

# 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

宮田 利雄<sup>1</sup>・山田 均<sup>2</sup>・風間 浩二<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 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)

<sup>2</sup>正会員 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)

<sup>3</sup>正会員 工博 住友重機械工業株式会社 総合技術研究所(〒254 平塚市夕陽ヶ丘63-30)

(研究当時 横浜国立大学大学院博士課程(後期))

本論文では、中央支間長が2,000mを超える長大吊橋を対象として、その合理的耐風安定性の改善方法の提案を行っている。長大吊橋においては、その柔構造化に伴ってフラッター発生時の振動モード形に振動成分間の位相差の橋軸方向の変化が顕在化してくる。ここでは、風作用下の振動モード形に着目した構造設計を行うことにより、非定常空気が構造物に与える仕事を低減させる方法の有効性について、試設計吊橋モデルを用いたフラッター解析によって明らかにしている。また、作用する非定常空気の特性による効果の相違を平板空気力とトラス桁の観測空気力との比較で検討し、上記の最適設計には構造物の空気力学的形状を十分再現した非定常空気の導入の必要性を示している。

**Key Words :** *coupled flutter, long span bridges, direct flutter FEM analysis, mode shape control*

## 1. はじめに

明石海峡大橋に代表される長大吊橋は、社会的要請と設計、製作、架設等諸技術の進歩および材料の改善によりその支間長を増大させてきた。また、将来の更なる長大吊橋の可能性を考えると、本州四国連絡橋プロジェクトに次ぐ大型橋梁プロジェクトとして第2国土軸構想に伴う橋梁群の構想が浮び上がってきており、今後も吊橋の最大支間長は大きくなっていくものと考えられる。

また、明石海峡大橋<sup>1)~3)</sup>のみならず、海外の具体的な長大橋プロジェクトにおいても、耐風設計の重要性が認められ、特に連成フラッターに対してはこれが破壊的な応答特性を持つことから、解析的にも実験的にも、より慎重な検討が加えられるようになってきており、空気力学的安定性を高めるための補剛桁の形状や橋梁構造全体系の剛度を高める方策としてのケーブルシステム等が従来のものとは大幅に異なった形式で提案されるに至っている<sup>4)~6)</sup>。しかし、その耐風安定性の検討内容は、フラッター現象の照査については、既往の簡易式を用いたものが多く、柔構造化の進む長大吊橋の複雑な振動性状の影響を十分考慮しているものとは言い難い。また、具体的な耐風安定化対策の検討においても、フ

ラッターの安定化には固有振動数の向上が唯一の目標との旧来の経験/理解に基づいて、固有振動数の向上に力点を置いたものが多く、断面増加やステイケーブルの設置により剛性を高める方法にのみ精力を注いだものがほとんどであり、長大吊橋の3次元的な構造特性・空気力特性を考慮した検討例はきわめて少ない。さらに、その耐風設計手順も静的解析を中心とした断面設計の後にフラッター照査を行い、必要があればフラッター性能の向上を図るとの旧来の方法であり、支間の長大化に伴った設計手順の見直しは行われていない。

このような背景を踏まえ、本研究では、耐風安定性改善をいかに合理的・効果的に実現するかを念頭に、超長大吊橋に発生する連成フラッターの発生メカニズムをその長大構造システムと作用する非定常空気力とを含めた空力弾性問題としてとらえ、構造の振動特性と空気力特性とを勘案した合理的な耐風設計法を提案することを目的とする。具体的な検討の対象構造物としては、上記の設計法の効果を見ることを主眼にし、ここでは現行の長大吊橋の延長で考えた試設計案を用いる。本研究ではこの合理性の追求に論点を絞り、大幅な構造システムの変更や桁形状の変更を仮定しない範囲の設計案に対する検討を実施した。

## 2. 解析手法

連成フラッター解析法には周知の通り、固有振動モード形を用いた解析法を中心に、いくつかの提案がなされている<sup>7) 8)</sup>。これらの手法は、柔構造化が顕著に進んでいない構造に対しての適用を考慮しており、'フラッター発生時(非定常空気力作用下)の固有振動モード形(フラッターモード形)は、対象とする構造の、無風時のいくつかの固有振動モード形の線形和で十分に表現できる'との仮定に基づいている。また、上記の重ね合わせには、多くの場合、最低次の鉛直対称たわみ振動モード形と最低次のねじれ対称振動モード形とが用いられる。

しかし、吊橋構造と非定常空気力から成る空力弾性システムを考えた際には、上記のモード組み合わせは、実際に発生するフラッターモード形の近似値であり、フラッターモード形が十分な精度で表されている範囲でのみ、モード重ね合わせによるフラッター解析法は十分な精度を有しているといえる。

このため、本研究では、フラッター発生時の加振/減衰空気力分布を求めるための風作用下の振動モード形を精度良く求める目的から、以下に示す直接フラッター解析法を採用して解析を進めた。

### (1) 自励空気力の表現

3成分自励空気力は翼理論の拡張で次のように書くことができる。

$$F = \begin{Bmatrix} D \\ L \\ M \end{Bmatrix} = [F_{3DA}] \begin{Bmatrix} y \\ \dot{y} \\ z \\ \dot{z} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$D = \pi \rho b^2 \omega^2 \left\{ D_{yR} y + D_{yI} \frac{\dot{y}}{\omega} + D_{zR} z + D_{zI} \frac{\dot{z}}{\omega} + D_{\theta R} \theta + D_{\theta I} \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right\}$$

$$L = \pi \rho b^2 \omega^2 \left\{ L_{yR} y + L_{yI} \frac{\dot{y}}{\omega} + L_{zR} z + L_{zI} \frac{\dot{z}}{\omega} + L_{\theta R} \theta + L_{\theta I} \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right\}$$

$$M = \pi \rho b^4 \omega^2 \left\{ M_{yR} y + M_{yI} \frac{\dot{y}}{\omega} + M_{zR} z + M_{zI} \frac{\dot{z}}{\omega} + M_{\theta R} \theta + M_{\theta I} \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right\} \quad (2)$$

