

波動場で渦励振動している直円柱に作用する揚力評価について

林 建二郎*・J. R. Chaplin**

1. 緒 言

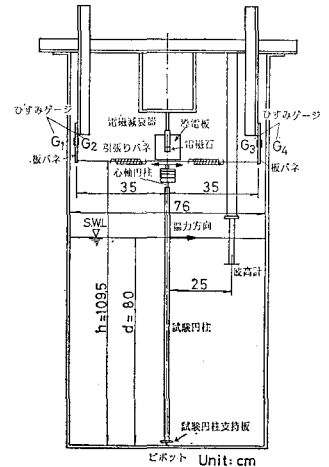
海洋開発に対する需要の増加に伴ない開発方法は多様化すると同時に、深海部における開発の必要性も生じて来ている。各種柱状海洋構造物の固有周期は、通常水深が深くなる程長くなり作用波力の周期に近づいてくる。その結果、作用波力（進向波力、揚力）に対する構造物の動的応答が問題となってくる。a) 作用波力の周期と構造物の固有周期とが一致する共振周期および、b) 共振時における構造物の応答振動量の予測は、工学的に重要な課題である。波動場に設置された柱状構造物の基礎的な動的問題を調べた研究成果はかなり報告されているが（例えば 1)~3)), しかし、まだ十分にその動的応答特性は把握されていないようである。そこで、筆者等も波動場における柱状構造物の揚力に対する動的応答（渦励振動）特性に関する研究を行ってきた。前報⁴⁾においては、a) 造波水槽床部を支点としてロッキング振動するように弾性的に設置された直円柱の渦励振動に対する線型化された振動方程式を導出し、その解より波動場における渦励振動を支配する主要パラメーターを明らかにし、b) 主要パラメーターの 1 つである周波数比 f_w/f_{nw} (f_w : 作用波周波数, f_{nw} : 円柱の水中固有振動数) の変化に対する渦励振動特性を詳しく調べた結果を報告した。

本論文は、前報と同様に波動場に弾性的に設置された直円柱の共振時における渦励振動特性について報告するものである。研究の主目的は、a) 共振振動量と、その支配パラメーター（Keulegan-Carpenter 数, Reduced-Camping 数, 減衰定数）との定量的な関係を明らかにすること、b) 共振時の円柱に作用する揚力の評価（同じ円柱が振動してない場合（静止円柱）に作用する揚力との増減比較）に置かれている。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

実験は、長さ 18 m, 幅 0.75 m, 高さ 1 m の両面ガラス張り二次元造波水槽を用いて行なった。使用した円柱体は前報と同様のものでありその概略を 図一1 に示す。試験円柱（径 $D=19.05$ mm, ステンレス管製）の上下両端は、径 10 mm のアルミ製心軸円柱とフランジを用いて接続されている。従って試験円柱体の剛性は剛体と見なせる程十分大である。心軸円柱の両端は水路方向に対して直角な両方向にそれぞれ引張りバネを用いて弾性的に接続されている。その下端は試験円柱支持板（ $200 \times 50 \times 6$ mm）に接続されている。長軸が水路方向と平行になるように設置された試験円柱支持板の水路方向両端はピボットの造波水槽床部に置かれている。従って円柱体は水路方向に対して直角な方向（揚力方向）のみにロッキング振動する。揚力方向への弾性（復元力）を試験円柱体に与えている 1 対の引張りバネはそれぞれステンレス製の板バネ（ $100 \times 10 \times 3$ mm）で支持されている（板バネの弾性係数 $\gg$ 引張りバネの弾性係数）。板バネの下端に作用するバネの伸張力（=円柱体の振動量と比例する）による曲がモーメントを測定するために板バネの表裏にはひずみゲージ（G1~G4）が貼られている。円柱体の質量を調整するために、心軸円柱上部には荷重円盤が取り付けられている。円柱体の減衰定数を調整するために、心軸円柱上端には電磁減衰器が設けられている。円柱体の固有振動数は、円柱体の質量および引張りバネ定数を変化さすことにより調整可能である。バネ定数が十分高い引張りバネを用いた場合には、円柱体の揚力方向振動は抑制され静止円柱として取り扱える。



図一1 試験円柱体の概略

* 正会員 Ph.D. 防衛大学校講師 土木工学教室

** Ph.D. Applied Fluid Mechanical Division
British Maritime Technology
(National Maritime Institute)
Professor, Department of Civil Engineering,
The City University, London.

