

I-153 乱れた流れの中の構造物の耐風応答に関する実験的研究

京都大学工学部 正 負 ○ 白 石 成 人
京都大学大学院 学生員 松 本 勝

1. まえがき 長大つり橋など土木構造物の耐風性に関する研究は従来一様な定常流に対して行われてきたが, A.G. Davenport の研究以来, 自然風の変動性を考慮した確率論的考察がなされるようになっている。Davenport の研究は周知のように, 抗力ならびに揚力に関して考察し, 抗力については空力応答関数 (Aerodynamic Magnification Factors) を定義しているが, 揚力については風速相関関数 (Velocity Correlation-Reduced Velocity Relation) を空力応答関数として用いている。このことは統計的な応答特性を手えることにはなるが, いわゆる変動風の Stabilizing 効果あるいは Destabilizing 効果を考察する場合には必ずしも十分ではないと考えられる。このため変動風によって構造物に生ずる非定常流体力を Kármán-Sears ならびに J.H. Horlock の理論を用いて考察し, これまでの実験的に求められた特性について考察してみたい。

2. 従来の研究 Kármán-Sears は二次元流れの中の平板に作用する空気力, 物力ならびにピッチングモーメントが,

$$L = 2\pi\rho b U_0 v_0 e^{i\omega t} S(k') \quad M = \pi\rho b^2 U_0 v_0 e^{i\omega t} S(k') \quad (1)$$

で与えられることを示めた。ここに ρ は空気密度, b は弦長の $1/2$, U_0 は平均風速, v_0 は鉛直速度成分の振幅, $S(k')$ は Sears 関数であり, v_0 および $S(k')$ は次のように与えられる。

$$v(x,t) = v_0 e^{i\omega(t - \frac{x}{U_0})}$$

$$S(k') = \frac{J_0(k') K_1(ik') + iJ_1(k') K_0(ik')}{K_1(ik') + K_0(ik')} \quad , \quad k' = \frac{2b}{U_0} \quad (2)$$

また J.H. Horlock は平板を迎え角 α をもつとき流れ方向の速度成分が揚力, ピッチモーメントを生ずることに注目し, 次式を求めた。

$$\left. \begin{aligned} L &= 2\pi\rho b U_0 \alpha e^{i\omega t} T_0(k') \\ M &= \pi\rho b^2 U_0 \alpha e^{i\omega t} T_0(k') \end{aligned} \right\} (3)$$

ここに, 速度成分は

$$u = u_0 e^{i\omega(t - \frac{x}{U_0})} \quad (4)$$

のようであり, $T_0(k')$ は次のようである。

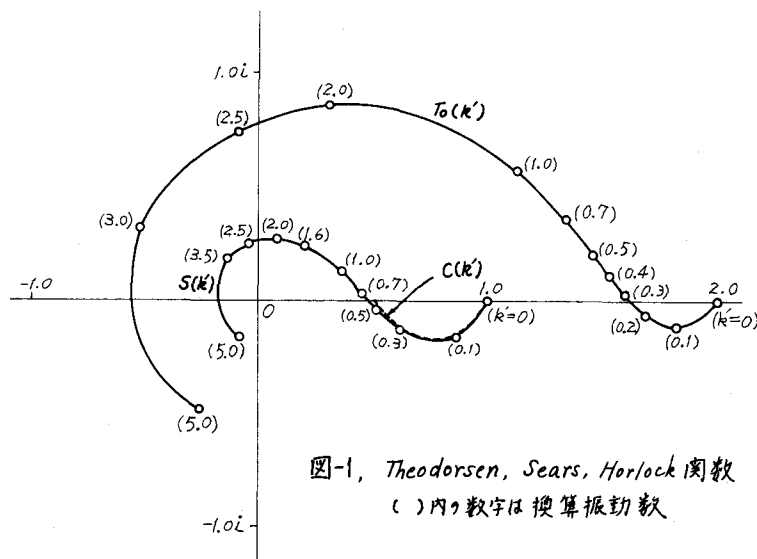


図-1, Theodorsen, Sears, Horlock 関数
() 内の数字は換算振動数

$$T_0(k) = J_0(k) \left\{ 2 - \operatorname{Re} \frac{K_0}{K_0 + K_1} \right\} - J_1(k) \operatorname{Im} \frac{K_0}{K_0 + K_1} + i J_2(k) \left\{ 1 + \operatorname{Re} \frac{K_0}{K_0 + K_1} \right\} - i J_3(k) \operatorname{Im} \frac{K_0}{K_0 + K_1} \quad (5)$$

