

斜張ケーブルの耐風安定性のための減衰力評価

九州工業大学 学生員 金尾 稔

九州工業大学 学生員 中原智法

九州工業大学 正 員 久保喜延

1. はじめに

斜張橋の長大化にともない、その施工中および完成後における、ケーブルの風による振動についての報告が数多くなされ、その検討がなされている。この問題に対し各研究機関では、他の構造基本断面とともに現象に対する基礎的なメカニズムの解明や、静的な空気力の測定などがなされているが、動的空気力を用いて空力弾性振動の推定を目的とした研究はあまりなされていないのが現状である。しかし、ケーブルの2次元模型として用いられる円柱は、その形状が一意的であるので、一断面において測定した動的空気力は、直径をパラメータとして換算できる。この動的空気力を変位の関数として得ることができれば、構造物の振動モード形状からその応答量を解析によってあらかじめ推定することができ、どの程度の減衰力を付加すれば振動を抑制できるかの検討ができる。そこで本研究では、円柱の代表的な空力弾性振動現象である単独円柱の渦励振と複数円柱のウェークギャロッピングを対象として、自由振動実験からこれらの空力弾性振動時の空気力を、各振幅での空力減衰の形で求め、これをもとに斜張橋ケーブル振動時の各振動モードでの換算空気力を求めて空力弾性振動を抑制するのに必要な減衰力の推定を試みた。

2. 空気力係数の測定

使用した風洞は、九州工業大学建設工学教室付属の測定断面1070X1070mmの空力弾性試験用風洞を用いた。この風洞内に、 $\phi 50\text{mm}$ のアルミパイプ製模型を鉛直曲げ1自由度振動系にバネで支持して、自由減衰実験を行なった。ケーブルの耐風設計で問題となるのは、最大振幅がどの程度になるかであることを考慮して、単独円柱の実験については、渦励振域で最大振幅となる風速において空力減衰と振幅の関係を求めた。同様にして並列配置の円柱に対して後流側円柱のウェークギャロッピングについても空力減衰と振幅との関係を求めた。なお、空力減衰率を δa とすると、各振幅における空力減衰率の動的空気力の速度比例項に対応する空気力係数 C_{fi} への変換は式(1)で行なわれる。

$$C_{fi} = \frac{2 \delta a M \omega^2 Y}{\pi \rho V^2 D \ell} \quad \text{-----} \quad (1)$$

但し、 M : 質量, ω : 円振動数, Y : 振動片振幅

ρ : 空気密度, V : 風速, D : 円柱直径, ℓ : 円柱長さ

こうして求められた無次元振幅($A = Y/D$)に対する空気力係数は図1および図2で示されるものである。これをそれぞれ最小自乗法で三次曲線および二次曲線による回帰を行なって得られた関数は以下のとおりである。なお系の振動数を f とすると、換算風速 V_r は $V_r = V / (f D)$ と表される。

○渦励振に対して($V_r = 6.18$ のとき)

$$C_{fi} = 1.61A^3 - 2.95A^2 + 1.85A \quad \text{-----} \quad (2)$$

○ウェークギャロッピングに対して($V_r = 25$ のとき)

$$C_{fi} = -0.069A^2 + 0.22A \quad \text{-----} \quad (3)$$

である。これら2つの励振域における空気力係数の特徴について考察してみると、図1の渦励振域の空気力係数はウェークギャロッピング域の空気力係数の約4倍の大きさとなっている。しかも

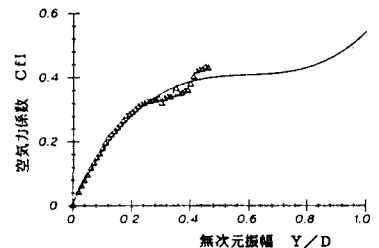


図1 渦励振域の空気力係数

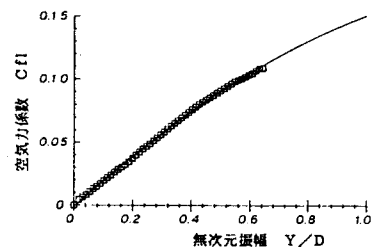


図2 ギャロッピング域の空気力係数

振幅に対する非線形性が強く、無次元振幅 $Y/D = 0.3$ あたりから振幅の増加に対する空気力係数の増加が極端に小さくなる傾向にある。これに対して、ギャロッピング域の空気力係数は大きさも小さい上に、かなり無次元振幅に対する線形性が強くなっている。なお、円柱のようにその形状が変わらないものでは式(1)および(2)で提案した空気力係数 C_f はレイノルズ数の影響を無視すれば、円柱部材の動的耐風設計に充分に使用できるものと考えている。