2.2 共振時における振動方程式の線型解

本実験で使用された円柱体の波動場における渦励振動方程式の線型解が前報⁴⁾で導出されている。その結果、揚力の n 次調和周波数と円柱体の固有振動数が一致する共振時 ($f_w/f_{nw}=1/n$, $n=1, 2, 3, \dots$) での静水面位置における円柱体の半振幅値 Y_h は次式で与えられる。

$$\frac{Y_h}{D} = \frac{C_{Le}(n) \cdot 3F_s(kd) \cdot SKC^2 \cdot (f_w/f_{nw})^2}{4\pi \cdot 2m_e(2\pi\zeta_t/\rho D^2)} \dots (1)$$

式中

$C_{Le}(n)$ =換算揚力係数の n 次調和周波数成分

$F_s(kd)$ =水平波水粒子速度の最大値の2乗値の水深方向分布特性を示す指数

$kd=2\pi d/L$, L =波長, d =水深

SKC =静水面位置における Keulegan-Carpenter 数

m_e =円柱体の換算単位質量

ζ_t =減衰定数, ρ =水の密度

$m_e/\rho D^2$ =Mass Ratio

$2m_e \cdot (2\pi\zeta_t/\rho D^2)$ =Reduced Damping

(註: 上記記号の詳細は前報⁴⁾参照)

式(1)は、共振時での円柱体の半振幅値の無次元値 (Y_{hm}/D) は以下のパラメーターで支配されていることを示している。

$$[kd, SKC, f_w/f_{nw}=1/n, C_{Le}(n), 2m_e \cdot (2\pi\zeta_t/\rho D^2)]$$

2.3 実験条件および方法

本実験で行なった実験条件を表-1に示す。実験を通して、実験水深 d は 80 cm, Mass Ratio ($m_e/\rho D^2$) は 15.7 にそれぞれ固定されている。Case A, AB, AC の各シリーズにおける引張りバネ定数は一定値に固定されている。したがって、これら各シリーズにおける円柱体の固有振動数は空中で $f_{na}=1.52$ Hz, 静水中 ($d=80$ cm) で $f_{nw}=1.46$ Hz である。

1) Case A-3, 5, 9 は、揚力の2次, 3次, 4次の各調和周波数成分と円柱体がそれぞれ共振している場合 ($f_w/f_{nw} \doteq 1/2, 1/3, 1/4$) の渦励振動特性と SKC 数との関係

を調べたものである。

2) Case AB-4, 5 は、上記関係に及ぼす減衰定数の影響を調べるために、空中における減衰定数 ζ_{ta} を Case A-3, 5, 9 における 0.001 から電磁減衰器を用いて 0.021 へ変化させて、Case A-5, 9 と同様な実験を行なったものである。

3) Case AC-1, 2, 3, 4, 5 は、揚力の2次又は3次調和周波数成分と円柱体が共振している時の渦励振動特性に及ぼす減衰定数の影響を $SKC=6.2, 8.7, 12, 20$ のそれぞれの場合について詳しく調べたものである。この場合、減衰定数 ζ_{ta} は、電磁減衰器を用いて 0.001 から 0.021 の間の各値に調整されている。

4) 共振時に渦励振動している円柱体に作用する揚力と静止円柱に作用する揚力を比較するために、Case AS-3, 4, 5 は、Case A-3, 5, 9 でそれぞれ使用した作用波とほぼ同様な作用波中に、バネ係数が非常に大きな引張りバネを用いて円柱体を静的に設置した場合の円柱体(静止円柱体)に作用する揚力特性を調べたものである。

