

### 平行ケーブルにおける 2 自由度ウェイク振動の発生機構に関する研究

京都大学 学生員 ○小川 哲司  
京都大学 有間 将司  
京都大学 Mohd Raizamzamani Md ZAIN

京都大学 正会員 八木 知己  
京都大学 学生員 荒木 伸哉  
京都大学 正会員 白土 博通

#### 1. はじめに

斜張橋ケーブル等に見られるような平行配置されたケーブルに風が作用すると、上流側円柱の影響を受けて下流側円柱が振動することが知られている。この空力振動現象は、風向直角方向に卓越した振動であるウェイクギャロッピング(以下 WG)と、風向方向に卓越した楕円軌道振動であるウェイクインデューストフラッター(以下 WIF)に大別され、これまでに多くの研究がなされている。しかし、発生メカニズムについては未だ不明な点も残されている。本研究では、自由振動応答実験で得られた下流側円柱の振動応答と鉛直・水平 2 自由度フラッター解析の結果から、2 ケーブルの配置条件と空力不安定性の関係性を考察した。

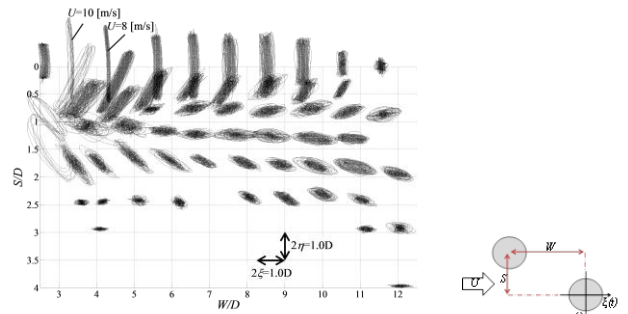
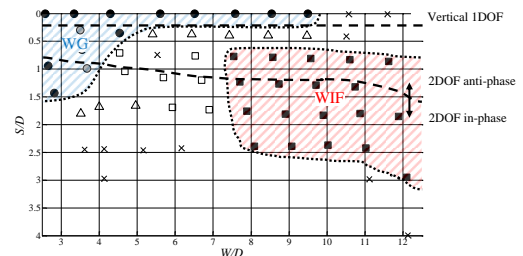


図-1. 自由振動応答時の下流側円柱の軌跡(U/fD=177.8)

#### 2. 2 自由度振動応答実験

過去に平行配置された 2 円柱を模型として自由振動応答実験<sup>1)</sup>が行われており、得られた最大風速時(U=12m/s, U/fD=177.8)の 2 円柱配置に対する下流側円柱の応答軌跡を図-1 に示す。また、これと既往の研究<sup>2)</sup>を参考に、2 円柱の配置条件に対する WG と WIF の発現領域を推定し、結果を図-2 に示した。WG と見られる鉛直卓越振動が発現した領域を赤色、WIF と見られる楕円軌道を描く振動が発現した領域を青色で分類した。W/D が比較的大きい配置条件において発現した WIF と考えられる楕円軌道振動は非定常な応答となっていた。また、破線は上から鉛直 1 自由度振動, 2 自由度鉛直・水平変位逆位相振動, 2 自由度鉛直・水平変位同位相振動の境界を示す。



- Wake galloping
- Wake galloping and Unsteady vibration
- Unsteady vibration (y direction)
- △ Unsteady vibration (x and y direction)
- Unsteady vibration (x direction)
- Wake induced flutter or Unsteady vibration (x direction)
- × No remarkable vibration