3. 解析モデルによる減衰力の評価

図3に示すような、架設系の斜張橋に擬した簡単な解析モデルで種々の振動モードに対する空気力の大きさを検討する。ここで対象としたのは、図4に示すようにケーブルが対称モードで振動する場合と逆対称モードで振動する場合に対して、各振動モードでの励振空気力の大きさを算出し、空気力による励振を抑制するのに必要な付加減衰力の推定を行なってみた。図3の解析モデルにおける諸元は、桁部が長さ $L=50\text{m}$ で単位長さ重量 $W=10.46\text{t}$ であり、ケーブル部が長さ $l=70.7\text{m}$ で単位長さ重量 $W=83\text{kg/m}$ 、直径 160mm 、張力 282t である。解析にあたっては、桁部およびケーブル部の両者を共に10要素とし、空気力はケーブル部のみに作用させた。空気力の導入に際しては、ケーブルは固有振動モードで振動するとして、まず各節点で図1および図2に示している空気力をその振動モードでの応答変位に対応する空気力として算出し、空気力は節点間で線形に変化するとしている。こうして計算されたケーブル全長にわたって作用する空気力をモーダルマトリクスで対角化して、各振動モードに対応する空気力の励振力 F_a とする。この場合、桁の剛性が小さい場合は、ケーブルに作用する動的空気力が桁の振動にも寄与することになり、見かけ上 F_a が小さくなることになる。そこで、本研究では、桁の剛性を変えた場合、 F_a がどのように変わるかを検討した。図5は桁の断面二次モーメントを $I=10\text{m}^4$ とした場合のケーブルの対称および逆対称モードに着目した時の渦励振とギャロッピングに対する F_a である。これによると、渦励振の場合は逆対称モードの F_a が対称モードの F_a より20%程度大きくなっているのに対して、ギャロッピングの場合はモードによる差は顕著に現われていない。図6は $I=100\text{m}^4$ としたばあいである。図5の結果と比較すると、 F_a が大きくなっている。すなわち、桁の剛性が大きくなったために、ケーブルに作用する空気力のケーブルの振動への寄与が大きくなったことを意味しており、桁の剛性が小さい場合は、小さい付加減衰で振動を抑制できるのに対して、桁の剛性が上がるにつれ大きい付加減衰が必要となることを意味している。

風によるケーブルの振動に対する必要な減衰力の推定法について検討してきたが、桁の剛性によって励振力 F_a の寄与率が異なってくることは興味深いことである。

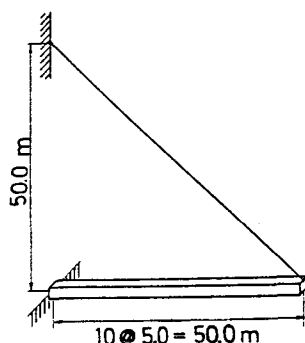


図3 解析モデル

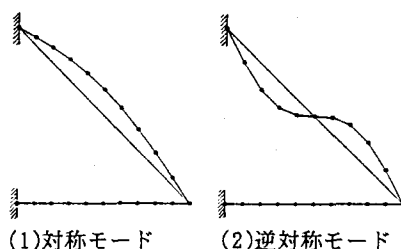


図4 振動モード

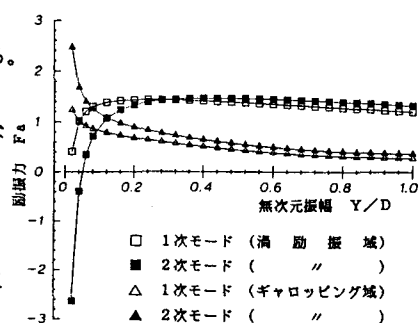


図5 桁剛性が小さい場合 ($I=10\text{m}^4$)

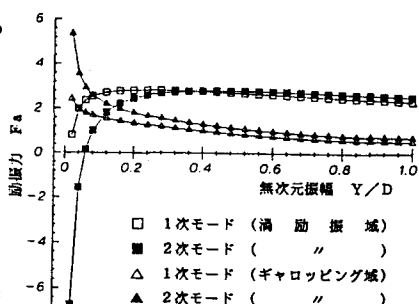


図6 桁剛性が大きい場合 ($I=100\text{m}^4$)