

吊橋断面の2自由度フラッタについて

ON THE BINARY FLUTTER OF SUSPENSION
BRIDGE SECTIONS

中村 泰治*・吉村 健**

By Yasuharu Nakamura and Takeshi Yoshimura

1. ま え が き

吊橋は一般に多自由度系であり、風によるそのフラッタもしたがって多自由度フラッタである。ところが、吊橋は橋軸方向に細長く、断面もほぼ一様であるので、吊橋のフラッタは、系を単純化した二次元断面に生ずるフラッタによってその基本的理解を得ることができる。いわゆる部分模型による研究を通じ、吊橋の耐風安定性に関する多くの重要な知見が得られたことは周知のとおりである。

いま、ばね支持部分模型に対して、流れに直角方向の上下変位（以下に曲げ変位と略称する）および断面の特定点まわりの回転変位（以下にねじり変位と称する）とのみを許せば、系は曲げ—ねじり2自由度系である。さらに系を単純化して曲げあるいはねじり変位を拘束すれば、系はそれぞれ、ねじりあるいは曲げの1自由度系となる。このような2自由度系あるいは1自由度系に発生するフラッタがそれぞれ2自由度フラッタでありまた1自由度フラッタである。

本論文は吊橋断面に生ずる2自由度フラッタの発生機構について考察する。周知のとおり、多自由度フラッタは別に連成フラッタ (coupled flutter) あるいはクラシカルフラッタ (classical flutter) ともいわれ、特に、曲げ—ねじり2自由度系では曲げ—ねじりフラッタとよばれている。ところで、普通、曲げ—ねじりフラッタあるいは一般に連成フラッタにおいては、変位を拘束して1自由度系とするとき振動は減衰し、2自由度以上の変位を許してはじめて自励振動が発生すると説明されている。すなわち、多自由度フラッタは自由度間の連成作用、特に、自由度間の位相差の存在が原因となって空気

力が正の仕事をし、自励振動が発生するといわれる¹⁾。航空機の翼などに生ずる多自由度フラッタはすべてこのようなフラッタである。ところが、吊橋断面のような非流線型物体においては、2自由度フラッタの発生がみられる一方、変位を拘束するとき、しばしば曲げあるいはねじりの1自由度フラッタが発生するので事柄がやや異なってくる。

一般に、補剛トラス吊橋断面において、床版の幅員に比べその両縁部の縦桁、地覆などの高さが小さい場合とか、あるいはプレートガーダー形式の吊橋断面でも桁高が比較的低い場合には、純曲げフラッタ (ギャロッピング) の可能性は小さい。したがって、問題は純ねじりフラッタとの関連である。すなわち、吊橋断面の2自由度フラッタの中には、本質的に曲げ—ねじりフラッタに属するもののほか、本質的にねじり1自由度フラッタとみなされるものがあるであろう。本論文では単純な吊橋断面模型につき、このような観点より模型に生ずる2自由度フラッタの分類を試みる。実橋断面、特に補剛トラス吊橋断面の2自由度フラッタが上記のいずれの分類に入るかを知ることは興味深く、また、耐風設計上重要である。なぜならば、上記二種類のフラッタの発生機構はそれぞれ異なるものと考えられ、したがって、それらのフラッタに対する耐風設計の指針も自ら異なると考えられるからである。

なお、この問題は最初、Scruton²⁾ により提起され、第1回耐風国際会議において話題にされた^{3), 4)}。その後も折にふれて論議の対象となっているようであるが⁵⁾、いまだ問題の論点が明確にされたといえないようである。

2. 吊橋断面の2自由度フラッタの分類

吊橋断面のフラッタについては、宮田・岡内による振動性状による分類⁶⁾、田中・伊藤による非定常空気力特

* 正会員 工博 九州大学教授 応用力学研究所

** 正会員 工修 九州大学助手 応用力学研究所 (現在九州大学大学院 博士 課程)

性にしがった分類⁷⁾のほか、特に平板状構造物に対しては、白石による Routh-Hurwitz の安定判別に基づく安定性の考察がある⁸⁾。しかし、ここでは、まえがきに述べた見地よりフラッタの発生機構に基づく分類を試みる。

図-1のように、座標基準点を吊橋断面の中央1点にとり、その基準点における曲げおよびねじり変位をそれぞれ $h(t)$ およ

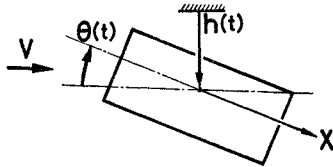


図-1 吊橋断面の曲げおよびねじり変位

び $\theta(t)$ とする。 t は時間である。いま、この2自由度系がある風速で2自由度フラッタを生じたとし、簡単のため、次式で示す振動数 ω の定常振動を仮定する。

$$h(t) = h_0 \sin \omega t \dots\dots\dots (1)$$

$$\theta(t) = \theta_0 \sin(\omega t - \varphi) \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{h_0}{\theta_0} = X_0 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 h_0 および θ_0 は振幅、 φ は曲げおよびねじり変位間の位相差を表わし、 X_0 は定数とする。このとき、次の場合が考えられる。

