

ダイバージェンス型吊橋のフラッターについて の 2 , 3 の考察

A STUDY ON THE FLUTTER OF DIVERGENCE-TYPE SUSPENSION BRIDGES

佐野演秀*

宇都宮英彦**

長尾文明***

Nobuhide SANO, Hidehiko UTSUNOMIYA and Fumiaki NAGAO

The flutter characteristics of divergence-type suspension bridges were discussed. This type of bridge was designed by the new concept so that the frequency ratio, $f_{\phi}/f_{\eta} \approx 1$. To ensure the aerodynamic stability of these bridges to the divergence, their decks must be designed so that the aerodynamic derivatives of pitching moment become sufficiently small. In this case, another unstable aerodynamic phenomenon, the torsional flutter, could be observed in wind tunnel tests. This torsional oscillation was followed by large amplitude of bending oscillation. The mechanism of this unstable oscillation was revealed through this study such that the aerodynamic lift induced by the torsional mode exerted as an external force to the bending mode.

1. まえがき

吊橋の2自由度フラッターには本質的に振れフラッターによるものと、曲げ振れフラッターによるものとが存在する¹⁾。また、振れフラッターおよび曲げ振れフラッターは長大吊橋の耐風性に大きく影響すると考えられるものの、それらの発生形態は明確に把握されているとは言い難い。これらの発生形態を明らかにすることは耐風工学的に非常に重要であると思われる。

振れと曲げの振動数比を1.0付近に調節して連成フラッターを回避し、耐風性の確保を図るという新しい発想²⁾に基づいて超長大吊橋の実現を検討する過程³⁾において、残された空力不安定現象すなわちダイバージェンスの発生を抑えるために、吊橋の補剛桁断面の空力モーメント係数曲線の勾配を小さくすることが必要となる。このような条件を満たした吊橋補剛桁断面の空力特性が振れ振動系に対して不安定である(空力モーメント係数曲線の勾配が0または負となる)場合に、振れの振動に伴って大きな曲げ振動が発生することが指摘されている⁴⁾。本論文では、このような特性を有する吊橋を仮にダイバージェンス型吊橋と呼ぶ

* 工修 鹿島建設設計部 (107 東京都港区元赤坂1-2-7)

** 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (770 徳島市南常三島町2-1)

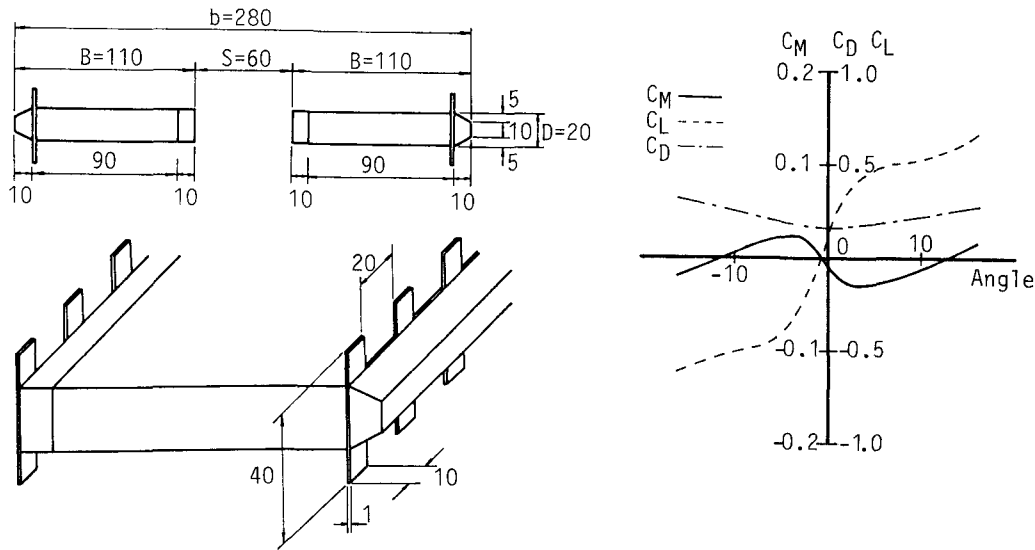
*** 工博 徳島大学講師 工学部建設工学科 (770 徳島市南常三島町2-1)

ものとし、このダイバージェンス型の安定性に係わる振動現象の発生メカニズムを理論的に解明し、その発生メカニズムを踏まえて、この形式に特有の振れフラッターの発生形態についての考察を行うとともに曲げ振れフラッターの発生形態についても若干の考察を加える。

