

モード分解再構成法による非定常空気力係数抽出と 2, 3 の問題について

DISCUSSIONS ON EXTRACTION OF THE UNSTEADY AERODYNAMIC COEFFICIENTS
BY THE MDR METHOD REFERRING THEIR CONTRIBUTION ON THE ANALYTICAL RESPONSE

山田 均*, 宮田 利雄**, 須藤 享***

Hitoshi YAMADA, Toshio MIYATA and Susumu SUDOH

*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79-5)
**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79-5)
***工修 石川島播磨重工業(株) (研究実施当時: 横浜国立大学大学院博士課程前期)

Opening day of the Akashi Kaikyo bridge is coming soon without any major problems during the construction. This will be a very good timing to start a campaign to realize longer span bridge projects of the next generation. From the aerodynamic viewpoint of the super long span bridges, there will be technical barriers before the goal, which must be cleared. One of them is establishment of more detailed and more accurate behavior estimation technique under the improved structural modeling and full dimensional aerodynamic force of guaranteed accuracy. In this paper, three dimensional unsteady aerodynamic forces measured by the MDR method are firstly reported and discussed problematic points referring estimated response of a model suspension bridge under them. Key words: Unsteady aerodynamic force, Flutter derivatives, Three dimensional measurement, MDR method

1. まえがき

明石海峡大橋の開通日が近づきつつある。阪神淡路大震災を架設時に経験したことなど、いくつかのトピックスはあったようだが、特に大きな障害もなく開通日を迎えられそうなことは非常に喜ばしいことである。一方、別の見方をすれば、次世代の長大橋プロジェクトの具現化を加速させるためのいい機会とも言える。橋梁の風工学の立場から言えば、明石海峡大橋の検討過程で学んだことは多く、3次元立体モデルのフラッター解析技術やガス応答検討の精度要件など将来の長大橋実現に必須の事項は非常に多い。前者にあつては、長大橋梁の対風挙動を精度よく評価するためには、吊橋の挙動を精密に評価できる3次元構造モデルの構築、静的な風力に押し流される変形状況を種々の非線形性を考慮しながら追跡できる手法、さらに強風下の状況で精度よく測定された3次元非定常空気力を適用し応答評価を行うフラッター解析法の開発は、トラス補剛桁を持つ明石海峡大橋にあつてはそれぞれ既往の精度を越えた緻密さを要求する。非定常空気力を解析に取り込み、設計プロセスの一部と明示的にしたことは、新しいアイデアが数多く盛り込まれた明石海峡大橋の耐風設計の中でも特に画期的なことである。これらの内、構造モデルの精緻化および変形に伴う静的空気力の導入、非線形性の導入は土木工学だけでなく多くの分野での既存技術を拡張することで可能になることであるが、3次元振動に伴

う非定常空気力を測定することは、いわば極めて柔軟な構造物である吊橋固有の問題であり、従来技術の拡張にとどまらず、新たな技術開発を必要としている。別の見方をすれば、精度よく信頼性の高い3次元非定常空気力を求めることは、次世代の長大橋プロジェクトの合理化のためにキーポイントの一つとも言える。

本論文では非定常空気力の測定法として自由振動法を基礎としたモード分解再構成法(MDR法)により測定した3次元非定常空気力について、その非定常空気力により推定される長大吊橋のフラッター発生状況に対する影響を調べながら議論を加えるものである。

2. 非定常空気力の測定

2.1 非定常空気力測定について

非定常空気力の測定自体は周知の通り、決して新しい問題ではない。非定常空気力作用下のパネ支持模型の振動応答履歴から非定常空気力を抽出するという、いわば逆問題として解く方法が、いわゆる自由振動法であり、測定模型に強制振動をあたえ生じる慣性力との不均衡力として、非常に精密な測定処理を経て非定常空気力を測定する手法が強制振動法になる。両者ともに、正弦波状の応答を仮定し、非定常空気力の定義を換算振動数($=fB/U$, ここで f は振動数, U は風速, B は全幅) ないしその逆数の換算風速を支配変数として行い、またフラッター解析上の都合と

