

一方向流中で渦励振動している円柱に作用する 流体力の増加特性

AMPLIFICATION OF FLUID FORCES ACTING ON A VORTEX-EXCITED CIRCULAR CYLINDER VIBRATING IN STEADY FLOW

林建二郎¹・田中克也²・藤間功司³・重村利幸⁴

Kenjiro HAYASHI, Katuya TANAKA, Kouji FUJIMA and Tosiya SHIGEMURA

¹正会員 Ph. D. 防衛大学校助教授 土木工学教室 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

²学生員 防衛大学校大学院工学研究科 地球環境科学専攻 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

³正会員 工博 防衛大学校助教授 土木工学教室 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

⁴正会員 Dr. Eng. 防衛大学校教授 土木工学教室 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

This study describes experimental investigations into the non-linear vortex-excited vibration of a circular cylinder in steady and uniform flow in open channel with emphasis being placed on the amplification of fluid forces caused by the fluid-structure interaction. The dynamic transverse responses of a spring supported circular cylinder were investigated in the range of reduced velocity $V_r = 4$ to 10 for several values of reduced damping K_{sa} . The value K_{sa} of deduced damping was adjusted by using a electromagnetic damper. Hydrodynamic forces, drag and lift, acting on the vortex-excited circular cylinder freely vibrating in uniform flow were measured by using a load cell installed in the test cylinder and a load cell supporting the test cylinder. The variation of amplification of the hydrodynamic forces acting on the vortex-excited vibrating cylinder in comparison with the hydrodynamic forces acting on the cylinder stationary mounted at the reduced velocities V_r and amplitudes of transverse vibration of cylinder were evaluated quantitatively.

Key Words : vortex-excited vibration, lift force, drag force, fluid and structure interaction

1. はじめに

一方向流中に置かれた円柱のようなばい物体の後流域には周期性を持つ後流渦が形成されるため、その物体が静止状態であっても作用流体力には時間変動成分(変動流体力)が存在する。流体力の変動周期と物体の固有周期が一致すると、共振現象によりその物体の振動は顕著となる。後流渦の非定常性によって生じる変動流体力によるこの振動は「渦励振動」と呼ばれ、流れと物体振動との相互作用を伴う非線形流体力による自励振動の一種である¹⁾。耐風構造物や、河川および潮流の卓越する海域に設置される水中構造物の設計においては、この渦励振動に対して十分に検討する必要がある。

一方向流中に置かれた静止円柱には、主流の方向に抗力 F_D が、その直角方向に揚力 F_L が作用する。揚力 F_L の時

間変動成分(変動揚力)の卓越周波数 f_L は、Strouhal周波数と呼ばれている静止円柱からの後流渦の発生周波数 f_v ($f_v = St U/D$, St : Strouhal数, U : 主流速度, D : 円柱径)と同じである。一方、抗力 F_D の時間変動成分(変動抗力)の卓越周波数 f_d は f_L の約2倍である。変動揚力の大きさは変動抗力のそれより大きい¹⁾。従って、一般には揚力に起因する渦励振動が支配的であり、工学的にも重要な問題である¹⁾。

一方向流中に置かれた円柱の揚力に対する渦励振動に関しては多くの研究が行われてきた^{2), 3)}。バネ等を用いて弾性支持された円柱の一方向流中での渦励振動の様子を調べる実験(自由振動法)行くと、円柱は主流速度 U のある特定範囲のみで円柱の固有振動数 f_n に極近い周波数を持って大きな振動をする。この場合、後流渦の発生機構が円柱の振動運動に引き込まれる結果、渦励振動円柱からの後流渦の発生周波数 f_v は、円柱の振動数

$f_y (=f_n)$ とほぼ等しい。従って、渦の発生周波数 f_v は、主流速度 U の変化によらず一定値 ($f_v = f_n$) を保っている。この同期現象は Locking-in 現象と呼ばれている。Locking-in 現象は、換算流速 $V_r (=U/(f_n \cdot D))$ が 5 より少し低い値より始まる。Locking-in 現象の結果生じる円柱振動量の増加と共振が生ずる V_r 領域の拡大は、後流渦の発生強度や後流渦列幅の変化を引き起こすと共に、後流渦の円柱軸方向の相関性を向上させる。その結果、渦励振動時の円柱に作用する揚力 FL および抗力 FD は円柱静止時より変化する²⁾。