図-2. 自由振動応答実験による振動現象の分類

#### 3. 非定常空気力係数を用いたフラッター解析

本研究では、非定常空気力係数を用いて 2 自由度フラッター解析を行い、各振動現象の発現機構と非定常空気力の発現への寄与の解明を試みた。非定常空気力を鉛直・水平 1 自由度強制加振によって計測し、式(1)、式(2)のように各項に分解することにより、非定常空気力係数を算出する。

$$Lift = \frac{1}{2} \rho D U^2 \left( k H_1^* \frac{\dot{\eta}}{U} + k^2 H_4^* \frac{\eta}{D/2} + k H_5^* \frac{\dot{\xi}}{U} + k^2 H_6^* \frac{\xi}{D/2} \right) \quad (1)$$

$$Drag = \frac{1}{2} \rho D U^2 \left( k P_1^* \frac{\dot{\eta}}{U} + k^2 P_4^* \frac{\eta}{D/2} + k P_5^* \frac{\dot{\xi}}{U} + k^2 P_6^* \frac{\xi}{D/2} \right) \quad (2)$$

式中の  $H_1^* \sim H_6^*$  及び  $P_1^* \sim P_6^*$  が非定常空気力係数であり、力の作用する方向の空気力を表す項が非連成

項、力の作用する方向以外の空気力を表す項が連成項である。これらの非定常空気力係数を用いてフラッター解析を行い、空力不安定性を検討した。非定常空気力係数は振幅依存性があるため、自由振動応答実験で得られた振動振幅に最も近い振動の時の非定常空気力係数を用いて解析を行った。自由振動応答実験において WG と見られる鉛直卓越振動が発現した領域でフラッター解析を行ったところ、W/D=7.58 までの S/D が比較的小さい配置条件で対数減衰率が負となり、フラッターが発現するという結果となった。これは従来 WG の発現に寄与すると考えられる揚力の鉛直速度同相項の  $H_1^*$  が正の値を示す領域と概ね一致している。自由振動応答実験で WIF が発現したと考えられる領域でフラッター解析を行ったところ、対数減衰率が正の値を示し、フラッターが発現しなかった。ただし、自由振動応答実験において楕円軌道振動は非定常な応答であり、フ

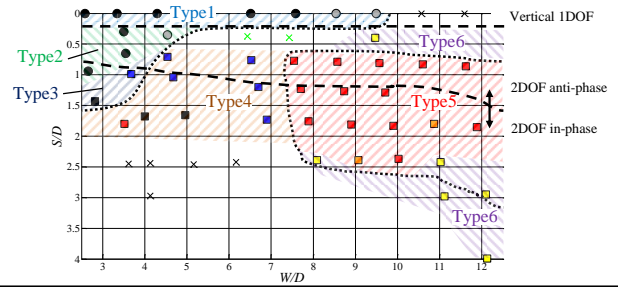
キーワード: ウェイクギャロッピング, ウェイクインデューストフラッター, 非定常空気力係数, フラッター解析

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

ラッター解析の結果と対応していると考えられる。そこで、振動の非定常性を考慮し、WIFの発現に対する各非定常空気力係数の寄与を検討するために、非定常空気力係数の評価時間を短くして(約180波→10波または5波)フラッター解析を行った。評価時間の長い解析では対数減衰率が正の値を示したケースにおいても、非定常空気力の評価時間を短くすることで対数減衰率が負の値を示し、フラッターが発現した。評価時間を短くしたことで対数減衰率が負となったケースにおいて、寄与する非定常空気力係数の組み合わせは $P_4^* > 0, H_5^* > 0$ であった。また、 $P_4^* > 0, H_6^* < 0$ で空力不安定化するケースも存在し、基本的には連成項である $P_4^*, H_5^*, H_6^*$ の正負がWIFに寄与すると思われる。さらに、従来WIFの発現が報告されていなかった2円柱が近接配置された領域( $W/D=3.68, S/D=0.99, U/fD=177.8$ )や、自由振動応答実験で非定常な応答を示し、WG及びWIFと見られる振動が共に発現しないと考えられていた領域( $W/D=5.0 \sim 7.5, S/D=0.5 \sim 2.0$ )においても評価時間の短くした結果、連成項の効果で対数減衰率が負の値を示し、不安定化した。フラッター解析の結果と自由振動応答実験で得られた振動応答を基にした振動特性の分類を図-3に示す。これらの振動特性は以下に示すように、Type1からType6に分類される。