ここに、D；抗力、L；揚力、M；モーメント、y；鉛直変位\*、z；水平変位\*、θ；ねじれ角度、ρ；空気密度である。(\* 桁半幅 b で無次元化) さらに、調和振動を仮定すると、式(1)は次のように、固有円振動数 ω の入らない形で表現できる。これにより、非定常空気力は換算振動数 k (= ωb/U) と迎角の関数である非定常空気力係数 18 係数と加速度 3 成分とで表現する事ができる。

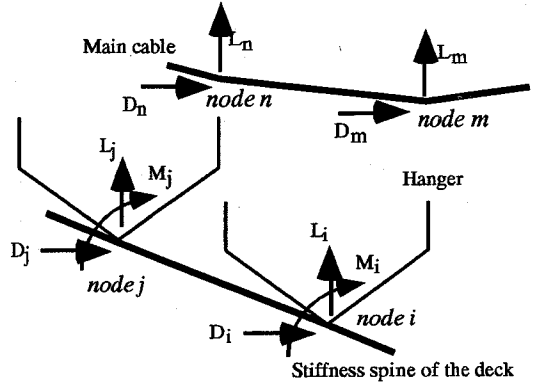


図-1 立体骨組みモデルへの非定常空気力の適用

$$F = [F_{3DA}] \begin{Bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{z} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$[F_{3DA}] = -\pi \rho \begin{bmatrix} b^2 & 0 & 0 \\ 0 & b^2 & 0 \\ 0 & 0 & b^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{yR+i} D_{yI} & D_{zR+i} D_{zI} & D_{\theta R+i} D_{\theta I} \\ L_{yR+i} L_{yI} & L_{zR+i} L_{zI} & L_{\theta R+i} L_{\theta I} \\ M_{yR+i} M_{yI} & M_{zR+i} M_{zI} & M_{\theta R+i} M_{\theta I} \end{bmatrix} \quad (4)$$

### (2) 直接フラッター解析法<sup>9)</sup>

連成フラッターの解析の精度は、フラッターモード形と非定常空気力特性に依存している。これまでの解析で、構造特性の比較的小さな変化(たとえば支点条件)によっても発生するフラッターモード形や根軌跡に顕著な差が生じることが明らかとなって来ている。このような現象を前述のモード重ね合わせによるフラッター解析法を用いて行うためには、解析に先立って、発生するフラッター現象のフラッターモード形を予め知ることが必要となる。このフラッターモード形についての不確定性を排除できることが、以下に示す直接フラッター解析法の最大の利点である。

直接フラッター解析法では、図-1に示すように、有限要素に展開された吊橋モデルの梁部材及びトラス部材の各格点に式(2)或いは(4)で定式化された非定常空気力を作用させる。非定常空気力は換算振動数の関数として与えられるため、解析においては、ある換算振動数 k を仮定しこれに対応する非定常空気力係数を与え、運動方程式を解くことになる。風速との対応は固有値解析の結果として得られる固有振動数 ω と仮定した k とから求めることになる。

すなわち、ある換算振動数 k を仮定して、運動方程式を

$$[[M]]\{\ddot{u}\} + [[K]]\{u\} = [[F_{3DA}]]\{\ddot{u}\} \quad (5)$$

として、下式の複素固有値解析を行う。

$$(([[M]] - [[F_{3DA}]])\{\ddot{u}\} + [[K]]\{u\} = 0 \quad (6)$$

解析の結果として得られる複素ベクトルからフラッターモード形が、複素固有値から各振動モードの有風時の振動数及び減衰率が求められる。着目する振動モードの対数減衰率  $\delta$  は 着目した振動モードの固有円振動数の実数部  $\omega_R$  と虚数部  $\omega_I$  とから

$$\delta = \frac{2\pi\omega_I}{\sqrt{\omega_R^2 + \omega_I^2}} \quad (7)$$

として求められる。

(7) 式の値を適当な換算振動数  $k$  毎に順次求めることによって、着目するモード(換算振動数の変化によりモード形は逐次変化していくが、根軌跡及びフラッターモード形状から関連するモードを結びつける)に対して、風速-減衰率曲線が得られる。

設計風速と対象とする振動モードの固有振動数を勘案しながら、換算振動数  $k$  を順次変化させて、式(6)に対する複素固有値解析を繰り返すことにより、図-2に示すような形で、風速に応じた根軌跡図が得られる。

風速による静的変形が顕著な構造に対しては、さらにこれを考慮した解析が必要となる。すなわち、風による静的変形により、構造側の幾何剛性の変化のみならず迎角の関数である各格点に作用する非定常空気力係数にも変化が生じ、この影響を考慮した解析が必要となる。このため、フラッター解析に先立って、風速を順次変化させた静的変形解析を実施し、各風速毎の変形状態(幾何剛性および補剛桁の迎角分布)を調べ、フラッター解析を行う際、入力として用いる構造側の情報および空気力側の情報にこれを用いることになる。具体的には、仮定した換算振動数と得られた固有振動数及び変形状態との間で収束計算を行うことになる。

この収束計算の結果、各振動モード形に対して、風による静的変形を考慮したフラッター解析結果が得られる。

### (3) フラッター解析結果の評価

長大吊橋に発生する連成フラッターでは、そのフラッターモード形を見ると、橋軸方向に各成分の振動振幅が変化するばかりでなく、その位相特性も橋軸方向に変化する。このことから、空気力が桁になす仕事の分布も一樣あるいは振幅に比例するものではないことがわかる。このため、空気力が桁になす仕

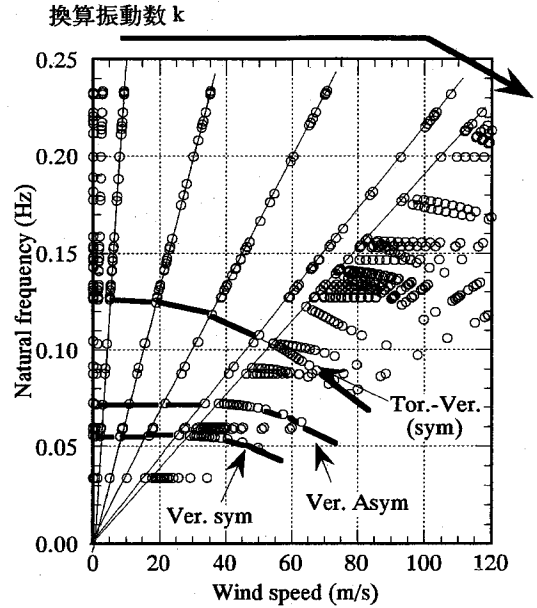


図-2 換算振動数の順次仮定による根軌跡 (風速による各振動モードの振動数の変化)