空気力としての第1近似として、連成項を含めて換算振動数をパラメータとする定係数との単純な積の和で変位と速度に同相な成分として分離して、表現していることに違いはない。風速の増加に伴い急激に発達するフラッターの発生状況から、そのような線形和を用いた第1近似でも、振動振幅がそれほど大きくない範囲では、高精度に表現できることは多いように見える。一方、測定すべき空気力自由度が増加するにつれ、強制振動法では加振方向の増加、自由振動法では振動方向の増加が必要になり、測定装置としての複雑さは同様に増す。類似な背景を持つ両手法で、違いは測定を行う振動状況にある。強制振動法では、測定上の理由で、振動の各変位方向に別々に（3次元振動の場合、鉛直まげ、ねじれ、水平まげ、2次元の場合は前二つ）連成のない正弦波加振し、それぞれの場合に、揚力、空力モーメント、抗力各成分について連成項も含めて加振している変位同相、速度同相成分を求めることになる。つまり、連成加振が可能なシステムであっても、連成振動状態で各成分を求めることはできない。一方、自由振動法では、バネ支持系に観測される振動応答を逆解析する。したがって、観測対象とするのは連成振動応答（低風速時には通常空力的には連成は無視できる）である。ただし、それだけでは情報が不足するので、効率的に分析するために必要な各モードの情報を自由度を拘束しながら求めることも手法、手順によっては必要になる。

明石海峡大橋での議論以降、測定装置として商品化されている強制振動法による非定常空気力の測定事例が増えているように見受けられるが、非定常空気力の精度自体の議論は、方法間の違いの影響などを含めて、必ずしも十分に行われているわけではなく、今後解決すべき問題点の一つと考える。

2. 2 MDR法の適用概要

自由振動法で非定常空気力を引き出そうとする場合の問題点の一つは、応答履歴の観測が風速ベースで行われ、その風速でバネ支持模型システムの自由度数に相当するモードが現れることにある。したがって、同じ風速で振動数の異なる、つまり換算振動数が異なる振動応答を見ていることになり、通常目にする1換算風速の連成非定常空気力の定義式をそのまま適用すると矛盾が生じる。しかし、振動連成が無視できる低風速の範囲では、構造連成が無い場合、空力特性の性格上、非定常空気力係数マトリクスの連成項を省略でき、変位間での空気力に関する連成はなく、変位ごとに別個の独立した運動方程式を立てることができる。この場合には、それぞれの非定常空気力係数には対応する別々の換算振動数を用いればいいことになる。この連成が小さいことによる条件の緩和を利用したシステム同定による空気力係数の手法もいくつか見受けられる^{1, 2)}。しかし、当然ながら、議論の前提をはずれる、応答に連成が大きくなる高風速の範囲では、手法上の問題を生じることになる³⁾。一方、MDR法は、連成する振動状況を前提（連成しない状況も含むことができる）にし、実風速領域で観測されるモード情報を換算振動数領域で整

理し直し、本来の非定常空気力定義式を逆算する^{4, 5)}。換算振動数領域で実現するすべてのモードを併せ使用するために、測定を実施した換算振動数の整合精度が問題の一つになる。したがって、ここでは以下のように実験および解析を進めた。

ステップ1 風速ベースの応答観測とモード情報の抽出

- 風速に対する振動数変化が大きいモードの同定と測定値に応じた係数推定の基準とする換算風速の決定
 - 残るモードの決定された換算風速ステップでの同定
- 原理的には、すべてのモードが同時に同定できるような応答履歴を同定し、結果的に得られるそれぞれのモードの換算振動数を利用しても構わない。しかし、換算振動数ステップの実現精度を考慮して、実現する換算風速をリファレンスにしながら、各モード別に加振し、固有値解析によりモード情報（複素モード形、複素固有振動数）を抽出した。状態方程式は、多自由度の振動状況が反映できるように、減衰、剛性に対応する係数マトリクスを密なものとし、E K W G I 法^{4, 5, 6)}で係数同定した。

ステップ2 ステップ1で決めた換算振動数ステップで得られたモード情報を換算振動数で並べなおし、元の非定常空気力定義に基づくフラッター方程式へ逆算した。換算振動数の整合精度は、既往の報告^{4, 5, 7)}とは異なり、実換算振動数で0.1の範囲を許した。なお、非定常空気力の定義式と逆算に用いる式は、正弦波状の変位を仮定しながら変形し、次のものを用いている。

