

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—

Compound Flutter Characteristics for Two Types of Super Long Span Suspension Bridges due to Different Acting Aerodynamic Forces on the Deck

米田昌弘*, 上田宗志**, 西澤 毅***

Masahiro YONEDA*, Muneshi UEDA** and Tsuyoshi NISHIZAWA**

*	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)
**		近畿大学大学院	工学研究科修士課程	(〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)
***		近畿大学大学院	工学研究科修士課程	(〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

Aerodynamic stability is one of the most important themes in the design of a super long span suspension bridge. A series of direct flutter FEM analyses were carried out for a 2,500m super long span suspension bridge with conventional or mono-duo cable system. Both measured aerodynamic forces and Theodorsen's aerodynamic forces on the flat plate were used for the flutter analysis. It was shown from the analytical results that the compound flutter speed for the conventional type bridge would not be almost dependent due to different acting aerodynamic forces on the deck. It was also found that greatly reduced compound flutter speed have been observed when measured aerodynamic forces were used for the mono-duo type bridge.

Key Words : *super long span suspension bridge, direct flutter FEM analysis
compound flutter speed, different acting aerodynamic force*

1. まえがき

周知の如く、吊橋は吊構造部の形式によってトラス補剛形式と流線形の扁平箱桁形式（以下、扁平箱桁形式と記す）に分類される。扁平箱桁形式はトラス形式と比較して風荷重（抗力）が小さく、かつ、完成後の維持管理もきわめて容易である。したがって、板厚を増加して桁のねじれ剛性を高める以外の、より経済的な手法によって所定の耐フラッター性を確保できれば、建設費用の抑制が最重要課題となっている今後の超長大吊橋に対してきわめて有望な補剛形式になると思われる。また、実際、各種のケーブルシステムを採用して扁平箱桁形式吊橋の連成フラッター風速を上昇させようとする研究も多くの研究者によって活発に実施されている^{1)~5)}。

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。

ところが、著者の一人が側径間側や中央径間側のみで 1 対の両効き鉛直クロスステイを設置した場合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別モードの連成フラッターが発現するという現象（構造対数減衰率 δ_s を $\delta_s=0$ と仮定した場合）が認められた⁶⁾。このような連成フラッター風速の大幅な低下現象は、構造減衰の設定値によっても変化するが、モノデュオ形式（2 本のメインケーブルを主塔付近で 1 本に束ねた形式）^{1), 7)}を初めとするその他のケーブルシステムに対しても認められる可能性が十分にあると考えられる。

そこで、本研究では、中央支間長が 2,500m で支間長比を 0.3~0.5 の範囲で変化させた従来形式とモノデュオ形式についてそれぞれ平板空気力と測定空気力を用いた立体骨組みフラッター解析を行い、作用空気力を変化させた場合の連成フラッター特性を詳細に検討

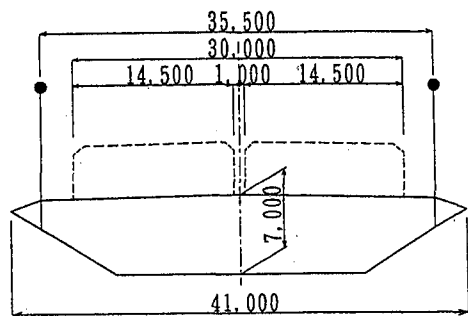


図-1 対象橋梁の桁断面

することとした。その結果、従来形式では、作用空気が変化してもフラッター風速に大幅な増減が認められないのに対し、モノデュオ形式では両者に大きな差異が生じるなど、超長大吊橋の検討に携わる実務技術者や風工学の研究者にとって示唆に富んだ知見が得られたことから、ここにその検討結果を報告する。

2. 対象橋梁と解析条件

(1) 対象橋梁

本研究で対象とした橋梁は、図-1に示すような桁断面を有する中央支間長 2,500m の従来形式とモノデュオ形式で、支間長比は 0.3, 0.4, 0.5 のそれぞれ 3 通りを考えるものとした。対象橋梁の基本諸元を表-1に示す。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 82kgf/mm² から 100kgf/mm² に変更することとしている。なお、ケーブルのサグ比を 1/10、ケーブルの許容応力度を 82kgf/mm² とした場合のケーブル重量 w_c は $w_c = 17.0\text{tf/m/Br.}$ であり、サグ比を 1/9、許容応力度を 100kgf/mm² に変更することによってケーブル重量は $w_c = 11.0\text{tf/m/Br.}$ まで低減したことを付記しておく。

(2) 連成フラッター解析

立体骨組みフラッター解析には、固有振動モードを組み合わせる方法（モード組み合わせ法）⁸⁾ と基本となる連成空気を加えた運動方程式を直接解く方法（直接法）⁹⁾ とがある。モード組み合わせ法は、直接法に比べ、大きな計算容量を必要としないが、超長大吊橋の解析にあたって考慮すべきモード次数について定量的指標が与えられていないこともあり、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を

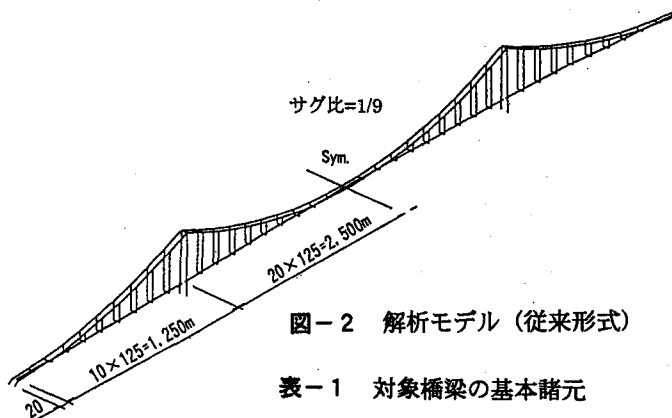


図-2 解析モデル（従来形式）

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	0.3, 0.4, 0.5
ケーブル	
サグ比	1/9
間隔	35.5 m
有効断面積	$2 \times 0.6 = 1.2 \text{ m}^2/\text{Br.}$
許容応力度	100 kg/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.
ねじり定数	水平 160 m ⁴ /Br.
死荷重	
吊構造部	24 t/m/Br.
ケーブル	11 t/m/Br.
合計	35 t/m/Br.
吊構造部重量極慣性	3,300 m ² /m/Br.
ハンガー断面積	0.03m ² / 125m / Cable.

