

第 I 部門

新しいフラッター解析手法を用いた分枝特性に関する基礎的研究

京都大学工学部 学生員 ○藤原慎也
 京都大学工学研究科 学生員 金 起男

京都大学工学研究科 フェロー 松本 勝
 京都大学工学研究科 学生員 伊藤靖晃
 京都大学工学研究科 学生員 松宮央登

1.序論 長大吊橋に生じるフラッター現象は自励型の発散振動であり直接構造物を破壊に至らしめることから、長大吊橋設計上の最重要検討項目となっている。従来の研究では、複素固有値(以下、CEV)解析が広く用いられているが、CEV 解析ではフラッター発現風速の評価は可能であるがフラッターの発生機構を明らかにすることはできない。そこで、松本らは連成フラッターの発生機構に基づいた Step-by-step(以下、SBS)解析[1]を提案し、連成フラッターに関する様々な特性を明らかにしてきた。ところが、SBS 解析と CEV 解析から得られる解には、特にフラッター発現風速後の風速域において差が見られることが指摘されてきた。そこで本研究では、どちらの解が実現象に即した解であるのかを検証するため、たわみ・ねじれ 2 自由度ばね支持実験を行った。実験の結果、CEV 解析の方が実現象により近い解を与えていることが明らかとなったため、SBS 解析に検討を加えた Step-by-stepII(以下、SBSII)解析を提案し、分枝のスイッチング特性及び共存特性に関して考察を行う。

2.フラッター解析法 CEV 解析とは、たわみ・ねじれの運動方程式を固有値問題として定式化し、固有値・固有ベクトルを求めることにより 2 組のフラッター特性を導き出す解析手法である。CEV 解析はフラッター発現風速の正確な評価は可能であるが、フラッター安定化機構に有用な情報を与えるものではない。一方、SBS 解析は Heaving Branch(以下、HB)を例に挙げると、たわみ振動によってねじれ振動が励起され、ねじれ振動がさらにたわみ系に Feed Back するという過程を逐一計算する解析手法であり、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言える。Torsional Branch(以下、TB)についても同様である。このため、SBS 解析は分枝の定義が連成フラッターの発生機構に基づいたものであり、分枝のスイッチング特性並びに共存特性が議論できる。また、対数減衰率 ζ_F の各非定常空気力係数[2]の寄与が明確になり、連成フラッターの安定化機構に重要な役割を果たす非定常空気力係数を明らかにすることができるなどの

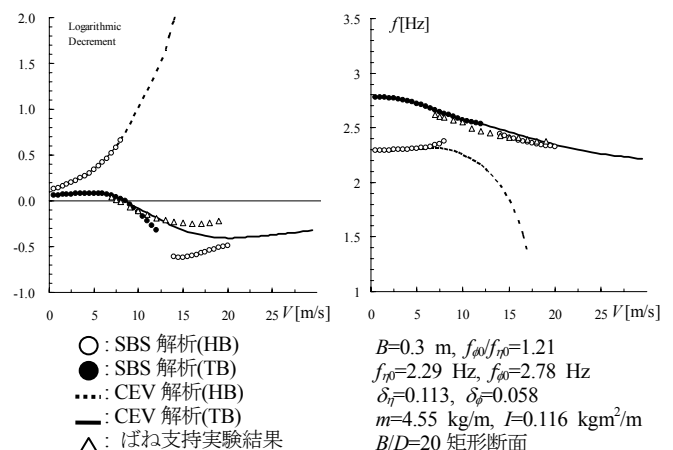


図 1. 各フラッター解析とばね支持実験結果の比較

利点がある。しかし図 1 に示すように、特にフラッター発現風速後の風速域で $B/D=20$ (B :全弦長, D :桁高)矩形断面の両解析結果の減衰特性に差が見られる。また、CEV 解析では高風速域でも TB の解が存在しているのに対し、SBS 解析では解が求まらない。この 2 点が従来から指摘されており、これらについて詳細な検討が必要である。

3.Step-by-step 解析の検討 まず、SBS 解析と CEV 解析の解の違いに着目し、どちらが実現象に即した解であるか検証するため自由振動実験を行った。図 1 に示すとおり、自由振動実験結果は CEV 解析に近い値を示しており、分枝の定義を除けば CEV 解析の方が実現象に沿った解を与えていると考えられる。そこで、減衰特性に着目して SBS 解析の検討を行う。実現象はどちらの系もフラッター振動数 ω_F 及びフラッター減衰 ζ_F で支配されるのに対し、SBS 解析では初期振動として調和振動を仮定することにより減衰を求めており、HB におけるねじれ系または TB におけるたわみ系にフラッター減衰 ζ_F の影響が考慮されていない。そこで、式(1)に示す減衰