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} D/B \\ L/B \\ M \end{Bmatrix} &= \pi \rho \omega^2 \begin{bmatrix} B^2 & 0 & 0 \\ 0 & B^2 & 0 \\ 0 & 0 & B^t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_d & D_{yI} & D_{\theta I} \\ L_d & L_{yI} & L_{\theta I} \\ M_d & M_{yI} & M_{\theta I} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z}/\omega B \\ \ddot{y}/\omega B \\ \ddot{\theta}/\omega \end{Bmatrix} \\ &+ \begin{Bmatrix} D_{zR} & D_{yR} & D_{\theta R} \\ L_{zR} & L_{yR} & L_{\theta R} \\ M_{zR} & M_{yR} & M_{\theta R} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z}/B \\ \ddot{y}/B \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} \\ &= -\pi \rho [b] \{ i[f_I] + [f_R] \} \begin{Bmatrix} \ddot{z}/B \\ \ddot{y}/B \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} \\ &= [\tilde{F}] \begin{Bmatrix} \ddot{z}/B \\ \ddot{y}/B \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} \\ [\tilde{F}] &= [M] \\ &+ [C] \{ \phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3 \} \begin{bmatrix} 1/\omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\omega_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\omega_3 \end{bmatrix} \{ \phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3 \}^{-1} \\ &+ [K] \{ \phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3 \} \begin{bmatrix} 1/\omega_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\omega_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\omega_3^2 \end{bmatrix} \{ \phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3 \}^{-1} \end{aligned}$$

ここで、D, L, Mは非定常空気力の抗力、揚力、空力モーメント、z, y, θ は水平方向変位、鉛直方向変位、回

転変位を示す。Bは全幅、 ρ は空気密度である。[b]は第1式のBの係数マトリクス、 $[f]_1, [f]_2$ は第1式にある速度同相成分、変位同相成分の非定常空気力係数マトリクスを示す。[M], [C], [K]はバネ支持系の運動方程式を構成する質量マトリクス、減衰マトリクス、剛性マトリクスである。 ϕ_j, ω_j はj次モードの複素モード形、複素固有振動数である。

3. 非定常空気力の抽出

3. 1 実験条件

実験に使用したトラス桁模型は2000m級トラス補剛吊橋の設計案の一つであり、水平方向にもバネを挿入し水平まげ、鉛直まげ、ねじれの3次元振動を実現した〔参考文献5と同様〕。バネの剛性中心はトラス桁の剛性中心位置とし、重心は、模型の構造上生じる振動連成考慮上の煩雑さをさけるために剛性中心と一致させた。実験は再現性を確認するために、同じ模型—バネ系を使用し余り変わらない2種類の条件（表—1）で実施した。以下それぞれの結果を諸元1の結果、諸元2の結果として議論を加える。解析結果を図—1に抗力、図—2に揚力、図—3に空力モーメントのそれぞれ非定常空気力係数をしめす。ここで示す測定結果は迎角0度のものである。図中には空力的にはほぼ同一なトラス補剛桁について測定された強制振動法による非定常空気力係数をあわせ示している。

表—1 実験条件の違い

	諸元1	諸元2
模型長 (m)	1.25	1.25
模型幅 (m)	0.355	0.355
鉛直方向質量 (kg/m)	4.51	3.90
水平方向質量 (kg/m)	4.18	4.07
極慣性モーメント ($\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{m}$)	0.100	0.110
固有振動数 (Hz)		
鉛直曲げ	1.37	1.36
ねじれ	3.01	2.90
水平曲げ	1.10	1.10
構造対数減衰率		
鉛直曲げ	0.030	0.040
ねじれ	0.007	0.009
水平曲げ	0.009	0.013

3. 2 実験間での比較

一般的には諸元1、諸元2のケース共に特にまとまりは悪くはなく、各係数の換算風速に対する変化が見て取れる。これらの中で、推定結果に、 $L_{\theta R}, M_{yR}$ に多少の違いが現れ、 $D_{\theta R}$ では顕著な食い違いが見られる。前者については測定データのばらつきの範囲とも見られるが、後者については意味のある差と捉えるべきであろう。影響する要因はいくつか考えられる。例えば、実験実施の過程で静的な風力により姿勢変化が生じるが、この補正が必ずしも同

一ではないことや、振動発散減衰の状況が正弦波状の応答仮定と食い違うこと等が考えられるが、影響の顕著に現れるのは1係数のみであり、実験諸元に大きな差はないこと、換算風速によらず差が生じていることを考慮すると、具体的に $D_{\theta R}$ に値全体をシフトさせるような影響を与える因子は不明であり、今後解明すべき点の一つとなる。

