

第 I 部門 断面辺長比 5 の矩形断面におけるねじれ大振幅空力自励振動応答特性

京都大学工学部 学生員 ○小松 尚弘 京都大学大学院工学研究科 正会員 八木 知己
 京都大学大学院工学研究科 学生員 佐々木 雄多 (一財) 電力中央研究所 正会員 松宮 央登
 (一財) 電力中央研究所 非会員 西原 崇

1. 背景

構造物は風により空力自励振動を発生し、旧 Tacoma Narrows 橋のように破壊に至る可能性を有する。耐風設計上は自励振動の発生を避けるため、微小振幅域での構造物の空力不安定性が議論の焦点となることがほとんどであり、大振幅域での自励振動応答特性は未解明である。そこで本研究では、ねじれフラッターが発生する断面辺長比 $B/D = 5$ (B : 幅, D : 高さ) 矩形断面を用いた自由振動実験により、大振幅空力自励振動応答特性の把握を試みた。また、時間領域応答解析によって自励振動応答を発生機構別に分類した。

2. 3 自由度弾性支持自由振動実験

実験装置は、図 1 に示すような電力中央研究所の風洞設備¹⁾を用いた。測定する無次元風速域を変化させるため、以下の 3 種類の模型を用いた。

- Model1 : $B = 125\text{mm}, D = 25\text{mm}$
- Model2 : $B = 300\text{mm}, D = 60\text{mm}$
- Model3 : $B = 500\text{mm}, D = 100\text{mm}$

いずれも模型長さ $l = 1000\text{mm}$ である。水平 x ・鉛直 y ねじれ θ の 3 自由度系において、ねじれ振動数 $f_{\theta 0}$ を鉛直・水平振動数 f_{y0}, f_{z0} と離す ($f_{\theta 0}/f_{y0} \approx f_{\theta 0}/f_{z0} = 1.4 \sim 1.9$) ことで、ねじれ 1 自由度卓越振動の発生を狙った。無次元風速は $U/f_{\theta 0}B = 0 \sim 134$ の範囲で変化させた。

3. 時間領域応答解析

時間領域応答解析では、振動中の相対風速 U_r ・相対迎角 α_r から算出される準定常空気力を用いた。しかし、準定常空気力にはねじれ速度同相項が空気力に含まれておらず、ねじれフラッターの発生を説明できない。そこで本研究では、式(1)のように仮想的にねじれ速度 $\dot{\theta}$ を加味した空気力 F'_θ を新たに考慮した²⁾。 C_M はピッチングモーメント係数である。 G はねじれ速度同相項の係数である。 $G = 0$ のとき、式(1)はねじれ方向の準定常空気力 F_θ と一致する。

$$F'_\theta = \frac{1}{2} \rho U_r^2 l \{ B^2 C_M(\alpha_r) \} + 2\pi G \frac{B \dot{\theta}}{U_r} \quad (1)$$

本研究では、以下の 3 自由度運動方程式を用いて、4

次のルンゲクッタ法による時間領域応答解析を行った。

$$m_q \ddot{q} + 2m_q C_q \dot{q} + K_q(x, y, \theta) = F_q \quad (2)$$

q は x, y, θ のいずれかを表し、 m_q は質量 m [kg] ($q = x, y$) または慣性モーメント I [kg m^2] ($q = \theta$)、 C_q は構造減衰の係数、 K_q は弾性ひもによる復元力である。 F_q は準定常空気力であり、ねじれ振動系では式(1)に示す F'_θ を用いた。 $G = 0$ として準定常空気力を用いた解析に加えて、 $G > 0$ の範囲で、各ケースのねじれ応答振幅が実験結果と合うように G を調整した解析を実施した。

