

モノデュオ形式吊橋の連成フラッター特性を支配する空気力成分について

Compound Flutter Analyses of Mono-duo Type Suspension Bridges Emphasizing on the Variation of Aerodynamic Forces Acting on the Deck

米田昌弘*, 和田謙司**

Masahiro YONEDA* and Jyoji WADA**

* 工博 近畿大学助教授 理工学部土木工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

** 工修 株式会社 アルス製作所工事部工事課 (〒770-0004 徳島市南田宮 1-1-62)

A series of direct flutter FEM analyses were carried out for a 2,500m super long span suspension bridge with mono-duo cable system. The purpose of this study was to investigate the reason why greatly reduced compound flutter speed was observed when measured aerodynamic forces were used for this type of bridge. Measured aerodynamic forces, some of which were replaced by Theodorsen's aerodynamic forces on the flat plate, were used for the flutter analysis. Analytical results showed that the compound flutter speed for the mono-duo type bridge was strongly dependent on the aerodynamic derivative of $M_{\dot{\alpha}}$.

Key Words : mono duo type suspension bridge, direct flutter analysis, compound flutter speed

キーワード : モノデュオ形式, フラッター解析, フラッター風速

1. まえがき

連成フラッター解析にあたっては、対象とした桁断面の非定常空気力係数(風洞実験での測定値)を使用するのが理想である。しかしながら、測定空気力を使用するためには、それに先立ち、多大な労力と費用を要する風洞実験(非定常空気力試験)を実施しなければならない。したがって、各種ケーブルシステムの定性的なフラッター特性把握を目的とした従来の連成フラッター解析では、理論的に導かれた平板翼に作用する空気力(平板空気力)を用いる場合が多かった。これには、平板空気力が扁平箱桁断面の測定空気力と大きく相違しないことに加え、他の研究者と外力の統一を図れることなども採用の背景となっている。また、実際、従来形式(中央支間長 2,500m, 支間長比 0.5 の超長大吊橋)では、平板空気力および測定空気力を用いた場合のフラッター風速は、それぞれ $V_F = 60\text{m/s}$, $V_F = 56\text{m/s}$ と両者は概ね等しい結果を与えることも明らかになっている。

ところが、著者の一人がモノデュオ形式(2本のメインケーブルを主塔付近で1本に束ねるような形式)について連成フラッター解析を実施したところ、測定空気力を用いた場合には平板空気力を用いた場合と比較してかなり低い風速域で連成フラッ

ターが発現するという現象が認められた¹⁾。このような連成フラッター風速の大幅な低下現象は、クロスステイ方式(細いケーブル部材などで吊橋の主桁とメインケーブルをクロスさせるように結ぶ方式)においても同様に認められる現象である²⁾。それゆえ、新しいケーブルシステムでは、空気力が若干変化するだけで連成フラッター風速が大幅に変化する場合があることに十分な注意を払う必要があるが、モノデュオ形式をはじめとしてフラッター風速が大幅に変化する理由については今までのところ十分な説明はなされていない。

そこで、本研究では、中央支間長が 2,500m(支間長比は 0.5)のモノデュオ形式ならびにモノデュオ形式との対比を目的とした従来形式について、平板空気力成分の一部を対応する測定空気力成分に置換した場合の連成フラッター解析を実施し、モノデュオ形式吊橋の連成フラッター特性を支配する空気力成分について考察を行った。その結果、フラッター発生時の仕事量からは連成フラッターの発現に最も大きな寄与を及ぼす空気力係数を評価できないこと、モノデュオ形式吊橋の連成フラッター風速を大きく支配する空気力成分は $M_{\dot{\alpha}}$ 成分(ねじれ振動にともなって生じる空力モーメントの虚部)であること、従来形式においても非定常空気力の $M_{\dot{\alpha}}$ 成分が連成フラッター特性に大きく関与することなどが判

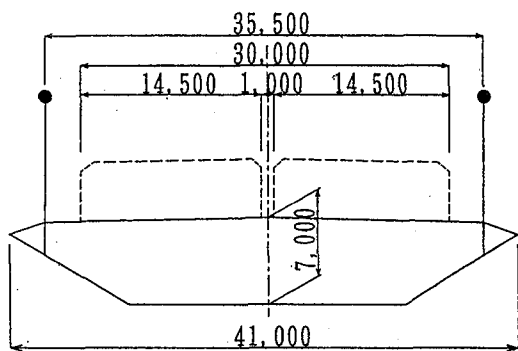


図-1 対象橋梁の桁断面

明したことから、ここにその具体的な検討結果を報告する。

2. 対象とした超長大吊橋

(1) 対象橋梁

本研究で対象としたモノデュオ形式と従来形式¹⁾は、それぞれ図-1に示すような同一の桁断面を有する中央支間長 2,500m（支間長比は 0.5）の超長大吊橋である。モノデュオ形式のメインケーブル間隔は中央径間中央で 35.5m、主塔近傍で 8m となるように変化させている。一方、従来形式のメインケーブル間隔は一定で 35.5m となっている。対象としたモノデュオ形式と従来形式の基本諸元は同一で、表-1に示す値を仮定した。表-1からわかるように、本橋では使用鋼重量の低減を図ってより経済的な超長大吊橋が実現できるよう、ケーブルのサグ比を 1/9 とし、ケーブルの許容応力度も明石海峡大橋の 804.4kN/mm² (82kgf/mm²) から 981kN/mm² (100kgf/mm²) に変更している。

(2) 連成フラッター特性

本研究では図-2に示すような中央径間を 20 等分、側径間を 10 等分したモデルに対して、直接法による立体骨組みフラッター解析³⁾を実施した。連成フラッター解析に用いる非定常空気力は、平板空気力（平板翼の非定常揚力と非定常空力モーメント）および図-1の桁断面に対する測定空気力（水平な一様流中の風洞実験から算出した測定空気力）²⁾である。また、桁とケーブルの横たわみ振動に伴う抗力とケーブルの鉛直たわみ振動に伴う揚力（桁の抗力係数は $C_D = 0.75$ 、ケーブルの抗力係数は $C_{DC} = 0.7$ と仮定）も考慮するものとしたが、有風時における横たわみの影響については無視するものとした。これは、有風時における横たわみを考慮した場合、静的ねじれ変形量に対応して非定

表-1 対象橋梁の基本諸元

項目		構造諸量
中央支間長		2,500m
支間長比		0.5
ケーブル	サグ比	1/9
	間隔（従来）	35.5 m
	間隔（モノデュオ）	8.0m～35.5 m
	有効断面積	2×0.6=1.2 m ² /Br.
	許容応力度	981N/mm ² (100 kgf/mm ²)
補剛桁	総幅	41 m
	桁高	7 m
	断面 2 次モーメント	鉛直 12 m ⁴ /Br.
		水平 160 m ⁴ /Br.
	ねじり定数	26 m ⁴ /Br.
死荷重	吊構造部	235.44 kN/m/Br. (24 tonf/m/Br.)
	ケーブル	107.91 kN/m/Br. (11 tonf/m/Br.)
	合計	343.35 kN/m/Br. (35 tonf/m/Br.)
吊構造部重量慣性モーメント		32,373 kN·m ² /m/Br. (3,300 tonf·m ² /m/Br.)
ハンガー断面積		0.03m ² / 125m / Cable.

