

京都大学工学部 学生員 ○足立 洋一 京都大学工学研究科 フェロー 松本 勝
 京都大学工学研究科 正会員 八木 知己 京都大学大学院 学生員 岡田太賀雄
 京都大学大学院 学生員 劉 慶寛 京都大学大学院 学生員 大石 孝弘

1.はじめに

斜張橋ケーブルにおいて、降雨時に観測されるレインバイブレーションの発生メカニズムの解明が必要となっている。発生要因としては、降雨時に形成される水路、風向きに対して傾斜していることによる軸方向流、カルマン渦放出周波数特性などが考えられているが未解明な点が多い。また、最近の研究報告では、水路がケーブル周方向に挙動することがケーブルの空力振動に重要な役割を果たしていると言われている。本研究では、水路の周方向振動を仮定し、ケーブルの空力振動に及ぼす影響について検討を行うこととした。

2.実験概要

水路が周方向に振動する状態がケーブル模型のねじれ振動と断面形状の変化という点において同じものであると考え、ケーブル模型のたわみ及びねじれ 1 自由度強制加振実験を行った。模型両端に設置されたロードセルを用いて非定常空気を検出し、非定常空気力係数を算出した。それらを用いた運動方程式より、対数減衰率を算出し、水路の周方向振動がケーブル振動に及ぼす影響について考察を行った。また、非定常空気力と準定常的に求めた空気力との比較を行った。ただし、実験装置の制約上 $\beta=0^\circ$ に設置した。

3.解析方法

流体中で 2 自由度調和振動をする断面に作用する非定常揚力 L を、Scanlan によって提案された 4 個の非定常空気力係数 H_i^* ($i=1\sim 4$) を用いて次式で定式化した。

$$L = \frac{1}{2} \rho (2b) V^2 \left\{ kH_1^* \frac{\dot{\eta}}{V} + kH_2^* \frac{b\dot{\phi}}{V} + k^2 H_3^* \phi + k^2 H_4^* \frac{\eta}{b} \right\}$$

ただし、 η : たわみ変位(下向き正)、 ϕ : ねじれ変位(頭上げ正)、 $(\dot{})$: 時間微分、 V : 風速、

ρ : 空気密度、 b : 半径、 k : 換算振動数($=b\omega/V$)、 ω : 円振動数

ここで、たわみ変位鉛直下向き最大からねじれ変位頭上げ最大までの位相差を λ とおくと、ねじれ変位はたわみ変位を用いて、

$$\phi = \phi_0 \sin(\omega t + \lambda) = \left(\frac{\phi_0}{\eta_0 \omega} \sin \lambda \right) \dot{\eta} + \left(\frac{\phi_0}{\eta_0} \cos \lambda \right) \eta \text{ と表される。たわみ 1}$$

自由度の運動方程式を解くと、対数減衰率は以下のように表すことができる。

$$\delta = 2\pi \times \frac{-\frac{\rho D^3 \omega}{8m} \{H_1^* + R[\cos \lambda H_2^* + (\sin \lambda) H_3^*]\}}{\sqrt{\omega_0^2 - \frac{\rho D^3 \omega^2}{4m} \{R[-\sin \lambda H_2^* + (\cos \lambda) H_3^*] + H_4^*\}}}$$

ただし、 $D=2b$ 、 $R = D\phi_0/2\eta_0$ 振幅比、 m : 単位長さあたりの質量

4.考察

4.1 非定常空気力特性

図 1 に各水路位置での各風速における非定常空気力係数 H_1^* を示す。上式より、 H_1^* が正であると励振力、負の場合は制振力として作用することがわかる。図を見ると水路位置 $\theta=50^\circ, 52^\circ, 54^\circ$ では H_1^* は高風速域において正となっており、ギャロッピングが発現する可能性が示唆される。また、 H_2^* 及び H_3^* については位相差 λ によって励振力として作用するの制振力として作用するのかが決まる。

