

有迎角時加振方向差により非定常空気力とフラッター推定応答に生じる影響

Experiment on unsteady aerodynamic force and flutter response estimation under different experimental settings

山田 均*, 勝地 弘**, 鈴木 猛***

Hitoshi Yamada, Hiroshi Katsuchi and Takeshi Suzuki

*工博, 横浜国立大学教授, 工学部建設学科 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

**工博, 横浜国立大学助手, 工学部建設学科 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

***横浜国立大学大学院学生, 工学研究科計画建設学専攻 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

Analytical approach in the flutter-response estimation came to have increasing importance in the wind resistant design process for long span bridges. It was the first time of introduction of this approach, when the flutter behavior was intensively discussed for the Akashi-Kaikyo bridge. Its reliability was carefully investigated in comparison with wind-tunnel observation of response of the full bridge model. To discuss accuracy of the analysis it is very important to make careful investigation on reliability of unsteady aerodynamic force. In this paper error and sensitivity of its measurement process of currently conducting methods is discussed especially in setting of shaking direction.

Key Words: Wind tunnel experiment, measurement method, Unsteady aerodynamic force, Flutter response estimation

キーワード: 風洞実験, 計測法, 非定常空気力, フラッター応答推定

1. はじめに

長大橋の耐風応答検討のプロセスに測定した非定常空気力を用いたいわゆる全橋フラッター解析が組み込まれ盛んに用いられるようになり、特に従来の部分模型による風洞試験がいわば簡易な古びた方法というような印象を与えているようにも見えるのは極めて遺憾である。フラッター解析が耐風設計に積極的に用いられるようになったのは、明石海峡大橋の事例が最初である。しかし、フラッター解析が設計当初から高精度の応答推定法として扱われたわけではなく、大型風洞による1:100縮尺の全橋模型試験結果を説明する一手法として導入され、解析構造モデルの精緻化や精度確認をはじめとして、適用する振動に対する多次元非定常空気力、静的な変形を司る3分力の精密な検討導入、静的変形推定についての非線形解析の必要性の検証を経て、フラッター応答解析の全橋模型試験応答とのキャリブレーションが可能になり、実用性が確認されたものであった。非定常空気力に関する測定法の検討は、決して新しい問題ではない。しかし、明石海峡大橋以前の多くの例は、実験室レベルの検討の域を出るものではなかったようにみうけられる。また、明石海峡大橋が超長大橋であり耐風安定性が極めて高い構造様式をとっているため発生する空力弾性応答が連成フラッターであり、応答推定のために精度の高い多自由度非定常空気力測定のために多くの検討がなされた。¹⁾

いくつかの表記方法があるが、非定常空気力は、変位および変位速度同相の各成分重ね合わせとして、抗力、揚力、ねじれトル

クとして表現されるのが常である。非定常空気力の測定自体は、変位および変位速度同相の成分を係数化し、元々の定式化が調和振動を前提としていることがおそらく主とした理由で、測定する風速と振動の振幅、そして振動の振動数をパラメータとして記述される。一方、現在のところフラッター解析は複素固有値解析を元に実施されるために、実際の非定常空気力そのものには応答振幅依存性が強く現れることがあるものの、振幅非依存の形で、風速が決まれば定係数となるような表記が使われている。つまり、計測上あるいは解析上の都合で、簡易化されている面も少なくなく、長大橋の設計に盛んに用いられつつある非定常空気力によるフラッター解析ではあるが、その組み合わせだけで万全の精度を持つということはかなり難しいといえる。一方で、非定常空気力の定式化自体に問題があるとする研究もあり、非定常空気力に関しては、精度の保証は容易ではなく、何らかの別の方法とのキャリブレーションなど耐風設計で最終的に問題とする応答推定精度への影響を考慮しながらの慎重な吟味が必要になるといえる。

さて、本研究では、非定常空気力の測定上の問題として迎角を持つ場合の振動の与え方の影響を議論する。風洞内で迎角を物体(風洞模型)に与えるためには、気流方向を変えることは一般には困難であるために、風洞模型を所定の角度傾け、気流軸と物体軸のはさみ角を、両軸が一致する時を 0° として基準とし風上側縁があがる方向を正に定義している。これにいわゆる鉛直振動を与える場合、振動軸を迎角の有無と無関係に風洞軸と直交する気流軸を直角にとる場合(図-1のcase 2)と物体軸も風洞模型回