3. 3 強制振動法データとの比較

図中に併記した類似トラス桁の強制振動法の結果および不足分は準定常理論による推定値との整合は、いくつかの係数、例えば $L_{\theta R}, M_{\theta R}, M_{yR}$ で多少の食い違いは生じているがおおむね良好である。ただし、 $D_{\theta R}$ と M_{yR} についての食い違いは大きく目立つ。これは非定常空気力測定手法としての精度議論上を大きな点の一つになる。

4. 全橋振動応答に与える影響

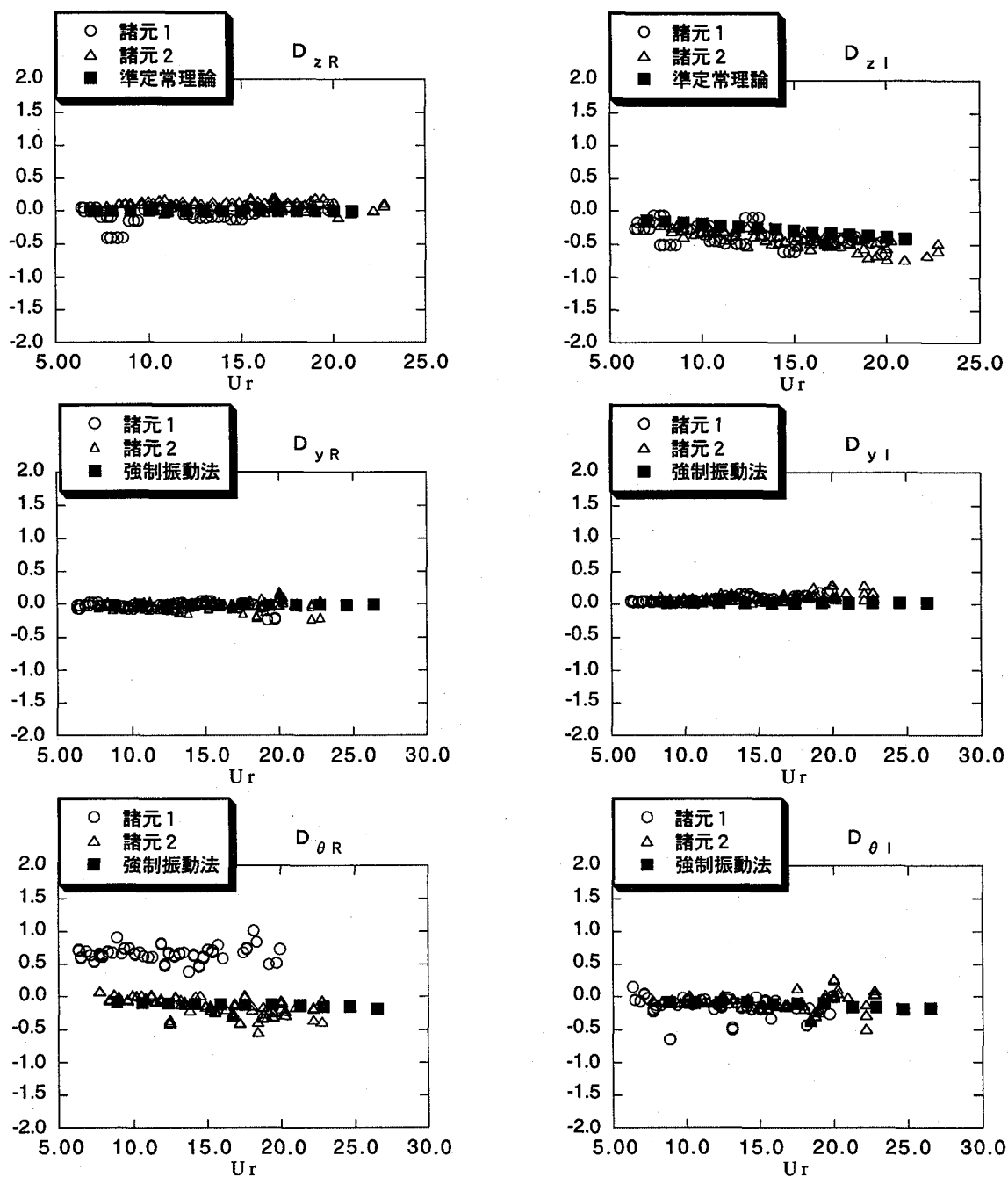
前章で見た抽出された非定常空気力係数の影響を調べるために明石海峡大橋と同レベルの吊橋モデルに、測定された非定常空気力を当てはめ影響を調べた。解析は解析対象とするモードを3次元骨組みモデルで風速領域内で直接追跡するモードトレース法を適用した。非定常空気力係数の影響を調べることが目的であるために、風速増加に伴う静的変形は考慮していない。解析に用いた構造モデルの主要諸元は表—2の通りである。

