

## PC斜張橋の耐風性能試験

久保 喜延\*

## 1. ま え が き

近年PC斜張橋は、年々そのスパンを伸ばしてきております。その背景には、PC斜張橋の長大化に向けての並々な技術革新が行われていることがあげられます。橋梁の耐風性の問題が取り上げられるのは、自重の軽い鋼橋が主でありましたが、PC斜張橋の長大化により、コンクリート橋の世界でも耐風性が問題視されるようになってきております。

時々、「PC斜張橋でも風で揺れることがあるのですか?」と尋ねられることがあります。それでは、「どうして風で揺れないと思われているのですか?」と聞き返しますと、「鋼橋に比べて重いし、コンクリートだからがっちりしています」という返事が返ってきます。確かに、同一規模のPC斜張橋の桁について見ますと、単位長さあたりの重量の比較では、鋼斜張橋の約1.5～1.7倍近くあります。しかし、剛性という面からすれば、設計荷重と自重を外荷重として作用させた場合のたわみが同じになるように設計したとすれば、鋼に比べてヤング率が相対的に小さいプレストレストコンクリートでは、断面を大きくせざるを得ず、外見的にはがっちりした構造物に見えることとなります。しかしながら、必要とされる相対的な剛性についてみれば、鋼橋もPC橋も設計上は同程度のはずであります。従って、鋼橋で問題となってきた風による振動が、PC斜張橋でも問題にされて当然なのです。長大化を目指しているPC斜張橋においては、風との問題はますます重要になってくるものと思われま

## 2. 構造物に作用する風荷重

風により構造物は変形したり、振動したりします。その元となるのが、空気力です。空気力には、静的空気力(定常空気力)と動的空気力(非定常空気力)とがあり

ます。これら空気力は、図-1に示しますように、3個の力(三分力)で表されます。抗力(Drag)は風向方向に働く力、揚力(Lift)は風向直角方向に働く力、空力モーメント(Aerodynamic Moment)は回転させようとする力です。静的な空気力によって、構造物は静的な変形をします。その力は、それぞれの係数を用いて表されます。空気密度を $\rho$ 、風速を $U$ 、桁幅を $B$ として単位長さあたりの力としてみますと、式-1のようになります。

$$\text{抗力} : D = 0.5 \rho U^2 C_D B \quad (C_D : \text{抗力係数}) \quad (1-1)$$

$$\text{揚力} : L = 0.5 \rho U^2 C_L B \quad (C_L : \text{揚力係数}) \quad (1-2)$$

$$\text{空力モーメント} : M = 0.5 \rho U^2 C_M B^2 \quad (C_M : \text{空力モーメント係数}) \quad (1-3) \dots (\text{式-1})$$

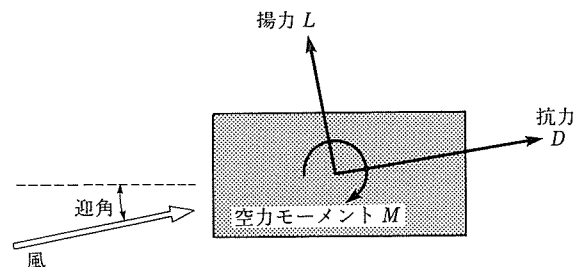


図-1 空気力の三分力

空気力の各係数は、実験によって求められるもので、風速によらず一定になります。しかし、空気力は、風速の2乗に比例しますので、風速が倍になりますと、空気力は4倍になります。そのときの変形も4倍になります。従って、高風速の場合には、空気力・変形はかなり大きくなります。このことは、十分に理解しておくことが必要です。

次に風荷重をどのようにして測定するかということですが、図-2に示しますように、風洞内に桁の一部を取り出して3分力天秤にセットして、風を吹かしながら、空気力の3分力である抗力、揚力、空力モーメント

