

(II-60) 開水路中で渦励振動している水平円柱に作用する流体力について

防衛大学校 学生会員 田中 克也 正会員 林 建二郎
正会員 藤間 功司 正会員 重村 利幸

1 はじめに

円柱のようにぶい物体の後流域には、周期性を持つ後流渦を生じるため時間変動成分を持つ作用流体力が発生し物体に振動を誘起する。この振動は「渦励振動」と呼ばれ流れと物体振動との相互作用を伴う自励振動の一種である。本研究は、渦励振動現象の解明において重要な渦励振動円柱に作用する流体力特性を明らかにすることを目的として、開水路中に水平設置された円柱の渦励振動特性と渦励振動時の作用流体力特性を自由振動法により調べたものである。

表-1 実験条件

2 実験装置および方法

本実験には、長さ 40m、幅 0.8m、高さ 1m の環流装置付 2 次元増波水槽を用いた。実験装置の概略を図-1 に示す。試験円柱(外形 $D=3\text{cm}$ 、長さ $L=48\text{cm}$)は流れに対して垂直方向のみ振動可能である。円柱に作用する流体力を直接計測するために円柱内に 2 分力計を組み込みセグメント円柱($D=3\text{cm}$ 、長さ 3cm)の単位長さ当たり作用する流れ方向および揚力方向の流体力 DF_x 、 DF_y を計測した。振動加速度を計測するために円柱支持枠に加速度計を設置した。主流速 U の計測には、レーザー流速計を用いた。

実験条件を表-1 に示す。case1 ~ 6 においては、磁石とアルミ板との間隔を調整し空中における減衰定数 ζ_a を変化させた。図中の K 値 ($=m(2\pi\zeta_a)/(\rho D^2)$ 、 m : 円柱の換算単位長質量) は *Scruton* 数と呼ばれている渦励振動量の支配パラメーターである。また、比較のため同円柱静止時に作用する流体力も計測した。

3 渦励振動モデル

流れと直角方向(揚力方向)に片振幅 Y で渦励振動している円柱からのカルマン渦列の間隔 a は(1)式で表されると仮定すると、渦の掃出し周波数 f および渦励振動円柱に作用する変動揚力の片振幅 F_0 、ならびに円柱振動の片振幅 Y は、(2)、(3)、(4)式でそれぞれ示される¹⁾。式中の M は円柱の *bluffness ratio*、 K は背圧パラメーター、 ε は渦度の発生循環への寄与率である。式中の ϕ は円柱のゼロ変位時と渦発生時(円柱の一端から新しい渦の生成が始まる時間)との位相差である。 S^* は後流ストローハル数であり円柱の場合 $S^*=0.164$ である。作用揚力と円柱変位との位相差 ψ は(5)式で示される。 ψ と ϕ は互に関係し両者の和は 270° に近い一定値となる。(1)~(6)式より主流速度 U の変化に対する円柱の渦励振動片振幅 Y を計算できる。本計算においては、静止円柱の場合の $M=1.13$ 、 $K=1.4$ 、 $\varepsilon=0.43$ を用いた。なお静止円柱に作用する揚力の実測値と(3)式で示される F_0 値を合わせるために(3)式の右辺に 0.05 を乗じた。

case	固有振動数 (Hz)		減衰定数 ζ		質量減衰パラメーター	
	空中 f_{ms}	水中 f_{mw}	空中 ζ_a	水中 ζ_w	空中 K_{ms}	水中 K_{mw}
1	0.904	0.870	0.0043	0.0100	0.59	1.38
2	0.904	0.870	0.0138	0.0188	1.90	2.60
3	0.904	0.870	0.0190	0.0232	2.62	3.20
4	0.904	0.870	0.0258	0.0325	3.56	4.49
5	0.904	0.870	0.0371	0.0416	5.12	5.74

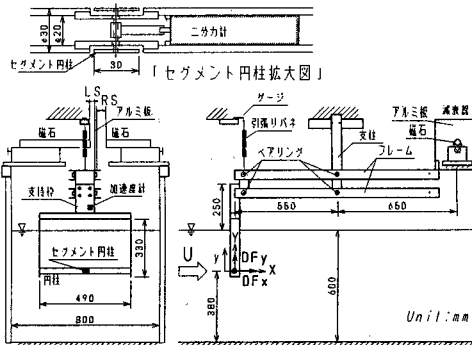


図-1 実験装置

$$a = M(D + 2Y \sin \phi) \quad \dots (1)$$

$$f = \frac{KS^*U}{a} = \frac{KS^*U}{M(D + 2Y \sin \phi)} \quad \dots (2)$$

$$F_0 = \frac{\pi \varepsilon K \rho L M (D + 2Y \sin \phi) U^2}{4S^*} \quad \dots (3)$$

$$Y = \frac{\frac{F_0}{k}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta \left(\frac{f}{f_n}\right)\right]^2}} \quad \dots (4)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left\{ \frac{\frac{2\zeta f}{f_n}}{1 - \left(\frac{f}{f_n}\right)^2} \right\} \quad \dots (5)$$

$$\psi + \phi \approx \text{const} = 270^\circ \quad \dots (6)$$

4 結果および考察

渦励振動変位 y の時系列における平均片振幅 Y_{mean} および最大片振幅値 AY_{mean} をゼロアップクロス法を用いて算定した。各ケースの Y_{mean}/D と換算流速 $V_r (=U/(f_v D))$ の関係を図-2 に示す。どのケースも $V_r=4$ 近くで渦励振動が始まり、 $V_r=6$ 近くで最大値 AY_{mean}/D を示す。最大値 AY_{mean}/D は K_s 値が減少するにつれて大きくなっている。空気流中での円柱の渦励振動量を調べた Feng の結果²⁾における振動量の最大値とそれが生じる V_r 値との関係を図-2 中に黒丸●で示す。 $AY_{mean}/D < 0.4$ では、本実験結果と Feng の結果との一致は良好である。