常空気力係数を変化させる必要が生じ、連成フラッター特性を支配する空気力成分の特定が困難になると考えたことによる。

なお、トラス形式吊橋を対象とした場合、非定常抗力 D が連成フラッター特性に少なからず影響を及ぼすことが知られている。しかしながら、本研究で対象とした流線型箱桁形式吊橋では、桁高が低いことから、連成フラッター特性に及ぼす非定常抗力 D の寄与は非常に小さく、その影響を無視しても差し支えないことを述べておく。参考までに、非定常揚力 L と非定常空力モーメント M をそれぞれ、

$$\begin{Bmatrix} L \\ M \end{Bmatrix} = -\pi b^2 \begin{bmatrix} L_{yR} + L_{yI}i & L_{\phi R} + L_{\phi I}i \\ M_{yR} + M_{yI}i & M_{\phi R} + M_{\phi I}i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\phi} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 ρ ；空気密度

b ；橋桁の半幅

$\ddot{y}$ ；鉛直たわみの加速度振幅

$\ddot{\phi}$ ；ねじれの加速度振幅

i ；虚数単位

で定義した場合の L_{yR} , L_{yI} , $L_{\phi R}$, $L_{\phi I}$, M_{yR} , M_{yI} , $M_{\phi R}$, $M_{\phi I}$ を、換算風速 V/fB (V ；風速, f ；振動数, B ；橋幅) を横軸として図-3にまとめる。

平板空気力と測定空気力を使用した連成フラッタ

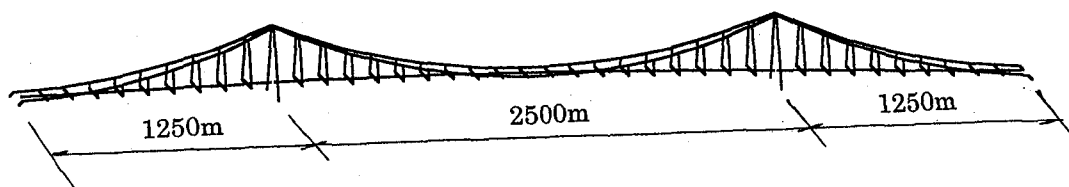


図-2 解析モデル (モノデュオ形式)