事の分布を定量的に評価することは、フラッターの発生メカニズムを求める際や耐風安定化対策の最適化を図る際の指標としての価値が大きい。空気力が桁になす仕事の分布は、フラッター解析の結果として得られる複素振動モード形(フラッターモード形)から以下の形で求められる。

非定常空気力が作用する補剛桁のある接点において、鉛直たわみ振動成分  $y$  とこれに位相差  $\beta$  をもつねじれ振動成分  $\theta$  及び位相差  $\gamma$  をもつ水平たわみ振動成分  $z$  とを考える。

$$y = y_0 e^{i\omega t} \quad (8)$$

$$\theta = \theta_0 e^{i(\omega t - \beta)} \quad (9)$$

$$z = z_0 e^{i(\omega t - \gamma)} \quad (10)$$

各位相差は、複素振動モードベクトルから次の式でそれぞれの位相  $\phi_y, \phi_\theta, \phi_z$  を求め、その差から求める。

$$\phi_y = \tan^{-1} \left( \frac{y_I}{y_R} \right) \quad (11)$$

$$\phi_\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\theta_I}{\theta_R} \right) \quad (12)$$

$$\phi_z = \tan^{-1} \left( \frac{z_I}{z_R} \right) \quad (13)$$

連成振動をする桁に空気力がなす仕事は、鉛直成分  $W_L$ 、ねじれ成分  $W_M$ 、水平成分  $W_D$  それぞれ次のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
 W_L &= \oint L_R dy_R \\
 &= \omega^2 \pi \left[ -y_0^2 \overline{L_{yI}} + (\overline{L_{\theta R}} \sin \beta - \overline{L_{\theta I}} \cos \beta) y_0 \theta_0 \right. \\
 &\quad \left. + (\overline{L_{zR}} \sin \gamma - \overline{L_{zI}} \cos \gamma) y_0 z_0 \right] \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_M &= \oint M_R d\theta_R \\
 &= \omega^2 \pi \left[ -y_0 \theta_0 (\overline{M_{yR}} \sin \beta + \overline{M_{yI}} \cos \beta) - \theta_0^2 \overline{M_{\theta I}} \right. \\
 &\quad \left. + \theta_0 z_0 \{ \overline{M_{zR}} \sin (\gamma - \beta) - \overline{M_{zI}} \cos (\gamma - \beta) \} \right] \quad (15)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_D &= \oint D_R dz_R \\
 &= \omega^2 \pi \left[ -y_0 z_0 (\overline{D_{yR}} \sin \gamma + \overline{D_{yI}} \cos \gamma) - z_0^2 \overline{D_{zI}} \right. \\
 &\quad \left. + \theta_0 z_0 \{ \overline{D_{\theta R}} \sin (\beta - \gamma) - \overline{D_{\theta I}} \cos (\beta - \gamma) \} \right] \quad (16)
 \end{aligned}$$

ここに、 $\overline{L_{yR}}, \overline{L_{zR}}, \overline{L_{\theta R}}, \overline{L_{yI}}, \overline{L_{zI}}, \overline{L_{\theta I}}, \overline{M_{yR}}, \overline{M_{zR}}, \dots$  は非定常空気力係数と

$$\begin{aligned}
 &\begin{bmatrix} \overline{D_{yR+i} D_{yI}} & \overline{D_{zR+i} D_{zI}} & \overline{D_{\theta R+i} D_{\theta I}} \\ \overline{L_{yR+i} L_{yI}} & \overline{L_{zR+i} L_{zI}} & \overline{L_{\theta R+i} L_{\theta I}} \\ \overline{M_{yR+i} M_{yI}} & \overline{M_{zR+i} M_{zI}} & \overline{M_{\theta R+i} M_{\theta I}} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \pi \rho b^2 & 0 & 0 \\ 0 & \pi \rho b^2 & 0 \\ 0 & 0 & \pi \rho b^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{D_{yR+i} D_{yI}} & \overline{D_{zR+i} D_{zI}} & \overline{D_{\theta R+i} D_{\theta I}} \\ \overline{L_{yR+i} L_{yI}} & \overline{L_{zR+i} L_{zI}} & \overline{L_{\theta R+i} L_{\theta I}} \\ \overline{M_{yR+i} M_{yI}} & \overline{M_{zR+i} M_{zI}} & \overline{M_{\theta R+i} M_{\theta I}} \end{bmatrix} \quad (17)
 \end{aligned}$$

の関係で結ばれる係数である。

吊橋系に対して、着目した節点に空気力がなす仕事が増振力となるか減衰力となるかは、これらの節点毎の総和

$$W = W_L + W_M + W_D \quad (18)$$

の正/負によって求めることができる。

この値を橋軸方向に順次求めていくことによって、3次元構造物としての吊橋に作用する加振空気力の分布を明らかにすることが可能となる。

### 3. 長大吊橋のフラッター特性に及ぼす桁剛性の単純増加による耐風性向上対策の効果

ここでは、中央支間が2,000m を越える長大吊橋のフラッター特性とこれに対する既往の耐風安定化対策の効果を検討した。具体的には、これらの長大橋に対する耐風安定化対策として比較的效果の大きい補剛桁のねじれ剛性の単調増加の効果の程度を見

