

開水路中で渦励振動している円柱に作用する流体力

Fluid Forces Acting on a Vortex-Excited Vibrating Circular Cylinder in Open Channel

林建二郎^{*}・田中克也^{**}・藤間功司^{***}・重村利幸^{****}

By Kenjirou HAYASHI^{*}, Katuya TANAKA^{**}, Kouji FUJIMA^{***} and Toshiyuki SHIGEMURA^{****}

Drag and lift forces acting on a vortex-excited vibrating circular cylinder in steady flow were measured by using a load cell installed in the test cylinder elastically mounted in the open channel. The variation of the amplifications of these forces in comparison with the forces acting on the stationary mounted cylinder for Reduced velocity and amplitude of cylinder transverse vibration were evaluated quantitatively.

Keywords: Vortex-induced Vibration, Lift force, Drag force, Open Channel

1. はじめに

一方向流中に置かれた静止円柱には、主流方向に作用する抗力 FD とその直角方向に作用する揚力 FL が作用する。時間変動する揚力の卓越周波数 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波波数 f_v ($f_v = StU/D$; St : Strouhal数、 U : 主流速度、 D : 円柱径)と同じである。抗力の時間変動成分(変動力)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⁾。これら変動流体力の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現象を伴う非線形流体力による自励振動の一種である¹⁾。一般的には揚力に対する渦励振動が支配的であり、河川や潮流の卓越する海域に設置される水中構造物や耐風構造物の設計においては十分に検討する必要がある。

一方向流中に設置さ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自由振動法実験を行うと、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 に極近い周波数で顕著な振動をする。後流渦の発生は柱の振動運動に引き込まれる。その結果、その流速範囲では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 ($\approx f_n$)とほとんど同じである。従って、渦の発生周波数 f_v は、主流速度 U の変化にもかかわらず一定の値($f_v \approx f_n$)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現象が生じる換算

^{*} 正 会 員 Ph. D. 防衛大学校 土木工学教室 助教授 (〒横須賀市走水1-10-20)

^{**} 学生会員 防衛大学校 土木工学教室 研究科学生 (同上)

^{***} 正 会 員 工博 防衛大学校 土木工学教室 助教授 (同上)

^{****} 正 会 員 Dr. Eng. 防衛大学校 土木工学教室 教授 (同上)

流速 $V_r (=U/(f_n \cdot D))$ の範囲は、主流速度 U に比例する円柱静止時の渦の発生周波数 f_v と円柱の固有振動数 f_n が一致する換算流速 $V_r=5$ 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および共振領域の拡大は、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 は円柱静止時より一般に増加する²⁾。

渦励振動量の評価においては、作用流体力の的確な評価が減衰係数の評価と共に重要である。Vicheryら⁴⁾や、King⁵⁾、ならびにGriffinら⁶⁾は、自由振動法実験において一方向流中に弾性的に設置された渦励振動円柱に作用する揚力の評価を行った。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。

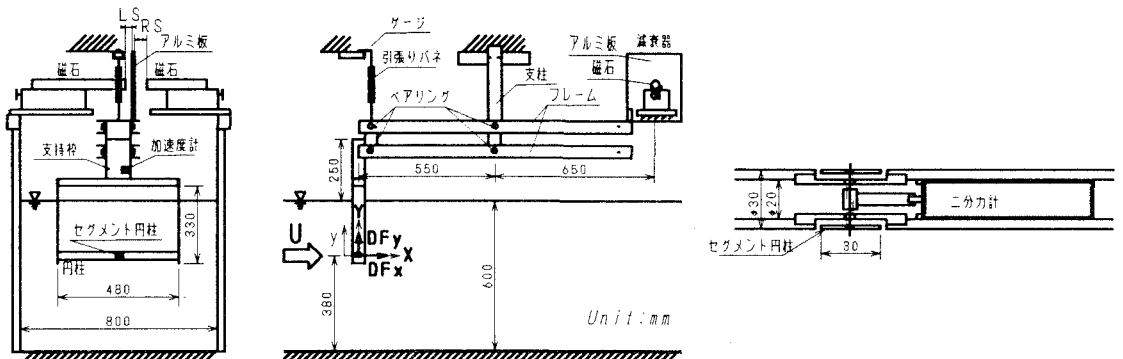
田中⁷⁾ら、Tanidaら⁸⁾、ならびにSarpkaya⁹⁾は、一方向流中で円柱を流れと直角な方向に強制的に加振させる加振法実験を行い、作用揚力および抗力の換算流速 $V_r (=U/(f_c \cdot D))$ (f_c : 加振周波数)に対する変化特性を振動振幅比 Y_c/D (Y_c : 円柱の加振片幅振幅)をパラメーターとして調べた。円柱の振動変位に比例する揚力成分は $V_r=5$ 近傍で急激に変化すること、円柱の振動速度に比例する揚力成分の $V_r=5$ 近傍での値は振動振幅 Y_c/D によって大きく変化すること、ならびに Y_c/D の増加に伴い抗力は増加すること等が明らかにされている。

