

第 I 部門

step-by-step解析に基づくフラッター発現風速推定式に関する研究

京都大学工学部
京都大学工学研究科学生員 ○加藤嘉昭
学生員 松宮央登京都大学工学研究科
京都大学工学研究科フェロー 松本 勝
学生員 藤原慎也

1. 序論 長大橋梁に生じる連成フラッターは自励型発散振動であり、その発現が構造物を直接破壊に至らしめるため、長大橋建設の際の最重要検討項目である。本研究では、連成フラッター解析手法として、松本らによって提案された step-by-step 解析[1](以下 SBS 解析)を用いる。SBS 解析とは、自由度間の連成作用を考慮する解析手法であるため、分枝が明確に定義でき、高風速域で分枝が入れ替わる「分枝のスイッチング特性」が確認できる[2]。また、SBS 解析では、各分枝においてフラッター特性に対する各非定常空気力係数の寄与がわかり、フラッターの安定化にはどの非定常空気力係数を制御すればよいかを明確に示すことができる[3]。そこで、本研究では、SBS 解析により明らかとなった連成フラッター発生機構に基づいて、フラッター発現風速推定式を導出し、その導出過程の検討を行う。

2. step-by-step 解析 従来フラッター解析に広く用いられてきた複素固有値解析(以下 CEV 解析)は、たわみ・ねじれの 2 自由度運動方程式を数学的に解くことで 2 組のフラッター特性を導き出す解析手法であるため、フラッター発現風速は明らかにできるが、フラッターを安定化するための具体的な情報は得られない。一方、SBS 解析は、ねじれ分枝を例に挙げると、ねじれ振動が強制効果を与えたわみ振動が励起され、このたわみ振動がさらにねじれ系に自励効果を与え、ねじれ振動が励起されるという、連成空気力の作用を逐一計算しているため、連成フラッターの発生機構に基づいた解析手法であるといえる。

3. Selberg のフラッター発現風速推定式 Selberg[4]は平板翼に対して非常に簡単なフラッター発現風速推定式を提案した。Selberg の推定式は以下のように表される。

$$V_F = 3.71 \cdot f_{\phi 0} \cdot 2b \sqrt{\frac{\sqrt{mI}}{\rho(2b)^3} \left\{ 1 - \left(\frac{f_{\eta 0}}{f_{\phi 0}} \right)^2 \right\}} \quad (1)$$

この推定式では、フラッター発現風速が構造諸元のみによって表現されているため、容易に発現風速が求められる一方、フラッター振動数が風速によって変化するにも関わらず、系の固有振動数によって発現風速が表現される理由は未だ完全には解明されていない。なお、実際にはねじれ・たわみ振動数比 $f_{\phi 0}/f_{\eta 0}$ が 1.1 以下の場合には、発現風速は振動数比 $f_{\phi 0}/f_{\eta 0}$ の減少とともに急激に高くなり、 $f_{\phi 0}/f_{\eta 0}=1.0$ においてフラッターは発現しないが、Selberg の式によれば、振動数比 $f_{\phi 0}/f_{\eta 0}$ の減少とともに発現風速も低下し、 $f_{\phi 0}/f_{\eta 0}=1.0$ では発現風速は 0 となり、この式の適用範囲は少なくとも $f_{\phi 0}/f_{\eta 0} > 1.1$ の範囲に限られることが知られている。

4. フラッター発現風速推定式 SBS 解析により明らかとなった連成フラッター発生機構に基づけば、ねじれ分枝においてフラッター振動数とたわみの固有振動数が交わるときにフラッターが発現すると考えられる。さらに、ねじれ分枝においてフラッター振動数をねじれ 1 自由度の振動数で表現すると、次のような 2 次元平板におけるフラッター発現風速推定式が誘導できる。

$$V_F = 3.81 \cdot f_{\phi 0} \cdot 2b \sqrt{\frac{\sqrt{mI}}{\rho(2b)^3} \left\{ 1 - \left(\frac{f_{\eta 0}}{f_{\phi 0}} \right)^2 \right\}} \quad (2)$$

この式は、Selberg が提案したフラッター発現風速推定式(1)とほぼ一致している。

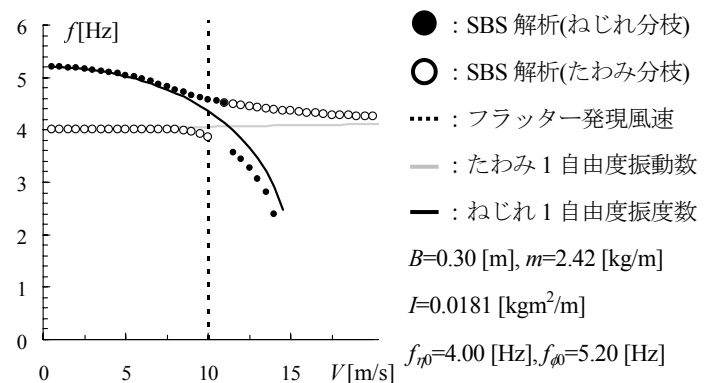


Fig.1 SBS 解析結果：振動数特性(2次元平板)

5. フラッター発現風速推定式の導出過程の検討 Fig.1 に振動数比 $f_{\phi 0}/f_{\eta 0}=1.3$ において 2 次元平板を対象に行った Yoshiaki KATO, Masaru MATSUMOTO, Hisato MATSUMIYA, Shinya FUJIWARA

SBS 解析結果及びたわみ・ねじれ 1 自由度解析結果を示す。また、Fig.2 に SBS 解析及び式(2)によるフラッター発現風速とねじれ 1 自由度振動数とたわみの無風時の固有振動数が交わる風速を示す。これらの図を見ると、フラッター発現風速とねじれ 1 自由度振動数が無風時のたわみ固有振動数が交わる風速との間に差が見られる。

