

同定条件の違いによる 連成非定常空気力係数推定に関する影響

Comparative study on coupled unsteady aerodynamic coefficient
measurement by a system identification method under different conditions

山田 均^{*}、宮田 利雄^{**}、岡本 好弘^{***}
by Hitoshi YAMADA, Toshio MIYATA and Taka-hiro Okamoto

Because of limitation of measurable independent values in wind tunnel testings, ordinal coupled aerodynamic coefficient measurements, such as the free vibration method and the forced vibration method, consist of 2 separated measurements, which are two 1DOF measurements of bending and torsion and a coupled 2DOF measurement. In this study a recently introduced system identification method is applied to coupled unsteady aerodynamic coefficient measurements of ordinal measurement steps and of direct coupled 2DOF measurement. Better agreement of estimated unsteady aerodynamic coefficients between measuring steps is concluded, although the 2DOF estimation is less stable.

1. まえがき

建設が既に始まっている 2 0 0 0 m 級吊橋である明石海峡大橋と 1 0 0 0 m 級あるいは 1 5 0 0 m 級吊橋を比較すると、構造物規模が大きくなったことによる主として固有振動数の低下により換算風速になおした限界風速は前者は後者の 2 倍近くになる。発生する空力振動の違いに視点をおくと、後者では 1 自由度系のねじれフラッターが耐風設計上の検討対象であったのに対し、前者ではフラッターは曲げと捩れが連成するいわゆる連成フラッターになる。ねじれ 1 自由度フラッターと曲げねじれ連成フラッターが分離できるかという議論は古くからあるが、報告されている風洞試験結果によると、ねじれ 1 自由度フラッター限界風速を押し上げる耐風安定化対策が成功した場合でも、設計風速付近の高換算風速では曲げとねじれ振動が連成するようになって、連成フラッターと見てよい空力振動が発生している¹⁾。したがって、長大橋梁の連成フラッターに関する研究は、複雑な橋梁の桁の連成空気力の評価方法や連成フラッターの評価方法をトピックスとして、吊り形式橋梁の長大化により、最近より具体的になってきた、古いが新しい研究と言える。

連成非定常空気力の定式化、推定方法には周知の通り古くから議論があつて、すでにいくつかの提案がなされている。例えば、空気力の定式化については、いくつかの提案がなされており、変数により重

* 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156)
 ** 工博 横浜国立大学教授 工学部建設学科 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156)
 *** 横浜国立大学大学院学生 工学研究科 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156)

みや、無次元化の仕方は異なるが、基本的には曲げ振動とねじれ振動の変位およびその時間微分である速度の4つを独立変数として、それぞれ定係数の形で揚力とねじれ空力モーメントについて合計8つの係数を定め、線形和をとるモデルが一般的であり、よく用いられている。一方、それぞれの空気力の測定には、二次元部分模型を用いるが、弾性支持した系の減衰-発散振動応答履歴から非定常空気力係数を推定する自由振動法、正弦波状に強制振動を与え、そのときの気流からの反力を測定し空気力を求める強制加振法が2つの方法としてよく知られている。測定できる独立量の制約から、いずれの方法も空気力のいわゆる変位に関する線形和がなりたつとの前提で、まず曲げとねじれいずれか一方のみの1自由度振動系でそれぞれ別々の応答履歴の測定をまず行い、次に曲げと捩れが連成した状態での測定を経て、非定常空気力係数を求める手順をとることは共通である。著者らは、非定常空気力係数測定の問題として、システム同定理論を用い、曲げ捩れが連成する2自由度の応答履歴から、直接これらの係数を測定することを試みてきた²⁾。本研究では、従来行われてきたように、曲げとねじれそれぞれの2つの1自由度系から1自由度に対応する非定常空気力を求め、次に曲げ振動とねじれ振動が連成する2自由度系の応答履歴から、残る空気力を推定する従来法と同様な手順を踏む場合と、2自由度応答履歴から直接すべての非定常空気力係数を推定する場合を行い、結果を比較し、推定精度および結果の検討を行うこととする。

2. 推定手法及び手順

連成非定常空気力の定式モデル化方法にはいくつか提案例があるが、曲げ変位同相の空気力を無視できるという議論³⁾を含め基本的には、非定常揚力、ねじれモーメントについて、それぞれ曲げ変位同相、曲げ速度同相、ねじれ変位同相、ねじれ速度同相の合計8項で線形和として表現する非定常空気力モデルが慣用である。例えば、平板翼の非定常空気力の表現に倣えば次のようになる。

$$L = \pi \rho b^3 \omega^2 \left\{ L_{zR} \frac{u}{b} + \frac{L_{zI} \dot{u}}{\omega b} + L_{QR} \theta + \frac{L_{QI} \dot{\theta}}{\omega} \right\}$$

$$M = \pi \rho b^4 \omega^2 \left\{ M_{zR} \frac{u}{b} + \frac{M_{zI} \dot{u}}{\omega b} + M_{QR} \theta + \frac{M_{QI} \dot{\theta}}{\omega} \right\}$$

