

構造基本断面の非定常空気力に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON AERODYNAMIC FORCES OF STRUCTURAL SECTION

松本 勝*, 伊藤裕一**, 重高浩一**, 白土博通***, 白石成人****

By Masaru MATSUMOTO, Yuichi ITO, Koichi SHIGETAKA,
Hiromichi SHIRATO and Naruhito SHIRAISHI

In the potential flow such as the flow around an airfoil, the aerodynamic force acting on the structure which is oscillating in the motion of 2-degree of freedom, can be calculated by superposing the forces of the motion of 1-degree of freedom. But, structures such as bridges have bluff bodies for which the flow separates, and so we have to consider whether it is able to superpose the aerodynamic forces in the motion of 1-degree of freedom. In this study, the two dimensional rectangular cylinder is vibrated by the motor in the motion of 2-degree of freedom, and aerodynamic forces are calculated by integrating the surface pressure. Then, the aerodynamic forces between the motion of 2-degree of freedom and 1-degree of freedom are compared.

1. まえがき

土木構造物が受ける空気力は、構造物周囲の流れの状態を近似的に時間的に変化しないとして取り扱えるときに受ける空気力（静的空気力）と、流れの状態を時間の関数として取り扱わなければならないときに受ける空気力（非定常空気力）とに大別される。さらに非定常空気力は、一様な流れの中におかれた物体が運動することにより物体周囲の流れが非定常となることにより新たに作用する空気力（自励的特性を持つ空気力）と時間的空間的に変動する乱れを含む気流など流れそのものが非定常であることにより作用する空気力（強制的特性を持つ空気力）とに大別される。これらの空気力のうち、自励的特性を持つ空気力により発生する、自励振動（フラッター）と呼ばれる現象は、風速の増大と共に構造物の振動振幅が急激に増大するきわめて危険な現象といえよう。橋梁の長大化にともない、その曲げ剛性や捩れ剛性の低下により、フラッター振動の発現風速を予測することが、耐風安全性を評価する上で重要な問題となっている。本研究では各種フラッターのうち、特に連成フラッターを取り上げる。連成フラッターの研究は、構造断面に先立って航空機の翼を対象に、航空工学の分野で始められた。流線型の翼においては、流れの剥離がみられないことから、解析的な研究が可能とされている。Theodorsen¹⁾は、平板周囲の流れにポテンシャル流理論を適用し、振動平板に作用する非定常空気力を求めている。これにより、フラッター発現風速やその他のフラッター特性を理論的に求めることが可能である。

これに対し、一般の構造断面においては、流れの剥離が生じるため、ポテンシャル流理論の適用にはある程度の限界があると思われる。また、構造断面の物理的な特性としても、重心位置と弾性中心位置が共に幅員方向にみて断面中央にある点で、翼断面とは異なっているといえる。そこで、Selberg²⁾は、平板

* 工博 京都大学助教授 工学部土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

** 京都大学大学院 (〒606 京都市左京区吉田本町)

*** 工博 京都大学助手 工学部土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

**** 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

翼のフラッター発現風速を経験式により与え、H型断面のような非流線形断面の場合のフラッター発現風速は、それに補正係数を乗ずることによって求められるとした。この方法は、簡便的にフラッター発現風速を推定できるという点では便利であるが、構造物や空気力の複雑さを考えると、フラッター発現風速の目安を与えている程度であると見なすべきであろう。

一方、Scanlan³⁾ は、連成振動系に対し、非定常空気力係数 H_i^* 、 A_i^* ($i=1, 2, 3, 4$) を定義し、自励的特性を持つ空気力の特性を明らかにした。このとき、非定常空気力係数を実験により求める際に、1自由度振動系の自由振動実験から得られた非連成項の非定常空気力係数を用いて、連成振動系の自由振動実験によって残りの連成項の非定常空気力係数を決定する。しかしこの方法は、1自由度系と連成系での非連成項の非定常空気力係数の値が一致しているのかどうか、つまり、非流線形の断面はその振動形状に依存して空気力が作用することが考えられるため、空気力の線形重ね合わせが出来るのかどうかという点で疑問が残る。

