

第1部門 構造基本断面の連成フラッター特性に関する新しい知見

京都大学工学部 学生員 伊藤靖晃 京都大学大学院工学研究科 フェロー 松本 勝
 京都大学大学院工学研究科 学生員 水野恵介 京都大学大学院工学研究科 学生員 大窪一正

1. 序論 フラッター振動現象は自己励起型発散振動であり、構造物を破壊に至らしめるため、長大吊橋の動的安定性を考える上で最重要検討項目である。そのため、フラッターの励振機構を解明することは必要不可欠であるといえる。そこで本研究では、連成フラッターにおいて支配的であるたわみ・ねじれ 2DOF を考慮し、たわみ・ねじれ間の連成作用に着目した Step-by-step 解析 [1](以下 SBS 解析と呼ぶ) を用いて、分枝のスイッチング特性についての考察を行い、その検証実験としてたわみ・ねじれ 2DOF ばね支持実験を行う。

2. 非定常空気力係数とフラッター解析法 振動する構造断面に作用する非定常揚力 L 及び非定常ピッチングモーメント M は Scanlan[2] により以下のように定式化されている。

$$L = \frac{1}{2}\rho(2b)V^2\left\{kH_1^*\frac{\dot{\eta}}{V} + kH_2^*\frac{b\dot{\phi}}{V} + k^2H_3^*\phi + k^2H_4^*\frac{\eta}{b}\right\}, M = \frac{1}{2}\rho(2b^2)V^2\left\{kA_1^*\frac{\dot{\eta}}{V} + kA_2^*\frac{b\dot{\phi}}{V} + k^2A_3^*\phi + k^2A_4^*\frac{\eta}{b}\right\} \quad (1)$$

ただし、 $H_i^*, A_i^* (i = 1 \sim 4)$: 非定常空気力係数, η : たわみ変位(下向き正), ϕ : ねじれ変位(頭上げ正)
 (\cdot) : 時間微分, V : 風速, ρ : 空気密度, b : 半弦長, k : 換算振動数 ($= b\omega/V$), ω : 円振動数

この L, M を用いてたわみ・ねじれ 2DOF の運動方程式は以下のように表現される。

$$m\ddot{\eta} + C_\eta\dot{\eta} + k_\eta\eta = \frac{1}{2}\rho(2b)V^2\left\{kH_1^*\frac{\dot{\eta}}{V} + kH_2^*\frac{b\dot{\phi}}{V} + k^2H_3^*\phi + k^2H_4^*\frac{\eta}{b}\right\}, I\ddot{\phi} + C_\phi\dot{\phi} + k_\phi\phi = \frac{1}{2}\rho(2b^2)V^2\left\{kA_1^*\frac{\dot{\eta}}{V} + kA_2^*\frac{b\dot{\phi}}{V} + k^2A_3^*\phi + k^2A_4^*\frac{\eta}{b}\right\} \quad (2)$$

ただし、 $C_\eta(C_\phi)$: 単位スパン長あたりのたわみ(ねじれ)粘性係数, $m(I)$: 単位スパン長あたりの質量(慣性モーメント)
 $k_\eta(k_\phi)$: 単位スパン長あたりのたわみ(ねじれ)ばね定数

本研究ではこの運動方程式を複素固有値解析法及び SBS 解析法を用いて解き、フラッター解析を行った。

3. 分枝のスイッチング特性 Fig.1 に、平板空気力を用いて 2 次元平板を対象に行った Torsional/Heaving 2DOF の複素固有値解析及び Torsional, Heaving 各 1DOF 振動解析結果を、SBS 解析結果と併せて示す。複素固有値解析結果では、振動数特性は風速に対して連続的に変化するため、無風時のねじれ固有振動数に帰着するものを Torsional Branch, 無風時のたわみ固有振動数に帰着するものを Heaving Branch としてきた。このため、一般的な構造断面に生じる連成フラッターは、Torsional Branch であると考えられてきた。