(1) $\varphi = 0$

いま、フラッタにおいて $\varphi = 0$ 、すなわち、曲げ-ねじり変位間に位相差がなかったとする。一般に、曲げ-ねじり2自由度系において、 X 軸上の任意の点 X における曲げ変位 $\hat{h}(t)$ は、微小変位の仮定のもとで、

$$\hat{h}(t) = h(t) + X\theta(t) \dots\dots\dots (4)$$

とかける。したがって、 $\varphi = 0$ の成立する場合に、 $X = -X_0$ における曲げ変位を考えると、 $\hat{h}(t)$ は振動の1サイクル中に常に0である。換言すれば、 $X = -X_0$ は不動点であって、系の振動は $X = -X_0$ を中心とする純ねじり振動となる。したがって、この不動点をあらかじめ固定して風を流し、その風速を2自由度フラッタの発生時と同じくすれば、結果は両者で同一であって、系は $X = -X_0$ を中心とするねじり1自由度フラッタを示すことになる。この意味で、もとの2自由度フラッタは本質的にねじり1自由度フラッタであったといえる。

(2) $\varphi \neq 0$

もし曲げ-ねじり変位間に0でない位相差があれば、振動の1サイクル中に $\hat{h}(t) = 0$ を恒等的に満足する X の値はない。すなわち、振動系に不動点は存在しない。問題は、この0でない位相差がフラッタの発生に本質的に必要かどうかをみることにある。通常、位相差の数値が小さい場合が多く*、まず、この場合を考察する。このとき、振動は、一見、 $X = -X_0$ を中心とするねじり振

動に類似するので、以下に、 $X = -X_0$ を見掛けの不動点とよぶ。そこで、もし、見掛けの不動点付近を固定してすべての振動が正減衰を示すならば、もとの2自由度フラッタは、本質的に曲げ-ねじりフラッタであったといえる。

次に、自由度間に位相差は存在し、なお、見掛けの不動点付近を固定してフラッタの発生をみる場合がある。この場合は、本質的にねじり1自由度フラッタを生ぜしめる要因と本質的に曲げ-ねじりフラッタを生ぜしめる要因（これらの詳細については本節後半に考察する）とがともに2自由度フラッタの発生に寄与しているものと考えられる。そして、その二つの要因の寄与の量的差異によって、フラッタの型が決定される。いずれの要因の寄与が支配的であるかをみるために、ここでは系の応答の大きさを取上げよう。

もし、1自由度フラッタにおける応答が2自由度フラッタにおけるそれと比較して極端に小さいならば、もとの2自由度フラッタは、やはり、本質的に曲げ-ねじりフラッタであったといえることができる。逆に、前者が後者と同程度あるいはそれ以上になったならば、2自由度フラッタは本質的にねじり1自由度フラッタであると結論してよい。さらに、前者が後者に比して小さいが、なお、極端に小さくない場合もあり得る。このような場合、2自由度フラッタの発生に対して、二つの要因が同程度に寄与しているものと考えられ、発生機構上、そのようなフラッタは中間型であるというべきであろう。

最後に、位相差の数値が必ずしも小さくない場合を考える。もし、基準軸上の任意の点を固定したねじり1自由度系がすべて正減衰を示すならば、もとの2自由度フラッタは、やはり、本質的に曲げ-ねじりフラッタに属する。他の場合、すなわち、1自由度フラッタも同時に発生する場合は、前述の応答の比較による2自由度フラッタの分類方法は必ずしも適用できない。なぜならば、位相差の数値が大きくなると、見掛けの不動点を固定した1自由度系の振動モードが2自由度系の振動モードに近似するという仮定が成立しなくなるからである。このような場合も含めて、フラッタの分類を疑義なく行うには、本節後半の議論をまたなければならぬ。なお、次節に述べるように、分類(1)はむしろ例外的であり、実際のフラッタはほとんどすべて分類(2)に属することをことわっておきたい。

上述の、本質的にねじり1自由度フラッタと本質的に曲げ-ねじりフラッタの相違を、エネルギー方程式を用いて考察してみよう。Duncan⁹⁾ にしがたい、流れの中

* 一般に、位相差の大きさは、断面形状のほか、質量比、曲げ-ねじり振動数比ならびに構造減衰による。このうち、特に、曲げ-ねじり振動数比の影響が大きく、この値が1に近くなると、位相差の数値は大きくなる。

におかれた多自由度系の運動方程式を次のようにかく。

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = 0 \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $q(t) = \{q_i(t)\}$, $i=1, 2, \dots, n$, は一般化座標ベクトルであり、マトリックス A , B ならびに C はそれぞれ、空気力の寄与も含めた質量、減衰ならびに剛性マトリックスである。簡単のため、以下では構造減衰のない系を考えることにすれば、 B は空気力の寄与のみとなる。

次に、一般化された運動エネルギー、散逸関数ならびにポテンシャルエネルギーをそれぞれ、

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{1}{2} [\dot{q}' A \dot{q}] \\ F &= \frac{1}{2} [\dot{q}' B \dot{q}] \\ V &= \frac{1}{2} [q' C q] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

