゼロとするためである。

3. 非定常空気力の同定

(1) 解析条件

第2段階として、前章で得られたデータセット群より、有限次数近似モデルにおける非定常空気力係数マトリクスおよびパラメータ A_0 、 A_1 、 A_{l+1} および λ_l ($l=1, \dots, n_l$, n_l : 近似モデルの次数)を同定する。その解析方法および条件は、文献5)の数値シミュレーションとほぼ同一である。

実験対象が偏平箱桁であり、その空気力特性が平板翼に近いことも考慮し、有限次数近似モデルの次数は $n_l=2$ とした。同定すべき係数パラメータの数は18となる。また、 λ_l の値を正とする拘束条件も与えていない。同定解析には修正Levenberg-Marquardt法を用いた。

パラメータ推定の基準となる評価関数についても、文献5)と同様に次の2つを使用した。評価関数 J_1 は、次式に示す振動数表示形式の有限次数近似モデルを組み込んだ運動方程式を、すべてのデータセットが満足することを利用したものである。

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = \gamma \left(A_0 + \bar{s}A_1 + \sum_{l=1}^{n_l} \frac{1}{\lambda_l + \bar{s}} A_{l+1} \right) q \quad (3a)$$

$$q = \begin{Bmatrix} z/B \\ \theta \end{Bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} mB^2 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (3b,c)$$

$$C = \begin{bmatrix} 2mB^2\xi_z\omega_z & 0 \\ 0 & 2I\xi_\theta\omega_\theta \end{bmatrix} \quad (3d)$$

$$K = \begin{bmatrix} mB^2\omega_z^2 & 0 \\ 0 & I\omega_\theta^2 \end{bmatrix}, \quad \gamma = \frac{1}{2}\rho U^2 B^2 \quad (3e,f)$$

ここに、 m 、 I は各々橋桁の単位長さ質量および極慣性、 ω_z 、 ω_θ は各々鉛直たわみおよびねじれの固有円振動数、 ξ_z 、 ξ_θ は各々鉛直たわみおよびねじれの構造減衰定数である。また、 ρ は空気密度、 \bar{s} は無次元ラプラス変換パラメータ(= Bs/U)である。式(3)より、次式のように評価関数 J_1 を定義した。

$$J_1 = \sum_{j=1}^n w_j \|F_j \cdot q_{0,j}\|^2 \quad (4a)$$

$$F_j = \left(s_j^2 M + s_j C + K \right) - \gamma \left(A_0 + \bar{s}_j A_1 + \sum_{l=1}^{n_l} \frac{1}{\lambda_l + \bar{s}_j} A_{l+1} \right) \quad (4b)$$

ここに、 n はデータセット数、 w_j は重み係数である。ただし、式中の複素モードベクトル q_0 は ϕ を用いて表現している。つまり、 q_0 の主要振動成分は1とした。

この評価関数は、式(3)の運動方程式における、一般化揚力 L とモーメント M に対して最小2乗法を適用することを意味する。式(3)は一般化された表現をとっているため、式(4)における各項の次元は同一であり、またそのオーダーもほぼ等しい。重み係数の設定における自由度は低いが、それについて特別の注意を払う必要がないという利点にもなっている。

表-3 J_2 における重み係数の算定

		Re(s)	Im(s)	Re(ϕ)	Im(ϕ)
変動値の相乗平均	鉛直たわみ	0.02283	0.02666	0.00551	0.00532
	ねじれ	0.00749	0.01031	0.00109	0.00103
相対的な変動値	鉛直たわみ	2.806 (2)		0.616 (0.5)	
	ねじれ	1		0.120 (0.1)	
重み係数	鉛直たわみ	0.25		4	
	ねじれ	1		100	

注：相対的な変動値におけるかっこ内の数値は概数である。

本解析でも、文献5)の数値シミュレーションと同様、すべての項に同一の重みを与えている。すなわち、すべての重み係数を1とした。

一方、データセット群に対して直接最小2乗法を適用すると、次式の評価関数 J_2 が与えられる。

$$J_2 = \sum_{j=1}^M \left(w_{s,j} |s_j - s_{M,j}|^2 + w_{\phi,j} |\phi_j - \phi_{M,j}|^2 \right) \quad (5)$$

ここに、 $w_{s,j}$ 、 $w_{\phi,j}$ は重み係数、添え字の M は仮定した未知パラメータによって得られる推定値を表す。

この評価関数 J_2 のもとでは、実験によって得られたモード情報そのものを対象としているため、同定の意味は明快である。各モード情報の重要度や信頼度に応じて重み係数を変化させるといった、自由度の高い同定も可能となる。ただし次節で述べるように、その重み係数の設定にはある程度注意を払う必要がある。

