

波動場で渦励振動している直円柱の応答振動量評価について

林 建二郎*・荻原 洋聡**・藤間 功司***・重村 利幸****

1. 緒 言

波動場に設置された柱状海洋構造物の作用波力に対する応答振動問題においては、構造物に作用する波力および減衰力を精度良く評価する必要がある。しかし、流体と構造物との相互作用現象が生じるために、これら諸量を的確に評価することはなかなか困難である。柱状海洋構造物の作用波力に対する振動応答問題に関する基礎的な研究成果はかなり報告されてきた(例えば、石田, 1984; 榎木, 中村ら, 1976)が、この種の振動応答問題において重要な、流体と構造物との相互作用効果はまだ十分に把握されていないようである。そこで、筆者らは、波動場に鉛直に設置された円柱(直円柱)の作用揚力に対する応答振動(渦励振動)量と作用揚力との関係に及ぼす減衰定数の影響を調べ、この相互作用効果に対する検討を行ってきた(林ら, 1989)。

本研究は、a) 実海洋構造物の渦励振動問題において重要となる高い Keulegan-Carpenter 数 (KC 数) の場合をも対象とした直円柱の渦励振動応答特性を実験的に調べるとともに、b) 減衰定数評価に対するより詳しい検討を行い上記相互作用効果を調べたものである。

2. 実験装置および方法

実験は、長さ 39.6 m, 幅 0.6 m, 高さ 0.8 m の二次元造波水槽を用いて行った。使用した円柱体の概略を図-1 に示す。試験円柱には、外径 $D=1.9$ cm, 長さ $=73.7$ cm, 重量 $=119.9$ gf のアクリルパイプを用いた。質量調節を目的として円柱内には、外径 $=0.9$ cm, 長さ $=78.5$ cm, 重量 $=380.4$ gf の丸鋼が挿入されている。試験円柱の上部は、水路方向と直角な両方向に引っ張りバネを用いて弾性的に支持され、その下端は円柱支持板 $(25*10*0.2$ cm) に接続されている。支持板の水路方向両端は、ピボットの水槽床部に置かれている。従って、試験円柱は揚力方向にのみロッキング振動する。

円柱振動変位 y_h に比例する引っ張りバネの伸張合力を測定するために、バネ支持用の鉄棒フレームを三分力計に取り付けている。

本実験で行った測定条件を表-1 に示す。実験静水深 d は 40 cm, 試験円柱体の Mass Ratio ($m_e/\rho_w D^2$, (9) 式参照) は 14.9 である。

1) Case V1, V2, V3 は、試験円柱の水中有振動数 f_{nw}

の $1/2, 1/3, 1/4$ 倍なる作用波周波数 f_w を有する規則波中における、試験円柱の渦励振動特性と静水表面の位置における KC 数 (CKC 数) との関係をそれぞれ調べたものである。

2) Case S1, S2, S3 は、バネ定数が非常に大きな引っ張りバネを用いて固定的に設置された本試験円柱に作用する揚力モーメント FLM の CKC 数に対する変化特性を、Case V1, V2, V3 の場合と同様な作用波条件下で調べたものである。

上記各ケースの実験に先立ち、試験円柱体の減衰自由振動実験を空中および静水中 (水深, $d=40$ cm) で行い、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 h_{ua}, h_{uw} をそれぞれ調べた。

作用波水位変動の測定には、抵抗線式波高計を使用した。波高計からの出力信号は、円柱振動量に対応する三分力計からの出力信号と共に、サンプリング周波数 50 Hz で AD 変換しフロッピーディスクに記録した。サンプリング個数は 3000 とした。

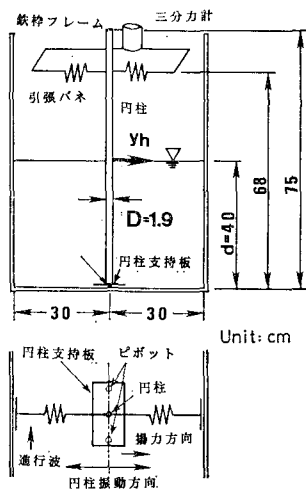


図-1 実験装置

* 正会員 Ph.D. 防衛大学校助教授 土木工学教室

** 学生会員 防衛大学校理工学研究科 海洋工学専攻

*** 正会員 工博 防衛大学校助手 土木工学教室

**** 正会員 Dr.Eng. 防衛大学校教授 土木工学教室

表-1 実験条件 (Case V1~V3...振動円柱, Case S1~S3...固定円柱)

