

高風速域における斜ケーブルの対風応答特性の検討

九州工業大学大学院 学生会員 ○小川祐介 川崎恭平

九州工業大学 正会員 木村吉郎 フェロー 久保喜延 正会員 加藤九州男

1. はじめに

長大斜張橋のケーブルにおいては、大振幅の空力不安定振動が生じることがある。そのうち、高風速域で生じる大振幅振動については、未だに発生メカニズムが解明されていないばかりか、風洞実験における異なる試行間での再現性も十分ではない場合がある。本研究では、50m/sを越える風速範囲までを対象として、再現性の確保に留意して実施した斜ケーブルの風洞実験結果¹⁾を分析することにより、発現した振動現象の特性の把握を試みた。

2. 分析対象とした実験の概要

実験は住友重機械工業株式会社所有の回流風洞で行った¹⁾。ケーブル模型は外径Dが114mmの塩化ビニル管とし、図-1のように、5ケースの偏角($\beta=0, 40, 45, 50, 60^\circ$)について実験した。気流は一様流で、風速範囲は0.3m/s～60m/sである。模型の固有振動数が0.97～1.01Hz、対数構造減衰率が0.0039～0.0056の場合の応答を図-2に示す。 $\beta=40^\circ$ においては換算風速130付近を、 $\beta=45^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ においては換算風速100付近をピークとした振動が発現した。この振動を「低風速域の振動」と呼ぶこととする。 $\beta=40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ においては、その振動が発現した後、高風速域において振幅が2Dを越える大振幅の振動が発現した。また、 $\beta=40^\circ$ を除くすべてのケースにおいて、臨界レイノルズ数領域($Re=3 \times 10^5$ 程度)以上の風速で、流れの非対称な剥離によるものと思われる不規則な振動が発現した。 $\beta=45^\circ$ については、固有振動数が1.02Hzと0.71Hzの2ケースの実験をしており、それらの応答を横軸を実風速として図-3に示す。2Dを越える高風速域での大振幅の振動現象に注目すると、両者の発現風速域が一致していることから、この現象は換算風速ではなく、レイノルズ数に依存している可能性が考えられた。

3. 外力の特性の検討

応答実験で得られた変位の時刻歴データを微分して得られる速度、加速度を振動方程式に代入することで、模型に作用する外力を算出し、その特性を検討した。

3. 1 外力と変位の位相差

変位と外力との位相差 ϕ を、両者のクロススペクトルより算出した。図-4には2Dを越える大振幅の振動が生じたケース($\beta=40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$)の位相差と換算風速との関係を示す($\beta=45^\circ$ については $f_0=1.02\text{Hz}$ の場合)。図-4をみると、いずれのケースも低風速域の振動が発現している風速範囲において位相差はほぼ $\phi=0(\text{rad})$ であり、この風速

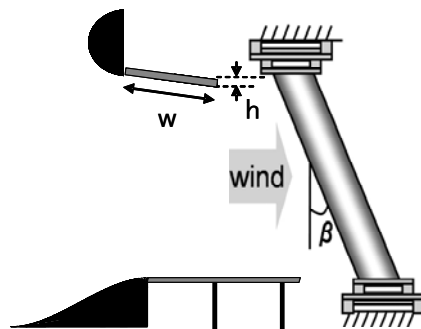


図-1 模型の偏角 β (側面図)

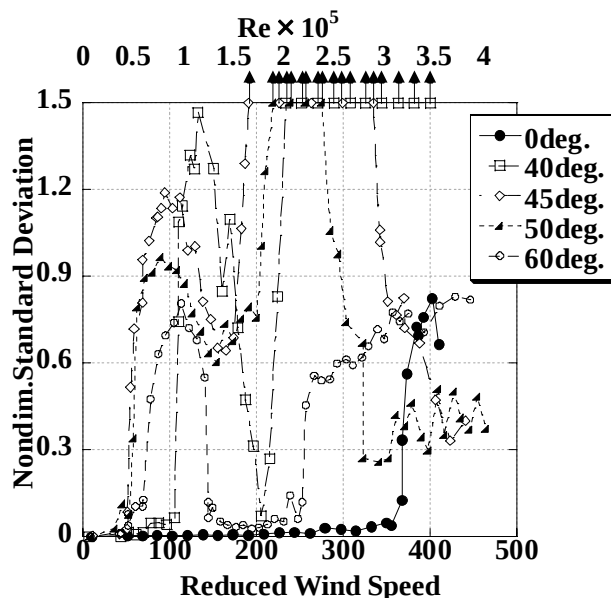


図-2 主流直角方向応答図($f_0=1.0\text{Hz}$)