2 振動数比が振れフラッターに及ぼす影響についての実験的考察

2.1 実験模型、装置等

実験に使用した模型断面および断面の空力特性は図1に示すとおりである。 極慣性モーメントを増加させ振れ振動数を曲げ振動数に近づけるために、実験模型は二つの矩形断面により構成され、両矩形断面の間には開口部が設けられている。 さらに、前縁及び後縁には長方形の突起が設置されており、これによって



突起付きフェアリングの状況図 単位(mm)

図1 実験模型断面及び三分力特性

表1 構造諸元

ケース名	振れ自由度			曲げ自由度			振動数比 $f\phi/f\eta$
	振れ剛性 $k\phi$ Kg $\cdot$ m/rad	極慣性モーメント I Kg $\cdot$ m ² /rad ²	固有振動数 $f\phi$ Hz	曲げ剛性 $k\eta$ kgf/m	質量 m kgf $\cdot$ s ² /m	固有振動数 $f\eta$ Hz	
1	0.635	2.188×10^{-3}	2.664	37.735	0.134	2.671	0.999
2	0.848	2.265×10^{-3}	3.091	37.622	0.134	2.667	1.159
3	0.469	2.092×10^{-3}	2.370	37.622	0.134	2.667	0.889
4	0.550	2.188×10^{-3}	2.523	37.793	0.134	2.673	0.944
5	0.767	2.265×10^{-3}	2.929	37.735	0.134	2.671	1.097
6	0.552	2.092×10^{-3}	2.585	37.594	0.134	2.666	0.970
7	0.667	2.241×10^{-3}	2.746	37.397	0.134	2.659	1.033

空力特性をある程度自由に制御することを可能にしている。三分力図より明らかなように、ここでは現象の発生を明確にするために、揚力係数曲線の勾配は正となり曲げ振動系に対しては安定であるのに対して、空力モーメント係数曲線の勾配は負となって振れフラッターの発生を許すような断面が選ばれている。さらにこの現象は断面の質量、極慣性モーメント、曲げと振れの振動数比等に影響されるが、特に振動数比の影響が顕著である。

実験は2自由度バネ支持された剛体模型を用いて一様流中で行われた。実験に用いた構造諸元は表1に示すとおりである。曲げ振動の諸元を一定にして振れ剛性と極慣性を変化させている。実験には徳島大学工学部大型風洞が使用された。測定部は $1.5\text{m} \times 1.5\text{m} \times 5\text{m}$ である。

2.2 振動数比による応答特性の変化

表1に従って振動数比を $f_\phi / f_\eta = 1.0$ 近傍で変化させた応答実験結果の内、代表的なケースについてのV-A図を図2～図5に示す。曲げと振れの振動数比 f_ϕ / f_η を1.0 付近に調節するという新しい発想による吊橋において、空力モーメント係数曲線の勾配が0または負になると、図5の応答図のように、振れ振動の発達と共に曲げ振動もかなりの大きさの振幅を伴って発生することがわかる。V-A図中の1Dの記号を付した曲線は、振れ1自由度の応答のリミットサイクルを示している。

図6に表1の全ケースの風速の変化に伴う位相差の変化を示す。位相差は後の図9に定義するように曲げ

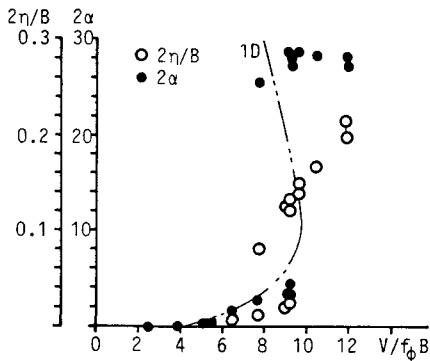


図2 振動応答振幅－風速図 ($f_\phi / f_\eta = 0.889$)

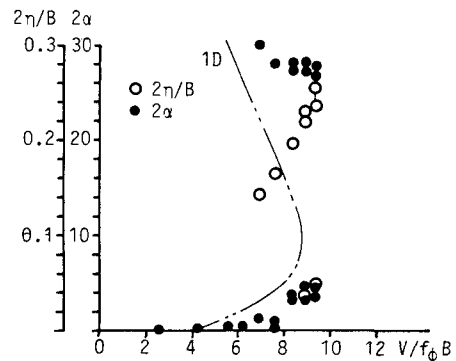


図3 振動応答振幅－風速図 ($f_\phi / f_\eta = 0.970$)