Case	d (cm)	D (cm)	f_{na} (Hz)	f_{nw} (Hz)	f_w (Hz)	f_w/f_{nw}	d/L	CKC	h_{ta}	h_{tw}	$m_e/\rho_w D^2$
V1	40	1.9	2.17	2.12	1.07	0.506($\approx 1/2$)	0.308	5.2~26.4	0.002	0.005	14.9
V2	40	1.9	2.17	2.12	0.70	0.332($\approx 1/3$)	0.164	5.6~38.0	0.002	0.005	14.9
V3	40	1.9	2.17	2.12	0.53	0.250($\approx 1/4$)	0.116	4.5~35.1	0.002	0.005	14.9
S1	40	1.9	十分大	十分大	1.07	0.505($\approx 1/2$)	0.306	5.5~25.5			14.9
S2	40	1.9	十分大	十分大	0.70	0.332($\approx 1/3$)	0.164	2.8~39.9			14.9
S3	40	1.9	十分大	十分大	0.53	0.250($\approx 1/4$)	0.116	2.1~36.4			14.9

d : 水深, D : 円柱径, f_w : 作用波周波数, L : 作用波波長, $m_e/\rho_w D^2$: Mass Ratio

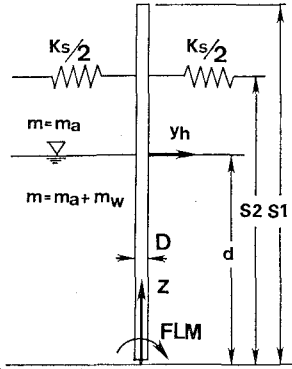


図-2 振動モデル座標系

3. 試験円柱の振動モデル

3.1 振動方程式

実験に用いた試験円柱の振動モデル座標系を図-1に示す。ロッキング振動する試験円柱の代表振動変位として静水面位置における円柱体の振動変位量 y_h をとる。円柱体の振動方程式は円柱体下部のピボット点における曲げモーメントの釣合条件を満たす(1)式で与えられる。

$$M_{mt} \cdot \ddot{y}_h + C_{mt} \cdot \dot{y}_h + K_{mt} \cdot y_h = \text{FLM} \quad (1)$$

ここに, $\dot{y}_h = dy_h/dt$, $\ddot{y}_h = d^2 y_h/dt^2$

M_{mt} は, (2) 式で示される全質量マトリックスである。 $M_{mt} \cdot \ddot{y}_h$ は, 円柱体の振動によるピボット点回りの慣性力モーメントを示す。

$$M_{mt} = \int_{d+\eta}^{s1} m_a \cdot (z/d) \cdot z \cdot dz + \int_0^{d+\eta} (m_a + m_w) \cdot (z/d) \cdot z \cdot dz \quad (2)$$

ここに, m_a : 円柱体の単位長さ当りの質量

m_w : 円柱体の単位長さ当りの水中付加質量

η : 波による水位変動

C_{mt} は, (3) 式で示される全減衰マトリックスである。 $C_{mt} \cdot \dot{y}_h$ は, 引っ張りバネ部において生ずる構造減衰力と円柱体水中部に作用する流体減衰力によるピボット点回りの曲げモーメントを示す。

$$C_{mt} = C_s \cdot (s_2/d) \cdot s_2 + \int_0^{d+\eta} C_f \cdot (z/d) \cdot z \cdot dz \quad (3)$$

ここに, C_s : 構造減衰係数, C_f : 流体減衰係数

K_{mt} は, (4) 式で示される全剛性マトリックスである。 $K_{mt} \cdot y_h$ は, a) 引っ張りバネ部の復元力と, b) 円柱体が鉛直な状態から水平方向に振動変位した場合に生じる円柱体の自重および浮力によるピボット点回りの曲げモーメントを示す。FLM は作用揚力によるピボット点回りの曲げモーメントである。

$$K_{mt} = K_s \cdot (s_2/d) \cdot s_2 - \int_0^{s1} m_a \cdot g \cdot (z/d) \cdot dz \quad (\text{バネ復元力項})$$

$$+ \int_0^{d+\eta} (\pi D^2/4) \cdot \rho_w \cdot g \cdot (z/d) \cdot dz \quad (\text{浮力項}) \quad (4)$$