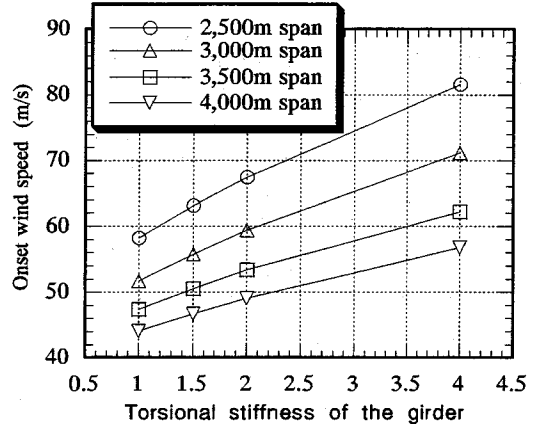


図-3 桁剛性の増加がフラッター発振風速上昇に及ぼす効果

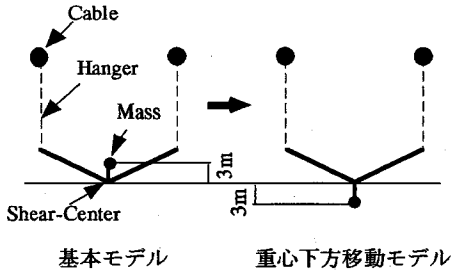
た。フラッター解析では平板空気力（水平変位に伴う空気力は無視）を補剛桁に適用し解析を行った。また、ケーブルおよび桁に作用する準定常空気力についてはこれを無視した。

フラッター解析の結果として、中央支間 2,500m ~ 4,000m の試設計案に対して、桁剛性を基本モデルの1.5倍、2倍および4倍としたものについて、フラッター発振風速を図-3にまとめる。図-3をみると、桁剛性の増加によってフラッター発振風速は上昇しているものの、支間長の増加に伴ってその効果が低減していることが見て取れる。これは、構造システム全体に及ぼす桁剛性の割合が長大化に伴って低下することが主因であると考えられる。

### 4. 風作用下の振動モード形を考慮した耐風安定化対策とその効果

前項で見たように、超長大橋では単純な桁剛性増加による耐風安定化対策の効果が絶対量として大きくないこと、将来建設される超長大橋では経済的な要求が厳しくなりその効率及び合理性がこれまでに増して要求されること等を考慮し、最小限の部材の追加で耐風安定性を向上させる方策を検討した。

これは、フラッター機構を空気力形成の視点で見た際、その加振/減衰力分布を支配する風作用下の複素振動モード形において、その振動成分間の位相差が橋軸方向に変化していることから、この風作用下の振動モード形を積極的に制御することにより非定常空気力に起因する加振空気力の低減を図ろうという発想に基づくものである。



基本モデル 重心下方移動モデル

図-4 補剛桁重心の下方移動

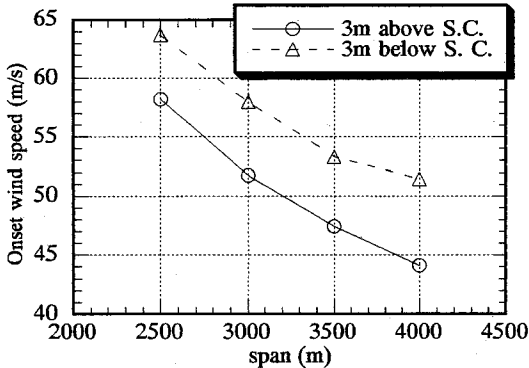


図-5 桁剛性の増加対策がフラッター発振風速の上昇に及ぼす効果

ここでは、幾つかの検討例のうち効果の顕著であった補剛桁重心位置の移動による振動モード形の制御の効果について示す。これは、図-4に示すように、これまでのように上路トラスを仮定し重心を剪断中心より上方に設定した桁モデル（明石海峡大橋クラスのトラス桁で剪断中心より3m程度上方）に対して、下路トラスで同じ剛性が達成されたと仮定して、重心を剪断中心より下方に設定した桁モデルとの比較検討を行った。これは、重心位置を移動することにより、ねじれ成分を中心に他の成分が連成するフラッターモード形を積極的に制御する事を狙ったものである。表1に重心位置の変更が固有振動数に与える影響(2,500m 支間モデル)を示すが、後に示すフラッター発振風速の大幅な上昇にも関わらず、固有振動数、特にフラッターが発生しているモードに大きく関連するねじれ振動モードの振動数に大きな変化は見られない。

(1) 平板空気力を用いた解析

前項と同様に平板空気力を適用して実施したフラッター解析による重心位置の変化がフラッター発振風速に及ぼす効果を 図-5 に示す。支間長の増加に伴ってフラッター発振風速自体は低下しているが、重心位置変更の効果は支間が長大化しても桁剛

表-1 重心位置の変更が固有振動数に与える影響

桁重心位置		3 m上	3 m下
フラッター発振風速		58.2 m/s	63.7 m/s
固有振動数 (Hz)	H1	.0339	.0339
	H2	.0589	.0585
	H3	.0877	.0874
	V1	.0558	.0558
	V2	.0725	.0725
	V3	.1045	.1046
	T1	.1264	.1264
	T2	.1461	.1465

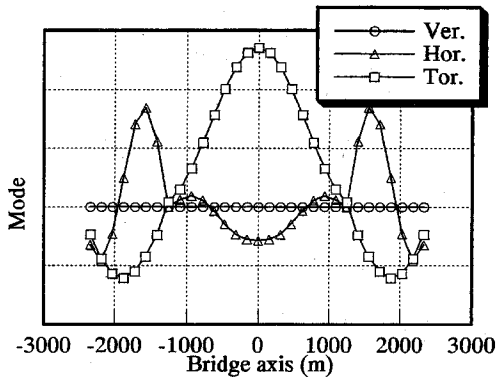


図-6 無風時ねじれ卓越振動モード形 (基本モデル, l=2,500m)

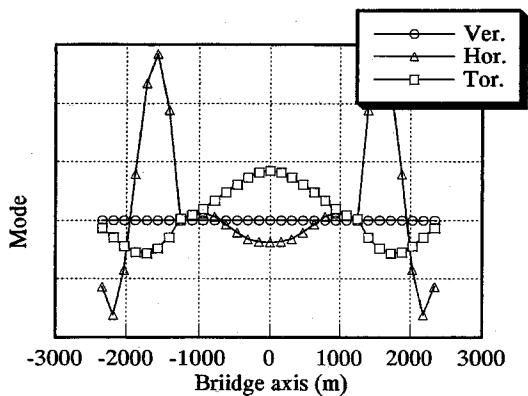


図-7 無風時ねじれ卓越振動モード形 (重心下方移動モデル, l=2,500m)