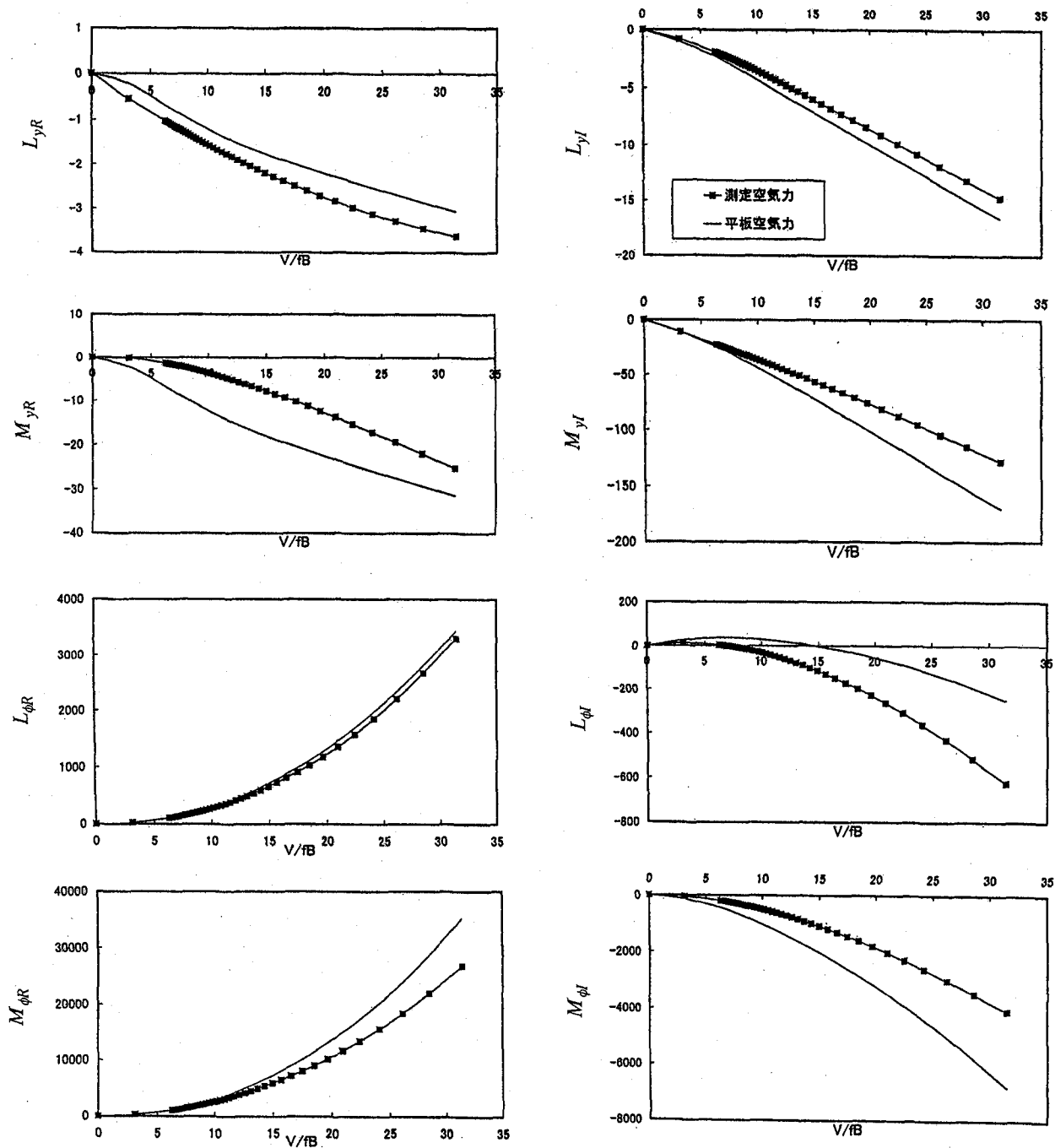


図-3 非定常揚力 L と非定常空力モーメント M

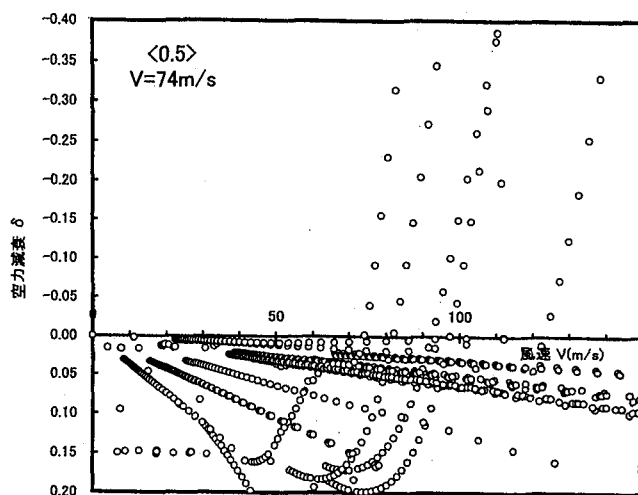


図-4 モノデュオ形式のV- δ 曲線
(平板空気をういた場合)

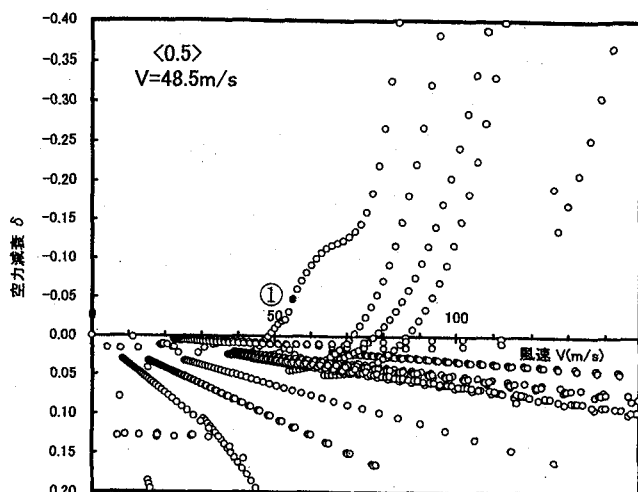


図-5 モノデュオ形式のV- δ 曲線
(測定空気をういた場合)

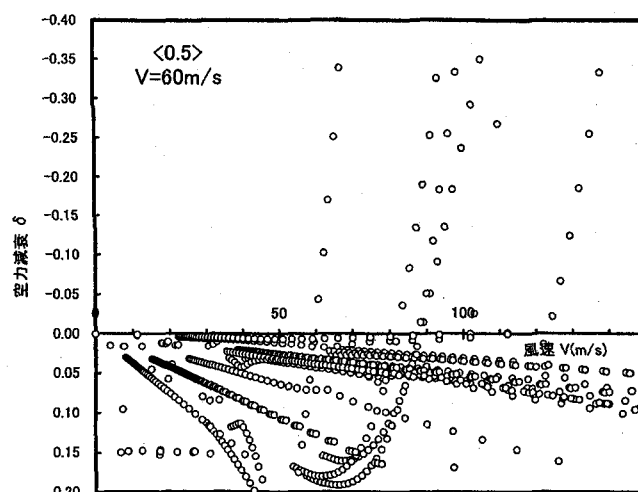


図-6 従来形式のV- δ 曲線
(平板空気をういた場合)

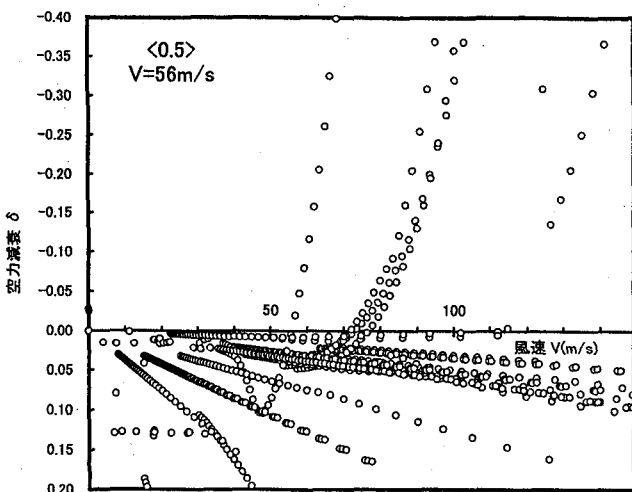


図-7 従来形式のV- δ 曲線
(測定空気をういた場合)

一解析で得られた、モノデュオ形式のV- δ 曲線(風速と空力減衰の関係)をそれぞれ図-4、図-5に示す。これらの図からわかるように、モノデュオ形式では、平板空気をういた場合のフラッター風速が $V_F = 74\text{m/s}$ であるのに対し、測定空気をういた場合には $V_F = 48.5\text{m/s}$ まで大幅に低下する結果となっている。参考までに、従来形式では、図-6、図-7に示すように、平板空気および測定空気をういた場合のフラッター風速はそれぞれ $V_F = 60\text{m/s}$ 、 $V_F = 56\text{m/s}$ と両者は概ね等しい結果を与える。

3. 空気がなす仕事量

主桁に作用する非定常揚力 L と非定常空力モーメント M を式(1)で表示した場合、連成振動する主桁

に対して揚力と空力モーメントがそれぞれなす仕事 W_L 、 W_M は、文献4)にしたがって、以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} W_L &= \oint L_R dy_R \\ &= \rho \pi b^2 \omega^2 \{ y_0^2 L_{yI} - (L_{\phi R} \sin \theta - L_{\phi I} \cos \theta) y_0 \phi_0 \} \\ &= \rho \pi b^2 \omega^2 y_0^2 L_{yI} - \rho \pi b^2 \omega^2 L_{\phi R} \sin \theta y_0 \phi_0 \\ &\quad + \rho \pi b^2 \omega^2 L_{\phi I} \cos \theta y_0 \phi_0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} W_M &= \oint M_R d\phi_R \\ &= \rho \pi b^2 \omega^2 \{ y_0 \phi_0 (M_{yR} \sin \theta + M_{yI} \cos \theta) + \phi_0^2 M_{\phi I} \} \\ &= \rho \pi b^2 \omega^2 y_0 \phi_0 M_{yR} \sin \theta + \rho \pi b^2 \omega^2 y_0 \phi_0 M_{yI} \cos \theta \\ &\quad + \rho \pi b^2 \omega^2 \phi_0^2 M_{\phi I} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 ω は円振動数であり、添え字の R と I はそれぞれ実部、虚部であることを表す。また、 θ は、