ここに, K_s : バネ係数, g : 重力加速度, ρ_w : 水の密度
波による水位変動 η の影響を無視した場合 (= 静水状態) の M_{mt} , C_{mt} , K_{mt} を M_{m0} , C_{m0} , K_{m0} とすると, M_{m0} および K_{m0} は定数となり, (5) 式の振動方程式が得られる。

$$\ddot{y}_h + 2h_{t0} \cdot \omega_n \cdot \dot{y}_h + (\omega_n)^2 \cdot y_h = \text{FLM}/M_{m0} \quad (5)$$

式中, ω_n , h_{t0} は, (6), (7) 式で示される, 円柱体の静水における円固有振動および換算減衰定数である。

$$\omega_n = 2\pi \cdot f_{nw} = (K_{m0}/M_{m0})^{1/2} \quad (6-a)$$

$$h_{t0} = C_{m0}/(2\omega_n \cdot M_{m0}) = h_s + h_f \quad (6-b)$$

ここに, f_{nw} は水中固有振動数である。 h_s , h_f は, (7), (8) でそれぞれ示される換算構造減衰定数および換算流体減衰定数である。

$$h_s = C_s \cdot s_2/d \cdot s_2/(2\omega_n \cdot M_{m0}) \quad (7)$$

$$h_f = \int_0^d C_f \cdot (z/d) \cdot z \cdot dz/(2\omega_n \cdot M_{m0}) \quad (8)$$

試験円柱体の換算単位長質量 m_e を次式で定義する。

$$m_e = M_{m0} \int_0^d (z/d) \cdot z \cdot dz/3M_{m0}/d^2 \quad (9)$$

3.2 減衰定数

減衰定数 h_{t0} と, 振動1周期間に減衰力によって失われるエネルギー E_d および系全体のエネルギー E_t (= 運動エネルギーの最大値 E_{kmax}) の間には, (10) 式の関係が成立する (小坪, 1973)。

$$h_{t0} = 1/(4\pi) \cdot (\omega_n/\omega) \cdot (E_d/E_t) \quad (10)$$

従って, 構造減衰定数 h_s および流体減衰定数 h_f は (11), (12) 式でそれぞれ示される。

$$h_s = 1/(4\pi) \cdot (\omega_n/\omega) \cdot (E_{as}/E_t) \quad (11)$$

$$h_f = (1/4\pi) \cdot (\omega_n/\omega) \cdot (E_{df}/E_t) \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに, E_{as} , E_{df} は, 構造減衰力, 流体減衰力によってそれぞれ失われる1周期間内のエネルギーである。

振幅 Y_h , 周期 T で正弦振動 ($y_h = Y_h \cdot \sin(\omega \cdot t)$, $\omega = 2\pi/T$) する試験円柱に作用する流体減衰力をモリソン式中の抗力項の形で評価すると, 1周期間中に流体減衰力によって失われるエネルギー E_{df} は, (13) 式で示される。

$$\begin{aligned} E_{df} &= \int_0^T \int_0^d \{1/2 \cdot \rho_w \cdot D \cdot (\omega \cdot Y_h)^2 \cdot C_d \cdot (z/d)^2 \cdot \\ &\quad |\cos(\omega \cdot t)| \cos(\omega \cdot t) dz\} \cdot (\omega \cdot Y_h) \\ &\quad \times (z/d) \cos(\omega \cdot t) \cdot dt \\ &= 1/2 \cdot \rho_w D \cdot (\omega \cdot Y_h)^3 \cdot (8/(3\omega)) \int_0^d C_d \cdot (z/d)^3 \cdot dz \\ &\quad \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

一方, 振動系全体のエネルギー E_t は(14)式で示される。

$$\begin{aligned} E_t &= E_{kmax} = 1/2 \cdot (Y_h \cdot \omega)^2 \cdot \left\{ \int_d^{s1} m_a \cdot (z/d)^2 \cdot dz \right. \\ &\quad \left. + \int_0^d (m_a + m_w) \cdot (z/d)^2 \cdot dz \right\} \\ &= 1/2 \cdot 1/d \cdot (Y_h \cdot \omega)^2 \cdot M_{m0} \quad \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