振動数特性に着目すると、Torsional Branch では振動数は風速の増加に伴い低下し、フラッター発現風速付近からは風速に対してほぼ一定値をとる。一方、Heaving Branch ではフラッター発現風速付近までは一定値を保ち、フラッター発現風速以上では急激に減少する。この特性は、Torsional, Heaving 各 1DOF 振動解析結果とは大きく異なるものである。たわみ・ねじれ固有振動数と、空力剛性項 H_4^*, A_3^* の影響を大きく受ける振動数特性が連成空気力の作用のみでこれほど大きく変化することは考えにくく、従来から問題とされてきた。SBS 解析では、一部解が収束せずに解を求められない風速域が存在するものの、振動数特性に着目すると、フラッター発現風速以前の低風速域では複素固有値解析の結果とほぼ一致するが、Heaving Branch の振動数が急激に増加し、複素固有値解析で従来 Torsional Branch と考えられてきたものと同程度の値をとるといふ特性を示す。減衰特性に着目しても、フラッター発現風速前後で Heaving Branch において急激に不安定化して、高風速域では複素固有値解析の Torsional Branch に漸近する様子が確認できる。たわみ・ねじれ振幅比特性、位相差(ねじれ変位頭上げ最大からたわみ変位下向き最大)特性についても同様である。

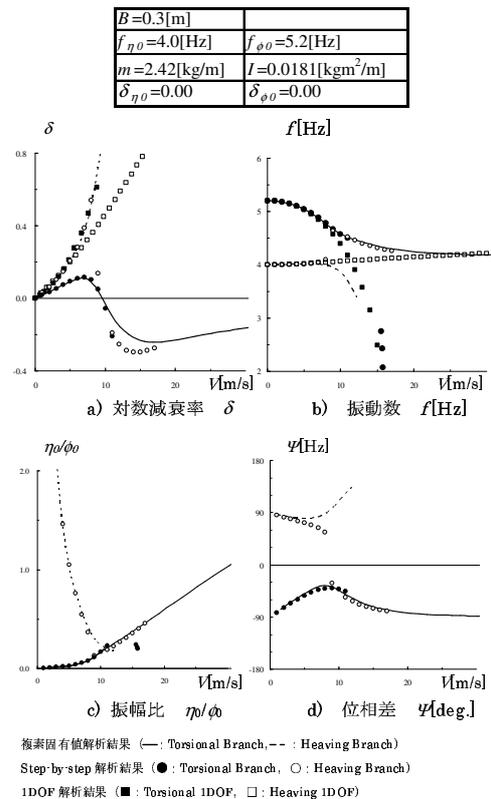


Fig.1 Torsional/Heaving 2DOF, 1DOF 解析結果

4. Torsional/Heaving 2DOF ばね支持実験 SBS 解析法により解析的に Torsional Branch と Heaving Branch の分枝のスイッチング特性が確認された。この結果が実現象に即したものであるかどうかを確認するため、平板空気力と比較的類似した空力特性を有する $B/D = 20$ (全弦長 300mm, 桁高 15mm) 矩形断面を用いて Torsional/Heaving 2DOF ばね支持実験を行った。

4.1 実験諸元を用いたフラッター解析結果 本実験では Torsional / Heaving 各分枝を分類することに重点を置いた。Fig.2 に対数減衰率, 位相差特性, たわみ・ねじれ振幅比, 振動数の実験結果及び実験構造諸元を用いた複素固有値解析結果, SBS 解析結果を併せて示す。SBS 解析では, 複素固有値解析とは異なり, Heaving Branch で連成フラッターが発現し, その振動数がフラッター発現風速付近で急激に増加することがみてとれる。また位相差特性についても, Heaving Branch で 90[deg.] から -90[deg.] に漸近していく様子が見られる。

4.2 実験概要及び考察 フラッター発現前は, 風洞外部からたわみ・ねじれ初期変位を与え, 加振をやめた後の波形から読み取った値をそれぞれ Heaving Branch, Torsional Branch とした。フラッター発現後は, たわみ(ねじれ)を発散しない程度に拘束し, 外部からねじれ(たわみ)振動を与えた。これは, ねじれ(たわみ)振動によってたわみ(ねじれ)自由振動系に非定常揚力(非定常モーメント)が作用し, この振動が安定することと等価である。分枝とはたわみ・ねじれどちらの振動が支配的であるかで分類されるものであるため, たわみ(ねじれ)自由振動系に支配されているこの振動を, 本研究では Heaving Branch(Torsional Branch) と考えた。

実験結果から, Heaving Branch の対数減衰率がピークを有し以後減少する特性及び Heaving Branch と Torsional Branch の振動数が近接する特性, Heaving Branch の位相差特性が複素固有値解析の Heaving Branch から Torsional Branch へ移行していく特性が確認された。連成フラッターの Heaving Branch はフラッター発現風速付近において, SBS 解析の結果と同様の特性を示すことが確認された。

