

九州大学応力学研究所 正員 岡島厚, 原田健一

1. まえがき. 一様流中にある円柱の渦励振による流れと直角な方向の振動については今日まで数多くの研究がなされている. 円筒状部材からなる鉄塔構造物などでは構成部材の結合の仕方によって, 流れに対し種々な角度の振動方向を有する場合が多い. そのような場合の部材結合部の設計についての基礎となる資料は非常にわずかである. 渡辺ら⁽¹⁾は比較的低いレイノルズ数範囲($Re=80\sim4000$)であるが, 油あるいは水の中で円柱を強制的に流れ方向およびそれと直角な方向に加振させ, その時の円柱に作用する流体力などを測定している.

また King⁽²⁾らは潮流における海洋構造物の振動の安定性を調べるため, 流れ方向および流れと直角方向に振動するように片持弾性支持した円筒構造物につき, 振動系の減衰比率を種々変えて, 模型のたわみおよび後流の速度変動の周波数などを実測した実験結果を報告している. そこで本研究は流れに直角方向⁽³⁾($\alpha=90^\circ$), 流れ方向($\alpha=0$)さらに流れに対して傾斜した方向に(例えば角度 $\alpha=75^\circ, 45^\circ, 15^\circ$)振動出来るように両端弾性支持した円柱模型につき, 発振の様相, 振動の挙動, さらに振動円柱まわりの流れを調べた. その結果, 振動方向により模型の振動振幅はかなり相違し特に振動方向が流れ方向に近い場合($\alpha=0^\circ, 15^\circ$)には, 共振風速の $1/2$ ($\alpha=0^\circ$)あるいは $1/3$ ($\alpha=0^\circ, 15^\circ$)の低風速域附近で不安定になることがわかった.

2. 実験装置と実験方法. 実験は風洞型低速風洞で行った. 図1に示すように風洞測定部(高さ4m, 幅2m断面)に直径 $D=0.3m$, スパン長さ2mの模型円柱①を設置する. 模型円柱は重量軽減のため発泡スチロール製の中空の円筒を用い, 表面を出来るだけ滑らかにするよう $0.3mm$ のアルミ薄板を被覆したもので, 模型の両端は2枚1対の板ばね②(厚さ5mm, 幅10cm, 長さ150cm)とそれに直角方向上下につけたコイルばね③によって弾性支持されている. 模型円柱の振動方向 α は図に示すように板ばねとコイルばねの取付け位置を変えることにより, $\alpha=90^\circ, 75^\circ, 45^\circ, 15^\circ, 0^\circ$ などに変えた. 振動系の減衰率を変えるには粘性平行板方式のダンパー④を用いた.

3. 実験結果 弾性支持された円柱の固有振動数は $f_n=3.47(4.38, 3.17)Hz$ で非振動時のカルマン渦の周波数 f_K と一致する共振風速は $V_{cr}=5.63(7.10, 5.14)m/s$ で無次元共振風速表示 $\bar{V}_{cr}(\equiv V_{cr}/f_n D, f_n=f_K)$ では, $\bar{V}_{cr}=5.41(5.26)$ である. この時のレイノルズ数は $Re(\equiv V_{cr} \cdot D/\nu, \nu$ は空気の動粘性係数) $\approx 1.0\sim 1.4 \times 10^5$ で円柱まわりの流れは亜臨界域である. 角度 α を変えた各々の実験では, 減衰比率 $2m\delta/\rho D^2$ (m は円柱の単位スパン長さ並りの質量, δ は振動系の対数減衰率, ρ は空気の密度)をパラメータとして, 無次元風速 $\bar{V} \equiv V/f_c \cdot D$ (V は試験風速, f_c は振動時の模型の振動数)に対する円柱の無次元応答振幅 η_{RMS} および後流中の速度変動の周波数 f_w ($St \equiv f_w \cdot D/V$)の変化を示す. ここで η_{RMS} は記録波形約300周期以上にわたる振幅のR.M.S.値を直径 D で無次元化したものである.

