

矩形断面の大振幅空力自励振動に対する相対迎角速度に基づいた考察

京都大学大学院 学生員 ○奥西 智也 京都大学大学院 正会員 八木 知己
 (株)ネットプロテクションズ 非会員 小松 尚弘¹⁾ 京都大学大学院 学生員 小野 拓海
 電力中央研究所 正会員 松宮 央登 京都大学大学院 正会員 野口 恭平

¹⁾研究当時京都大学大学院

1. 背景

橋梁の耐風設計においては、破壊に至る危険がある空力自励振動の発現の有無が重要であり、一般に、照査風速付近での微小振動に主眼を置き検討している。そのため、自励振動発現後の高風速域での大振幅応答特性は未だ解明されていない。そこで本研究では、ねじれフラッターが発現すると知られる断面辺長比 $B/D=5$ (B :幅, D :高さ) 矩形断面を対象に風洞実験を行い、相対迎角速度の観点から、大振幅応答および空力特性の把握を試みた。さらに、2種類の定式化した空気力を用いた時間領域応答解析により、空力自励振動の発現機構の解明を行った。

2. 実験方法および空気力の定式化

電力中央研究所の風洞設備を用い、 $B/D=5$ 矩形断面模型について、2種類の空気力測定実験¹⁾および風応答測定実験²⁾を実施した。模型寸法は $B=125\text{mm}$, $D=25\text{mm}$, 長さ $l=1000\text{mm}$ である。まず、ねじれ1自由度正弦波加振時の空気力測定実験により、非定常揚力 L (下向き正)・非定常ピッチングモーメント M (頭上げ正) を測定し、式(1), (2)に従い、加振振幅・風速依存の非定常空気力係数 (H_2^* , H_3^* , A_2^* , A_3^*) を算出した³⁾。

$$L = \frac{1}{2}\rho(2b)U^2l \left\{ kH_2^* \frac{b\dot{\theta}}{U} + kH_3^* \theta \right\} \quad (1)$$

$$M = \frac{1}{2}\rho(2b^2)U^2l \left\{ kA_2^* \frac{b\dot{\theta}}{U} + kA_3^* \theta \right\} \quad (2)$$

y は鉛直変位 (下向き正), θ はねじれ変位 (頭上げ正),

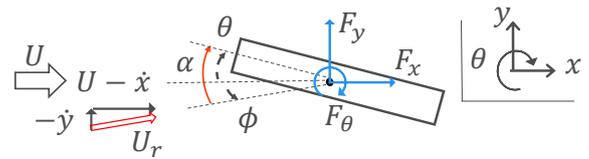


図1 角度 (θ , ϕ , α) の定義

U は風速, ρ は空気密度, b は半弦長, k は換算振動数 ($=b\omega/U$), ω は円振動数である。ここで、鉛直1自由度の空力自励振動であるギャロッピングは、相対迎角 α と相対風速 U_r を用いた準定常理論で説明できるが、ねじれフラッターは、ねじれ速度 $\dot{\theta}$ を考慮しない準定常空気力では説明できないと考えられる。松宮ら⁴⁾は4導体送電線に作用する空気力を、 $\dot{\theta}$ を考慮した空気力の定式化により、 α , U_r , および $\dot{\theta}$ で評価が可能であることを示した。

本研究ではこの定式化を参考に、振動中の物体に作用する空気力を、その瞬間の α および相対迎角速度 $\dot{\alpha}$ の関数として表すことができると仮定し、新たな空気力の定式化を行った(式(3)~(5))。 C_D^* , C_L^* , C_M^* は新たに定義する抗力・揚力・空力モーメント係数で、 α と無次元相対迎角速度 $b\dot{\alpha}/U_r$ の関数である。ねじれ1自由度下で回転速度一定時の空気力測定実験を行い、物体に作用する抗力 F_x ・揚力 F_y ・ピッチングモーメント F_θ を測定することにより、様々な α および $\dot{\alpha}$ での、 C_D^* , C_L^* , C_M^* を算出した。 α は θ と並進振動に伴う相対迎角 ϕ の和であり(図1), ねじれ1自由度下では $\phi=0$ のため、 $\alpha=\theta$ となる。

