

変動風に対する吊橋の耐風安定性に関する考察

京都大学工学部 正員 工博 小西一郎
 京都大学工学部 正員 工博 白石成人
 京都大学工学部 正員 工修 宇都宮英孝
 京都大学大学院 学生員 工修 松本 勝

§ 1. まえがき

長大吊橋の耐風安定性を検討するために、今回は各種の断面形状を有する部分模型を用いて定常風(乱れを含まない一様な空気流)および変動風(乱れを含む空気流)について動的な実験を行ない、その動的挙動について考察を加えた。

§ 2. 定常連成振動時におけるエネルギー状態

振動系に作用する動的空気力(揚力, トルクモーメント)および模型の変位(たわみ, おじれ)をそれぞれ次式で表わす。

$$L/m = \bar{H}_1 \dot{x} + \bar{H}_2 \ddot{x} + \bar{H}_3 x, \quad M/I_p = \bar{A}_1 \dot{x} + \bar{A}_2 \ddot{x} + \bar{A}_3 x \quad (1)$$

$$x = x_0 \sin \omega t, \quad \alpha = \alpha_0 \sin(\omega t - \delta) \quad (2)$$

たわみ振動 1 cycle 当りに対して

$$\text{gain energy} = \pi x_0 m (\dot{x}_0 \omega \bar{H}_1 + \dot{x}_0 \omega \bar{H}_2 - \alpha_0 \bar{H}_3 \sin \delta), \quad \text{loss energy} = 2\pi m \zeta_x \omega x_0 \dot{x}_0^2 \quad (3)$$

おじれ振動 1 cycle 当りに対して

$$\text{gain energy} = \pi \alpha_0 I_p \omega (\dot{x}_0 \bar{A}_1 \cos \delta + \dot{x}_0 \bar{A}_2), \quad \text{loss energy} = 2\pi I_p \zeta_x \omega x_0 \dot{x}_0^2 \quad (4)$$

式(3), (4)より定常連成振動が存在する条件は次式で表わせる。

$$\bar{A}_1 \cos \delta - (\bar{H}_3 \sin \delta + \omega \bar{H}_2 \cos \delta) = \omega (2\zeta_x \omega x_0 - \bar{A}_2) (2\zeta_x \omega x_0 - \bar{H}_1) \quad (5)$$

§ 3. 動的空気力係数

動的空気力係数をそれぞれ次のように表わす。

$$\bar{H}_1 = b_1 U, \quad \bar{H}_2 = b_2 U, \quad \bar{H}_3 = b_3 U^2, \quad \bar{A}_1 = a_1 U, \quad \bar{A}_2 = a_2 U, \quad \bar{A}_3 = a_3 U^2 \quad (6)$$

これらの係数 b_1, b_2, a_1, a_2 は次式より実験的に求めることができる。

$$b_1 = \frac{\dot{x}_0 (\omega x_0^2 - \omega^2) \cos \delta - 2\zeta_x \omega x_0 \dot{x}_0 \sin \delta}{\dot{x}_0 U (U - \frac{\dot{x}_0}{\omega} \omega \sin \delta)}, \quad b_2 = \frac{\dot{x}_0}{\dot{x}_0 \omega U} \{ (\omega x_0^2 - \omega^2) \sin \delta + (2\zeta_x \omega x_0 - b_1 U) \omega \cos \delta \} \quad (7)$$

$$a_1 = \frac{\omega^2 - \omega_{x0}^2}{(\dot{x}_0 / \dot{x}_0) U \omega \sin \delta - U^2}, \quad a_2 = \frac{1}{U} \left\{ 2\zeta_x \omega x_0 - \frac{(\omega^2 - \omega_{x0}^2) \cos \delta}{\omega \sin \delta - (\dot{x}_0 / \dot{x}_0) U} \right\}$$

一方、Theodorsen 関数を用いてこれらの係数を表わすと次のようになる。

$$b_1 = -(\pi F C_L / a) \sqrt{F(h) + G(h)}, \quad b_2 = -(\pi F C_D / 4am) \{ \sqrt{F(h) + G(h)} + 1 \}, \quad a_1 = (\pi F C_L / 4I_p) \sqrt{F(h) + G(h)}, \quad a_2 = (\pi F C_D / 6I_p) \{ \sqrt{F(h) + G(h)} - 1 \} \quad (8)$$

部分模型 Plate, DT70H, DT70Π について、実験より求めた $\bar{H}_1$ の値および理論値 (DT70H) を図 1 に示す。

§ 4. 位相のずれ δ と Reduced-velocity U/ω の関係

動的空気力係数が決まれば次式より位相のずれ δ を求めることができる。(図 2 参)

$$\{ (K_A K_x - \bar{A}_1 \bar{H}_2) + \bar{A}_1 \bar{H}_2 x \} [\bar{A}_1^2 \bar{H}_2 K_x - \bar{A}_1^2 \bar{H}_2^2 - (\omega_{x0}^2 - \bar{A}_3) \bar{A}_1 \bar{H}_2^2] x^2 + \{ \bar{A}_1 \bar{H}_3 K_x (K_A K_x - \bar{A}_1 \bar{H}_2) + \bar{A}_1^2 \bar{H}_2^2 - 2(\omega_{x0}^2 - \bar{A}_3) (K_A K_x - \bar{A}_1 \bar{H}_2) \bar{A}_1 \bar{H}_2 \} x - (\omega_{x0}^2 - \bar{A}_3) (K_A K_x - \bar{A}_1 \bar{H}_2)^2 = 0 \quad (9)$$

$$\text{where } x = \sin^2 \delta, \quad K_A = 2\zeta_x \omega x_0 - \bar{H}_1, \quad K_x = 2\zeta_x \omega x_0 - \bar{A}_2$$