(i) $\alpha=90^\circ$ の場合, 文献(3)参照.

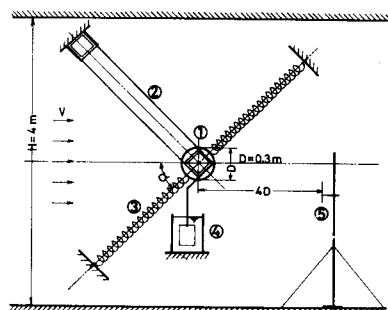
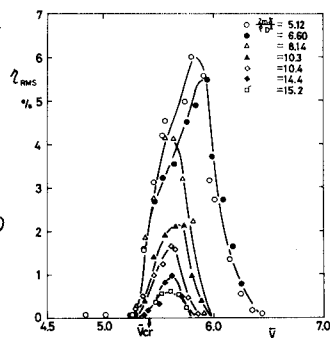
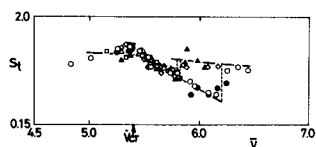


図1 実験装置測定部概略

- ① 模型円柱 ② 板ばね
③ コイルばね ④ ダンパー
⑤ 熱線プロローフ



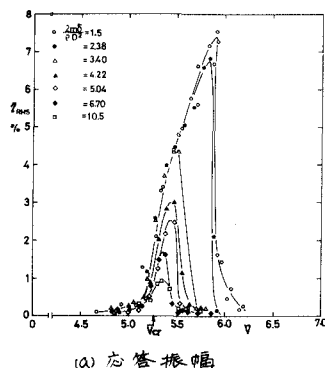
(a) 応答振幅



(b) 後流の速度変動のストロハ数

図2 斜め方向に振動する円柱($\alpha=75^\circ$)

(ii) $\alpha = 75^\circ$ の場合 (図2)。 いずれの減衰比率の場合にも $\bar{V}_{cr} = 5.41$ 附近から不安定となり、その振動振幅は増大すると共に、後流の速度変動の周波数 f_w は図2bに示すように円柱の振動数 f_c に等しく、減衰比率によって相違するが、 $\bar{V}$ のかなり広い範囲で後流渦と円柱の振動は同期している。図2に示す $\alpha = 75^\circ$ の様相は $\alpha = 90^\circ$ の場合に比較して、同じ減衰比率に対し振幅 η_{RMS} が若干小さいこと以外ほとんど同じである。



(iii) $\alpha = 45^\circ$ の場合 (図3)。この場合、試験風速を広い範囲にわたり変えたが、この減衰比率の範囲ではたとえ $\bar{V}_{cr}/2$ や $\bar{V}_{cr}/3$ でも発振は認められず、いずれの減衰比率の場合でも共振風速 (この場合 $\bar{V}_{cr} = 5.26$) 附近からのみ不安定となり、振幅 η_{RMS} は急激に増大し、後流の速度変動の周波数 f_w は円柱の振動数 f_c に同期している。このような $\alpha = 45^\circ$ の場合の振動挙動は $\alpha = 90^\circ, 75^\circ$ の場合と類似しているが、振動振幅 η_{RMS} はかなり小さい。