ここで、Bは全幅である。以下の非定常空気力係数の比較では、この記号を用いることとする。なお、Bは非定常空気力無次元化の代表長として、全幅をとる場合と半幅をとる場合の比較を行っている。非定常空気力の測定方法には、強制振動法と自由振動法がある。強制振動法は模型を強制的に正弦波状に振動させ作用する非定常空気力を、振動にともなう慣性力を何らかの方法でキャンセルしながら、測定する方法である。現在のところ、測定された力をフーリエ変換で曲げ、あるいはねじれの変位同相、速度同相の2成分として整理する方法が慣例であり、曲げと捩れが連成する非定常空気力を求めるためには、測定される空気力が曲げ方向の揚力とねじれ空力モーメントの二つであるため、曲げと捩れの連成する振動状態では関係する非定常空気力係数8つを同時には求めることはできない。つまり、曲げ1自由度振動状態で曲げ振動に関する揚力、空力モーメントに関する4係数、おなじくねじれ1自由度振動により残りの4係数を求めることになる。一方、自由振動法では、測定できる量が振動数、減衰状態(減衰率、振幅、2自由度実験ではさらに曲げとねじれの振幅比と位相差)であるため、曲げ1自由度試験、ねじれ1自由度試験から曲げ-揚力に関する2係数、ねじれ-空力モーメントに関する2係数を求め、曲げねじれ2自由度連成振動試験からなんらかの仮定をおきながら残りの4係数を求めることになる。本研究では、星谷等⁴⁾により構造物の動的特性の同定に用いられ、好結果を得ている、拡張カルマンフィルターによる空気力同定を、先の自由振動法と同じように2ステップの手順をたどる推定(ここで

は1自由度+2自由度推定と呼ぶ)、及び2自由度連成状態から非定常空気力8係数の直接推定(ここでは2自由度直接推定と呼ぶ)を行い、その結果を比較する。同定手順は既往の報告²⁾⁴⁾とほぼ同じであるが、同定の安定性改善のための変更は若干行っている。同定結果の比較は、別途強制振動法により行われた、類似トラス断面の非定常空気力係数⁵⁾を参考に行うこととした。

システム同定理論を本研究のような事例に当てはめる場合、議論のポイントとなるのは、1)非定常空気力モデルを含めシステム表現が正確であるか、2)入力信号に十分な情報量があるか、の2点になろう。まず、前者については、空気力を含む状態表現が曲げと捩れの連成状態のもので、とりあえず曲げ振動と捩れ振動が十分に連成した状態(連成フラッターが発生している状態)とすることとした。また、非定常空気力モデルは慣用のものを用いることとした。後者については、曲げと捩れの連成振動が、正弦波の組み合わせで表現できるとすると、問題がありそうである。しかし、測定した波形(図1に捩れ波形を示す)と極力適合するように調整した正弦波との比較ではピーク付近でごく僅かではあるが、測定波形が正弦波からずれる。この違いは測定誤差と同程度のものであり、有意ではないとの見方もできるが、別途行ったシミュレーションでも同様な違いがあることが分かっており、連成空気力を受ける2自由度振動系の応答波形は必ずしも単一の減衰する正弦波ではないと見てよい。したがって、第2点についても継続して検討を行う必要はあるが、とりあえずは問題はないとした。

3. 実験条件

本研究で用いた風洞試験模型は、ある長大吊橋のトラス補剛桁設計案の一つであり、表1の諸元で無風時の捩れ固有振動数を代表振動数、代表長を全幅とすると、換算風速15付近で曲げ捩れ振動フラッターが発生するものである。したがって、十分に曲げ捩れが連成する領域ということで、本研究での測定は換算風速15より高風速にて行っている。

模型諸元	トラス高	1 4 0 mm	主構幅	3 5 5 mm
	重量	5. 4 8 k g f	極慣性モーメント	0. 1 2 4 k g m ²
振動数	曲げ	1. 1 5 H z	捩れ	2. 5 1 H z
構造減衰率	曲げ	0. 0 2 8	捩れ	0. 0 1 7