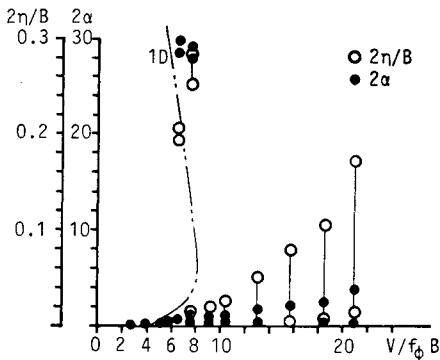


図4 振動応答振幅－風速図 ($f_\phi / f_\eta = 1.033$)

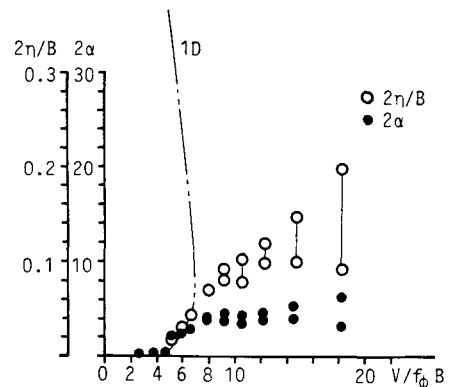


図5 振動応答振幅－風速図 ($f_\phi / f_\eta = 1.097$)

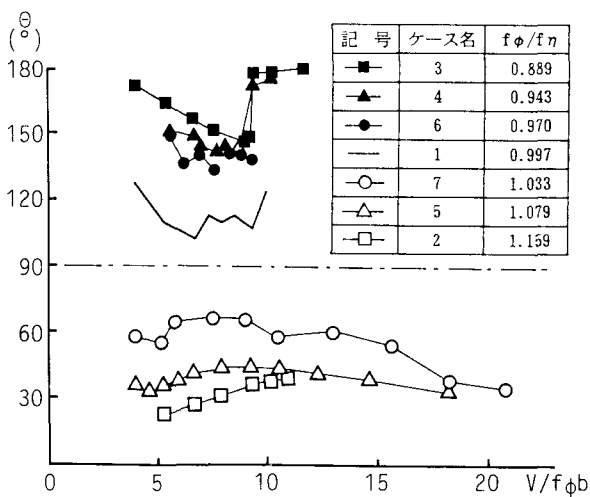


図6 位相差—風速図

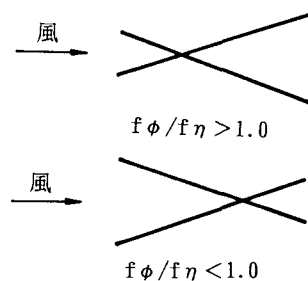


図7 振動モード

変位（下向き正）に対する振れ変位（時計回り正）の遅れを正の値と定義している。振動数比と位相差について見ると、振動数比が1.0 以下の場合には位相差は 90° 以上の範囲で変化し、逆に振動数比が1.0 以上の場合には位相差は 90° 以下の範囲で変化することがわかる。さらに、両者の場合とも振動数比が1.0 に接近するほど位相差は 90° に接近することが確認できる。このことは、振動数比が大きな値から次第に1.0 に近づくと位相差は大きくなるという一般的な説明に従う結果となっており、位相差の値は主に振れと曲げの振動数比と、その振動を支配するモードにより決定されると言える。

次に、V-A 図の特性を位相差との関係から考察すると、振れ1 自由度実験においては位相差に関係無く振れの Self Starting Point が換算風速 8～10 付近で発生する。一方振れと曲げの2 自由度の実験では、振動数比が1.0 より小さい（位相差が 90° 以上）ケース3,4,6 については、換算風速 9～12 の範囲で振れの Self Starting Point が現れ、振れフラッターが発生しているのに対して、振動数比が1.0 より大きい（位相差が 90° 以下）ケース2,5,7 に関しては、模型の振動数比が1.0 に近いほど振れ振幅が抑制されていることが確認できる。さらに風速の上昇に伴い振れ振幅ではなく曲げ振幅が発達する現象が現れていることがわかる。この現象の発生時には振れの Self Starting Point が低風速域で確認できず、あたかも振れフラッターが抑制され曲げ振動に移行したかのような挙動が認められる。