(2) 評価関数 J_2 における重み係数

式(5)に示されるように、評価関数 J_2 においては次元の異なる s および ϕ に関する項が混在している。また、 s と ϕ とでは値のオーダーも異なる。そこで、文献5)の数値シミュレーションにおいては、評価関数内のオーダーをそろえるため、各モード情報成分値そのものの逆数の2乗を重みとして与えていた。本風洞実験データについても当初、この重み係数を用いて同定を行ってみた。しかし、図-3に示す s の虚部（振動数）をはじめ、全般にかなり大きな再現誤差が生じることが分かった。この設定方法では、値の大きいモード情報ほど小さな重みを与えることとなる。そのため、他のモード情報に比べ全般的に大きいオーダーを持つ s の虚部に対して相対的に過小な重みを与え、また他のモード情報についてはその値が比較的小さい低風速域のデータに対して過大な重みを与えていたと考えられる。そこで本研究では、 J_2 の重み係数について再検討を行った。

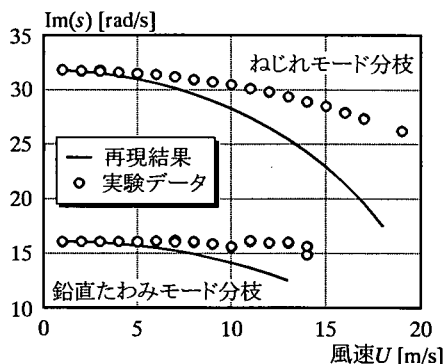


図-3 誤差の大きい再現結果例（ケース4）

まず、重み係数設定のための指標として、最尤法の考え方を導入することとした。最尤法は、重み付き最小2乗法における重み係数として、観測誤差の共分散行列の逆行列を採用したものと一致する¹¹⁾。簡便のため本解析では、同一風速で複数回行っている計測データについての差であるデータ変動値を誤差と見なして、重み係数を決定することとした。

その計算過程を表-3に示す。最初に、計測データから求めた変動値をモード分枝、モード情報ごとに集計し、その相乗平均を求めた。相加平均ではなく相乗平均を用いたのは、変動値がかなり広いオーダーに渡ってばらついていたためである。また、集計した変動値に実験ケースや風速による明確な傾向が見受けられなかったことに加え、低風速域のデータの過大評価を避けるため、ケースや風速を問わず一律に平均値を求めた。表2段目には、ねじれモード分枝の s に関する値を基準とした、相対的な変動値を示している。 s 、 ϕ ともに実部、虚部の差異が小さいことからその区別を廃し、平均値で代表させている。表中かっこ内に示しているのは相対変動値の概数である。この概数値の逆数の2乗から、表3段目に示す重み係数を定めた。この重みは、モード情報ごとにケースや風速に依存しない一定値として与えられる、非常にシンプルなものである。

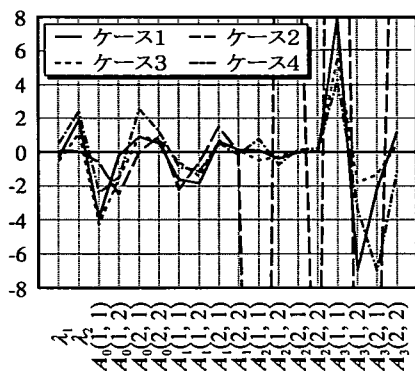


図-4 同定された係数パラメータ (J_1)

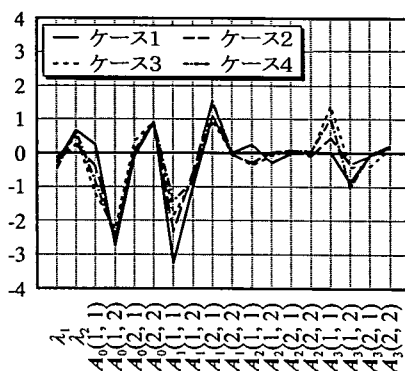


図-5 同定された係数パラメータ (J_2)

4. 同定結果

(1) 同定された係数パラメータ

同定された有限次数近似モデルの係数パラメータ値を、図-4, 5にまとめて示す。なお、図の横軸における $A_0(1,1) \sim A_3(2,2)$ は非定常空気力係数マトリクスの要素を表している。一般的に、評価関数 J_1 を用いた推定値 (図-4) の変動が比較的大きいことが分かる。これは、文献5)の数値シミュレーションにおいても見受けられた傾向である。特に、 J_1 を用いたケース2の結果では λ_1 と λ_2 の値が近接しており、パラメータ推定値の一部ではその絶対値が60程度とかなり大きい値となった。また、 J_1 を用いた全ケースおよび J_2 を用いたケース1, 3の計6ケースで、 λ_1 ($< \lambda_2$) が負となる結果が得られている。

推定値の収束に要した繰り返し計算回数を表-4に示す。 J_2 の繰り返し回数はケース3を除いて J_1 より小さく、 J_2 の収束性が比較的高いことが分かる。 J_1 を用いた場合に λ_1 の値が近接していたケース2では、 J_2 においても他のケースに比べて多くの繰り返し計算を要している。また、ケース1においては評価関数によって繰り返し回数に大きな差が生じている。後述するように、ケース1の鉛直たわみモード分枝に関するデータセット群は、高風速域で傾向の異なるデータセットを含んでおり、その影響の程度が評価関数によって異なっていたと考えられる。