$$\theta_y = \tan^{-1}(y_I / y_R) \quad (4)$$

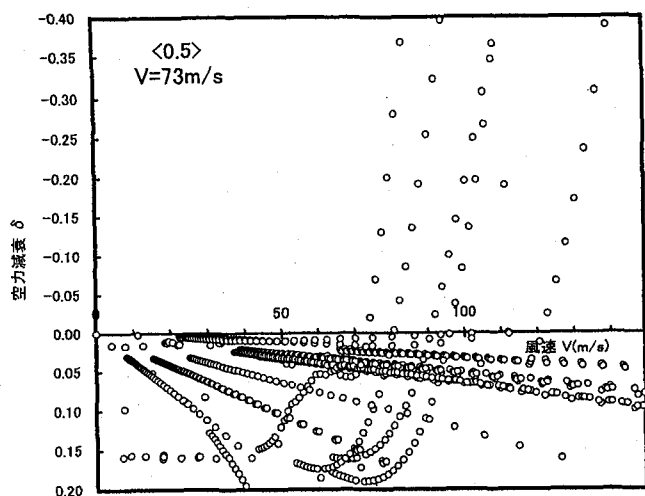


図-8 モノデュオ形式のV- δ 曲線
(L_{yR} だけが測定空気力, その他は平板空気力)

$$\theta_\phi = \tan^{-1}(\phi_I / \phi_R) \quad (5)$$

ただし, y_R, y_I ; 複素モード (鉛直たわみ成分) の実部と虚部

ϕ_R, ϕ_I ; 複素モード (ねじれ成分) の実部と虚部

なる関係式から θ_y, θ_ϕ を算定すれば,

$$\theta = \theta_y - \theta_\phi \quad (6)$$

で与えられる. さらに, y_0 と ϕ_0 はそれぞれ

$$y_0 = \sqrt{y_R^2 + y_I^2} \quad (7)$$

$$\phi_0 = \sqrt{\phi_R^2 + \phi_I^2} \quad (8)$$

なる式でそれぞれ算定すればよい. なお, 本文では, 便宜上, 式(2)の揚力がなす仕事 W_L において, 右辺第1項目 ($= \rho \dot{\kappa} b^2 \omega^2 y_0^2 L_{yI}$) を L_{yI} 成分, 第2項目 ($= -\rho \dot{\kappa} b^2 \omega^2 L_{\phi R} \sin \theta y_0 \phi_0$) を $L_{\phi R}$ 成分, 第3項目 ($= \rho \dot{\kappa} b^2 \omega^2 L_{\phi I} \cos \theta y_0 \phi_0$) を $L_{\phi I}$ 成分と記す. また, 同様に, 式(3)の空力モーメントがなす仕事 W_M において, 右辺第1項目 ($= \rho \dot{\kappa} b^2 \omega^2 y_0 \phi_0 M_{yR} \sin \theta$) を M_{yR} 成分, 第2項目 ($= \rho \dot{\kappa} b^2 \omega^2 y_0 \phi_0 M_{yI} \cos \theta$) を M_{yI} 成分, 第3項目 ($= \rho \dot{\kappa} b^2 \omega^2 \phi_0^2 M_{\phi I}$) を $M_{\phi I}$ 成分と記すこととする.

したがって, 空気力が主桁に対してなす仕事量の総和 W は,

$$W = W_L + W_M \quad (9)$$

となり, この値を主桁の格点について順次求めれば, 吊橋に作用する加振空気力の橋軸方向分布を明らかにすることができる. ただし, 式(2)と式(3)に示した仕事量 W_L, W_M には複素モード振幅の絶対値 y_0 ,

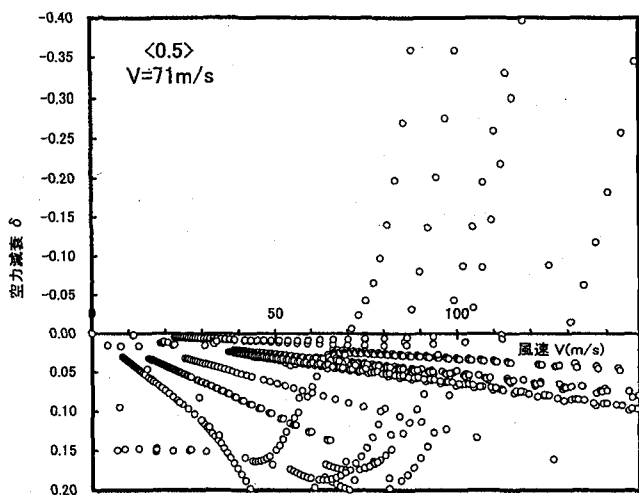


図-9 モノデュオ形式のV- δ 曲線
($M_{\phi R}$ だけが測定空気力, その他は平板空気力)

ϕ_0 が含まれている. そこで, 揚力と空力モーメントがなす仕事量の大きさを直接対比できるように, 本文では鉛直たわみの複素モード振幅の絶対最大値 $y_{\max}$ が

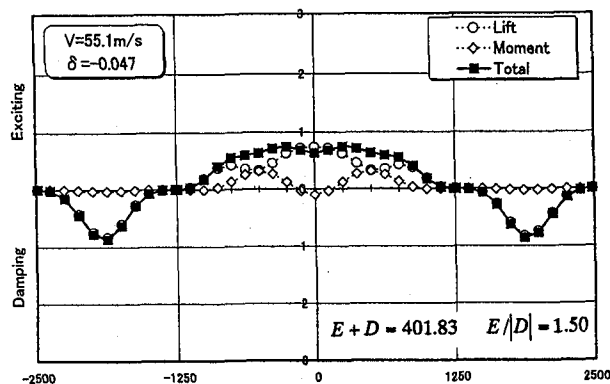
$$y_{\max} = \sqrt{y_R^2 + y_I^2} = 1 \quad (10)$$

となるように, 各質点における鉛直たわみ成分とねじれ成分の複素モードをそれぞれ基準化し, 仕事量を算出するものとした. なお, 厳密には, 式(10)で基準化した複素モード振幅の絶対最大値 $y_{\max}$ は無次元であるが, 揚力と空力モーメントがなす仕事量の次元が等しくなるよう, 本文では $y_{\max}$ の次元を m に設定した.

