

I-331

斜張橋ケーブルの Rain Vibration 発生機構に関する解析的研究

日本構造橋梁 正員 小西 俊之
埼玉大学 正員 山口 宏樹

1. まえがき

ケーブルの Rain Vibration は斜張橋の設計、施工において最近、問題とされることの多い対風挙動である。その特徴は雨と風との強い相互作用であって、現象の主たる特性は実橋における現地観測および風洞実験により明かにされている^{1), 2)}。しかし、Rain Vibration の発生機構については推察がなされているものの²⁾、解明されているとは言い難い。そこで本研究では、理論モデルを用いた準定常解析を行い、発生メカニズムの基本的な解明を試みた。

2. 2自由度モデルによる準定常解析

既往の研究^{1), 2)}によれば、Rain Vibration が発生するときにはケーブル上下面に雨水による水路が形成され（Fig.1）、特に上面水路の存在が現象を大きく支配しているとされている。本研究ではこの上面水路のみに着目し、Fig.1 に示すような 8字型断面でモデル化して解析を行った。図中、上面水路の無次元径 d/D 、および位置 β は実験的事実より0.1、および 10° を基本とした。

解析モデルの自由度は、ケーブル振動中に水路がケーブル面に沿って周方向に振動していたとの報告を踏まえ、ケーブルの鉛直変位 y および上面水路の回転変位 θ の2自由度とする。Fig.2 に示すように任意時刻の運動状態を考え、図に示した相対速度 U_{rel} 、および相対迎角 α を導入して準定常を仮定すれば、2自由度系の解析モデルに対する運動方程式が最終的に次のように求められる。

$$[M] \begin{Bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + [C] \begin{Bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + [K] \begin{Bmatrix} y \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ただし、

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad [K] = \begin{bmatrix} \omega_y^2 & -\frac{1}{m} \cdot \frac{1}{2} \rho (d+D) U^2 \frac{dC_L}{d\alpha} \\ 0 & \frac{1}{I} \cdot \frac{1}{2} \rho (d+D)^2 U^2 \frac{dC_M}{d\alpha} \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (2.a, b)$$

$$[C] = \frac{1}{2} \rho (d+D) U \begin{bmatrix} \frac{1}{m} (C_D + \frac{dC_L}{d\alpha}) & \frac{(d+D) \sin \beta}{2m} (C_D + \frac{dC_L}{d\alpha}) \\ -\frac{(d+D) dC_M}{I d\alpha} & -\frac{(d+D)^2 \sin \beta}{2I} (C_D + \frac{dC_L}{d\alpha}) \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (2.c)$$

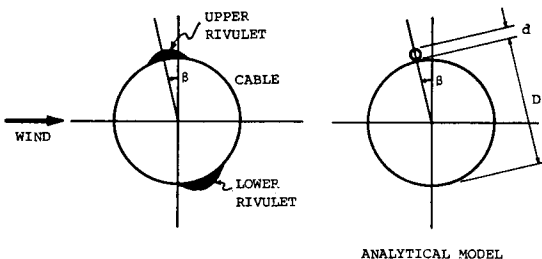


Fig. 1 雨水による水路¹⁾および解析モデル

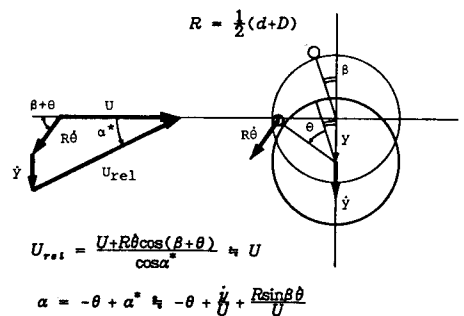


Fig. 2 2自由度準定常モデル

ここで ω_y はケーブルの固有振動数、 m はケーブル質量、 I は水路のケーブル軸回りの極慣性モーメント、 ρ は空気密度、 U は風速、 C_D 、 C_L 、および C_M は定常空気力係数である。解析モデルに対するこの定常空気力係数は風洞実験により求めたが、その結果を3分力曲線として Fig.3 に示す。