Vichery⁴⁾、King⁵⁾、Griffin⁶⁾ は、自由振動法により一方向流中における渦励振動円柱に作用する揚力の評価を行った。田中⁷⁾ ら、Tanida⁸⁾、ならびに Sarpkaya⁹⁾ は、一方向流中で円柱を流れと直角な方向に強制的に加振させる加振法実験を行い、作用揚力および抗力の換算流速 $V_r (=U/(f_c \cdot D))$ 、 f_c : 加振周波数) に対する変化特性を振動振幅比 Y_c/D (Y_c : 円柱の加振片幅振幅) をパラメーターとして調べた。その結果、揚力係数は、揚力方向の渦励振動の片幅振幅 Y が円柱径 D の 0.5 倍程度になるまでは、 Y の増加に伴い増加するが、その後は、 Y の増加に伴い減少することが明らかにされている。

本研究は、渦励振動の解明において重要な渦励振動時の円柱に作用する流体力の特性をより詳しく調べることを目的として、一様な流速分布を有する一方向流中に置かれた円柱の、作用揚力に対する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実験により調べたものであり、前報¹⁰⁾ では評価されなかった渦励振動時の円

柱全体 (全円柱) に作用する流体力の直接計測も行なった。また、得られた実験値に対する、流れと円柱振動との相互作用をも考慮した Silvio の渦励振動モデル式¹³⁾ の推定値精度についても検討した。

2. 実験装置および方法

実験には、還流装置付き 2 次元造波水槽 (長さ=40m、幅=0.8m、高さ=1m) を用いた。実験装置の概略を図-1 に示す。支柱に設けた 2 つの支点とフレームを吊す引っ張りバネを用いて水路横断方向に弾性的に水平設置された試験円柱 (外径 $D=3\text{cm}$ 、長さ=48cm) は、揚力方向となる鉛直方向にのみ振動可能であり自由振動する。試験円柱は端板 (長さ=33cm、幅=5cm、厚さ=1.5mm) を用いて支持枠に取り付けられている。円柱の振動変位量の計測は、引っ張りバネの伸縮量 (=円柱の振動変量) に比例する力をその上方で支持している板バネに貼られた歪みゲージを用いて電圧変換することにより行った。静止時からの円柱の鉛直方向 (Y 方向) の変位量を y とする。円柱の振動加速度 (d^2y/dt^2) を計測するために円柱と一体に振動する支持枠に加速度計を取り付けた。

フレームの一端に設置した 3 分力計を用いて、試験円柱全長 (全円柱) の単位長さ当たり作用する流れ方向 (X 方向) と揚力方向 (Y 方向) の流体力 DF_{xt} 、 DF_{yt} を計測した。また、試験円柱内に 2 分力計を組み込み、セグメント円柱部 (外径 $D=3\text{cm}$ 、長さ=3cm) の単位長さ当たり