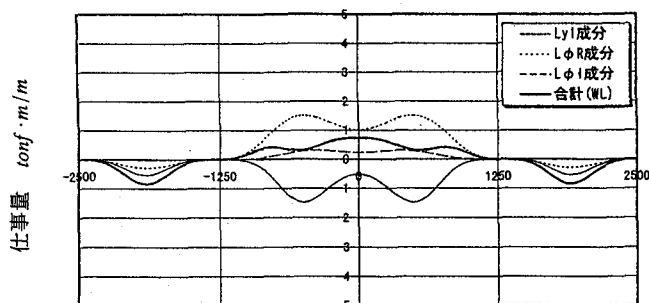
4. モノデュオ方式の連成フラッター特性を支配する非定常空気力係数

(1) L_{yR} 成分と $M_{\phi R}$ 成分の寄与

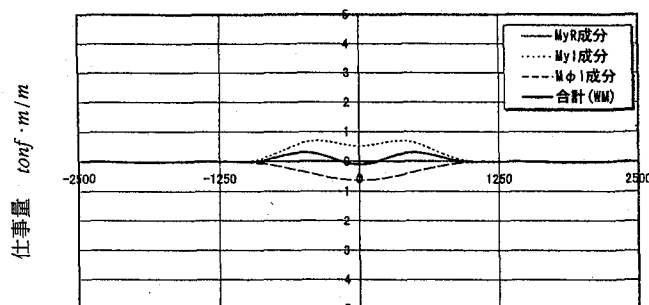
式(2)と式(3)からわかるように, 仕事量に着目した場合, 連成フラッターには, $L_{yI}, L_{\phi R}, L_{\phi I}$ および $M_{yR}, M_{yI}, M_{\phi I}$ の各空気力成分が関与し, L_{yR} と $M_{\phi R}$ の二つの空気力成分はほとんど影響しないと推察される. 本節では, このことを検証するため, モノデュオ方式に対して, 平板空気力を基本空気力に設定し, 測定空気力の $L_{yR}, M_{\phi R}$ をそれぞれ対応する平板空気力成分に置換した場合について連成フラッター解析を実施した. 得られた, V- δ 曲線をそれぞれ図-8, 図-9に示す. これらの図からわかるように, 測定空気力の L_{yR} だけを置換した場合のフラッター風速は $V_F = 73 \text{ m/s}$, 測定空気力の $M_{\phi R}$ だけを置換した場合のフラッター風速は $V_F = 71 \text{ m/s}$ となっており, 平板空気力だけを使用した場合のフラ



(a) 揚力と空力モーメントのなす仕事



(b) 揚力成分のなす仕事



(c) 空力モーメント成分のなす仕事

図-10 測定空気のなす仕事量
(モノデュオ形式, $V=55\text{m/s}$ 付近の連成フラッター)

ッター風速 $V_F = 74\text{m/s}$ と比べ、大きな低下は認められない。すなわち、フラッターの発現風速に対しては、仕事量から推察される通り、 L_{yR} と $M_{\phi R}$ の二つの空気力成分は、それぞれ単独では本質的な影響を及ぼさないとと言える。

(2) L_{yI} , $L_{\phi R}$, $L_{\phi I}$ 成分の寄与

前節の結果を踏まえ、以下では、 L_{yI} , $L_{\phi R}$, $L_{\phi I}$ および M_{yR} , M_{yI} , $M_{\phi I}$ の各空気力成分に着目して、連成フラッター特性に及ぼす影響を調査することとした。まず、図-5に示した $V-\delta$ 曲線（モノデュオ方式で測定空気を作用させた場合）において、

風速 $V=55\text{m/s}$ 付近（24次モードの換算振動数 $k=\omega b/V=0.37$ に対応する風速）の連成フラッター（①の連成フラッター）について測定空気のなす仕事量を計算した。その結果を図-10に示す。図-10から、モノデュオ方式でも、測定空気がなす総仕事（揚力と空力モーメントがそれぞれなす仕事の合計）は、側径間で減衰力、中央径間で励振力を呈していることがわかる。また、従来形式と同じく⁵⁾、空力モーメントのなす仕事量は揚力のなす仕事量と比べて非常に小さく、連成フラッターの発現には揚力成分が大きく関与する結果となっている。

図-10(b)は揚力の各成分がなす仕事量を示したものであるが、この図から、中央径間側において $L_{\phi R}$ 成分と $L_{\phi I}$ 成分が励振力を、 L_{yI} 成分が減衰力を呈していることがわかる。ただし、 $L_{\phi R}$ 成分と $L_{\phi I}$ 成分の励振力を比較した場合、明らかに $L_{\phi R}$ 成分の方が大きくなっている。一方、図-10(c)は空力モーメントの各成分がなす仕事量を示したものである。この図から、空力モーメントの各成分は中央径間側においてのみ仕事を行い、 M_{yI} 成分が励振力を、 $M_{\phi I}$ 成分が減衰力を呈していることがわかる。また、 M_{yR} 成分は、ほとんど寄与していないことも理解できる。一方、 M_{yI} 成分と $M_{\phi I}$ 成分がなす仕事量の絶対値は、 L_{yI} 成分と $L_{\phi R}$ 成分がなす仕事量の絶対値と比べ、明らかに小さい。すなわち、フラッター発現時の仕事量から考察した場合、 $L_{\phi R}$ 成分と L_{yI} 成分が連成フラッター特性に最も大きく寄与するものと推察される。

そこで、モノデュオ方式において、 $L_{\phi R}$ だけが測定空気でその他は平板空気をを用いた場合、 L_{yI} だけが測定空気でその他は平板空気をを用いた場合のそれぞれについて連成フラッター解析を実施した。解析で得られた $V-\delta$ 曲線をそれぞれ図-11, 図-12に示す。これらの図からわかるように、 $L_{\phi R}$ だけを測定空気に置き換えた場合の連成フラッター風速は $V_F = 76\text{m/s}$ 、 L_{yI} だけを測定空気に置き換えた場合の連成フラッター風速は $V_F = 73\text{m/s}$ となっている。なお、結果は省略するが、 $L_{\phi R}$ と L_{yI} が測定空気でその他は平板空気をを用いた場合には $V_F = 75\text{m/s}$ 、 $L_{\phi R}$ と L_{yI} および $L_{\phi I}$ が測定空気でその他は平板空気をを用いた場合には $V_F = 72\text{m/s}$ となり、いずれのケースもすべて平板空気をを用いた場合の結果 ($V_F = 74\text{m/s}$) と概ね等しい風速域で連成フラッターが発現する結果が得られた。すなわち、モノデュオ方式の連成フラッター風速には、フラッター発生時の仕事量で最も寄与の大