さらに、風洞内の模型の応答を観察することにより、 90° を境界とした位相差の違いによって、振れと曲げの定常振幅の発生時のモードが図7 に示されるように分かれることがわかった。すなわち振動数比が1.0 以上の場合には見かけの回転中心が断面中央から上流側に移動しており、振動数比が1.0 以上の従来型の吊橋の構造特性を対象とした、従来の振れフラッターの研究において指摘されている現象⁵⁾と同じであるが、逆に振動数比が1.0 以下の場合には見かけの回転中心は下流側に移動することがわかる。また、振動数比が1.0 以上の場合にのみ曲げの不安定な振動が発生し、さらに曲げの不安定な振動が発生しているケースでは、振動数比の減少とともに振れの振動が小さくなることを考えると、曲げの不安定な振動の発生機構には振動数比が重要な影響を及ぼしている可能性が高いと言える。

3 曲げの不安定振動の発生メカニズム

振れフラッターが曲げの不安定な振動を誘発するメカニズムを振動数比と位相差に注目し、振れと曲げの

各自由度に対する空気力の関係を準定常空気力として捉えベクトル表示することにより説明する。

断面の空力特性を考慮して振れ1自由度振動時ベクトル図を図8に示す。反時計回りの方向を位相が進んでいる状態と定義すると $\ddot{\phi}$ は加速度、 $\dot{\phi}$ は速度、 ϕ は変位を表すベクトルとなる。さらに、それぞれのベクトルと反対の方向はそれぞれ振動の慣性力、減衰力、復元力の方向を表す。振動が定常振幅の場合にはこのベクトル図は反時計回りの方向に回転することになる。また、振れ振動による自励空気力を考えると、断面の空力特性より空力モーメント係数曲線の勾配は負であることから、振れ振動の回転速度による断面前縁の相対迎角により決定される準定常空気力が発生し、この空気力が系に対して励振力として作用することになる。このことから発生する自励空気力は $\dot{\phi}$ の方向に作用することになり、これを空力モーメント $M\dot{\phi}$ とする。この $M\dot{\phi}$ が構造減衰による減衰力より大きくなると振れフラッターが発生すると言える。また、自励空気力が作用している時の系の振動数は次式により表される⁶⁾。

$$\omega_{\phi} = \sqrt{(\omega_0^2 - 2\rho b^2 U^2 / I \times S\alpha)} \quad (1)$$

ここで

ω_{ϕ} : 空気力の作用時の振れ円振動数 ω_0 : 構造条件より求まる振れ円振動数
 ρ : 空気密度 b : 断面幅 U : 風速
 I : 極慣性モーメント $S\alpha$: 空力モーメント係数曲線の勾配

この式より、 $S\alpha$ が負の場合には準定常的には振動数が高くなることが予測される。このことは振れ剛性を表す復元力が自励空気力により付加されていることを意味しており、 ϕ の方向とは反対方向に空力モーメント $M\dot{\phi}$ が作用していることになる。この空力モーメント $M\dot{\phi}$ は振れの回転変位による迎角により発生するものであり系の減衰力には影響を及ぼさない空気力である。これらのことより振れ自由度の振動に対しては、回転速度による相対迎角により発生する $M\dot{\phi}$ と回転変位による迎角により発生する $M\phi$ との合力としての自励空気力である空力モーメント $M\dot{\phi}\phi$ が作用していると言える。さらに、ベクトル図より $M\dot{\phi}\phi$ は $M\dot{\phi}$ の影響により変位の逆方向との間に若干の位相差を生じることがわかる。

また、三分力図より回転速度による相対迎角と回転変位による迎角により、空力モーメント $M\dot{\phi}$ と $M\phi$ が発生すると同時にこれらの迎角により揚力も発生することがわかる。これらの回転速度により発生する揚力を $L\dot{\phi}$ とし回転変位により発生する揚力を $L\phi$ とする。さらに、これらの揚力の合力を $L\dot{\phi}\phi$ とする。実際

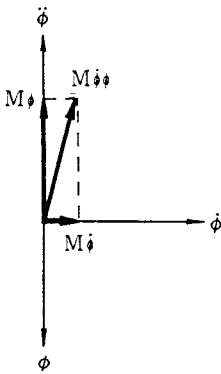


図8 振れ1自由度振動のベクトル図

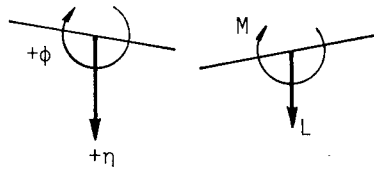


図9 変位および空気力の定義

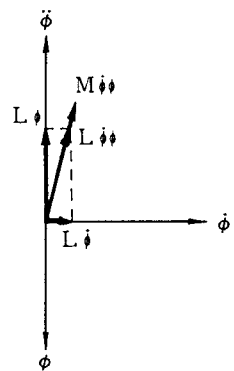


図10 振れ1自由度振動のベクトル図

にはこれらの揚力が断面中央から偏心して作用することにより空力モーメント $M\dot{\phi}$ と $M\phi$ 、さらには $M\ddot{\phi}\phi$ が発生するものと考えられる。