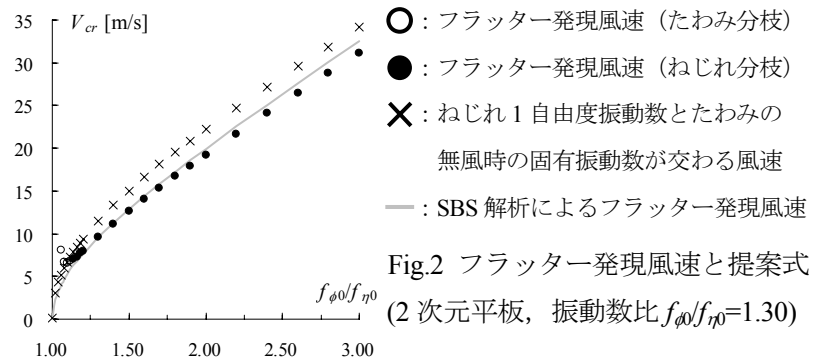


Fig.2 フラッター発現風速と提案式
(2 次元平板, 振動数比 $f_{\phi 0}/f_{\eta 0}=1.30$)

それにもかかわらず、式(2)は高い精度でフラッター発現風速を推定している。これは、式(2)を導出する際には、(a)SBS 解析で定義されるねじれ分枝において、フラッター振動数と無風時のたわみ固有振動数が交わる風速とフラッター発現風速が一致する。(b)ねじれ分枝のフラッター振動数が、ねじれ 1 自由度振動数に等しい。(c)準定常状態を仮定する。(d)たわみ固有振動数は風速によらず無風時の値から変化しない。という 4 つの仮定を用いており、これらが生じる誤差を互いに打ち消したためと考えられる。

ここで、4 つの仮定うち(a)及び(b)、(c)の 3 つの仮定による誤差を検討する。ねじれ分枝のフラッター振動数は、ねじれ 1 自由度振動数と等しいとき、以下のように表される

$$f_F = \sqrt{f_{\phi 0}^2 - \left(\frac{\rho b^4}{I}\right) f_F^2 A_3^*} \quad (3)$$

ここで、 A_3^* は Theodorsen 関数($C(k)=F(k)-iG(k)$)の実部 $F(k)$ 、虚部 $G(k)$ を用いると、以下のように表される。

$$A_3^* = \frac{\pi}{k} \left(\frac{F(k)}{k} + \frac{G(k)}{2} \right) \quad (4)$$

さらに準定常状態を仮定すると $F(k)=1$ 、 $G(k)=0$ であり、これを式(4)に代入すると、

$$A_3^* = \frac{\pi}{k^2} \quad (5)$$

これを式(3)に代入すると、

$$f_{\phi} = \sqrt{f_{\phi 0}^2 - \left(\frac{\rho b^2}{4\pi I}\right) V^2} \quad (6)$$

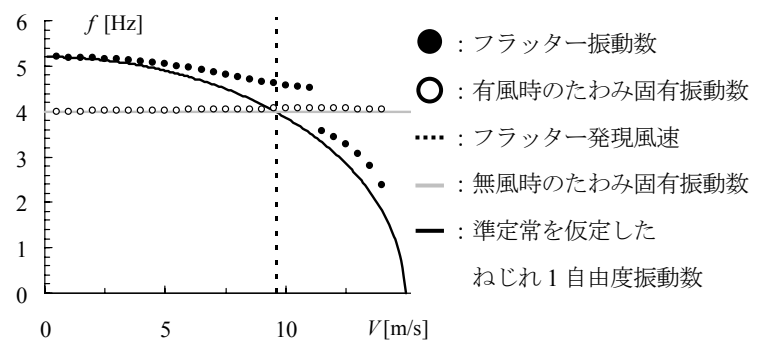


Fig.3 ねじれ分枝の振動数特性

(2 次元平板, 振動数比 $f_{\phi 0}/f_{\eta 0}=1.30$)

ここで、振動数比 $f_{\phi 0}/f_{\eta 0}=1.3$ において 2 次元平板を対象に行った SBS 解析結果におけるねじれ分枝の振動数特性を Fig.3 に示す。Fig.3 を見ると、式(5)で表される A_3^* を用いたねじれ 1 自由度振動数と無風時のたわみ固有振動数が交わる風速とフラッター発現風速がほぼ一致していることがわかる。

6. 結論

以下に本研究で得られた結論をまとめる。

- (1) SBS 解析によって得られたフラッター発現に関する知見から、準定常状態において、ねじれ分枝のフラッター振動数と無風時のたわみ固有振動数が交わる風速がフラッター発現風速と一致すると仮定すると、非常に精度の高いフラッター発現風速推定式が誘導できた。
- (2) SBS 解析の特性から求めた発現風速推定式は、実際にはフラッター発現風速を高い精度で推定しているが、それぞれの仮定で誤差は生じており、4 つの仮定を用いてフラッター発現風速を正確に評価できる理由については、詳細な検討が必要である。

【参考文献】

- [1] M. Matsumoto et al. : Flutter mechanism and its stabilization of bluff bodies. 9th ICWE, pp827-838,1995.
- [2] M. Matsumoto, "Flutter instability of structures", *Proceedings of 4th EACWE*, 2005.
- [3] Matsumoto, M. : Flutter instability of structures", *Proc. of 4th EACWE*, 6-11, 2005.
- [4] A. Selberg: "Oscillation and aerodynamic stability of suspension bridges", *ACTA Polytechnica Scandinavica, Civil Engineering and Construction Series*, No.13, 1961