実施することとした。

本研究での連成フラッター解析では、平板空気が（平板翼の非定常揚力と非定常空力モーメント）を橋桁に作用させる場合に加え、図-1の桁断面に対する測定空気が（水平な一様流中の風洞実験から算出した測定空気が）⁶⁾ を作用させた場合についても併せて実施するものとした。また、いずれの空気を使用する場合にも、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）は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小さいと考えられることから、本解析では無視するものとした。

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、

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

ここに、 ρ ; 空気密度

b ; 橋桁の半幅

$\ddot{\eta}$; 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

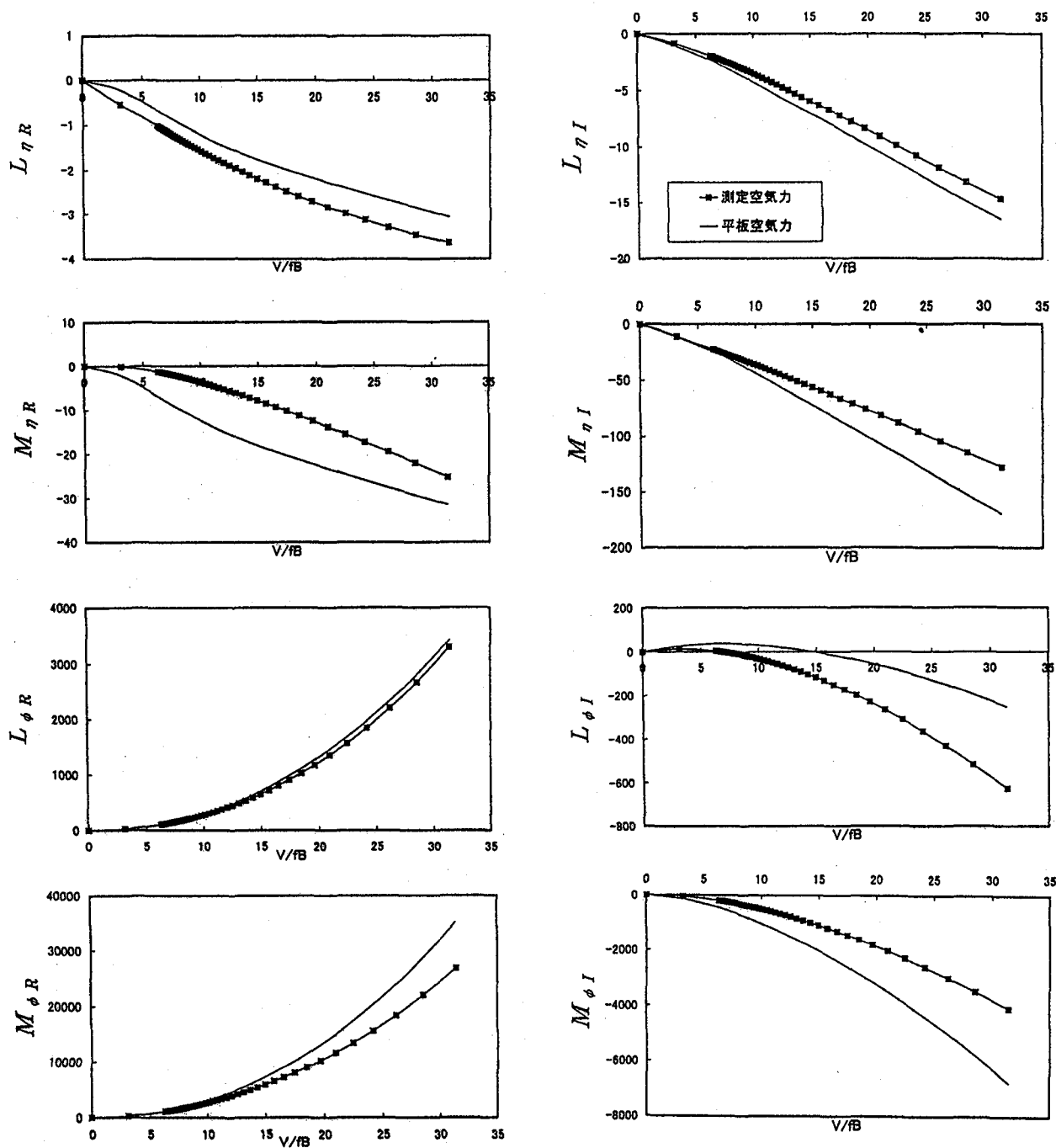


図-3 平板空気力と測定空気力

で定義した場合の $L_{\eta R}$, $L_{\eta I}$, $L_{\phi R}$, $L_{\phi I}$, $M_{\eta R}$, $M_{\eta I}$, $M_{\phi R}$, $M_{\phi I}$ 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。なお、図-3には、補足的に平板空気力に対応する値(理論値)も併記している。

3. 固有振動特性

まず、支間長 0.5 の従来形式とモノデュオ形式について固有振動解析を実施した。得られた代表的な固有

振動モードとその固有振動数を表-2にまとめる。表-2からわかるように、両者の1次~14次まで(結果は省略したが、厳密には23次まで)の固有振動モードと固有振動数はほぼ一致している。これに対し、ねじれ対称1次振動については明らかに相違する結果が得られている。すなわち、従来形式では、図-4に示すように純粋なねじれ対称1次振動(振動数は0.1602Hz)が25次で生じているのに対し、モノデュオ形式では、図-5からわかるように、水平曲げ成分はやや連成しているものの、29次に本来のねじれ対称

表-2 支間長比 0.5 の固有振動解析結果

固有振動 モード	固有振動数 (Hz)		備 考
	従来形式	モノデュオ形式	
水平曲げ対称 1 次	0.0314 (1)	0.0323 (1)	
鉛直曲げ対称 1 次	0.0537 (2)	0.0536 (2)	
鉛直曲げ逆対称 1 次	0.0580 (3)	0.0580 (3)	中央径間に遊動円木成分
	0.0697 (7)	0.0696 (7)	
側径間の遊動円木	0.0869 (8)	0.0868 (8)	側径間が逆位相
	0.0873 (9)	0.0873 (9)	側径間が同位相
鉛直曲げ対称 2 次	0.0997 (11)	0.0996 (11)	
鉛直曲げ逆対称 2 次	0.1365 (14)	0.1364 (14)	
ねじれ対称 1 次	—	0.1597 (24)	水平曲げ対称 1 次が卓越
	—	0.1727 (26)	水平曲げ対称 1 次が連成
	0.1602 (25)	0.1893 (29)	ねじれ対称 1 次が卓越

注) 括弧内の数値は振動次数を表す。

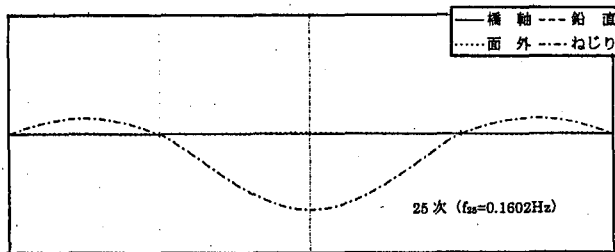


図-4 従来形式のねじれ対称 1 次モード
(支間長比 0.5)

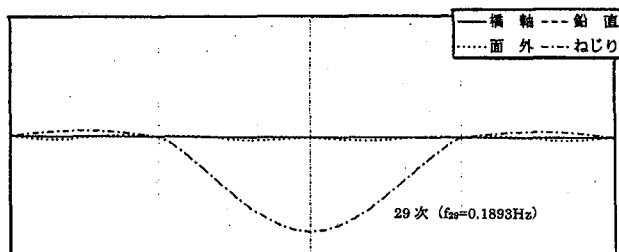
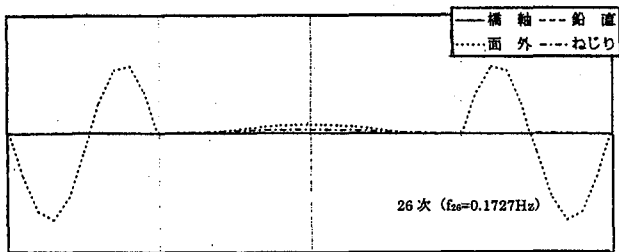
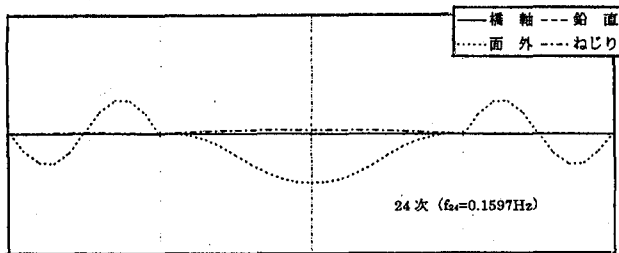