(iv) $\alpha = 0^\circ, 15^\circ$ の場合 (図4, 5)。この場合、減衰比率が極端に小さい $2m\delta/\rho b^3 = 1.6$ の場合でも、共振風速の $\bar{V}_{cr} = 5.26$ 附近では模型は発振せず、その $1/2$ の $\bar{V}_{cr}/2 = 2.6$ 附近の低風速域で不安定となる。しかしその振動振幅はかなり小さく、高々直径の2%程度である。 $\alpha = 0^\circ$ の場合には $\bar{V}_{cr}/2$ 前後の $\bar{V} = 1.75 \sim 2.4$ 、 $2.6 \sim 3.3$ の2ヶ所の風速域に不安定域がある。この現象は King⁽²⁾ の実験結果にもみられ、特に風速 $\bar{V}$ の低い方の不安定域の振動時には後流に対称な渦が発生していると報告している。 $\alpha = 15^\circ$ の場合の不安定域は $\bar{V} = 1.9 \sim 2.6$ の1ヶ所である。それぞれ図bには後流の周波数 f_w の円柱の振動数 f_c に対する比 f_w/f_c を示したが、 $\alpha = 0^\circ$ (図5b) の場合、 $\bar{V}_{cr}/2 = 2.6$ から高風速域の $\bar{V} = 2.6 \sim 3.3$ の不安定域で $f_w/f_c = 1/2$ が一定で、かなりの範囲にわたり、後流渦の周波数は円柱の振動数の $1/2$ に同期していることがわかる。さらに $\alpha = 0^\circ$ および 15° の場合の不安定域は $\bar{V}_{cr}/3 = 1.75$ から高風速域の $\bar{V} = 1.75(1.9) \sim 2.4(2.6)$ である。この領域で比較的大きな振幅の場合には狭い範囲であるが $f_w/f_c = 1/3$ の一定値を示し、円柱の振動数 f_c の $1/3$ に同期した後流渦が形成されていることがわかる。

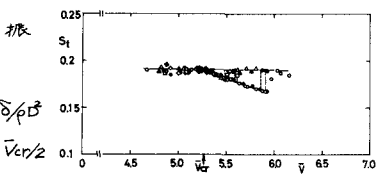
以上の振動方向が流れに対し、 $\alpha = 90^\circ, 75^\circ, 45^\circ, 0^\circ$ の場合につき、弾性支持した円柱の振動実験の結果から、種々な減衰比率に対する応答振幅の最大値を図6にまとめて示す。図には Scruton⁽⁴⁾ による流れに直角方向の振動実験結果も示すが、同条件の本実験値と良く一致している。また振動方向 α が変わると、その振動振幅は急激に減少することがわかる。

参考文献

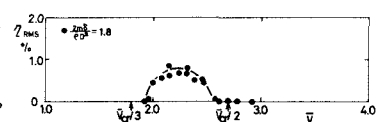
- (1) 渡辺他2名, 機械学会論文集40, 33/1(昭和43)
- (2) King, R. H. 2名, J. Sound & Vibration 29, 2 (1973) 169.
- (3) 岡島, 土木学会年次講演会概要集I(昭和43) 435.
- (4) Scruton, C., Proc. Sympo. Wind Effects on Buildings and Structures, II (1965) 798.

図6. 減衰比率に対する応答振幅の最大値。

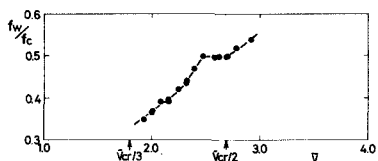
図5. 流れ方向に振動する円柱 ($\alpha = 0^\circ$)



(b) 後流の速度変動のストロハル数
図3. 斜め方向に振動する円柱 ($\alpha = 45^\circ$)

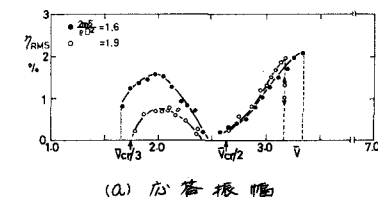


(a) 応答振幅

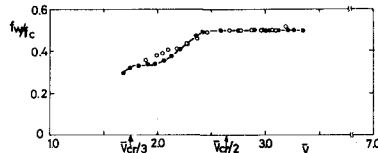


(b) 後流の速度変動の周波数

図4. 斜め方向に振動する円柱 ($\alpha = 15^\circ$)



(a) 応答振幅



(b) 後流の速度変動の周波数

図5. 流れ方向に振動する円柱 ($\alpha = 0^\circ$)