- Type1:  $H_1^* > 0$  による鉛直1自由度WG
- Type2:  $H_1^* > 0$  によりWGが発生し、連成空気力による2自由度連成振動
- Type3: 従来2自由度WGが発現すると考えられたが、連成空気力の寄与による2自由度連成振動
- Type4: 従来WG並びにWIFが共に発現しないと考えられていた領域で、連成空気力の寄与による非定常な2自由度連成振動
- Type5: 従来WIFが発現すると考えられていた領域で連成空気力の寄与による定常または非定常な2自由度振動応答の領域
- Type6: 限定的な条件下での連成空気力による2自由度連成振動

これらの振動特性を大きく分類したものを図-4に示す。1自由度フラッターは $H_1^* > 0$ の寄与によって発現する振動である。 $S/D$ が大きくなると水平方向への変位が生じるが、本質的な発現メカニズムは1自由度フラッターである。2自由度フラッターは連成空気力の効果により振動が発現するケースを示している。しかしType4の領域で発生する2自由度フラッターは非定常な応答を示すため、今後詳細な検討を重ねる必要がある。また、別途行った非定常空気力の重ね合わせの可否についての検討から、鉛直・水平変位が逆位相の場合において、重ね合わせが成立しないことが判明した。このような配置条件ではフラッター解析の結果も実際の応答とは異なっており、今後検討する必要がある。



- Wake galloping
- Wake galloping when  $H_1^* > 0$  for 5 or 10 cycles
- 2DOF Flutter using original unsteady aerodynamic derivatives
- 2DOF Flutter when  $H_5^* > 0$  and  $H_6^* < 0$  for 10 cycles
- 2DOF Flutter when  $H_5^* > 0$  and  $H_6^* < 0$  for 5 cycles
- 2DOF Flutter when  $H_5^* > 0$  and  $H_6^* > 0$  for 10 cycles
- 2DOF Flutter when using  $H_5^*, H_6^*, P_1^*$  and  $P_4^*$  for 5 cycles
- × No Flutter from flutter analysis
- × No Flutter from free vibration test

図-3. フラッター解析と振動応答を考慮した振動特性分類

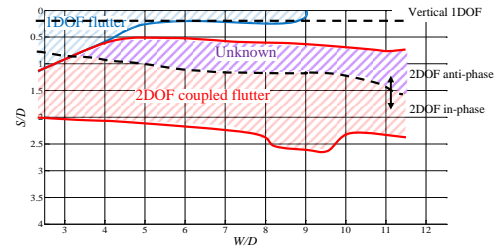


図-4. 発生メカニズムによる振動現象の分類

4. 結論

以下に本研究で得られた結論を述べる。

- 1) 自由振動応答実験及び2自由度フラッター解析の結果から、2ケーブルの配置条件によって振動現象を分類した。さらに、これらはメカニズムによって1自由度フラッターと2自由度連成フラッターに大別される。非定常な応答を示した領域も2自由度連成フラッターで説明できることが示唆された。
- 2) 非定常空気力係数に関して、WGの発現には $H_1^*$ による励振力が寄与し、WIFとみられる2自由度楕円軌道振動には連成空気力に関する項である $P_4^*, H_5^*, H_6^*$ の正負が寄与することが明らかとなった。
- 3) 鉛直・水平変位が逆位相となっている領域については非定常空気力の重ね合わせが成立しないので、この領域におけるフラッター解析の是非を今後検討する必要がある。

参考文献

- 1) 荒木伸哉, 八木知己, 小杉翼, 有間将司, Mohd Raizamzamani Md ZAIN, 白土博通: フラッター解析に基づいた並列円柱の空力振動現象に関する研究, 第23回風工学シンポジウム論文集, pp.205-210, 2014.12
- 2) 宮田利雄, 山田均, 勝地弘, 篠原建太郎: 平行ケーブルのウェイク振動に関する風洞実験, 第16回風工学シンポジウム, pp.489-494, 2000