

第1部門

連成フラッターを利用した発電システムの効率化に関する基礎的研究

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○伊藤靖晃
京都大学大学院工学研究科 学生員 大窪一正

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 金 起男
京都大学工学部 学生員 松宮央登

1. 序論

長大橋梁に生じるフラッターは、構造物を直接破壊に至らしめる危険な現象であり、橋梁の台風設計における最重要検討項目である。そのためフラッターを制御することを目的とした数多くの研究がなされてきた。その一方で、近年、連成フラッターを利用して風力エネルギーを抽出するフラッター発電に関する研究も進められており、風車と比較しても優れた効率性を示すことが報告されている[1]。そこで本研究では、フラッター発電の実用化に向けて、その効率化について検討を行う。

2. フラッター発電システムの概要

本研究では、磯貝らの提案するたわみ 1DOF ばね支持系にねじれ強制振動を与え、生じるたわみ応答振動からエネルギーを抽出するシステム[1]を想定し、その効率化について検討を行った。このシステムの運動方程式は Scanlan の非定常空気力係数[2]を用いると次式のように表される。

$$m\ddot{\eta} + C_{\eta}\dot{\eta} + k_{\eta}\eta = \rho b^2 \omega_{\phi} H_1^* \dot{\eta} + \rho b^3 \omega_{\phi} H_2^* \dot{\phi} + \rho b^3 \omega_{\phi}^2 H_3^* \phi + \rho b^2 \omega_{\phi}^2 H_4^* \eta \quad (1)$$

ただし、 m ：単位長さあたりの質量、 k_{η} ：たわみバネ定数、 C_{η} ：たわみ粘性係数、 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、 ρ ：空気密度、 b ：半弦長、 $H_i^*(i=1\sim4)$ ：非定常空気力係数、 ω_{ϕ} ：ねじれ加振振動数、とする。このシステムは Eq.(1)に示されるたわみの自由振動系に支配されるものであり、連成フラッターのたわみ分枝に分類される振動現象を巧妙に利用した発電システムであるといえる。

3. 解析手法

振幅比の計算には従来と同様の手法を用いた[3]。本システムから得られるエネルギーは非定常揚力の仕事として評価され、周期を T とすると、1 サイクルあたりに非定常揚力のする仕事 W_{GH} は次式のように表される。

$$W_{GH} = \int_0^T [\rho b^2 \omega_{\phi} H_1^* \dot{\eta} + \rho b^3 \omega_{\phi} H_2^* \frac{1}{\eta_0/\phi_0} (\dot{\eta} \cos \psi - \eta \omega_{\phi} \sin \psi) + \rho b^3 \omega_{\phi}^2 H_3^* \frac{1}{\eta_0/\phi_0} \left(\eta \cos \psi + \dot{\eta} \frac{\sin \psi}{\omega_{\phi}} \right) + \rho b^2 \omega_{\phi} H_4^* \dot{\eta}] T dt \quad (2)$$

$$= \left[\rho b^2 \omega_{\phi} H_1^* + \rho b^3 \omega_{\phi} H_2^* \frac{\phi_0}{\eta_0} \cos \psi + \rho b^3 \omega_{\phi} H_3^* \frac{\phi_0}{\eta_0} \sin \psi \right] \eta_0^2 \omega_{\phi} \pi / T$$

また同様に、非定常ピッチングモーメントのなす仕事から、加振に際して空気力により失うエネルギー W_{SH} を算出することができる。

4. ねじれ加振振動数に着目した効率化の検討

ねじれ加振振動数を変化させた際の発電効率への影響の評価を行うために、 $B/D=20$ 矩形断面を対象に風洞実験を行い、同時に実験諸元を用いて解析を行った。実験で得られたたわみ・ねじれ振幅比(η_0/ϕ_0)を解析結果とともに Fig.1 に示す。Fig.1 に示されるとおり、風速とともにたわみ応答振幅は増大し、得られるエネルギーも大きくなる。また、ねじれ加振振動数がたわみ系の固有振