$$F_x = \frac{1}{2}\rho U_r^2 l \left\{ -BC_L^* \left(\alpha, \frac{b\dot{\alpha}}{U_r} \right) \sin\phi + DC_D^* \left(\alpha, \frac{b\dot{\alpha}}{U_r} \right) \cos\phi \right\} \quad (3)$$

$$F_y = \frac{1}{2}\rho U_r^2 l \left\{ BC_L^* \left(\alpha, \frac{b\dot{\alpha}}{U_r} \right) \cos\phi + DC_D^* \left(\alpha, \frac{b\dot{\alpha}}{U_r} \right) \sin\phi \right\} \quad (4)$$

$$F_\theta = \frac{1}{2}\rho U_r^2 l \left\{ B^2 C_M^* \left(\alpha, \frac{b\dot{\alpha}}{U_r} \right) \right\} \quad (5)$$

3. 空気力測定実験結果

正弦波加振時の空気力測定実験で得られた非定常空気力係数 A_2^* を図2に示す。 $A_2^*=0$ 付近では空力的な励振力・減衰力が作用せず、ねじれ1自由度系で、ねじれ振動は定常とな

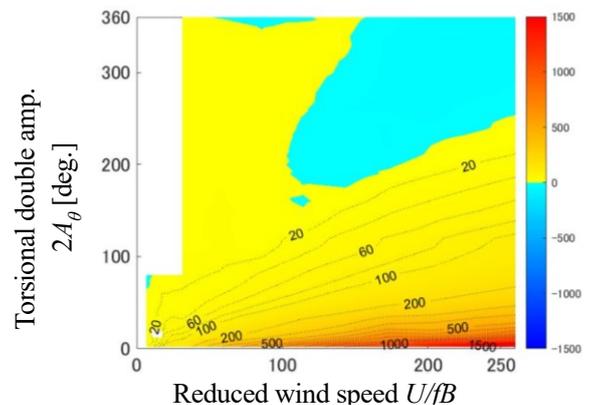


図2 非定常空気力係数 A_2^* の振幅・風速依存性

キーワード:ねじれフラッター, 大振幅応答, 相対迎角速度

連絡先:〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 Tel 075-383-3244

る。したがって、図2より、 $B/D=5$ 矩形断面において、一般に発散振動とされるねじれフラッターが、高無次元風速域では、大振幅の定常振動となることが確認された。

次に、回転速度一定時の空気力測定実験で算出された空力モーメント係数 C_M^* を図3に示す。 C_M^* は $\dot{\alpha}=0$ のとき静的空力係数 C_M と一致する。 $\dot{\alpha}$ に伴い C_M^* が大きく変化することから、 $\dot{\alpha}$ に伴う空気力の影響が大きいといえる。さらに、相対迎角速度を考慮した空気力を用いて、ねじれ1自由度系で正弦波振動中の空気力を解析により算出し、非定常空力係数 A_2^* を求めた(図4)。図2と比較すると、よく一致している。 H_2^*, H_3^*, A_3^* も同様に算出でき、精度のよい一致が確認された。よって、各刹那の α と $b\dot{\alpha}/U_r$ で整理した相対迎角速度を考慮した空気力は、ねじれ1自由度系での任意のねじれ振動を表現できると考えられる。

4. 風応答測定実験結果と時間領域応答解析結果の比較

図5に、高無次元風速域での3自由度風応答測定実験結果と、2種類の時間領域応答解析結果(従来の準定常空気力を用いた解析、および相対迎角速度を考慮した空気力(式(3)~(5))を用いた解析)の定常応答状態における倍振幅を示す。風応答測定実験では、ねじれ卓越振動を発生させ空力連成の影響を確認するため、ねじれと鉛直・水平振動数比を $f_{\theta 0}/f_{y0}=1.7$ および $f_{\theta 0}/f_{z0}=2.0$ に設定した。その結果、ねじれ振動数付近での鉛直ねじれ2自由度連成の大振幅応答の発現が判明した。

相対迎角速度を考慮した空気力を用いた解析では、実験で応答が確認された全風速域で、応答の再現が可能であった。よって、相対迎角速度を考慮した空気力により、鉛直ねじれ2自由度連成の大振幅応答を説明できる。一方、準定常空気力を用いた解析においては、比較的低無次元風速域では応答の再現ができなかったが、比較的高無次元風速域では、応答を再現できた。ここから、相対迎角速度を考慮した空気力による解析でのみ応答が再現できた、比較的低無次元風速域では、相対迎角速度に伴う空気力の影響が大きい振動であり、無次元風速が大きくなると、相対迎角速度の寄与が小さく準定常空気力で説明できる振動であるといえる。