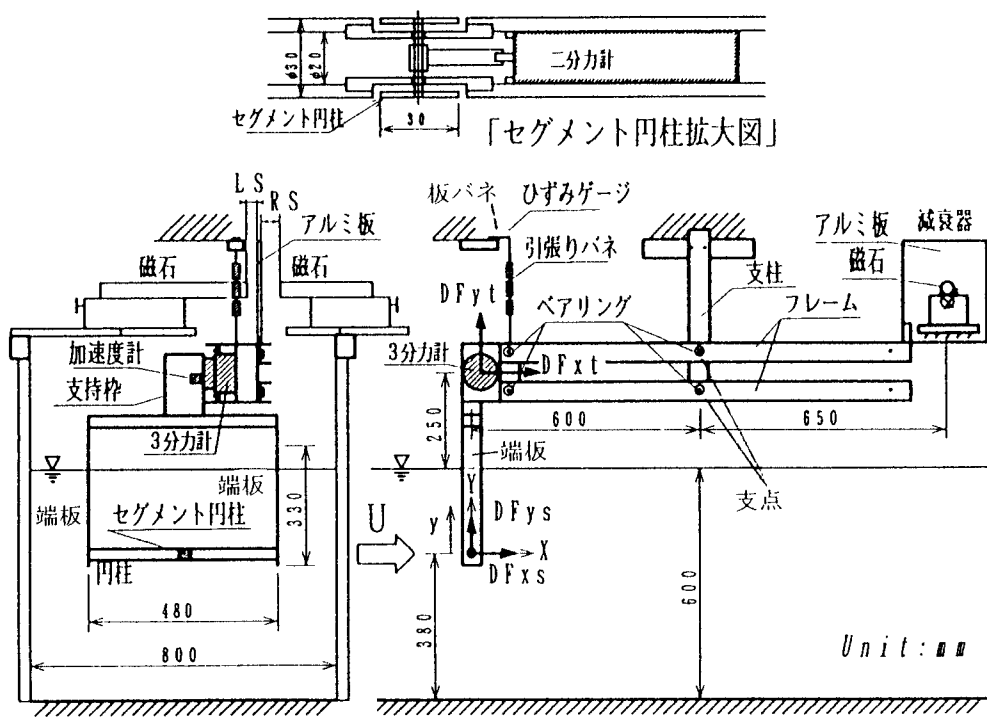


図-1 実験装置の概略

表-1 実験条件

Case	f_{na}	f_{nw}	h_{ta}	h_{tw}	K_{sa}	K_{sw}	$m_{ew}/(\rho D^2)$
V-1	0.826 (Hz)	0.790 (Hz)	0.006	0.011	0.90	1.70	12.4
V-2			0.006	0.011	0.90	1.70	
V-3			0.008	0.013	1.28	2.05	
V-4			0.012	0.016	1.80	2.50	
V-5			0.018	0.023	2.85	3.60	
V-6			0.025	0.031	3.95	4.70	
V-7			0.035	0.040	5.40	6.20	
V-8			0.044	0.049	6.85	7.60	
V-9			0.054	0.058	8.50	9.00	
S-1	静止円柱						

に作用する流れ方向と揚力方向の流体力DF_{xs}、DF_{ys}をも上記のDF_{xt}、DF_{yt}と同時に計測した。

フレームの他端に設けたアルミ板とそれを挟む棒磁石の間隔 RS、RLを変えて構造減衰定数hsを調整した。実験水深はd=60cmとした。静止時の円柱の位置は水路底部のより上方38cm(水表面下22cm)とした。

自由減衰振動実験を行い、試験円柱の空中と静水中における固有振動数f_{na}、f_{nw}と減衰定数hta、htwを評価した。減衰定数の算定には対数減衰法¹¹⁾を用いた。空中での減衰定数htaは構造減衰定数hsとほぼ等しい。バネ定数Kと静水中における固有振動数f_{nw}より、水中付加質量をも含む試験円柱の換算単位質量 m_{ew}(=K/(2πf_{nw})^{1/2})を算定し、質量比(m_{ew}/(ρD²))、ρ:水の密度)を求めた。

実験は自由振動法で行った。渦励振動量yおよび作用流体力の換算流速V_rに対する変化特性をScruton数²⁾と呼ばれているK_{sa}値(=2m_{ew}・2π・hta/(ρD²))をパラメーターとして調べた。実験条件を表-1に示す。表中には、htaの代わりに水中における減衰定数htwを用いたScruton数K_{sw}をも参考値として記入している。

主流速度Uの計測にはレーザー流速計を用いた。水路幅中央の円柱前方20cmで水表面下22cmの位置での時間平均流速を主流速度Uとした。水深方向に様な主流速度分布を作るために、円柱の前方1mの位置にハニカム製の整流装置を置いた。円柱設置位置より上・下10cm間における速度分布のUからのずれは6%以下であった。主流速度Uの乱れ強度は時間平均値Uの約5%であった。出力信号は50HzでAD変換し、サンプリング数は2048個とした。

3. 振動方程式

揚力方向(Y方向)にのみ振動量yで渦励振動している円柱の単位長さあたりに作用流体力をDF_yとすると、次式の振動方程式が得られる。

$$m_{ea} d^2 y / dt^2 + C_a dy / dt + Ky = DF_y \quad (1)$$

式中、yは円柱のY方向の振動量である。dy/dt および d²y/dt² は円柱の振動速度と振動加速度である。meaとC_aは空中における試験円柱の単位長さ当たりの換算質量(端板や支柱棒等の質量影響をも含む)と減衰係数であ

