I-225　トラス補剛桁のフラッター振動に関する一考察

中部工業大学　正員　小西 一郎
京都大学工学部　正員　白石 成人
京都大学大学院　学生員　○小島 治久

1　まえがき

長大吊橋補剛桁としてトラス断面がしばしば用いられるが、その空気力学特性に関して、特にねじれ1自由度の自励振動であるストールフラッタについては、重要な問題であるにもかかわらず、不明な点が数多く残されている。本研究は、トラス断面のストールフラッタ現象についての風洞実験結果を示し、あわせて準定常空気力理論による応答振幅の計算結果との比較検討を行なうものである。

2　風洞実験

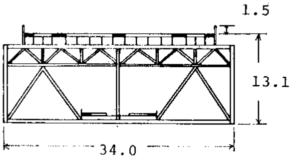
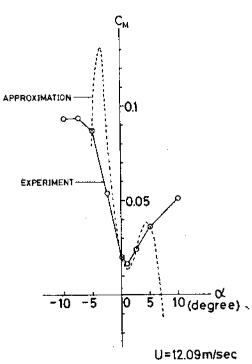


図 1

風洞実験に用いた2次元模型の断面を図1に示す。模型はねじれ1自由度フラッタの発生を期待して、床版に地覆・高欄に相当する高さ 1.5 cm の突起物を取り付けたものである。模型の長さは 93 cm，単位長さ当りの質量慣性モーメントは 0.0247 kg·sec²·m/m である。図2に静的ピッチングモーメント係数 C_M と迎え角 α の関係を示す。図中の鎖線は C_M 曲線の5次多項式近似を表わしている。図より知られるように C_M 曲線は迎え角が約 −7° から 1° の範囲において負勾配を有している。フラッター実験において迎え角を −10° より 10° まで 2° 毎に変化させたが、フラッターの発生が確認されたのは −6°, −4°, −2°, 0° の場合のみであり、この模型断面に関する限り、Negative Slope Theory が成立するものと思われる。



$C_M = 0.02 - 0.7678\alpha + 24.9\alpha^2 - 28.3\alpha^3 - 2553.9\alpha^4 + 11896.6\alpha^5$

図 2

3　応答振幅の数値計算

ねじれ1自由度振動に対して準定常理論を用いた応答計算は、宮田・岡内[1]が行っているが、ここでは応答と非定常空気力の間に位相遅れ θ を考え、以下のような仮定を設けて数値解析を行なった。

いま、$\varphi = A\cos(\omega t + \psi)$ で示される振動状態に働く非定常モーメント M は $\tilde{\varphi} = A\cos(\omega t + \psi - \theta)$ で示される瞬間の状態に作用する静的なモーメントに等しいと考える。ねじれ1自由度の振動方程式を

$$I(\ddot{\varphi} + 2\zeta\omega\dot{\varphi} + \omega^2\varphi) = \frac{1}{2}\rho(2b)^2U^2 C_M \qquad (1)$$

とおき、C_M 曲線を次のように5次多項式で近似する。

$$C_M = C_0 + C_1\alpha + C_2\alpha^2 + C_3\alpha^3 + C_4\alpha^4 + C_5\alpha^5 \qquad (2)$$

また相対迎え角，および相対風速を

$$\alpha_{rel.} = \varphi - \varepsilon b/U\cdot\dot{\varphi} \quad , \quad U_{rel.} = U\left\{1 + \frac{1}{2}\alpha_{rel}^2\right\} \qquad (3)$$

とする。(1)の右辺および(2), (3)に対して φ を $\tilde{\varphi}$ でおきかえれば

$$\ddot{\varphi} + \omega^2\varphi = \mu\left[-\frac{I\zeta\omega}{\rho b^2 C_0}\dot{\varphi} + (1 + \tilde{\alpha}_{rel}^2)U^2 \times \left(1 + \frac{1}{C_0}\sum_{i=1}^{5} C_i\,\tilde{\alpha}_{rel}^{\,i}\right)\right] \qquad (4)$$

ここに、$\mu = 2\rho b^2 C_0/I \; (= 0.0059 \ll 1)$ ，$\tilde{\alpha}_{rel} = \tilde{\varphi} - \varepsilon b/U\cdot\dot{\tilde{\varphi}}$ である。

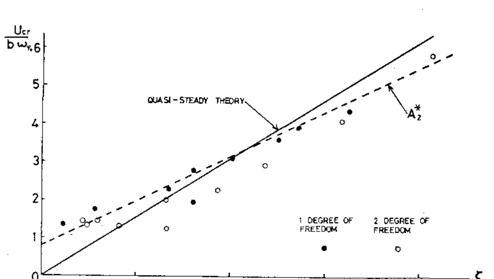


Fig.　CRITICAL FLUTTER VELOCITY — INITIAL DAMPING RATIO (TORSION)

図 3

ここで、$\tilde{\alpha}_{rel}$ を φ で表わせば、$\dot{A}(t), \dot{\psi}(t) \approx 0$ とおくことにより

$$\tilde{\alpha}_{rel.} = \cos\theta \cdot \varphi - (\sin\theta/\omega + \varepsilon b/U \cdot \cos\theta)\dot{\varphi} + \varepsilon b/U\omega \cdot \sin\theta\,\ddot{\varphi} \tag{5}$$

(5)により(4)は $\ddot{\varphi} + \omega^2\varphi = \mu f(\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi})$ ，f は非線形関数となる。