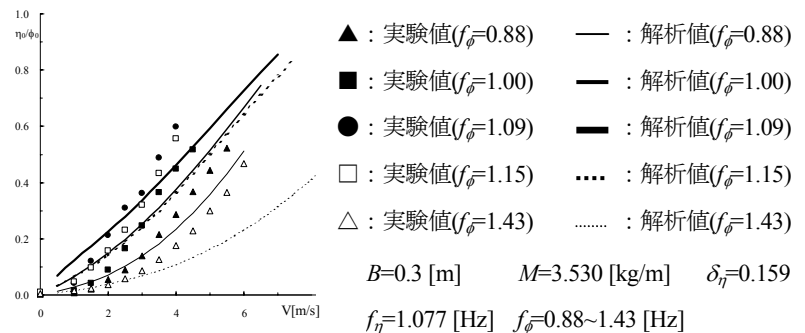


Fig.1 ねじれ加振振動数に着目したたわみ応答特性

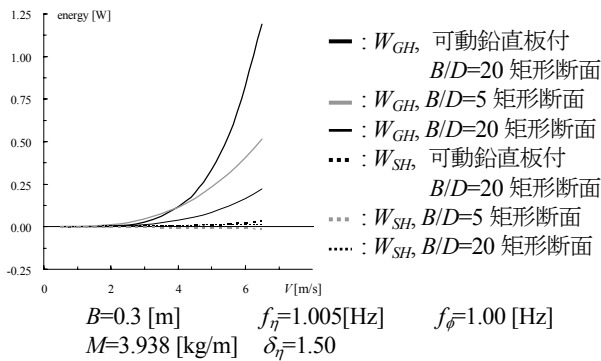


Fig.2 ねじれ強制加振たわみ 1 自由振動系のエネルギー収支

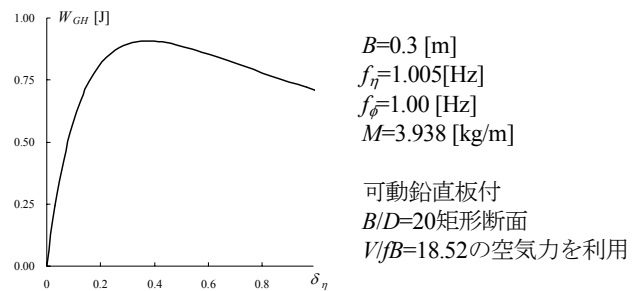


Fig.3 各減衰値に対する利用可能なエネルギー

動数に近いとき最大振幅となることが確認された。これは周波数応答関数が大きくなるためであるといえる。なお、Fig.1 において実験値と解析値に定量的な差異があるのは、構造減衰に振幅依存性があるためであると考えられる。

5. 非定常空気力係数に着目した効率化の検討

Eq.(2)から、非定常空気力係数のうち、 $|H_2^*|$ と $|H_3^*|$ を大きくすることで発電システムの効率化が図れることがわかる。一方、たわみの空力減衰項である H_1^* は一般に負であり、エネルギーロスに働くため、その絶対値を小さくすることが要求される。しかし、相対迎角に起因する非定常空気力係数の従属性から、 $|H_1^*|$ と $|H_3^*|$ を独立に制御することは不可能である。そこで本研究では Active-Control の利用について検討を行った。Active-Control とは、付加的な可動部材の作用によって、断面周りの流れ場を断面の振動とは独立に制御することにより、非定常空気力係数の従属性を壊すシステムである。本研究では、可動鉛直板付 $B/D=20$ 矩形断面の非定常空気力係数を用いた。Fig.2 に、可動鉛直板付 $B/D=20$ 矩形断面の非定常空気力係数を用いて算出した、ねじれ強制加振たわみ 1 自由度系のエネルギー収支を示す。この図に示されるように、Active-Control 等を用いて非定常空気力係数を制御することにより、発電システム的大幅な効率化が図れることが確認された。

6. たわみ構造減衰に着目した効率化の検討

Eq.(2)をたわみ構造減衰の関数として整理し直すと、次式のように表される。

$$W_{GH} = C_\eta \omega_\phi \pi \frac{\left(\rho b^3 \omega_\phi^2 \phi_0 \sqrt{H_2^{*2} + H_3^{*2}} \right)^2}{\left\{ \omega_\phi^2 (C_\eta - \rho b^2 \omega_\phi H_1^*)^2 + (k_\eta - \rho b^2 \omega_\phi^2 H_4^* - m \omega_\phi^2)^2 \right\} T} \quad (3)$$

実際には摩擦等に起因する減衰によるロスが生じるが、摩擦等によるロスは発電機による減衰に比べ十分小さいと考えられるため、本研究ではたわみ構造減衰とは発電機的作用によるものを想定している。Fig.3 にたわみ対数減衰率 δ_η で整理した W_{GH} の値を示す。これより、使用する発電機の規模を調整することによって最適な C_η を与え、発電システムの効率化が図れることが確認された。

7. 結論

本研究により得られた結論を以下にまとめる。

- ・ねじれ加振振動数がたわみ固有振動数に近いとき大きなたわみ振幅が得られる。
- ・Active-Control 等を用いるなどして断面形状を工夫し、 H_1^* 、 H_2^* 、 H_3^* を制御することにより発電システム的大幅な効率化が図れる。
- ・たわみ減衰係数 C_η を調整することでシステムの効率化が図れる。

参考文献

- [1] 磯貝紘二 他(2003)：フラッタ発電の概念検討, International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics 2003, Amsterdam
- [2] R.H.Scanlan et.al. (1974)：Indicial Aerodynamic Functions for Bridge Decks, *J.Eng. Mech. Proc. ASCE Vol.100, EM4*
- [3] 松本 勝 他(2005)：フラッター発電の効率化に関する研究, 土木学会第 60 回年次学術講演会概要集, pp.643-644