転に従い回転させる場合（図- case 1）とがある。最近のバネ吊り振動応答装置はほとんど後者の迎角設定方法を採用しているが、前者では振動装置自体の回転移動がないために、振動装置が大型になる強制振動法による非定常空気力測定の場合では前者の迎角設定方法によるものがほとんどである。非定常空気力の重ね合わせができる前提の範囲では、当然、鉛直振動に相当する振動方向の違いは線形変換により相互に一致するはずであり、両者の比較は必ずしも例が多いわけではない。一方、長大吊橋で強風時に大きな静的ねじれ角が生じている場合を想定すると、振動方向は case2 の様になることも想定できるが、解析モデルとしては case1 の非定常空気力を当てはめ、その結果振動応答として case2 のような振動方向になったと考える正しい。言い換えると、線形和を仮定できれば case 1 を基準とすれば特に問題は大きくないということになる。本研究では、明石海峡大橋の検討の際に水平振動に伴う非定常空気力成分が振動応答推定に大きな影響を持ったことを考慮して、明石海峡大橋と同型のトラス補剛桁模型をもちい、非定常空気力とフラッター推定応答により両者の場合を比較検討することとする。なお、迎角がない場合や回転変位に伴う成分には影響がないことは、明らかに予想されうることである。

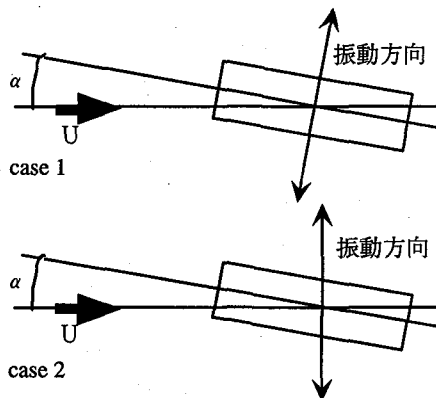


図- 迎角と振動方向

2. 実験および解析の条件

2.1 実験模型と迎角の与え方

実験に用いた模型は明石海峡大橋補剛桁試設計案の内の一つであるいわゆる基本断面を模型化したものであり、表- 1のような諸元を与えた。

非定常空気力の測定はバネ吊り試験装置を用い、振動系全体を傾け迎角を与える方法（case1）とバネは風軸と直角（本研究の場合は鉛直）に保ったままバネに上下の相対変位を与えて吊られている模型に迎角を与える方法（case 2）として、比較することとした。

2.2 非定常空気力の推定

非定常空気力測定手法は、自由振動応答波形を逆解析する「モード分解再構成法」²⁾を適用した。EK-WGI法を用いた、パラメータ同定時の初期条件は表-

2.3 フラッター応答の推定

フラッター解析は明石海峡大橋設計案に準拠した骨組み構造

モデルを用いて、測定した非定常空気力を適用し実施した。モデルの主要諸元は表-

ターモード形を固有モード形で展開するいわゆるモード法を当てはめた。モード展開に用いた固有モード形は30次までとした。また、強風時発生する静的なねじれ変形の影響は、本研究の趣旨が精密な応答分析ではなく非定常空気力の差の影響を見ることにあるため、省略した。

表- 1 トラス断面模型実験諸元

模型全長 $L(m)$		1.250
全幅 $B(m)$		0.355
桁高 $D(m)$		0.140
鉛直方向質量 $m_y(kg/m)$		3.704
極慣性モーメント $I(kg \cdot m^2/m)$		0.083
固有振動数	鉛直曲げ $f_y(Hz)$	1.440
	ねじれ $f_\theta(Hz)$	2.480
	振動数比 f_θ/f_y	1.722
対数減衰率	鉛直曲げ δ_y	0.032
	ねじれ δ_θ	0.019

表- EK-WGI法の初期パラメータおよび解析条件

共分散	システム (変位、速度)	1
	未知パラメータ	100
状態ベクトル	システム (変位、速度)	実観測データ値を使用
	未知パラメータ	強制振動法の値 ³⁾
観測方程式の雑音の共分散		1.0
グローバルな繰り返し回数		20
解析時間長		鉛直たわみ4波
時間刻み (msec)		2
重み		1