ここで、振れと曲げの変位及び空気力について図9に示すように、振れ変位が時計回りの方向に生じ、曲げ変位が鉛直下向きに変位する場合を正と定める。また、空気力に対しても揚力が鉛直下向きに生じ、空力モーメントが時計回りの方向に生じている場合を正の方向と定義する。

振れ変位が頭下げの状態を負の迎角が付いている場合の空気力を三分力図より準定常的に考えると、迎角が負の場合は時計回りの空力モーメント $M\phi$ が作用し、鉛直下向きに揚力 $L\phi$ が発生することになる。このことから振れの変位と空力モーメントとの間の位相差は 180° となり、空力モーメント $M\phi$ と揚力 $L\phi$ との間の位相差は 0° となる。さらに、このことは相対迎角による $M\dot{\phi}$ と $L\dot{\phi}$ の間にも成り立つことであり、結果的には $M\dot{\phi}\phi$ と $L\dot{\phi}\phi$ との間の位相差も 0° であると言える。これらのことより図10に示すようにベクトル図において振れ振動により発生する揚力 $L\dot{\phi}\phi$ が空力モーメント $M\dot{\phi}\phi$ と同じ方向に同時に作用していることになる。

この揚力 $L\dot{\phi}\phi$ は振れ振動に伴って発生するため、振れの振動数で断面に作用することから曲げ自由度に対して周期的に作用する外力となり、曲げの自由度に対して一種の強制振動を発生させる。一般の強制振動では作用する外力の振動数が系の固有振動数より大きいときは、系の変位の位相が外力の位相に対して 90° 以上遅れ、系の円振動数の方が大きいときは系の変位と外力との位相差は 90° 以下となる。振れと曲げの振動数比が1.0付近の場合は、 $L\dot{\phi}\phi$ が振れ振動に伴って発生し、曲げ自由度に対して振れ振動数で作用すること、および、前述した強制振動の特性から考えると、 $L\dot{\phi}\phi$ の振動数と曲げ振動数の比が1.0に近い値となり共振状態に近くなることにより曲げ振幅が発達することが考えられる。

さらに、振れと曲げの振動数比1.0以上と以下の場合に分けて、 $L\dot{\phi}\phi$ に対する曲げの変位の位相特性を強制振動の特性から考慮して、曲げ振動系をベクトル図に表わすと、振れと曲げの2自由度の振動状態は次の図11のようになる。図中の $\ddot{\eta}$ 、 $\dot{\eta}$ 、 η は振れ1自由度の場合と同様に、それぞれ曲げ1自由度振動の加速度、速度、変位を表している。