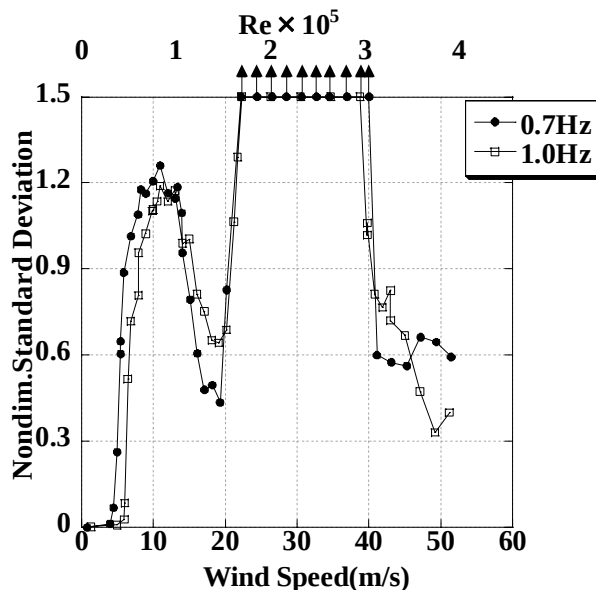


図-3 主流直方向応答図($\beta=45^\circ$)

域での振動は共振や自励振動によるものではないと考えられる．一方，2Dを越える大振幅の振動が発現している風速範囲では，位相差は0から π (rad)付近に移行していることから，共振，または自励振動のようなメカニズムで振動が発現している可能性が考えられる．なお，結果は示していないが， $\beta=45^\circ$ でも $f_0=0.7\text{Hz}$ の場合には，低風速域の振動が発現している風速範囲において位相差が0から π (rad)付近に移行している．再実験を行うなどして，固有振動数の違いによって異なる結果となった理由を検討していく必要がある．

3. 2 揚力係数の算出

以下に示す調和関数で変位と外力を近似し，変動揚力係数を算出することで，振動を生じさせる外力の特性の把握を試みた．

$$y = y_0 \cos[\omega_0(t - t_0)] \quad (1)$$

$$F = F_0 \cos[\omega_0(t - t_0')] \quad (2)$$

まず変位の時刻歴データを最小二乗法を用いて式(1)で近似し，得られた ω_0 の値を式(2)で用いることとして今度は外力の時刻歴データを近似することで，変位と外力の振幅をそれぞれ求めた．得られた外力の振幅より変動揚力係数を求めた結果を図-5 と図-6 に示す．図-5 は $f_0=1.0\text{Hz}$ のケース，図-6 は $\beta=45^\circ$ の固有振動数 $f_0=1.0\text{Hz}$ と $f_0=0.7\text{Hz}$ のケースを示している．図-5 をみると $\beta=0^\circ$ においては揚力係数に顕著な変化はみられないが， $\beta=40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ においては低風速域の振動の発現風速付近で変動揚力係数が大きな値をとり，それ以降は顕著な変化は見られないことから，この振動は変動揚力係数の大きさに依存している可能性が考えられる．図-6 の固有振動数が異なる場合でも，変動揚力係数の値が大きくなる風速域が換算風速にして約50～150と，低風速域の振動の発現風速と一致した．一方，2Dを越える大きな振幅が発現した風速域では，変動揚力係数を振動が発散している非定常なデータから求めているので確かなことは言えないが，変動揚力係数の値は大きくないようである．この高風速域の振動は，外力の振幅よりも，3.1で述べたように位相差の特性が支配的な役割を果たして発現していることを支持している可能性がある．