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、一方向流が生じている開水路中に水平設置さ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により調べたものである。

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。主流速度 U の調整は、水槽下部の還流用インペラの駆動電動機のインバーター周波数の変えることにより容易に可能である。実験装置の概略を図-1に示す。支柱と引っ張りバネを用いて水路横断方向に水平設置された試験円柱(外径 $D=3$ 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る。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。円柱の振動量を計測するために、引っ張りバネの伸縮量に比例する力を歪みゲージを用いて電圧変換した。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ている。円柱に作用する流体力の直接計測を行うために円柱内に2分力計を組み込み、セグメント円柱(外径 $D=3$ cm、長さ=3cm)の単位長さ当たりに作用する流れ方向(X 方向)および揚力方向(Y 方向)の流体力 DF_x 、 DF_y を計測した。円柱の構造減衰定数 δ を調整するために、フレームの他端にはアルミ板と棒磁石より構成される減衰器を取り付けている。アルミ板と棒磁石の間隔 LS 、 RS を変えることにより δ の調整が可能である。

実験水深は $d=60$ cmとした。静止時の試験円柱の位置は水路底部の上方より38cm(水面下22cm)とした。



- 1 実験装置の概略

表－１ 実験条件

CASE	磁石間隔(mm)		流速増減(増減幅)	換算流速 V_r	固有振動数(Hz)		減衰定数		質量減衰パラメーター	
	LS	RS			f_{nw}	f_{nw}	ζ_{ta}	ζ_{tw}	K_s	K_{sw}
1-A	∞	∞	増加 (0.40cm/s)	3~10	0.904	0.870	0.0043	0.0100	0.59	1.38
1-B	∞	∞	増加 (0.17cm/s)	3~10	0.904	0.870	0.0043	0.0100	0.59	1.38
1-C	∞	∞	減少 (0.40cm/s)	3~10	0.904	0.870	0.0043	0.0100	0.59	1.38
2	1	20	増加 (0.47cm/s)	4.1~9.2	0.904	0.870	0.0138	0.0188	1.90	2.60
3	1	10	増加 (0.40cm/s)	3.8~9.9	0.904	0.870	0.0190	0.0232	2.62	3.20
4	∞	1	増加 (0.39cm/s)	4.7~9.3	0.904	0.870	0.0258	0.0325	3.56	4.49
5	1	∞	増加 (0.41cm/s)	4.8~9.2	0.904	0.870	0.0371	0.0416	5.12	5.74
6	1	1	増加 (0.43cm/s)	4.5~9.5	0.904	0.870	0.0741	0.0756	10.23	10.43
7	静止円柱			3~10						

質量比 $m_{ew}/(\rho D^2)=11.0$

実験に先立ち、空中と静水中で自由減衰振動実験を行い、試験円柱の空中および静水中における固有振動数 f_{na} 、 f_{nw} と減衰定数 ζ_{ta} 、 ζ_{tw} をそれぞれ評価した。減衰定数の算定には対数減衰法¹⁰⁾を用いた。検定されたバネ定数 k と水中固有振動数 f_{na} 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} を算定した。質量比 ($m_{ew}/(\rho D^2)$ 、 ρ ：水の密度)は11.0である。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で水面下22cmの位置における時間平均流速を代表主流速度 U とした。

