

ねじれ速度に着目した矩形断面の大振幅空力自励振動応答特性の解明

京都大学大学院工学研究科

学生員 ○小野 拓海

京都大学大学院工学研究科

正会員

八木 知己

阪神高速道路 (研究当時京都大学大学院生)

正会員 佐々木 雄多

京都大学大学院工学研究科

学生員

小松 尚弘

電力中央研究所

正会員 松宮 央登

京都大学大学院工学研究科

正会員

野口 恭平

1. 序論

橋梁構造物に風が作用すると、破壊に至る空力自励振動が発現することがある。耐風設計上は自励振動が発現しないことが重要であり、発現風速や微小振幅域での応答特性に着目した議論がなされてきた。そのため、自励振動発現後の大振幅応答特性は未解明である。

筆者ら¹⁾はねじれフラッターが発現する断面辺長比 $B/D=5$ 矩形断面を用いて、高無次元風速域を対象とした 3 自由度大振幅自由振動実験を行い、鉛直・ねじれ 2 自由度連成振動応答を確認した。また、高無次元風速域では、準定常空気力を考慮した時間領域応答解析により応答が再現できるが、比較的低無次元風速域では、ねじれ速度を考慮した仮想的な空気力を考慮しなければ応答が再現できず、ねじれ速度の応答振幅への影響が大きいことを確認した。

本研究では、大振幅ねじれ加振中の非定常空気力を測定することで、ねじれフラッター発現後の応答特性を調べた。また、時間領域応答解析において、測定したねじれ速度に依存する空気力を用いることで、より詳細な自励振動の発現メカニズムの解明を試みた。

2. 非定常空気力測定実験

実験は電力中央研究所の風洞設備²⁾で、断面辺長比 $B/D=5$ (幅 $B=125\text{mm}$, 高さ $D=25\text{mm}$, 長さ $l=1,000\text{mm}$) のアクリル樹脂製矩形模型を用いて行った。風洞に設置された大振幅ねじれ加振装置によって、模型をねじれ 1 自由度で正弦波加振し、加振中の模型に作用する非定常揚力 L (下向き正)・非定常ピッチングモーメント M (頭上げ正) を測定した。非定常空気力の定義には、Scanlan&Tomko により提案された次式を用いた³⁾。

$$L = \frac{1}{2} \rho (2b) U^2 l \left\{ kH_1 \frac{\dot{y}}{U} + kH_2 \frac{b\dot{\theta}}{U} + k^2 H_3 \theta + k^2 H_4 \frac{y}{b} \right\} \quad (1)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho (2b^2) U^2 l \left\{ kA_1 \frac{\dot{y}}{U} + kA_2 \frac{b\dot{\theta}}{U} + k^2 A_3 \theta + k^2 A_4 \frac{y}{b} \right\} \quad (2)$$

ただし、 y は鉛直変位 (下向き正)、 θ はねじれ変位 (頭上げ正)、 U は風速、 ρ は空気密度、 b は半弦長、 l は矩形長さ、 k は換算振動数 ($=b\omega/U$)、 ω は円振動数である。

3. 時間領域応答解析

本研究では 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。運動方程式の外力に代入する空気力として、2 種類の定式化を用いた。一つ目は、振動中の相対風速 U_r ・相対迎角 α_r により定式化される準定常空気力 (式(4)~(6)) とした。もう一方では、ねじれ方向の空気力に、実験で測定した非定常空気力のねじれ速度項 (振幅に依存する A_2^*) を線型的に足し合わせた空気力 (式(4),(5),(7)) とした。本来、非定常空気力はねじれ変位とねじれ速度の両者に依存する項により、ねじれ振動に対する空気力の位相差を表現しているため、ねじれ変位項とねじれ速度項は対で定式化される必要がある。本研究では、準定常空気力のねじれ変位成分と非定常空気力のねじれ変位成分がおおよそ等しいことが確認できたため、準定常空気力と非定常空気力のねじれ速度項の線型的な足し合わせが可能であると判断した。