表1 トラス模型諸元

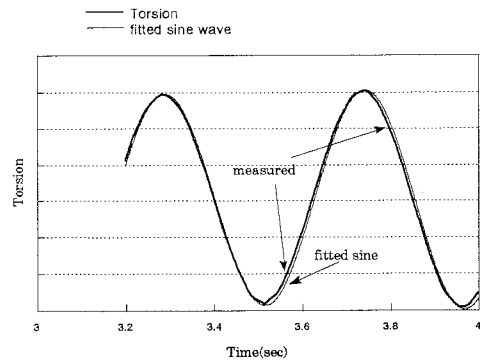


図1 捩れ応答波形とフィットさせた正弦波の比較

4. 非定常空気力係数の比較

本研究での非定常空気力係数の推定は、同定上の条件の比較を行うため、同定手順によりバネ吊りによる応答履歴はi)曲げ1自由度振動、ii)捩れ1自由度振動、iii)曲げと捩れ双方を許す2自由度振動のそれぞれの測定を行い、同じ波形について同定を実施している。係数の比較は次の点について行った。

I 従来の自由振動法と同じく曲げと捩れのそれぞれ1自由度応答同定をまず実施して、次に2自由度連成応答による同定を行った場合(1自由度+2自由度同定)と曲げと捩れ2自由度連成波形から直接すべての非定常空気力係数を推定した場合(2自由度直接同定)

II 入力波形の数値上の大きさのアンバランスをなくすため、適当な入力波形の代表的な大きさで入力曲げ変位、捩れ変位をそれぞれ規格化した場合

III 各非定常空気力係数間の数値的な大きさの関係を検討するため、非定常空気力係数の無次元化に全幅Bを用いた場合と半幅bを用いた場合。

さて、以上の比較を行うために、II,IIIについては基本的には解析対象波形は曲げと捩れ2入力の場合はそれぞれの最大の相乗平均を代表量として規格化することとし、全幅Bを用いて非定常空気力を定式化した場合をベースとして、それぞれの条件で同定を行った結果を、1自由度振動+2自由度振動による推定結果を図2に、同じ条件で2自由度波形に対し直接すべての係数を求める同定を行った結果を図3に、図2の条件に対し入力信号の規格化を行わない場合の結果を図4に、同じく図3の条件に対し規格化を行わない場合の結果を図5に、図3の条件に対し非定常空気力係数の無次元化を半幅bで行い同定した結果を図6に示す。また、換算風速1.5付近の曲げと捩れの連成振動応答の状況を図2に示す。

1) 同定手順に関する検討(Iの比較)

図3に示すように、曲げと捩れ2つの1自由度波形+2自由度連成波形の手順で同定を行った場合の同定結果は概ね収束もよく、図中に黒く示す類似トラス断面に関する強制振動法による測定結果とも整合は良好である。しかし、揚力や空力モーメントの変位同相成分の係数には若干収束の悪さが認められる。図4に示す2自由度連成波形から直接すべての非定常空気力係数を推定した結果では、図3に示す結果と比較すると、収束の状況はよくない。特に、曲げ振動の関係する係数でばらつきが目立つ。いず