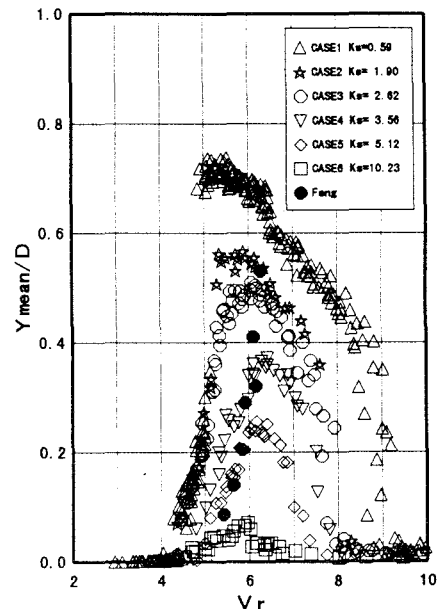
実験は自由振動法で行った。流れと直角な方向にのみ振動するようにバネを用いて弾性支持された剛円柱の渦励振動量 y および作用流体力 DF_x 、 DF_y の主流速度 U に対する変化特性を質量減衰パラメーターである K_s 値 ($=2m_{ew}(2\pi\zeta_{ta})/(\rho D^2)$)をパラメーターとして調べた。 K_s 値は渦励振動特性の重要な支配パラメーターであり、Reduced-dampingまたはScruton数と呼ばれている^{23,11)}。実験条件を表－１に示す。CASE 1は、 K_s 値 ($=0.59$)が小さく大きな渦励振動振幅が生じている場合である。CASE 2, 3, 4, 5, 6は、 ζ_{ta} を少しずつ増加させ K_s 値を上げた場合である。CASE 1においては、主流速度 U を小刻みに増加および減少させ渦励振動振幅の履歴効果を調べた。CASE 7においては、比較のために静的に設置した同試験円柱(静止円柱)のセグメント部分に作用する流体力 DF_x 、 DF_y を計測した。表－１には、空中の減衰定数 ζ_{ta} の代わりに水中の減衰定数 ζ_{tw} を用いた質量減衰パラメーター K_{sw} を参考値として記入している。円柱の振動変位 y 、振動加速度 d^2y/dt^2 、流体力 DF_x 、 DF_y ならびに主流速度 U の出力信号は50HzでAD変換した。サンプリング数は2000個とした。

3. 実験結果および考察

3.3 渦励振動特性

渦励振動変位 y の平均片幅振幅 Y_{mean} をゼロアップクロス法を用いて算定した。 Y_{mean}/D の換算流速 $V_r (=U/(f_{nw} \cdot D))$ に対する変化特性を K_s 値をパラメーターとして図－２に示す。どのケースにおいても $V_r=4$ を過ぎたあたりから渦励振動が始まっている。 Y_{mean}/D の最大値は、同円柱静止時の後流渦の発生周波数 $f_v (=St_c \cdot U/D$ 、Strouhal周波数)と振動時の円柱固有振動数 f_{nw} が等しくなる $V_r=5$ (但し $St_c=0.2$)ではなく $5 < V_r < 6.3$ の領域で生じている。 Y_{mean}/D の最大値は、 K_s 値の増加に伴い減少する。渦励振動がはっきりと認められる V_r の上限値は、 K_s 値の減少に伴い大きくなっている。 Y_{mean}/D の最大値が0.5以下の場合には、 $5.7 < V_r < 6.2$ の領域で生じているが、その値が0.5以上と大きくなると $5 < V_r < 5.8$ の領域で生じている。

空気流中における剛円柱の渦励振動を調べたFeng¹²⁾の結果における Y_{mean}/D の最大値と、それが生じる V_r 値の関係を図－２中に黒丸●で示す。 Y_{mean}/D の最大値が増加するに従い、それが生じる V_r 値は増加している。 Y_{mean}/D の最大値が0.4の場合には、それは水流を用

図－２ 渦励振動振幅 Y_{mean}/D と V_r の関係

いた本実験結果合と同様に $V_r=6$ 付近で生じている。

空気流中における剛円柱の渦励振動においては、振動振幅 Y_{mean}/D の最大値が約0.3以上になると、換算流速 V_r の増加時と減少時では振動振幅が異なる履歴現象の出現が報告されている^{14),15)}。しかし、水流を用いた本実験結果においては、大きな振動振幅が生じているにも関わらず履歴現象は認められない。