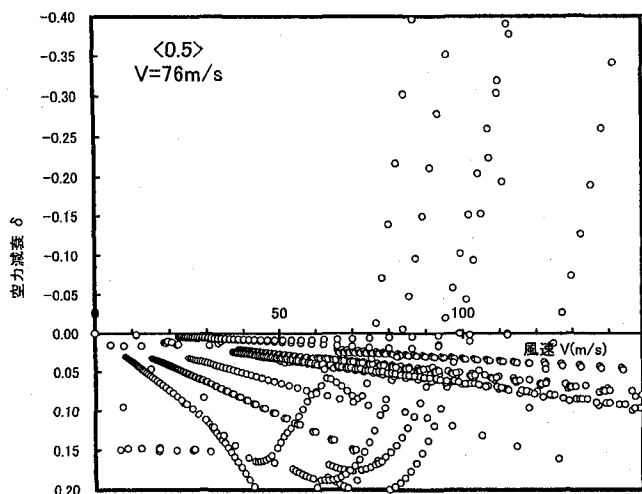


図-11 モノデュオ形式のV- δ 曲線
($L_{\phi R}$ だけが測定空気力, その他は平板空気力)

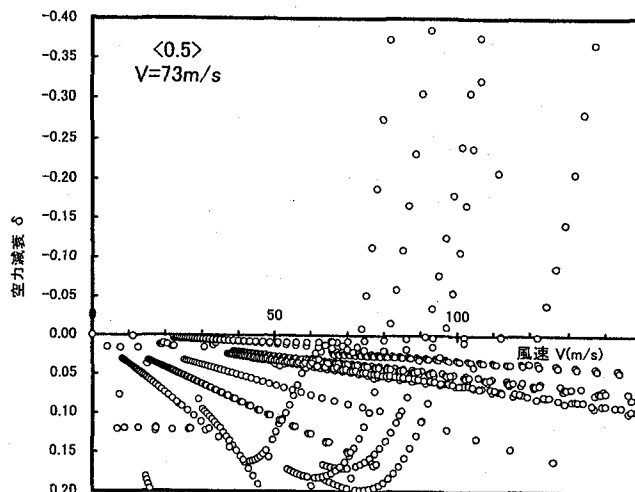


図-12 モノデュオ形式のV- δ 曲線
(L_{yI} だけが測定空気力, その他は平板空気力)

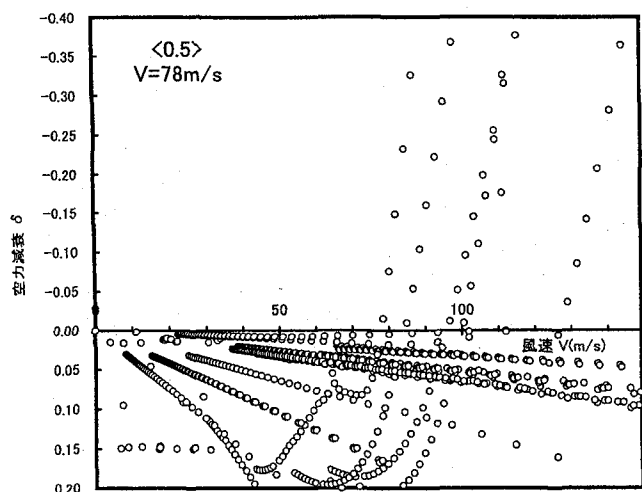


図-13 モノデュオ形式のV- δ 曲線
(M_{yR} だけが測定空気力, その他は平板空気力)

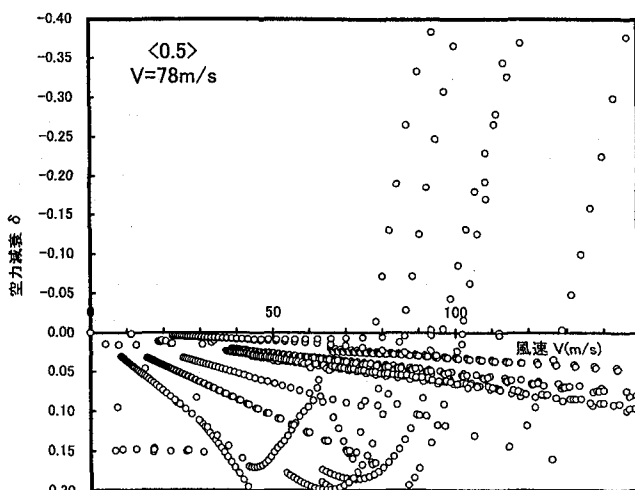


図-14 モノデュオ形式のV- δ 曲線
(M_{yI} だけが測定空気力, その他は平板空気力)

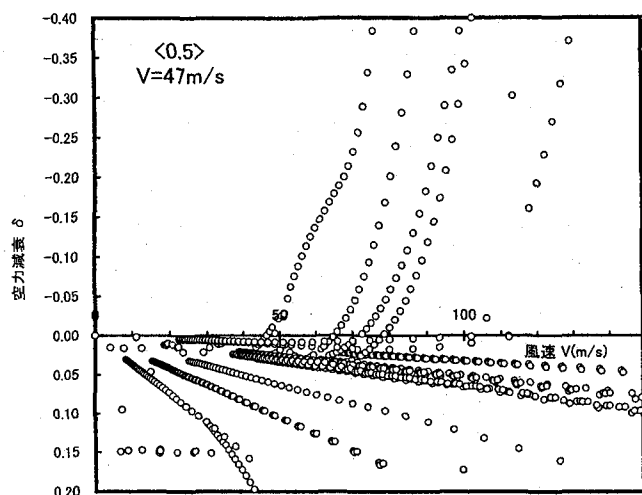


図-15 モノデュオ形式のV- δ 曲線
(M_{ϕ} だけが測定空気力, その他は平板空気力)

きかった $L_{\phi R}$ 成分と L_{yI} 成分はほとんど影響しないという結果が得られた。したがって、フラッター発生時の仕事量からは、連成フラッターの発現に最も大きな寄与を及ぼす空気力係数を評価できないと言える。

(3) M_{yR} , M_{yI} , M_{ϕ} 成分の寄与

上述の検討から、フラッター発生時の仕事量からは、連成フラッターの発現に最も大きな寄与を及ぼす空気力係数を評価できないことがわかった。そこで、空力モーメントの空気力成分 (M_{yR} , M_{yI} , M_{ϕ}) についても着目し、 M_{yR} だけが測定空気力でその他は平板空気力を用いた場合、 M_{yI} だけが測定空気力でその他は平板空気力を用いた場合、および、 M_{ϕ} だけが測定空気力でその他は平板空気力を用い

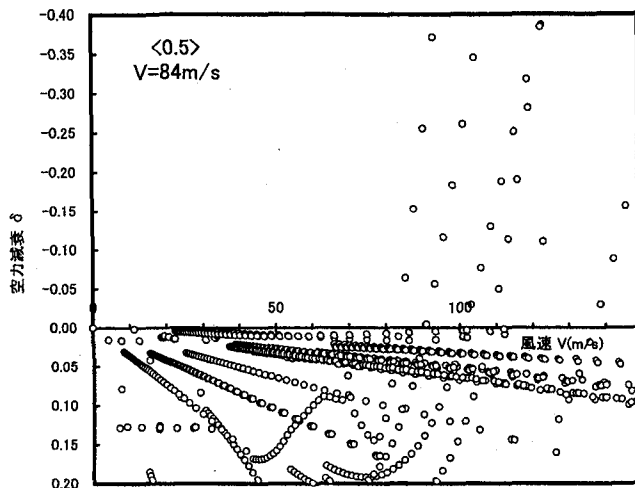


図-16 モノデュオ形式のV- δ 曲線
(M_{ϕ} だけが平板空気力, その他は測定空気力)

