

## 一定速度回転時の非定常空気力に基づく矩形断面の大振幅ねじれフラッターの検討

京都大学 学生員 ○後藤 崇文  
 京都大学 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 正会員 八木 知己  
 京都大学 学生員 奥西 智也  
 京都大学 正会員 野口 恭平

## 1. 背景および目的

橋梁は強風下で空力自励振動を発現する可能性があるが、これは発散振動とされているため、振動自体を発現させないに設計することが重要である。それゆえ、従来の研究は自励振動の発現の有無に焦点を当てたものが多く、微小振幅域での検討が主である。よって、振動発現後の大振幅応答特性については未解明な部分が多い。橋梁で発生する空力自励振動のうち、鉛直1自由度振動のギャロッピングは、高無次元風速において準定常理論により大振幅応答まで評価可能である。しかしねじれフラッターなど、ねじれを伴う振動については、ねじれ速度を考慮しない準定常理論では高無次元風速域においても応答を表現できず、問題である。本研究では、矩形断面のねじれ1自由度系を対象を絞り、一定速度回転中の模型に作用する非定常空気力を、回転速度を様々に変えつつ計測することで、ねじれ速度を持つ模型の空力特性を把握した。さらに提案する空気力モデルに基づき、かつ得られた空気力を利用して、高風速・大振幅を有するねじれフラッターを説明することを試みた。

## 2. 自由振動実験概要

電力中央研究所の風洞設備<sup>1)</sup>を用い、ねじれ1自由度の大振幅自由振動実験を実施した。振り子を用いて復元力を作用させることで、ねじれ1自由度振動系を実現した(図-1)。なお、振り子は模型の左右に設置した。対象とした模型は $B/D=5$ 矩形断面(幅 $B=0.125\text{m}$ 、高さ $D=0.025\text{m}$ 、長さ $l=1.000\text{m}$ 、アクリル樹脂製)である。この断面では、微小振幅領域においてはねじれフラッターが発現することが知られている。模型の固有振動数は $f_{\theta 0}=0.58\text{Hz}$ とした。つり合い時の模型の迎角を $0^\circ$ に設定し、風速を変化させ、応答の計測を実施した。無次元風速 $U/f_{\theta}B$ ( $U$ : 風速,  $f_{\theta}$ : 振動数)の範囲は41~277であった。初期条件として、ねじれ変位が迎角 $0^\circ$ の状態とある迎角を有する場合の二つを考え、い

れも模型を静かに放し計測を行った。その結果、初期条件によらず、ねじれフラッターが発現した(図-2, 青)。

## 3. 空気力測定実験

大振幅振動中の物体に作用する空気力について、松宮<sup>2)</sup>は4導体送電線について準定常空気力をもとに、ねじれ速度を考慮して空気力を定式化した。本研究ではこれを参考に、模型に作用するねじれ方向の空気力を以下のように定式化した。

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

$\rho$ : 空気密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ,  $b$ : 半弦長( $=B/2$ ),  $\theta$ : 迎角,  $C_M^*$ は新たに定義する空力モーメント係数である。 $\theta$ と $F_{\theta}$ の定義を図-3に示す。この力はねじれ方向の準定常空気力に、ねじれ速度 $\dot{\theta}$ を無次元ねじれ速度 $b\dot{\theta}/U$ の形で変数として非線形的に考慮したものとみなすことができる。

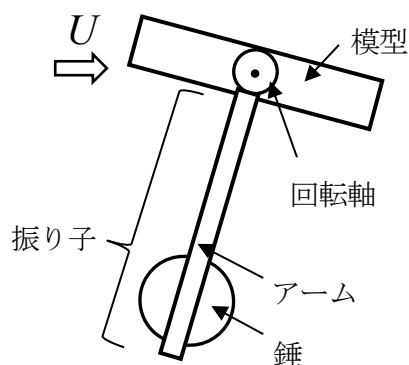


図-1 自由振動実験機構（振り子は風を受けない）

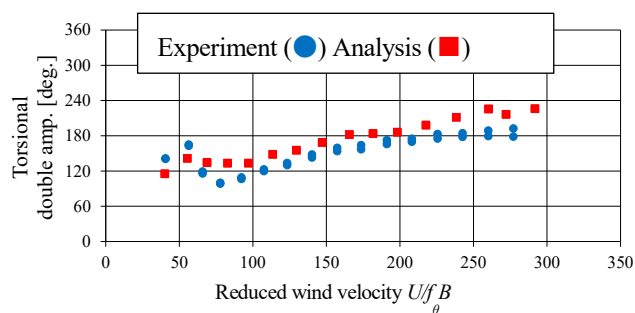


図-2 無次元風速-応答ねじれ倍振幅関係

キーワード ねじれフラッター, 大振幅応答, ねじれ速度, 一定速度回転

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 075-383-3170

次に、式(1)中の  $C_M^*$  を算出するために、一定速度で連続回転中の模型に作用する非定常空気力を測定した。モーターによって模型の回転速度を制御し、風速を変化させて計測を実施した (図-3)。迎角およびねじれ速度の組み合わせごとにねじれ方向の非定常空気力  $F_\theta$  を求め、 $C_M^*$  を算出した結果を図-4 にコンター図として示す。  $b\dot{\theta}/U = 0$  の場合は、静的空気力係数  $C_M$  と一致することを別途確認している。図-4 より、  $b\dot{\theta}/U$  の絶対値が大きくなるにつれて、  $C_M^*$  の  $C_M$  からの乖離が大きくなることが確認できる。このように、ねじれ方向に運動する物体に作用する非定常空気力に対し、ねじれ速度の影響が大きいことが明らかとなった。なお、ねじれ速度を無次元化した変数として  $b\dot{\theta}/U$  を用いることの妥当性を確認するため、  $b\dot{\theta}/U$  を一定に保ち、  $\dot{\theta}$  および  $U$  の組み合わせを変えて  $C_M^*$  の変化を確認した (図-5)。