(2) モード情報の再現性

係数パラメータ同定値から再現した、各ケースのモード情報例を図-6~9に示す。図中には、同定の入力となった、実験結果から求めたデータセット群についても示してある。

2.(2)で述べたように、誤差の大きいデータセットはあらかじめ削除したものの、データセット群には

表-4 推定値の収束に要した繰り返し計算回数

		ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
評価関数	J_1	1079	547	44	69
	J_2	25	113	58	39

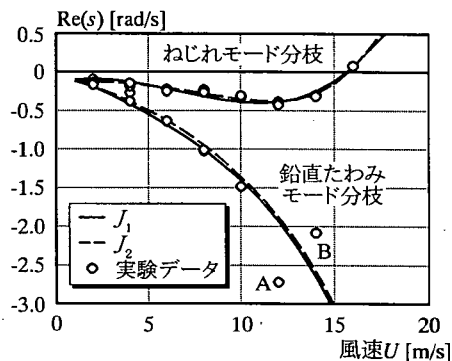


図-6a モード情報再現結果例 (ケース1)

ある程度のばらつきが残っている。特にケース1の鉛直たわみモード分枝においては、図-6aに示すとおり高風速域で傾向の異なるデータセットA, Bが存在しており、少なくとも片方の誤差がかなり大きいと考えられる。こうしたことから、風洞実験もしくは振動波形からの減衰、剛性マトリクスの同定の精度は必ずしも高いものではなかったと推察される。

しかし、同定値から再現したモード情報の傾向は実験データとおおむね一致しており、その再現性は良好であることが分かる。先のケース1におけるA, Bのように傾向の異なるデータセット群に関しては、再現結果はその中間的な値を示している。また、係数パラメータ推定値における傾向はかなり異なっていたにもかかわらず、モード情報の再現性については評価関数による差異は小さい。ただし、図-6bに示すように、ケース1の鉛直たわみモード分枝の ϕ に

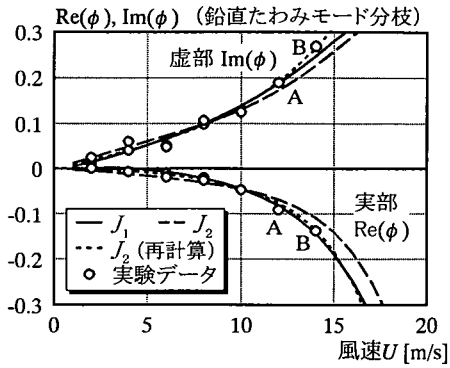


図-6b モード情報再現結果例 (ケース 1)

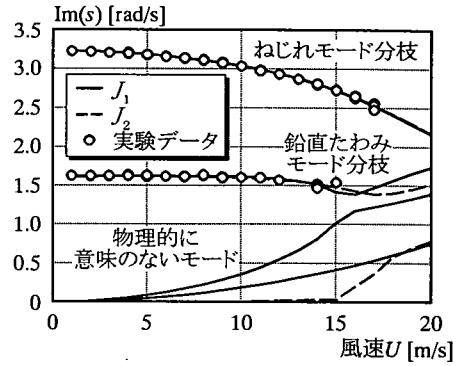


図-7b モード情報再現結果例 (ケース 2)

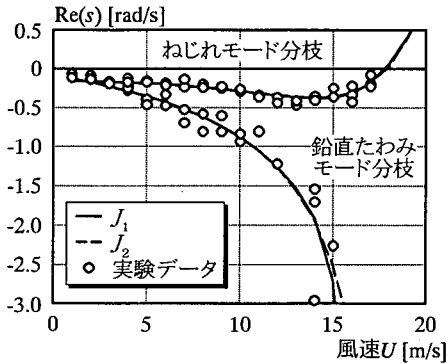


図-7a モード情報再現結果例 (ケース 2)

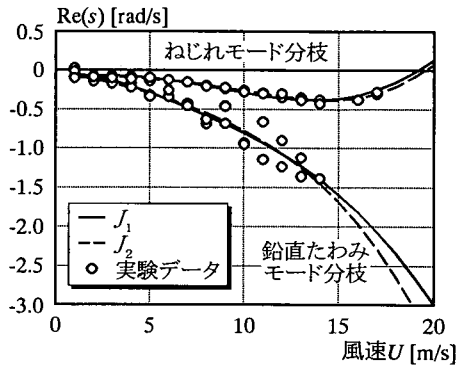


図-8 モード情報再現結果例 (ケース 3)