図-5 モノデュオ形式のねじれ対称 1 次モード
(支間長比 0.5)

1 次振動 (振動数は 0.1893Hz) が、また、24 次 (振動数は 0.1597Hz) と 26 次 (振動数は 0.1727Hz) に水平曲げ対称 1 次成分が連成したねじれ対称 1 次の振動モードがそれぞれ存在している。したがって、主桁に作用させる空気力が相違した場合、モノデュオ形式では、本来のねじれ対称 1 次振動 (29 次) に加え、24 次、26 次の振動モードが連成フラッター特性に少なからぬ影響を及ぼす可能性があるかと推察される。

なお、結果は省略するが、支間長が 0.3 と 0.4 の場合についても、上述した支間長 0.5 の場合と同様に、モノデュオ形式では本来のねじれ対称 1 次振動に加え、これより少し低い振動数域で幾つかの水平曲げ成分をともなったねじれ対称 1 次振動モードが存在していることを付記しておく。

4. 連成フラッター特性

(1) 従来形式

はじめに、支間長比を 0.3, 0.4, 0.5 とした従来形式について連成フラッター解析を実施した。平板空気力と測定空気力を使用した場合に得られた V- δ 曲線 (風速と空力減衰の関係) をそれぞれ図-6~図-8 に示す。また、構造対数減衰率 δ_s を $\delta_s=0$ とした場合の、支間長比と連成フラッター風速の関係を表-3 に示す。これらの結果からわかるように、測定空気力を作用させた場合の連成フラッター風速は、平板空気力を用いた場合と比較し、支間長比が 0.3 で 5m/s, 支間長比が 0.4 で 3m/s, 支間長比が 0.5 で 4m/s 程度、それぞれ低くなっているものの、両者の結果は概ね等しくなっている。したがって、平板空気力を使用した連成フラッター解析は、ケーブルシステムを採用しない従来形式の超長大吊橋に対し、初期の検討段階では実用上十分な精度を有すると言える。なお、平板空気力と測定空気力を作用させた場合のフラッターモード

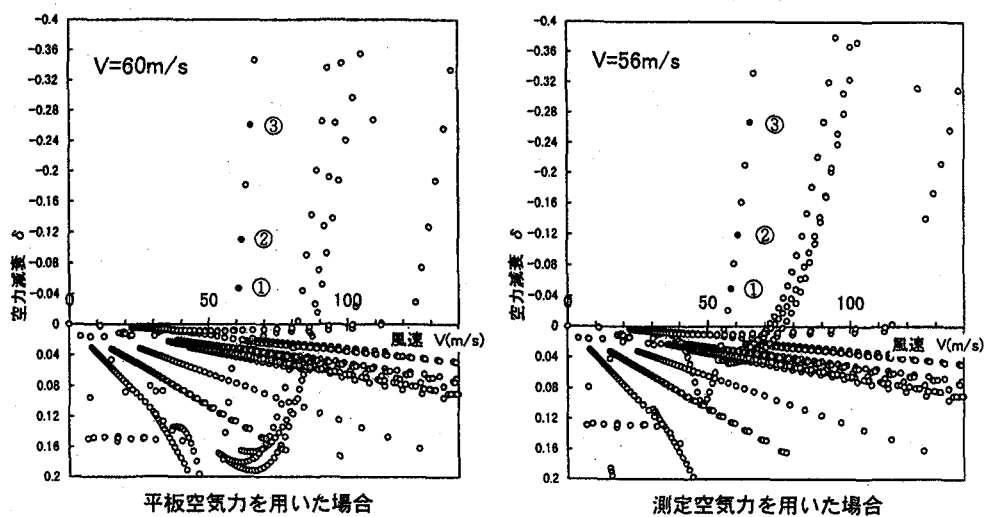
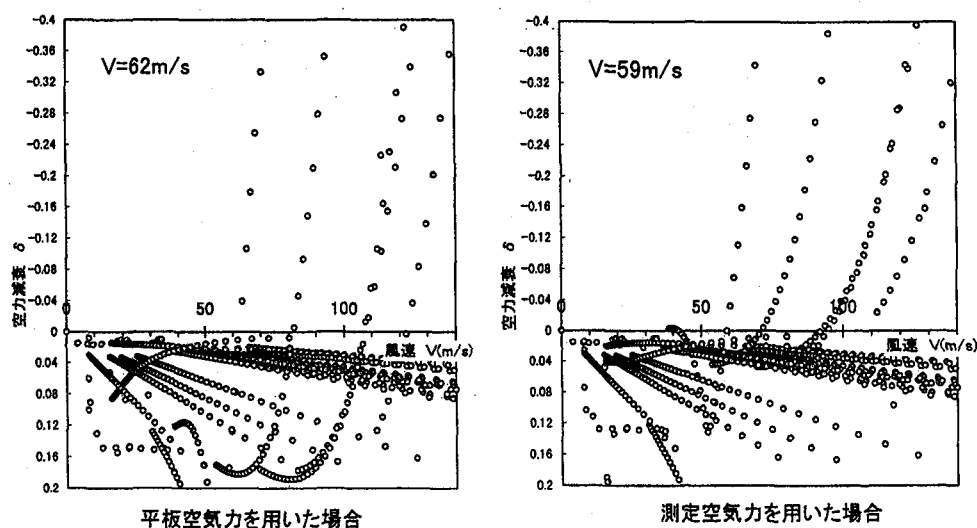
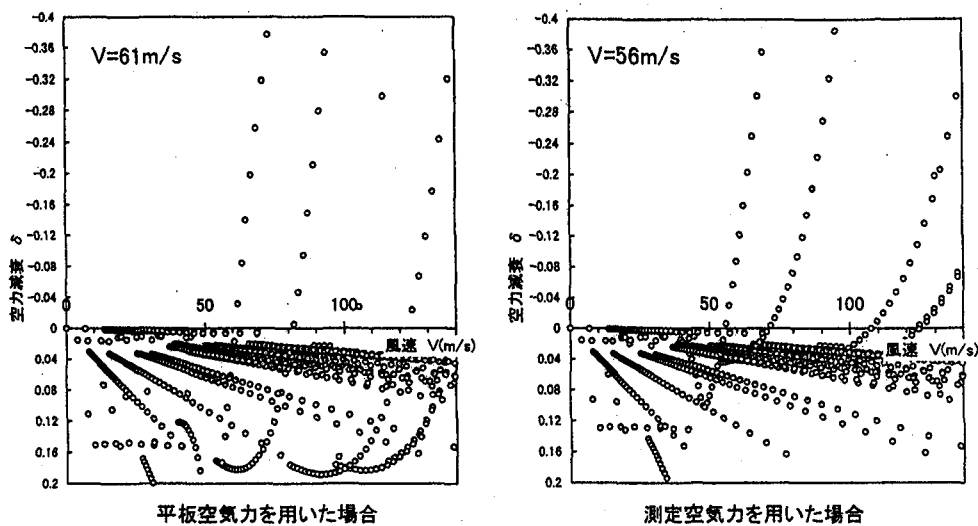
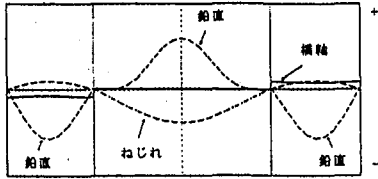