上記各ケースの実験に先立ち、円柱体の減衰自由振動実験を空中および静水中 ($d=80$ cm) で行ない、空中および静水中における固有振動数 f_{na} , f_{nw} および減衰定数 ζ_{ta} , ζ_{tw} をそれぞれ調べた。これら減衰自由振動実験は電磁減衰器の使用電流 I_e の各値に対してそれぞれ行なった。

共振時における渦励振動および静止円柱に作用する揚力の不規則性を考慮するために、出力信号の記録時間は作用波周期の 50~100 倍とした(規則性が強い共振時における渦励振動の場合⁴⁾には作用波周期の 50 倍)。

3. 実験結果および考察

3.1 減衰定数

減衰定数は、式(1)に示されるように渦励振動特性を支配する主要パラメーターの1つである。流れ場中で振動している円柱に対する減衰定数の評価は困難である。

表-1 実験条件 (Case A-3, 5, 9, Case AB-4, 5, Case AC-1, 2, 3, 4, 5...振動円柱, Case AS-3, 4, 5...静止円柱)

Case	$m_e/\rho D^2$	f_{na}	f_{nw}	SKC	f_w/f_{nw}	kd	ζ_{ta}	ζ_{tw}	$2m_e(2\pi\zeta_{ta})/\rho D^2$
A-3	15.7	1.52	1.46	6.9~50.5	0.251	0.71	0.001	0.004	0.20
A-5	15.7	1.52	1.46	9.0~40.0	0.335	1.01	0.001	0.004	0.20
A-9	15.7	1.52	1.46	4.4~32.0	0.503	1.83	0.001	0.004	0.20
AB-4	15.7	1.52	1.46	8.9~32.3	0.335	1.01	0.021	0.023	4.14
AB-5	15.7	1.52	1.46	5.6~32.8	0.503	1.83	0.021	0.023	4.14
AC-1	15.7	1.52	1.46	6.2	0.506	1.85	0.001~0.0267	0.004~0.0284	0.20~5.27
AC-2	15.7	1.52	1.46	8.7	0.508	1.88	0.001~0.0267	0.004~0.0284	0.20~5.27
AC-3	15.7	1.52	1.46	12	0.503	1.83	0.001~0.0267	0.004~0.0284	0.20~5.27
AC-4	15.7	1.52	1.46	20	0.503	1.83	0.001~0.0267	0.004~0.0284	0.20~5.27
AC-5	15.7	1.52	1.46	20	0.336	1.01	0.001~0.0267	0.004~0.0284	0.20~5.27
AS-3	15.7	12.5	12.0	8.5~34.9	0.031	0.735			
AS-4	15.7	12.5	12.0	6.9~37	0.041	1.01			
AS-5	15.7	12.5	12.0	9.3~34.3	0.06	1.79			

したがって、種々の評価法が提案^{1),5)}されているが、まだその適確な評価法は確立されていないようである⁶⁾。本研究においては、減衰定数を以下に示すように評価し後のデータ解析に使用した。

空中および静水での減衰自由振動実験で得られた円柱体の減衰自由振動記録より、静水面位置における円柱体の各一周期間の半振幅量 Y_{hi} に対する減衰定数 ζ_{tai} (空中), ζ_{twi} (静水中) を対数減衰法を用いて算定した。 ζ_{tai} , ζ_{twi} と Y_{hi}/D の関係を電磁減衰器に使用した電流値 I_e をパラメーターとして図-2 にそれぞれ示す。この図より以下のことが明らかである。

- 1) ζ_{tai} は, Y_{hi}/D の変化に対してほぼ一定である。
- 2) ζ_{twi} は, $Y_{hi}/D < 0.2$ ではほぼ一定であるが, $Y_{hi}/D > 0.2$ では Y_{hi}/D の増加と共に増加する。この増加量に対する電流値 I_e の影響は認められない。

上記 2) に示す現象は, a) 円柱体の振動量が小さい場合 ($Y_{hi}/D < 0.2$) には, 減衰定数 ζ_{twi} は円柱体表面に作用する流体粘性摩擦力および電磁減衰器による減衰力によって支配されていること, b) 一方, 円柱振動量が大きくなると ($Y_{hi}/D > 0.2$), ζ_{twi} は上記減衰力に加えて, 円柱表面からの境界層はく離より生ずる後流渦の存在による圧力抵抗力によって支配されていることを示している⁶⁾。

