

第 I 部門 断面辺長比 5 の矩形断面における大振幅空力自励振動特性

京都大学工学部	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
京都大学大学院工学研究科	学生員	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

橋梁構造物は、風が作用すると空力自励振動が発現し、破壊に至る危険がある。耐風設計上は、空力自励振動が発現しないことが重要であり、発現風速付近の微小振幅域のみに着目した議論がなされてきた。そのため、自励振動発現後の応答特性は未解明である。

自励振動発現後の振動に対する研究として、小松ら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 3 自由度大振幅自由振動実験を行い、高風速域における鉛直・ねじれ 2 自由度連成振動応答を確認した。さらに、時間領域応答解析によって、比較的高風速域において、この振動は準定常的な現象であることを明らかにした。また、ねじれ方向の準定常空気力に、仮想的にねじれ速度を加味した空気力を用いて、比較的低風速域では、ねじれ速度の影響が大きい振動であることを確認した。

本研究では、大振幅・高風速域における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実際に測定されたねじれ速度によ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 $l=1000\text{mm}$) のアクリル樹脂製矩形柱を用いて行った。風洞に設置された強制加振装置によって矩形をねじれ 1 自由度で正弦波加振し、加振中の矩形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。橋梁桁断面が風から受ける非定常空気力について、Scanlan&Tomko³⁾により次のような定式化が提案されている³⁾。

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

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

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。

$$m\ddot{q} + 2m_q C_q \dot{q} + K_q(x, y, \theta) = F_q \quad (3)$$

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 m²] ($q=\theta$)、 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 は外力であり、今回は空気力を代入する。代入する空気力として、まず振動中の相対風速 U_r ・相対迎角 α_r から算出される準定常空気力 (式(4)~(6)) を定式化した。さらに、ねじれ方向の準定常空気力に、実験により測定した非定常空気力のねじれ速度項を線型的に足し合わせた空気力 (式(4),(5),(7)) の 2 種類の空気力を定式化した。

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

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

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

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

4. 実験結果と解析結果の比較および考察

実験により得られた非定常空気力係数のうち、ねじれ振動の空力減衰に関わる係数である A_2^* をコンター図で整理したものが図 1 である。縦軸が倍振幅、横軸が無次元風速を表す。ねじれ 1 自由度系において、構

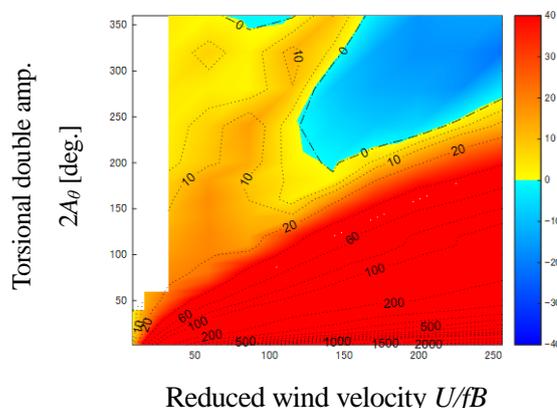


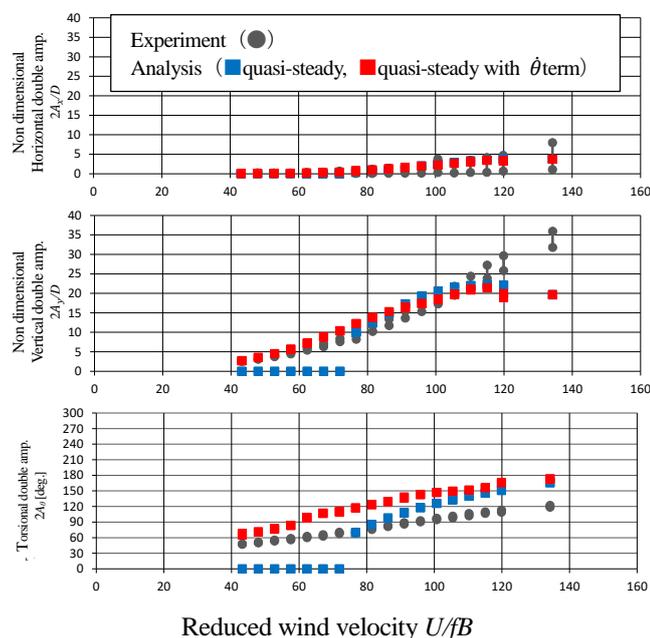
図 1 非定常空気力係数 A_2^*

造減衰を考慮しない場合、 A_2^* が正のとき励振力が働き、振動は発散に向かい、負のとき減衰力が働き、振動は抑制される。 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を受けないため、準定常的に説明できると考えられる。

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)プロットは自由振動実験結果を灰色で、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た。各々、定常応答の最大・最小倍振幅をプロットした。

準定常空気力による解析では比較的低風速域の応答は表せなかったが、無次元風速76以上の比較的高風速域の応答は再現できた。小松ら¹⁾が確認したように高風速域の2自由度振動は準定常的な振動となっている。ねじれ速度を加味した空気力による解析では全風速域の応答を表せた。よって、準定常空気力では表せず、ねじれ速度を加味することで表すことができた比較的低風速域の2自由度振動は、ねじれ速度による空気力の影響が大きい振動であることが確認された。

この振動応答に対して、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上に各仕事量に対応する応答振幅を示す。図3下にそれぞれの仕事量を示した。横軸は無次元風速である。白抜きプロットが各項の仕事量を表し、色付きプロットが両者の和を表す。これより、比較的低風速域においてはねじれ速度項の仕事量が大きく、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っている。この風速は準定常空気力で実験応答が再現できた風速と一致する。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以上の比較的高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。

5. 結論

- (1) ねじれフラッターは高風速域において、発散振動ではなく倍振幅200~300°程度の大振幅定常振動となる。
- (2) ねじれ大振幅振動は比較的低風速域においてねじれ速度の影響が大きく、比較的高風速域においては準定常的な振動となる。

参考文献

1)小松ら：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：日本風工学会論文集, Vol.38, No4, 87-100, 2013. 3) Scanlan and Tomko : J. Engineering Mechanics Division Proceeding of the American Society of Civil Engineers, 1717-1737, 1971.