で定義する。ただし、ダッシュ(')は行ベクトルを示す。式(5)の両辺に \dot{q}' を左より掛けて若干の整理を行えば、系の全エネルギー $E=T+V$ の時間的変化として次式を得る。

$$\frac{dE}{dt} = \dot{E} = -[\dot{q}' B \dot{q} + \dot{q}' C q] \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $B = B_1 + B_2$ および $C = C_1 + C_2$ とかき、 B_1 , C_1 ならびに B_2 , C_2 をそれぞれマトリックス B および C の対称成分および反対称成分 (skew-symmetric) とする。このとき、式(7)は

$$\frac{dE}{dt} = \dot{E} = -[\dot{q}' B_1 \dot{q} + \dot{q}' C_2 q] \dots\dots\dots (8)$$

とかける。特に、 C_2 は空気力のみよりなり、構造力の寄与はないことに注意されたい。いま、フラッタの1サイクルにおけるエネルギーの増分 ΔE を求めると

$$\Delta E = - \int_0^{2\pi/\omega} [\dot{q}' B_1 \dot{q} + \dot{q}' C_2 q] dt \geq 0 \dots\dots\dots (9)$$

となる。特に、振動の発散がゆるやかであると仮定して $q(t)$ を正弦振動で近似することとする。 $q(t) = \{Q_i \sin(\omega t + \varphi_i)\}$ (ただし、 Q_i , φ_i はそれぞれ振幅と位相を表わす) とかき、また、 $B_1 = [b_{ij}^{(1)}]$, $C_2 = [c_{ij}^{(2)}]$ と記して、式(9)を書き改めると、

$$\Delta E = -\pi \sum_i \sum_j Q_i Q_j [b_{ij}^{(1)} \omega \cos(\varphi_i - \varphi_j) - c_{ij}^{(2)} \sin(\varphi_i - \varphi_j)] \geq 0 \dots\dots\dots (10)$$

となる。式(9)あるいは(10)は多自由度フラッタ発生の必要条件を示しているわけである。

さて、式(8)より多自由度系のエネルギー授受に二つの形式があることを指摘することができる。その一つは減衰マトリックス B_1 に関係するものであり、他の一つは剛性マトリックス C_2 に関係した形式である。前者は1自由度系にもみられるものであるが、後者は多自由度系に特有なものである。これに対応して多自由度フラ

ッタには、発生機構の異なる二種類のもが存在することになる。すなわち、その一つは、式(9)および(10)において、右辺のかつこ内第1項が支配的であるものであり、他の一つは第2項が支配的となって発生するものである。本論文ではこれらをそれぞれ、本質的に1自由度フラッタおよび本質的に曲げ-ねじりフラッタとよぶわけであるが、この分類は、本節前半に述べた2自由度フラッタの分類に対応するものである。以下にそれを説明しよう。

既述のように、 B_1 および C_2 は空気力のみ寄与である。これらのマトリックスの各要素はそれぞれ、 ρV および ρV^2 (ρ は空気密度、 V は風速) に比例するものであって、それゆえに、一般に高風速で発生する多自由度フラッタにおいては、式(9)あるいは(10)の右辺かつこ内第2項が支配的であるといわれている。式(10)より明らかなように、この項は自由度間の位相差の存在と結びついている。すなわち、航空機の翼などに発生する多自由度フラッタが、自由度間の位相差の存在によって発生するといわれる所以である。しかし、一般に非流線型物体を含む構造物を対象とするとき、式(10)の右辺かつこ内第1項を無視することは必ずしも許されない。むしろ、式(10)の右辺かつこ内第1項が支配的となる場合がしばしばあるわけである。たとえば、フラッタにおいて自由度間の位相差がすべて0であれば、式(10)の右辺かつこ内第2項は消え、第1項のみが残る*。このときの振動は、 $q(t) = \{Q_i \sin \omega t\}$ となるわけであって、あらかじめ適当な $n-1$ 個の線型拘束を加えて1自由度系とし、その後、風を流して風速を等しくすれば、系の応答は多自由度系の場合となんら変わるところがない。このような多自由度フラッタを本質的に1自由度フラッタとよぶ所以である。

もし、空気力係数 B_1 , C_2 ならびにフラッタにおける振動モードを知ることができれば、式(10)の右辺かつこ内第1項と第2項を定量的に比較することによって、多自由度フラッタが本質的に1自由度フラッタに属するか、あるいは本質的に曲げ-ねじりフラッタに属するかを決定することができる。ただし、フラッタにおける振動モードのみを知って、その型をある程度決めることもできる。本節前半に記した分類方法がそのようなものであった。多自由度フラッタについても方法は全く同様であって、要するに、適当な $n-1$ 個の線型拘束を加えて作った1自由度系における応答と多自由度系における応答とを比較検討すればよい。その詳細については、ここでは省略する。

* この場合でも、空力連成作用、特に C_2 のフラッタへの影響が全く無視できたことにはならない。たとえば、式(9)あるいは(10)の右辺かつこ内第1項に対しても、その影響は振動モードへの影響として間接的に存在する。