性の増加対策のような低下は見せず大きな安定化効果を示している。各モデルにおいてフラッターが発生するモード形をみると、支間長によらず鉛直曲げ成分とねじれ成分とが連成したモード形でフラッターが発生している。

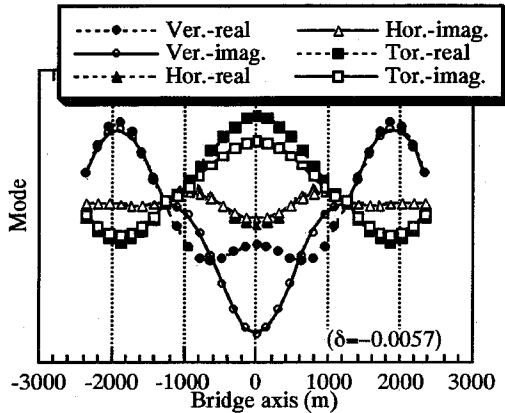


図-8 フラッターモード形  
(基本モデル,  $l=2,500\text{m}$ ,  $U=58.5\text{m/s}$ )

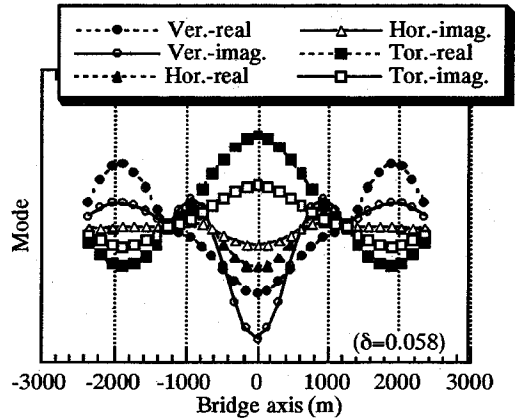


図-9 フラッターモード形  
(重心下方移動モデル,  $l=2,500\text{m}$ ,  $U=58.4\text{m/s}$ )

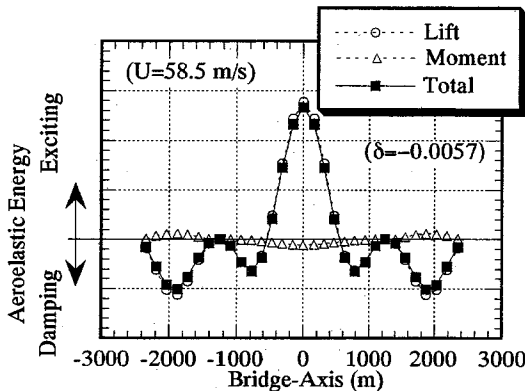


図-10 空気が桁に為す仕事  
(基本モデル, 平板空気力)

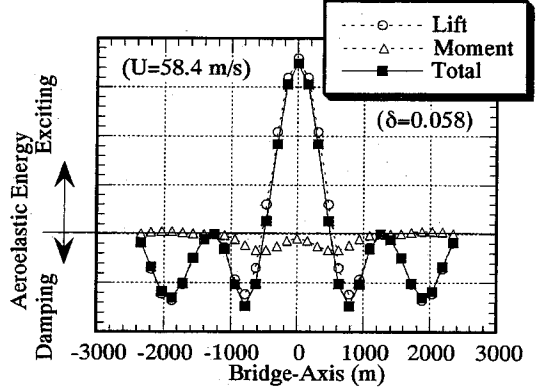


図-11 空気が桁に為す仕事  
(重心下方移動モデル, 平板空気力)

支間長の増大によって、逆対称モードの根軌跡がこれに近づいてくるが逆転は見られない。代表的な例として、 $2,500\text{m}$  支間のものを見ると、無風時のねじれ1次卓越振動モード形(図-6, 7)は、桁重心の下方移動によって水平曲げ成分の連成が大きくなっている。この振動モード形は、風速の上昇に伴う連成空気力によって、それぞれ徐々に振動成分間の振幅比と位相差を変えていき、フラッターが発生する時点ではねじれ成分と鉛直曲げ成分とが大きく連成したものとなる。風速  $58\text{m/s}$  付近のフラッター振動モード形を図-8, 9に示す。さらに、空気が桁に為す仕事(図-10,11)を比較すると、重心移動によって中央径間の主塔近傍の減衰力が大きくなっている。このように、重心の下方移動によってフラッターモード形は大きく変化し、加振空気力の分布の絶対値のみならず正/負減衰の分布範囲にも影響を与え、結果として、大幅な耐風安定化効果をもたらす事が明らかになった。

## (2) 観測空気力を用いた解析

超長大吊橋に発生するフラッターは前項までの検討が示すように、その柔構造に起因した、橋軸方向に分布する振動成分間の位相差が橋軸方向の加振/減衰空気力分布となる複雑なものになっている。この発生機構を勘案し加振空気力の発生を最低限に抑えることをモード形を制御することによって実現する手法がここで提案するフラッターモード形を考慮した耐風安定化対策である。ここではトラス桁に作用する非定常空気力<sup>10)</sup>を用いて解析を実施し、対策のする。解析に用いた桁に作用する非定常空気力成分を表-2に示す。ケーブルについては鉛直および水平運動に伴う準定常空気力を仮定した。

風速に対する両モデルの減衰の変化を図-12に示す。重心の下方移動によって、フラッター発振風速は大幅に上昇している。空気力構成を分析するために、空気が桁に為す仕事を成分毎の橋軸方向の総和として図-13,14に示す。重心の下方移動によって、加振空気力成分の構成に大幅な変化が見られ

る。すなわち、基本モデルでは、風速の上昇に伴い、鉛直 ( $W_D$ )、ねじれ ( $W_M$ ) および水平成分 ( $W_H$ ) が徐々に加振側へと移行し、これらの和がケーブルに作用する減衰力を上回った風速でフラッターが発生する。発振風速以降は、鉛直成分の加振空気力が支配的となってフラッターが発達していく。一方、重心移動モデルでは、桁の鉛直成分の空気力が高風速まで減衰側になっている。また、抗力成分の加振力の割合が大きくなっていることも特徴的である。