\* Yoshinobu KUBO : 九州工業大学 工学部 建設社会工学科 教授

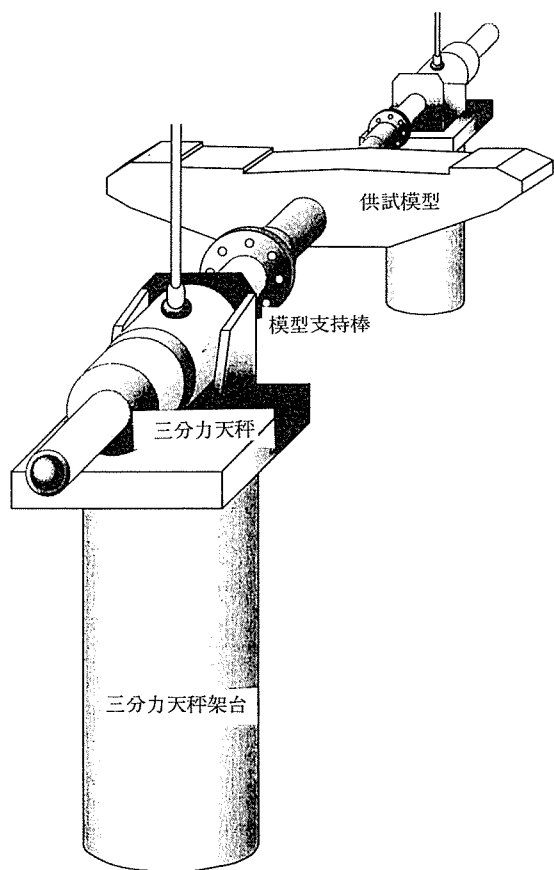


図-2 三分力天秤と模型の設置状況

を歪み計で測定します。

その結果を、横軸に(風速)<sup>2</sup>、縦軸に空気力をとってグラフに表しますと、直線になります。この傾きが、式-1で用いられている空気力係数です。例えば、垂直に立っている平たい板にどれくらいの風荷重が作用するかを見てみましょう。平板の抗力係数は  $C_D=2.0$  で、15℃で空気密度は  $\rho=1/8 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$  ですから、1m<sup>2</sup>あたりの荷重は、風速 4 m/s で  $D=2 \text{ kg f}$  です。ところが、風速が10倍の 40 m/s になると、 $D=200 \text{ kg f}$  と100倍にもなります。

### 3. 風による構造物の振動

構造物の風に関する事柄の中で、最も注意を払われているのが、風による構造物の振動です。そこで、風による振動の概略を説明しておきます。図-3に示す1質点系があるとき、これに風の外力が働く場合を考えますと、そのときの運動方程式は、式-2のようになります。

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F(t) \quad \dots\dots \text{(式-2)}$$

外力の  $F(t)$  が正弦波の場合、

$$F(t) = F_0 \sin(2\pi ft + \phi) \quad \dots\dots \text{(式-3)}$$

と表されます。風による構造物の振動のことを空力弾性振動といいます。このときの外力の振動数  $f$  は構造物の振動数と同じになります。そこで構造物の変位を

$$y(t) = y_0 \sin(2\pi ft) \quad \dots\dots \text{(式-4)}$$

と表しますと、式-3の外力は次のように書き換えられます。

$$F(t) = F_0 \cos \phi \frac{y}{y_0} + F_0 \sin \phi \frac{\dot{y}}{2\pi f y_0} \quad \dots\dots \text{(式-5)}$$

これを式-2に代入すると、自励振動の式になります。これは、式-1の右辺の外力項がゼロであるときの式、すなわち、自由減衰の式と同じ形になります。

$$m\ddot{y} + \left( c - F_0 \sin \phi \frac{1}{2\pi f y_0} \right) \dot{y} + \left( k - F_0 \cos \phi \frac{1}{y_0} \right) y = 0 \quad \dots\dots \text{(式-6)}$$

この式の変位速度の項の係数が正の時減衰振動にな

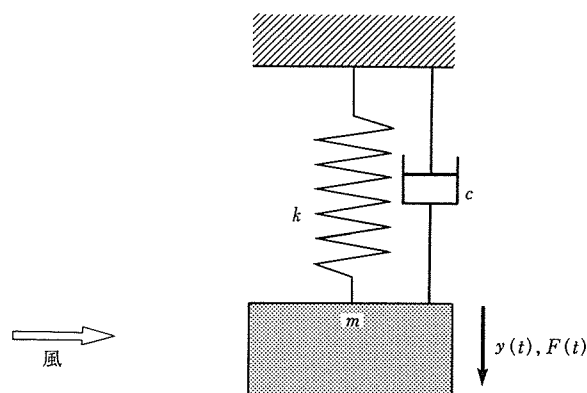


図-3 1質点振動系

り、負の時発散振動となります。例えば、構造減衰がゼロである ( $c=0$ ) としますと、変位速度項の係数は  $\sin \phi$  の符号と同じになりますので、 $\sin \phi$  が正の時に発散振動が誘起されることになります。 $\sin \phi$  が正ということは、 $0 < \phi < \pi$  であることを意味します。言い換えますと、変位に対する空気力の位相差が進んでいる状態になります。このことは、変位に対して空気力が位相差分だけ先に作用することを意味しております。このことを表したのが図-4です。一般に、自励振動では、構造物が振動しますと、その振動変位に応じて新たな空気力が発生して、構造物に働く空気力が変化します。このループを繰り返しながら、構造系とバランスするまで振幅が大きくなり、構造系とバランスした振幅で、定常振動(一定の振幅の振動)状態になります。このような振動は、地震による構造物の振動とは本質的に異なることです。このことを図に表したのが、図-5です。地震の場合は、構造物が揺れても、そのことが地震外力になら影響を与えません。従いまして、地震による構造物の振動は、地震による強制振動と見ることができます。これに対して、風による振動の場合は、構造物が振動することにより、非定常空気力(振動時に作用する空気力)が変化す