る。Kは換算バネ係数である。

DF_yは、フーリエ級数展開により(2)式のように三角関数の和で表せる。

$$DF_y = DF_{ys} \sin(2\pi f_y t) + DF_{yc} \cos(2\pi f_y t) \quad (2)$$

式中のDF_{ys}は、DF_yの円柱の振動変位y(y=Ysin(2πf_yt))、Y:円柱振動の片振幅、f_y:円柱の振動数)および振動加速度(-d²y/dt²)に比例する成分、DF_{yc}は振動速度dy/dtに比例する成分である。フーリエ解析を用いると、DF_{ys}とDF_{yc}は(3)式、(4)式で表される。

$$DF_{ys} = (2/T_m) \int_0^{T_m} DF_y \sin(2\pi f_y t) dt \quad (3)$$

$$DF_{yc} = (2/T_m) \int_0^{T_m} DF_y \cos(2\pi f_y t) dt \quad (4)$$

式中のT_mはサンプリング時間である。(3)式、(4)式を(1)式に代入すると(5)式が得られる。

$$\begin{aligned} & \left\{ -m_{ea} Y (2\pi f_y)^2 - DF_{ys} \right\} \sin(2\pi f_y t) \\ & + C_a Y (2\pi f_y) \cos(2\pi f_y t) + K \cdot Y \sin(2\pi f_y t) \\ & = DF_{yc} \cos(2\pi f_y t) \end{aligned} \quad (5)$$

sin項およびcos項の係数をそれぞれまとめると、円柱振動の片振幅Yは、(6)式、(7)式で表される。

$$Y = (DF_{ys} / K) / \left\{ 1 - (f_y / f_{na})^2 \right\} \quad (6)$$

$$Y = DF_{yc} / \left\{ C_a (2\pi f_y) \right\} \quad (7)$$

4. 結果および考察

(1) 渦励振動特性

渦励振動周波数の平均値f_yと、渦励振動変位yの平均片振幅Y_{mean}および最大片振幅Y_{max}をゼロアップクロス法を用いて算定した。

Y_{mean}/Dおよびf_y/f_{nw}の換算流速V_rに対する変化特性をK_{sa}値をパラメーターとして図-2に示す。図中の波線は、静止円柱時の後流渦の発生周波数fv(=St・U/D)と静水中の固有振動数f_{nw}の比である。また、図中には空気流中における円柱の渦励振動を調べたFeng¹²⁾の結果で得られた、Y_{mean}/Dの最大値AY_{mean}/Dとそれが生じるV_r値の関係を黒丸●で示す。以下のことが明らかである。

- どのK_{sa}値においても、V_r約5においてf_y/f_{nw}約1となっており、Looking-in現象が生じている。
- V_r=4.5を過ぎたあたりから渦励振動が始まり、V_r=6近傍で最大値AY_{mean}を示す。
- 最大値AY_{mean}/Dは、K_{sa}値の増加に伴い減少する。

図-2に示す各K_{sa}値でのY_{mean}およびY_{max}の最大値を

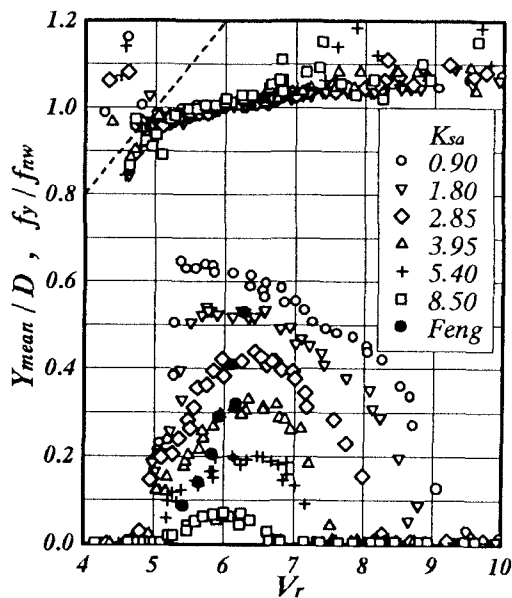


図-2 Y_{mean}/D および f_y/f_{nw} の V_r に対する変化特性

AY_{mean} 、 AY_{max} とする。最大値 $(AY_{max}/D)/\gamma$ の K_{sa} 値に対する変化特性を図-3に黒丸●で示す。 γ は円柱の振動モードによって異なるGeometric factor²⁾である。本試験円柱のように円柱が一体となって振動する振動モードの場合(剛円柱)は $\gamma=1.0$ であり、倒立円柱の場合は $\gamma=1.29$ である。Blevins²⁾がまとめた、水および空気を用いた一方向流中における $(AY_{max}/D)/\gamma$ の既往値を図-3に示す。既往値と本実験値との一致は良好である。

また、図中には、一方向流中における円柱の渦励振動に対するSilvioの渦励振動モデル式¹³⁾を用いた本実験値の推定値を×印で示す。振動変位 AY_{max} の増加に伴う揚力の増加現象を、本渦励振動モデル式では十分に評価できないため推定値は実験値より小さい。