注：状態ベクトル未知パラメータは式1、式2の非定常空気力係数の8こである

表- フラッター解析の構造諸元

支間割り (m)		960+1990+960
桁間ケーブル間隔 (m)		35.5
桁高 (m)		14.0
ケーブル	サグ[サグ比] (m)	200.3[1 : 10]
	断面積 (m ²)	0.7882
	ヤング係数 (tf m ² /m)	2.03×10 ⁷
死荷重	吊構造部 (t/m)	28.9
	ケーブル関係 (t/m)	14.26
吊構造部極慣性モーメント (tf m ² /m)		5883
桁の剛性	断面積 (m ²)	0.4896
	鉛直剛性 (m ⁴)	23.990
	ねじれ剛性 (m ⁴)	154.25
	水平剛性 (m ⁴)	18.407

3. 抽出された非定常空気力係数

非定常空気力係数は式1と式2に示すような定式化を用いて抽出した。ここで、L、Mは揚力と空力モーメント、v、θは鉛直方向（橋桁の）の変位、橋軸まわりのねじれ変位である。ωは振動を調和振動としたときの円振動数である。

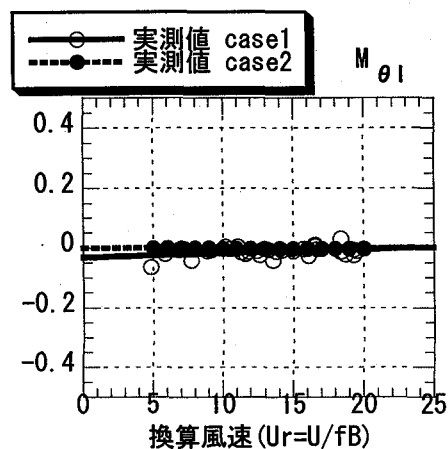
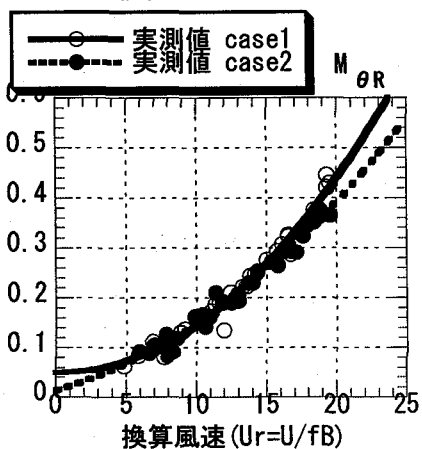
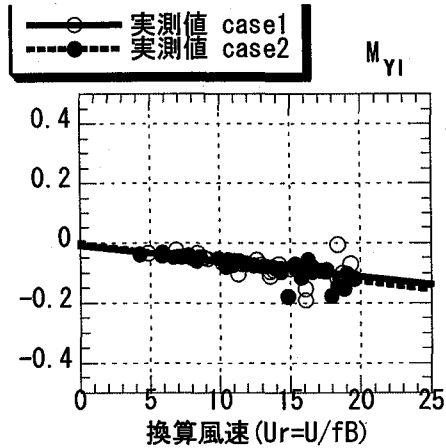
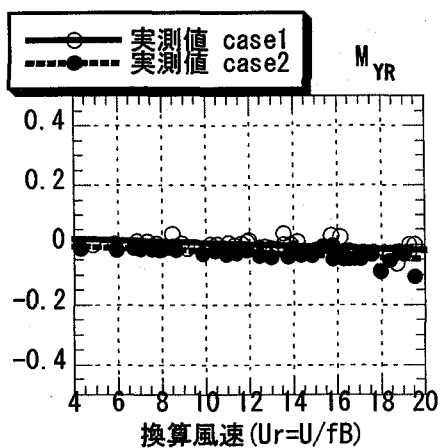
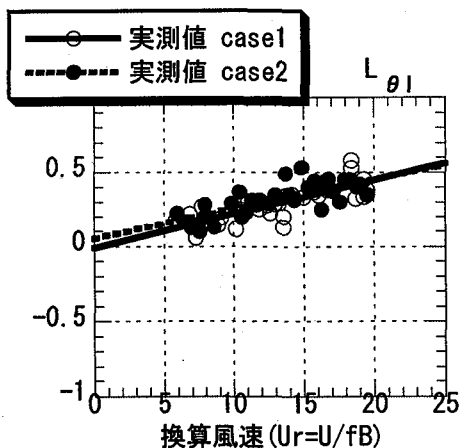
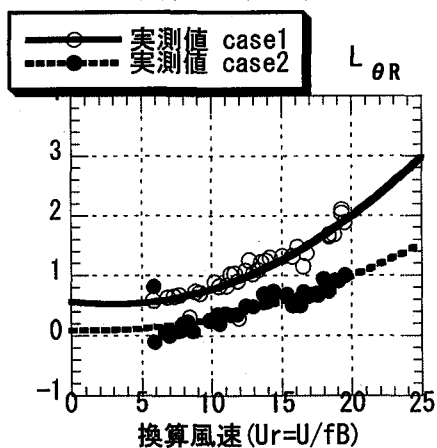
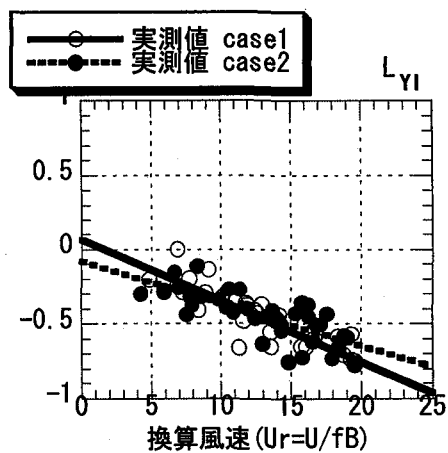
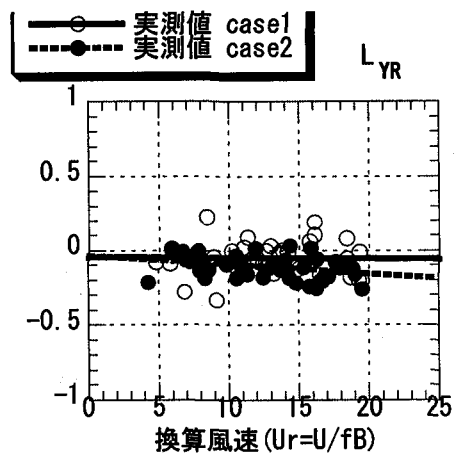