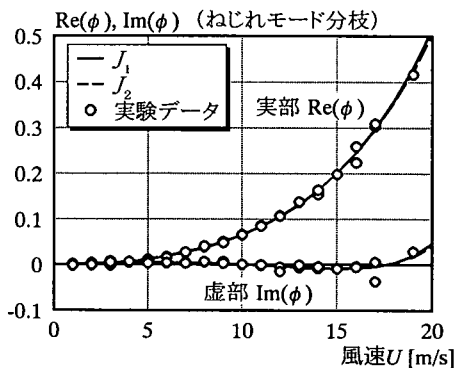
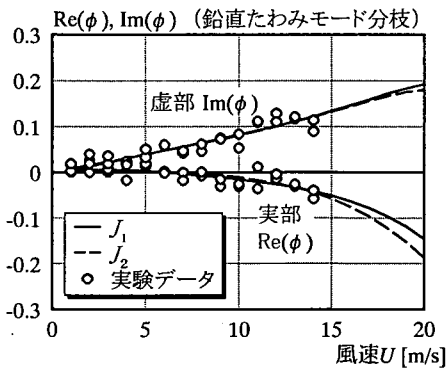
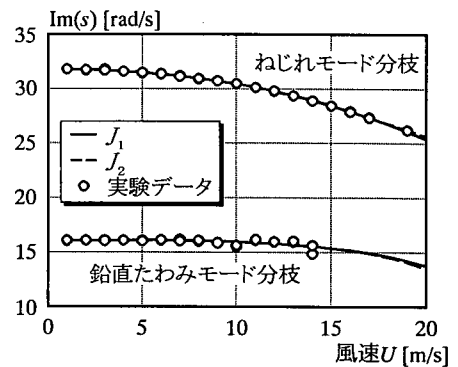
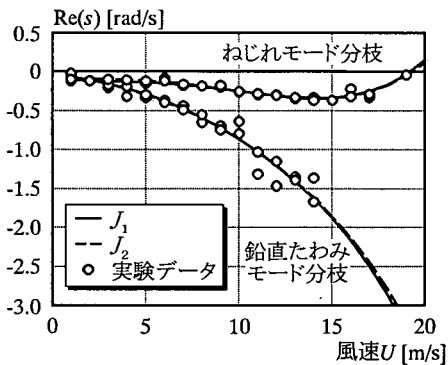


図-9 モード情報再現結果 (ケース 4)

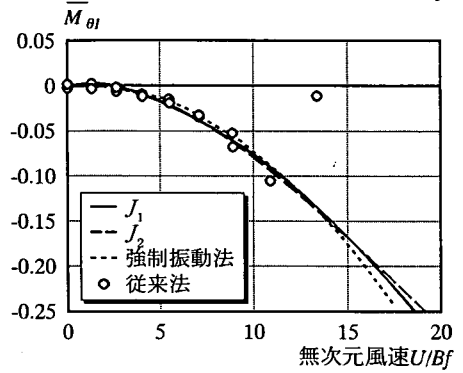
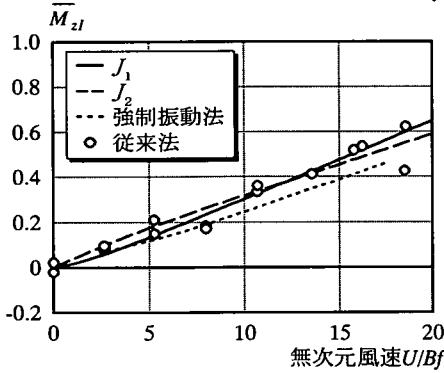
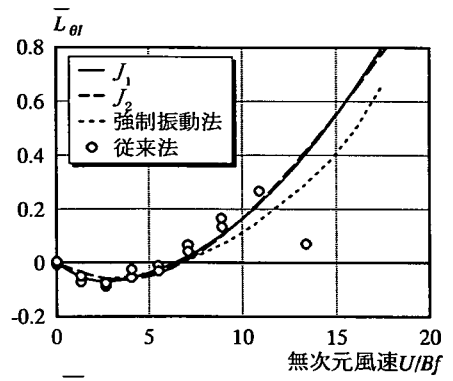
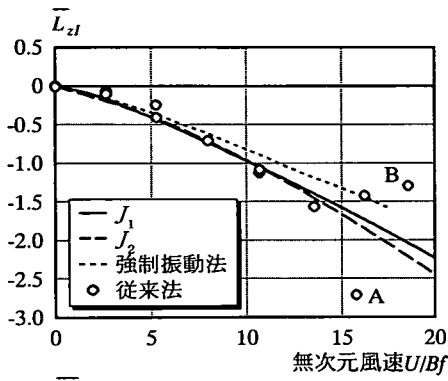


図-10 同定結果から求めた非定常空気力係数例（ケース1）

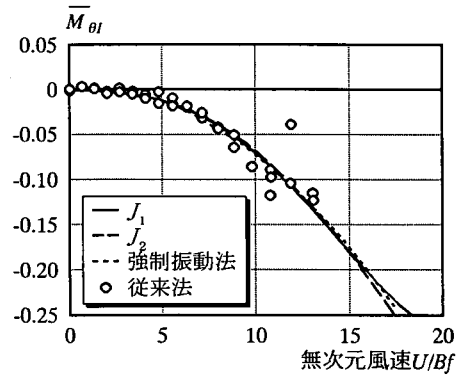
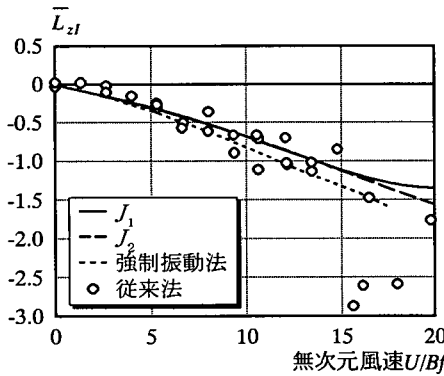