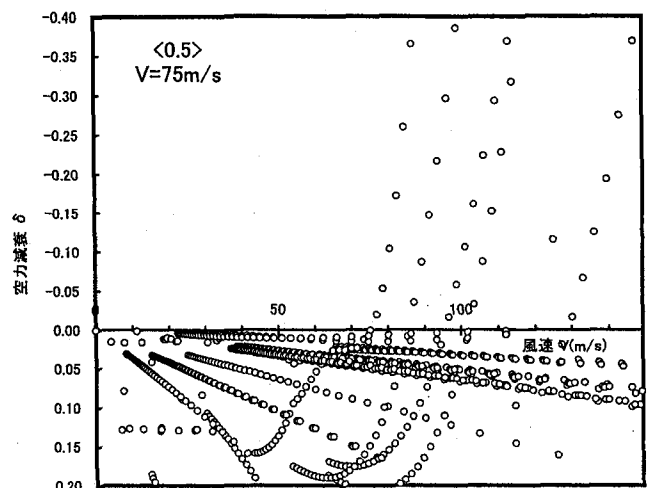


図-17 モノデュオ形式のV- δ 曲線
(M_{ϕ} と M_{yI} が平板空気力, その他は測定空気力)

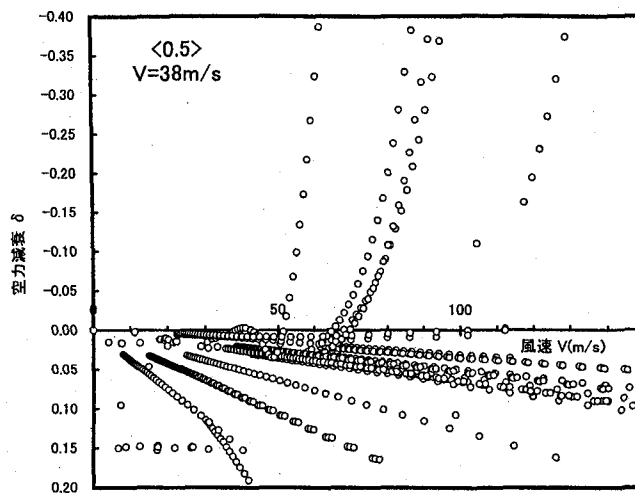


図-18 従来形式のV- δ 曲線
(M_{ϕ} だけが測定空気力, その他は平板空気力)

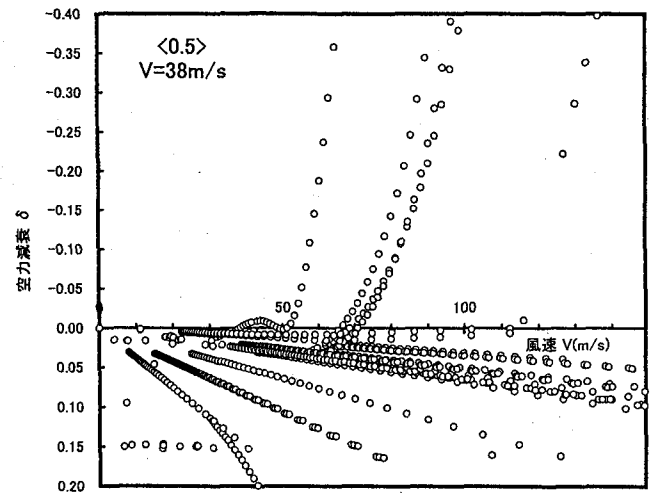


図-19 従来形式のV- δ 曲線
(M_{ϕ} と $M_{\phi R}$ が測定空気力, その他は平板空気力)

た場合のそれぞれについて連成フラッター解析を実施した。解析で得られたV- δ 曲線をそれぞれ図-13～図-15に示す。これらの図からわかるように、 M_{yR} だけを測定空気力に置き換えた場合の連成フラッター風速は $V_F = 78\text{m/s}$ 、 M_{yI} だけを測定空気力に置き換えた場合の連成フラッター風速は $V_F = 78\text{m/s}$ となっており、連成フラッター風速の大幅な低下は認められない。これに対し、 M_{ϕ} だけを測定空気力に置き換えた場合の連成フラッター風速は $V_F = 47\text{m/s}$ となっており、平板空気力のみを適用した場合の連成フラッター風速である $V_F = 74\text{m/s}$ を大きく下回る結果（すべて測定空気力を適用した場合の連成フラッター風速である $V_F = 48.5\text{m/s}$ と概ね等しい結果）が得られた。すなわち、測定空気力を

用いた場合のモノデュオ方式吊橋において、平板空気力を用いた場合と比較してかなり低い風速域で連成フラッターが発現した現象には、非定常空気力の M_{ϕ} 成分が大きく関与していると言える。

以上の検討は、平板空気力を基本空気力に選定した場合の検討であったが、補足的に、測定空気力成分の一部を対応する平板空気力成分に置換した場合（測定空気力を基本空気力に選定した場合）についても連成フラッターを実施した。その結果、 M_{ϕ} 成分を除く他の非定常空気力を置換しても連成フラッター風速の上昇は認められなかったが、 M_{ϕ} のみを置換した場合（平板空気力の M_{ϕ} を用いた場合）にはフラッター風速が図-16からわかるように $V_F = 84\text{m/s}$ まで上昇した。また、平板空気力の M_{ϕ}

と M_{yI} を置換した場合には、フラッター風速は図-17 からわかるように $V_F = 75\text{m/s}$ となり、平板空気力をすべて用いた場合のフラッター風速である $V_F = 74\text{m/s}$ に概ね一致する結果となった。すなわち、測定空気力を基本空気力に選定した検討からも、連成フラッターには、同様に $M_{\phi I}$ 成分が大きく関与する結果が得られたことを付記しておく。

5. 従来形式に及ぼす $M_{\phi I}$ 成分の影響

従来形式では、すでに示した図-6、図-7 からわかるように、平板空気力をを用いた場合のフラッター風速が $V_F = 60\text{m/s}$ 、測定空気力をを用いた場合のフラッター風速が $V_F = 56\text{m/s}$ と両者は概ね等しい結果を与える。しかしながら、モノデュオ方式に対する検討から、連成フラッターの発現には非定常空気力の $M_{\phi I}$ 成分が大きく関与することがわかったことから、従来形式についても連成フラッター特性に及ぼす $M_{\phi I}$ 成分の影響を検討することとした。