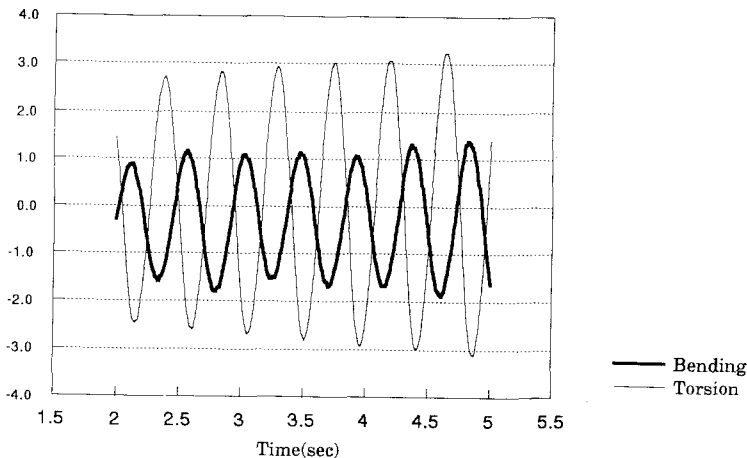


図2 曲げと捩れの連成応答波形

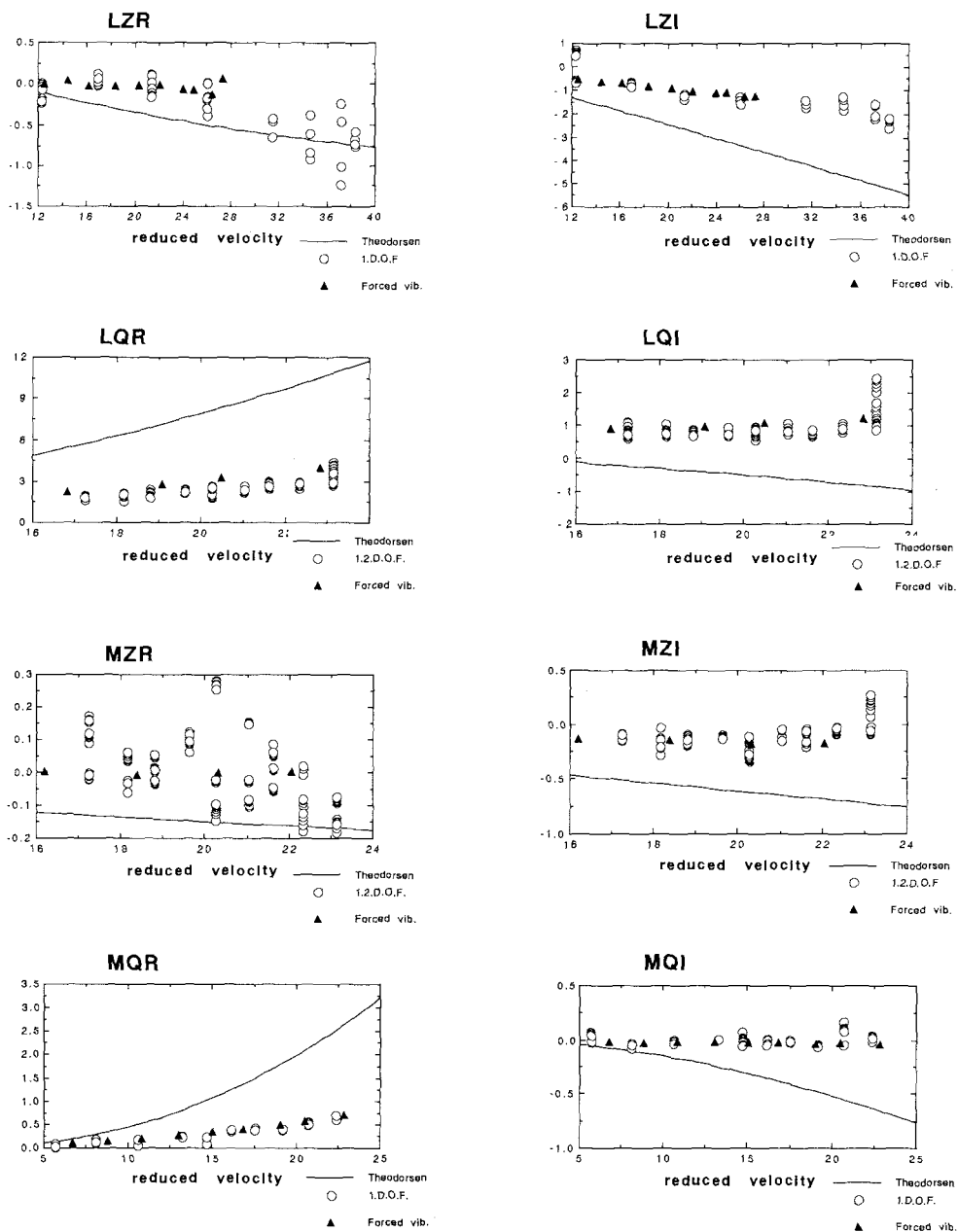


図3 1自由度+2自由度振動応答による非定常空気力係数の推定（入力規格化）

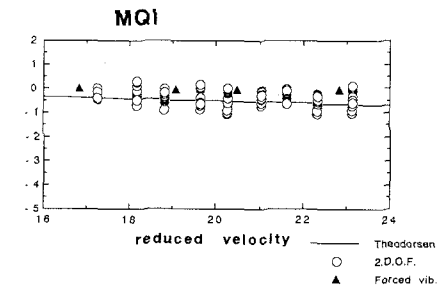
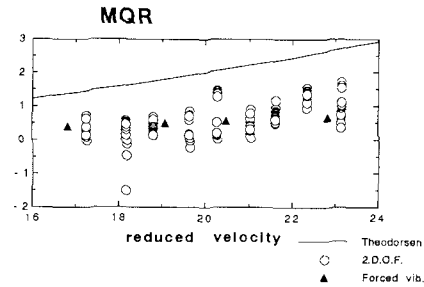