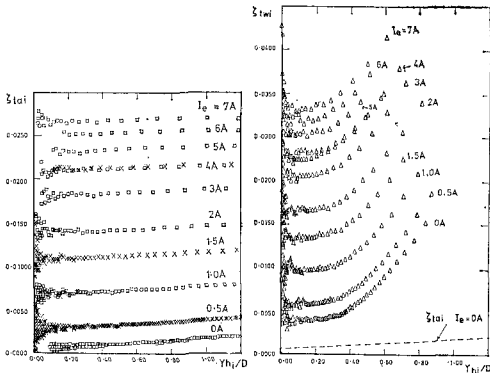


図-2 減衰定数

3.2 無次元振幅量 (Y_{hm}/D) と SKC の関係

円柱体が揚力の2次, 3次, 4次の各調和周波数成分に共振している場合 ($f_w/f_{nw} \approx 1/2, 1/3, 1/4$) の円柱体の静水面における半振幅量 Y_h の平均値 Y_{hm} の無次元値 Y_{hm}/D と, SKC 数の関係を図-3 に示す。この図より以下のことが明らかである。

- 1) $f_w/f_{nw} = 0.503$ ($\approx 1/2$) の場合には, 約 $10 < SKC < 25$ の範囲で Y_{hm}/D は大きな値を示している。
- 2) $f_w/f_{nw} = 0.335$ ($\approx 1/3$) の場合には, 約 $16 < SKC < 26$ の範囲で Y_{hm}/D は大きな値を示している。
- 3) $f_w/f_{nw} = 0.251$ ($\approx 1/4$) の場合には, 約 $28 < SKC$

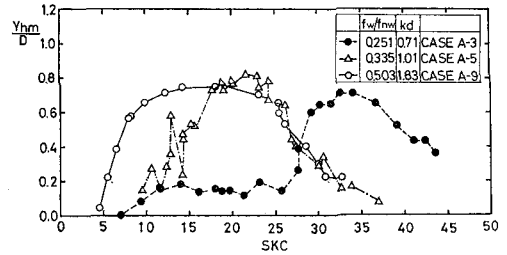


図-3 Y_{hm}/D と SKC の関係

く約 38 の範囲で Y_{hm}/D は大きな値を示している。

上記各ケース (Case A-3, 5, 9) に用いられた波とはほぼ同様な実験波浪条件下に, 静水円柱として設置された試験円柱に作用する揚力の2, 3, 4次各調和周波数成分 ($C_{Le}(n)$, $n=2, 3, 4$, $f_w/f_{nw}=1/n$) と SKC の関係を調べた結果 (Case AS-3, 4, 5) と, 上記 Y_{hm}/D と SKC の関係を比較した。その結果, Y_{hm}/D の SKC 数に対する支配領域は, $C_{Le}(n)$ の SKC 数に対する支配領域に比べて明確であり, また, 多少大きくなっている事が把握された。これは, 波動場中で渦励振動している円柱と作用流体力との相互作用の特性を示す興味ある現象であり, 工学的にも重要な現象である。

3.3 Y_{hm}/D と Reduced-Damping 値との関係

Y_{hm}/D 値に対する減衰定数の影響を調べることを目的として, 円柱体が揚力の2次調和周波数成分と共振している場合の Y_{hm}/D と Reduced-Damping 値との関係を SKC をパラメーターとして図-4 に示す。本実験では, 質量比 $m_e/\rho D^2$ は一定 15.6 に固定されている。したがって, Reduced-Damping 値は減衰定数のみの関数である。前述 (3.1) したように流れ場中で振動している円柱に対する減衰定数の正確な評価は難しい。したがって, 図中の Reduced-Damping 値は電磁減衰器によって調整された ζ_{ta} を用いたものである。

