

徳島大学工学部 正員 ○宇都宮英考
 徳島大学大学院 学生員 関南博夫

1. まえがき

現在、つり橋の耐風安定性を検討する場合、風洞による模型実験がその最適な手段とされているが、本研究では、この実験にかかる負担を可能な限り軽減し、且つ所要の精度を満し得る安定解析の方法を見出すと共に、自然風中の乱れの成分がフラッター現象に及ぼす影響をアナログシミュレーションによって検討しよとするものである。この方法によれば任意の変動風を作ることに可能であり空力的な応答特性の把握に有効であると思われる。ここでは流れの場を準定常とし、乱れの成分は正弦波状突風によって表わされるものとして解析を行った。

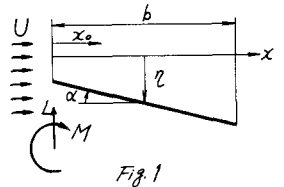
2. 空気力および運動方程式

2.1) 準定常空気力による振動

準定常流中において、2自由度振動を行う平板に作用する空気力は、空力弾性学において周知の如くつぎのように入れられる。(図1)

$$\left. \begin{aligned} \text{揚力係数: } C_L &= \frac{dC_L}{d\alpha} \left[\alpha + \frac{1}{U} \frac{dU}{dt} + \frac{1}{U} (\frac{3}{2}b - x_0) \frac{d\alpha}{dt} \right] \\ \text{モメント係数: } (C_M)_{\alpha} &= -\frac{b^2}{8U} \frac{d\alpha}{dt} - \frac{1}{4} C_L \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

この場合、揚力係数曲線の勾配 $\frac{dC_L}{d\alpha}$ は平板では迎角が $\pm 10^\circ$ 程度の範囲で、ほぼ一定値をとることが明らかにされているが、相対迎角は、予想される振動中この範囲を越えることが考えられるために、シミュレーションの段階では三合力試験によって得られた実験曲線を利用するものとする。このとき空気力は非線型性を有するものになる。図1に示された系の質量を m 、回転慣性を I 、粘性係数と C_D, C_a 、バネ定数と k_2, k_a とすると運動方程式は次のようになる。



$$\left. \begin{aligned} m\ddot{z} + C_D\dot{z} + k_2z &= -L \\ I\ddot{\alpha} + C_a\dot{\alpha} + k_a\alpha &= M \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

2.2) 正弦波状突風による空気力

自然風中の乱れの成分として、ここで設定される正弦波は、平均流方向および平均流直角方向の二成分 u, v が考えられる。一般に乱れた風の問題は、Sear⁽¹⁾, Harlock⁽²⁾, 白石等⁽³⁾ によって解析が行われているが、ここでは変動成分に対しても準定常的な考察が可能な程に、比較的ゆるやかな変動成分に対する応答を考えるものとする。これは実測された風速の変動成分の周期がかなり大きいものまで含むこと、つり橋が長周期構造物であり耐震解析の例に見られるように所謂逆拍共振現象が起ることに予想される、事に基くものである。ここで設定した2自由度振動系では、運動方程式の非線型性は相対迎角 α については問題にならない故、変動空気力を準定常空気力に重ね合わせるものとする。 u 成分は、式(1)において $U \rightarrow U+u$ とし、 v 成分は相対迎角の項に $\frac{v}{U}$ とし加えるものとする。変動空気力と

しては、例えば Horiack は $\Delta L_D = \frac{\partial C_D}{\partial \alpha} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho U^3}{2} \right)$ $\Delta L_u = C_D \rho U A$ と与えており、 Sear によれば $\Delta L_D = 2\rho U V_0 e^{i\omega t} S(k)$ として与えられている。

3. アナログシミュレーションによる応答解析のプログラム

定速風中の平板の安定性に対する同様の方法による検討は、筆者等によって既に発表され、⁽⁴⁾ 部分模型による風洞実験結果と比較してもかなり良い一致が得られている。本研究においても京都大学における部分模型による実験データを参照して解析を行った。解析に用いた部分模型は図2および表1に示す通りである。

Model	$I (\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{m})$	$\omega_0 (\text{rad}/\text{s})$	$\omega_{02} (\text{rad}/\text{s})$	ω_{01}/ω_0	δ_0	δ_{02}
R-1	0.01631	11.69	17.80	1.52	0.0376	0.0217
R-2	0.01941	11.62	19.64	1.69	0.0391	0.0284
R-3	0.02401	11.62	21.54	1.85	0.0342	0.0218
R-4	0.03017	11.52	23.25	2.02	0.0391	0.0237

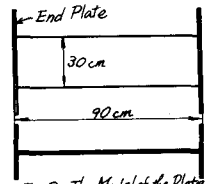


Fig.2. The Model of the Plate

3.1) アナログブロック図の構成

解析に使用するアナログ計算機(三菱 MELCOM-7420)の容量、精度の潤添から演算電圧、演算時間を修正する必要がある。式(1)において時間 t 、変位 φ 、回転角 α に対する scaling factor をそれぞれ T, L, R とし、 $t = T\tau$, $\varphi = L\zeta$, $\alpha = R\theta$ とすると原方程式を