4. 実験結果と解析結果の比較及び考察

実験で得られた応答の、各自由度の固有振動数成分を図 2 に、ねじれ固有振動数成分の解析結果との比較を図 3 に示す。横軸を無次元風速 $U/f_{\theta 0}B$ 、縦軸は水平・鉛直無次元倍振幅 $2A_q/D$ ($q = x, y$)、ねじれ倍振幅 $2A_\theta$ [deg.] とし、定常振動時の最大・最小振幅を示した。実験結果は各 Case で色分けした。解析結果は、 $G = 0$ (準定常空気力) の場合は四角、 $G > 0$ でねじ速度同相項を考慮した場合は三角で示した。初期条件により異なる応答が見られた際は、model1, model2 で区別した。矢印付きプロットは、その方向の振幅が測定可能域を超え、定常応答を測定できなかったことを示す。図 2, 3 の同じ無次元風速域において Case 毎に振幅が異なるのは、各 Case でスクルートン数 (Sc 数) が異なるためである。表 1 に、解析で用いた G を示す。

実験 (図 2, 図 3) では、ねじれ固有振動数で振動する鉛直・ねじれ 2 自由度連成振動が見られた。発生風速付近でねじれ 1 自由度が卓越しており、ねじれフラッター起因の振動と考えられる。 Sc 数が小さい Case4 では、ねじれ倍振幅 300 度に至る大振幅応答を示した。

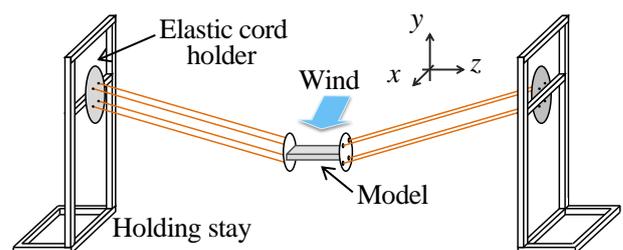


図 1 弾性支持方法

図3, 表1より, $U/f_{\theta 0}B$ が 80 以下 (領域 1) では, 高無次元風速域になるほど, 小さい G で実験結果が再現され, $U/f_{\theta 0}B$ が 80 以上 (領域 2) では, 準定常空気力を用いた解析から実験結果が再現された. よって領域 1 の振動は, 比較的低無次元風速域ではねじれ速度の寄与が大きく, 無次元風速が大きくなるとねじれ速度の寄与が小さくなっていく振動と考えられ, 領域 2 の振動は, ねじれ速度の寄与が非常に小さい, 準定常 2 自由度連成振動と考えられる. さらに, 領域 1 の振動はねじれ速度の寄与が大きいため, ねじれ 1 自由度系でも発現し得るねじれフラッター起因の振動であり, 連成空気力によって鉛直にも応答が表れると考えられる. 領域 2 の振動は, 準定常空気力を用いた解析で表わせる振動であり, ねじれ 1 自由度系での解析では表現できなかったことから, 本振動は準定常鉛直・ねじれ 2 自由度連成振動であると言える. 尚, Case2, 3, 4 については, G を調節することで解析による実験結果の再現を試みたが, ねじれ振幅が 0 または発散となり定常振幅を得られなかった. 要因として, 実験におけるねじれ振幅が比較的大きいときは空気力が振幅に対して非線形性を示し, 線形のねじれ速度同相項を加味した空気力では表現できないことが推察される.

5. 結論

以下に, 本研究で得られた結論を述べる.