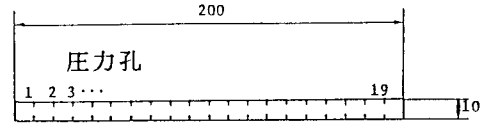
そこで本研究では、2-D矩形断面模型をたわみ一振れ2自由度、振れ1自由度、及びたわみ1自由度で強制加振を行い、模型表面上の圧力分布を測定することにより、両者の非定常空気力の比較を試みた。また得られた非定常空気力から、非定常空気力係数を推定した。

2. 実験概要

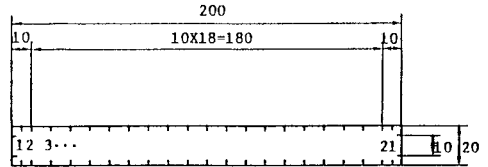
実験に用いた風洞は、吹き出し式エッフェル型風洞（測定部高さ1.0m、幅員0.7m、長さ5.0m）である。実験に用いた模型は、断面辺長比 $B/D=20$ （ B ：幅員、 D ：桁高）、及び $B/D=10$ の2種類の2-D矩形断面模型であり、それらの概略を図1に示す。各模型には、それぞれ38, 46個の表面圧力測定用の圧力孔が設けてある。模型のスパン長は600mmであり、端部には気流の二次元性を確保するために端板が取り付けられている。

模型は、支持アームを介して図2に示す2自由度強制加振機に固定した。この加振機によりたわみと振れとの位相差や振幅比を固定して、様々な連成振動状態を再現することが出来る。今回の実験では、後述の自由振動実験より得られたそれぞれの断面の連成フラッターが起こっている状態での振幅比と位相差を用いてたわみ一振れ2自由度加振を行い表面圧力の測定を行った。また、たわみ1自由度、振れ1自由度の場合についてもこの加振機で加振し表面圧力測定を行った。