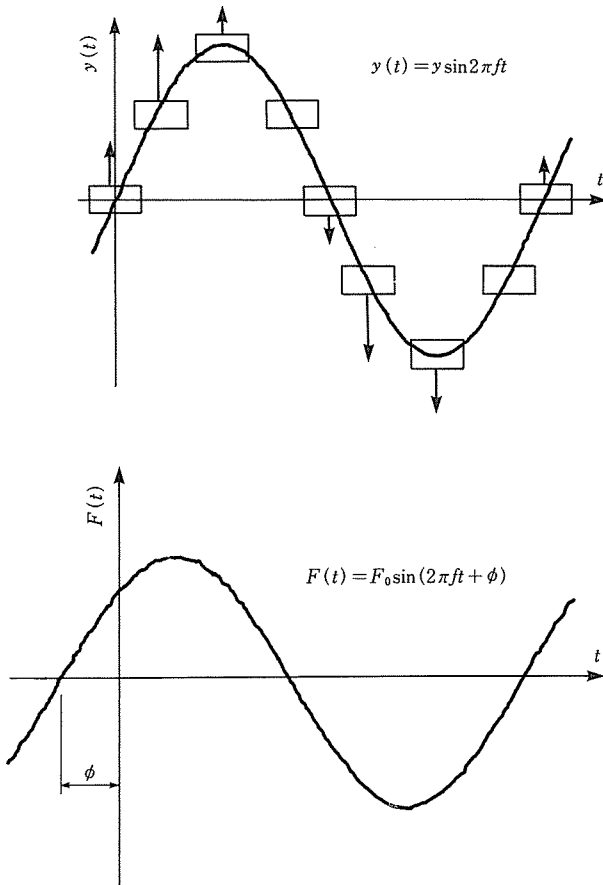
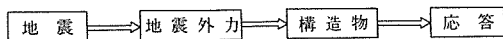


図-4 自励振動における変位と空気力

ることになりますから、図-5に示すように、構造物の振動と非定常空気力との間にフィードバック回路が形成されることとなります。これが、自励振動の場合です。この意味は、構造物が振動することが原因で、それ自身に作用する力が新たに生まれ、さらにその振動振幅を大きくすることになるという現象のことです。

風による振動の原理は、前述したとおりですが、これまでに分類されております風による振動は、図-6のようになります。このうちの自励振動に分類されているギャロッピング（たわみの自励振動）とフラッター（ねじれの自励振動）は、構造物の設計時に発生させてはならないことになっております。これらの自励振動は、一度発生すると、構造物を破壊させる危険性があるためです。

・地震による構造物の振動



・風による構造物の振動

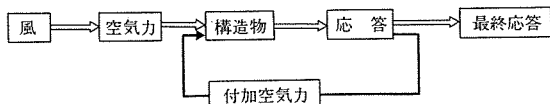


図-5 地震による振動と風による振動

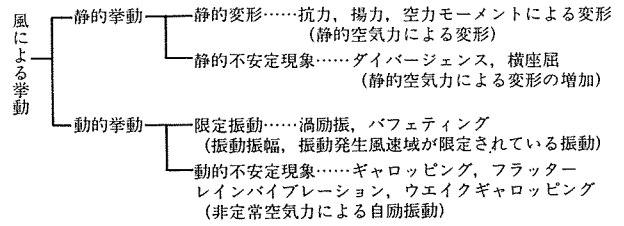


図-6 風による挙動の分類

#### 4. 風洞実験の準備

まず風洞実験を行う場合の相似則について述べます。構造物の風洞実験を行う場合に用いられる相似則には、幾何学的な相似に加えて、以下のものが考えられます。構造物の代表長を  $L$  とし、添字  $P$  および  $m$  で実橋および模型を表しますと、縮尺率  $1/n$  は、 $L_m / L_P = 1/n$  となります。

- 1) レイノルズ数相似…流体の慣性力と粘性力の比  
 $Re = UL/\nu = (\text{慣性力}/\text{粘性力}) \dots\dots (\text{式-7})$   
 $U$ : 流速,  $L$ : 代表長,  $\nu$ : 流体の動粘性係数
- 2) フルード数相似…流体の慣性力と重力との比の平方根,  $Fr = U/\sqrt{gL} \dots\dots (\text{式-8})$

実橋も模型も同一重力場に置かれているため、実橋風速と実験での風速との間の関係は、以下のようになります。

$$U_m / U_P = \sqrt{L_m / L_P} = 1/\sqrt{n} \dots\dots (\text{式-9})$$

- 3) 剛性と流体力に関する相似…… $G/\rho U^2$   
 $G$ : 剛性,  $G_m / G_P = (U_m / U_P)^2 = 1/n \dots\dots (\text{式-10})$