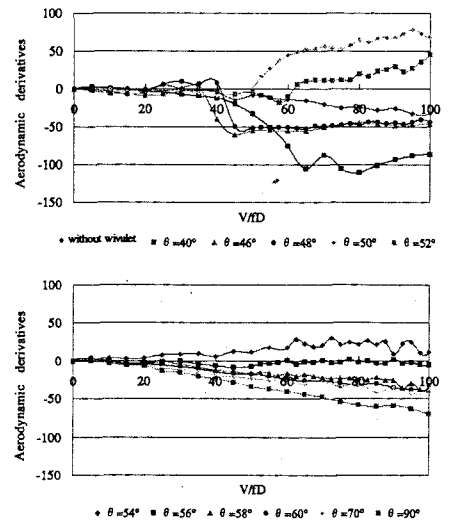


図 1 各水路位置における非定常空気力係数 H_1^*

4.2.非定常空気力特性に基づく水路の周方向振動の影響

各水路位置において求められた非定常空気力係数を用いて、位相差 λ と振幅比 R をパラメータとして扱い解析を行う。図 2 に水路位置 $\theta=40^\circ$ 位相差 $\lambda=225^\circ$ 、図 3 に水路位置 $\theta=54^\circ$ 位相差 $\lambda=225^\circ$ を用いた場合の解析の結果を示す。水路の周方向を考慮しない場合、水路位置 $\theta=40^\circ$ では安定であったが水路の周方向振動を考慮すると不安定に、水路位置 $\theta=54^\circ$ では不安定だったのが水路の周方向振動を考慮すると安定に作用することがわかる。全ての水路位置において、位相差 λ によって安定化にも不安定化にも作用する結果となった。ただし、位相差は水路位置によって異なる。また、最近の研究報告¹⁾では、風洞実験で人工降雨を用いて水路の周方向振動を測定し、レインバイブレーションの発生メカニズムについて考察を行っているものがある。その研究報告から得られた水路の周方向振動は位相差 $\lambda=180^\circ$ 、振幅比 $R=0.0698$ であることがわかる。このパラメータを用いた結果、水路の周方向振動を考慮しなくてもギャロッピングが発現する可能性が考えられた水路位置を含む、水路位置 $\theta=48^\circ, 50^\circ, 52^\circ, 54^\circ, 56^\circ, 58^\circ, 60^\circ$ において水路の周方向振動は励振力として作用することがわかった。特に、水路位置 $\theta=56^\circ$ においては水路の周方向振動を考慮しなかった場合、安定であったが、水路の周方向振動を考慮した場合、高風速域において δ が負となった。(図 4 参照)。水路の周方向振動によりギャロッピングが発現する可能性を持つ水路位置が広がり、その付近の水路位置でも空力的に不安定になるように作用するものと考えられる。

4.3 非定常空気力特性に基づく各水路位置の特性

図 5 に本研究で得られた、たわみ強制加振実験で得られた非定常空気力係数を用いて求めた揚力変動と、各水路位置における静的空気力係数を用いて準定常的に求めた揚力変動とを、各水路位置、風速で比較した結果を示す。高風速域で水路位置 $\theta=50^\circ, 52^\circ, 56^\circ, 58^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ においては揚力の振幅、位相共に異なっている。また、ねじれ振動においても同様の傾向が示された。

よって、準定常的に求めた揚力と非定常空気力係数を用いた揚力が異なる水路位置においては、非定常性が強く複雑な流れ場が形成されていると考えられ、準定常的に議論することが困難であると可能性がある。

5.まとめ

水路の周方向振動を考慮しない場合、水路位置 $\theta=50^\circ, 52^\circ, 54^\circ$ においては発散型振動の傾向が示された。また、水路位置 $\theta=46^\circ, 48^\circ$ においては風速限定型振動の傾向が示された。水路の周方向の振動は、たわみ振動との位相差によってケーブル振動を安定化にも不安定化にも作用することがわかり、実際のケーブル振動時の水路の振動状況を把握することが重要であると考えられた。また、非定常空気力係数を用いて求めた揚力変動と、各水路位置における静的空気力係数を用いて準定常的に求めた揚力変動を比較した結果、水路位置 $\theta=50^\circ, 52^\circ, 56^\circ, 58^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ で非定常性が強く準定常的に議論することは困難である可能性が示唆された。

参考文献 1) Nicola Cosentino, Olivier Flamand, Claudio ceccoli, RAIN-WIND INDUCED VIBRATION OF STAY CABLES : PHYSICAL INTERPRETATION AND MECHANICAL MODELING (INGEGNERIA DEL VENTO IN ITALIA 2002)

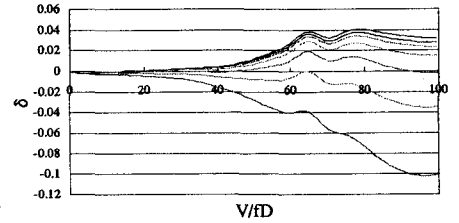


図 2 水路位置 $\theta=40^\circ$ 位相差 $\lambda=225^\circ$ V- δ 曲線

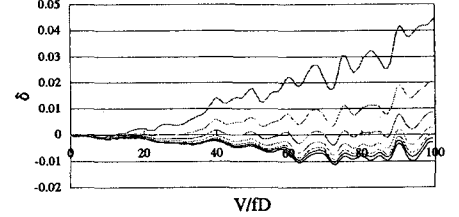


図 3 水路位置 $\theta=54^\circ$ 位相差 $\lambda=225^\circ$ V- δ 曲線

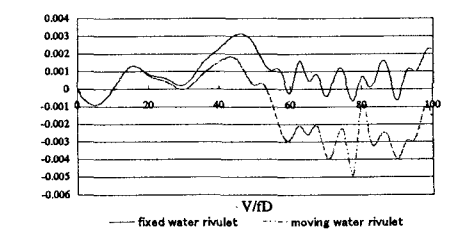


図 4 水路位置 $\theta=56^\circ$ 位相差 $\lambda=180^\circ$, $R=0.0698$ V- δ 曲線

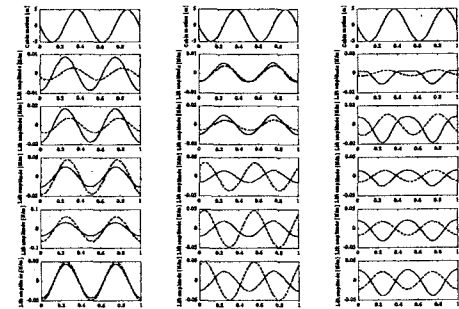


図 5 準定常空気力 (実線) と非定常空気力 (破線)
左から $\theta=40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$, 上から $V/\Gamma D=20, 40, 60, 80, 100$