これら E_{df} および E_t ($=E_{kmax}$) を(12)式に代入すると, 流体減衰力定数 h_f は次式で示される。

$$h_f = \frac{\left\{ (2\rho_w \cdot D^2 \cdot (\omega_n/\omega)) \cdot (Y_h/D) \int_0^d C_d \cdot z^3 \cdot dz \right\}}{(3\pi \cdot M_{m0} \cdot d^2)} \quad \dots\dots\dots (15)$$

4. 結果および考察

4.1 減衰定数

本実験に使用した円柱体の空中および静水中における減衰自由振動記録例を図-3にそれぞれ示す。これら記録例より, 減衰する円柱体の各半振幅量 Y_{hi} に対する減衰定数 h_{tai} (空中), h_{twi} (水中) を対数減衰法に基づく次式を用いて算定した結果を図-4にそれぞれ示す。

$$h_{tai} \text{ or } h_{twi} = \{\pi/2 \cdot \ln(Y_{hi-2}/Y_{hi+2})\}/4 \quad \dots\dots\dots (16)$$

図-4より以下のことが明かである。

1) 空中減衰定数 h_{tai} (=構造減衰定数 h_s) は, Y_{hi}/D の変化に対してほぼ一定 ($h_{tai} \doteq 0.002$, 表-1に記載) である。

2) 構造減衰定数 h_s (= h_{tai}) と流体減衰定数 h_f の和である水中減衰定数 h_{twi} は, $Y_{hi}/D < 0.3$ では一定 ($h_{twi} \doteq 0.005$, 表-1に記載) であるが, $Y_{hi}/D > 0.3$ では Y_{hi}/D の増加とともに大きくなる。従って, h_f は Y_{hi} の関数である。

振動量が小さい場合(後流渦が出現しない場合)の円柱表面に発達する層流境界層による流体粘性摩擦力等をストークスの理論等を用いて評価すると(Bearman, 1985), (15) 式中の抗力係数 C_d は次式で示される。

$$C_d = 3\pi^{5/2}/(2 \cdot KC \cdot \sqrt{\beta}) \quad \dots\dots\dots (17)$$

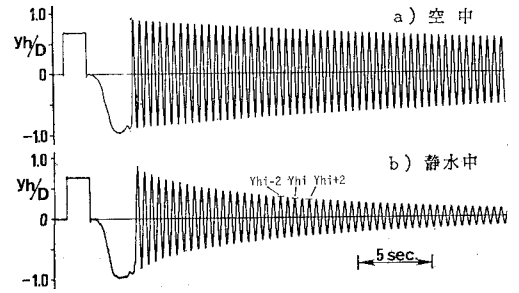


図-3 減衰自由振動記録例

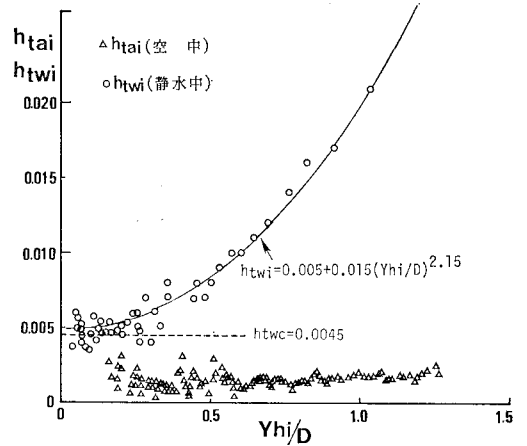


図-4 減衰定数と Y_{hi}/D の関係

式中, KC , β は, (18), (19) 式で示される KC 数および, 粘性周波数パラメーターである。

$$KC = (z/d) \cdot Y_h \cdot 2\pi/D \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\beta = Re/KC = D^2 \omega_n / (2\pi\nu) \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここに, Re : Reynolds 数, ν : 動粘性係数

ω_n : 静水中における円固有振動数 ($\omega_n = 2\pi f_{nw}$)

(17)~(19) 式を (15) へ代入すると, この場合, $\omega = \omega_n$ なので

$$h_f = \rho \cdot D^2 \cdot \pi^{1/2} \cdot d^2 / (6M_{m0} \cdot \sqrt{\beta}) \quad \dots\dots\dots (20)$$