1) ねじれフラッターを大振幅域まで許容したところ,

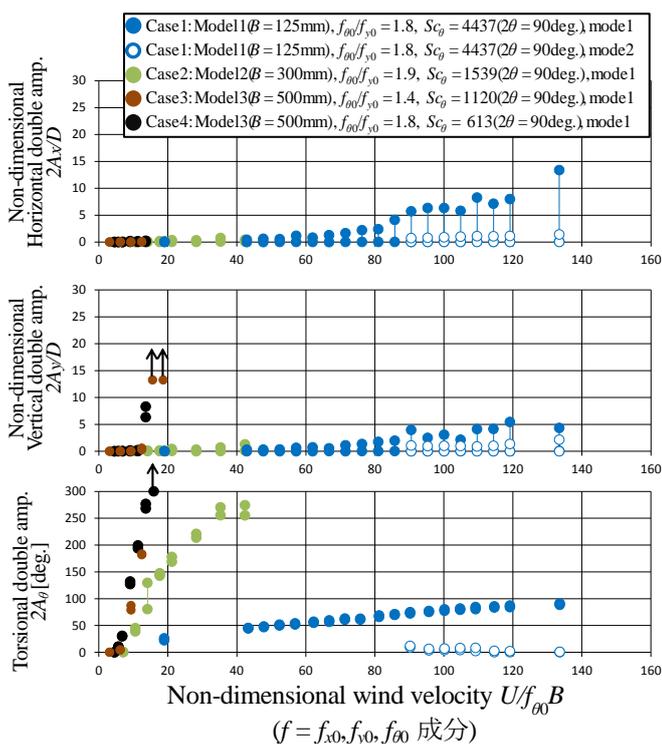


図2 振幅応答図(実験結果)

ねじれ倍振幅 300 程度程度の振動が実験で確認された.

2) $B/D = 5$ 矩形断面において, 比較的低無次元風速域では, ねじれ速度の寄与が大きいねじれフラッター起因の 2 自由度連成振動が見られる. 高無次元風速域になるにつれてねじれ速度の寄与は小さくなり, $U/f_{\theta 0}B$ が 80 以上のとき, ねじれ速度の寄与が非常に小さい準定常 2 自由度連成振動が発現する.

3) ねじれフラッター起因の 2 自由度連成振動はねじれ速度の寄与により, ねじれ 1 自由度系でも発現し得ると考えられる. 準定常 2 自由度連成振動は, 鉛直方向の自由度に伴う連成空気力によって発現すると考えられる.

謝辞 本研究の一部は, 一般社団法人日本鉄鋼連盟の助成を受けたものである. ここに記し, 謝意を表す.

参考文献

- 1) 松宮央登, 西原崇: 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, No4, pp87-100, 2013
- 2) 佐々木雄多, 八木知己, 濱野真彰, 松宮央登, 西原崇: 迎角を有する断面辺長比 2 矩形断面の大振幅空力自励振動, 第 24 回風工学シンポジウム論文集 pp175-180, 2016

表 1 G の設定値

$U/f_{\theta 0}B$	42.9	52.4	62.0	71.5
G	0.080	0.060	0.041	0.030

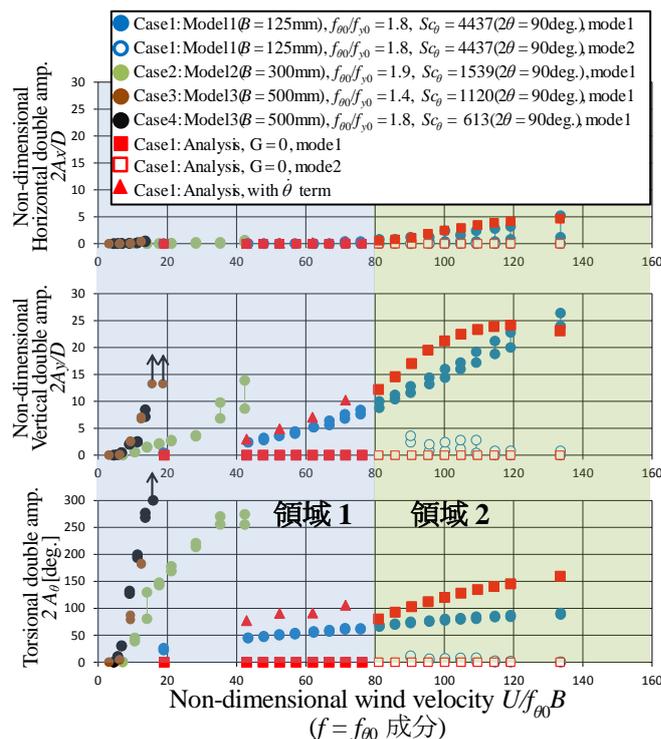


図3 振幅応答図(実験結果と解析結果の比較)