図- 2 迎角+3度の場合の測定例 (図中の実線、破線はフラッター解析のための近似関数)

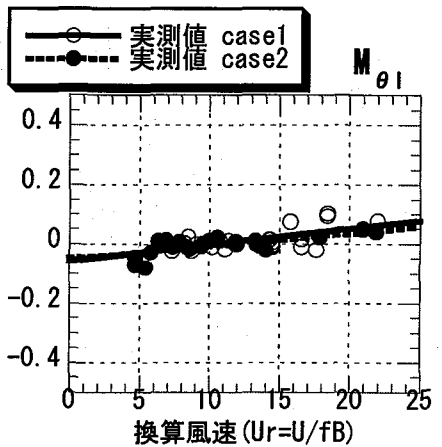
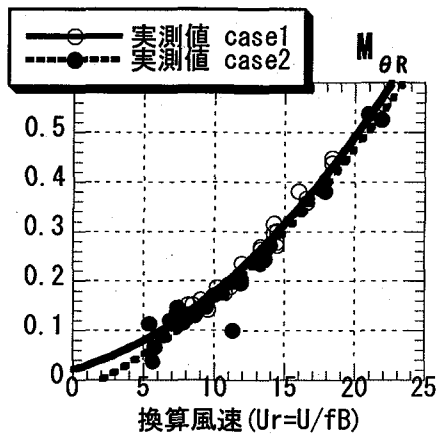
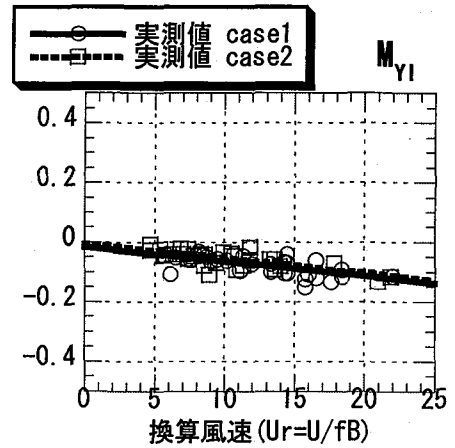
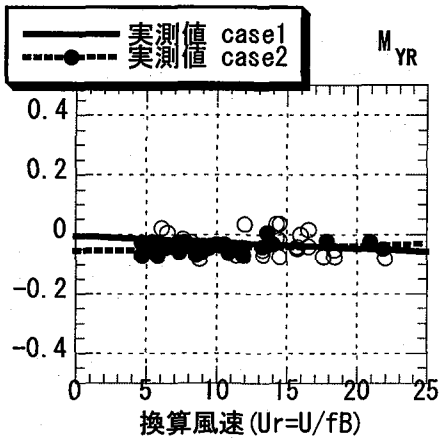
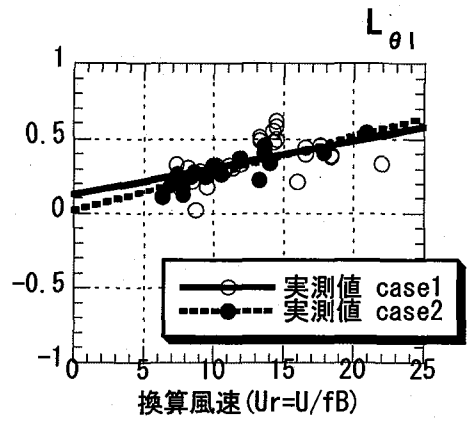