各実験ケースにおける渦励振動振幅 Y_{max} の最大値を AY_{max} とする。 $(AY_{\text{max}}/D)/\gamma$ の K_s 値に対する変化特性を図-3に示す。 γ は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 $\gamma=1.0$ 、倒立円柱の場合は $\gamma=1.29$ である。Blevins²⁾によってまとめられた水流および空気流を用いた一方向流中における $(AY_{\text{max}}/D)/\gamma$ の既存値を図-3中に記入している。既存値と本実験値との一致は良好であり、 K_s 値は渦励振動振幅を規定する重要なパラメーターであることが分かる。

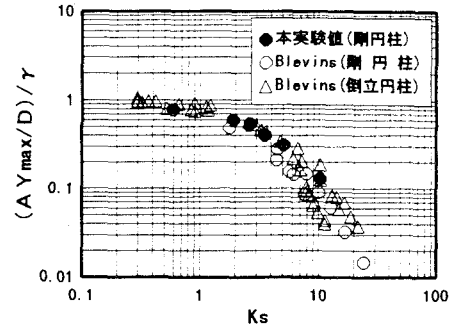


図-3 渦励振動振幅 AY_{max} の K_s 値に対する変化

3.4 渦励振動円柱に作用する流体力特性

2分力計で計測されたセグメント円柱部の単位長さ当たりに作用する流れ方向とその直角な方向に作用する力を DF_x 、 DF_y とする。円柱は揚力方向にのみ振動している。従って、 DF_y には揚力方向の流体力 DF_{yag} とセグメント円柱部に作用する質量力 DF_{ia} (=セグメント円柱部等の質量×円柱の振動加速度)が含まれている。 DF_y よりこの DF_{ia} を差し引いた DF_{yag} ($=DF_y-DF_{ia}$)を正味の揚力方向の流体力とする。 DF_{yag} の特性をより詳しく調べるために、円柱の振動変位 y と揚力 DF_{yag} のフーリエ解析を行い、 DF_{yag} の振動変位比例成分および振動速度比例成分をそれぞれ算定した。下記の抗力係数および揚力係数をそれぞれ算定した。

$$CD_{\text{max}} = DF_x \text{の最大値} / (1/2 \rho \cdot D \cdot U^2) \quad \text{---(1)}$$

$$CD_{\text{mean}} = DF_x \text{の時間平均値} / (1/2 \rho \cdot D \cdot U^2) \quad \text{---(2)}$$

$$CD_{\text{rms}} = DF_x \text{の実効値} / (1/2 \rho \cdot D \cdot U^2) \quad \text{---(3)}$$

$$CL_{\text{gmax}} = DF_{yag} \text{の片幅振幅の最大値} / (1/2 \rho \cdot D \cdot U^2) \quad \text{---(4)}$$

$$CL_{\text{grms}} = DF_{yag} \text{の片幅振幅の実効値} / (1/2 \rho \cdot D \cdot U^2) \quad \text{---(5)}$$

$$CL_{\text{mh}} = DF_{yag} \text{の振動変位比例成分} / (1/2 \rho \cdot D \cdot U^2) \quad \text{---(6)}$$

$$CL_{\text{dh}} = DF_{yag} \text{の振動速度比例成分} / (1/2 \rho \cdot D \cdot U^2) \quad \text{---(7)}$$

CASE1, 3, 6におけるこれら各係数の換算流速 V_r に対する変化特性を、円柱の振動振幅 Y_{max}/D 、 Y_{mean}/D 、 Y_{rms}/D と振動周波数比 f_y/f_{nv} の V_r に対する変化と併せて図-4のa), b), c)にそれぞれ示す。 Y_{rms} は振動変位 y の実効値である。 f_y は振動変位 y の平均周波数である。抗力の大きさを示す CD_{max} 、 CD_{mean} 、およびその変動成分の大きさを示す CD_{rms} は振動振幅の増加に伴い増加している。 CL_{gmax} および CL_{grms} も振動振幅の増加に伴い増加しているがその最大値は円柱の振動振幅がピーク値を示す直前の V_r 値で生じている。しかし、 $6 < V_r$ のLocking-in領域においては、大きな円柱振動が生じているにもかかわらず CL_{gmax} および CL_{grms} は共に小さくなっている。 CL_{mh} は、円柱の振動振幅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 の増加に対しては急激に小さくなっている。 CL_{dh} は、円柱振動振幅が最大となる V_r 付近で最大となっている。