各ケースの実験条件を用いた渦励振動片振幅の計算値 Y/D と V_r 値の関係を図-3 に示す。計算値 Y/D の最大値と実験値 Y_{mean}/D の最大値との一致は良好であるが、 Y/D は Y_{mean}/D と異なり $V_r > 6$ では急激に減少している。

2 分力計で計測された DF_y には、セグメント円柱部に作用する質量力(=セグメント円柱部の質量×円柱の振動加速度)が含まれている。 DF_y よりこの質量力を差し引いた DF_{yag} を揚力方向の流体力(揚力)とする。各ケースにおける揚力係数 $CL_{gmax} (=DF_{yag}$ の最大値/ $(1/2)\rho DU^2$) と抗力係数 $CD_{mean} (=DF_x$ の時間平均値/ $(1/2)\rho DU^2$) の V_r 値に対する変化特性を図-4 と図-5 にそれぞれ示す。 CL_{gmax} は振動変位の増加に伴い増加するが、その最大値は振動振幅が、最大となる直前の V_r で生じている。その後、振動変位の変化は緩やかであるが CL_{gmax} は急激に減少する。 CD_{mean} は振動変位の増加に伴い増加し、振動振幅が最大となる V_r 値で最大値を示す。これは円柱振動により渦列の幅が増加するからである。振動変位 y と揚力 DF_{yag} のフーリエ解析を行い、 DF_{yag} の振動速度 dy/dt との同位相成分 DF_{yagd} を算定した。振動速度との同位相成分 DF_{yagd} は、流体減衰力に関係する値であり共振時には振動強制外力として働く。各ケースにおいて振動振幅の最大値 AY_{mean} が生じる V_r 値での DF_{yagd} を用いた抗力係数 CL_{dh} と AY_{mean}/D との関係を図-6 に示す。 $AY_{mean}/D=0.5$ 付近で CL_{dh} は大きく増加している。

AY_{mean}/D が生じる V_r 値での抗力係数 CD_{mean} を CD_v とする。これと同じ流れに円柱を静止させた時の抗力係数を CD_s とする。 CD_v/CD_s と AY_{mean}/D との関係を図-7 に示す。渦励振動している円柱に作用する揚力は、振動振幅の増加に伴い増加することがわかる。上記渦励振動モデル式において計算された揚力係数および抗力係数の増加率を図-6、図-7 に示す。本モデル式は、振動量が小さい場合の揚力、抗力が増加現象を概ね評価している。

参考文献

- (1) Silvio, G. D. : Self-Controlled Vibration of Cylinder in Fluid Stream, Journal of Engineering Division, Proceeding of ASCE, EM2, April, 1969.
- (2) Feng, C. C. : The Measurement of Vortex-induced Effects in Flow Past Stationary and Oscillating Circular and D-section Cylinders, MASC Thesis, University of Br. Columbia, Vancouver, 1968.

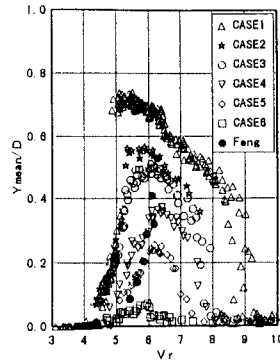


図-2 実験値 Y_{mean}/D と V_r の関係

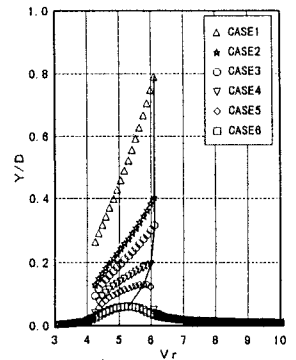


図-3 理論計算値 Y/D と V_r の関係

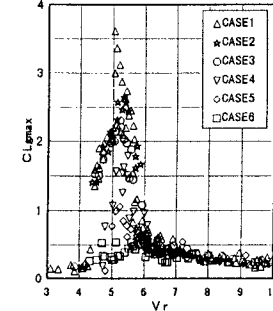


図-4 実験値 CL_{gmax} と V_r の関係

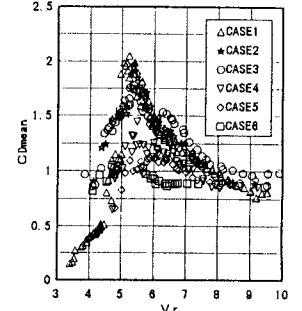


図-5 実験値 CD_{mean} と V_r の関係

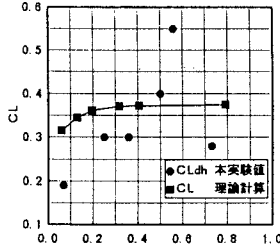


図-6 振動強制外力に寄与する揚力係数と振動振幅の関係

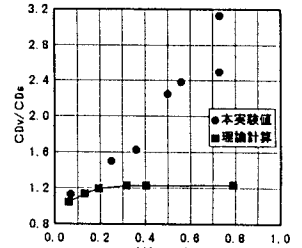


図-7 渦励振動時における抗力の増加