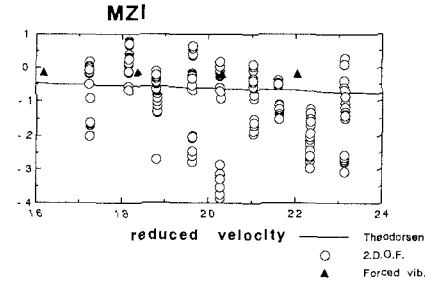
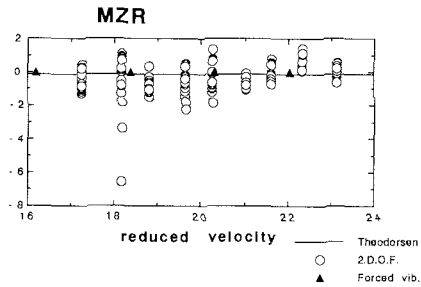
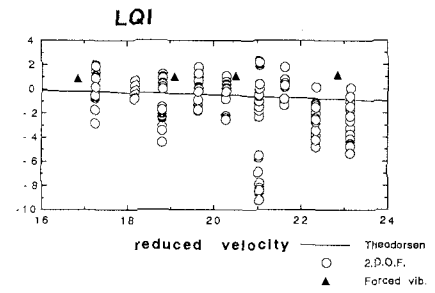
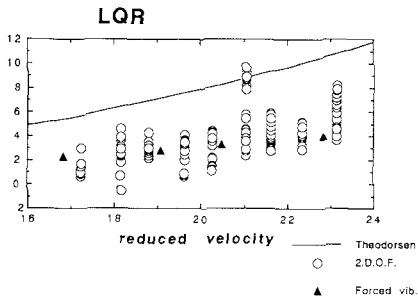
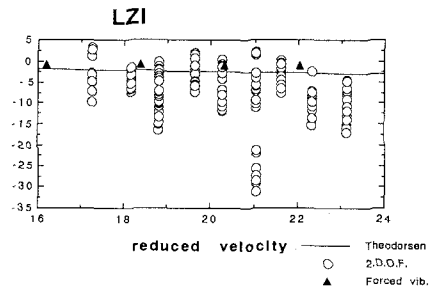
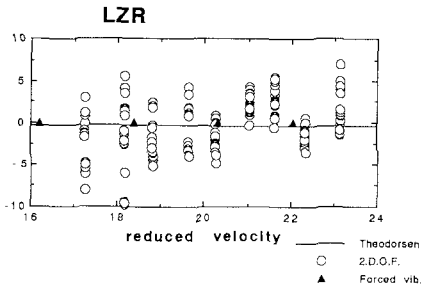