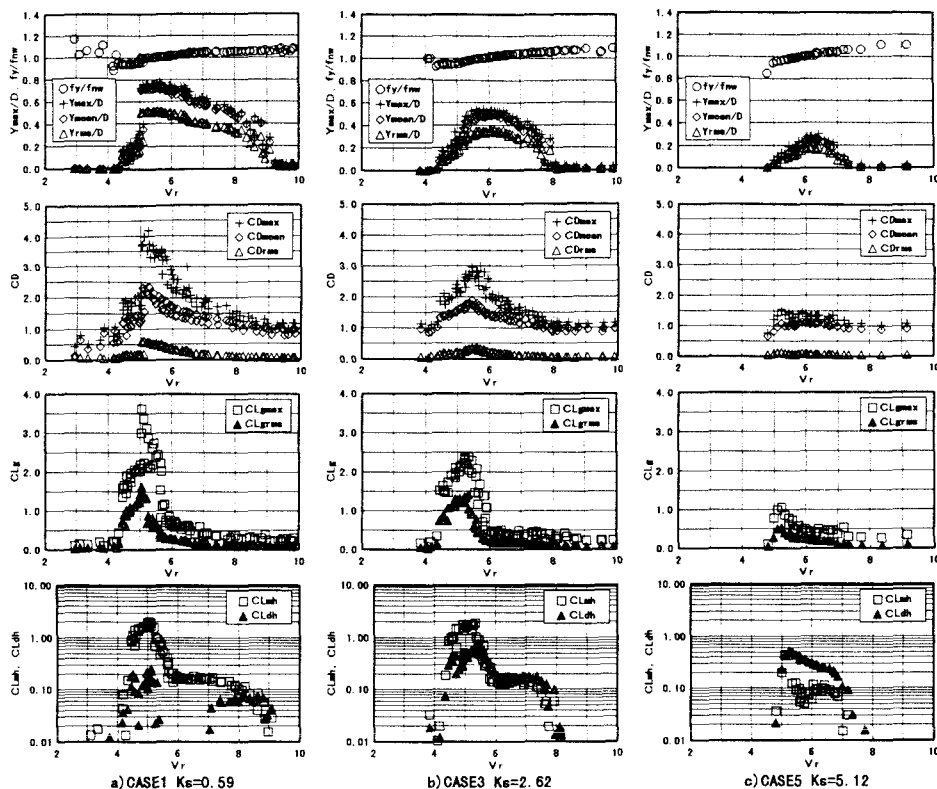


図-4 渦励振動振幅と作用流体力の V_r 値に対する変化特性

3.5 渦励振動円柱に作用する流体力の増加特性

各実験ケースにおける振動振幅 Y_{max} が最大値(AY_{max})となる V_r 値での CD_{max} 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させて設置した場合の CD_{max} を CD_s とする。

抗力の増加率 CD_v/CD_s の AY_{max}/D に対する変化特性を図-5に示す。自由振動法および加振法の実験で得られ抗力の増加率をまとめたBarltropら¹³⁾の結果、および抗力が最も大きくなる $V_r=5$ 近傍での抗力の増加率を評価したTanidaら⁸⁾とSarpkaya⁹⁾の加振法によって得られた結果を既存値として示す。

本実験結果とこれら既存値との一致は、 $Y_{max}/D < 0.4$ で良好である。0.5 $< Y_{max}/D$ の領域においては、本実験結果はSarpkaya⁹⁾の結果と良く一致している。渦励振動している円柱に作用する抗力は、振動振幅の増加に伴い増加することがわかる。