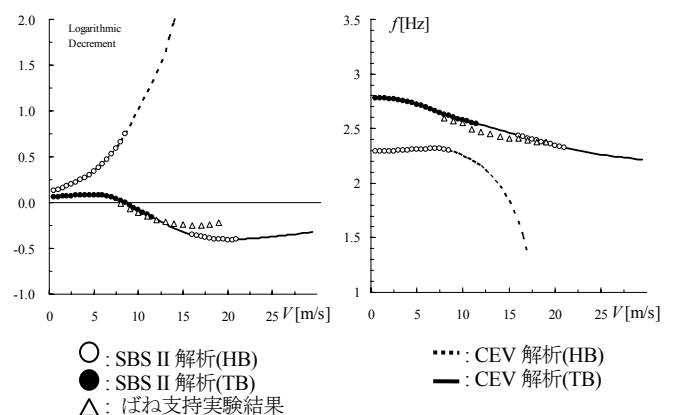


図 2. SBS II 解析と CEV 解析結果及び実験値の比較

振動を仮定した CEV 解析と同様に、式(2)のような減衰振動を仮定し、SBS 解析と同様の式展開を行った。この解析手法を SBSII 解析とし、これを用いてフラッター特性に関する検討を行う。図2に示すように、CEV 解析結果と SBSII 解析結果は分枝の定義を除いて完全に一致し、両解析結果は実験結果にも一致することが確認できた。

$$\{Z\} = \{\eta_0, \phi_0\}^T \exp(\lambda t), \quad \lambda = (-\zeta_F \pm i)\omega_F \quad (1)$$

$$\phi = \phi_0 e^{-\zeta_F \omega_F t} \sin \omega_F t, \quad \eta = \eta_0 e^{-\zeta_F \omega_F t} \sin \omega_F t \quad (2)$$

4.分枝のスイッチング特性及び共存特性 図3に風速の変化に伴う減衰特性及び振動数特性の変化を示す。減衰特性に着目すると、フラッターはまず TB で発生し、それに伴い HB も急激に不安定化し、両分枝が共存すると考えられる。このような特性は、SBSII 解析の収束しない解が振動し、もう一方の分枝付近に存在することからもその可能性が示唆される。またこの共存域を経た後、さらに高風速域では連成フラッターは HB で発生していると考えられる。

次に振動数特性に着目し、SBSII 解析において解が

求まらない理由を検討する。解が求まらない理由は、1)解が振動し収束しない、2)TB において過減衰になる、3)TB においてフラッター振動数が0となる、4)HB においてねじれ系の振動数が0となる、の4つである。ここで、振動数が0になるときは系の剛性が0であり、divergenceが発生すると考えられる。TB でフラッターが発生した後、TB では過減衰もしくはねじれ系における divergence が発生し解が得られなくなる。しかしながら、実現象は HB によって支配されているため、実際にはこの風速で divergence は発生しない。さらに高風速域では、ねじれ1自由度系での静的な divergence の発生が示唆されるが、2自由度系においては連成空気力が作用するため、ねじれ1自由度系での静的な divergence は発生しないと考えられる。最終的に振動系が成立しなくなるのは HB の解が求まらなくなる風速であると考えられ、SBSII 解析によりこの風速域では、HB において連成空気力の影響を受けたねじれ1自由度系の divergence の発生が示唆される。これは SBSII 解析ではたわみ・ねじれの連成を考慮しているため、一方の系が成立しなくなると他方の系も成立しなくなり、解が求まらなくなるからである。なお、式(3)で示すように1自由度解析はねじれの振動数 ω_ϕ で制御されるのに対し、SBSII 解析では連成空気力の影響を考慮しているため、HB のねじれ系の振動数 ω_ϕ^* はねじれ1自由度系の振動数 ω_ϕ より大きなフラッター振動数 ω_F で制御され、無次元風速が低くなり、1自由度解析の解が求まらなくなった風速以降もしばらく解が求まる。このような特性は CEV 解析では得られず、SBSII 解析のみによって得られ、SBSII 解析の利点の1つであると言える。

$$\omega_\phi = \sqrt{\omega_{\phi 0}^2 - \rho b^4 / I} / \omega_\phi^* A_3^*, \quad \omega_\phi^* = \sqrt{\omega_{\phi 0}^2 - \rho b^4 / I} / \omega_F^* A_3^* \quad (3)$$

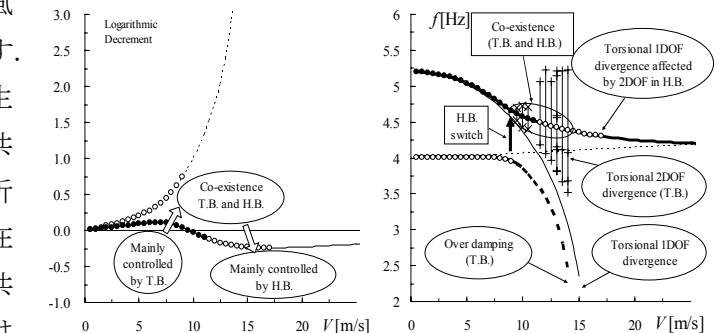
5.結論

本研究により得られた結論を以下にまとめる。

- ・ SBS 解析では調和振動を仮定していたが、SBSII 解析では減衰振動を仮定することにより分枝の定義を除いて CEV 解析と同じ値を有する解が得られることが確認された。
- ・ フラッター発現後の振動数特性として、TB と HB が共存した後、TB のねじれ系での divergence やねじれ1自由度系での静的な divergence の発生が示唆されるが、最終的には HB において連成空気力の影響を受けたねじれ1自由度系の divergence により系が成立しなくなると考えられる。これは SBSII 解析によってのみ得られる特性であり、SBSII 解析の利点の1つであると言える。

【参考文献】

- [1] M.Matsumoto et al. : Flutter mechanism and its stabilization of bluff bodies. 9th ICWE, pp827-838,1995.
- [2] R.H.Scanlan et al. : Indicial Aerodynamic Functions for Bridge Decks, J. Eng. Mech. Proc. ASCE Vol. 100, EM4, 1974.



凡例は図2と同一、ただし
×:SBS II 解析(HB)で収束しない解、+:SBS II 解析(TB)で収束しない解
図3. 風速の変化に伴う振動数特性の変化