圧力測定は、模型表面の圧力孔で取り出した圧力を



(a) $B/D=20$



(b) $B/D=10$

図1 模型概略図（単位 mm）

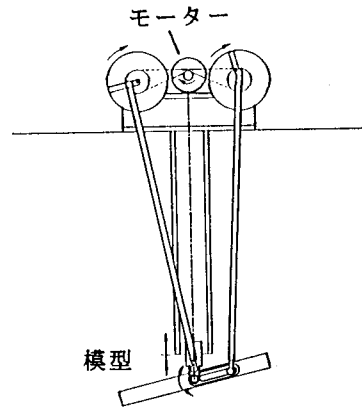


図2 強制加振機

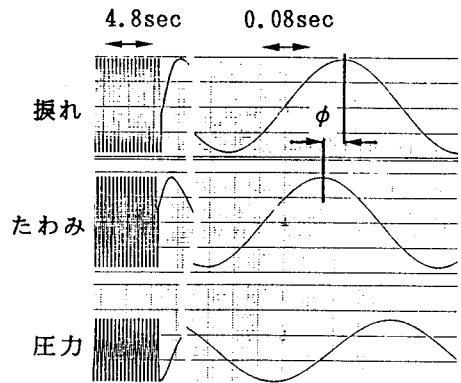
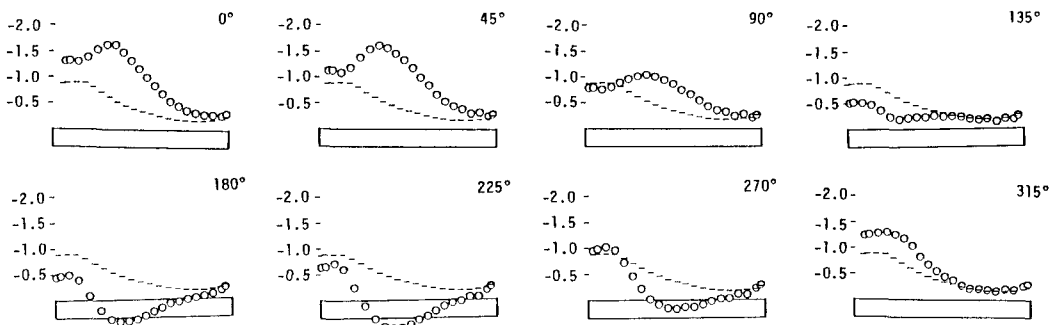
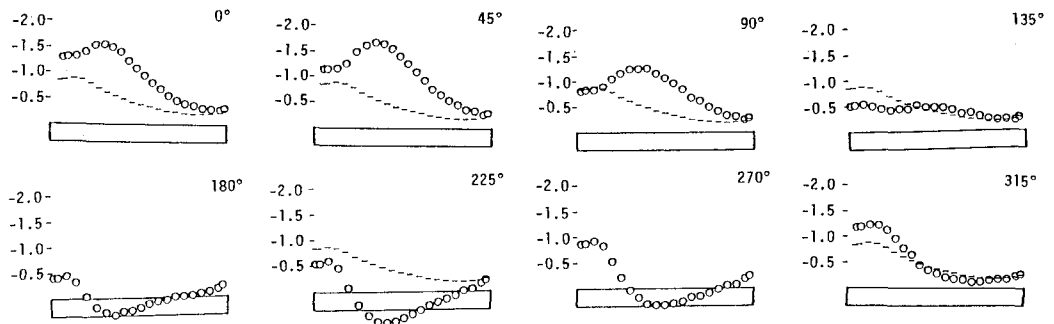


図3 出力波形



(a) 振れ一自由度 ($\alpha_0=0.05\text{rad}$)



(b) たわみ一振れ二自由度 ($h_a=0.0025\text{m}$, $\alpha_0=0.0255\text{rad}$, $\phi=17.9^\circ$)

図4 瞬間圧力分布 ($B/D=10$, $f=2.7\text{Hz}$, $U=10.42\text{m/sec}$)

(短い横線は平均圧力、気流に対して頭上げ最大を 0°)

アルミ管で端板まで導き、ビニールチューブとスキヤニバルブ（スキヤニバルブ社）を介してプレッシャーマイク（豊田工業K.K.）に導き、風洞内の静圧との差を取り出した。取り出された圧力信号は、ローパスフィルタとバンドパスフィルタ（共にNF回路設計ブロックK.K.）を通して、平均圧力と模型振動数成分の変動圧力とに分解し、マルチコーダ（渡辺測器製作所K.K.）とリニアコーダ（グラフテックK.K.）にそれぞれ出力した。変動圧力は、変動振幅と模型の変位との位相差を測定した。ただし、圧力伝達チューブ系が長い（約2.0m）チューブによる圧力位相遅れの補正を次のようにして行った。模型表面上に短いビニールチューブを、開放端が測定用の圧力孔のすぐそばに同じ向きに並ぶように固定した。この短いチューブで取り出した変動圧力を直接プレッシャーマイクに導き、風洞内の静圧との差を測定系と同様に出力させた。このときに与えた変動圧力は、スピーカーによって与えたものと、風洞の下流端の閉塞率を周期的に変化させる装置（パルセーター）によって与えたものの、2種類の変動圧力を用いた。補正値を測定した周波数の範囲は1 Hzから3 Hzまでで、測定結果はスピーカーによるものパルセーターによるものともに周波数に応じて約 4° から 14° となった。

自由振動実験は、模型を左右各4本合計8本のコイルスプリングにより風洞内に水平に支持し、コイルスプリング基部に挿入されたコの字型ピックアップ部にある歪ゲージにより電気的に変位を検出した。模型の自由度は、拘束をつけ変えることにより、たわみ一振れ2自由度、たわみ1自由度、振れ1自由度について、計測を行った。たわみ一振れ2自由度の実験からは、前述の強制加振実験の時に用いる、連成振動時のたわみと振れとの位相差や振幅比を求めた。2つの1自由度の実験からは、非連成項の非定常空気力係数 H_1^* , A_2^* , A_3^* を計算した。