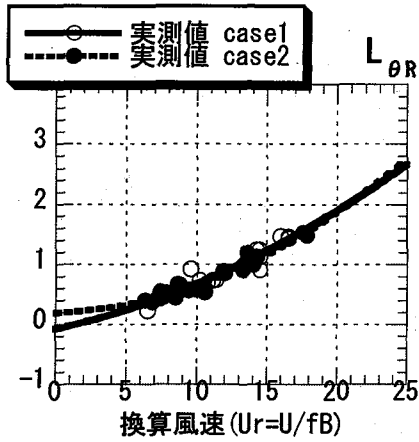
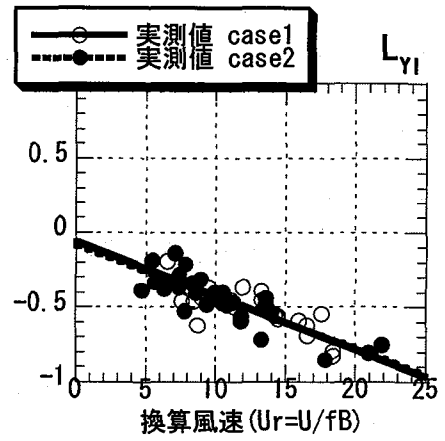
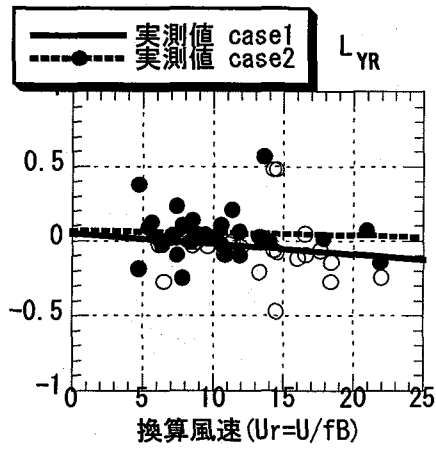
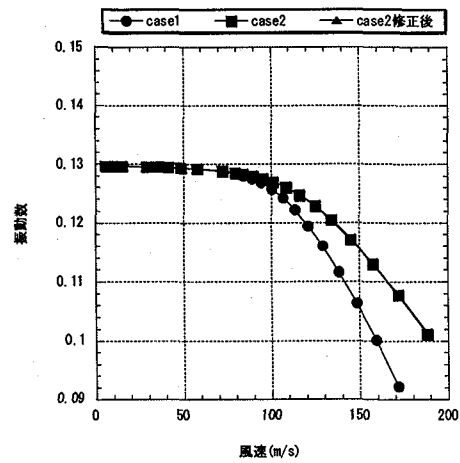
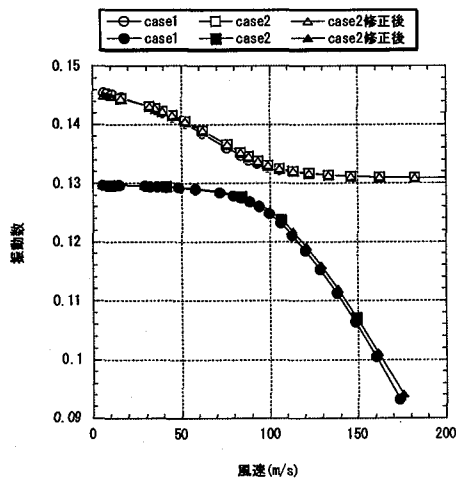
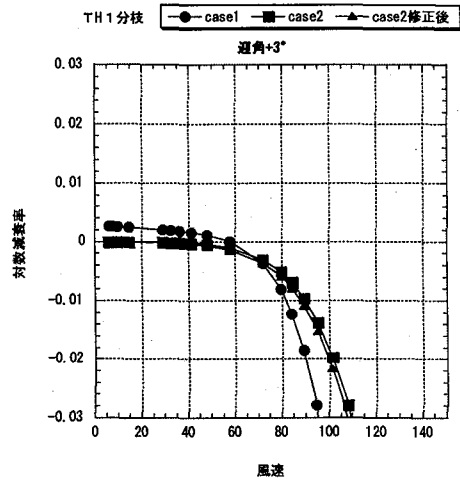
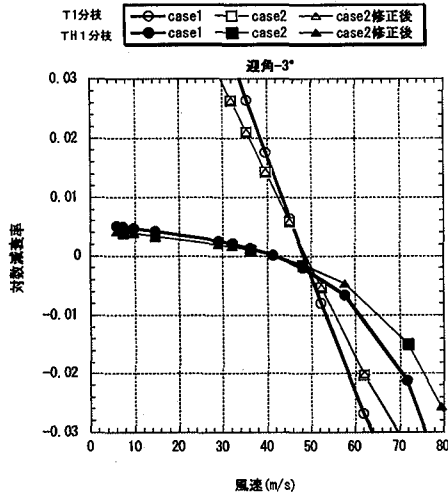


