

三菱重工長崎研究所 荻口展宏

○坂田 弘 土木学会員

田中博喜

1) はしがき

円柱構造物が風により振動を起す事は良く知られている。この振動を予知し、設計に応用していくために多くの研究がなされているが、必ずしも完全な予知技術は得られていない。これは実際の円柱構造物が遭遇する自然風は時間的にも空間的にも常に変動しているので、この変動が予知技術を困難にしているためと思われる。この変動風の円柱振動にあたえる影響についてニミの検討を行った。以下、これらの検討結果について述べるものである。

2) 過去の研究概容

円柱のカルマン渦による振動は音響的興味から出発し、一種の強制振動と考えられていたが、Funk (1), 藤野, 中川 (2), Smith and McCarthy (3) 等が不規則振動の理論を導入した。一方、Koopmann (4), Toebes (5) は渦が円柱振動に支配される事を見出し、自励振動的要素がある事を見出した。Bishop and Hassan (6), Fargarson and Parkinson (7) は、空気力と振動の位相差を見出し、空気力の虚数部の重要性を指摘した。Keefe (8), Gerrard (9) は円柱に働く圧力に関して同様な角度から究明している。

3) 使用記号

D: 円柱直径

L: 円柱長さ

 ρ : 空気密度

V: 風速

L: 揚力

 C_L : 揚力係数 ($L/2\rho V^2 D L$) y : 振動振幅 f_0 : 固有振動数 ω_0 : 固有円振動数 δ : 構造対数減衰率SH: 機械的ストローク係数 ($f_m D/V$)

I: 虚数部

K: 運動エネルギー

 W_0 : 減衰力による仕事 W_a : 空気力による仕事 $f(\omega)$: 円柱振動モード $g(\omega)$: 揚力の軸方向モード g : 減衰係数 (δ/π) f_m : 機械的強制振動数

4) 円柱に働く非定常空気力

円柱後方に発生する渦は円柱振動に大きな影響を受け、その結果空気力も振動振幅により変化する。このような空気力の性質を見出すために円柱を機械的な振動台に乗せ、強制的に振動させられた円柱

に作用する空気力を計測した。風洞は中1 m, 高さ1.3 mの密閉型回流風洞を使用した。円柱模型は直径0.15 m, 長さ1 mで、風洞の両壁いっばいに取付けた。

試験の結果揚力の絶対値について図1に示す。横軸は S_M を採った。絶対値は振動振巾が増加する程大きくなり、また S_M が0.2近くで揚力の最高値を持つ。この最高点は渦の自然発生数と円柱の機械的な振動数が一致した点である。円柱の機械的な振動と空気力との位相差を図2に示す。空気力は S_M が0.2付近で急激に位相が変化する。位相角が $0^\circ \sim 180^\circ$ の間では振巾は増大し振動は不安定になるが、 $0^\circ \sim -180^\circ$ の間で空気力は振動振巾を押さえつける側に働く。振巾の不安定量を示す空気力の虚数部の最高値と、振巾を横軸にして図3中実線で示す。同図にはスプリング系で円柱を支持した振動実験より得られた揚力係数も合わせて示す。尚図中の点線は後述するが、乱れを考慮した空気力である。

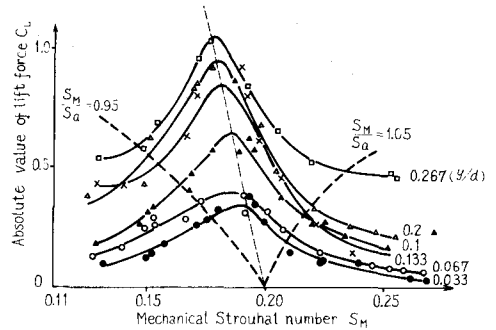


図1 空気力絶対値

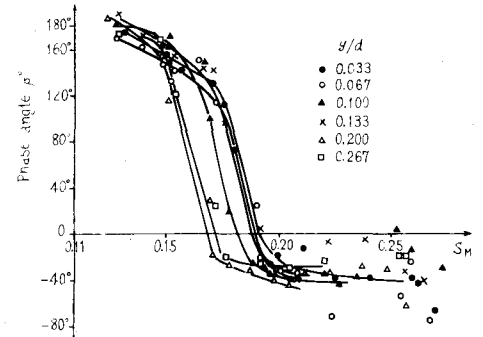


図2 空気力の位相差

5) 振動実験における特殊な例

円柱に図4の様な平板を取付けて振動実験を行った。円柱に×印の位置まで外乱を与えると、矢印の方向に振巾が変化し、ある外乱以上では振巾が大きくなり、それ以下では非常に小さな振巾に落ちつく。この事は空気力が振巾により大きく左右される事を示している。