図-11 同定結果から求めた非定常空気力係数例（ケース2）

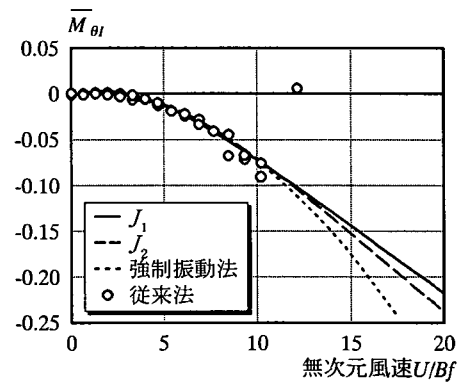
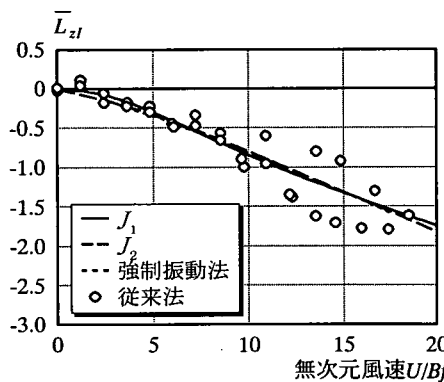


図-12 同定結果から求めた非定常空気力係数例（ケース3）

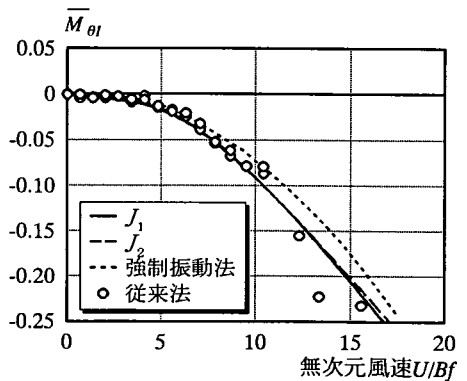
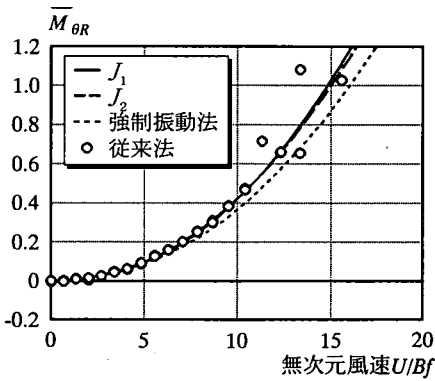
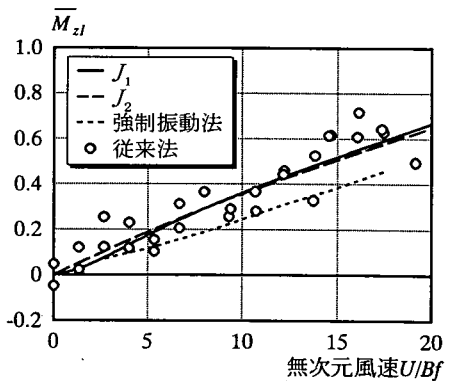
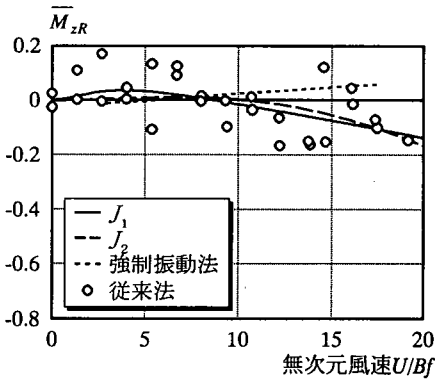
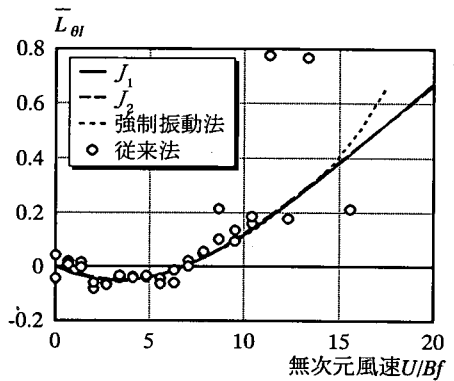
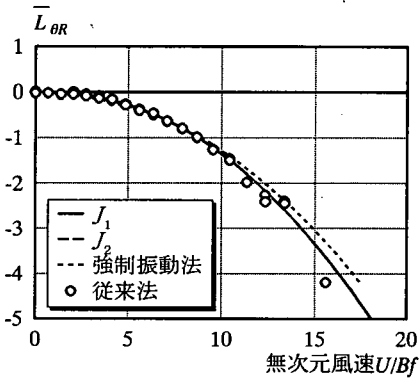
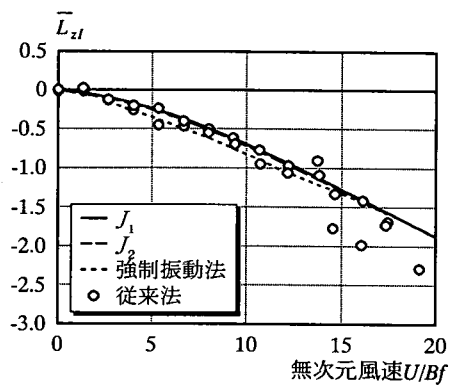
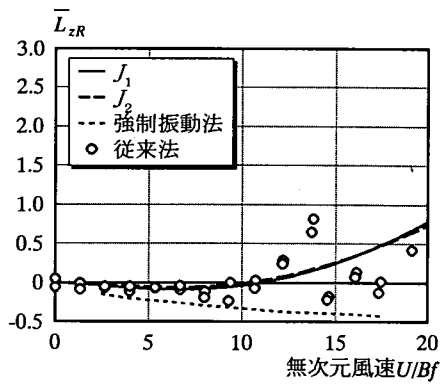