表-3 従来形式の連成フラッター風速 ($\delta_s=0$)

支間長比	連成フラッター風速	
	平板空気力	測定空気力
0.3	61 m/s	56 m/s
0.4	62 m/s	59 m/s
0.5	60 m/s	56 m/s

平板空気力 フラッター風速 60.8m/s

$t=(3/8)T$



測定空気力 フラッター風速 58.3m/s

$t=(3/8)T$

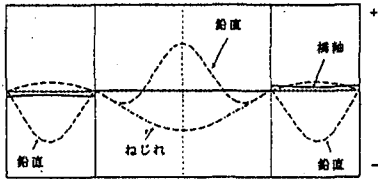


図-9 従来形式 (支間長比 0.5) のフラッターモード
(①のフラッターモード)

(図-8中の①に対応するフラッターモード)を比較したところ、支間長比 0.5 では、図-9に示すように中央径間側の主塔から約 1/4 区間における鉛直たわみ性状に若干の差異が認められるものの、ねじれについてはほぼ同様な対称 1 次形を呈していた。また、支間長比が 0.3 と 0.4 の場合も、平板空気力と測定空気力を作用させたフラッターモードはそれぞれ同様に概ね類似しており、水平たわみを伴わない、鉛直たわみとねじれが連成したフラッターが発現していたことを付記しておく。

(2) モノデュオ形式

次に、支間長比を 0.3, 0.4, 0.5 としたモノデュオ形式について連成フラッター解析を実施した。平板空気力と測定空気力を使用した場合に得られた $V-\delta$ 曲線 (風速と空力減衰の関係) をそれぞれ図-10～図-12に示す。また、構造対数減衰率を $\delta_s=0$ とした場合の、支間長比と連成フラッター風速の関係を表-4にまとめる。表-3と表-4を比較すればわかるように、平板空気力を用いた場合、従来形式 (支間長比 0.3～0.5) のフラッター風速が $V_F=60\text{m/s} \sim 62\text{m/s}$ であったのに対し、モノデュオ形式 (支間長比 0.3～0.5) では $V_F=70\text{m/s} \sim 76\text{m/s}$ まで上昇する結果となっている。この結果は、たとえば支間長比 0.5 のモノデュオ形式に着目すれば、ねじれ対称 1 次振動数 (29 次に現れる本来のねじれ対称 1 次振動数) が、従来形式のねじれ対称 1 次振動数と比べ、18%程度

($0.1893\text{Hz}/0.1602\text{Hz} \approx 1.18$) 上昇していたことに起因すると思われる。すなわち、平板空気力を用いた検討では、水平曲げ振動が連成したねじれ対称 1 次振動モード (支間長比 0.5 では 24 次や 26 次に現れる振動モード) の影響は小さく、連成フラッターに対するモノデュオ形式の優位性が認められる結果が得られることとなる。

これに対し、表-4からわかるように、測定空気力を作用させた場合、モノデュオ形式ではいずれの支間長比においても、平板空気力を作用させた場合と比べ、連成フラッター風速が 25m/s 程度も大幅に低下している。また、先に示した図-10～図-12からわかるように、連成フラッターの励振力も支間長比が 0.3 から 0.4, 0.5 と大きくなるにしたがって明らかに増加する傾向にある。したがって、モノデュオ形式を採用した超長大吊橋では、平板空気力と測定空気力を使用した連成フラッター解析結果は大幅に相違する可能性があり、初期の検討段階でも測定空気力を使用した検討が必要であると言える。

なお、平板空気力と測定空気力を作用させた場合について支間長比 0.5 のフラッターモード (図-12中の①に対応するフラッターモード) を比較したところ、図-13に示すように、両者のフラッターモードは、ねじれ性状は概ね一致しているものの、中央径間側の鉛直たわみ性状が明らかに相違し、測定空気力を用いた場合には中央径間側の 1/4 点付近でピークを描く対称形を呈する結果となっていた。一方、結果は省略するが、測定空気力を作用させた③のフラッターモードは、平板空気力を用いたフラッターモードときわめて類似しており、面外モードもほとんど連成していなかった。したがって、測定空気力を用いた場合、モノデュオ形式の①と③の連成フラッターでは、特性に明確な差異が存在すると推察される。

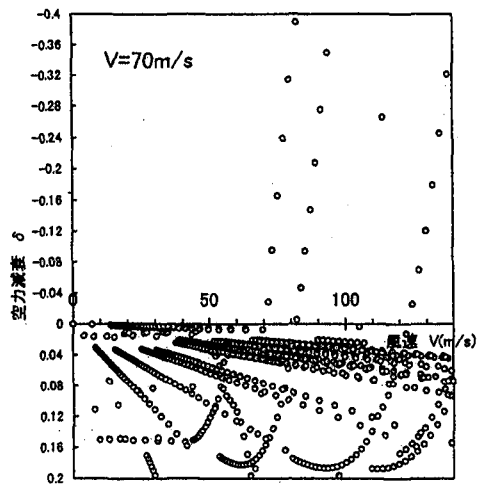
5. 連成フラッターに対する仕事量からの考察

(1) 空気力がなす仕事量の計算

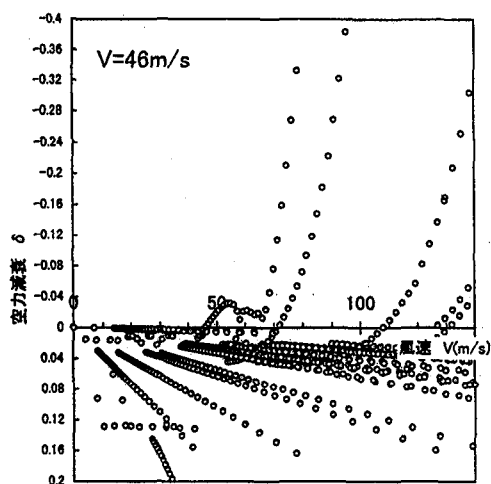
空気力が主桁に対してなす仕事量は、文献 10)にしたがって、以下のように計算する。すなわち、主桁の格点に作用する非定常揚力 L と非定常空力モーメント M を式(1)で表示した場合、連成振動する主桁の格点に対して揚力と空力モーメントがそれぞれなす仕事 W_L , W_M は次式で計算できる。

$$W_L = \int L_R dy_R \\ = \rho \pi^2 b^2 \omega^2 \left\{ y_0^2 L_{yI} - (L_{\phi R} \sin \theta - L_{\phi I} \cos \theta) y_0 \phi_0 \right\} \quad (2)$$

$$W_M = \int M_R d\phi_R \\ = \rho \pi^2 b^2 \omega^2 \left\{ y_0 \phi_0 (M_{yR} \sin \theta + M_{yI} \cos \theta) + \phi_0^2 M_{\phi I} \right\} \quad (3)$$