表—2 解析に用いた構造モデル主要諸元

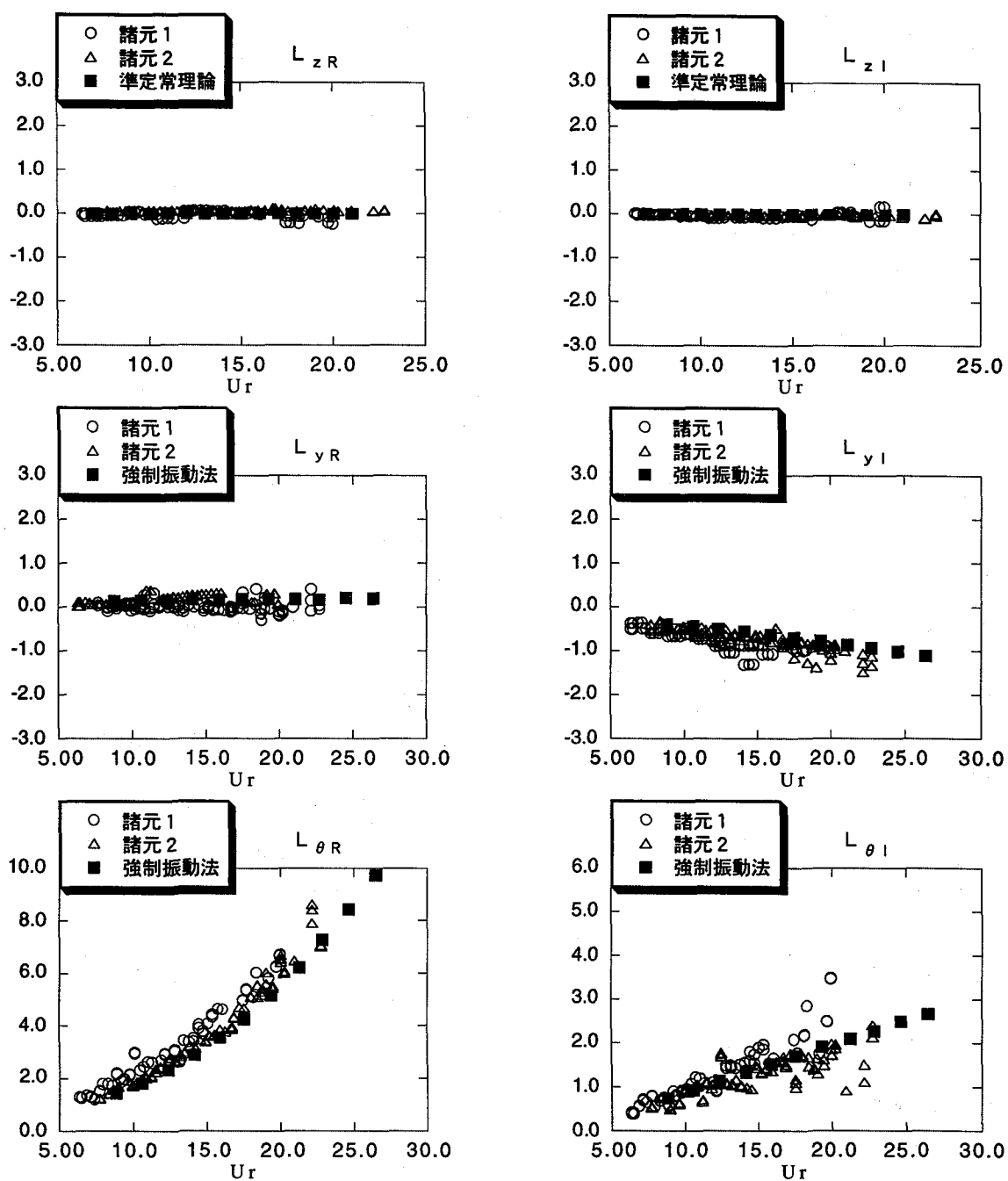
支間割り (m)		960 + 1,990 + 960
桁幅 [ケーブル間隔] (m)		35.5
桁高 (m)		14.0
ケーブル	サグ [サグ比] (m)	200.3 [1 : 10]
	断面積 (m^2)	0.7882
	ヤング率 ($\text{tf m}^2/\text{m}$)	2.03×10^7
死荷重	吊構造部 (t/m)	28.9
	ケーブル関係 (t/m)	14.26
吊構造部極慣性モーメント ($\text{tf m}^2/\text{m}$)		5883
桁の剛性	断面積 (m^2)	0.4896
	鉛直剛性 (m^4)	23.990
	ねじれ剛性 (m^4)	154.25
	水平剛性 (m^4)	18.407