- 4) 構造減衰に関する相似  
 構造減衰率は振動振幅比という無次元量でありますから、実橋と実験とで同じです。

- 5) 換算風速に関する相似  
 換算風速  $U/fL$  が実橋と実験とで一致することが条件であります。これより、

$$f_m / f_P = U_m / U_P \cdot L_P / L_m = \sqrt{n} \dots\dots (\text{式-11})$$

これらのうち、1) については、実物と実験とで同一流体である空気を用いるため、レイノルズの相似則を満たすことはできません。従って、橋梁の風洞実験においては、2) 以下の条件を満たすように行っております。例えば、 $1/100$ の縮尺模型を用いると、風洞風速の10倍が実橋風速であり、風洞実験での振動数の $1/10$ が実橋の振動数となります。すなわち、風洞実験の縮尺が $1/n$ であれば、前述のことから、

$$U_P = \sqrt{n} \chi U_m, f_P = f_m / \sqrt{n} \dots\dots (\text{式-12})$$

$U_P$ : 実橋風速,  $U_m$ : 実験風速,  $f_P$ : 実橋での振動数,  $f_m$ : 実験模型の振動数となります。

風洞実験には、二次元模型を用いて行う場合と三次元

模型を用いて行う場合があります。二次元模型実験は、桁の一部を取り出して、剛な模型を用いて行う実験です。三次元模型実験は、実橋全体を模型化して行う実験で、二次元模型実験に比較すると、大きな測定断面を必要とします。二次元模型実験による風洞実験は、基礎的データを取るのに適しております。特に、桁の断面形状の検討には、二次元風洞が使われます。その理由としては、模型製作費を含め、実験に要する費用が少なく、きめ細かい調整が可能であるからです。通常、二次元風洞実験で決定された桁断面形状を用いて三次元実験で橋全体としての挙動を見て、最終的な検討を行います。PC斜張橋は、通常張出し架設が行われ、閉合直前の状態が構造的に最も不安定な状態となります。この構造的に不安定な状態である架設中に台風の襲来を受けたときの挙動を知るために、PC斜張橋に対する三次元実験が行われました。著者が関係した呼子大橋や伊唐大橋では、張出し架設段階に応じた検討を行いました。

まず、二次元模型風洞実験を行う場合の手順を示しますと、以下ようになります。

風洞実験は、構造細目が決定された後に照査という形で行われることがほとんどです。その意味では、真の耐風設計とはなっていないとも言えます。

- ① 実橋における構造諸元の提示……桁の質量、極慣性モーメント、水平および鉛直方向の曲げ剛性、ねじれ剛性、固有振動数などの構造細目を受け取ります。
- ② 縮尺率の決定……使用風洞の規模に応じて決めます。実験用模型の風洞に占める割合を閉塞率といい、この閉塞率が5%以内になるように決めます。
- ③ 固有振動数の算定……縮尺率に応じた固有振動数の決定を行います。通常最低次数のたわみ振動数およびねじれ振動数を用います。
- ④ 質量および極慣性モーメントの算出……選んだ振動モードの次数に対応する質量および極慣性モーメントを算出し、模型の所要値を求めます。
- ⑤ 所要バネ定数の決定とバネの設計……二次元模型風洞実験は、図-7に示しますように、風洞内に剛な模型をバネで吊って、風を吹かした時の挙動を見る方法です。たわみ振動のみ（たわみ1自由度）を見るときは、模型を4本のバネで吊ります。また、ねじれ振動のみ（ねじれ1自由度）を見るときは、板バネを組み合わせた十字バネが模型の回転中心になるように模型を支持します。たわみとねじれの両方（2自由度）を同時に見るときは、8本のバネで吊ります。本来であれば、常に2自由度系で見るべきですが、現象を分けて見たいときに、1自由度系で見ることをします。これらに必要なバネ定数を決定し、バネを設計します。通常はコイル

バネを用いておりますので、バネの設計ではバネの線径、巻径、巻数などを決めることになります。

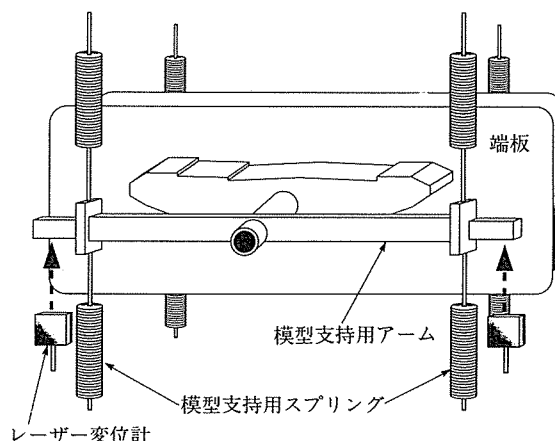


図-7 二次元模型支持状況

- ⑥ 質量および極慣性モーメントの調整……所要の質量や極慣性モーメントを得ることは、実験の精度を左右する重要な事柄です。バネをはじめ、バネと模型とを接合する治具などの振動する部分を含めて調整します。調整方法は、いくつかの既知の質量（極慣性モーメント）を付加して、振動数の比から所要のものになっているかを調べます。例えば、バネ定数  $k$ 、真の質量を  $m_0$ 、付加質量を  $m_1$ 、 $m_2$  としますと、それぞれの振動数は、

$$f_1 = 1/2 \pi \cdot \sqrt{k / (m_0 + m_1)}$$

$$f_2 = 1/2 \pi \cdot \sqrt{k / (m_0 + m_2)}$$

ですから、

$$(f_1 / f_2)^2 = (m_0 + m_2) / (m_0 + m_1)$$

となります。この方法により、真の質量（あるいは極慣性モーメント）を知ることができます。

必要であれば、構造減衰率の調整……構造減衰率は、系固有のものとなりますので、できあがった系の構造減衰率が所要値より大きすぎる場合は、調整の方法がありませんが、所要値より小さい場合には、粘性液体を用いたダンパーや、電磁ダンパーを使ったりして調整できます。また、後ほど述べますように、実験結果から構造減衰率の影響を差し引いた空力減衰率としての表現もできますので、構造減衰率をあわせられなくても、違う形で減衰率の影響を見ることもできます。