図4 2自由度振動応答による非定常空気の推定（入力は規格化）

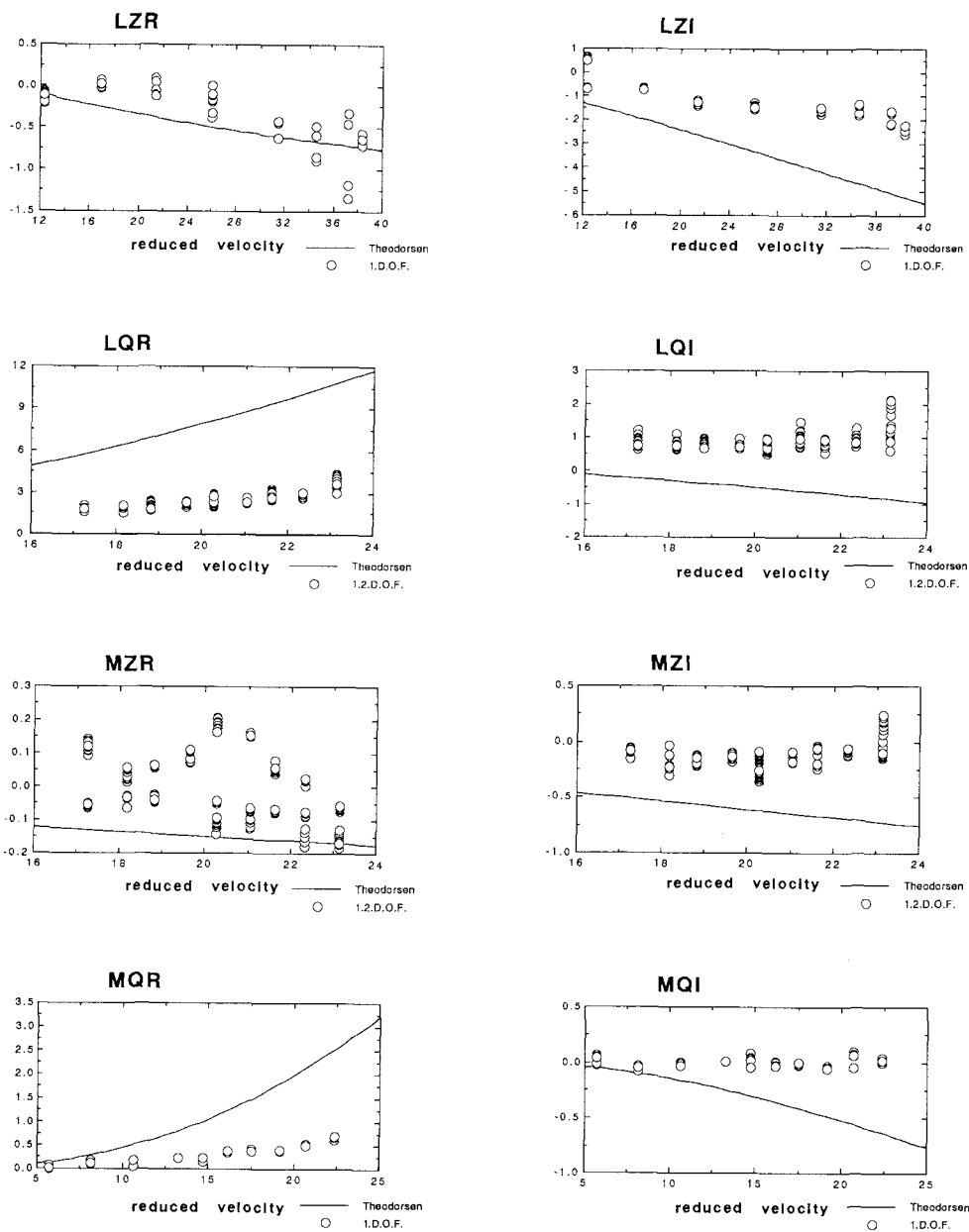


図5 入力を規格化しない1自由度+2自由度振動応答からの推定

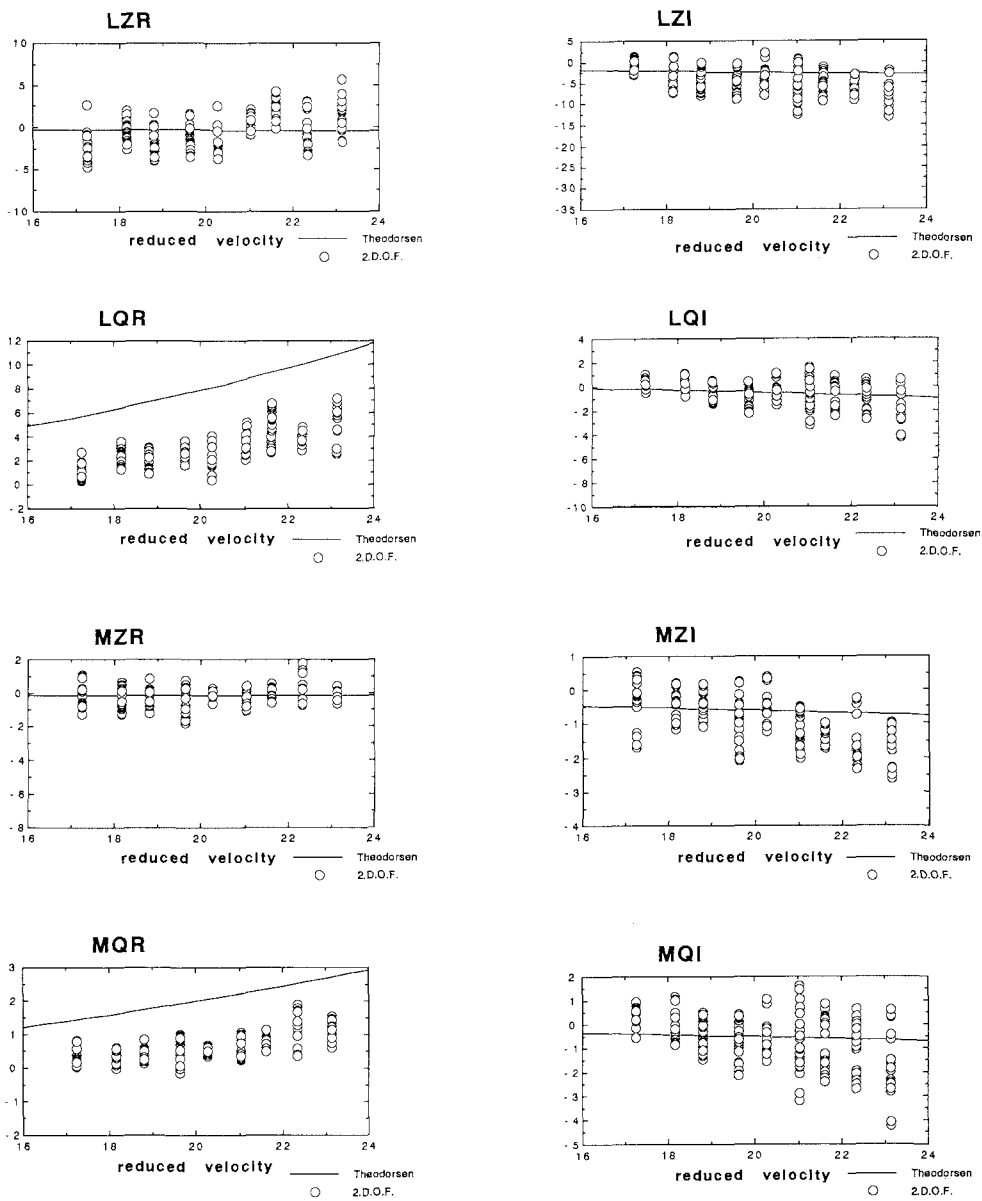