(20) 式は, 円柱体の振動量 Y_h に依存しない関数であり, 円柱振動量が小さい場合の h_f の理論値を示す。構造減衰定数の実測値 ($h_s = h_{tai} \doteq 0.002$) に本試験円柱に対する(20)式による計算値を加えた値 h_{twc} を図-4中に点線で示す。 Y_{hi}/D が小さい場合には h_{twi} と h_{twc} の一致は良好である。

実験値 h_{twi} の回帰式として次式で示される実験式が得られた。

$$h_{twi} = 0.005 + 0.015(Y_{hi}/D)^{2.15} \quad \dots\dots\dots (21)$$

円柱振動振動量 Y_{hi} の増加に伴う h_f の増加は, Y_{hi}/D の増加 (= KC 数の増加) に伴い発生する円柱後流渦による圧力抵抗に起因すると考えられる(林, 1986)。

4.2 固定円柱に作用する揚力モーメント

固定円柱に作用する揚力モーメント FLM の周波数

特性を得るために、Case-S1, S2, S3 の各実験で得られたデータのフーリエ解析を行った。得られた作用波周波数 f_w の1倍, 2倍, 3倍, 4倍周波数成分値 (FLM (n), $n=1, 2, 3, 4$) と静水面位置における KC 数 (CKC 数) との関係を図-5 に各実験ケース別に示す。揚力係数表示を行っていないために、振動流または波動場に置かれた円柱に作用する揚力特性に関する既存の結果との比較は行えないが、以下のことが概略認められる。

1) 2倍周波数成分が卓越する CKC 数の上限は、 d/L の増加につれて大きくなる (例えば、 $d/L=0.116$ の場合の CKC 上限値=約 15、 $d/L=0.164$ の場合の CKC 上限値=約 22)。

2) CKC 数が大きな領域 ($20 < \text{CKC} < 35$) では、3倍, 4倍周波数成分が卓越してくる。しかしこれら各周波数成分の卓越性およびその領域は、倍周波数成分の場合に比べて不明確である。

3) FLM (n) の各値は CKC が 40 近くになるとかなり減少する。

4.3 円柱応答振動量の代表値特性

Case V1, V2, V3 の各実験ケースで得られた円柱振動 y_h の周波数特性を調べるために、フーリエ解析を行った。得られた y_h の卓越周波数はどの実験ケースにおいても水中固有振動数 f_{nw} と一致していた。このことは、試験円柱は、Case V1 の場合には作用揚力モーメントの2倍周波数成分値 FLM (2) と、Case V2 の場合には3倍周波数成分値 FLM (3) と、Case V3 の場合には4倍周波数成分値 FLM (4) とそれぞれ共振していることを示す。この解析で得られた y_h の卓越周波数成分値を実測値 y_h の共振周波数成分 Y_{hef} とする。 Y_{hef}/D と CKC 数との関係を図-6 に f_w/f_{nw} をパラメータとして示す ($f_w/f_{nw}=1/2 \cdots$ Case V1, $f_w/f_{nw}=1/3 \cdots$ Case V2, $f_w/f_{nw}=1/4 \cdots$ Case V3)。

固定円柱に作用する揚力モーメントの n 倍周波数成分値 FLM(n) に対する円柱体の応答振動振幅 $Y_{hef}(n)$ は振動方程式 (5) 式の解として次式で与えられる。

$$Y_{hef}(n) = \frac{\text{FLM}(n)/K_{m0}}{\{(1-(n \cdot f_w/f_{nw})^2)^2 + (2h_{t0} \cdot n \cdot f_w/f_{nw})^2\}^{1/2}} \quad (22)$$

従って n 倍周波数 $n \cdot f_w$ と円柱固有振動数 f_{nw} が一致する共振時 ($n \cdot f_w = f_{nw}$) での $Y_{hef}(n)$ の値は、次式で与えられる。