3. 実験結果ならびに考察

(1) 模型と実験装置

使用した風洞は九州大学応用力学研究所所属の大型低速風洞であり、測定部の大きさは、たて×よこ×長さ=4 m×2 m×6 mである。模型は文献6)に使用されたものを参考にして製作された。図-2に示すように、まず、Aと記す模型は、地覆、高欄、縦桁などをもたない平板状床版と補剛トラスとよりなる吊橋断面であって、文献6)にST型と称せられたものと幾何学的形状が相似であり、寸法、質量、剛性などが異なるものである。ちなみに同文献の分類によれば、ST型の模型の2自由度フラッタは準曲げ-ねじりフラッタという分類に入っている。このA模型を原型として、床版両縁部に地覆、縦桁に相当する充腹突起材を逐次付加したものが、それぞれB、C、DおよびE模型である。図-2には充腹突起材の高さ d の寸法も記入されている。模型の床版は表面処理された比較的硬い発泡スチロール材(ウッドラック)であり、上弦および下弦材はジュラルミンの中空角材、斜材その他は木製であって、模型全体はビスあるいは接着剤で組立てられた。模型の長さは1850 mmであり端板が左右についている。模型の両端より腕を出し(その位置は図-2に示す)、図-3に示されるばね支持装置によりこれを支えた。本実験では、模型の平均迎角は常に 0° (床版面が流れに平行)に設定された。模型を支持するばねは、コイル・スプリング①とクロス・スプリング②とよりなり、このようにして、模型に曲げとねじりの振動的変位が与えられる。すなわち、模型は曲げ-ねじりの2自由度系となる。また、別に用意した板ばねつき小金具で基準軸③上の任意の1点を山形鋼を介して風洞測定部に固定すれば、模型はねじり1自由度系となる。付加金具は十分に軽く、それによる模型の慣性モーメントの増加は無視することができる。

表-1に模型の力学的特性を示す。特に、曲げ-ねじり振動数比は $f_{h0}/f_{\theta 0}=0.51$ である。模型変位の測定であるが、ねじり変位はクロス・スプリングに貼った抵抗線ひずみゲージにより、また、曲げ変位はコンタクトレス変位計(EMNEG製)によりそれぞれ検出された。これらの出力の線性は測定範囲で十分に良好であった。出力信号は直流増幅器を介してデータレコーダーおよび電磁オシログラフに導かれた。図-4はそのブロック図である。模型上流の一様流の風速($V=1\sim 20$ m/sec)は

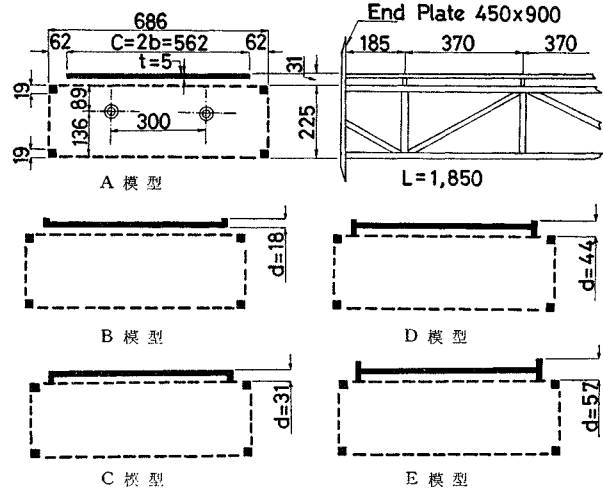


図-2 実験に使用された吊橋断面模型

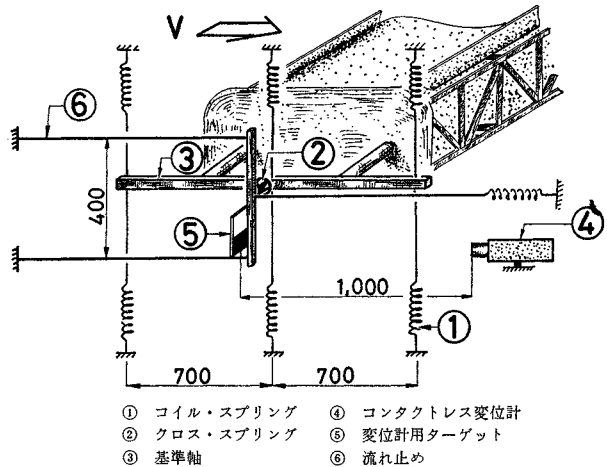


図-3 模型支持装置

ピトー管-ゲッチングマン・マンメーターによる圧力測定より、あるいは、低風速用サーミスター風速計(カノマックス製)を使用して求められた。なお、一部の実験では、熱線流速計を用いて後流の速度変動の計測も行われた。

表-1 吊橋断面模型の力学的特性

| 曲 げ | |
|--|--------|
| 単位長あたりの模型質量 $M(\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2)$ | 0.800 |
| ばね定数 $K_h(\text{kg}/\text{m})$ | 213 |
| 固有振動数 $f_{h0}(\text{Hz})$ | 1.91 |
| 無風時対数減衰率 δ_{h0} | 0.0320 |
| $2M/\rho b^4$ | 162 |
| ね じ り | |
| 単位長あたりの模型慣性モーメント $I(\text{kg}\cdot\text{s}^2)$ | 0.0562 |
| ばね定数 $K_\theta(\text{kg}\cdot\text{m}/\text{rad})$ | 57.9 |
| 固有振動数 $f_{\theta 0}(\text{Hz})$ | 3.75 |
| 無風時対数減衰率 $\delta_{\theta 0}$ | 0.0147 |
| $2I/\rho b^4$ | 144 |