図5にはトリップワイヤーを螺旋状に巻いた円柱の振動試験結果を示す。この場合も初期外乱を与えると、図

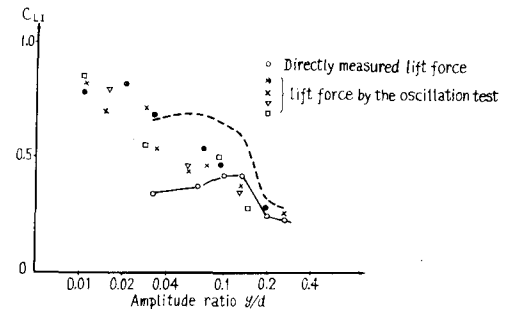


図3 空気力虚数部

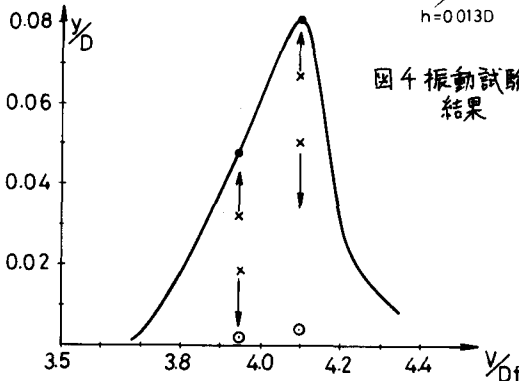
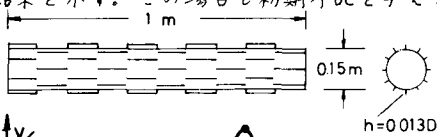


図4 振動試験結果

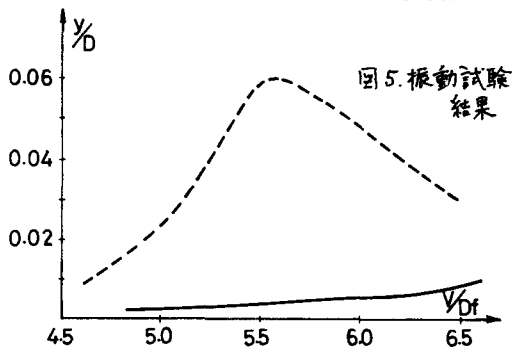
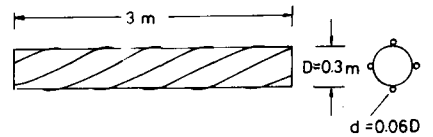


図5 振動試験結果

中点線の様に大きな振巾をたどるが、初期外乱がない場合は実線の様に小さな振巾になる。これも初期振巾が渦発生に大きな影響を与える一例である。

6) 揚力が作用する時の振動方程式

円柱に作用する空気力の中には円柱振動にそって動く非定常空気力と変動風によって動く変動空気力とがある。さらに円柱振動に従う空気力は振動との位相差を持つので実数部と虚数部に分けられる。この様な空気力が作用する元での円柱振動のダイアグラムを書けば、図6の様になる。この中で変動風による空気力は時間的に常に変動しているので、その大きさ、方向共にダイアグラム上を動いている。もし変動空気力が上向の時は振動が増加するし、下方に向けば振動は減少する。ここで円柱は固有振動数で振れる事から、変動空気力も固有振動数から大きく離れた振動数成分は円柱振動に影響しないと思われる。この事はダイアグラム上をゆっくり変動する成分のみが円柱振動に影響を及ぼす事になる。これらを元に振動方程式を考える。

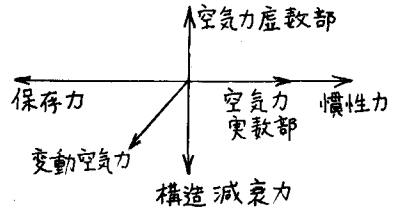


図6 振動メカニズム

振動振巾

$$Y(t) = Y_0(t) e^{i\omega_0 t}$$

振巾の時間による変化

$$\frac{dY(t)}{dt} = i\omega_0 Y_0(t) e^{i\omega_0 t}$$

ここで、次のように仮定した

$$\frac{dY_0(t)}{dt} e^{i\omega_0 t} \ll i\omega_0 Y_0 e^{i\omega_0 t}$$

6.1 運動エネルギー

$$T = \frac{1}{2} \omega_0^2 Y_0^2 \int m f^2(x) dx = \frac{1}{2} \omega_0^2 Y_0^2 M$$