一様定常流中に設置された円柱の共振時における渦励振動量は, 空中における減衰定数 ζ_{ta} を用いた Reduced-Damping 値によって強く関係づけられている結果が報告されている^{7),8)}。一様定常流中の水底にビボットの設置され, 本実験と同様にロッキング振動しながら渦励振動している円柱の共振時における無次元振幅量 Ay/D (Ay : 自由表面点での半振幅量) と Reduced-Damping 値 (ζ_{ta} を使用) との既往の成果をまとめた Iwan⁹⁾ の結果を図-4 に○印で記入している。図より以下の現象が明らかである。

- 1) 波動場における本実験値 Y_{hm}/D は, 一様定常流中における場合と同様に Reduced-Damping 値の減少と共に増加・収束している。しかし, Y_{hm}/D の収束値は一様定常流における Ay/D の収束値よりも小さい。これ

は、これら2つの流れ場においては主流特性が異なっているために、渦の生成過程や渦励振動機構がそれぞれ異なっているためと思われる。

2) 線型振動方程式の解である式(1)においては、 Y_{hm}/D は Reduced-Damping 値の逆数に比例する。しかし、このような関係は 図-4 においては認められない。これは、渦励振動においては、流れと円柱振動の相互作用により、円柱に作用する揚力および減衰力が変化していることによるものと思われる。

Y_{hm}/D や A_y/D の収束値が存在することは、静水中の減衰自由振動においては円柱の抛動量が増加するとともに減衰力が増加するように、渦励振動時においても振動量の増加に伴ない減衰力が増大する現象が生じていることを示している。

3.3 共振時の円柱に作用する揚力

a) 算定法

線型化された振動方程式の共振時における解である式(1)は次式のように表現できる。

$$C_{Le}(n) = \frac{4\pi \cdot 2m_e(2\pi\zeta_{ta}/\rho D^2)}{3F_s(kd) \cdot SKC^2 \cdot (f_w/f_{nw})^2} \cdot \left(\frac{Y_h}{D}\right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $f_w/f_{nw}=1/n$, $n=1, 2, 3, \dots$

実験条件より明らかにされる値 ($F_s(kd)$, SKC , $f_w/f_{nw}=1/n$, $m_e/\rho D^2$, ζ_{ta}), および実測値 Y_{hm}/D を右辺へ代入すると $C_{Le}(n)$ を算定できる。前述したように、共振時の円柱に対する減衰定数の正確な評価は難しいので以下に示す3種類の減衰定数値(空中, 静水中での減衰自由振動実験より得られた)を次式の ζ へ代入し、それぞれの減衰定数値に対応する揚力係数 C_{Lma} , C_{Lmw} , C_{Lmv} を算定した。

1) ζ_{ta} : $Y_{hi}/D \approx 0.1$ における空中での減衰定数

$\dots\dots\dots C_{Lma}$

2) ζ_{tw} : $Y_{hw}/D \approx 0.1$ における静水中での減衰定数

$\dots\dots\dots C_{Lmw}$

3) ζ_{tv} : $Y_{hi}/D = Y_{hm}/D$ における静水中での減衰定数 $\dots\dots\dots C_{Lmv}$

b) C_{Lma} , C_{Lmw} , C_{Lmv} と SKC の関係

Case AB-4, 5 の各データより算定された C_{Lma} , C_{Lmw} , C_{Lmv} と SKC の関係を 図-5 にそれぞれ示す。上記各実験ケースとはほぼ同様な作用波中 (Case AB-4, 5) に静止円柱として設置された試験円柱に対する揚力係数の値 $C_{Le}(3)$, および $C_{Le}(2)$ をそれぞれ図中に記入している (Case AB-4 の場合, Case AS-4 の $C_{Le}(3)$, Case AB-5 の場合, Case AS-5 の