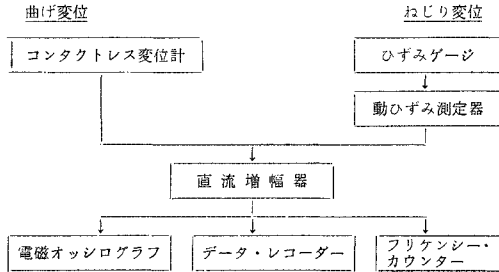
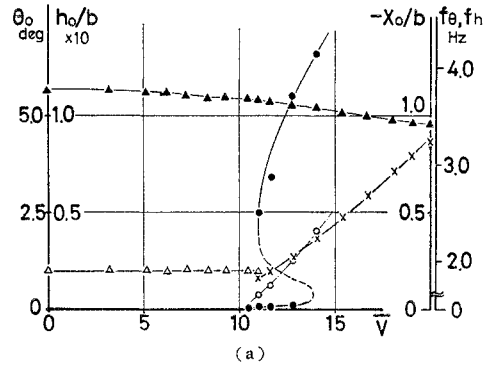
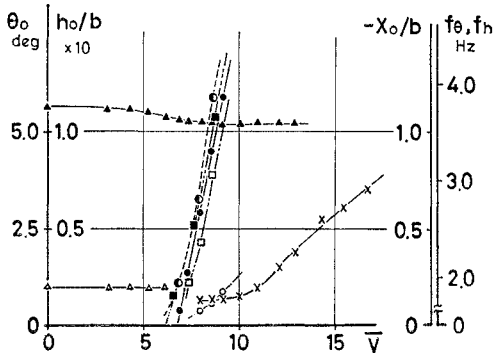


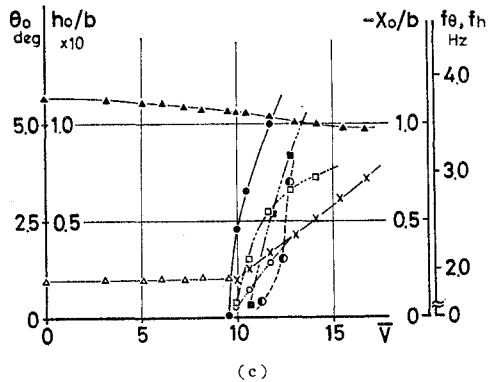
図-4 振動変位計測のブロック図



(a)



(b)



(c)

- | | |
|--------------------------|--------------------|
| ●—● (2自由度系) | ○—○ (1自由度系) |
| ○—○ θ_0 , ねじり振動振幅 | □—□ $X_0/b=0$ |
| ○—○ h_0/b , 曲げ振動振幅 | ■—■ $-X_0/b=0.276$ |
| ×—× X_0/b , 不動点位置 | ●—● $-X_0/b=0.534$ |
| ▲—▲ f_θ , ねじり振動数 | |
| △—△ f_h , 曲げ振動数 | |

図-5 模型の動的応答例

(2) 実験結果

実験は、まず2自由度系について行い、2自由度フラッタの発生を観測する。この時、オシログラフに示された曲げおよびねじり変位の記録より、振動系の不動点ないしは見掛けの不動点を推定する。ついで、その不動点の近傍(風速によって変化する)を固定して、ねじり1自由度フラッタの可能性を検討するわけである。

図-5(a)~(c)に代表的な模型の応答を示す。図-5(a)はA模型、(b)はE模型、(c)はC模型にそれぞれ対応する。横軸はともに無次元風速 $\bar{V}(=V/f_0b)$ 、 f_θ はねじり振動数、 b は床版幅員の1/2)であり、縦軸は2自由度フラッタにおける曲げおよびねじりの振動振幅と振動数、不動点位置ならびに軸を固定してねじり1自由度系としたときのねじりフラッタの振動振幅を示す。図-6は2自由度フラッタにおける曲げ-ねじり変位間の位相差 ϕ の変化を示す。2.では応答振幅を目安にしたフラッタの分類を考察したが、場合によっては振動の発散率に着目したほうが便利である。特に、フラッタ限界風速以後、風速を増すとリミット・サイクルの振動振幅が急激に増加する場合は、模型の破壊を招く恐れがあり、高風速における振幅の測定ができなくなる。その点、小振幅における振動発散率であれば比較的高風速まで測定可能であって都合がよい。図-7(a)~(d)は、それぞれA、E、C、およびB模型に対応し、振動振幅3°における振動の対数減衰率(負値は発散振動を意味する)の測定結果である。

なお、先述のように、2自由度フラッタにおける見掛けの不動点位置は風速によって変化する。それゆえ、ねじり1自由度フラッタの実験では、風速に応じて軸位置をかえなければならないが、このことはわずらわしく、便宜上、軸位置を適当に数点選び、風速を広くかえた実