§ 5. 振動数 ω と Reduced-velocity U/ω の関係

次式より振動数 ω を理論的に求めることが出来る。
(図3参)

$$\omega = (-\bar{A}_1 \bar{H}_0 \cos \delta - A_2 \sin \delta) / (K_A K_d - \bar{A}_1 \bar{H}_0 \cos \delta) \quad (10)$$

§6. 定常振幅比 h_0/α_0 と Reduced-velocity $U/b\omega$ の関係

次式より定常振幅比を求めることが出来る。

$$h_0/\alpha_0 = (2\zeta_d(\omega/\omega_0 - \bar{A}_2) / \bar{A}_1 \cos \delta) \quad (11)$$

§7. 定常振動時におけるエネルギー状態

式(3),(4)より1 cycle 当りのエネルギーを求める
と(図4,5参)次のことがわかる。つまりたわみ振
動はねじれ振動の場合の約7~10 倍のエネルギーを
必要とする。従って2自由度連成振動においてはね
じれ振動のオパはるかに生じやすくなったと考
える。この事実を説明することが出来る。

§8. 平均風速と風の変動成分の標準偏差との関係

乱れの標準偏差は平均風速にはほぼ比例する。(実験
解析結果より)つまり風速が高くなるにつれて乱れ
成分の持つエネルギーが大きくなり、平均流の乱れ
による損失エネルギーが大きくなるものと考えられ
る。

§9. 結論および今後の課題

今回の実験では、部分模型 Plate, DT70H, DT70 π に
ついては、定常風より変動風を受けた場合の方が耐
風安定性上有利であり、一オ部分模型 EP70H, DP70H
については、逆に定常風を受けた場合の方が耐風安
定性上やや有利であるという結果を得た。この理由
として次のことが考えられる。つまり、前者の模型
では、その断面形状が比較的 simple でありまたその
定常応答が比較的高い風速で生じているために、空
気流のエネルギーが動的挙動に与える影響が大きい
と思われる。一オ、後者の模型では、その断面形状
がやや複雑であり、またその定常応答が比較的低い
風速で生じているために、空力的アドミッタンスの
影響が大きいと思われる。従って今後は、空力的ア
ドミッタンスおよび乱れを合ふ空気流の持つエネ
ルギー(模型のエネルギー吸収率)に関する研究が
必要であると思われる。

参考文献: (1) Sabzevari, Scanlan "Aerodynamic Instability of Suspension Bridge" Journal of Eng. ASCE, 1968

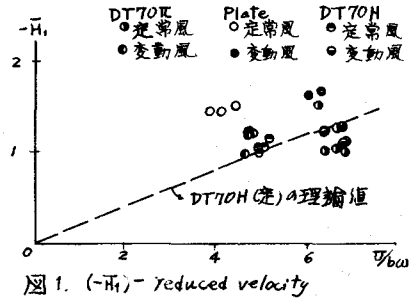


図1. $(-H_1)$ - reduced velocity

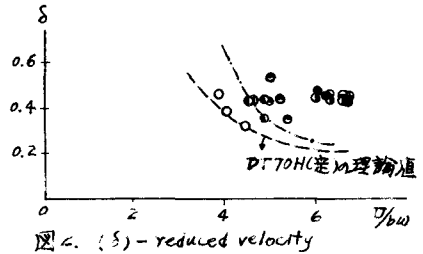


図2. (δ) - reduced velocity

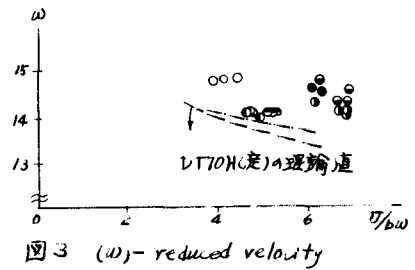


図3. (W) - reduced velocity

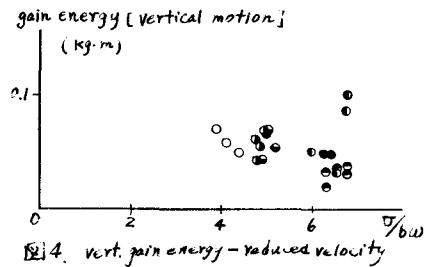


図4. vert. gain energy - reduced velocity

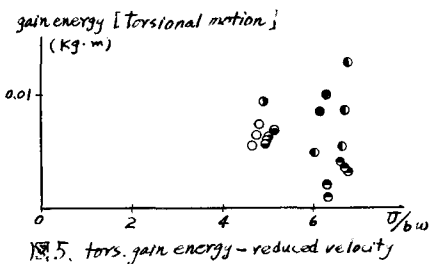


図5. tors. gain energy - reduced velocity