平板空気力を基本空気力に設定し、測定空気力の $M_{\phi I}$ 成分だけを対応する平板空気力成分に置換した場合に得られた $V-\delta$ 曲線を図-18 に示す。図-6 と図-18 を比較すれば、従来形式においても非定常空気力の $M_{\phi I}$ 成分が連成フラッター特性に大きく関与していることがわかる。すなわち、測定空気力の $M_{\phi I}$ を置換した場合、 $38\text{m/s} \sim 42\text{m/s}$ の風速域で励振力の非常に弱い不安定振動が出現した後、 51m/s の風速から連成フラッターが発現する結果となっている。なお、測定空気力の $M_{\phi R}$ のみを置換した場合には、連成フラッター特性に大きな変化は認められなかったが、測定空気力の $M_{\phi I}$ と $M_{\phi R}$ を置換した場合には、 $M_{\phi R}$ の微妙な影響で、図-19 に示した $V-\delta$ 曲線からわかるように、構造減衰を無視すれば、連成フラッターは 38m/s から発現する結果となった。

モノデュオ方式の連成フラッター風速は、平板空気力をを用いた場合が $V_F = 74\text{m/s}$ 、測定空気力をを用いた場合が $V_F = 48.5\text{m/s}$ であり、測定空気力を適用した場合には $48.5\text{m/s}/74\text{m/s}=0.655$ まで連成フラッター風速が低下する。一方、従来形式について、測定空気力の $M_{\phi I}$ と $M_{\phi R}$ を置換した場合の結果に着目すれば、モノデュオ方式とほぼ同程度の $38\text{m/s}/60\text{m/s}=0.633$ まで連成フラッター風速が低下する。すなわち、従来方式でも、測定空気力をを用いた場合、 $M_{\phi I}$ 成分の寄与でフラッター風速が大きく低下する可能性を潜在的に秘めていると言える。このことは、非定常空気力の測定精度とも関係するが、

超長大吊橋の耐風検討を実施する上で、きわめて重要な知見であると考えられる。

6. まとめ

本文は、中央支間長が $2,500\text{m}$ （支間長比は 0.5 ）のモノデュオ形式と従来形式を対象として、平板空気力の各成分を測定空気力の各成分に置換して連成フラッター解析を実施し、測定空気力を作用させたモノデュオ形式において連成フラッター風速が大幅に低下した空気力成分について考察を行ったものである。得られた主要な結果を以下にまとめる。

(1) モノデュオ方式で測定空気力を作用させた場合の $V-\delta$ 曲線において、 $V=55\text{m/s}$ 付近の風速に対応する連成フラッターについて空気力のなす仕事量を計算した。その結果、モノデュオ方式でも、測定空気力がなす総仕事（揚力と空力モーメントがそれぞれなす仕事の合計）は、側径間で減衰力、中央径間で励振力を呈し、また、空力モーメントのなす仕事量は揚力のなす仕事量と比べて非常に小さいことがわかった。

(2) フラッターの発現風速に対しては、仕事量から推察される通り、 L_{yR} と $M_{\phi R}$ の二つの空気力成分は、それぞれ単独では本質的な影響を及ぼさない。

(3) モノデュオ方式の連成フラッター風速には、フラッター発生時の仕事量で最も寄与の大きかった $L_{\phi R}$ 成分と L_{yI} 成分はほとんど影響しないという結果が得られた。したがって、フラッター発生時の仕事量からは、連成フラッターの発現に最も大きな寄与を及ぼす空気力係数を評価できない。

(4) モノデュオ方式において $M_{\phi I}$ だけを測定空気力に置き換えた場合の連成フラッター風速は $V_F = 47\text{m/s}$ となり、平板空気力のみを適用した場合の連成フラッター風速である $V_F = 74\text{m/s}$ を大きく下回る結果（すべて測定空気力を適用した場合の連成フラッター風速である $V_F = 48.5\text{m/s}$ と概ね等しい結果）が得られた。すなわち、モノデュオ方式吊橋において、測定空気力をを用いた場合には平板空気力をを用いた場合と比較してかなり低い風速域で連成フラッターが発現するという現象が認められたのは、非定常空気力の $M_{\phi I}$ 成分が大きく関与していると言えた。

(5) 従来形式においても非定常空気力の $M_{\phi I}$ 成分が連成フラッター特性に大きく関与し、測定空気力の $M_{\phi I}$ だけを対応する平板空気力成分に置換した場合、 $38\text{m/s} \sim 42\text{m/s}$ の風速域で励振力の非常に弱い不安定振動が出現した後、 51m/s の風速から連成フラッターが発現する結果となった。また、測定空気力の

$M_{\phi R}$ のみを対応する平板空気力成分に置換した場合には、連成フラッター特性に大きな変化は認められなかったが、測定空気力の $M_{\phi I}$ と $M_{\phi R}$ を置換した場合には、 $M_{\phi R}$ の微妙な影響で、構造減衰を無視すれば、連成フラッターは38m/sから発現する結果となった。すなわち、従来方式でも、測定空気力を用いた場合、 $M_{\phi I}$ 成分の寄与でフラッター風速が大きく低下する可能性を潜在的に秘めていると言える。

最後に、本研究を実施するにあたり、横浜国立大学の宮田利雄教授と山田 均教授から、フラッター解析に関する貴重なご教示と御助言を賜りました。紙面を借りて両先生に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 米田昌弘, 上田宗志, 西澤 毅: 超長大箱桁形式吊橋の連成フラッター特性に関する2, 3の考察—作用空気力を変化させた従来形式とモノデュオ形式に対する検討—, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1047~1058, 1999年3月.
- 2) 米田昌弘, 大野克紀, 田巻嘉彦, 木村公

男: 超長大箱桁形式吊橋の連成フラッター特性に及ぼす鉛直クロスステイの効果—測定空気力を作用させた場合の最適位置—, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.907~916, 1997年3月.

- 3) 宮田利雄, 山田 均, 太田博文: 立体骨組み解析法による横たわみしたトラス補剛吊橋の曲げねじれフラッター解析, 土木学会論文集, 第404号/I-11, pp.267~275, 1989年4月.
- 4) 宮田利雄, 山田 均, 風間浩二: フラッターモード形に着目した長大吊橋の耐風安定性向上に関する研究, 土木学会論文集, 第525号/I-33, pp.191~200, 1995年10月.
- 5) 風間浩二, 宮田利雄, 山田 均: 吊橋の長大化に伴うフラッター特性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.809~816, 1995年3月.

(2001年9月14日受付)