3. 周期的に変動する風速による平板に生ずる流体力 2. にのべたように、流れ直角方向および平行な方向に変動する風速によって生ずる流体力は風速の Pattern が式(2), (4) のように与えられるとすれば、図-1 に示すような Vector 図をえがくことになる。流れ直角方向については平板のある振動状態になつたとしても、これは変動成分との連成作用はないと考えられ、流れに平行な速度成分 u による流体力は Horlock の結果とは異なるものになる。すなわち

$$u = u_0 e^{i\omega(t - \frac{x}{c})}$$

なる変動成分を考え、平板の時間におけるねじれおよびたわみを y_0 , η_0 とすれば、揚力は

$$L = 2\pi\rho b u_0 e^{i\omega t} \left[T_0(k) y_0 + T_1(k) \frac{\eta_0}{U} + T_2(k) \frac{b y_0}{U} + T_3(k) \frac{b^2 y_0}{U^2} + T_4(k) \frac{b^2 \eta_0}{U^2} \right] \quad (6)$$

ピッチングモーメントは

$$M = \pi\rho b^2 u_0 e^{i\omega t} \left[T_0(k') y_0 + T_1(k') \frac{\eta_0}{U} + T_2(k') \frac{b y_0}{U} + T_3(k') \frac{b^2 y_0}{U^2} + T_4(k') \frac{b^2 \eta_0}{U^2} \right] \quad (7)$$