$$Y_{hef}(n) = \text{FLM}(n)/K_{m0}/(2 \cdot h_{t0}) \quad (23)$$

式中の減衰定数 h_{t0} を実験式 (21) 式で評価すると、

$$h_{t0} = 0.005 + 0.015 \cdot (Y_{hef}(n)/D)^{2.15} \quad (24)$$

従って、 $Y_{hef}(n)$ は連立方程式 (23), (24) 式の数値解として与えられる。

Case S1, S2, S3 の各実験ケースで得られた、固定円柱に作用する FLM の共振周波数成分 FLM(n) を用い

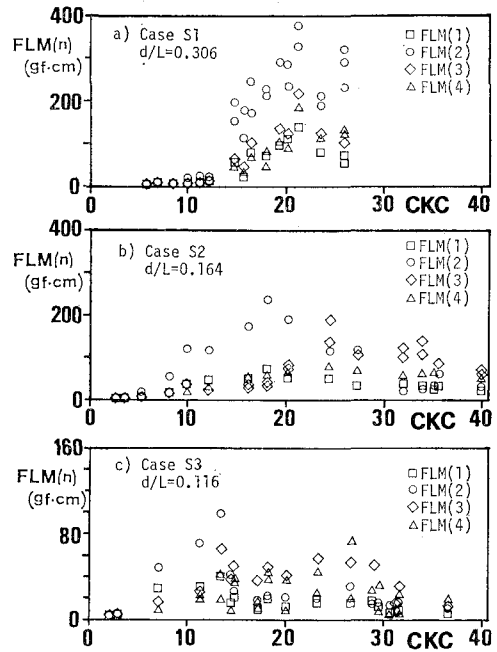


図-5 揚力モーメントと CKC 数の関係

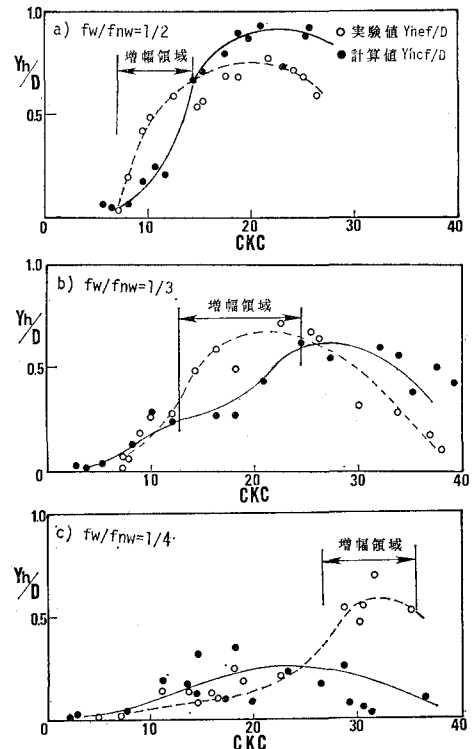


図-6 Y_{hef} , Y_{hef} と CKC 数の関係

た上記数値解 $Y_{hef}(n)$ (Case S1 の場合 $\cdots n=2$, Case S3 の場合 $\cdots n=3$, Case S4 の場合 $\cdots n=4$) を計算値 Y_{hef} とする。 Y_{hef}/D と CKC 数との関係を実験値

Y_{hef} の場合と同様に 図-6 に示す。 Y_{hef} と Y_{hef} の一致はかなり認められる。しかし、 $f_w/f_{nw}=1/2$ の場合は $8 < CKC < 14$, $f_w/f_{nw}=1/3$ の場合は $13 < CKC < 24$, $f_w/f_{nw}=1/4$ の場合は $28 < CKC < 34$ の範囲で、実験値 Y_{hef} は計算値 Y_{hef} より大きくなっている。 $Y_{hef} > Y_{hef}$ なる理由としては、渦励振動時の作用揚力モーメントが流れと円柱振動との相互作用効果のために固定円柱時よりも大きくなっていることが考えられる。工学的に大変興味深いこの相互作用現象が生じる CKC 数の範囲は、周波数 f_w/f_{nw} によって変化することが 図-6 より明かである。一様振動流中における渦励振動円柱に作用する揚力は、 $f_w/f_{nw}=1/2$ の場合には KC 数が小さい領域 ($6 < KC < 10$) で増加されることが報告されている (林ら, 1986)。

4.3 円柱応答振動量の変動特性

Case-V1, V2, V3 の各実験ケースで得られた円柱振動 y_h の平均振幅値 Y_{heb} および各振幅値の変動幅をゼロアップクロス法を用いて調べた。

Case-S1, S2, S3 の各実験で得られた固定円柱に作用する揚力モーメント FLM の時間変動波形に対する試験円柱の振動応答変位 y_h を振動方程式 (5) 式を用いて算定した。(5) 式中の減衰定数 h_{to} は次式で与えた。

$$h_{to} = 0.005 + 0.015 \cdot (\dot{y}_h / (2\pi \cdot f_{nw} \cdot D))^{2.15} \quad \dots (25)$$