6.2 減衰力による運散エネルギー

$$\delta W_D = D \frac{dy}{dt} dy = iM\omega_0^2 g Y_0 e^{i\omega_0 t} dy$$

一周期に放出するエネルギー

$$W_D = \oint \delta W_D = iM\omega_0^2 g Y_0 \int_0^{2\pi/\omega_0} e^{i\omega_0 t} \frac{dy}{dt} dt = -M\omega_0^3 Y_0 \int_0^{2\pi/\omega_0} e^{i\omega_0 t} e^{i\omega_0 t} dt$$

6.3 揚力による供給エネルギー

ここで空気力の実数部は保存力となり、エネルギーは供給しないので、虚数部のみ考える。

$$L(t) = iL_0(t) e^{i\omega_0 t} g(x) \quad \delta W_a = L(t) dy = iL_0 e^{i\omega_0 t} dy \int f(x) g(x) dx$$

1周期に供給するエネルギーは

$$W_a = \oint \delta W_a = iL_0 \int_0^{2\pi/\omega_0} e^{i\omega_0 t} \frac{dy}{dt} dt \int f(x) g(x) dx$$

$$= -L_0 \gamma_0 \omega_0 \int_0^{\frac{2\pi}{\omega_0}} e^{i\omega_0 t} e^{i\omega_0 t} dt \int f(x) g(x) dx = -\pi L_0 \gamma_0 \int f(x) g(x) dx$$

6.4 変動空気力によるエネルギー

$$L = \sum L_n e^{i\omega_n t} = \sum_j \frac{L_{N+1} + L_{N-1}}{2} e^{i\omega_j t} e^{i\omega_0 t} = \sum_j L_j e^{i\omega_j t} e^{i\omega_0 t}$$

同様にエネルギー計算を行えば

$$\delta W_a = -\pi \sum L_j e^{i\omega_j t} \gamma_0 \int f(x) g(x) dx$$

エネルギー保存の法則から、上記4種のエネルギー総和の時間的变化は0である。

$$\frac{dT}{dt} - \frac{dW_D}{dt} + \frac{dW_a}{dt} = 0$$

上記方程式より

$$\frac{d\gamma_0}{dt} + \frac{1}{2} \omega_0 \gamma_0 - A(L_0 + \sum_j L_j e^{i\omega_j t}) = 0$$

ここで

$$A = \frac{1}{2M\omega_0} \int f(x) g(x) dx$$

7) 検討

一般に円柱上では非定常空気力の他に変動空気力が生じ、その力は空気を増した様な形になる。図3で点線で示した線は変動空気力を考えた全体の空気力である。図4図5では振動がその初期振中で大きく変る事を示した。一方実際の構造物における円柱部材では溶接跡やステップナー等表面に付加物が付く事も多い。この場合に初期振中が後の振動に大きな影響を及ぼすが、この初期振中は変動風により誘起される事も多いと思われる。多くの円柱構造物が必ずしも振動が起らないという事実もこの不規則空気力による初期振中に起因すると思われる。従って今後現地風の風の特性まで考慮した研究を進める必要があろう。

文献

- 1) Y.C.Fung; Fluctuating lift ... JAS Vol.27 No.11 1960
- 2) K.Nakagawa, T.Fugino; ... Symposium on wind effects. Paper No.3 1963
- 3) J.O.Smith, J.H.McCarthy; ... ASME Paper No. 63-WA-246 1963
- 4) G.H.Koopmann; The vortex wakes of ... J.Fluid Mech. Vol.68 Part 3 1966
- 5) G.H.Toebes; The unsteady flow of ... ASME Paper No. 68-WA/FE-23 1968
- 6) R.E.D.Bishop, A.Y.Hassan; ... Proc. Royal Soc. of London Vol. 277, 1964
- 7) N.Ferguson, G.V.Parkinson; ... Trans. of ASME, J.of Eng. Nov. 1963
- 8) R.T.Keefe; ... Univ. of TORONTO, Ins. of Aerophysics, Report No.76 1961
- 9) J.H.Gerrard; ... J.of Fluid Mech. Vol 11, Part 2, 1961