5. フラッター制御に関する考察 連成フラッターが Heaving Branch で発現するとすれば, H_1^* 制御の必要性が示唆される。Fig.3 に, 非定常空力係数間の従属性を無視して H_1^* を変化させたときの SBS 解析結果を示す。これより, $|H_1^*|$ を増加させると, Heaving Branch の減衰のみならず, Torsional Branch でも減衰が増加する特性が確認された。これより, 従来のように, $|A_2^*|$ の値を保持しながら, $|A_1^*|, |H_3^*|$ を抑制することと, $|H_1^*|$ を増加させることが高風速域までのフラッター制御のために重要であることが確認された。

6. 結論 実験及び Step-by-step 解析法により, Torsional Branch と Heaving Branch のスイッチング特性が確認された。これにより, A_1^*, H_3^* の制御以外にも H_1^* の絶対値を増加させることによるフラッター制御の可能性が示された。

謝辞 本研究を遂行するにあたり, 京都大学大学院工学研究科白土博通助教授, 京都大学大学院工学研究科八木知己助手にご指導頂きました。ここに感謝の意を表させていただきます。

$B=0.3[m]$	$D=0.015[m]$
$f_{\eta 0}=3.26[Hz]$	$f_{\phi 0}=3.84[Hz]$
$m=2.98[kg/m]$	$I=0.0198[kgm^2/m]$
$\delta_{\eta 0}=0.0124$	$\delta_{\phi 0}=0.0413$

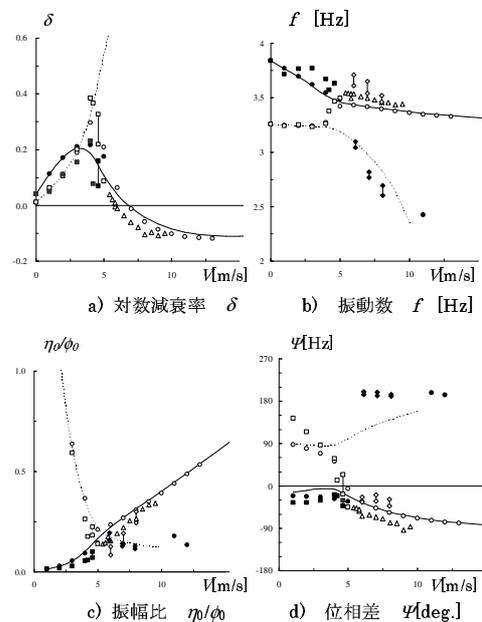


Figure 2: Torsional/Heaving 2DOF spring support experiment results. The figure includes a legend for complex eigenvalue analysis results (solid line for Torsional Branch, dashed line for Heaving Branch) and step-by-step analysis results (filled circles for Torsional Branch, open circles for Heaving Branch). It also lists symbols for various experimental conditions: filled squares for Torsional Branch with initial torsion, open squares for Heaving Branch with initial deflection, filled diamonds for torsion constrained, open diamonds for deflection constrained, and open triangles for coupled state.

Fig.2 Torsional/Heaving 2DOF ばね支持実験結果

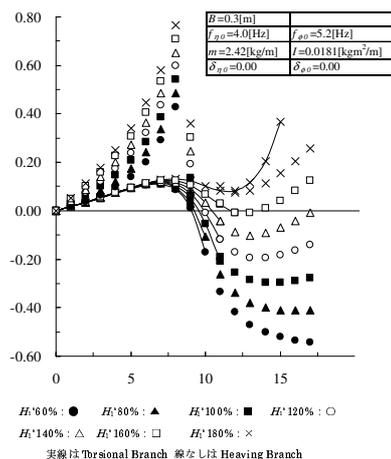


Fig.3 H_1^* 変化による減衰への効果

【参考文献】 1. 小林祐輔, 松本 勝 (1994):”非定常空力係数に着目したフラッター安定化策についての考察” 第 13 回風工学シンポジウム論文集, pp.377-382
 2. R.H.Scanlan Belveau, J.G., Budlong, K.S.(1974):”Indicial Aerodynamic Functions for Bridge Decks”, Jour. Eng. Mech. Division, Proc. ASCE., Vol.100, EM4.