これだけの準備を行ったうえで、風を吹かしながら、振動状態の観察を行います。次に具体的な例を紹介しながら、風洞実験結果の見方などを説明します。

## 5. PC斜張橋の風洞実験

それでは、PC斜張橋の場合、どのような空力弾性振

動が問題になるのでしょうか。斜張橋の構造要素は、桁、塔およびケーブルです。PC斜張橋において、風による振動で問題となるのは、桁とケーブルですが、ここでは、PCで作られる桁に焦点を絞って述べます。現在のところ、わが国で最大スパンのPC斜張橋は、平成8年8月2日に開通したスパン260mの伊唐大橋です。また、プレキャスト式斜張橋として最大スパンを有するのは、現在施工中のスパン200mの大芝大橋です。伊唐大橋は呼子大橋と同様の閉断面箱桁であり、大芝大橋は開断面桁です。これら2橋の桁断面決定に著者が関係しましたので、この2橋の桁断面の開発経緯を述べて、PC斜張橋用の桁の風に関する問題点および試験方法を紹介します。

PC斜張橋の場合、桁について考えますと、鋼斜張橋の桁との大きな違いは、耐風性能を向上させるためのフェアリングが、単なる付加物ではなく、桁重量を増加させるものになること、施工性や維持管理面からは、先端が鋭角になる形状は採用できないことなどで、鋼斜張橋におけるフェアリングに対する考え方とは基本的に異なる点であります。ここに興味深い実験データを示します。

伊唐大橋の桁断面選定において、図-8に示す数種のフェアリングを用いた検討を行いました。人間の目には流線型に見えるフェアリング形状と、何となく流線型からほど遠い形のフェアリングを比較しましたところ、両者の耐風性能は、どちらかといえば流線型からほど遠いフェアリング長の短いずんぐりとしたフェアリングの方が良好である結果を得ました。フェアリングとして流線型に見える形状の方は、そのフェアリング長が長く、PC斜張橋の桁の死荷重を増やすだけでなく、フェアリング先端が鋭角であるため、施工性および維持管理面でも好ましいものではありません。それでは、なぜ、ずんぐりした方が良いことになったのかです。もともと、これらの桁に発生する振動は、桁の上流端から発生する剥離流

れによって誘起されるものです。この剥離を制御することに使われてきたのが、フェアリングです。フェアリングとは、流線型にするという意味ですが、このフェアリングを流れが剥がれないようにするためではなく、流れの剥がれを積極的に利用しようとしたのが、ずんぐりむっくりのフェアリングです。このフェアリングを耐風性能が敏感でないフェアリングという意味で、ブラントフェアリング (Blunt Faring) と名付けております。このブラントフェアリングは、上面と下面で剥離現象をほぼ独立に制御できるため、桁に対しても下から吹き上げる風 (正の迎え角の風) の場合にも、上から吹き下ろす風 (負の迎え角の風) の場合にも安定な桁断面形状を見つけることができます。これらの桁形状開発のために、図-8に示すようなフェアリングについて耐風性能を比較検討した結果、F50Bというフェアリングが伊唐大橋のフェアリングとして選ばれました。この考え方をういて、大芝大橋の桁断面の決定を行いました。与えられた所要構造断面形状は、図-9に示すようなもので、桁高1mという国内でも例を見ない薄い桁断面です。このままの耐風性能を調べると、図-10のようになります。とにかく低風速でフラッターが発生する断面です。できるだけ小さい断面積となるフェアリングとすることが必要ですので、これに剥離を干渉させるブラントフェアリングの考え方を採用しました。このフェアリングの上面側形状は、伊唐大橋とほぼ同じですから、フェアリングの上面傾斜角は伊唐大橋の場合と同じにし、大芝大橋では、下面傾斜角を変更することにしました。その結果、下面傾斜角の変更で、図-11に示すように応答特性が大きく変化しました。最終的に下面傾斜角が30°になるフェアリングを採用することになりました。ここに示したのは、具体的な例ですが、風洞実験のうち空力弾性振動試験において、応答を見るのが、最も初歩的で簡単

