

1. まえがき

吊橋の耐風性の検討に際して、実験的にはバネ支持実験、理論的にはBleichの理論(あるいはSelbergの式)がよく用いられている。これらは、いずれも吊橋を2次元振動体(たわみ・ねじれ各1自由度)にモデル化した《2次元解析》である。3次元構造物である吊橋の耐風応答を2次元振動問題に還元できるのはある前提条件の場合に可能であり、そのような条件が成立しないときには、吊橋の3次元性に留意した耐風応答解析をする必要があると思われる。本稿では、吊橋に2次元解析が適用できる条件を整理した後、明らかに、吊橋の3次元性を無視することができない吊橋架設時の耐風性を、例題として検討する。

2. 吊橋を2次元振動体として解析できる条件

気流中における吊橋のたわみ・ねじれ連成振動方程式は、文献(1)より次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\delta}_j + 2\zeta_{\delta j}\omega_{\delta j}\dot{\delta}_j + \omega_{\delta j}^2\delta_j &= \frac{\omega_{\delta j}^2}{L_j^2} \left[\sum_0^1 L_h \eta_j^2 d\bar{x} \cdot \delta_k + \sum_0^1 L_\alpha \eta_j \varphi_k d\bar{x} \cdot p_k - \sum_0^1 \frac{C_{\delta k}}{L_j} \left[\sum_0^1 \eta_k(x_r) \eta_j(x_r) \dot{\delta}_k \right] S_{hrk} \right] \\ \ddot{p}_j + 2\zeta_{\alpha j}\omega_{\alpha j}\dot{p}_j + \omega_{\alpha j}^2 p_j &= \frac{\omega_{\alpha j}^2}{L_j^2} \left[\sum_0^1 M_h \varphi_j \eta_k d\bar{x} \cdot \delta_k + \sum_0^1 M_\alpha \varphi_j \varphi_k d\bar{x} \cdot p_k - \sum_0^1 \frac{C_{\alpha k}}{L_j} \left[\sum_0^1 \varphi_k(x_r) \varphi_j(x_r) \dot{p}_k \right] S_{ark} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

右辺最終項は、 $x=x_r$ に設置した粘性減衰器による減衰力項である。 $C_{\delta k}$, $C_{\alpha k}$ は、たわみ、ねじれ減衰器の減衰係数、 S_{hrk} はたわみ k 次振動に対する減衰器の作動補正係数、 S_{ark} はねじれ k 次振動に対する作動補正係数である。いま、式(1)において、空気力の積分項に直交関係が成立し、また、減衰器も設置されていないとすると、

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\delta}_j + 2\zeta_{\delta j}\omega_{\delta j}\dot{\delta}_j + \omega_{\delta j}^2\delta_j &= \frac{\omega_{\delta j}^2}{L_j^2} \left[\int_0^1 L_h \eta_j^2 d\bar{x} \cdot \delta_j + \int_0^1 L_\alpha \eta_j \varphi_j d\bar{x} \cdot p_j \right] \\ \ddot{p}_j + 2\zeta_{\alpha j}\omega_{\alpha j}\dot{p}_j + \omega_{\alpha j}^2 p_j &= \frac{\omega_{\alpha j}^2}{L_j^2} \left[\int_0^1 M_h \varphi_j \eta_j d\bar{x} \cdot \delta_j + \int_0^1 M_\alpha \varphi_j^2 d\bar{x} \cdot p_j \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

この場合、式(1)における振動モード間の連成項が消去されるため、たわみ振動とねじれ振動が相互に同次の振動モードだけを考慮して、他次の振動モードとの連成を無視して《2次元解析》ができることになる。したがって、吊橋を2次元振動体として解析できる十分条件を具体的に述べると次のようになる。

- ① たわみ振動形とねじれ振動形の間で相互に直交関係が成立すること。
- ② 風速、風の傾斜角等の気流特性が橋軸方向に一定であること。
- ③ 吊橋の断面形状が橋軸方向に一定であること。
- ④ 空気力が振幅に関して線形であること。
- ⑤ 減衰器が設置されていないこと。

3. 吊橋架設時の耐風性の検討(例題)

補剛桁を架設中の吊橋は、橋軸方向に補剛桁が部分的に設置されているため、前節の条件③を満足することができず、吊橋の応答解析は式(1)に依る必要がある。解析の対象とする吊橋は、スパン $l=100\text{m}$ 、幅員 $B=3.6\text{m}$ の単径間吊橋で、質量 $m=42.41\text{kg}\cdot\text{g}^2/\text{m}^2$ 、慣性モーメント $I_\alpha=85.88\text{kg}\cdot\text{g}^2$ 、振動数は、たわみ1次 0.234Hz 、2次 0.159Hz 、3次 0.318Hz 、ねじれ1次 0.443Hz 、2次 0.620Hz 、3次 0.951Hz とし、構造減衰は、たわみ、ねじれ共に $\delta_0=0$ と仮定する。また、断面形状は翼形で、風の傾斜角は $\beta=0^\circ$ とする。(空気力にTheodorsen関数を使用)

(A) 風速分布が吊橋の耐風性に及ぼす影響

補剛桁が支点側からスパン中央に向かって逐次架設されていく状態を想定して、(A-1)風が全スパンに一樣に吹きつける場合 (A-2)中央部 $l/4$ を除いて風が吹きつける場合 (A-3)支点側 $l/4$ の部分だけに風が吹きつける場合 (A-4)支点側 $l/8$ の部分だけに風が作用する場合の4ケースについて、換算風速 $\bar{v}(=V/\sqrt{NB})$ とねじれ1次対数減衰率 δ の関係について調べたのが図-1である。なお、ここでは、風速分布と吊橋の空力特性の関係を検討するため、橋軸方向の質量分布は一定としている。