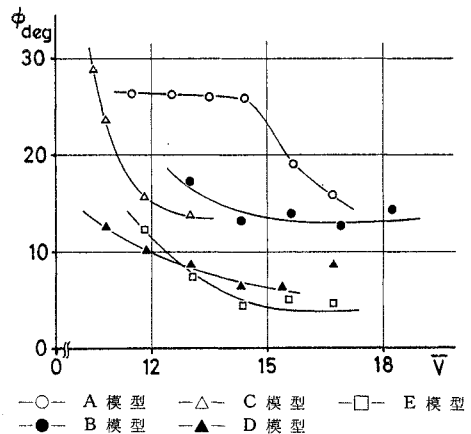


図-6 2自由度フラッタにおける曲げ-ねじり変位間の位相差

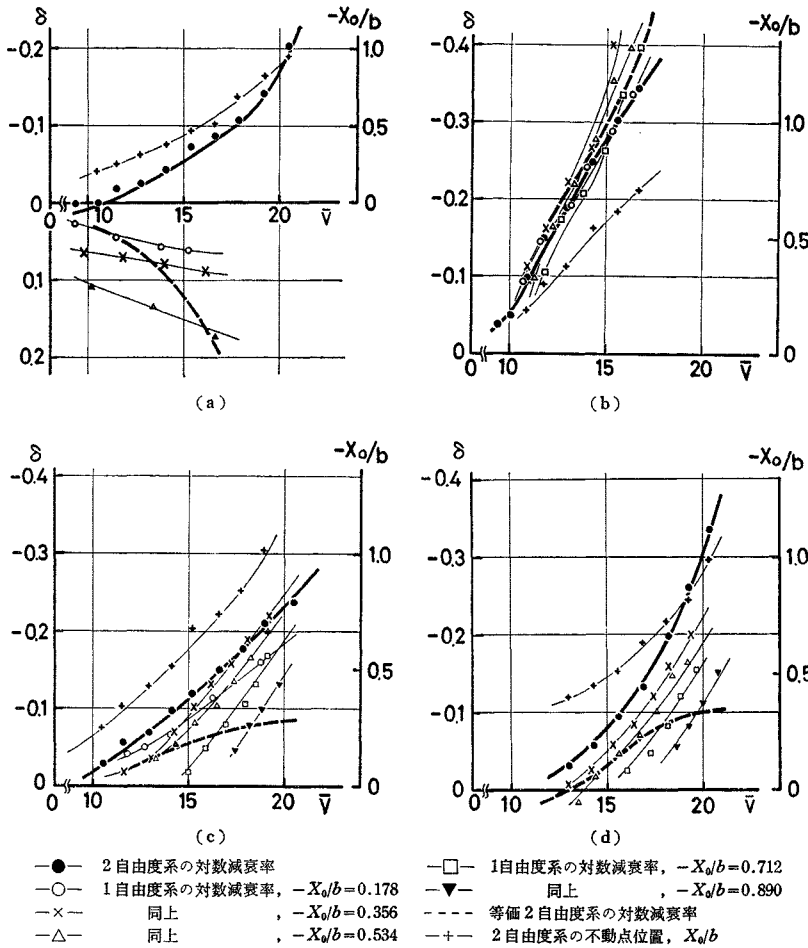


図-7 フラッタにおける振動の対数減衰率

験を行った。したがって、図-7において、各風速の2自由度フラッタに対応するねじり1自由度系の値は、破線の等価2自由度系であらわされることになる。

以下、実験結果について説明と考察を加えたい。まず、A模型について述べる。図-5(a)に示すように、この模型では $\bar{V}=11$ より2自由度フラッタを生じた。ただし、 $\bar{V}=11\sim 14$ の間では小振幅の不安定なりミット・サイクルが存在し、自然発散を示すのは $\bar{V} \geq 14$ の領域であった。図-6において曲げ-ねじり変位間の位相差 ϕ は、限界風速 $\bar{V}=11$ において約 26° であったが、その後、無次元風速の増大とともに遞減した。

一方、見掛けの不動点は、限界風速においてすでに $-X_0/b=0.20$ 付近にあるが、その後、風速の増加とともにさらに床版前縁側に移動を続ける。さて、このA模型のフラッタは前節で述べた分類のいずれに属するであろうか。図-7(a)に示すように、見掛けの不動点付近を固定すると振動はいずれも強い正減衰を呈することが知れた。よって、もとの2自由度フラッタは本質的に曲

げ-ねじりフラッタであることが結論される。なお、図-5(a)に示す振動数の変化をみると、ねじり分枝の振動数は風速とともにわずかに減少を続け、一方、曲げ分枝の振動数は限界風速直前までほぼ一定である*。一般に、曲げ-ねじりフラッタにおいては、限界風速付近で二つの分枝の振動数が一致することが多く、このことが限界風速の推定に利用されることもあるが¹⁾、いま述べた例に関する限り、二つの分枝の振動数の一致は生じていないようである。

次に、床版の両縁部に充腹突起材を付加した場合について説明したい。もっとも極端な場合はDおよびE模型であり、突起材の高さ d と床版幅員 c ($=562$ mm) との比はそれぞれ $d/c=0.08$ および 0.10 である。このようなH型断面では、流れが床版前縁で大きくはく離することが考えられ、