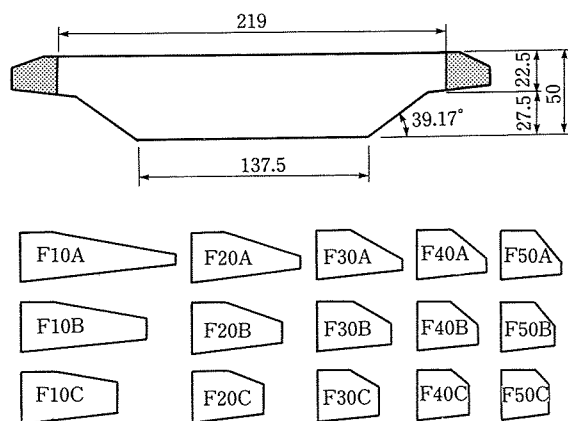


図-8 検討されたフェアリング形状

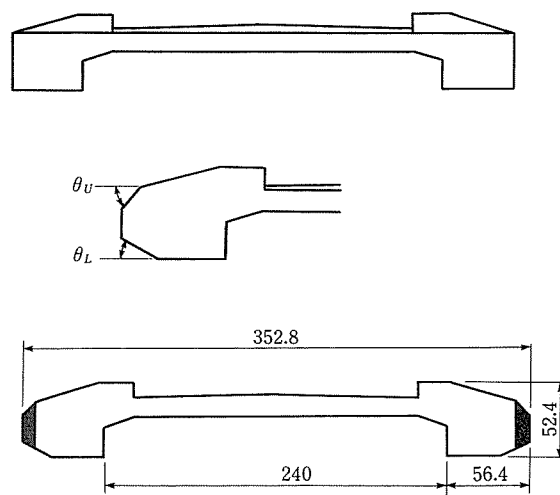


図-9 所要構造断面形状とフェアリング形状(1/20模型)

な方法です。しかし、この応答振幅も構造減衰率をいくらにするかで違ってきますので、想定している斜張橋の構造減衰率が明確であれば、所要の構造減衰率で実験を行えば、実験結果を相似則に従って、そのまま実橋に換算直すことができます。構造減衰率が明確でない場合には、空力減衰率という見方をします。

### 6. 風洞実験結果の解釈

自励振動の式は、自由減衰振動の式と形は同じであることを2で述べました。このとき、減衰項である変位速度に比例する項の正負が振動現象が発散するか否かを決めるのだと述べました。そこで、ある風速の時に、強制的に振動させて、所定の振幅になったところで自由減衰させ、自由減衰振動状態での減衰率を振幅ごとに計算します。その結果の一例が図-12, 13です。図-12の応答図に実線で示している風速における減衰率を測定し、これを $\delta$ とします。この $\delta$ には、構造減衰率である $\delta_s$ と空力による減衰率 $\delta_a$ （空力減衰率）とを含んでおります。したがって、空力減衰率は次式で求められます。

$$\delta_a = \delta - \delta_s \quad \dots\dots \text{(式-13)}$$

ある風速での空力減衰率を示したのが、図-13です。横軸に振幅をとり、縦軸に空力減衰率をとっております。空力減衰率 $\delta_a$ の値が正のときは、どの振幅においても必ず減衰することを意味しております。また、 $\delta_a$ が負のとき、構造減衰率がゼロであれば、発散することを意味しております。例えば、構造減衰率が $\delta_s = 0.01$ としますと、この図において $\delta_a = -0.01$ の直線と交わる振幅で定常振動が現れることを意味し、その振幅以下では、振動は発散振動になり、その振幅より大きい振幅では減衰振動になることを意味します。従って、所要の構造減衰率が得られなかった場合でも、各風速で空力減衰率を取っておけば、ある構造減衰率のときに、振動が発生した場合の応答図を作ることができます。各風速で、空力減衰を測定することは、かなりの労力ですが、実験している桁断面の耐風特性を詳しく見ることができます。風速に対して応答振幅をプロットしたものをV-A図、振幅に対して空力減衰率をプロットしたものを、A- $\delta$ 図、これらの情報すべてを集めて、風速を横軸、振幅を縦軸に取って、等減衰率曲線として表したものをV-A- $\delta$ 図と呼んでおります。これらの図を用いて耐風性能の検討を行います。耐風性能としては、前述しましたように、自励振動であるギャロッピングやフラッターを起こさせないこと、渦励振も許容振幅以下に抑えることが必要です。渦励振は、比較的低い風速で発生しますので、発生頻度の高い現象です。実橋で振動が発生しますと、簡単には止めることはできません。従って、桁断面の耐風特性を慎重に検討しておく必要があります。最も好ましいのは、いずれの振動も発生しない桁断面を選定することです。