図6 入力を規格化しない2自由度振動応答からの直接推定

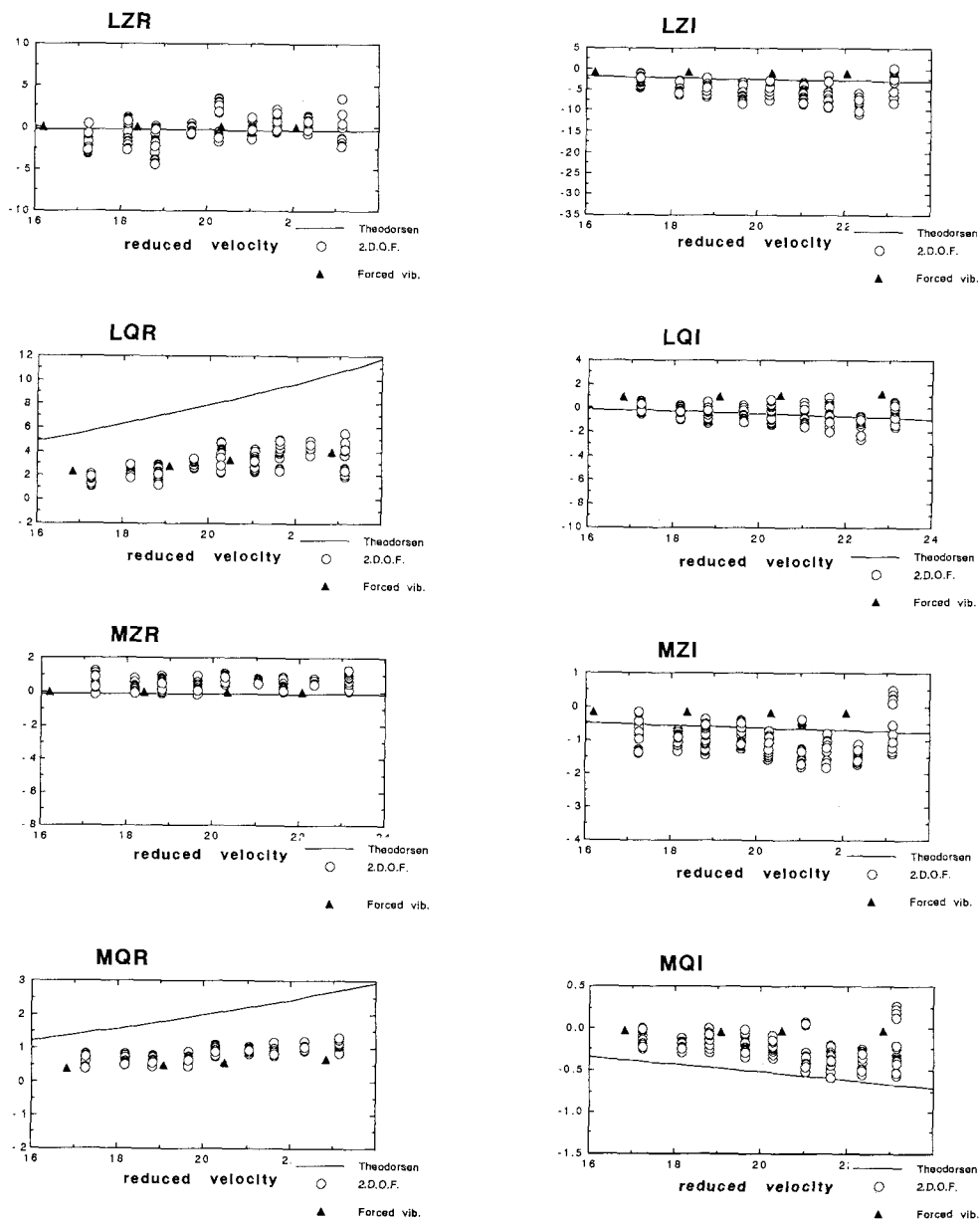


図7 半幅 b を用いた状態方程式に基づく推定 (2 自由度直接、入力は規格化)