3. 圧力測定結果と非定常空気力係数

たわみ一振れ2自由度実験でのリニアコーダの出力波形を図3に示す。たわみ変位 h は下向きを正、振れ変位 α は気流に対して頭上げを正とし、位相差 ϕ はたわみの正のピークに対する振れの正のピークの遅れで定義した。

非定常圧力測定結果より、 $B/D=1.0$ の場合の瞬間圧力分布の様子を図4に示す。図中の短い横線は平均圧力を表しており、縦軸の値は動圧により無次元化された値である。(a)が振れ1自由度(片振幅 $\alpha_0=0.05(\text{rad.})$) のとき、(b)がたわみ一振れ2自由度(振れ片振幅 $\alpha_0=0.0715(\text{rad.})$, たわみ片振幅 $h_0=0.0025(\text{m})$, 位相差 $\phi=17.9(\text{deg.})$) のときのものである。瞬間圧力の分布は、どちらの振動系も似たような傾向を示す。つまり、振れ変位が最大(頭上げ最大、図中の 0°) の瞬間より少し遅れて、前縁付近の圧力が最も低下し剝離バブルが最大となる。しかしながら、たわみ1自由度(片振幅 $h_0=0.005(\text{m})$) の場合には、平均圧力はよく似た曲線を描くものの、変動圧力の絶対値がかなり小さく計測が困難であったことを考えると、たわみ振動による断面周りの流れのパターンは、静止時とあまり変化が無かったものと考えられる。つまり、連成振動中の断面周りの流れのパターンはたわみ変位よりも振れ変位に多く依存しているものと考えられる。

次に、各瞬間の圧力分布から積分を実行することにより、揚力 $L(t)$ (下向きを正) と断面中心に関するピッチングモーメント $M(t)$ (気流に対して頭上げを正) を計算した。この値を用いて、Scanlan により定義された、非定常空気力係数 H_i^* , A_i^* ($i=1, 2, 3, 4$) を求めた。非定常空気力係数 H_i^* , A_i^* の定義を、次式に示す。

$$L = \frac{1}{2} \rho U^2 (2b) \left\{ k H_1^* \frac{\dot{h}}{U} + k H_2^* \frac{\dot{b} \dot{\alpha}}{U} + k^2 H_3^* \alpha + k^2 H_4^* \frac{h}{b} \right\}$$

$$M = \frac{1}{2} \rho U^2 (2b^2) \left\{ k A_1^* \frac{\dot{h}}{U} + k A_2^* \frac{\dot{b} \dot{\alpha}}{U} + k^2 A_3^* \alpha + k^2 A_4^* \frac{h}{b} \right\}$$

ただし、 ρ : 空気密度, U : 風速, b : 半弦長, k : 換算振動数 ($=b\omega/U$), h : たわみ変位, α : 振れ変位

たわみ一振れ2自由度強制加振を行った場合の非定常空気力係数は、Scanlan が自由振動実験から非定常空気力係数を求めたときと同様に、1自由度強制加振の場合の積分結果から得られた非連成項の非定常空気力係数 (H_1^* , A_2^* , A_3^* , H_4^*) を用いて、残りの連成項の非定常空気力係数を求めた。しかる後に、1自由度強制加振実験から直接得られる連成項の非定常空気力係数との比較を行った。なお比較のために、1自由度自由振動実験により求められた非連成項の非定常空気力係数と、Theodorsen関数により求められた非定常空気力係数を、図中に併せて示す。

自由振動実験では、次式により非定常空気力係数を求めた。

$$H_1^* = \frac{m}{\pi \rho b} (\delta_0 - \delta_h)$$

$$A_2^* = \frac{I}{\pi \rho b^4} (\delta_0 - \delta_a)$$

$$A_3^* = \frac{I}{\rho b^4} \left\{ \left(\frac{f_0}{f_a} \right)^2 - 1 \right\}$$