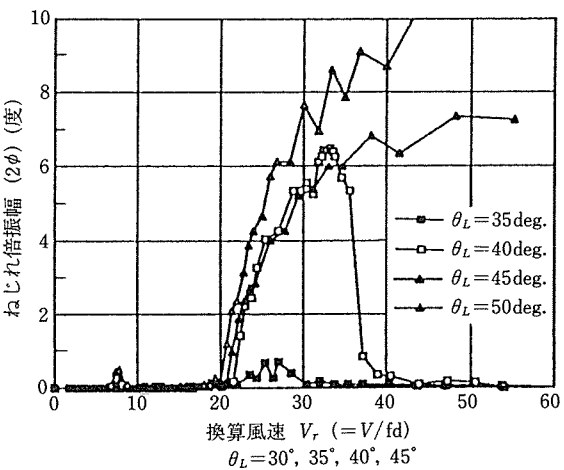
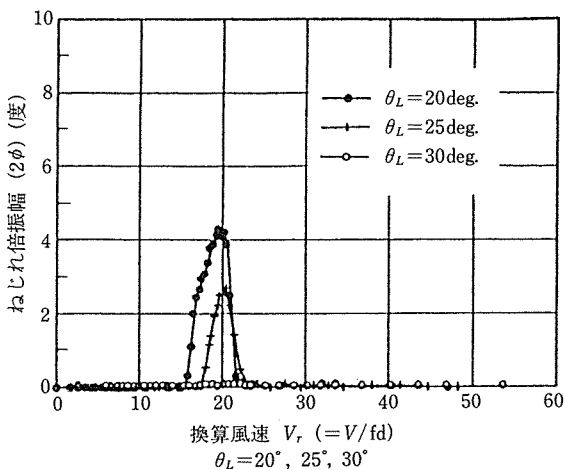


図-10 フェアリングなしの開断面桁の空力弾性応答

### 7. 三次元風洞実験

桁断面が選定されると、三次元の実験ができることに

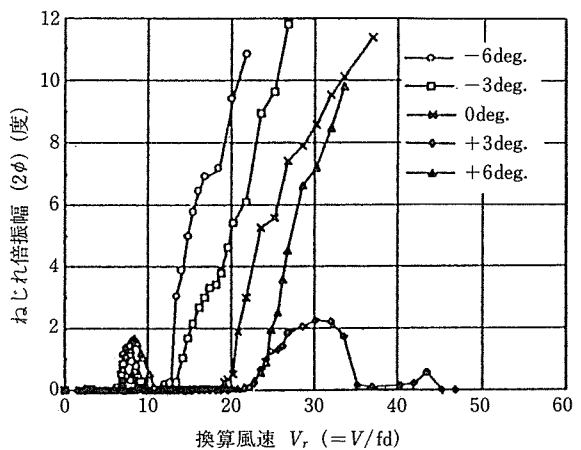


図-11 フェアリング下面傾斜角による空力弾性応答

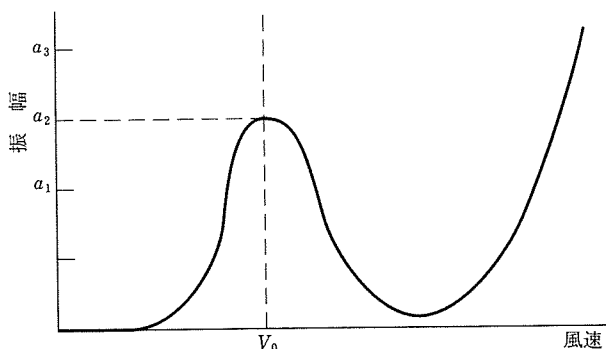


図-12 空力弾性応答図(V-A図)の例( $\sigma_s=0.01$ とする)

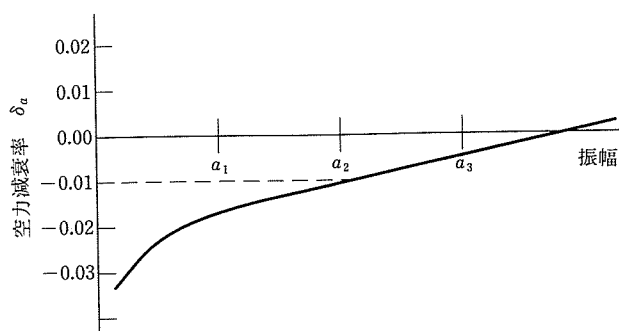


図-13 振幅-空力減衰率図(A- $\sigma$ 図)

なります。三次元実験と二次元実験とが大きく異なるのは、模型です。二次元実験に用いる模型は、剛な模型でしたが、三次元実験で用いる模型は、弾性模型です。実橋と同じ考え方では、模型は作れませんので、桁や塔の剛性をアルミ棒や鋼棒を加工して作った剛性棒という金属製のものを置き換え、これを桁の中央部に設け、その外側に木製の桁の外形材をつけます。この外形材が剛性に寄与しないようにするために、橋軸方向をいくつかのブロックに分け、ブロック間に1mm程度の隙間を設けて模型を製作します。図-14は、PC斜張橋の架設系の実験をするための模型を示したものです。一樣流中および自然風に相似させた乱流中で、加振実験を行い、減衰状態や発散状態を見ます。三次元実験の場合は、二次元実験とは違って、実橋で起こるであろういろいろな振動モードが現れるので、風速を変える場合は、それらの振動モードを逃さないように慎重に実験を遂行する必要があります。PC斜張橋の場合の架設系の乱流中での応答(ガスト応答)では、張出し桁の先端は鉛直および水平の振動をし、8の字型の振動をします。図-15は、三次元実験結果の例です。これによると、風速を上昇させるに従って、振動モードが変化している様子がよく分かります。