(2) 渦励振動円柱に作用する流体力特性

セグメント円柱部の単位長さあたりに作用する流れ方向と揚力方向の力を DF_{xs} 、 DF_{ys} とする。また、円柱全体(全円柱)の単位長さあたりに作用する流れ方向と揚力方向の力を F_{xt} 、 F_{yt} とする。2分力計および3分力で計測されたこれら力の揚力方向の力成分 DF_{ys} 、 DF_{yt} には、揚力方向の流体力と各力計に作用する慣性力 Df_{is} (=セグメント円柱部の質量×円柱の振動加速度)、 Df_{it} (=全円柱部の質量×円柱の振動加速度)が含まれている。 DF_{ys} および DF_{yt} より DF_{is} および DF_{it} をそれぞれ差し引くと、揚力方向の流体力 DF_{ysg} (= $DF_{ys}-Df_{ys}$)と DF_{ytg} (= $DF_{yt}-Df_{it}$)がそれぞれ求まる。

セグメント円柱部および全円柱部の単位長さあたりに作用する流れ方向の流体力(DF_{xs} 、 DF_{xt})と流れと直角な方向の流体力(DF_{ysg} 、 DF_{ytg})に対して、下記の抗力係数および揚力係数をそれぞれ算定した。

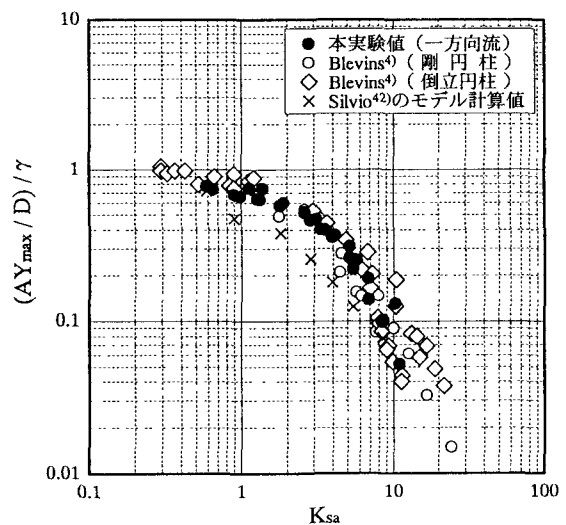


図-3 渦励振動量 AY_{max}/D の K_{sa} 値に対する変化特性

$$CD_{mean} = \text{抗力} (DF_{xs}, DF_{xt}) \text{ 時系列の平均値} / (1/2 \rho \cdot D \cdot U^2) \quad (8)$$

$$CL_{grms} = \text{揚力} (DF_{ysg}, DF_{ytg}) \text{ 時系列の標準偏差} / (1/2 \rho \cdot D \cdot U^2) \quad (9)$$

$$Cs = \text{揚力} (DF_{ysg}, DF_{ytg}) \text{ の振動変位 } y \text{ に比例する成分} / (1/2 \rho \cdot D \cdot U^2) \quad (10)$$

$$Cc = \text{揚力} (DF_{ysg}, DF_{ytg}) \text{ の振動速度 } dy/dt \text{ に比例する成分} / (1/2 \rho \cdot D \cdot U^2) \quad (11)$$

(10)、(11)式中の揚力(DF_{ysg} 、 DF_{ytg})の円柱の振動変位 y および振動速度 dy/dt に比例する成分は、振動変位 y と揚力 DF_{yag} のフーリエ解析をそれぞれ行い算定した((3)、(4)式参照)。振動変位に比例する揚力成分は、渦励振動時に生じる流体(水)による付加質量力となる((5)式の左辺第1項参照)。振動速度に比例する揚力成分は、振動強制外力として働く((5)式の右辺項参照)。

Case V の実験で得られたこれら揚力係数、抗力係数の、 V_r 値に対する変化特性の一例を K_{sa} 値をパラメーターとして図-4～図-7に示す。ただし、セグメント円柱の場合は $K_{sa}=0.9$ の場合のみである。図中には、比較のために、試験円柱を静止させた場合(静止円柱)の揚力係数 CL_{grms} と抗力係数 CD_{mean} の値を×印で記入している。