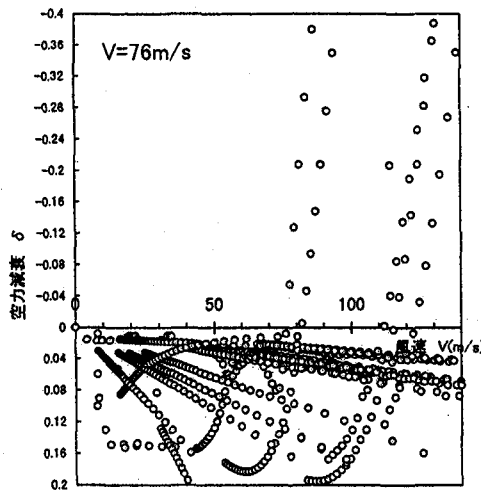


平板空気力を用いた場合

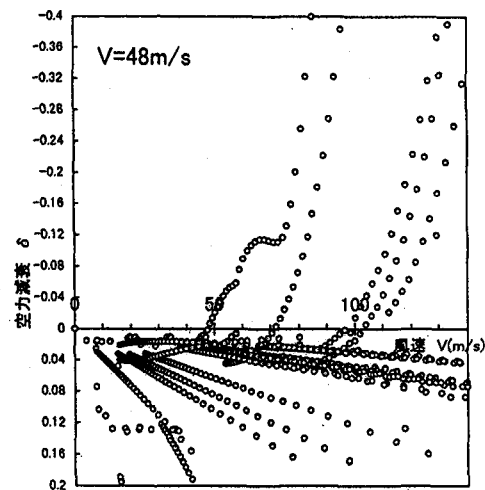


測定空気力を用いた場合

図-10 モノデュオ形式 (支間長比 0.3) の V - δ 曲線

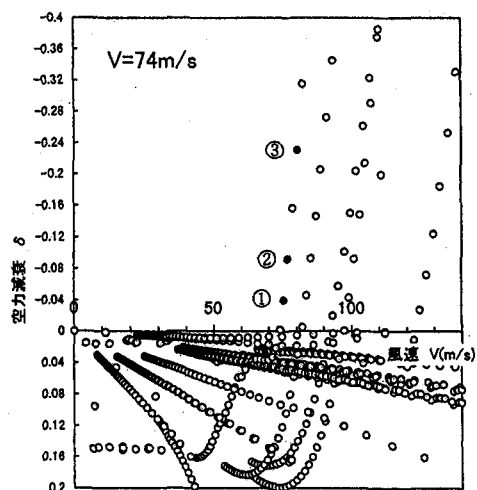


平板空気力を用いた場合

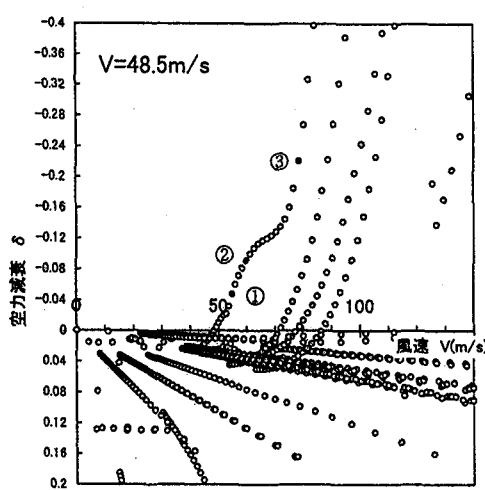


測定空気力を用いた場合

図-11 モノデュオ形式 (支間長比 0.4) の V - δ 曲線



平板空気力を用いた場合



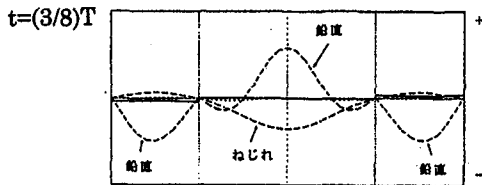
測定空気力を用いた場合

図-12 モノデュオ形式 (支間長比 0.5) の V - δ 曲線

表-4 モノデュオ形式の連成フラッター風速 ($\delta s=0$)

支間長比	連成フラッター風速	
	平板空気力	測定空気力
0.3	70 m/s	46 m/s
0.4	76 m/s	48 m/s
0.5	74 m/s	48.5 m/s

平板空気力 フラッター風速 75.5m/s



測定空気力 フラッター風速 55.1m/s

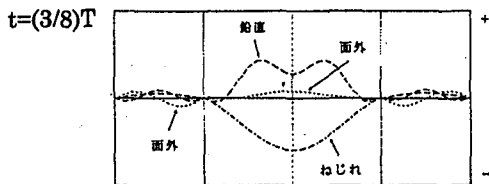


図-13 モノデュオ形式 (支間長比 0.5) のフラッターモード (①のフラッターモード)

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、

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

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

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。

したがって、空気力が主桁の格点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。

なお、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, ϕ_0 が含まれている。それゆえ、仕事量の厳密な定義にしたがえば、 y_0 として基準振幅 (たとえば、0.1m のように次元を有する値) を規定しなければならないが、本文では従来の慣用にしたがい、複素モード振幅の絶対値を用いて式(2)と式

(3)から計算される W_L, W_M を仕事量と記すこととした¹⁰⁾。また、次節以降に具体的な加振力分布図を示すが、これらの図中において E は空気力 (揚力と空力モーメント) がなす正の仕事量 (励振力) の総和 (橋軸方向の積分値) を、 D は負の仕事量 (減衰力) の総和をそれぞれ表す。したがって、桁の準定常抗力およびケーブルの準定常抗力と準定常揚力の寄与で若干の誤差は生じるものの、基本的には $E+D < 0$ あるいは $E/|D| < 1$ であればフラッターが発現しないことを表し、 $E+D > 0$ あるいは $E/|D| > 1$ であればフラッターが発現していることを意味する。

(2) 仕事量からの一般的な考察

まず、支間長比 0.5 の従来形式に着目し、図-8中に記した①、②、③の連成フラッターについて仕事量を計算した。なお、ここで着目した①、②、③の連成フラッターは、平板空気力と測定空気力を用いたそれぞれで、対応する番号の励振力 (負の空力減衰) がほぼ等しいもの ($\delta \approx -0.05, -0.10, -0.25$) を選定している。平板空気力と測定空気力を用いた場合の加振力分布をそれぞれ図-14、図-15に示す。これらの図から、支間長比 0.5 の従来形式で発現する①、②、③の連成フラッターでは、いずれも中央径間側において励振力、側径間側において減衰力が作用していることがわかる。また、中央径間側に作用する励振力に着目した場合、平板空気力を作用させた①、②、③の連成フラッターと測定空気力を作用させた③の連成フラッターでは励振力が中央点で最大となっているのに対し、測定空気力を作用させた①と②の連成フラッターでは中央点から少し離れた位置で励振力が最大となっていることもわかる。このように、最大励振力の位置については幾分の差異が認められるものの、いずれの連成フラッターも、従来から知られているように、空力モーメントのなす仕事量 (図中の□記号) の影響は非常に小さく、揚力のなす仕事量 (図中の○記号) が支配的となっている。