図- 3 迎角- 3度の場合の測定例 (図中の実線, 破線はフラッター解析のための近似関数)



a) 迎角 -3° の場合のフラッター応答特性

b) 迎角 $+3^\circ$ の場合のフラッター応答特性

図- 4 推定されるフラッター特性 (静的変形は無視している)

注: 図中の case 2 修正後は 5 章での議論に基づき非定常空気を修正した場合に推定されるフラッター応答

$$L = \pi \rho B^3 \omega^2 \left(L_{yR} v + L_{yI} \frac{\dot{v}}{\omega} + L_{\theta R} \theta + L_{\theta I} \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right) \quad (1)$$

$$M = \pi \rho B^4 \omega^2 \left(M_{yR} v + M_{yI} \frac{\dot{v}}{\omega} + M_{\theta R} \theta + M_{\theta I} \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right) \quad (2)$$

式 (1, 2) を直接適用しそれぞれのケースにおいて抽出された非定常空気力係数の値を、図- 2 および 3 に 2 例だけ示す。いずれも計測された値をそのまま示し、平滑化や平均化操作などはしていない。

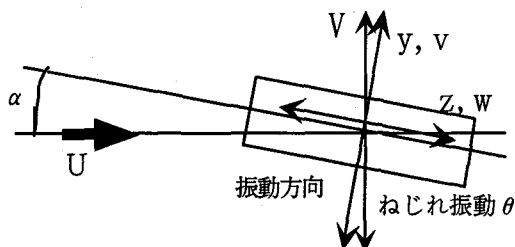
case1 と case2 の間で測定した非定常空気力の推定結果を比較すると、正の迎角である $+3^\circ$ では、係数 $L_{\theta R}$ で case2 が case1 に比べその値が小さくなった。これ以外の係数は推定結果にほとんど差が見られないものの、非定常空気モーメントに関する係数で相対的に case1 に比べ case2 の値が多少小さくなる場合も認められた。また、負の迎角である -3° でも同じく非定常空気モーメントに関する係数で相対的に case1 に比べ case2 の値が小さくなる傾向は見

られ、ここには示していない -5° のほうがその違いが大きくなる場合もあった。ただし、非定常空気力抽出条件を最適化した場合でも、非定常空気力のばらつきの中に、case の違いが埋もれている状況も観察される。つまり、非定常空気力抽出上の誤差は少なく、関数近似自体の近似誤差と見いだそうとしている差はそれほど大きくない。