CL_{grms} は円柱の振動振幅 Y_{mean} の増加に伴い増加しているが、その最大値は Y_{mean} がピーク値を示す直前の V_r で生じている(図-2参照)。その後は、Locking-in現象が継続するために、円柱の振動振幅は大きな値を保ちながら緩やかに減流れ方向と揚力方向の力を少しているにも関わらず、 CL_{grms} は急激に減少している。一方、 CD_{mean} は振動変位 Y_{mean} の増減と同様な傾向を示している(図-2参照)。全円柱とセグメント円柱の抗力係数の差は、円柱後流渦の挙動に三次元性があるためと考えられる。 $K_{sa}=0.90$ の場合の渦励振動時の CL_{grms} と CD_{mean} は、静止円柱時に比べ、それぞれ最大50倍、2.5倍となっている。

C_s は、円柱の Y_{mean} が最大となる少し手前の V_r で最大値を示し、その後は V_r の増加に対し急激に小さくなっている。 C_d は、円柱の振動振幅が最大となる V_r 付近で最大となっている。 V_r に対するこれら流体力の非線形性は、流れと円柱振動との相互作用により円柱後流渦の挙動が複雑に変化するためと考えられる。

(3) 渦励振動円柱に作用する流体力の増加特性

各実験ケース (Case V シリーズ) における振動振幅 Y_{max} の最大値 AY_{max} が生じる換算流速 V_r での抗力係数 CD_{mean} を CD_v とする。これと同じ主流速度 U を有する流れに円柱を静止的に設置した場合 (静止円柱) の CD_{mean} を CD_s とする。

渦励振動時における抗力の増加率 CD_v/CD_s の振動振幅 AY_{max}/D に対する変化特性を図-8に示す。自由振動法および加振法を用いた渦励振動実験で得られた抗力の増加率をまとめたBarltropら¹⁴⁾の結果、および加振法によって抗力が最大となる $V_r=5$ 近傍での抗力の増加率を評価したTanidaら⁸⁾とSarpkaya⁴⁾の結果を既往値として示す。本実験結果とこれら既往値との一致は概ね良好であり、振動振幅の増加に伴い抗力は増加することがわかる。図中に示すSilvioの渦励振動モデル式¹³⁾による計算値は、円柱の振動振幅が小さい場合 ($AY_{max}/D < 0.2$) における抗力の増加現象を若干評価しているが、振動振幅が大きくなると振動振幅に関係なく一定となっている。これは、振動振幅が大きな場合にお

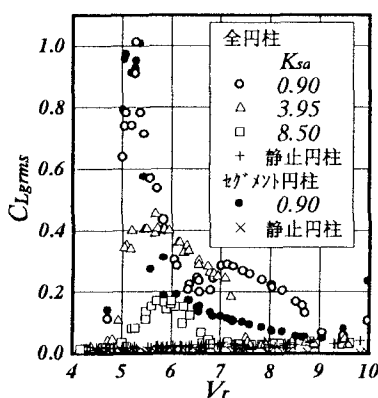


図-4 CL_{gmean} の V_r に対する変化

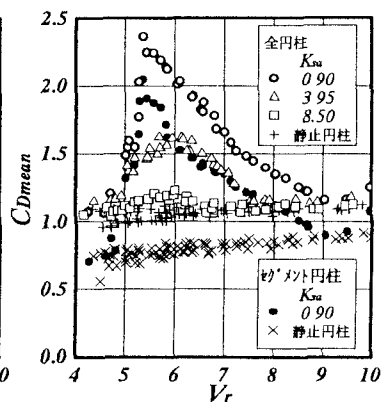


図-5 CD_{mean} の V_r に対する変化

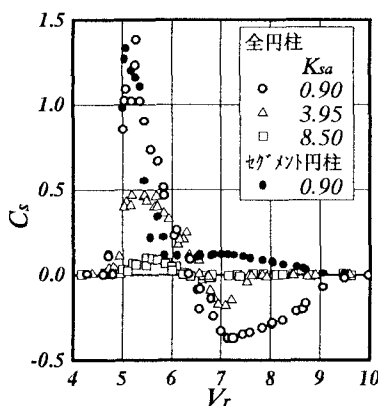


図-6 CL_s の V_r に対する変化

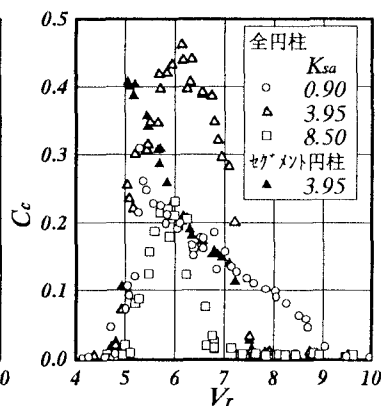


図-7 CD_c の V_r に対する変化

ける流れ円柱振動との相互作用による円柱後流渦強度や渦列幅の変化特性を、本モデル式では評価できないためと考えられる。

各実験ケースにおける振動振幅 Y_{max} の最大値 AY_{max} が生じる換算流速 V_r での揚力係数 C_c を C_{cv} とする。 C_{cv} と