4. まとめ

外力の特性を検討することにより，低風速域の振動と，2Dを越える高風速域での大振幅の振動の特性の違いをある程度捉えることができたと考えられる．

参考文献

1)小川他：高レイノルズ数領域までの斜円柱の空力振動の実験，土木学会第64回年次学術講演会，I-505，2009．

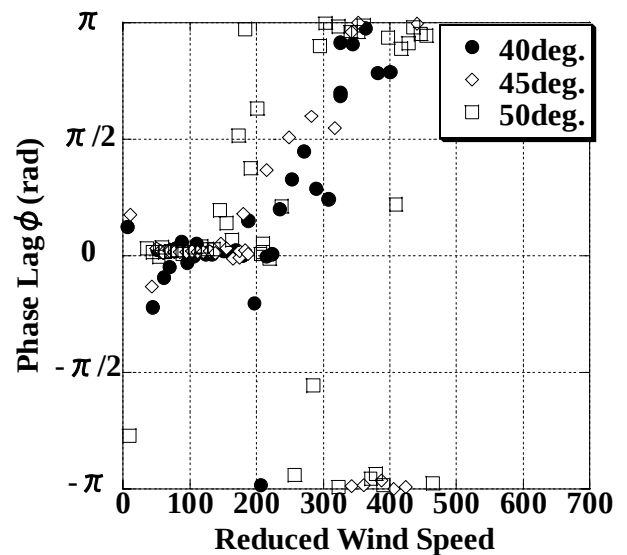


図-4 位相差($\beta=40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$)

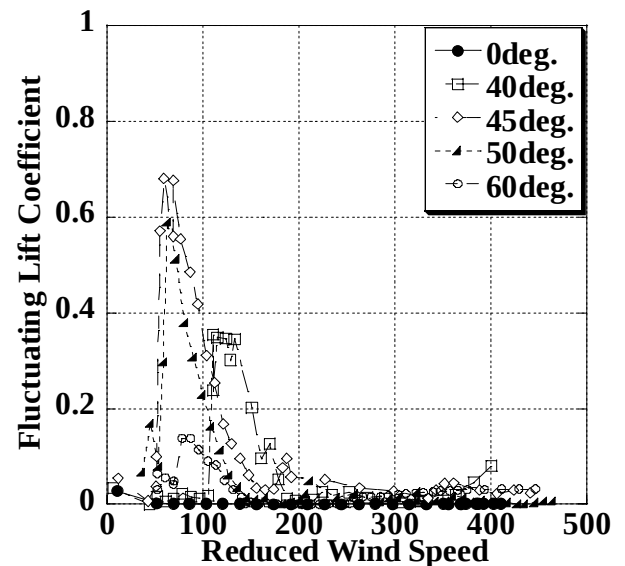


図-5 変動揚力係数($f_0=1.0\text{Hz}$)

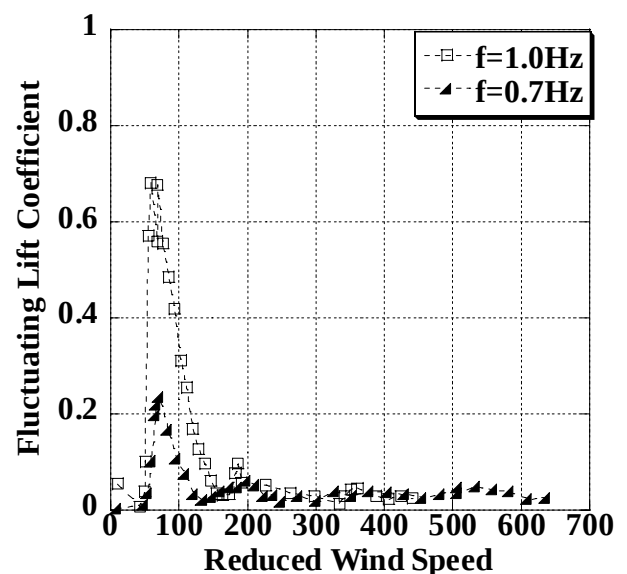


図-6 変動揚力係数($\beta=45^\circ$)