4. 推定されるフラッター応答の状況

抽出された非定常空気力に対し、解析上の都合ではあるが、それぞれの場合に適当な関数近似を実施し、2000m級吊橋モデルに対しフラッター解析を実施した結果の要約を図- 4 に示す。先に述べたように、静的変形は無視し、迎角 α° のケースでは全径間にわたり、その迎角に対応する非定常空気力を適用させている。この場合、その迎角は風速に関わらず一定となる。図には迎角 -3° と $+3^\circ$ の場合を示している。二つの迎角ともに、case1 と case2 を比較すると (図中で $\bigcirc$ と $\square$ の比較)、おおむね同様な傾向を示していることが分かる。ただし、構造減衰を対数減

衰率で0.02程度を仮定した場合、負側によぎる限界風速で10m/s弱の違いが見られ、いずれもcase1の場合の方が低い限界風速を与えていることが分かる。また、空力減衰応答の風速増加に伴う減少の度合いも大きくなる傾向がある。また、振動数にも違いが現れる場合もあるようで、この場合もcase1の方が変化が大きいようである。



図—5 case 1 と case2 の変位関係
(向かって右回転、及び上方为正)

5. 重ね合わせが有効であることを前提にした変換

図—5のように鉛直変位をそれぞれ v そして V と書くとする。case 2では通常風軸方向である U 方向を拘束していることを考慮し、物体軸に固定された座標系 $y-z$ で表現すると、case1とcase2の変位の関係をもちて、それぞれのケースで推定される非定常空気力係数は次のような線形変換として示すことができる。

$$\begin{Bmatrix} w \\ v \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} V \sin \alpha \\ V \cos \alpha \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \alpha & 0 \\ \cos \alpha & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V \\ \theta \end{Bmatrix} \quad (3)$$

これを3次元表示のcase1の非定常空気力に代入すると関係式が得られることになる。変位比例項のみを示すが、速度比例項も同様である。

$$\begin{aligned} \text{Re} \begin{Bmatrix} D \\ L \\ M \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} D_{zR} & D_{yR} & D_{\theta R} \\ L_{zR} & L_{yR} & L_{\theta R} \\ M_{zR} & M_{yR} & M_{\theta R} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w \\ v \\ \theta \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} D_{zR} \sin \alpha + D_{yR} \cos \alpha & D_{\theta R} \\ L_{zR} \sin \alpha + L_{yR} \cos \alpha & L_{\theta R} \\ M_{zR} \sin \alpha + M_{yR} \cos \alpha & M_{\theta R} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V \\ \theta \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

つまり、case2では模型軸と振動方向が直交しないために模型軸にあわせた振動を行うcase1の3次元表記での抗力方向の係数の影響が含まれることになる。ただし、通常行われる迎角の範囲は大きくなく、 $\sin \alpha$ の影響でしかないことを考えると大きな違いは生じないと推測することもできる。図—4でcase2修正と称しているものが、式(4)の関係を用いcase1で推定された非定常空気力係数で修正したものを用いたときに得られるフラッター応答である。迎角が $\pm 3^\circ$ で小さいこともあり、修正の有無に関わらずフラッター応答はほぼ重なり際は見えない程度であり、上の変換の影響は極めて小さいことが分かる。

6. まとめ

非定常空気力の精度について、測定時に設定する振動方向についての非定常空気力測定を明石海峡大橋の設計案の一つについて行った。振動軸を模型に固定している場合をcase1、封じ区と直角にした場合をcase2として、その比較結果をまとめると以下のようなになる。

1) 非定常空気力の比較では両ケースで測定値に少なからぬばらつきがあるものの、違いは認められる。

2) 両者の非定常空気力を用いてフラッター応答を推定すると、おおむね似たものが得られるが、限界風速で10m/s弱の違い起きる場合もある。また、フラッターモーダル空力減衰を見ると風速に対する変化にも若干の違いが認められる。

3) 振動方向の違いを考慮して変換を実施しても両者の違いは説明できない。

4) 本研究の範囲では、1)と2)の問題で非定常空気力の推定精度(フラッター解析に使用するための近似関数の精度も含む)を考慮すると、振動方向の違いによる差異については必ずしも明確ではない。つまり、この程度の差(この場合では推定される限界風速で10%程度)は、外力を含めた解析の種々の影響を考慮して、認めるべき誤差範囲としての見方もありうる。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団, 大型風洞試験作業報告書, 平成5年3月。
- 2) 山田 均, 宮田 利雄, 多次元非定常空気力測定手法の提案と測定パラメータの検討, 第14回風工学シンポジウム論文集, pp491-496, 平成8年12月。

(1999年9月17日受付)