$b\dot{\theta}/U = 0.0642$  のもとで、  $\dot{\theta}$  と  $U$  の値の組によらず  $C_M^*$  の値はほぼ等しくなった。  $b\dot{\theta}/U$  が他の値のときも同様のことがいえた。これより  $b\dot{\theta}/U$  を変数とするものの妥当性が示された。

#### 4. 時間領域応答解析および自由振動実験結果の考察

式(1)に示したねじれ速度を考慮した空気力の、ねじれ振動現象への適用可能性を検討するため、時間領域応答解析を実施し、定常応答振幅を算出した。左辺を構造系、右辺を式(1)の空気力を外力とした、以下に示す運動方程式を解く。

$$I\ddot{\theta} + 2IC_\theta\dot{\theta} + K_\theta = F_\theta \quad (2)$$

$I$  は慣性モーメント [ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ]、 $C_\theta$  は構造減衰を表す係数 [ $\text{s}$ ]、 $K_\theta$  は系の復元モーメント [ $\text{N}\cdot\text{m}$ ] である。時間積分法には4次のルンゲ・クッタ法を用い、時間刻みは0.01秒とした。

無次元風速毎の定常応答振幅の解析結果を、自由振動実験結果と合わせて図-2 に示す。図-2 より、解析によって自由振動実験で確認された定常応答を概ね再現できた。これより、一定速度回転時の非定常空気力を計測することで、高無次元風速域におけるねじれ1自由度定常振動現象を説明可能であることが示された。

#### 5. 結論

- (1) 迎角  $\theta$  とねじれ速度  $\dot{\theta}$  に依存するねじれ方向の空気力係数  $C_M^*$  は、ねじれ速度の影響が大きいことが確認された。なお  $C_M^*$  は、  $b\dot{\theta}/U$  が一定であれば  $\dot{\theta}$  と  $U$  にかかわらず等しいことが確認されたことから、  $\theta$

と  $b\dot{\theta}/U$  により一意に決まることが示された。

- (2) 一定速度回転中の非定常空気力を計測することにより求めたねじれ速度を考慮した空気力は、高無次元風速域におけるねじれ1自由度定常振動現象を説明可能であることが示された。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) Matsumiya, Nishihara, Yagi: Aerodynamic modeling for large-amplitude galloping of four-bundled conductors, Journal of Fluids and Structures, Vol.82, 559-576, 2018.

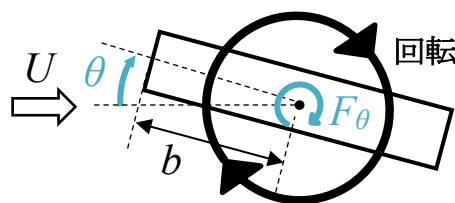


図-3 空気力計測

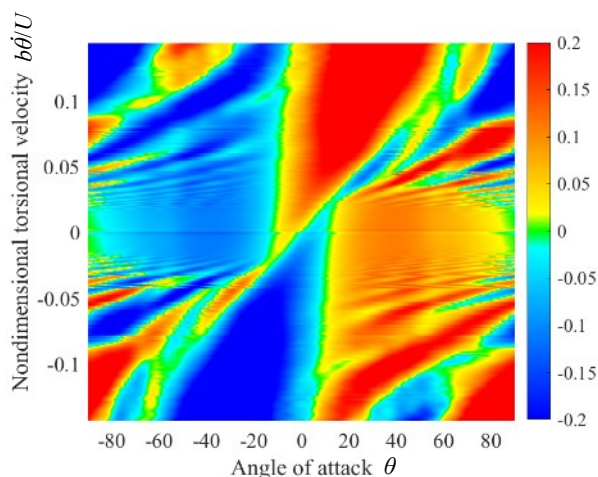


図-4 空気力係数  $C_M^*$

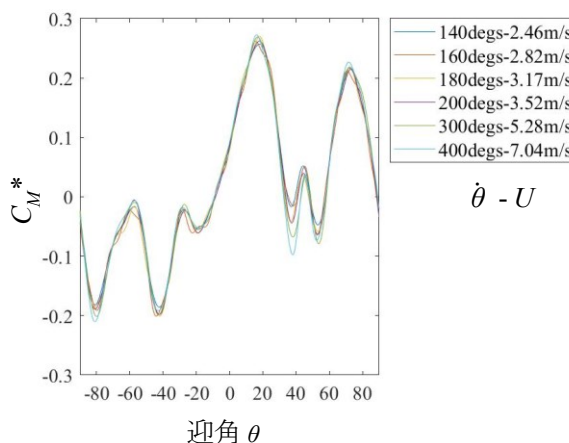


図-5  $b\dot{\theta}/U = 0.0642$  における  $C_M^*$  の比較