## 8. あとがき

PC斜張橋の耐風性能試験について述べてきました

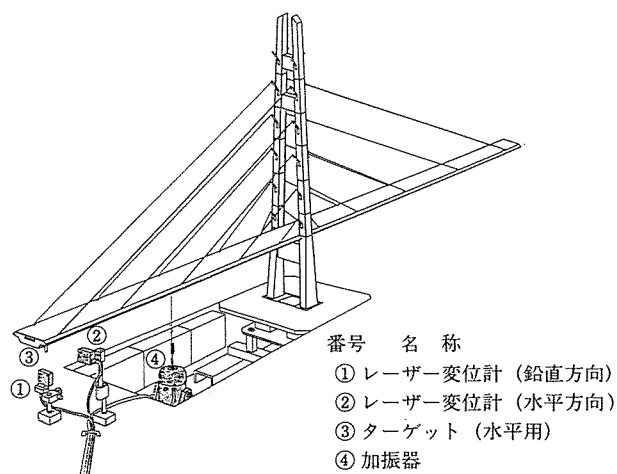


図-14 斜張橋架設系の三次元模型

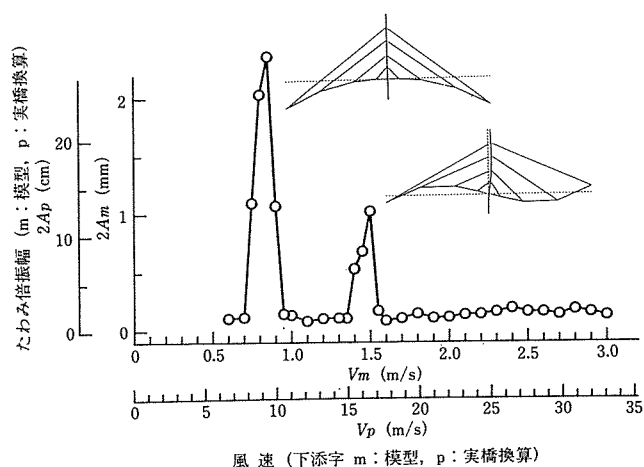


図-15 三次元模型風洞実験応答例

が、ここに述べたことは、PC斜張橋のみにいえることではなく、耐風性を検討しなければならない橋梁についても一般的にいえることであります。本講座では、気象学で取り扱われています風の性質などには触れませんが、風と構造物の関係についての耐風工学は、気象学、流体力学、航空工学、構造力学など多岐にわたる学問の上に成り立っております。特に、橋梁を対象とした耐風工学は、剥離流体による現象を取り扱っているため、未知な部分が多い分野です。特に、外力としての空気力を知るためには、実験によらなければならず、解析的に問題を取り扱えるまでには至っておりません。耐風工学についての成書は少ない状態ですが、参考文献に挙げておりますので、耐風工学を勉強されようとしていらっしゃる方は、参考にして下さい。本講座により、風による構造物の挙動およびその耐風性の検討について何らかのご理解をいただければ、幸いです。

## 参 考 文 献

- 1) 岡内功, 伊藤学, 宮田利雄:耐風構造, 丸善, 1977
- 2) 本州四国連絡橋公団:本州四国連絡橋耐風設計基準, 1976, 同解説, 1976, 本州連絡橋風洞試験要領, 1980, 同解説, 1980
- 3) Y.Kubo, T. Yoshimura, A. Watanabe: Aerodynamic Characteristics of the Yobuko Bridge, Proc. of Int'l Conf. on Cable-stayed Bridge, pp. 593-605, 1987
- 4) 久保喜延:耐風設計の豆知識, 橋梁と基礎, 89-8, pp.112-120, 1989
- 5) 久保喜延, 本多健二, 野上千秋, 加藤九州男, 田崎賢治:P C斜張橋の開断面桁および開断面桁の剥離流相互干渉法による耐風性能改善策に関する研究, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.919-924, 1992
- 6) 久保喜延, 本多健二, 田崎賢治:剥離干渉効果による P C斜張橋開断面桁の耐風性能改善法, 第12回風工学シンポジウム論文集, pp.399-404, 1992
- 7) 久保喜延:長大橋梁の桁および塔の風による振動とその制御, 第2回振動制御コロキウム Part A, pp.1-20, 1993
- 8) 久保喜延, 小石明, 田崎賢治, 中桐秀雄:橋梁断面における空中干渉作用のメカニズムについて, 第13回風工学シンポジウム論文集, pp.353-358, 1994
- 9) 久保喜延: P C 斜張橋桁断面の空力特性, 日本風工学会誌, 59号, pp.11-14, 1994
- 10) 鋼構造協会:構造物の耐風工学, 1995
- 11) 山田均:耐風工学的アプローチ, 建設図書, 1995
- 12) 土木学会構造工学委員会風洞実験相似則検討委員会活動報告書(第2期):プラントフェアリング付 P C 斜張橋桁断面の空力特性, pp.215-222, 1996

【1996年 9 月30日受付】