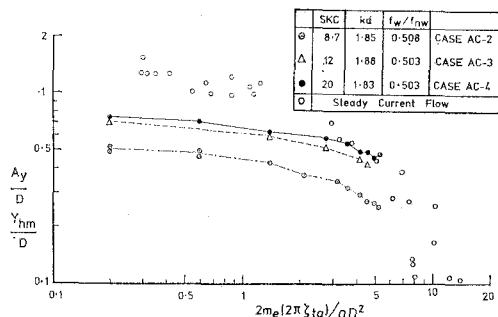


図-4 Y_{hm}/D , A_y/D と Reduced-Damping の関係

$C_{Le}(2)$). 図-5 より以下のことが明らかである。

1) $f_w/f_{nw} \approx 1/2$ である Case AB-5 の場合, $7 < SKC < 14$ の領域で C_{Lma} , C_{Lmw} , C_{Lmv} の各値は $C_{Le}(2)$ よりも大きくなっている。

2) $f_w/f_{nw} \approx 1/3$ である Case AB-4 の場合, $18 < SKC < 26$ の領域で C_{Lma} , C_{Lmw} , C_{Lmv} の各値は $C_{Le}(3)$ よりも大きくなっている。

以上の結果より、静止円柱に作用する揚力値と比べて共振時の円柱に作用する揚力値が増加する領域およびその増幅率は、周波数 f_w/f_{nw} , および SKC によって規定されていることが把握できる。

c) C_{Lma} , C_{Lmw} , C_{Lmv} と Y_{hm}/D の関係

Case AC-1, 2, 3 の各実験データから算定された C_{Lma} , C_{Lmw} , C_{Lmv} と Y_{hm}/D の関係をそれぞれ 図-6 に示す。これら各実験ケースにおいては1種類の作用波のみを使用している。したがって各ケースにおいて f_w/f_{nw} および SKC は一定値である。一方、減衰定数 ζ_{ta} は電磁減衰器を用いて $0.001 \sim 0.0267$ の間の各値に変化されている。 Y_{hm}/D と ζ_{ta} , ζ_{tw} , ζ_{tv} の関係, および, 上記各実験ケースとはほぼ同様な作用波中に静止円柱として設

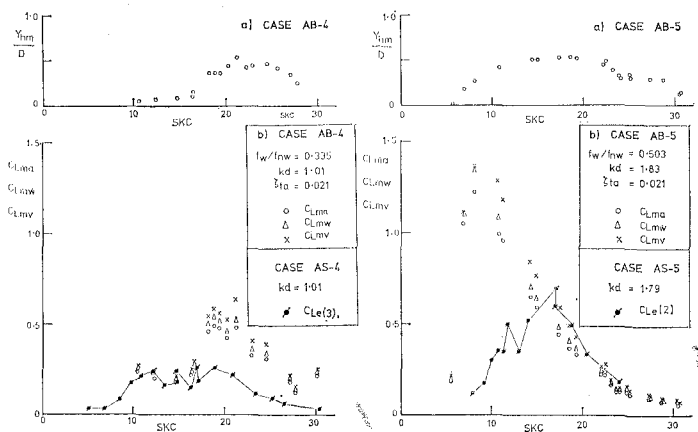


図-5 C_{Lma} , C_{Lmw} , C_{Lmv} と SKC の関係

置された試験円柱に作用する揚力の揚力係数の値 (Case AC-1, AC-2 の場合には $C_{Le}(2)$, Case AC-5 の場合には $C_{Le}(3)$) をそれぞれ対応する図中に記入している。これら図より以下のことが明らかである。

- 1) $Y_{hm}/D \leq 0.45$ では, C_{Lma} , C_{Lmw} , C_{Lmv} は Y_{hm}/D の増加と共に増加する。……(Case AC-1 参照)
- 2) $Y_{hm}/D \approx 0.45$ では, C_{Lma} , C_{Lmw} , C_{Lmv} は最大値を取る。……(Case AC-5 参照)
- 3) $Y_{hm}/D \geq 0.45$ では, C_{Lma} , C_{Lmw} , C_{Lmv} は Y_{hm}/D の増加と共に減少する。……(Case AC-2 参照)

以上の結果より, Y_{hm}/D は共振時の円柱に作用する揚力の増幅率を支配する重要なパラメーターであることが明らかである。上記特性と同様な現象が一樣定常流中における場合にも生じていることが報告⁹⁾ されている。