図-4の CL_{sh} と CL_{dh} で示されるように、渦励振動円柱に作用する揚力には円柱の振動変位と振動速度に比例する成分がある。揚力の振動変位比例成分は振動時の付加質量に寄与する。振動速度比例成分は流体減衰力と関係する値であり、共振時には振動強制外力に寄与する⁹⁾。各実験ケースにおいて AY_{max} が生じる V_r 値での CL_{dh} と AY_{max}/D の関係を図-6に★印で示す。図中には、Tanidaら⁸⁾とSarpkaya⁹⁾の加振法実験において得られた、 $V_r=5$ 近傍で生じる CL_{dh} の最大値を既存値として示す。

図中の●印は、本試験円柱に関する線形化された振動方程式の解に共振時の振動振幅 AY_{max} と減衰定数 ζ_a

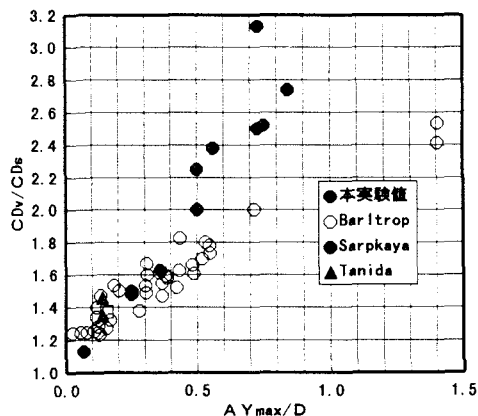


図-5 渦励振動時における抗力の増加

を代入して求めた評価された振動強制外力の揚力係数 CL_e である。一方向流中に片持梁形式で弾性的に設置された円柱を用いてVickery⁴⁾らの自由振動法実験において同様に推定された CL_e を既存値として示す。本実験で得られた CL_e 値と既存値 CL_e との一致は概ね良好である。 $0 < AY_{max}/D < 0.4 \sim 0.5$ の範囲では、 AY_{max}/D の増加に伴い CL_e は増加している。一方、 $0.4 \sim 0.5 < AY_{max}/D$ の範囲では、 AY_{max}/D の増加に伴い CL_e は減少している。本実験（自由振動法実験）で得られた CL_{dh} は、Tanida⁸⁾やSarpkaya⁹⁾の加振法実験で得られた CL_{dh} より若干小さいが、 Y_{max}/D に対する変化傾向は上記の CL_e と概ね一致している。

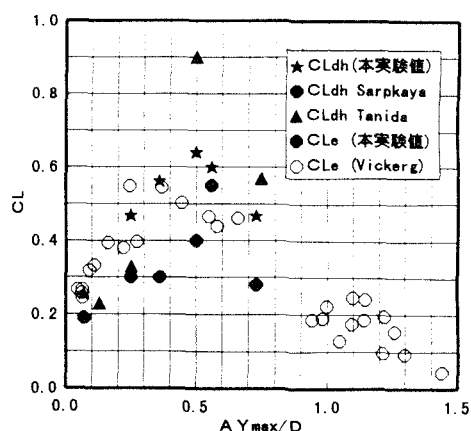


図-6 揚力の振動強制外力成分の変化

4. おわりに

開水路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特性

を自由振動法により調べた。渦励振動時の円柱に作用する抗力の増加率は、振動振幅の増加に伴い大きくなることを確認した。振動振幅が大きな場合（ $0.4 < AY_{max}/D$ ）、抗力の増加率は、加振法によるSarpkayaの結果と良く一致した。渦励振動円柱に作用する正味の揚力 DF_{yag} は、円柱の振動変位が最大となる少し手前の V_r 値で最大を示すが、 $6 < V_r$ のLocking-in領域では大きな振動が生じているにも関わらず急激に減少することを確認した。揚力の振動強制外力成分は円柱の振動振幅 $AY_{max}/D=0.4 \sim 0.5$ の範囲で最大値を示すことを確認した。

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 R.D. Watkins: Flow-induced Vibrations of Cylindrical Structures, Proceedings of the First Australian Conference, held at the University of Western Australia, (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 G. H. Koopmann: 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., A. Okajima, and Y. Watanabe: 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: 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).
- (11)林建二郎, J.R. Chaplin: 波動場における直円柱の渦励振動について, 第32回海岸工学講論集, (1985).
- (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)Bartrop, N.D.P. and A.J. Adams: Dynamics of Fixed Marine Structures Third Edition, Butterworth Heinemann, (1991).