れも、曲げの振動の関係する係数で収束が悪いが、この原因は原応答波形に混入したノイズによるところが大きいと推測される。図2の応答波形を見ると、振れ変位はなめらかに発達していることがみてとれるが、連成するたわみ変位は明らかにビート状の性質を示している。これは実験装置上の問題で、僅かなローリングと横揺れの問題と見られ、振動数は異なっているものの、同定を行う解析長は高々2波で行っていることを考慮すると、応答波形の振幅に関する有害なトレンドとなっていることは容易に想像される。

2) 入力波形の規格化に関する検討(IIの比較)

図3に示す結果と図4に示す結果、図4と図6を比較すると、前者ではどの非定常空気力係数についてもさほど差がないが、後者では推定する係数により曲げ変位の関係する場合には、規格化した波形を直接解析した場合の方が推定結果の収束が良好であり、その他では規格化した方が空気力係数の収束が良好であった。システム同定の場合には、結果としての係数の収束もさることながら、結果を得るための解析の収束の可否も大きな問題となる。この点では、図中には現れていないが、適当な代表量で規格化を行った方が、解析対象とする応答波形の代表振幅によらず、同定解析法の収束の確率は高かった。次の項目3)とも関係するが、拡張カルマンフィルターで同定を行う場合各係数の収束は同定アルゴリズムの中の“動き易さ”と大きく関係しており、図2で示した入力原波形のノイズの混入も考慮すると、どちらかといえば、なんらかの方法で原波形の大きさに応じた規格化をした方が、結果は良好のように思える。

3) 非定常空気力の無次元化代表長の影響(IIIの比較)

2自由度連成状態での応答波形を用い、非定常空気力係数及び曲げ変位の無次元化代表長の違いによる影響を調べた。半幅 b を用いるか、全幅 B を用いるかにより、非定常空気力係数の無次元化の考え方自体は変わらないが、空力モーメントと揚力、曲げ変位と振れ変位について無次元化の影響が現れ、状態方程式の中で数値的な大きさに関する関係が異なってくる。図4と図7を比較すると、明らかに図7の半幅 b を代表長とした場合の方が各非定常空気力係数の収束は良好である。図1の2つの1自由度応答波形に対する同定と1つの2自由度連成応答波形に対する同定を組み合わせした場合と比較すると、各係数の収束は若干劣るものの、係数のばらつきに大きな差はなくかなり改善されたと見てもよい。この比較は半幅 b と全幅 B について行ったが、同定アルゴリズムの関係でみると空気力の無次元化に推定される空気力係数の収束性の面から最適代表長があるようで、この代表長も同定に関する安定化の要素となると言えよう。

5. 結論

ある長大吊橋のトラス補剛桁について、連成非定常空気力推定に拡張カルマンフィルターを用いた同定手法を適用する為の基礎研究として、同定手順、非定常空気力及び入力応答波形の数値上の大きさの差について同定される非定常空気力係数の収束性の面から検討を加えた。結論は次の通りである。

1) いわゆる自由振動法と同じ手順を踏み、同定手法により連成非定常空気力係数を推定する方法はかなり良好な推定結果を与え、類似断面桁の強制振動法により測定された空気力係数とも有意な差はなく一致する。

2) 入力波形に関する代表量による規格化の影響は、同定結果に関し不確実である。しかし、同定解析自体の収束性を考慮すると、入力波形は規格化した方が望ましい。

3) 非定常空気力無次元化代表長については推定される非定常空気力係数の収束性に影響を与える。同定の安定性向上のためのパラメータの一つとして考慮されるべきである。

4) 本実験の場合混入した曲げ振動に対するノイズは同定結果に深刻な影響を与えるようである。安定した同定結果を得るためには、よりノイズの少ない応答波形が必要であろう。

謝辞 本研究の一部は本州四国連絡橋公団からの補助をうけている。ここに深謝する。

参考文献

- 1) 吉田、藤田、宮崎、風間、トラス補剛桁の高換算風速領域におけるフラッター特性に関する研究、風工学シンポジウム論文集、pp43-48、1990。
- 2) 山田、宮田、市川、橋桁に作用する連成空気力に関する研究、第11回風工学シンポジウム論文集、pp55-60,1990。
- 3) E.Simiu and R.H.Scanlan, WIND EFFECTS ON STRUCTURES, John Wiley & Sons, 1985.
- 4) M.Hoshiya et.al., Structural Identification by Extended Kalman Filter, EM ASCE, vol.110 No.12, pp1957-1970, 1984.
- 5) 本州四国連絡橋公団、明石海峡大橋大型風洞試験作業班報告書、平成3年3月。

(1992年9月21日受付)