ケーブルに作用する空気力は重心が下方に移動したことによって減衰側の値が大きくなっている。

風速の上昇に伴う、各成分の変化を両モデルについて橋軸方向の分布として示したものが 図-15,16 である。基本モデルでは、風速の上昇に伴って鉛直成分は中央径間において徐々に加振側の絶対値を大きくしていき、側径間では風速 70 m/s に向けて減衰側の値が大きくなり、これを最大値として風速の上昇とともに値は 0 に近づく。ねじれ成分を見ると、中央径間で低風速の減衰側から徐々にその値が 0 に近づき風速 70m/s 付近で加振側に転じている側径間では風速 50m/s 程度から加振側になるがその値に大きな発達はない。水平成分は、低風速から中央径間で加振力として作用している。一方、重心移動モデルを見ると、側径間の減衰力が特徴的である。成分別に見ると、鉛直成分は風速の増加に伴って中央径間で増加していくものの、側径間では高風速まで減衰としての値を大きくしていき、これが側径間に作用する減衰力のうち支配的なものとなっている。ねじれ成分をみると、側径間で風速 50 m/s、中央径間で 75 m/s 程度から加振側の空気力として発達する。また、水平成分は、中央径間で風速 70 m/s 程度まで支配的な値をとる。

以上述べたように、重心移動モデルに観測空気力を適用した解析においては、平板空気力を用いた解析と同様に発振風速が上昇することが確認されたものの、新たに考慮した抗力成分が大きな寄与を示していることが確認され、空気力係数によって加振空気力の形成機構が変化することが明らかになった。また、同じ観測空気力を適用した両モデルの間でも、振動モード形の変化によって加振空気力の形成機構が変化している。

このことは、耐風安定化対策の効果の検討時には、作用させる非正常空気力及び構造系の振動特性がともに、そのフラッター解析結果に発生機構自体から影響を及ぼすことを示しており、これらの精度には十分な注意が必要であることを示している。

表-2 解析に用いる桁に作用する空気力成分

	鉛直空気力	ねじれ空気力	水平空気力
鉛直運動	非正常	非正常	非正常
ねじれ運動	非正常	非正常	非正常
水平運動	—	—	—

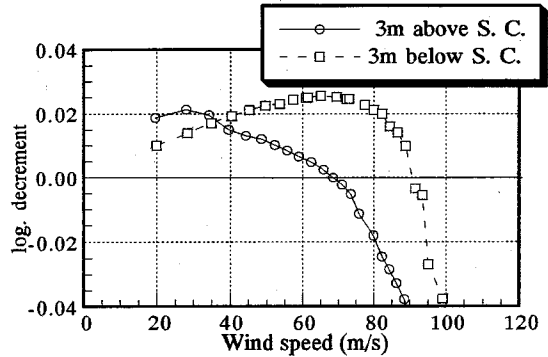


図-12 重心の下方移動の効果  
(観測空気力,  $l=2,500m$ )

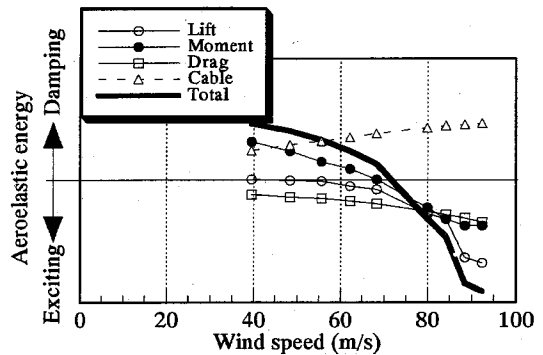


図-13 空気力が吊橋に為す仕事  
(基本モデル)

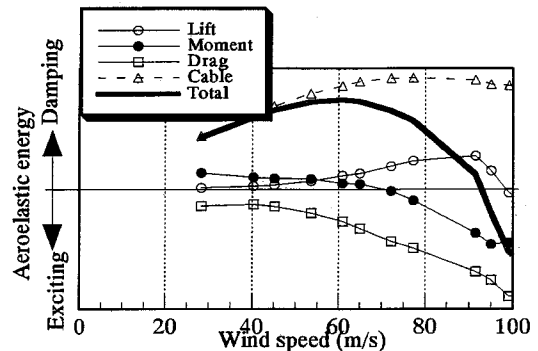
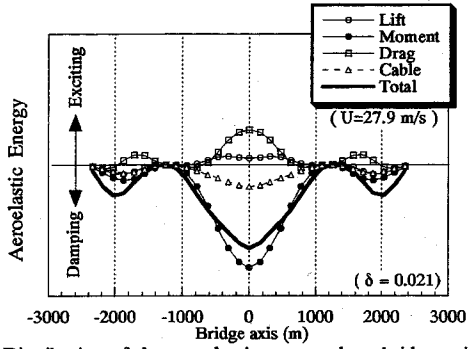
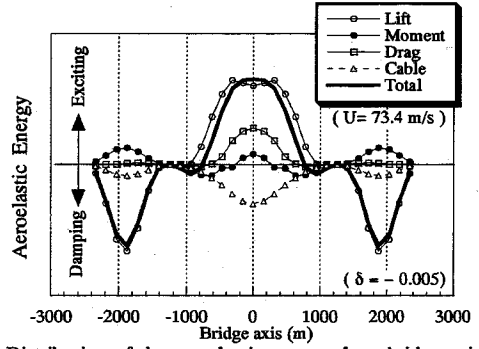


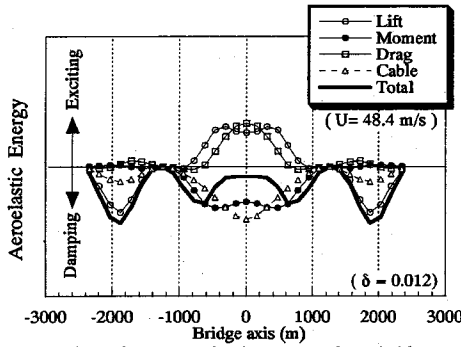
図-14 空気力が吊橋に為す仕事  
(重心下方移動モデル)