これを Krylov－Bogoliubov の方法によって解けば、

$$\frac{dA}{dt} = -\frac{\mu}{2\omega}\cdot\frac{U^2}{C_0}\left[\left\{\frac{35}{64}C_5\gamma^3\cdot A^7 + \frac{5}{8}(C_3+C_5)\gamma^2\cdot A^5 + \frac{3}{4}(C_1+C_3)\gamma\cdot A^3 + C_1A\right\}(\sin\theta + k\cos\theta) + \frac{I\zeta\omega^2}{\rho b^2U^2}A\right] \tag{6}$$

ここに，$\gamma = 1 + k^2$ ，$k = b\omega/U$ である。(6)において、相対迎え角を代表させる点の位置を表わすパラメータ ε を1とおいている。これは図3に示されるように初期減衰比と限界風速の間には線形関係が成立するものと考えられ、準定常理論による直線近似において、ε を1とおいた場合に実験値と比較的よく一致することによっている。(6)の右辺を0とおくことにより定常振動のA－V曲線を正の実根として得ることができる。これらの結果を図4～6に示す。図中太い実線は風洞実験結果を示し、細線は計算結果を示す。また限界風速を、非常に微小な定常振幅が存在する風速と考えれば、

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{dA}{dt}\right)\Bigg|_{A\to 0} = -\frac{\mu}{2\omega}\frac{U^2}{C_0}\left[C_1\left(\sin\theta + \frac{b\omega}{U}\cos\theta\right) + \frac{I\zeta\omega^2}{\rho b^2U^2}\right] = 0 \tag{7}$$

より $\sin\theta\left(\frac{U_{cr}}{b\omega}\right)^2 + \cos\theta\left(\frac{U_{cr}}{b\omega}\right) + \frac{I\zeta}{\rho b^4C_1} = 0$ の正実根として求められる。$\theta<0$ の場合には θ の値によって限界風速が求まらない場合があり、この時A－V曲線は閉曲線を描くようになる。

4　結果の考察

図4～6より知られるように、実験値と比較して、応答曲線は初期減衰比 ζ が大なる場合によく一致している。これは図3においても示されているように準定常理論が比較的高風速領域で適用できることを裏づけるものと考えられる。しかし、C_M 曲線近似が振幅の大なる範囲では大きくはずれていることより、大振幅における計算値は、信頼性の非常に低いものとなっている。また、計算値は倍振幅0.15rad以上で勾配が小さくなり、風速の増大に伴って一定値に漸近するように思われる。これは $U\to\infty$ のとき，$A = const.$ となることを表わしている。次に中村[2)]のいうように非定常空力ダンピング($-M_{\dot{\varphi}}$)が、準定常流的ダンピング($\bar{M}_{\dot{\varphi}}$) および定常モーメント勾配($\bar{M}_{\varphi}$)を用いて、

$$M_{\dot{\varphi}} = \bar{M}_{\dot{\varphi}} - \frac{1}{\omega}\sin\theta\,\bar{M}_{\varphi} \qquad (\text{第2項は流れの遅れによる成分})$$

と表わせるものとすれば、今回の実験では $\bar{M}_{\varphi}<0$ であることより、空力モーメントが応答より遅れ($\theta>0$)ている場合には、空力モーメントは大きくなり、低風速領域で応答することになる。逆に $\theta<0$ の場合には高風速領域で応答することになる。計算結果は上述の考察と合致しているといえる。

最後に、本研究を進めるにあたり多大の御助力を賜わった松本　勝講師，ならびに橋梁工学研究室の方々に深く感謝致します。

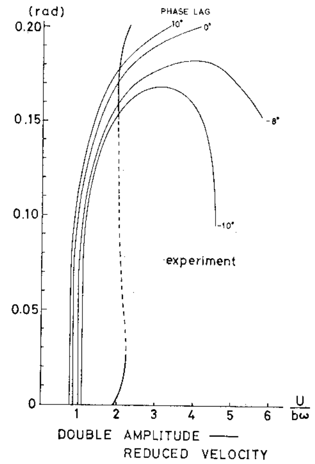


図 4　$\zeta = 0.002864$

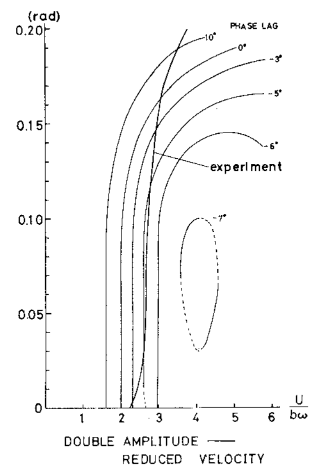


図 5　$\zeta = 0.06750$

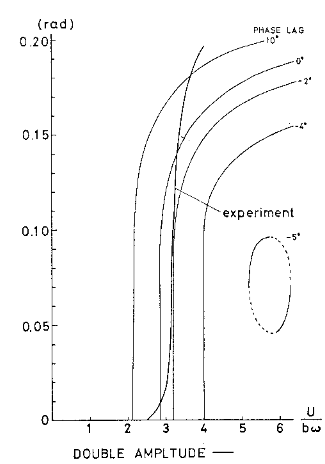


図 6　$\zeta = 0.01011$

（参考文献）

1) 宮田利雄・岡内功“吊橋の風による自励振動に関する一考察”土木学会論文報告集 第173号 1970年1月

2) 中村泰治・濱田武人“矩形断面の振りフラッタについて”構造物の耐風性に関する第2回シンポジウム 論文集 1972.