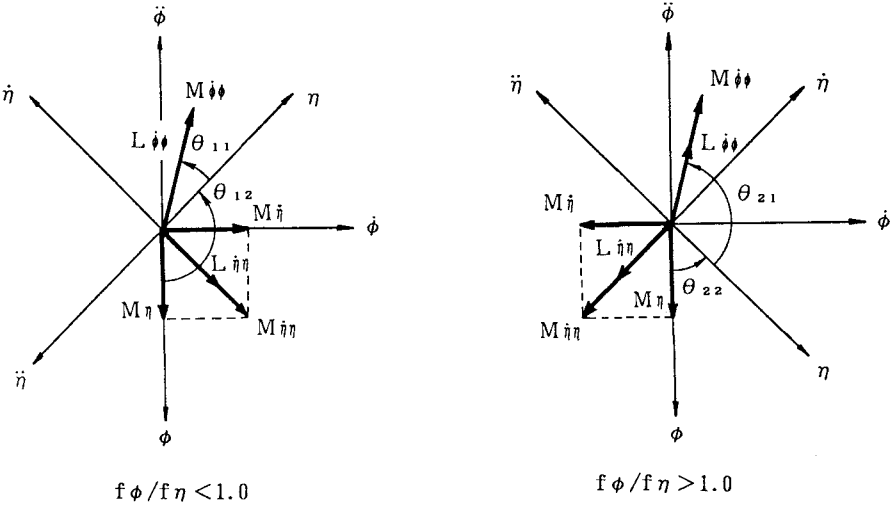


図11 2自由度振動時のベクトル図

振れと曲げの振動数比 f_{ϕ} / f_{η} が 1.0 より小さい場合については、 $L_{\phi\phi}$ の振動数が曲げ振動数より低いことから曲げの変位は $L_{\phi\phi}$ に対して位相が 90° 以下の範囲で遅れて作用することになる。このことはベクトル図において曲げの変位 η が $L_{\phi\phi}$ より位相が 90° より小さい範囲で θ_{11} 遅れて作図されることにより表現されている。発生している自励空気力については、振れ振動により発生した空気力 $L_{\phi\phi}$ は曲げ振動の速度を示す $\dot{\eta}$ 方向の成分を持つことがわかる。 $\dot{\eta}$ 方向と逆の方向が曲げ振動に対する減衰力を示すため $L_{\phi\phi}$ は曲げ振動に対して励振力となって作用し、曲げ振幅を発生させるものと考えられる。また、曲げ振幅が発生する場合には曲げ振動の速度による相対迎角により発生する揚力 $L_{\dot{\eta}\eta}$ が系に作用する。この曲げ振動により発生する揚力 $L_{\dot{\eta}\eta}$ は揚力係数曲線の勾配が正勾配であることより曲げの系に対して減衰力として作用するため、ベクトル図においては曲げ振動の速度方向 $\dot{\eta}$ と反対の方向に示される。曲げの振動が一定振幅を保っているときは曲げの系に対して励振力となっている $L_{\phi\phi}$ の $\dot{\eta}$ 方向の成分と減衰力となる $L_{\dot{\eta}\eta}$ および構造減衰項が釣り合っていると言える。さらに、 $L_{\phi\phi}$ と $M_{\phi\phi}$ の関係と同様に揚力 $L_{\dot{\eta}\eta}$ による空力モーメント $M_{\dot{\eta}\eta}$ がベクトル図において $L_{\dot{\eta}\eta}$ と同方向に作用することになる。この空力モーメント $M_{\dot{\eta}\eta}$ は、振れ振動の速度方向の成分 $M_{\dot{\eta}}$ と、変位方向の成分 M_{η} に分解できる。このうち $M_{\dot{\eta}}$ は振れの系に対して励振力として作用することがベクトル図よりわかる。

これらのことより振れと曲げの振動数比が 1.0 より小さい場合には、連成空気力 $L_{\phi\phi}$ の作用により曲げ振動が一種の強制振動として発生し、また空力モーメント $M_{\dot{\eta}}$ の作用により振れの系の励振力が $M_{\phi} + M_{\dot{\eta}}$ となることにより低風速域で振れフラッターが発生すると言える。

また、振れと曲げの変位の間の位相差がベクトル図より θ_{12} として表されている。これは曲げの変位に対して振れの変位が 90° 以上遅れている状態を示すものであり、図 9 に示した変位と位相差の定義より考えると、この場合の振動モードは図 8 で示した振れと曲げの振動数比が 1.0 より小さい場合の振動モードに相当し、推論が現象に合致していると言え、また、このような振動モードとなることにより、振れ振動に伴って曲げ振動が発生していることの確認ができる。

次に振れと曲げの振動数比が 1.0 より大きい場合について同様の考察を行う。振れの変位により生じる揚力 $L_{\phi\phi}$ は振れの振動数で発生し、曲げの振動数より高くなることから、一般の強制振動における外力と系の振動数比と位相の関係より、曲げの変位は $L_{\phi\phi}$ に対して 90° 以上遅れて生じることになる。ベクトル図では曲げの系が、曲げの変位と $L_{\phi\phi}$ の間に 90° 以上の位相差 θ_{21} の遅れた状態で生じていることがわかる。また、前者と同様に $L_{\phi\phi}$ は曲げ振動に対して励振力として作用し、さらに、準定常的に考えることにより前者と同様に曲げの振動により発生する揚力 $L_{\dot{\eta}\eta}$ および空力モーメント $M_{\dot{\eta}\eta}$ が $\dot{\eta}$ と反対方向に作用する。ベクトル図より空力モーメント $M_{\dot{\eta}\eta}$ の分力 $M_{\dot{\eta}}$ は ϕ と反対方向に作用することになり、振れ振動に対して減衰力として作用することがわかる。