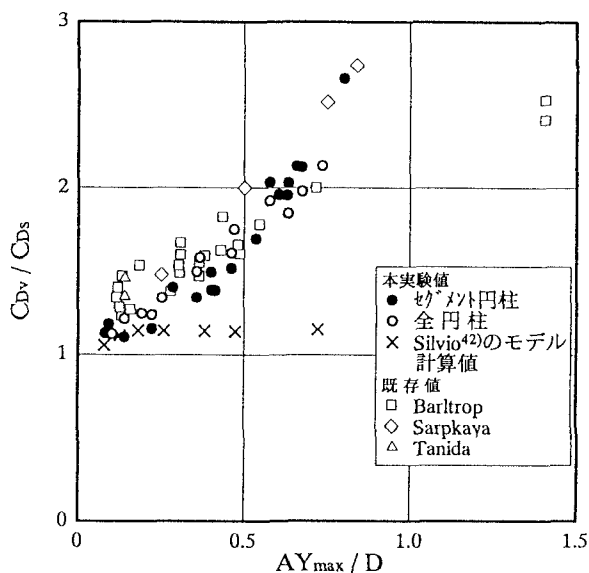


図-8 CD_v/CD_s の AY_{max}/D に対する変化特性

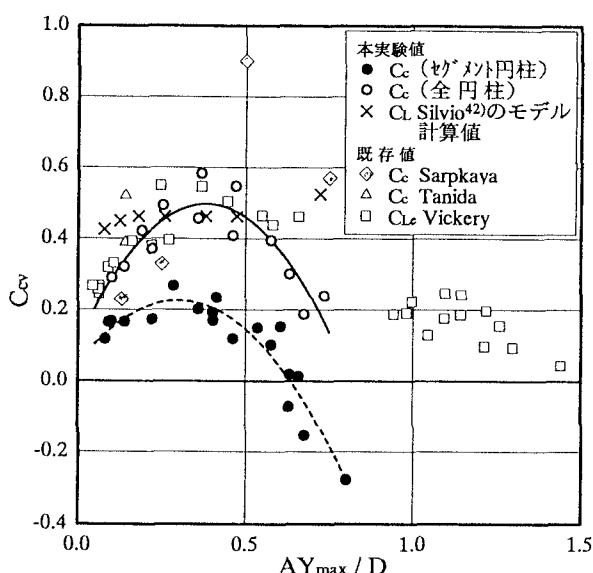


図-9 C_{cv} の AY_{max}/D に対する変化特性

$AY_{\max}/D$ の関係を図-9に示す。図中には、Tanidaら⁸⁾と Sarpkaya⁹⁾の加振法実験において直接計測された $V_r=5$ 近傍での C_c の最大値 C_{cv} と、線形化された振動方程式の解に振動片振幅と減衰定数 η を代入し評価された振動強制外力となる揚力の揚力係数 C_{le} (Vickery⁴⁾ら)を既往値として示す。本自由振動実験で得られた全円柱の C_{cv} は、既往のこれら C_{cv} および C_{le} と概ね一致している。

渦励振動時のこれら揚力係数は $0 < AY_{\max}/D < 0.4 \sim 0.5$ では $AY_{\max}/D$ の増加に伴い増加している。これは、流れと円柱振動との相互作用により後流渦の発生強度および後流渦挙動の円柱軸方向の相関性が増加したためと考えられる。一方、これら C_{cv} および C_{le} は、 $0.4 \sim 0.5 < AY_{\max}/D$ では $AY_{\max}/D$ の増加に伴い減少している。これは、円柱の振動が大きくなると後流渦の組織性が壊れるためと考えられる²⁾。

本実験で得られたセグメント円柱の C_{cv} は、本実験で得られた全円柱および既往値の C_{cv} と同様な $AY_{\max}/D$ に対する変化特性を示している。しかし、その値は全般に小さい。図中に×印で示すSilvioの渦励振動モデル¹³⁾の計算値 CL は、抗力 CD_v の場合と同様に円柱の振動振幅が小さい領域($AY_{\max}/D < 0.2$)では振動量の増加に伴う揚力の増加現象を評価しているが、振動振幅が大きくなると揚力が減少する特性を評価できない。