のようになる。

ここに、 $T_0(k')$ は式(5)の Horlock 関数であり、 $T_1(k')$ は式(2)の Sears 関数に一致し、かつ

$$T_2(k) = \frac{1}{2} \{ T_0(k) - T_2(k') \} \{ 1 - c(k) \} + i J_1(k') c(k)$$

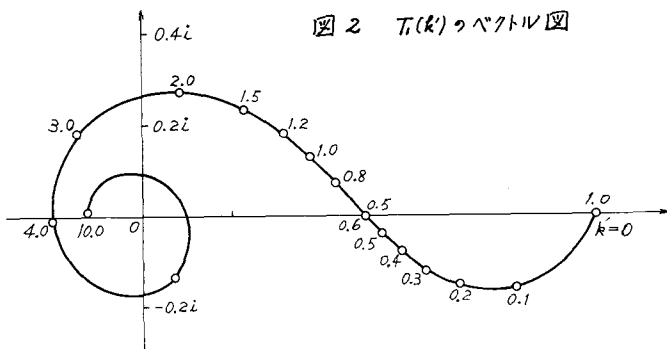


図2 $T_1(k)$ のベクトル図

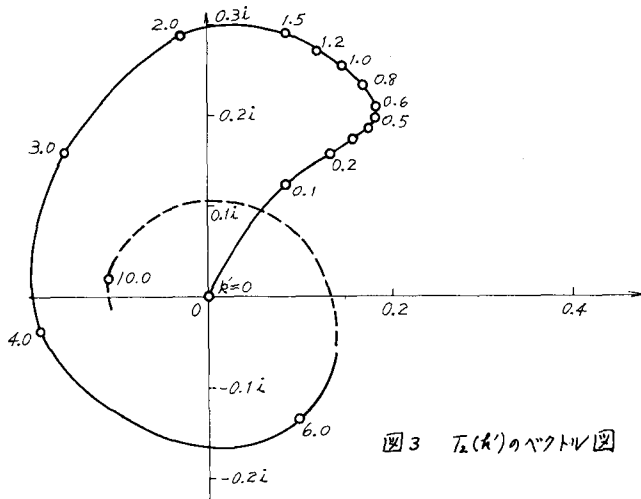


図3 $T_2(k')$ のベクトル図

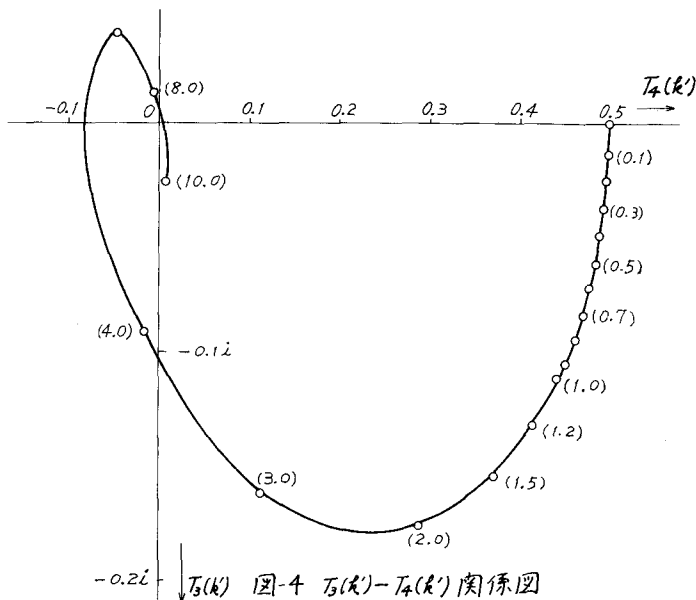


図4 $T_3(k')$ - $T_4(k')$ 関係図

$$\overline{T}_2(k') = -iJ_2(k')/k' = -\frac{i}{k'}(J_1(k') + J_3(k'))$$

$$T_2(k') = \frac{1}{2}(J_0(k') + J_2(k'))$$

である。(図-2, 3, 4)

4. 平板状構造物の応答特性 いまたわみ η , ねじれ φ の変位をもつ自由度振動系の平板状構造物を考えれば, 流体中の基礎方程式は Scanlan-Sabjeroni の表示を用いると次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \ddot{\eta} + 2\zeta_{\eta}\omega_{\eta}\dot{\eta} + \omega_{\eta}^2\eta &= H_1\dot{\eta} + H_2\dot{\varphi} + H_3\varphi + L/m \\ \ddot{\varphi} + 2\zeta_{\varphi}\omega_{\varphi}\dot{\varphi} + \omega_{\varphi}^2\varphi &= A_1\dot{\eta} + A_2\dot{\varphi} + A_3\varphi + M/I \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)の振動数応答関数 (frequency Response Function) を $H(\omega)$ とすれば, 一般に $H(\omega)$ は

$$H(\omega) = \begin{vmatrix} |H_{\eta}(\omega)|e^{i\theta_{\eta\eta}} & |H_{\alpha}(\omega)|e^{i\theta_{\alpha\eta}} \\ |G_{\eta}(\omega)|e^{i\theta_{\alpha\eta}} & |G_{\alpha}(\omega)|e^{i\theta_{\alpha\alpha}} \end{vmatrix} \quad (9)$$

のように表わされる。

以下の考察のため, 次のような周波数応答関数を定義する。

$$\begin{aligned} Y^2(\omega) &= \left(\frac{2\pi P b}{m} \right)^2 |H_{\eta}|^2 - 2 \left(\frac{2\pi P b}{m} \right) \left(\frac{\pi P b^2}{I} \right) |H_{\eta}| |H_{\alpha}| \cos(\theta_{\eta\eta} - \theta_{\eta\alpha}) + \left(\frac{\pi P b^2}{I} \right)^2 |H_{\alpha}|^2 \\ \Phi^2(\omega) &= \left(\frac{2\pi P b}{m} \right)^2 |G_{\eta}|^2 - 2 \left(\frac{2\pi P b}{m} \right) \left(\frac{\pi P b^2}{I} \right) |G_{\eta}| |G_{\alpha}| \cos(\theta_{\alpha\eta} - \theta_{\alpha\alpha}) + \left(\frac{\pi P b^2}{I} \right)^2 |G_{\alpha}|^2 \end{aligned} \quad (10)$$

いま式(1)で与えられる空気力を式(8)に代入すれば, その応答は $\eta = H(\omega)e^{i\omega t}$, $\varphi = \Phi(\omega)e^{i\omega t}$ となり, $H(\omega)$, $\Phi(\omega)$ はそれぞれ, 式(10)を用いて次のようになる。

$$\begin{aligned} H^2(\omega) &= Y^2(\omega) U^2 v_0^2 S^2(k') \\ \Phi^2(\omega) &= \Phi^2(\omega) U^2 v_0^2 S^2(k') \end{aligned} \quad (11)$$

$$k' = \omega b / U$$

また $y_0 e^{i\omega_0 t}$ は共振状態に式(4)のような変動風を考えるとすれば, 式(8)の応答は $\eta = H(\omega_0 + \nu) \times e^{i(\omega_0 + \nu)t}$, $\varphi = \Phi(\omega_0 + \nu) e^{i(\omega_0 + \nu)t}$ となり, H , Φ はそれぞれ 次のようである。

$$\begin{aligned} H^2 &= Y^2(\omega_0 + \nu) U^2 u_0^2 |T_{\eta}(k', k_0)|^2 y_0^2 \\ \Phi^2 &= \Phi^2(\omega_0 + \nu) U^2 u_0^2 |T_{\varphi}(k', k_0)|^2 y_0^2 \end{aligned} \quad (12)$$