次に、支間長比 0.5 のモノデュオ形式に着目し、図-12中に記した①、②、③の連成フラッターについて仕事量を同様に計算した。平板空気力と測定空気力を用いた場合の加振力分布をそれぞれ図-16、図-17に示す。図-16から、平板空気力を作用させた場合、支間長比 0.5 のモノデュオ形式で発現する①、②、③の連成フラッターでは、従来形式と同じくいずれも中央径間側において励振力、側径間側において減衰力が作用しているものの、最大の励振力は中央点から少し離れた位置で生じていることがわかる。また、いずれの連成フラッターにおいても、空力モーメントのなす仕事量の影響は非常に小さく、揚力のなす仕事

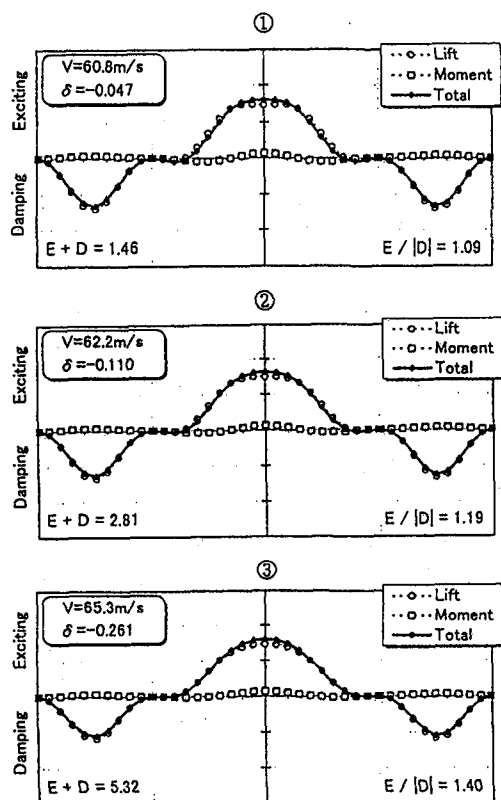


図-14 従来形式（支間長比0.5）の加振力分布図
（平板空気力）

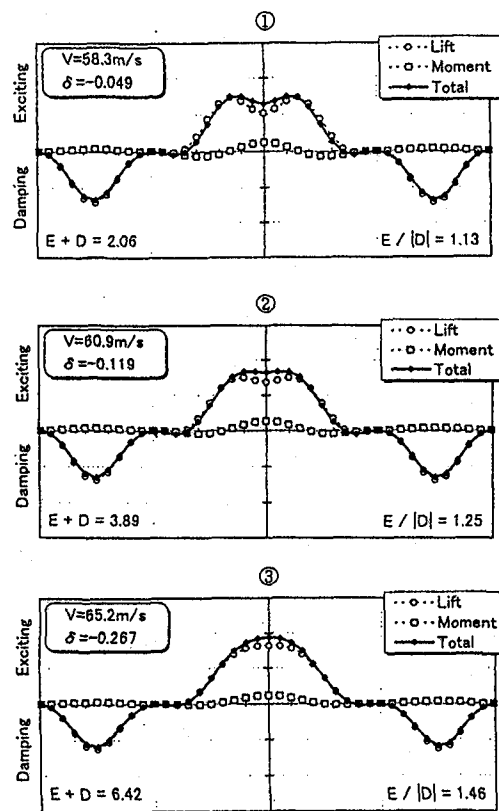


図-15 従来形式（支間長比0.5）の加振力分布図
（測定空気力）

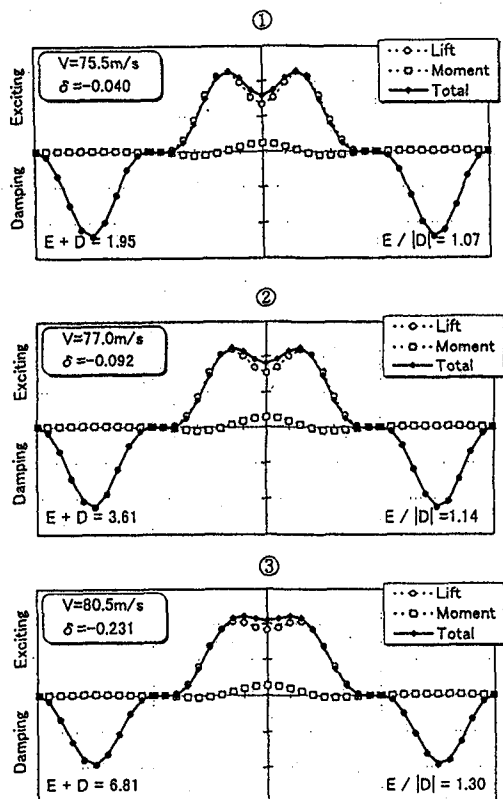


図-16 モノデュオ形式（支間長比0.5）の加振力分布図
（平板空気力）

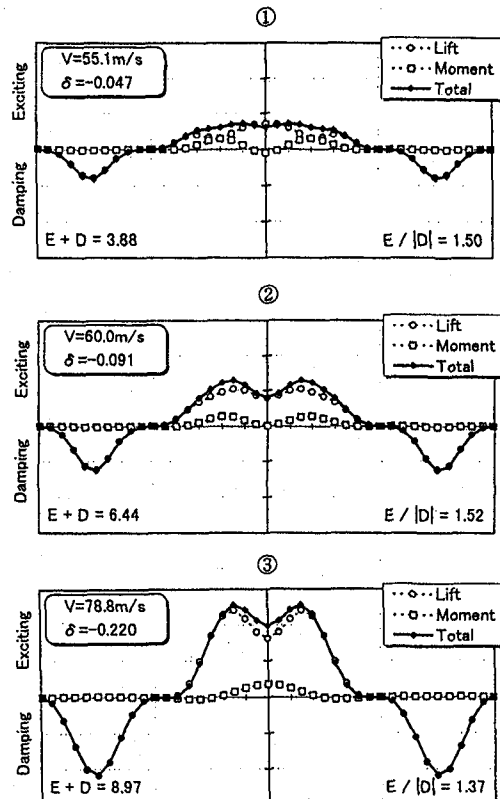


図-17 モノデュオ形式（支間長比0.5）の加振力分布図
（測定空気力）

量が支配的となっている。一方、図-17からわかるように、測定空気を作用させた場合、いずれの連成フラッターにおいても平板空気を作用させた場合と同様に、中央径間側で励振力、側径間側で減衰力が作用しているが、①の連成フラッターについてはきわめて興味深い結果が得られている。すなわち、測定空気をを用いた①の連成フラッターでは、平板空気をを用いた場合と比較し、空力モーメントのなす仕事量が比較的大きく、最大の値を呈する位置では揚力のなす仕事量と概ね等しくなっている。ただし、この空力モーメントの仕事量は風速に依存し、連成フラッター③では平板空気をを用いた場合と同じく大幅に低下する結果となっている。先に考察したように、測定空気をを用いたモノデュオ形式ではフラッターモードが風速の上昇とともに明確な変化を呈したが、これはここに報告した空力モーメントの仕事量に関係すると思われる。