これより、振れと曲げの振動数比が 1.0 より大きい場合には前者と同様の理由で曲げ振動が発生し、 $M_{\dot{\eta}}$ の作用が振れ振動系に対して減衰力となることから振れ振動系に対する励振力は $M_{\phi} - M_{\dot{\eta}}$ となり、振れ 1 自由度系で作用する励振力より小さくなり、低風速域で振れフラッターの発生を回避し、振れ振動に伴う強制外力による曲げ振幅が発達するものと言える。

さらに、振れと曲げの変位の位相差は θ_{22} により表され、振動モードは図 7 に示される振動数比が 1.0 以上の場合の振動モードと一致することがわかる。

4 振れフラッターの発生形態

以上の考察より振動数比が 1.0 付近で生じる振れフラッターについては、振れ振動と共に曲げ振動が発生

するメカニズムを説明することができた。さらに、このことは振動数比が2.0程度となる通常の吊橋のような特性を持つ断面においても同様のことが成り立つと考えられる。すなわち、振動数比が1.0より大きく、位相差が 0° または 180° 付近の小さい場合にも強制振動としての曲げ振動が発生することにより、振れ振動の回転中心が断面中央より前縁側に移動しているように見えると考えられる。このように、2自由度に支持された系の振れフラッターにおいては、断面中心を回転中心とする振れ振動に曲げ振動が伴って発生し、その結果、振れ振動の回転中心が見かけ上移動して見えている可能性が高い。

5 曲げ振れフラッターの発生形態

さらに、曲げ振れフラッターの発生形態を振れフラッターの場合と同様にベクトル図により考察する。曲げ振れフラッターの発生する翼又は平板状の構造物において、その断面の空力特性は振れフラッターの発生し易い断面とは異なり、図12に見られるような特性を示す。すなわち、揚力係数曲線の勾配及び空力モーメント係数曲線の勾配が共に正勾配であり、各系の1自由度での振動では作用する空気力が準定常的には減衰力となるため、発散振動は発生しないと言える。

2自由度振動系においてのみ発散振動が発生する本質的な曲げ振れフラッターは、図12のような空力特性を持つ断面において、振動数比が1.0よりある程度大きい場合に発生すると言える。そこで、このような空力特性と構造特性を踏まえて、曲げ振れフラッターの発生形態を次のように考えることができる。

まず、振れ1自由度の場合を考える。この場合、空力モーメント係数曲線の勾配 S_α が正勾配であることより、振れの速度項に比例する空気力 $M\dot{\phi}$ は系に対して減衰力として作用する。また、式(1)より空力モーメント係数曲線の勾配が正の場合には振動数が低下することがわかる。これより、変位項に比例する空気力 $M\phi$ は系の剛性を低下させる方向に作用することになる。これをベクトル図で表すと図13のように示され、空力モーメント $M\dot{\phi}$ の作用方向が S_α が負勾配の場合と逆方向に作用することがわかる。このとき空力モーメント $M\dot{\phi}$ に伴って揚力 $L\dot{\phi}$ も同方向に発生することになる。また、曲げ1自由度系では揚力係数曲線の勾配が正勾配であるために、速度項に比例する揚力 $L\dot{\eta}$ が系に対して減衰力として作用している。さらに曲げの変位は空気力の発生にはあまり関与しないために発生する揚力は $L\dot{\eta}$ のみとなっている。

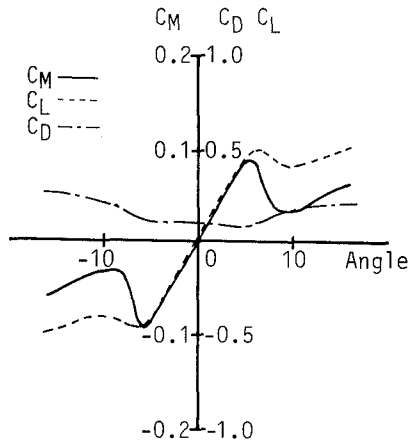


図12 三分力図

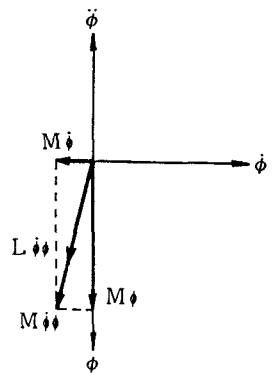


図13 振れ1自由度振動のベクトル図

曲げ振れフラッターの発生時には振れの振動数が低下し、曲げの振動数が上昇することにより両者の振動数が一致して連成振動となる。この場合に、振れと曲げの位相差は振動数比に影響され、定常振動時には振動数比が1.0であることより位相差は 90° 付近の値とならなければならない。しかし、多くの場合に位相差が 90° よりかなり小さく現れるのは、曲げ振れフラッターにおいても振れ振動に対して曲げ振動が一種の強制振動として発生すると仮定すれば説明できる。