図-13 同定結果から求めた非定常空気力係数 (ケース4)

は比較的大きな差異が生じており、 J_1 の方がその精度は高いように見受けられた。

有限次数近似モデルを用いた運動方程式は補助変数の自由度を含んでいるため、解析上振動応答解以外の複素固有値解が現れることがある。本解析においても、図-7bに示すように、ケース2でそうした物理的に意味のない振動モード分枝が現れた。ただし、フラッター解析を行った風速20m/sまでの範囲内で、それらのモード分枝における無次元風速 \bar{U} の値が29を下回ることにはなかった。同定に用いた観測データの無次元風速の上限は表-1に示したとおり14.7であるから、物理的に無意味な振動モード分枝はこれを大きく超えた領域でのみ発生していたこととなる。したがって、同定した空気力を空力振動解析に適用する際、その無次元風速を同定に用いた観測データの範囲内に限定することで、こうしたモード分枝の発生は防ぐことができると考えられる。

(3) 非定常空気力係数の比較

係数パラメータ同定値より求めた、調和振動状態(対数減衰率 $\delta=0$)における各ケースの非定常空気力係数の例を図-10～13に示す。図中には、別途行われた強制振動法および文献1)の従来法による結果もあわせて示してある。なお、従来法による結果は無風時および有風時の減衰、剛性マトリクスから直接算定しており、2.(2)で削除したデータセットに対応するものも含まれている。

非定常空気力係数の推定精度には、フラッター特性に対する影響度が深く関係している。影響度の大きい $\bar{L}_{\theta R}$ 、 $\bar{M}_{\dot{\theta}}$ 、 $\bar{M}_{\theta R}$ 、 $\bar{M}_{\theta I}$ については、従来法による結果におけるばらつきも比較的小さく、文献5)の数値シミュレーションでの精度も高かった。一方、影響度の小さい \bar{L}_{zR} 、 \bar{M}_{zR} の精度は比較的低かった。

風洞実験結果についての係数パラメータ同定値から求めた空気力係数にも、当然ながら同様の傾向が現れている。前節で述べたように、モード情報の再現性はおおむね良好で、評価関数による差異も小さかった。よって、空気力係数においてもその傾向は、評価関数を問わず従来法とよく一致している。ただし、フラッター特性に対する影響度が低く、従来法におけるばらつきの大きい \bar{L}_{zR} 、 \bar{M}_{zR} においては、評価関数による差異が比較的大きい。また、図-10に示されるとおり、ケース1の $\bar{M}_{\dot{\theta}}$ に比較的大きい差異が見受けられる。これは、モード情報としては評価関数による差異が大きかった、鉛直たわみモード分枝の ϕ に対して、この係数の影響度が高いことに起因すると考えられる。

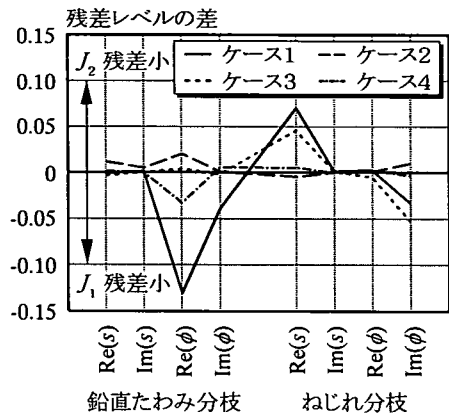


図-14 評価関数による残差レベルの差

(4) 評価関数および重み係数による影響

前節までの結果から、風洞実験結果に本手法を適用して、かなり良好なモード情報再現値と非定常空気力係数を得ることができていることが分かった。ただし、一部のケースでは特定のモード情報に関して比較的大きな差異が生じるなど、評価関数による再現性の傾向が異なっている。そこで、同定の入力としたデータセット群と係数パラメータ同定値から求めたモード情報再現値の残差に着目して、評価関数による差異を調べた。