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= -A_1 \frac{d\varphi}{dt} - A_2 \varphi + C_1 \\ \frac{d^2\alpha}{dt^2} &= -B_1 \frac{d\alpha}{dt} - B_2 \alpha + C_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

A_1, A_2, B_1, B_2 は定数。 C_1, C_2 は空気力項であるがこの変換では定数的に扱う。

とするととき次のように変換される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2\zeta}{d\tau^2} &= -A_1 T \frac{d\zeta}{d\tau} - A_2 T^2 \zeta + \frac{T^2}{L} C_1 \\ \frac{d^2\theta}{d\tau^2} &= -B_1 T \frac{d\theta}{d\tau} - B_2 T^2 \theta + \frac{T^2}{R} C_2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

空気力の項 C_1, C_2 は全体として定数的な取扱いが可能なら変換されなければならない。すなわち、 $L = \left(\frac{\rho b^3}{2m}\right) U^2 \left(\frac{dC_D}{d\alpha}\right) [\alpha + \frac{1}{2}(\dot{\alpha})^2 + \frac{1}{2}\dot{\alpha}]$ に対応するものとして、式(4)によって構成された回路の出力を用いるものとするれば、相対迎角の項は $[\theta + \frac{1}{T}(\dot{\zeta} + \frac{1}{R}\dot{\theta})]$ となる。従ってこの項を定数的に取扱うためには、 $[R\theta + \frac{1}{T}(\frac{1}{R}\dot{\zeta} + \frac{1}{R}\dot{\theta})]$ なる変換で元に戻してやれば良い。以上の変換によって原方程式は次のように書き換えられる。

$$\left. \begin{aligned} \tau \ddot{\zeta} &= -A_1 T \dot{\zeta} - A_2 T^2 \zeta - \frac{T^2}{L} C_1 \frac{dC_D}{d\alpha} \left[R\theta + \frac{1}{T} \left(\frac{1}{R} \dot{\zeta} + \frac{1}{R} \dot{\theta} \right) \right] \\ \tau \ddot{\theta} &= -B_1 T \dot{\theta} - B_2 T^2 \theta + \frac{T^2}{R} C_2 \left[-\frac{b\rho}{8U} \frac{R}{T} \dot{\theta} + \frac{1}{T} C_L \right] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

この連立方程式に対するアナログブロック図は図3に示す通りである。式中 $dC_D/d\alpha$ で示される空気力の非線形項は関数発生器(図中記号 FG)を用いて設定するものとする。この回路における演算電圧は $\nu \text{ vol}/\text{rad}$, $\mu \text{ vol}/\text{m}$, $dC_D/d\alpha = 1$ に対し $\epsilon \text{ vol}$, とし最終的にディメンジョンを調整する。これはポテンシオメーターによって行われるが、図3には省略されている。

3.2) 変動成分の設定

風の変動成分 u, v については、正弦波すなわち、 $u = u_0 \sin \omega_s t$, $v = v_0 \sin \omega_s t$ と仮定している。変動周期 ω_s は平板のフラッタ振動周期と比較して準定常の仮定が成立すると思われる範囲を越