これらのことを念頭に置いて曲げ振れフラッターの発生形態をベクトル図で示すと図14のように表すことができる。このときの曲げの変位は強制振動の特性より、振れ振動に伴って発生すると考えることができる。このときの曲げの変位は強制振動の特性より、振れ振動に伴って発生する揚力 $L\dot{\phi}$ より 90° 以上遅れて位相差 θ_{31} で発生することになる。このとき、2自由度系に対して連成空気力となる、振れ振動に伴い発生する揚力 $L\dot{\phi}$ 及び曲げ振動に伴い発生する空力モーメント $M\dot{\eta}$ は、それぞれ曲げ、振れのモードの速度方向に作用することにより励振力となることがわかる。これらの励振力が、各モードに減衰力として作用する非連成空気力 $M\dot{\phi}$ 、 $L\dot{\eta}$ より絶対値で大きくなることにより曲げ振れフラッターが発生すると説明できる。また、このときの振れと曲げの変位間の位相差は θ_{32} として示される。図9に示される変位の定義に従えば、 θ_{32} は 90° 以上となることから、見かけの回転中心が後縁側に移動した振動モードとなると言える。

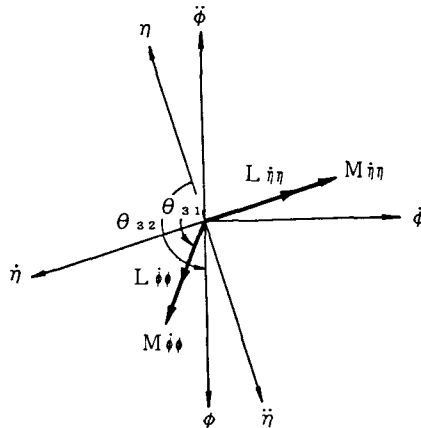


図14 2自由度振動時のベクトル図

6 結論

振れと曲げの振動数比を1.0付近に設定した長大吊橋において発生する振動現象の研究を行う過程で、吊橋の2自由度フラッターである振れフラッターと曲げ振れフラッターの発生形態をベクトル図で表すことにより考察し、比較を行った。本研究で得られた結果を次に述べる。

1. 実験結果を分析することにより、振れフラッターの振動モードは、振れと曲げの振動数比により支配され、振動数比1.0を境に見かけの回転中心が断面中心より前縁側、後縁側に偏心することにより変化することがわかった。
2. 振れフラッターにおいては、振れと曲げの振動数比（位相差）が小さい場合においても、振れ振動に伴って曲げ振動がある種の強制振動的に発生し、見かけの上で2自由度フラッターとなっている可能性が高い。
3. 曲げ振れフラッターも振れフラッターと同様に振れ振動に対して曲げ振動が一種の強制振動として

発生することにより、各系に作用する連成空気が励振力となって、2自由度のフラッターとして発現している可能性が高い。

ただし、本論は空気を準定常的に考えており、流れの遅れの効果を考慮していないところに若干の問題があると思われる。今後の課題として、非定常空気を考慮したフラッターの発生形態を理論的に説明すると共に、実験により推論の妥当性の確認を行い、2自由度フラッターの発生形態を解明する必要がある。

参考文献

- 1) 中村泰治, 吉村 健: 吊橋断面の2自由度フラッタについて, 土木学会論文報告集, 第226号, 1974.
- 2) Richardson, J.R. : The Development Of The Concept Of The Twin Suspension Bridge, NMI, R125, Oct, 1981.
- 3) Utsunomiya, H., et al: The Aerodynamic Properties of Divergence Type Suspension Bridge, Proc. I Int. Conf. on Flow Induced vibrations, May, 1987, Bowness-on-Windermere.
- 4) 川上剛司: ダイバージェンス特性を利用した超長大吊橋の耐風性, 徳島大学修士論文, 1989.
- 5) 中村泰治, 吉村 健: 既出.
- 6) 京都大学工学部土木工学教室橋梁工学研究室: 長大つり橋の自然強風に対する応答特性に関する研究, 昭和51年3月.

(1991年9月30日受付)