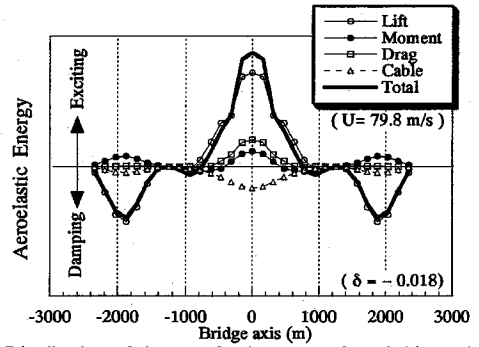
Distribution of the aeroelastic energy along bridge axis



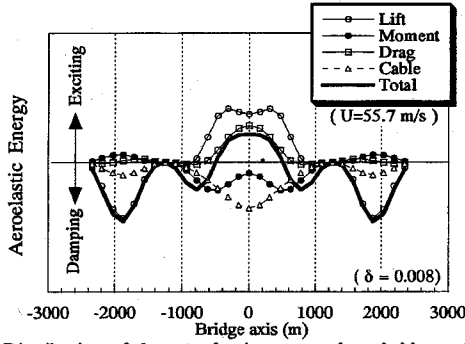
Distribution of the aeroelastic energy along bridge axis



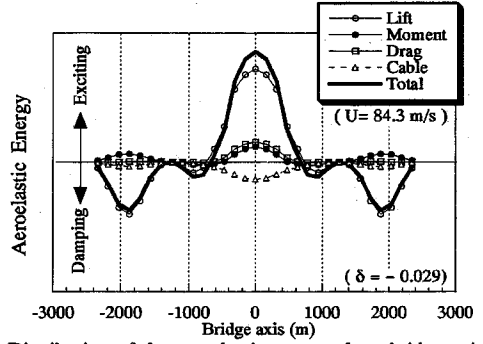
Distribution of the aeroelastic energy along bridge axis



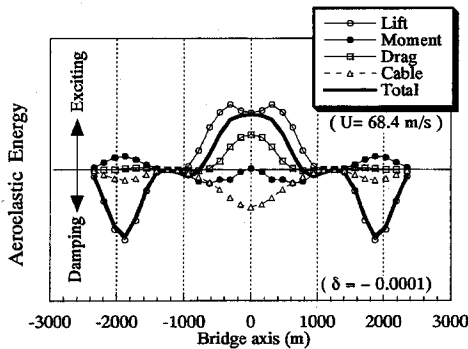
Distribution of the aeroelastic energy along bridge axis



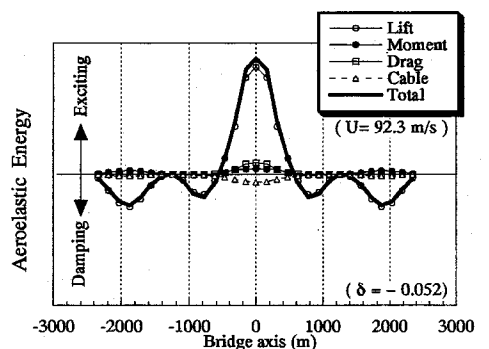
Distribution of the aeroelastic energy along bridge axis



Distribution of the aeroelastic energy along bridge axis



Distribution of the aeroelastic energy along bridge axis



Distribution of the aeroelastic energy along bridge axis

図-15 空気が吊橋に為す仕事の橋軸方向分布  
(基本モデル)



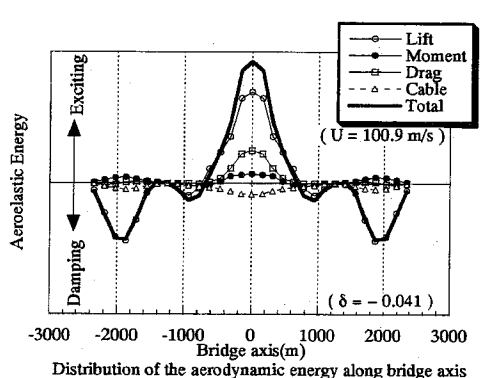
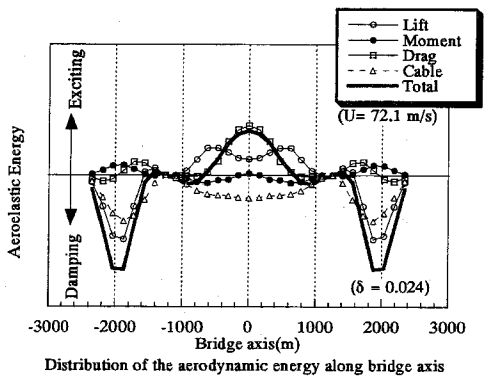
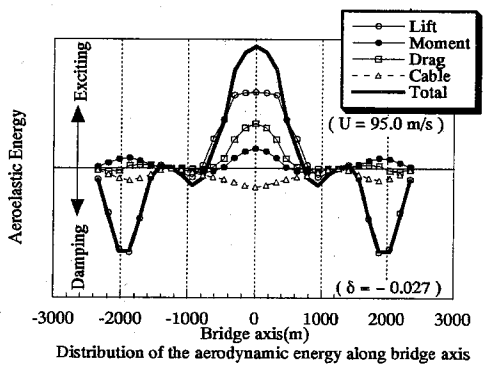
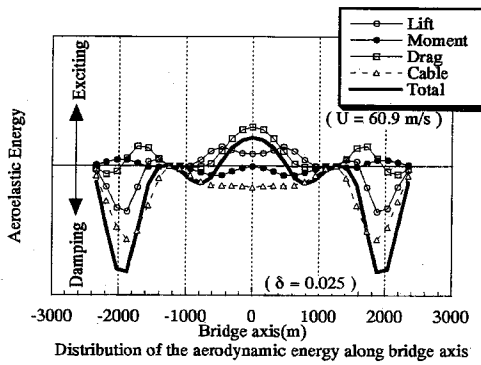
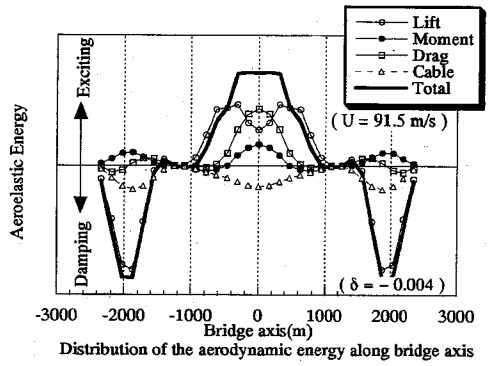
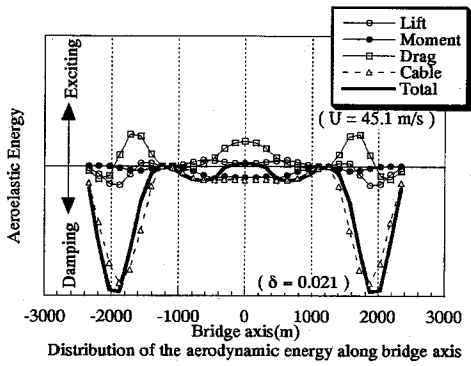
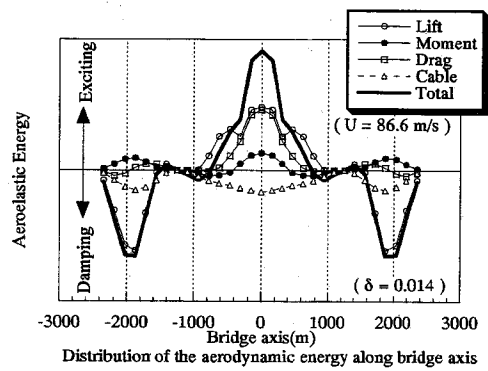
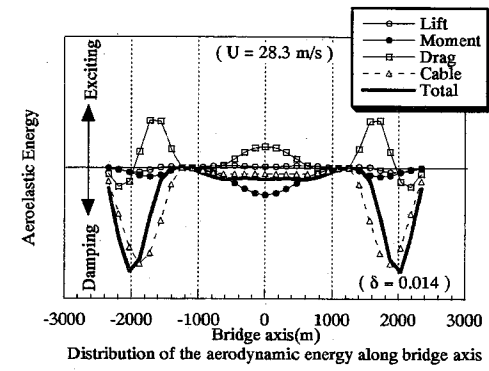