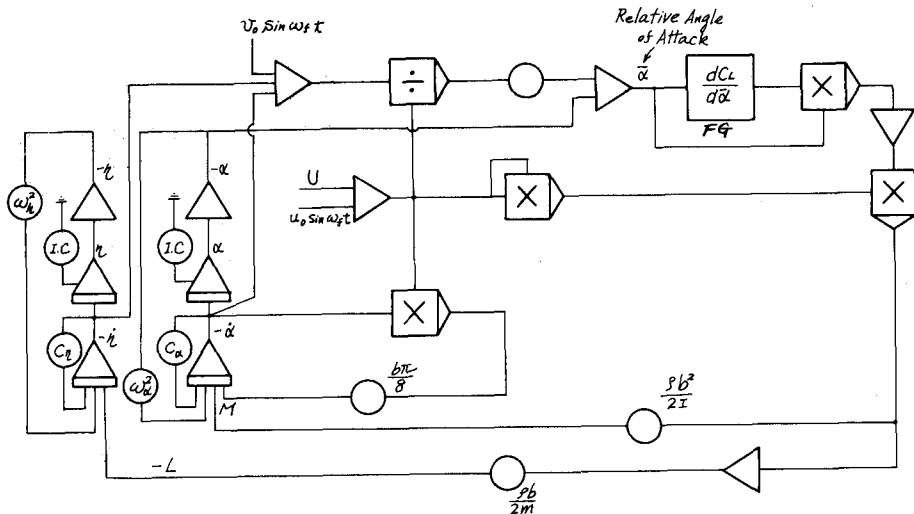


Fig.3 Analog Block Diagram of the System

えてはいけな。表1に示した部分模型による風洞実験では各4つの case についてフラッター振動数 ω_f はねじり振動数に近い値をとり、また換算風速は $3 \sim 6$ 程度の値を取るこが分っている。部分模型に対し、平均風速 $U > 5 \text{ m/sec}$ の範囲で、幅 30 cm の床版上と次抜けるのに要する時間を大とすると振動の本サイクル内で平均的な変動風向が変らないためには、正弦波状変動風の振動数を $\omega_f < 30 \text{ rad/sec}$ 程度とすれば良い。これらの実を考慮して変動風の振動数を、ねじり、たわみ固有振動数の上下の範囲にわたって $30, 20, 15, 10, 5 \text{ rad/sec}$ の5-case について応答を調べるものとする。正弦波は、積分器2個、符号変換器1個、ポテンシオメータ1個で容易に作成できる。また、変動成分の影響は、準定常的な仮定によれば over-estimation となる傾向があるため、特に影響の大きい β に対しては、位相差を無視した形で Sears 関数 $S(k)$ を導入するものとする。

4. 解析結果および考察

4.1) 定風速の下における平板の応答

$U, \dot{U} = 0$ の場合の運動方程式(2)を表1に示した各モデルに対して解析した結果が図4(a)に、またこれと比較のために京都大学土木教室における風洞実験結果を図4(b)に示している。準定常的な空気力によるシミュレーションの結果はかなり良く、実験値に対応している。たに不安定領域が、全般に低風速側にすれているこ

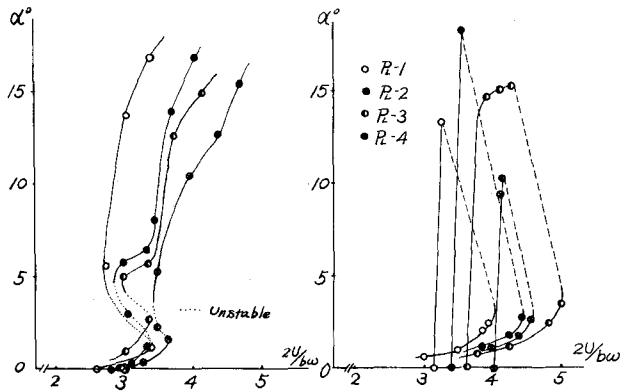


Fig. 4-(a): By Analog Simulation

Fig. 4-(b): By N. Shiraishi

こが認められる。この原因については、三力試験による空気力係数曲線から判断すると、揚力の作用角は理論値の如く、上流側を角ではなく、回転中心より偏っているこが分る。従って空力モー

メントの腕の中よりは理論値よりも小さな値となる。厳密には迎角の関数となるようであるがここでは図5に示されるものの内、 $1/5$ を採用することにして以下の解析を進める。定風速中のフラッターに対するいくつかの例については文献(4)に述べられている。

4.2) 正弦波変動成分の影響

具体的に見て、変動成分はたわみ型の振動に対して大きい影響を与えるようである。図7は u, v が平均風速の5%の場合の応答を示すものであるが、たわみ振幅が乱れを示すのに対し、ねじり振幅は比較的安定した定常状態を維持する。 u, v について比較すれば、 u -成分は5%程度の大きさになると影響が現われるが、 v -成分は1%程度でも明らかな影響が認められる。

モデルの固有周期に近い周期の v -成分に対しては、たわみ型振動は強制力の影響を強く受け、ねじり振動周期とは異った振動数で運動する。

フラッター発振風速については、風洞実験によれば、平板の場合乱れの影響を受けて発振風速がやや上昇する傾向が見られた。本シミュレーションにおいても同様の傾向が見られたが、これは主に v -成分の影響によるところが大きいようである。 v -成分による強制振動が、 $(\alpha)_{t=0} = (\theta)_{t=0} = 0$ からの Sweep Test によって k の広範囲にわたって現われ、この小振幅の振動によってフラッターの発振が抑制されることわかる。フラッター停止風速は、同様に、 u -成分によっては殆ど影響されないが、 v -によって明らかな上昇が認められた。

以上述べた事柄については、実験的な確認の方法がないこともあって、精度の面で保証を得られないのであるが、類似の実験結果と参照してある程度の期待は持てると思われる。この方法は、前述の如く、観測データそのまま入力して用い得る点で非常にメリットがあり、今後野外観測のデータ等によって之に改良を加える積りである。

- (参考文献) (1) Sears, W.R. "Some aspects of non-stationary airfoil theory and its applications" *Jour. of Aero. Sci.* 1941.
 (2) Horlock, J. H. "Fluctuating lift forces on airfoil moving through transverse & chordwise gust" *Trans. of A.S.M.E.* 1968.
 (3) 白石政人, "変動風上を平板板構造物の前風気流特性に関する2,3の基礎的研究" 土木学会論文報告集 No.195. 1971.
 (4) 岸野宮, 岡前: 中四支那年次講演会概要: 1972.5.