試験円柱の静水中における減衰定数 h_{tw} と円柱振動振幅 Y_h との関係を示す実験式 (21) 式に基づく (25) 式は、円柱振動速度 $\dot{y}_h$ と h_{to} ($=h_{tw}$) との関係を示す。数値計算には線形加速度法を用いた。計算時間間隔 Δt は 0.02 秒、解析時間は 60 秒とした。得られた応答振動波形の平均振幅値 Y_{hef} と各振幅値の変動幅をゼロアップクロス法を用いて算定した。

実験値 Y_{heb} および 計算値 Y_{hef} の CKC 数に対する変化特性を図-7 に f_w/f_{nw} をパラメータとして示す。図中に示す実線および点線は各振幅値の変動幅を示す。以下のことが明らかである。

1) Y_{heb} と Y_{hef} の CKC に対する変化特性は、図-6 に示される Y_{hef} と Y_{hef} の CKC 数に対する変化特性と類似している。

2) 実験値 y_h の各振幅変動幅は、計算値 y_h の各振幅変動幅より小さい ($f_w/f_{nw}=1/4$ の場合を除く)。

従って、共振時の渦励振動円柱に作用する揚力モーメントは、流体と円柱振動との相互作用により固定円柱時の場合よりも、安定化されていると考えられる。

5. 結 言

以上は、波動場における直円柱の渦励振動応答特性および円柱と波との相互作用効果について検討したものである。主要な結果として以下のことが挙げられる。

1) 円柱振動量が小さい場合の流体減衰定数は、円柱

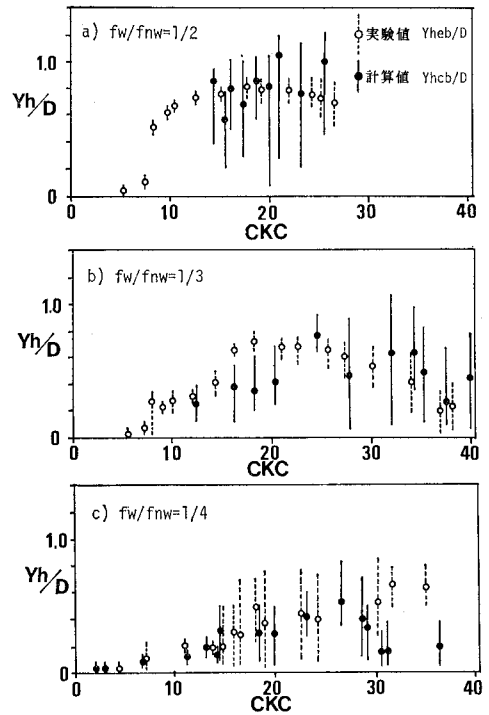


図-7 振動振幅変動幅と CKC 数の関係

表面に発達する層流境界層による流体粘性摩擦力等を考慮することにより評価可能であった。

2) 応答振動量評価において重要な減衰定数評価法として今回用いられた手法は有効である。

3) 渦励振動時の作用揚力モーメントが、流れと円柱振動との相互作用効果のために固定円柱時よりも大きくなる CKC 数と範囲は、周波数 f_w/f_{nw} によって変化する。

参 考 文 献

- 石田 啓 (1984): 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, 土木学会, B-4-1~B-4-15.
- 小坪清真 (1973): 土振動学, 森北出版, pp. 63~65.
- 樫木 亨・中村孝幸・三木秀樹 (1976): 波動場の円柱後流渦による振動応答の実態とその予測について, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 33~38.
- 林建二郎 (1986): 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.
- 林建二郎・成澤幹宏・重村利幸・藤間功司 (1989): 波動場で渦励振動している直円柱と波との相互作用について, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 699~703.
- 林建二郎・荻原洋聡・藤間功司・重村利幸 (1990): 振動流中で渦励振動している円柱と流れの相互作用について, 水工学論文集, 第 34 巻, pp. 265~270.
- Bearman, P. W., M. J., Downie, J. M., Graham, E. D., and Obasaju (1985): Forces on cylinders in viscous oscillatory flow at low Keulegan-Carpenter numbers, J. Fluid Mech., Vol. 154, pp. 337~356.