5. 結論

1) 正弦波加振時の空気力から算出された非定常空力係数 A_2^* より、高無次元風速域におけるねじれフラッターは、大振幅の定常振動となる。2) 相対迎角および無次元相対迎角速度で整理した空気力は、非定常空力係数 ($A_2^*, A_3^*, H_2^*, H_3^*$) を算出できるため、ねじれ振動中の物体に作用する空気力を表せると考えられる。3) 大振幅応答を相対迎角速度を考慮した空気力により説明できた。また、比較的低無次元風速域では相対迎角速度に伴う空気力の影響が大きく、比較的高無次元風速域では、その影響が小さくなると確認された。

参考文献

- 1) 松宮ら：任意波形が入力可能な回転装置を用いた4導体電線の非定常空気力測定実験，日本風工学会2019年度年次研究発表会，2019。
- 2) 松宮・西原：4導体送電線の大振幅ギャロッピング振動時における空気力モデルの検討，日本風工学会論文集，Vol.38, No.4, 87-100, 2013。
- 3) Scanlan and Tomko：Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivatives, J Engineering Mechanics, Vol.97, No.EM6, 1717-1737, 1971。
- 4) 松宮ら：4導体送電線における相対迎角・相対風速・無次元ねじれ速度を用いた空気力の定式化，土木学会第71回年次学術講演会概要集，1151-1152, 2016

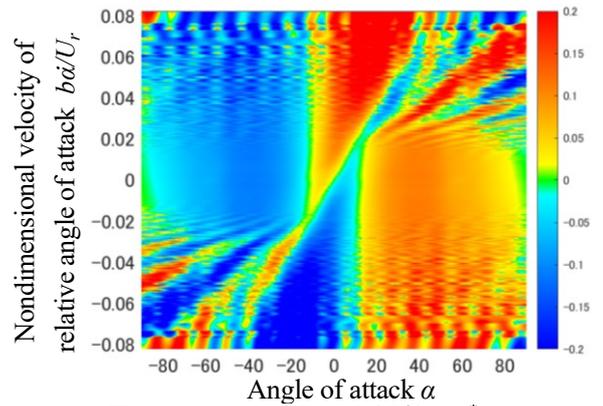


図3 空力モーメント係数 C_M^*

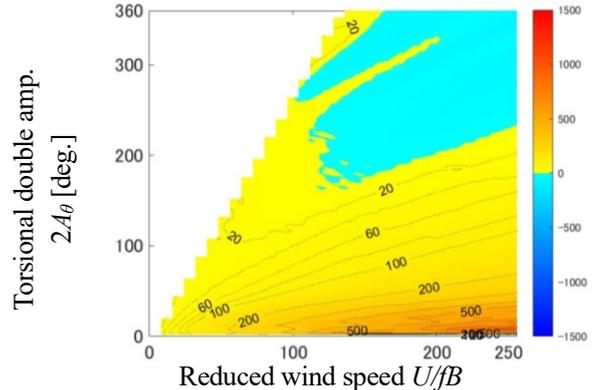


図4 A_2^* から算出した C_M^*

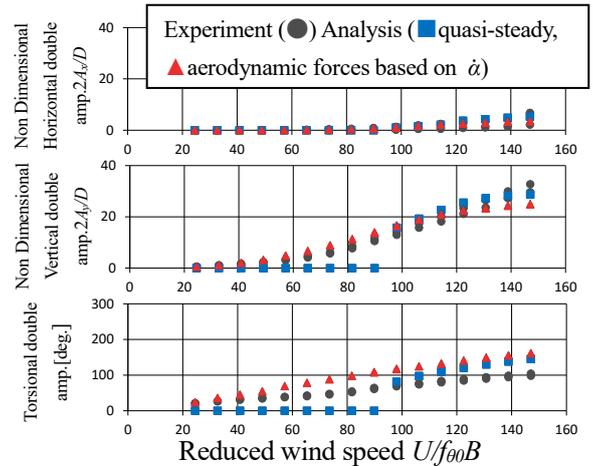


図5 振幅応答図