ここに,

$$T_{\eta}(k', k_0) = T_0(k') + i k_0 T_2(k') - k_0^2 T_3(k') \quad , \quad k' = \frac{\omega_0 + \nu}{U}, \quad k_0 = \frac{\omega_0}{U}$$

である。式(12)の関係はたわみ, ねじれの双方を考慮しても同様に求められる。

いま変動風は式(2)あるいは式(4)のような Wave Pattern の各種の成分をもつ場合その Power Spectral Density を式(11), (12)の u_0^2 の代りに代入すれば応答の Power Spectral Density が求められることになる。また式(8)より, 変動風による流体力学的効果は, 空気力係数の Reduction に関係するため, 例えば, 横算フラッター振動数 (k_{cr}) より k' が大きいときは空気力係数は減少し, 変動風は Stabilizing 効果をもたらし, $k' < k_{cr}$ の場合には Destabilizing 効果を与えることになる。このことは Transverse Gust は Destabilizing 効果を与える場合が考えられるのに対し, Chordwise Gust は式(12)より, Stabilizing 効果を与えるものと考えられる。

5. 実験結果 京都大学工

学部エツフル型風洞を用いて、プレート・ガーダー形式、トラス形式、平板、ならびに Severn 型二次元模型を用いてフラッター実験を行ったが、一様流れに対する応答は図-6 に示すようであり、風洞内に格子 200×100 のメッシュを設けた乱れた流れに対する応答は図-5 に示すようである。

変動風の乱れ強さはほぼ 0.03 乱れのスケールは 4~8 cm であったが、平板状構造物はいずれも変動風の場合がフラッター限界風速が高く、stabilize されていると考えられる。平板について $k_{cr} = 0.2$ ならば、変動風による stabilizing 効果の最大値は

$$U = U_{cr,0} \sqrt{\frac{|C(\infty)|}{|C(0)|}} \Big|_{k=0.2}$$

$$= 1.32 U_{cr,0}$$

のように近似的に求められ、実験結果はこの特性を示すものと思われる。Severn 形式は、これに対して乱れによってフラッター特性に変化せず、プレート・ガーダー形式は平板トラス形式とは逆に Destabilize された応答を示している。これらについては空気応答周数、非定常空気力係数について今後さらに検討をすすめる必要があることを意味すると考えられる。

図 5 変動風における応答図

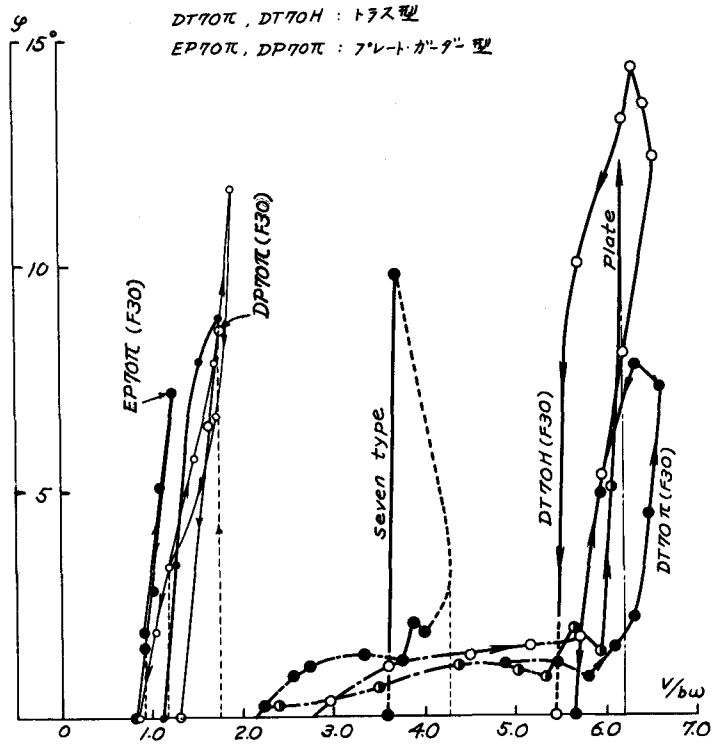


図 6 一様風における応答図