(B) 質量分布が吊橋の耐風性に及ぼす影響

実際の吊橋の場合、補剛桁架設後の部分と架設前の部分では質量分布が相違している。そこで、補剛桁が支点側から $l/4$ だけ架設された状態を想定して、(B-1) $W=W_0$, $I=I_0$ 。(B-2) $W=0.33W_0$, $I=0.50I_0$ 。(B-3) $W=0.01W_0$, $I=0.01I_0$ の3ケースについて、換算風速 $\bar{V}$ とねじれ対数減衰率 δ の関係を解析したのが図-2である。ただし、補剛桁既架設部分の質量を W_0 、慣性モーメントを I_0 、未架設部分の質量を W 、慣性モーメント I とする。未架設部分の質量と慣性モーメントが小さいとき、耐風性が悪くなるのは、式(1)における質量パラメータ M_0, M_1 が小さくなる分だけ、空気力係数が増幅されることによる。

(C) 減衰器が吊橋の耐風性に与える影響

架設中の吊橋は剛性が低いので、その耐風性が劣化し、架設計画を制約することが多い。そこで、架設中の耐風対策に配慮を要するが、ここでは、減衰器の設置による吊橋の耐風性の向上を試みる。解析対象として、支点側から $l/4$ だけ架設された補剛桁の先端に、ねじれ粘性減衰器(減衰係数 C_α)が設置されている吊橋を考える。(C-1) $C_\alpha=0$ (C-2) $C_\alpha=20\text{Kg}\cdot\text{s}$ (C-3) $C_\alpha=50\text{Kg}\cdot\text{s}$ の3ケースについて、換算風速 $\bar{V}$ とねじれ対数減衰率 δ の関係を調べたのが図-3である。吊橋の耐風性は、減衰器による付加減衰率の分だけ、減衰率曲線($V-\delta$ 曲線)がスライドして、耐風性の向上に役立つようである。なお、減衰器の性能と設置位置に関しては、今後さらに検討を要すると思われる。

4. あとがき

吊橋を2次元解析できる前提条件は、2章で述べたように意外と制約が厳しく、大部分の吊橋では、工学的判断は別として、3次元性を考慮した解析をする必要がある。吊橋の3次元性を検討する手段として、実験的には全体模型実験による方法があるが、理論的に式(1)のような運動方程式を用いて解析することも、大いに試みる価値があると思われる。その際、外力としての空気力は、特別の場合を除いて、実験的に求めなければいけないが、この空気力は2次元風洞実験から検出することができ、例えば、自由振動法によれば、文献(1)の方法がある。

最後に、本研究を進めるに際して、御指導をいただいている京都大学白石教授に感謝いたします。また、このような研究の機会を与えられた小川重工業(株)本四連絡橋室部長 繁戸武一氏、同係長佐岡隆也氏に感謝します。

文献(1) 白石、小川；非線形動的空気力を考慮した吊橋の耐風応答解析に関する一考察，土木学会論文報告集 第244号

文献(2) 小川；吊橋のフラッター振動モードについて，昭和51年度土木学会関西支部年次学術講演会

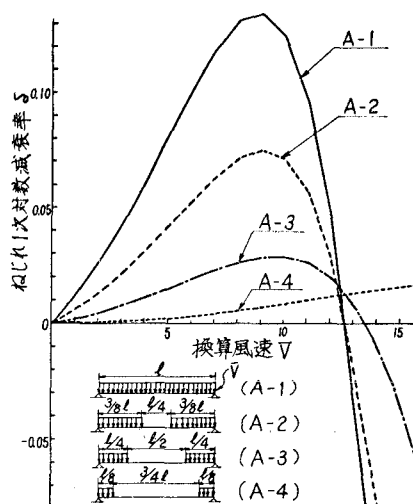


図-1 風速分布と耐風性の関係

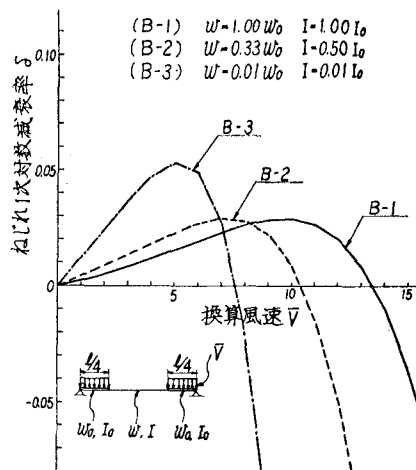


図-2 質量分布と耐風性の関係

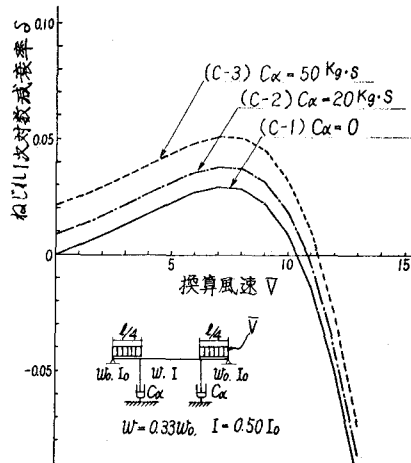


図-3 減衰器と耐風性の関係