残差の計算に関する基本的な手順は、3.(2)で述べた変動値の場合と同様である。実験値と再現値の残差をモード情報ごとに集計し、そのrms値を求めた。さらに、各モード情報のオーダーの違いを考慮して、求めた残差のrms値をモード情報そのもののrms値で除した、残差レベルを計算した。評価関数 J_1 の値から J_2 の値を差し引いた、残差レベルの差をケースごとにまとめたのが図-14である。この値が大きいくほど、 J_2 の残差レベルが相対的に小さく精度が高いことを表している。 J_1 においてはねじれモード分枝における s の実部、 J_2 においては ϕ の精度が、それぞれ比較的低いことが分かる。特にケース1では、その傾向が大きく現れている。

こうした残差の影響を同定に反映させるため、求めた残差を誤差と見なして、最尤法に基づく同定を再度行った。重み係数の算定に用いた相対的な残差を図-15、16に示す。評価関数 J_1 ではねじれモード分枝のモーメント M の実部を、 J_2 ではねじれ分枝の s の虚部を、それぞれ基準とした。なお J_2 については、3.(2)で算定した値との比較のため、表-3の2段目に示した相対変動値の概数値で除してある。 J_1 における相対残差は、当初の予想に反して大きくばらついていることが分かる。モード分枝を問わず、一般化

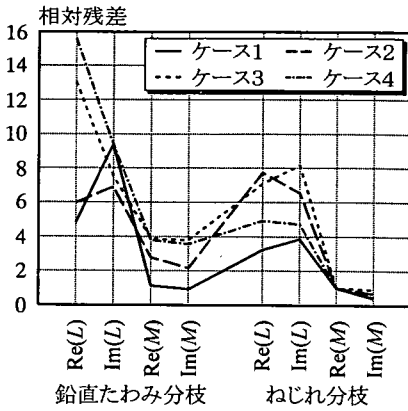


図-15 相対的な残差 (J_1)

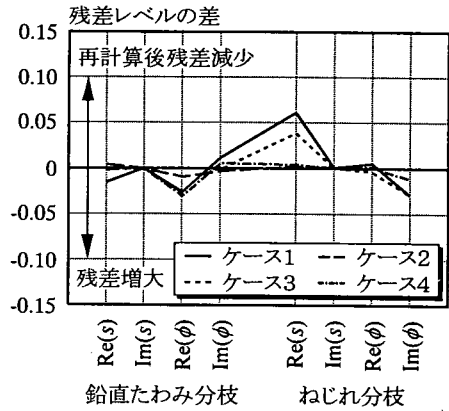


図-17 再計算前後の残差レベルの差 (J_1)

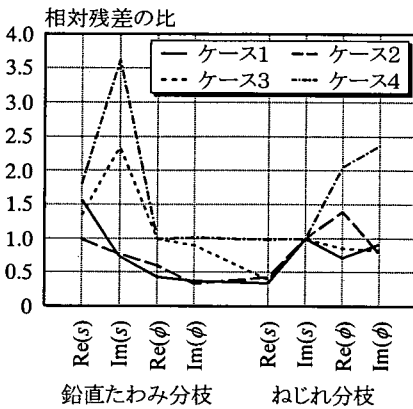


図-16 相対的な残差の比 (J_2)

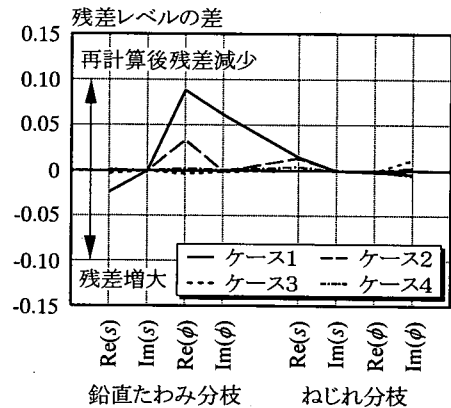


図-18 再計算前後の残差レベルの差 (J_2)

揚力 L の残差はモーメント M に比べかなり大きい。その原因としては、式(3)、(4)中の構造マトリクス M 、 C 、 K および空力特性マトリクス A_0 、 A_1 、 A_{n+1} における L 成分値が M 成分値に比べ大きいこと (試算によると、その比は3程度である)、第1段階の拡張カルマンフィルタによる特性マトリクスの同定において L 成分の精度が低かったことが挙げられる。また J_2 についても、3.(2)で述べた変動値との間にはある程度の隔りがあることが分かる。

相対残差の逆数の2乗で与えた、新たな重み係数によるモード情報の再現性の変化を調べるため、図-14と同様の手順で再計算前後の残差レベルの差を求めた。その結果を図-17、18に示す。この値が大きいほど、再計算により残差が減少していることを表している。 J_1 、 J_2 ともに、残差の大きかった部分が改善されていることが分かる。一例として、図-6b中には J_2 による再計算後の再現値を示している。この図より、 ϕ の再現性が向上していることが確認できる。また、評価関数による残差の差も減少しており、