ねじり1自由度フラッタの発生を予想することができる。図-5(b)に示すように、E模型では低風速より2自由度フラッタが発生する。D模型も限界風速はやや高くなるが同様な挙動を示した。図-6でわかるように、これら二つの模型について位相差 ϕ は必ずしも0でなく、むしろA模型に比して若干小さい程度であるが、見掛けの不動点を固定するときねじり1自由度フラッタが発生する。しかも、その限界風速、その後の振動振幅ならびに振動発散率はいずれも2自由度フラッタの場合とほとんどかわらない。図-5(b)および図-7(b)に示すとおりである。したがって、DおよびE模型の2自由度フラッタは、本質的にねじり1自由度フラッタであると結論してよい。この場合、見掛けの不動点が風速とともに大きく床版前縁側に移動し、その程度はA模型の場

* この実験では限界風速以上の曲げ分枝の挙動は調査されなかったが、後の同種の実験によれば、曲げ分枝振動数は限界風速以上でもほぼ一定であった。高い風速では、発散するねじり分枝のため測定が困難となる。

合とさほど変わらないことは興味深い。もちろん、この不動点の移動は振動の連成作用にほかならない。しかし、Rocard⁹⁾ は、旧タコマ橋の落橋フィルムの分析より、見掛けの不動点の前縁側への移動を認め、この事実より落橋の原因となったフラッタが狭い意味の連成フラッタ、すなわち、本論文でいう本質的に曲げ-ねじりフラッタであると結論している。本実験の結果の示すところによれば、見掛けの不動点の移動が、狭い意味の連成フラッタのみに特有な現象であるといえず、Rocardの推理は首肯し難いことがわかる。

最後に、BおよびC模型について述べたい。これら模型の突起材の高さと床版幅員との比はそれぞれ $d/c=0.03$ および 0.06 である。図-5(c)のC模型では、2自由度フラッタの発生する風速範囲で、見掛けの不動点を固定するときねじり1自由度フラッタが発生するが、その応答振幅は2自由度フラッタの場合に比して約1/2になっている。同様に、図-7(c)においても、等価2自由度系の振動発生率は2自由度系の約1/2となっている。フラッタ限界風速は上記二つの系であり差がないようであるが、もし構造減衰が極端に大きい場合には、二つの系の間で限界風速が大きく異なってくることが図-7(c)の結果より予想できる。これらの特性は、B模型においても同様であって図-7(d)に示すとおりである。したがって、ここで述べた二つの例においては、2自由度フラッタの発生に対して前節で論じた二つの効果がともに貢献していると考えられ、そのいずれがより支配的であるかを決定することは難しい。しかし、それにもかかわらず、 d/c がわずかに3%に等しい充腹突起材の付加により、ねじり1自由度フラッタが発現することは注目に値しよう。このようなフラッタ特性の変化については、恐らく床版前縁近傍のはく離流の変化が関係するように思われる。

以上、本節に示した実験結果は、床版両縁部の充腹突起材の高さを逐次増して行くとき、2自由度フラッタが、いわゆる本質的に曲げ-ねじりフラッタよりしだいに本質的にねじり1自由度フラッタへと移行する過程をとらえているように思われる。一般に、補剛トラス吊橋断面では、地覆あるいは縦桁などの配置の小さい変更によりその耐風安定性が大きく変化することが、従来、指摘されている^{2),10)}。これらの事実と本実験の結果とは互いに密接な関連があると思われ、研究を続行中である。Scrutonの見解によれば⁹⁾、吊橋のフラッタの研究において、従来、クラシカルフラッタ、すなわち、ここでいう曲げ-ねじりフラッタが注目されすぎた傾向にある。NPLの多年の経験によれば、吊橋のフラッタにおいて曲げ-ねじりフラッタを生じた例は(恐らくSevern型断面を除いて：引用者註)一例もなかったとのことであ

表-2 C模型の振動数変化

| V (m/s) | 2自由度系 (Hz) | 1自由度系 (Hz) | | | | |
|---------|------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | $-X_0 = 5 \text{ cm}$ | $-X_0 = 10 \text{ cm}$ | $-X_0 = 15 \text{ cm}$ | $-X_0 = 20 \text{ cm}$ | $-X_0 = 25 \text{ cm}$ |
| 10.0 | 3.64 | 3.63 | 3.57 | 3.42 | | |
| 12.0 | 3.57 | 3.61 | 3.57 | 3.48 | 3.35 | |
| 14.0 | 3.55 | 3.57 | 3.57 | 3.53 | 3.42 | 3.30 |
| 16.0 | 3.48 | 3.53 | 3.61 | 3.57 | 3.50 | 3.43 |
| 18.0 | 3.41 | 3.50 | 3.68 | 3.64 | 3.64 | 3.53 |

る。Scrutonも、本研究と同様に、ねじり軸を固定し1自由度系としての実験を追加して、2自由度フラッタの発生する領域でねじり1自由度フラッタの発生をみたのであった。しかし、その際、本研究と同様に“見掛けの不動点”を固定したのかあるいは単に断面中央部を固定したのであるか明らかでない。まえがきにも述べたように、実橋断面のフラッタが前節のいずれの分類に属するかを知ることは、耐風設計の上から重要である。本研究の方法にしたがってScrutonの見解を再検討することが望まれる。