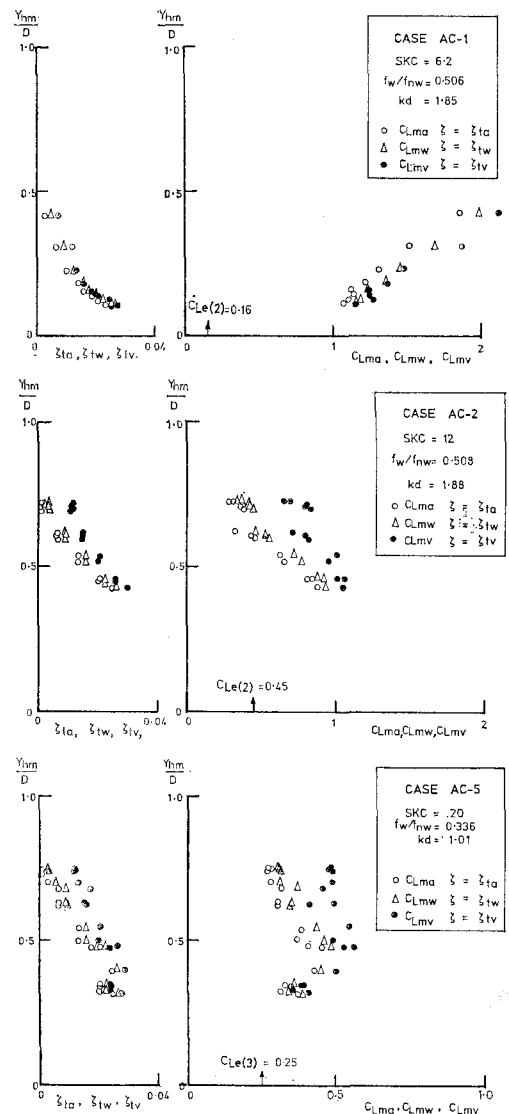
5. 結 語

以上は, 波動場中に設置された直円柱の共振時における渦励振動特性を調べたものである。振動している円柱と作用流体との相互作用の結果, 振動時の円柱に作用する揚力および減衰力が変化するために, 円柱の振動応答特性は非線型性を有することを確認すると共に, この非線型特性と渦励振動を規定する各種主要パラメーターとの関係を把握した。

最後に, 有益な討議ならびに御助言をして下さいました London 大学 Imperial College の P. W. Bearman 先生, J. M. R. Graham 先生に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Sawaragi, T., Nakamura, T. and Miki, H.: Dynamic Behavior of a Circular Pile due to Eddy Shedding in waves, Coastal Engineering in Japan, Vol. 20, pp. 109~121, 1977.
- 2) 石田 啓: 波による柱状構造物の動的応答について, 第20回水工学に関する夏期研修会講義集 B コース, 1984.
- 3) 吉田宏一郎・鈴木英之・岡 徳昭: 規則波を受ける鉛直パイプの揚力評価と応答解析, 日本造船学会論文集, 第158号, pp. 214~221, 1985.
- 4) 林建二郎・J. R. Chaplin: 波動場における直円柱の渦振動について, 第32回海岸工学論文集, pp. 633~637, 1985.
- 5) Sarpkaya, T. and Isaacson, M.: Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold Company, 1981.
- 6) 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, pp. 103~108, 1986.
- 7) Griffin, O. M., Kkorp, R. A. and Ramberg, S. E.: The Resonant, Vortex-Excited Vibration of Structures and Cable Systems, OTC Paper No. 2319, 1975.
- 8) Iwan, W. D.: The Vortex Induced Oscillation of Elastic Structural Elements, J. Eng. Industry, 97, pp. 1378~1382, 1975.
- 9) King, R.: A Review of Vortex Shedding Research and its Application, Ocean Engng., Vol. 4, pp. 141~171, 1977.



図—6 C_{Lma} , C_{Lmw} , C_{Lmv} と Y_{hm}/D の関係