図-16 空気が吊橋に為す仕事の橋軸方向分布  
(重心下方移動モデル)

## 5. まとめ

超長大橋における耐風安定化対策を考える際、桁剛性の単純な増加による対策は、吊橋全体の剛性占める桁剛性の割合が低くなることから、その効果の割合が低下することが明らかになった。これは、超長大橋において、新たな視点に立った効果的な耐風安定化対策が必要であることを示している。

この耐フラッター性能を合理的に向上させるためには、非定常空気力係数とフラッターモード形とで決まる加振空気力の分布を制御することは重要である。本論では、フラッターモード形を積極的に変化させることにより、この制御を試みた。具体的には、補剛桁重心の下方移動によって、大幅な鋼重増を伴わずにフラッターモード形が変化し、系全体に作用する加振空気力を低減させることによってフラッター発振風速を大幅に向上させる効果を与えることが可能となることが確認された。

この様な風作用下の振動モード形を考慮した耐風安定化対策を検討する際、本論で用いた直接フラッター解析法と非定常空気力係数と複素フラッターモード形を用いた励振力分布の評価方法は非常に有用である。

また、トラス桁の観測空気力を適用した解析においては、耐風安定化の対策の効果はフラッター発振風速の変化では平板空気力を用いたものと同様な傾向にあるものの、風速毎の加振空気力分布を見ると大幅に異なったフラッターの発生機構が形成されていることが明らかになった。このことはフラッター解析に用いる非定常空気力の精度が重要であることのみならず、これを用いてフラッター発生機構（加振/減衰力の成分別橋軸方向分布およびこれと振動モード形との関係）を明らかにしながら耐風安定化対策を検討していく必要性を示している。

今後、積極的に風作用下の振動モード形の制御を実施するためには、構造パラメータ解析等によって、如何なる構造要目の変更が有効な制御に繋がるかを検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 宮田, 岡内, 白石, 成田, 奈良平: 明石海峡大橋の耐風設計に関する予備的検討, 構造工学論文集, Vol.33A, 1987年3月.
- 2) 金崎, 宮田, 横山, 保田, 鈴木: 明石海峡大橋のフラッター特性, 第12回風工学シンポジウム論文集 pp.339-344, 1992年12月.
- 3) Miyata, T., Tada, K. and Katsuchi, H.: Wind resistant design considerations for the Akashi Kaikyo Bridge, *Proc. of International seminar on utilization of large boundary layer wind tunnel*, pp.79-100, 1993.
- 4) 山下, 新田, 石井, 川畑: 構造的耐風安定性向上策による超長大橋の試設計, 土木学会論文集, No.453/VI-17, pp.59-68, 1992.
- 5) G. L. Larose, A. Damsgaard, M. Falco, A. Cigada: Comparisons Between Wind Tunnel Tests on a Full Aeroelastic Model of the Proposed Bridge over Stretto di Messina and Numerical Results (Part I), *Proc. of APSOWEIII*, 1993.
- 6) Astiz, M.A.: Wind resistant design of the Gibraltar Crossing Bridge, *Proc. of International seminar on utilization of large boundary layer wind tunnel*, pp.203-221, 1993.
- 7) Agar, T.: Aerodynamic flutter analysis of suspension bridges by modal technique, *Engineering Structures*, Vol.11., pp.75-82, 1989.
- 8) 田中, 山村, 辰巳: 立体振動系と2次元風洞模型試験の相似則, 構造工学論文集 Vol.35A, 1989年3月.
- 9) 宮田, 山田, 太田: 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, No.404/1-11, pp.267-275, 1989.
- 10) 本州四国連絡橋公団: 大型風洞試験作業班検討報告書, 1993年3月.

(1995. 4. 7 受付)

## AEROELASTIC DESIGN CONSIDERATION OF VERY LONG SPAN SUSPENSION BRIDGES BY MODE SHAPE CONTROL

Toshio MIYATA, Hitoshi YAMADA and Kohji KAZAMA

A concept of mode shape control of long span suspension bridges against coupled flutter was presented using Direct Flutter FEM Analysis and its assessment method of distribution of exciting/damping aeroelastic energy along bridge axis. One of the mode shape control is applied to 2,500m span case study model by moving its mass center of the girder. And the repercussions of the difference of flutter derivatives between flat plate and truss girder is discussed.