ただし、 m : 質量, I : 慣性モーメント, δ_0 : 無風時の対数減衰率, δ_h : 有風時のたわみ対数減衰率,

δ_a : 有風時の振れ対数減衰率, f_0 : 無風時の振れ振動数, f_a : 有風時の振れ振動数

また、Theodorsen関数からは、次式により非定常空気力係数が求められる。

$$k H_1^* = -2 \pi F(k)$$

$$k H_2^* = -2 \pi (F(k)/2 + 1/2 - G(k)/k)$$

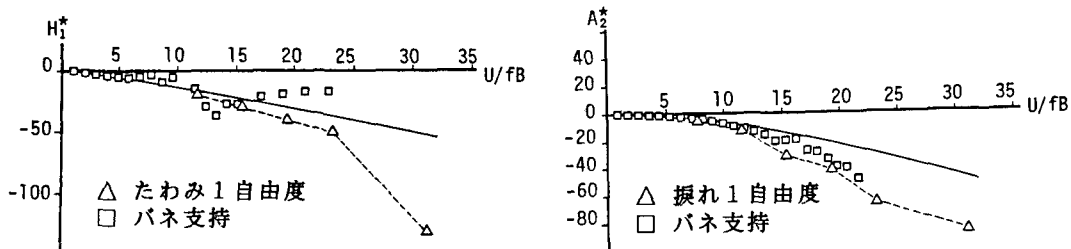
$$k^2 H_3^* = -2 \pi (F(k) + k G(k)/2)$$

$$k A_1^* = \pi F(k)$$

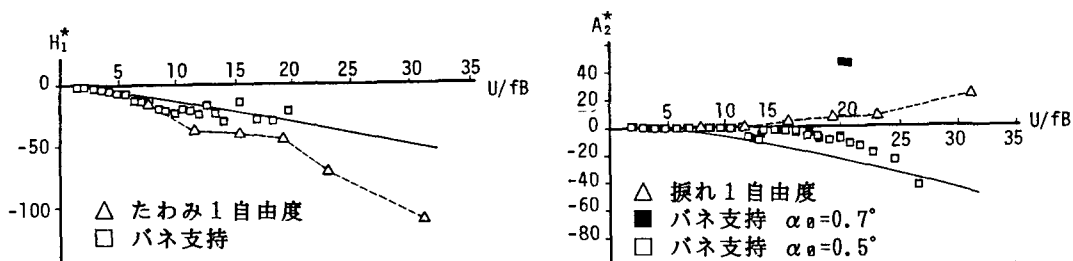
$$k A_2^* = \pi (F(k)/2 - 1/2 - G(k)/k)$$