全般的にバランスのよい再現結果が得られている。ただし、 J_1 における再計算前後の残差レベルの差は、相対残差のばらつき、すなわち重み係数の変化の割にはさほど大きくない。 J_1 における同定対象は運動方程式であり、モード情報を直接の対象としていないことが原因と考えられる。

有限次数近似モデルの係数パラメータ同定値については、 J_1 における変化が比較的大きかった。そのばらつきは全般的に減少しており、 J_2 の同定値に近づく傾向が見受けられた。ただし、ケース2の係数パラメータ λ_e 同定値が近接する現象は、再計算後の同定結果にも依然として発生していた。

以上のことから、残差に基づく重み係数の設定がモード情報の再現性の向上に有効であると考えられる。特に、モード情報を直接同定の対象とする評価関数 J_2 では、それを効率的に行うことができる。したがって、同定結果の使用目的等に応じて積極的に再現性の操作を行いたい場合には、 J_2 の活用が効果的であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、偏平箱桁断面に関する自由振動法による風洞実験データを用いて、有限次数近似モデルに基づく非定常空気力同定手法の適用性を検証した。また、評価関数における重み係数設定法等、実用上の問題点、留意点についても検討を行った。得られた主な知見を以下にまとめる。

(1) 本手法では、空気力係数を1点ずつ求める従来の方法とは異なり、モード情報データセット個々の誤差が全体的な同定精度に影響を及ぼす可能性がある。したがって、有限次数近似モデルの係数パラメータ同定に先立ち行う、誤差の大きいデータセットの削除、無風時振動パラメータの誤差の修正といった、実験データの预处理に注意を払う必要である。

(2) 実験データの精度は比較的低かったものの、本手法による同定結果から求めたモード情報や非定常空気力係数の再現性は、評価関数を問わずおおむね良好であった。また本手法は、空気力係数同定における一意性の問題が生じないといった定式化上の利点のほか、同定に用いる各モード分枝のデータセット数が異なってもよいといった計算作業上の有用性を有していることが確認できた。

(3) 同定に用いる評価関数の重み係数設定においては、モード情報に関する残差をもとにした最尤法の適用が有効である。特に、モード情報を直接同定の対象とする評価関数 J_2 は、それを効率よく行うことができるため、積極的に再現性の操作を行いたい場合に効果的であると考えられる。

モードからなる自由振動波形を用いた橋桁の非定常空気力係数の同定, 第12回風工学シンポジウム論文集, pp.363-368, 1992.

- 2) Sarker, P. P.: New identification methods applied to the response of flexible bridge to wind, The Johns Hopkins University 学位論文, 1992.
- 3) 山田 均, 宮田利雄, 中島州一: 送風時の振動モード情報を利用した非定常空気力推定法の開発, 土木学会論文集, No.537/I-35, pp.183-190, 1996.
- 4) Xie, J.: CVR method for identification of nonsteady aerodynamic model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **29**, pp.389-397, 1988.
- 5) 岩本政巳, 藤野陽三: 有限次数近似モデルに基づく橋桁の非定常空気力同定の定式化, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.205-216, 2000.
- 6) 増川淳二: 様々な橋梁断面に作用する非定常空気力の有限次数近似モデルとその応用, 東京大学修士論文, 1994.
- 7) Wilde, K., Fujino, Y. and Masukawa, J.: Time domain modeling of bridge deck flutter, 土木学会論文集, No.543/I-36, pp.19-30, 1996.
- 8) 岩本政巳, 藤野陽三: 一般振動下の非定常空気力を用いた橋桁のフラッター解析, 土木学会論文集, No.598/I-44, pp.311-322, 1998.
- 9) 藤野陽三, 岩本政巳, 伊藤 學, 樋上琇一, 武田勝昭, 宮田利雄, 辰巳正明: 三次元弾性模型による箱型補剛桁を有する超長大吊橋の風洞実験, 日本風工学会誌, No.46, pp.1-17, 1991.
- 10) 星谷 勝, 斉藤悦郎: 拡張カルマン・フィルターを用いた同定問題の各種振動系への応用, 土木学会論文報告集, No.339, pp.59-67, 1983.
- 11) 中川徹, 小柳義夫: 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会, 1982.

参考文献

(2001. 5. 14 受付)

- 1) 岩本政巳, 藤野陽三, 磯部正治, 長谷部宣男: 2つの

APPLICABILITY OF IDENTIFICATION OF UNSTEADY AERODYNAMIC FORCES OF BRIDGE DECK BASED ON FINITE STATE APPROXIMATE FORMULATION

Masami IWAMOTO and Yozo FUJINO

We applied a free-vibration-based identification method of unsteady aerodynamic forces of bridge deck based on finite state approximate formulation to modal information data obtained by wind tunnel experiments on a thin box girder. This paper also discussed two kinds of the objective functions and their weight factors in the identification procedure as an optimization problem in detail. The results show that modal information and flutter derivatives can be estimated accurately, even though the experimental data contain relatively large error. It is also found that the application of the maximum-likelihood method based on the residual on modal information is effective in determining the weight factors of objective functions.