図—4, 5に計測された非定常空気力と図中の強制振動法による非定常空気力を与えた場合の風速減衰率と振動数の関係を示す。振動数の変化見ると諸元1のケースと強制振動法のケースで類似であり、諸元2の場合には異なる。一方で、フラッター限界風速の観点からは、諸元1のケースと諸元2のケースは当然ながら同等、強制振動法ではより低い限界風速を推定することを示している。したがって、風速—減衰率の関係は納得できる傾向にあるが、それでは振動数の変化の状況を説明できないこととなる。

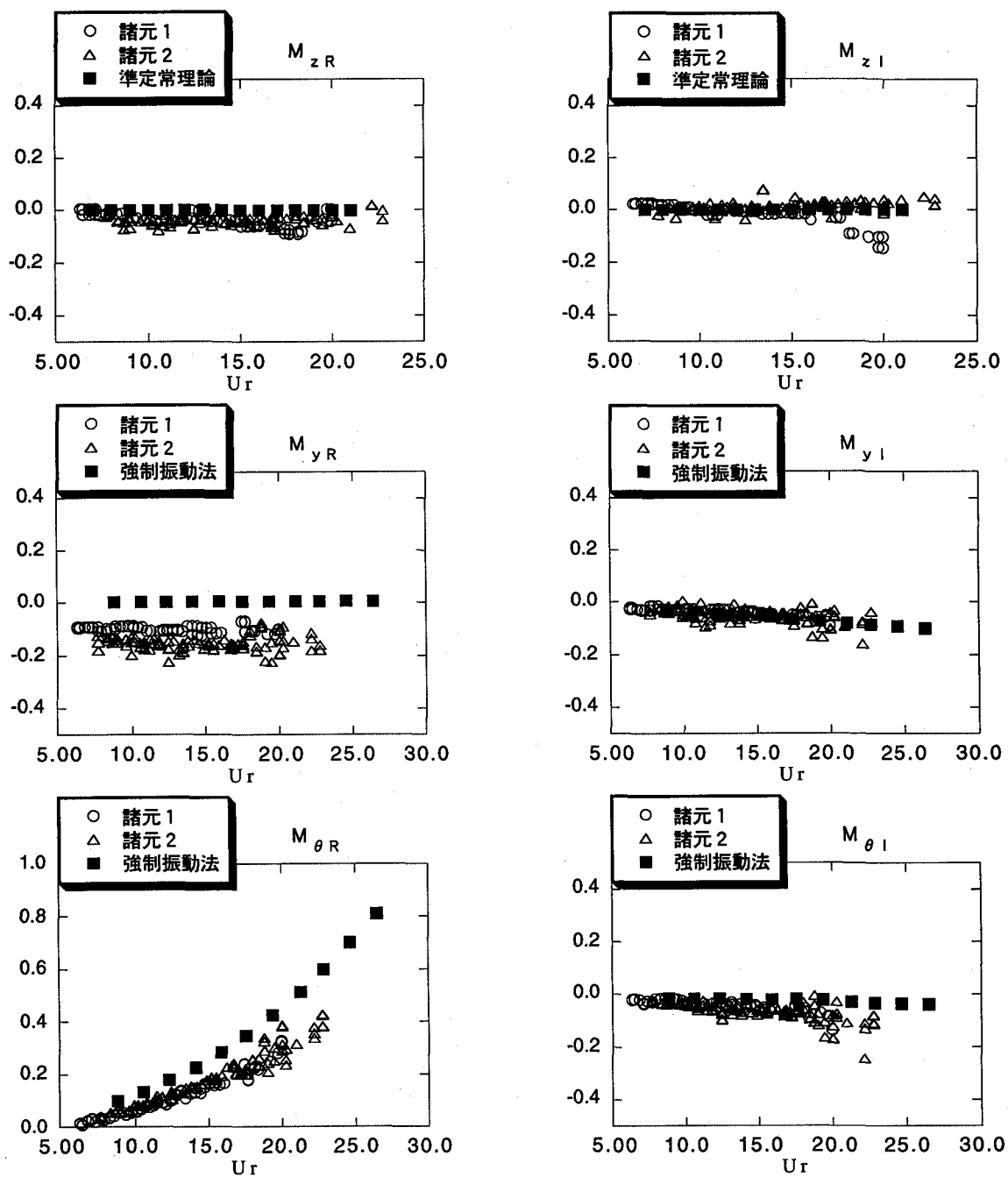
図—6については諸元—1に対し、図—7, 8, 9に諸



図一 1 抽出された非定常空気力一抗力係数

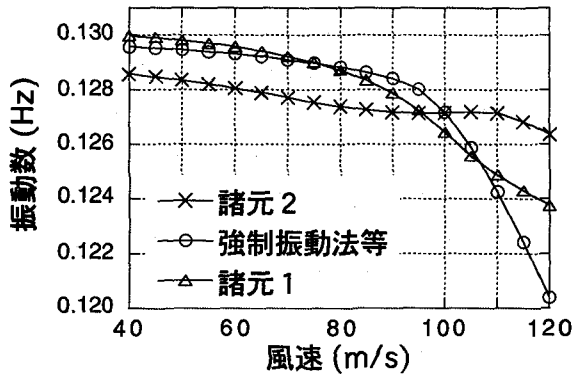


図一 2 抽出された非定常空気力一揚力係数



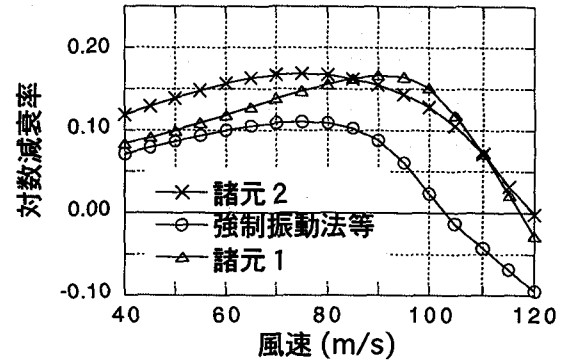
図一三 抽出された非定常空力ー空力モーメント係数

U-f 図：3条件間の比較

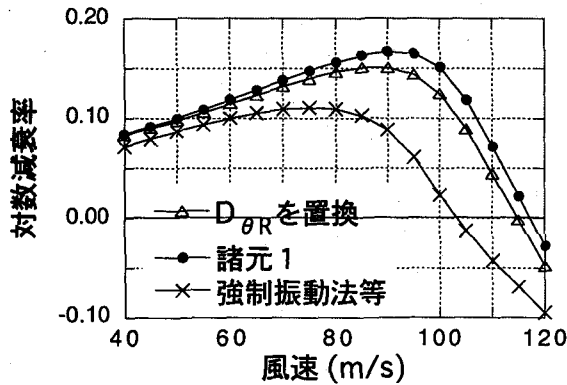


図一4 3種類の非定常空気力による応答振動数の変化

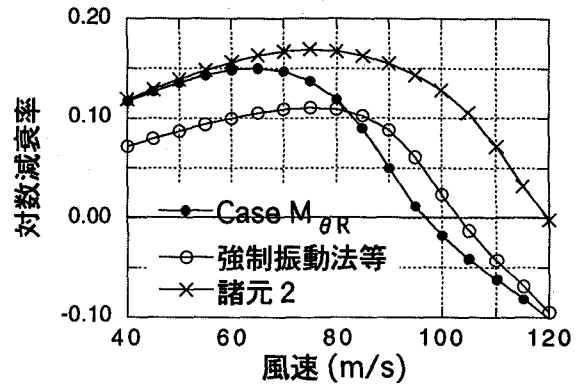
U- δ 図：3条件間の比較



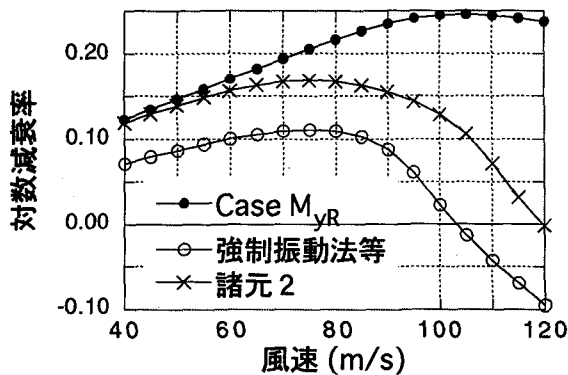
図一5 3種類の非定常空気力による応答減衰率の変化



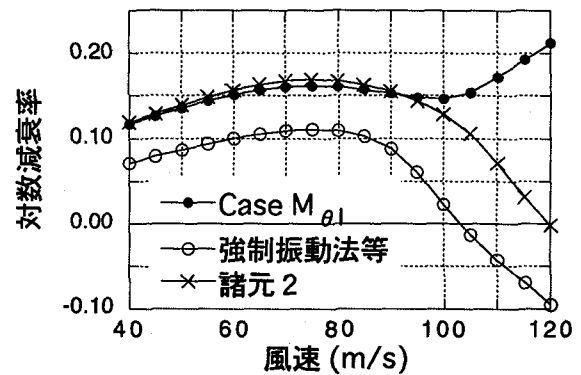
図一6 諸元1のケースに $D_{\theta R}$ を置き換えた場合



図一7 諸元2のケースに $M_{\theta R}$ を置き換えた場合



図一8 諸元2のケースに M_{yR} を置き換えた場合



図一9 諸元2のケースに $M_{\theta I}$ を置き換えた場合