$$F_x = \frac{1}{2} \rho U_r^2 l \{ DC_D(\alpha_r) \cos \varphi - BC_L(\alpha_r) \sin \varphi \} \quad (4)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \rho U_r^2 l \{ DC_D(\alpha_r) \sin \varphi + BC_L(\alpha_r) \cos \varphi \} \quad (5)$$

$$F_\theta = \frac{1}{2} \rho U_r^2 l \{ B^2 C_M(\alpha_r) \} \quad (6)$$

$$F'_\theta = \frac{1}{2} \rho U_r^2 l \{ B^2 C_M(\alpha_r) \} + \frac{1}{2} \rho (2b^2) U^2 l \{ kA_2^* \frac{b\dot{\theta}}{U} \} \quad (7)$$

4. 非定常空気力測定実験結果

ねじれ振動の空力減衰に関わる係数である A_2^* を図 1 に示す (縦軸は加振倍振幅、横軸は無次元風速)。ねじ

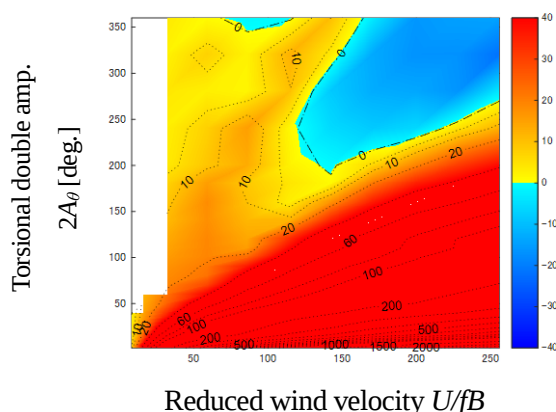


図 1 非定常空気力係数 A_2^* の振幅・風速依存性

キーワード ねじれフラッター、大振幅応答、準定常空気力

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

れ 1 自由度振動系において、構造減衰を考慮しない場合、 A_2^* が正のとき励振力が働き、負のとき減衰力が働き、 A_2^* が 0 のとき定常振動となる。図 1 において A_2^* が 0 となる領域の存在が確認される。このことから、従来発散振動であると考えられていたねじれフラッターは、高無次元風速域においては、構造減衰が働かなくとも倍振幅 200~300° 程度の大振幅の定常応答を示すことが明らかとなった。また、 A_2^* が 0 となる領域における振動は、ねじれ速度による空気力の影響がないため、準定常的な評価で説明できると考えられる。

5. 空気力のねじれ速度項を加味した応答解析結果

自由振動実験結果¹⁾と各種時間領域応答解析結果を水平・鉛直・ねじれ 3 自由度の応答振幅図で図 2 に示す(縦軸は無次元倍振幅, 横軸は無次元風速)。自由振動実験結果を灰色, 準定常空気力による解析結果は青色, ねじれ速度を加味した空気力による解析結果は赤色とし、定常応答時の最大・最小倍振幅を示した。

準定常空気力による解析では比較的低無次元風速域の応答は再現できなかったが、無次元風速 76 以上の高無次元風速域の応答は再現できた。一方、非定常空気力測定実験で得られた空気力のねじれ速度項を加味した解析では全無次元風速域の応答が再現できた。

ねじれ速度項を加味した応答解析結果を用いて、ねじれ方向の空気力(式(7))の準定常空気力項(第 1 項)とねじれ速度項(第 2 項)がそれぞれ定常振動 1 周期にする仕事量を比較することで、振動に対するそれぞ