(3) 若干の補足

軸を固定してねじり1自由度系にするとき、多くの場合、風速の増大とともにねじり振動数の増加がみられたが、これは空力モーメントの aerodynamic stiffness の影響である。表-2にC模型の例を示す。次に、E模型では、 $\bar{V}=4.8$ 近傍で曲げの卓越した弱い発振がみられた。熱線流速計を用いた後流の速度変動の計測によって、この励振がいわゆるうず励振であることがわかった。本論文で対象としたフラッタはいずれも比較的高い風速域で生じており、この意味で後流うずと無関係のフラッタであるといえる。最後に、図-8はA模型の2自由度フラッタを示すオッシログラフの記録である。注目すべきは曲げ変位の記録波形であって、時間の経過に伴い振動の平均値に変位を生じていることが認められる。すなわち、振動振幅が増すにしたがい、模型が上方に浮き上がったことを示す。ねじり変位についてはそのような現象は認められない。この現象は他の四種の模型についても共通して存在した。以下はこの一見奇妙な現象につ

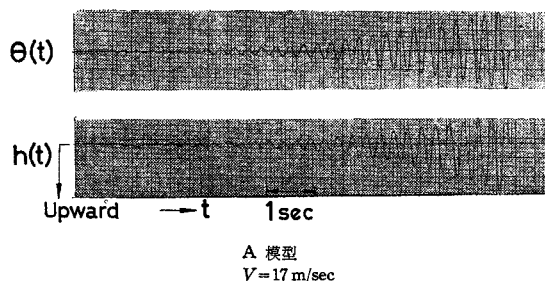


図-8 2自由度フラッタを示すオッシログラフの例

いての推測である。すなわち、模型には床面の下部に補剛トラスがついているので、迎角 0° においても流れは上下非対称である。したがって、たとえば、静的揚力曲線も上方に凸となっていることが多い。フラッタにおいては、ねじり変位 $\theta(t)$ のなんらかの偶数次非線型項をもつ揚力が発生し、非線型振動におけるいわゆる整流効果を生じ平均揚力が変化したものと思われるのである。

4. 結 論

2自由度系に生ずるフラッタが2自由度フラッタであり、広い意味で連成フラッタとよぶことができるかも知れない。しかし、それは必ずしも狭い意味の連成フラッタではない。ここで狭い意味の連成フラッタとは、自由度間の位相差の存在が本質となって発生するフラッタを指す。吊橋のような非流線型物体の2自由度フラッタの中には、この狭い意味の連成フラッタのほか、本質的にねじり1自由度フラッタに属するものが含まれる。

本論文では、平板状床版をもつ補剛トラス吊橋断面模型を基本として、床版両縁部に充腹突起材を逐次付加した模型につき実験を行い、2自由度フラッタが狭い意味の連成フラッタより本質的にねじり1自由度フラッタへと移行する過程を示した。その結果、わずかな突起材の付加により大きいねじり1自由度フラッタの効果があらわれることが知れた。実橋断面のフラッタが上記のいずれの型に属するか、また、地覆および縦桁の配置効果などを、本論文の手法にしたがって再検討することが望ましい。なお自由度間の位相差は、本論文におけるフラッタの分類の鍵となったものであり、その大きさに対する曲げ-ねじり振動数比その他のパラメータの影響を今後研究することも望まれる。

本研究を行うについて、東京大学 宮田利雄助教授に模型製作上の助言を頂いた。また、実験においては、深町信尊、杉谷賢一郎、原田健一の三君の協力を得た。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Bisplinghoff, R.L. and H. Ashley: Principles of Aeroelasticity, John Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 258-277, 1962.
- 2) Scruton, C.: An experimental investigation of the aerodynamic stability of suspension bridges with special reference to the proposed Severn Bridge, Proc. Inst. Civ. Engrs., pp. 189-222, 1952, 1 (1).
- 3) Walshe, D.E.J.: The use of models to predict the oscillatory behaviour of suspension bridges in wind, Proc. Wind Effects on Buildings and Structures, NPL, 1963, Vol. II, HMSO, London, pp. 518-554, 1965.
- 4) Discussion on Papers 10, 11, 20 and 17, *ibid.*, pp. 555-558.
- 5) Wardlaw, R.L.: Some approaches for improving the aerodynamic stability of bridge road decks, Proc. The Third Int. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, 1971, Saikon, Co. Ltd., Tokyo, 1971, pp. 931-940.
- 6) 宮田利雄・岡内 功: 吊橋の風による自励振動に関する一考察, 土木学会論文集, 第173号, pp. 19-34, 1970.
- 7) 田中 宏・伊藤 学: 充腹構造物の自励振動における空気力の特性, 土木学会論文報告集, 第168号, pp. 15-24, 1969.
- 8) 白石成人: 平板状構造物の曲げねじれフラッタ特性に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第186号 pp. 1-12, 1971.
- 9) Duncan, W.J.: Flutter of systems with many freedoms, The Aeronautical Quarterly, Vol. 1, May, pp. 59-76, 1949.
- 10) Scanlan, R.H.: An examination of aerodynamic response theories and model testing relative to suspension bridges, Proc. The Third Int. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, 1971, Saikon, Co. Ltd., Tokyo, pp. 941-951, 1971.

(1973.11.20・受付)