5. おわりに

一方向流中に弾性的に水平設置された剛円柱の作用揚力に対する渦励振動特性と、渦励振動時の作用流体力の変化特性を自由振動法の実験により調べた。主要な結果について以下に記す。

- 1) 渦励振動振幅の最大値は、流れと振動円柱との相互作用によるLocking-in現象が生じる結果、静止的に設置した同円柱(静止円柱)からの後流渦の発生周波数 $f_v (=St \cdot U/D, St:Strohal数)$ と円柱の静水中における固有振動数 f_{nw} が等しくなる換算流速 $V_r=5$ (但し $St=0.2$)では生じず $5 < V_r < 6.5$ の範囲で生じることを確認した。
- 2) 水中における円柱の渦励振動振幅とそれが生じる V_r 値は、Scruton数 K_{sa} で規定されることを確認した。
- 3) 渦励振動円柱に作用する抗力は、渦励振動振幅の増加に伴い増加することを自由振動法実験における抗力の直接計測によりを確認した。その増加率と渦励振動量との関係は、既往の結果と概ね一致した。
- 4) 渦励振動円柱に作用する揚力は、円柱の振動振幅が最大となる換算流速 V_r の少し手前で最大値を示すが、その後はLocking-in現象により大きな振動が生じているにも関わらず急激に小さくなることを、自由振動法実

験における抗力の直接計測によりを確認した。

- 5) 渦励振動円柱に作用する揚力の振動強制外力となる成分は、振動片振幅が円柱径の $0.4 \sim 0.5$ 倍となるまでは、振動量の増加に伴い増加するが、その後は振動量の増加に伴い減少することを自由振動法実験における揚力の直接計測によりを確認した。その増加率と渦励振動量との関係は、既往の結果と概ね一致した。
- 6) Silvioの振動モデル式は、渦励振動量が小さい場合における作用揚力と抗力の増加特性を評価できるが、渦励振動量が大きく なった場合に生ずる抗力の増加や揚力の減少特性を評価できない。

参考文献

- 1) 岡内 功, 伊藤 学, 宮田利雄: 耐風構造, 丸善, 1977.
- 2) Blevins, R.D.: Flow-induced Vibration, Van Nostrand Reinhold, 1977.
- 3) Bearman, P.W.: Vortex Shedding from Oscillating Bluff Bodies, Ann. Rev. Fluid Mechanics, Vol.16, 1984.
- 4) Vickery, B.J. and Watkins, R.D.: Flow-induced Vibrations of Cylindrical Structures, Proceedings of the First Australian Conference, 1962.
- 5) King, R.: A review of Vortex Shedding Research and its Application, Ocean Engng., Vol.4, Pergamon Press, 1977.
- 6) Griffin, O.M. and Kopmann, G.H.: The Vortex-excited Lift and Reaction Forces on Resonantly Vibrating Cylinder, Journal of Sound and Vibration, 54(3), 1977.
- 7) 田中博喜, 高原茂: 振動円柱の非定常空気力に関する研究, 三菱重工技報, 7-2, 1970.
- 8) Tanida, Y., Okajima, A. and Watanabe, Y.: Stability of a Circular Cylinder Oscillating in Uniform Flow or in a Wake, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 61, Part 4, 1973.
- 9) Sarpkaya, T.: Fluid Forces on Oscillating Cylinders, Journal of the Waterways Port, Coastal and Ocean Division, ASCE 104, 1978.
- 10) 林建二郎, 田中克也, 藤間功司, 重村利幸: 開水路中で渦励振動している円柱に作用する流体力, 水工学論文集, 第41巻, 1997.
- 11) 林建二郎: 水中における円柱に作用する流体減衰力について 第11回海洋開発シンポジウム論文集, 1986.
- 12) Feng, C.C.: The Measurement of Vortex-induced Effects in Flow Past Stationary and Oscillating Circular and D-section Cylinders, MSc Thesis, Univ. of Br. Columbia, Vancouver, 1968.
- 13) Silvio, G. D.: Self-Controlled Vibration of Cylinder in Fluid Stream, Journal of Engineering Division, Proceeding of ASCE, EM2, April, 1969.
- 14) Barltrop, N.D.P. and Adams A. J.: Dynamics of Fixed Marine Structures Third Edition, Butterworth Heinemann, 1991.

(1998. 9. 30受付)