元一2のケースについて疑わしい係数1つを強制振動法による測定値と置き換えた影響を風速減衰率の関係で示す。測定値を解析に用いる際に関数近似を用いているが、その近似状況にも振動応答の変化の状況に依存しているようにも見える。しかしながら、図に示した各係数の影響は決して小さくないレベルに現れている。また、変化の状況も場合に応じているように見え、分析にはより精度の高い非定常空気力に関する議論が必要になる。つまり、振動応答を詳細に議論する際には非定常空気力測定に非常に高い精度が要求されること、係数によっては影響が少ないものもあることから影響度合いを考慮して、強制振動法の測定状況も含めて、複数の角度から議論することが大きな課題であることを示唆している。

5. まとめ

トラス補剛桁を用いて3次元非定常空気力測定を実施した。強制振動法と比較できるレベルの結果を得た。測定された非定常空気力係数を2000m級吊橋の構造モデルに当てはめ、振動応答に与える影響を調べた。その結果、次のことが分かった。

1) 非定常空気力の精度の議論は長大橋梁の応答検討実施の上で必須のことであるが、係数自体の議論にとどまらず、目的とする橋梁系の応答を考慮して議論すべきである。

2) MDR法では、測定条件によっては係数全体が平行移動する様な特性が現れることがある。信頼性を向上させるためには、この解明が課題となる。

3) MDR法と強制振動法の非定常空気力は類似断面のものであり直接比較が難しいが、微妙に異なる部分、はっきり違いが現れる部分があり、精度議論と関係する大きなポイントになりそうである。

謝辞

本研究の一部は本州四国連絡橋公団より援助およびデー

タの提供を受けている。ここに深謝する。

参考文献

- 1) P.P. Sarkar, N.P. Jones and R.H. Scanlan, Identification of aeroelastic parameters of flexible bridges, EM ASCE, Vol. 120 No. 8, August 1994.
- 2) J.B. Jakobsen, fluctuating wind load and response of a line-like engineering structure with emphasis on motion-induced wind forces, Ph.D. thesis of the Norwegian Institute of Technology in Trondheim, 1995.
- 3) Febrin Anas Ismail, Toshio Miyata and Hitoshi Yamada: Identification of aeroelastic parameters by MITD method, 第52回土木学会年次学術講演会概要集, I-B76, pp.152-153, Sep.1997.
- 4) 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
- 5) 山田 均, 宮田 利雄: モード分解再構成法による三次元非定常空気力係数測定に関する研究, 土木学会論文集, No.543 /I-36, pp.209-216, 1996.
- 6) 星谷 勝, 齊藤 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, 土木学会論文集, No.339, pp.59-67, 1983.
- 7) 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13回風工学シンポジウム論文集, 1996.
- 8) Nguyen Ngoc Dung, Toshio Miyata, Hitoshi Yamada, Nguyen Nguyen Minh, Flutter responses in long span bridge with wind induced displacement by the mode tracing method, Proceedings of the 8th US National Conference on Wind Engineering, Baltimore, June 1997.

(1997年9月26日受付)