(3) モノデュオ形式に限定した仕事量からの考察

前節では、従来形式とモノデュオ形式について一般的な考察を行ったが、ここでは平板空気力と測定空気力を使用した場合にフラッター風速が大きく相違したモノデュオ形式の支間長比 0.5 に限定して、仕事量からより詳細な考察を加えることとする。

平板空気力と測定空気力を使用した場合の連成フラッター解析結果から、フラッターの発現に關与した振動モードについて振動数と風速の関係を整理した。その結果を図-18に示す。なお、この図において、黒塗りを施した●記号と▲記号は、それぞれ平板空気力と測定空気力を使用した場合に空力減衰が負となってフラッターが発生したことを表している。支間長比 0.5 のモノデュオ形式では、3章で示したように、29次にやや水平曲げ成分が連成した本来のねじれ対称1次振動（振動数は 0.1893Hz）が、また、24次（振動数は 0.1597Hz）と26次（振動数は 0.1727Hz）に水平曲げ対称1次成分が連成したねじれ対称1次の振動モードが存在したため、連成フラッターの起点モード

を特定できなかった。しかしながら、図-18の $V=0\text{m/s}$ における振動数の値から、平板空気力と測定空気力のいずれを用いた場合にも、モノデュオ形式（支間長比 0.5）の起点モードは、29次のねじれ対称1次振動（振動数は 0.1893Hz）であることがわかる。また、風速に対する振動数の低下傾向も両者で概ね類似しているが、図中の黒塗り記号からわかるように測定空気をを用いた場合には 48.5m/s で連成フラッターが発生するのに対し、平板空気をを用いた場合には 74m/s まで連成フラッターは発生せず、両者に大きな差異が生ずる結果となっている。

そこで、測定空気をを用いた場合にフラッターが発現した 49m/s 付近の風速に着目し、平板空気力と測定空気ををそれぞれ用いた場合の仕事量を計算した。その結果を図-19に示す。この図から、平板空気力と測定空気のいずれを用いても、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）は側径間で減衰力として作用していることがわかる。これに対し、中央径間では大きく相違し、平板空気をを用いた場合には $0.2L_c \sim 0.8L_c$ 区間（ただし、 L_c は中央支間長）で減衰力が作用するのに対し、測定空気をを用いた場合にはすべての格点で励振力が作用する結果となっている。しかしながら、揚力と空力モー