$$k^2 A_3^* = \pi (F(k) + k G(k)/2)$$

ただし、 $F(k)$, $G(k)$ は Theodorsen関数 ($C(k)=F(k)-iG(k)$) であり、次に示す近似式⁴⁾を用いた。

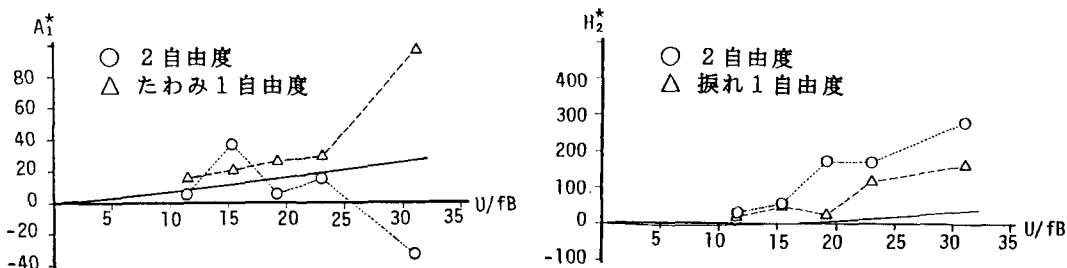


(a) $B/D=20$

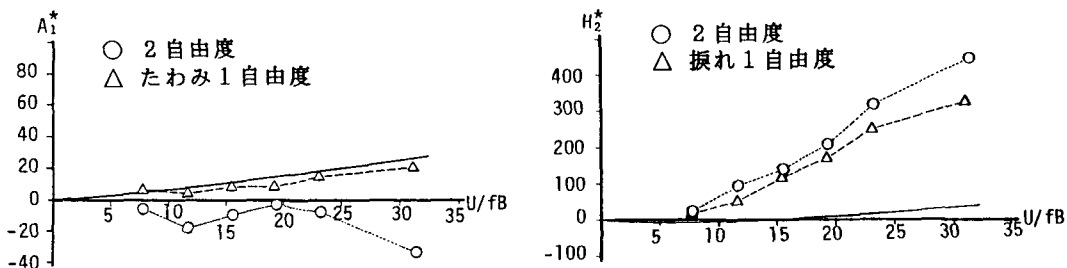


(b) $B/D=10$

図5 非連成項の非定常空気力係数 (曲線はTheodorsen関数より求めた値)



(a) $B/D=20$



(b) $B/D=10$

図6 連成項の非定常空気力係数 (曲線はTheodorsen関数より求めた値)

$$C(k) = 1 - \frac{0.165}{1 - \frac{0.041}{k}i} - \frac{0.335}{1 - \frac{0.32}{k}i}$$

1 自由度強制加振実験の結果による、非連成項の非定常空気力係数の一部を、図 5 に示す。断面辺長比 $B/D=1.0$ の A_2^* (振れ速度の項) を除いて、強制加振実験の結果は、バネ支持実験や Theodorsen 関数による非定常空気力係数と似た傾向を示している。 $B/D=1.0$ の振れ 1 自由度の場合は、バネ支持実験の結果より、 A_2^* は振幅依存性が強く振幅が大きめの時は高風速域で正となる (振動系が不安定となる) ことがわかった。強制振動実験の場合も、この影響により A_2^* が正となったものと思われる。

連成項の非定常空気力係数を、1 自由度強制加振実験の場合と 2 自由度強制加振実験場合で、比較したものの一部を図 6 に示す。 H_2^* (振れ速度の項) はどちらの断面でも、1 自由度と 2 自由度の結果は似かよっているものの、 A_1^* (たわみ速度の項) は、特に高風速で大きく異なっている。このことから、たわみ-振れ 2 自由度系に働く非定常空気力のたわみ振動に依存する成分は、たわみ 1 自由度系とは大きく異なり、たわみ振動よりも振れ振動に多く依存しているものと考えられる。また、 $B/D=2.0$ においても非定常空気力係数の一致がみられなかったことから、偏平な構造断面においても空気力の単純な重ね合わせは困難であることを示しているものと思われる。

4. まとめ

たわみ-振れ 2 自由度強制加振法による空気力測定の結果、断面辺長比 $B/D=2.0$ という偏平な断面においても、連成振動中の非定常空気力が、1 自由度振動中の非定常空気力の単純な重ね合わせによっては、正確には求められないであろうと思われる。また、連成振動中の断面周りの流れのパターンはたわみ振動よりも振れ振動に多く依存しているものと考えられる。

今後、さらに多くの断面を用いて、様々な振幅や連成状態で振動中の断面に働く非定常空気力の詳しい比較検討が望まれる。

謝辞 図面作成に多大な御協力を頂いた橋梁工学研究室の新原雄二氏に感謝致します。

参考文献

- 1) T.Theodorsen : General Theory of Aerodynamic Instability and the Mechanism of Flutter , N.A.C.A. Tech. Report No.496, Washington D.C., 1935
- 2) A.Selberg : Oscillation and Aerodynamic Stability of Suspension Bridges ,A.C.T.A. Polytechnica Scandinavica, Ci 13, 1961
- 3) R.H.Scanlan,A.Sabzevari : Suspension Bridge Flutter Revisited ,A.S.C.E. Struc. Eng. Conf. Washington D.C., 1967
- 4) Y.C.Fung : An Introduction to the Theory of Aeroelasticity ,John Wiley & Sons, Inc, New York, 1955

(1990年10月12日受付)