2自由度運動方程式(1)について複素固有値解析を行い、固有振動数、モード空力減衰等を求めて考察を加えた。

3. 解析結果および考察

Fig.4 は固有振動数の計算結果である。式(2.b) の剛性マトリックスより明らかなように、水路の周方向振動に対しては空力剛性により復元力がもたらされ、空力モーメント曲線が正勾配のときのみ振動が可能である。そして Fig.4 からわかるように水路の周方向固有振動数は風速に比例し、風速によってほとんど変化しないケーブルのたわみ固有振動数(本解析では無風時で $\omega_y = 2 \text{ Hz}$ と仮定)と風速10m/s 付近で一致している。

Fig.5 にはケーブルのたわみ固有振動に対するモード空力減衰を対数減衰率で示した。空力減衰は風速とともに大きく変化し、特に上述の水路の固有振動数がケーブルのそれと一致する風速付近で負の有意な値となっている。これは Rain Vibration が水路の周方向振動に関係した自励振動であることを意味している。Fig.5 には文献(2)から推定した空力減衰の実験値を示しているが、本解析結果と実験結果とは定性的にはよく対応していることがわらう。これに対し、1自由度ギャロッピング理論である Den Hartog 理論 (Fig.5 の細線) では空気力は正減衰を与えるのみで Rain Vibration を説明し得ていない。

Fig.6 はケーブルのたわみ固有振動に連成する水路振動の振幅比である。水路の周方向振動は上述の風速付近で大きく連成しており、水路の振動が Rain Vibration の発生メカニズムにおいて重要な役割を演じていることが推察できる。

4. まとめ

Rain Vibration の発生機構について、準定常を仮定した2自由度モデルによる解析から考察を加えた。その結果、Rain Vibration の発生にはケーブル上面に形成される水路の周方向振動が重要であることが明らかとなった。本研究では多くの仮定を導入して解析を簡略化しているが、Rain Vibration の解析的研究の第一歩としては十分であり、基本的な発生メカニズムは説明されたものと考ええる。

(参考文献) 1) 樋上琇一: 斜張橋ケーブルの Rain Vibration, 日本風工学会誌, 第27号, 昭和61年3月。 2) Hikami, Y. and N. Shiraishi: Rain-Wind Induced Vibrations of Cables in Cable Stayed Bridge, Preprints of 71CWE in Aachen, Vol.4, pp.293-302, July 1987.

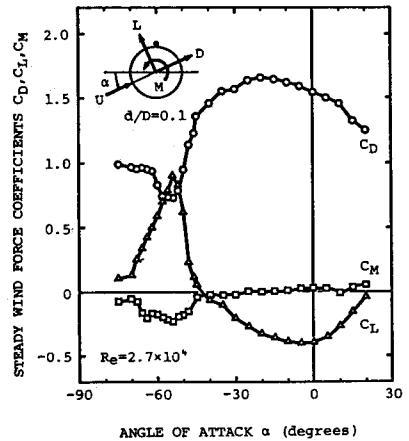


Fig. 3 解析モデルの定常空気力係数

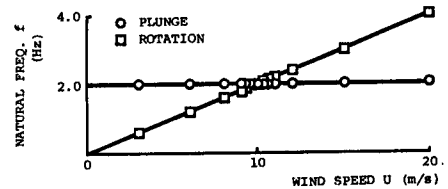


Fig. 4 風速による固有振動数の変化

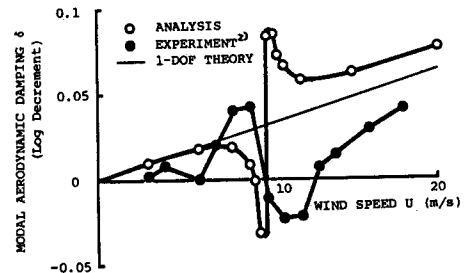


Fig. 5 ケーブル振動に対する空力減衰の風速による変化

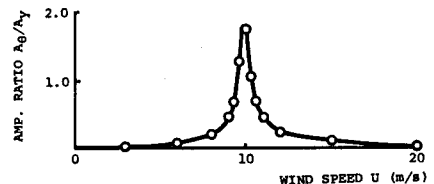


Fig. 6 ケーブル固有振動に連成する水路の振動振幅