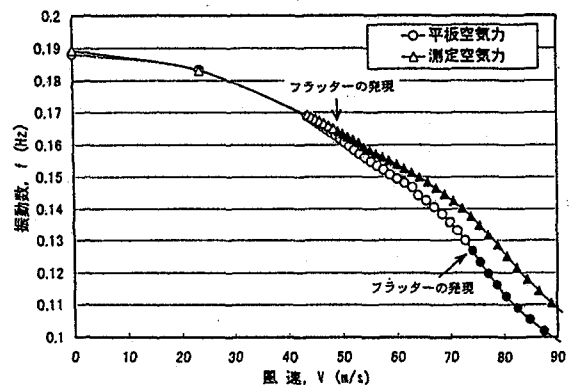


図-18 モノデュオ形式（支間長比 0.5）での風速と振動数の関係

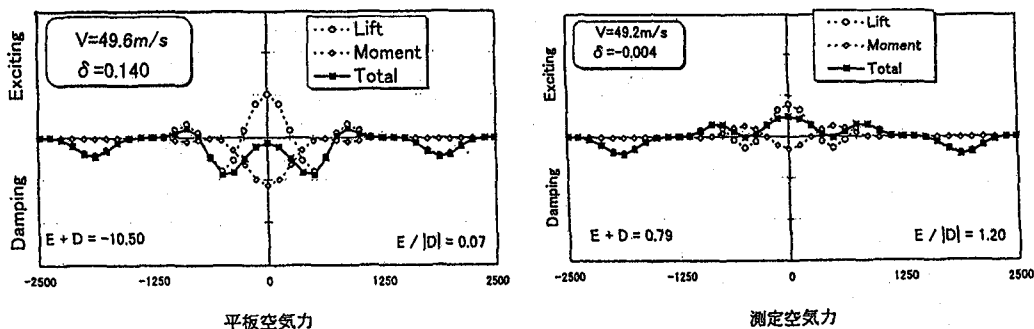


図-19 モノデュオ形式（支間長比 0.5）の加振力分布図
（風速 49m/s 付近；平板空気力と測定空気力）

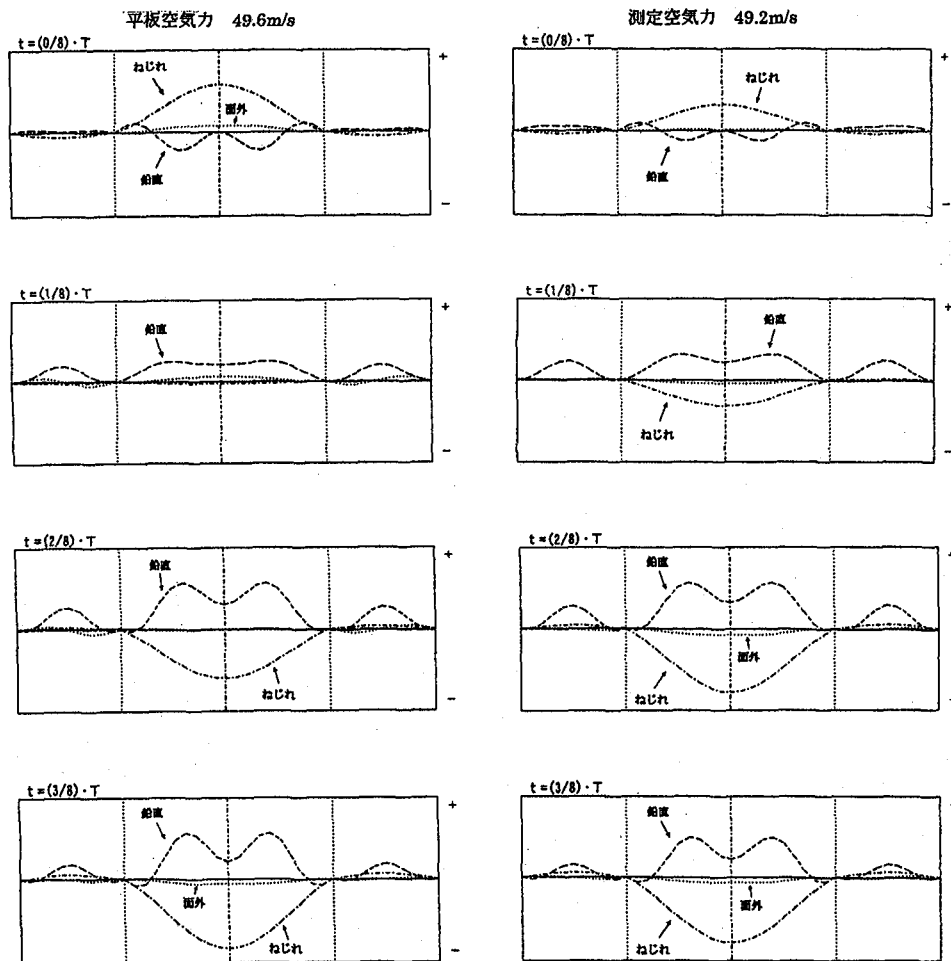


図-20 モノデュオ形式（支間長比0.5）の振動モード（風速49m/s付近）

ントの寄与に分けて考えた場合、平板空気力と測定空気力のいずれにおいてもそれぞれの空気力に起因した仕事量は比較的類似した分布形状を呈している。ただし、平板空気力を用いた場合は、測定空気力を使用した場合と比べ、中央径間の $0.2L_c \sim 0.8L_c$ に位置する格点で空力モーメントに起因した減衰力が揚力に起因した励振力を大きく上回っている。したがって、平板空気力を用いた場合は49m/s付近の風速で連成フラッターが発生しなかったのに対し、測定空気力を用いた場合には連成フラッターが発生する結果になったと言える。なお、図-20は平板空気力と測定空気力を用いた場合の振動モード（測定空気力を用いた場合にはフラッターモードに対応）を示したものである。この図から、平板空気力と測定空気力のいずれを用いても、一見、振動モードはきわめて類似しているように見える。しかしながら、 $1T/8$ での振動モードを比較すればわかるように、平板空気力と測定空気力を使用した両者でねじれ振動成分の位相に明確な差異が存在している。その結果、平板空気力と測定空気力の微妙な差異も影響し、両者の空力モーメントがなす仕事量が大きく相違し、連成フラッター特性に差異が生じたものと

推察される。

6. まとめ

本論文は、桁高7mの扁平箱桁断面を有する中央支間長2,500m（支間長比0.3, 0.4, 0.5）の従来形式とモノデュオ形式を対象として、それぞれ平板空気力と測定空気力を用いた立体骨組みフラッター解析を実施し、作用空気力が変化した場合の連成フラッター特性を検討したものである。得られた主要な結果を以下にまとめる。

- (1) 固有振動解析を実施した結果、従来形式では一つの純粋なねじれ対称1次振動が明確に存在するのに対し、モノデュオ形式では、本来のねじれ対称1次振動に加え、これより少し低い振動数域において水平曲げ成分をともなった複数のねじれ対称1次振動が生じる。
- (2) 測定空気力を作用させた従来形式（支間長比0.3～0.5）の連成フラッター風速は、平板空気力を用いた場合よりもそれぞれ若干低下したが、両者の結果は概ね一致していた。したがって、平板空気力を使用した連成フラッター解析は、ケーブルシステムを採用しな

い従来形式の超長大吊橋に対し、初期の検討段階では実用上十分な精度を有する。

(3) 平板空気力を用いた場合、従来形式（支間長比 0.3～0.5）のフラッター風速が $V_F=60\text{m/s}\sim 62\text{m/s}$ であったのに対し、モノデュオ形式（支間長比 0.3～0.5）では $V_F=70\text{m/s}\sim 76\text{m/s}$ まで上昇した。この結果は、モノデュオ形式における本来のねじれ対称 1 次振動数が、従来形式のねじれ対称 1 次振動数と比べ、14%～18% 程度上昇していたことを考えれば理解できる。したがって、平板空気力を用いたモノデュオ形式の検討では、水平曲げ成分をともなったねじれ対称 1 次振動モードの寄与は小さく、連成フラッターに対するモノデュオ形式の優位性が認められる結果が得られる。

(4) これに対し、モノデュオ形式で測定空気力を採用すると、平板空気力を作用させた場合と比べ、いずれの支間長比においても連成フラッター風速が 25m/s 程度も大幅に低下した。したがって、モノデュオ形式を採用した超長大吊橋では、平板空気力と測定空気力を使用した連成フラッター解析結果には大きな差異が生じる可能性があり、初期の検討段階でも測定空気力を使用した検討が必要であると言える。

(5) 測定空気力を作用させたモノデュオ形式でも、中央径間側で励振力、側径間側で減衰力が作用しているが、 55.1m/s で発現した連成フラッター①についてはきわめて興味深い結果が得られた。すなわち、平板空気力を用いた場合には空力モーメントのなす仕事量がきわめて小さいのに対し、測定空気力を用いた場合には空力モーメントのなす仕事量が比較的大きく、最大の値を呈する位置では揚力のなす仕事量と概ね等しくなった。

(6) 空気力が 49m/s 付近でなす仕事量をモノデュオ形式の支間長比 0.5 について算定した。その結果、平板空気力と測定空気力のいずれにおいても、揚力成分と空力モーメント成分に起因した仕事量は比較的類似した分布形状を呈することがわかった。ただし、平板空気力を用いた場合は、測定空気力を使用した場合に比べ、中央径間の $0.2L_c\sim 0.8L_c$ に位置する格点で空力モーメントに起因した減衰力が揚力に起因した励振力を大きく上回っていた。したがって、平板空気力を用いた場合は 49m/s 付近の風速で連成フラッターが発生しなかったのに対し、測定空気力を用いた場合には連成フラッターが発生する結果になったと推察される。

以上の検討結果より、モノデュオ形式のような新しいケーブルシステムに対しては、初期の検討段階でも平板空気力を用いた検討のみでは不十分で、測定空気力を用いた連成フラッター解析が必要であることを十分に提示できたと考えている。本文が、超長大吊橋の検討に携わる実務技術者や風工学の研究者にとって示唆に富んだ有益な技術資料になることを心から願う次第である。

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) M. A. Astiz and E. Y. Andersen : On Wind Stability of Very Long Spans in Connection with a Bridge across the Strait of Gibraltar, Proc. of The 2nd Symposium on Strait Crossings, Trondheim (Norway), pp.257～264, June, 1990.
- 2) 米田昌弘, 木村公男, 大野克紀, 中崎俊三, 野村国勝 : 3,000m 級吊橋の静的特性と連成フラッター特性に及ぼす各種ケーブルシステムの効果について, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.735～747, 1994 年 3 月.
- 3) 荒居祐基, 宮崎正男 : 超長大吊橋の耐風設計と水平ステイシステムに関する研究, 第 13 回風工学シンポジウム論文集, pp.503～508, 1994 年 12 月.
- 4) 大谷康史, 北川 信, 金崎智樹, 勝地 弘 : 長大吊橋のフラッター限界風速に対するクロスハンガーの改善効果に関する検討, 土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集, I-688, pp.1376～1377, 1995 年 9 月.
- 5) 佐々木 誠, 久保喜延, 山口栄輝, 坂田隆博 : 中央連結ケーブル形式による超長大吊橋の耐風特性, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.841～846, 1996 年 3 月.
- 6) 米田昌弘, 大野克紀, 田巻嘉彦, 木村公男 : 超長大吊橋の連成フラッター特性に及ぼす鉛直ならびに傾斜クロスステイの効果について—中央支間長が 2,500m の偏平箱桁形式吊橋に対する検討—, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.713～724, 1997 年 3 月.
- 7) 前田研一, 岩本政巳, 森園康之, 田平秀和, 長井正嗣, 藤野陽三 : MONO-DUO 形式化とリジッドハンガーによる超長大吊橋の耐風安定化策の実現性, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1199～1210, 1998 年 3 月.
- 8) 田中 洋, 山村信道 : 長大橋梁の非定常空気力係数による連成フラッター解析, 第 11 回風工学シンポジウム論文集, pp.61～66, 1990 年 12 月.
- 9) 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.
- 10) 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.

(1998 年 9 月 18 日受付)