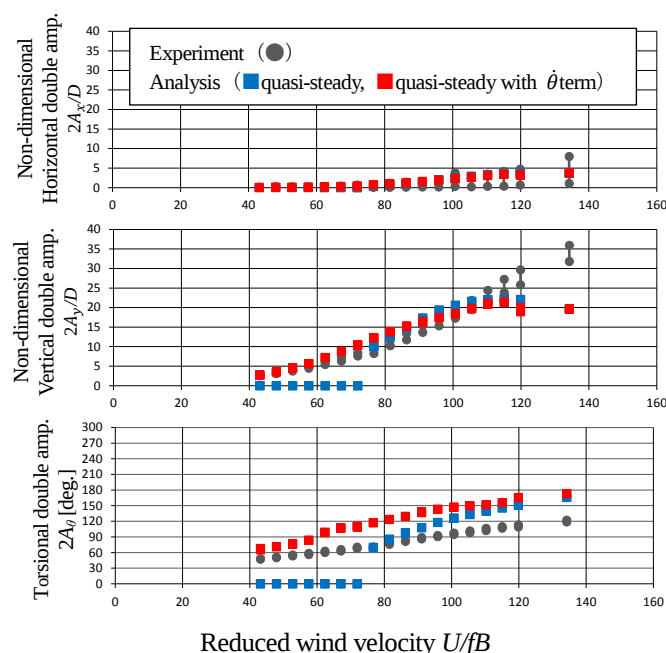


図 2 実験結果と時間領域応答解析結果の比較

れの空気力項の影響の大きさを調べた。仕事量は、時間領域応答解析で時々刻々算出される空気力の各項とねじれ速度の積を 1 周期で積分することにより求めた。図 3 に算出された仕事量を示した(横軸は無次元風速)。白抜きプロットが各項の仕事量を表し、準定常空気力項(第 1 項)を青色, ねじれ速度項(第 2 項)を赤色とした。色付きプロットが両者の和を表す。図 3 において、比較的低無次元風速域においてはねじれ速度項の仕事量が大きく、無次元風速が大きくなるにつれて小さくなる。一方、準定常空気力項の仕事量は無次元風速が大きくなるにつれて大きくなり、無次元風速 76 でねじれ速度項の仕事量を上回る。以上より、時間領域応答解析とエネルギーの観点から、無次元風速 76 以上の高無次元風速域では準定常的な振動が発現し、無次元風速 76 以下の比較的低無次元風速域ではねじれ速度の影響が大きい振動が発現することが確認された。

6. 結論

- (1) 非定常空気力測定実験結果から算出された A_2^* より、ねじれフラッターは高無次元風速域において、倍振幅 200~300° 程度の定常振動となることを明らかにした。
- (2) 準定常空気力とねじれ速度項を用いた、時間領域応答解析および仕事量の比較によって、ねじれ大振幅振動は比較的低無次元風速域においてねじれ速度の影響が大きく、高無次元風速域においては準定常的な振動となることを明らかにした。

参考文献

- 1) 小松ら：矩形断面におけるねじれ振動起因の大振幅空力自励振動応答, 土木学会第 72 回年次学術講演会公演概要集, 1135-1136, 2017.
- 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, 38(4), 87-100, 2013.
- 3) Scanlan and Tomko: Airfoil and bridge deck flutter derivatives, J. Engineering Mechanics Division Proceeding of the American Society of Civil Engineers, 97(EM6), 1717-1737, 1971.

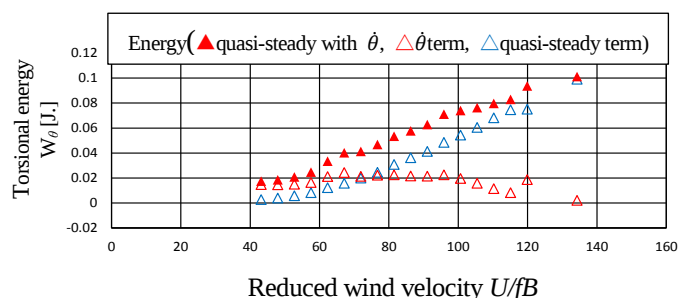


図 3 式 (7) 各項が定常振動 1 周期に行う仕事量の比較