

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

林 建二郎*・成澤 幹宏**・重村 利幸***・藤間 功司****

1. はじめに

波動場における柱状弾性構造物（例えば、石油採掘用ライザー管等）の作用揚力に対する応答振動（渦励振動）問題においては、波と振動する構造物との相互作用効果をも考慮する必要がある。

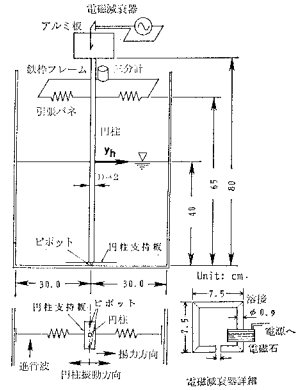
定常流中における円柱の渦励振動時においては、振動する円柱と流れの相互作用の結果、a) 円柱からの放出渦強度が増加すること、および b) 放出渦の円柱軸方向相関性が増加すること等の現象が明らかにされている (Blevins, 1977; Ramberg 等, 1976; Toebes, 1969)。その結果、渦励振動時の円柱に作用する揚力は、同じ主流中に静的に置かれている円柱（静止円柱）に作用する揚力より大きくなるようである。

同様な現象が波動場における円柱の渦励振動においても生じているものと推測できる。しかし、水粒子はオービタルモーションを有し、その大きさは水深方向に変化するような複雑な流れ場を有する波動場中での円柱の渦励振動時における、波と振動円柱との相互作用効果については、まだ十分に把握されていないようである (林ら, 1985)。

本研究は、波動場に鉛直に設置された円柱（直円柱）の渦励振動時における応答振動量と、その主要支配パラメーターの一つである減衰定数との関係を調べ、上記相互作用効果を検討したものである。また、渦励振動している直円柱に作用する局所波力の直接測定をも試みた。

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。実験に使用した円柱体の概略を図-1 に示す。試験円柱（直ちゅう製、外径 $D=2$ cm の下端は、水路方向両端をピボットの的に水槽底部に置かれている試験円柱支持板（アクリル製、 $15 \times 20 \times 0.5$ cm）に接続されている。試験円柱の上部（水槽底部より 65



モーメントは、試験円柱が鉛直な状態から振動変位した場合に考慮する必要がある。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。

波の水位変化による時間変動を無視した M_{mt} , C_{mt} , K_{mt} (例えば (2) 式を参照) を (1) 式に代入すると、次式の線型振動方程式が得られる。

$$\ddot{y}_n + 2 \cdot h_{tw} \cdot \omega_n \cdot \dot{y}_n + \omega_n^2 \cdot y_n = FLM / M_{mt} \quad \dots (3)$$

ここに、

$$\omega_n = 2\pi \cdot f_{nw} = (K_{mt} / M_{mt})^{1/2} \quad \dots (4)$$

$$h_{tw} = C_{mt} / (2 \cdot \omega_n \cdot M_{mt}) \quad \dots (5)$$

作用揚力モーメント FLM の時間変動をフーリエ級数近似し、作用波周波数 f_w の n 倍周波数成分の大きさを $FLM(n)$ とすると、 $FLM(n)$ に対する円柱体の応答振動振幅 (半振幅量) Y_{hn} は (4) 式で与えられる。

$$Y_{hn} = \frac{FLM(n) / K_{mt}}{\sqrt{(1 - (f_{Ln} / f_{nw})^2)^2 + (2h_{tw} f_{Ln} / f_{nw})^2}} \\ = \frac{FLM(n) / K_{mt}}{\sqrt{(1 - (n f_w / f_{nw})^2)^2 + (2h_{tw} n f_w / f_{nw})^2}} \quad \dots (6)$$

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

f_{Ln} : n 倍揚力周波数, f_w : 作用波周波数

また、共振時 ($f_{Ln} = f_{nw}$) における Y_h / D の値は、(7) 式で与えられる。

$$Y_{hn} = FLM(n) / K_{mt} \cdot (2 \cdot h_{tw}) \quad \dots (7)$$

4. 実験結果および考察

4.1 静止円柱に作用する揚力

Case 1-S および Case 2-S の実験で得られた、静止円柱に作用する揚力モーメント FLM の 2 倍周波数成分 FLM(2) と 3 倍周波数成分 FLM(3) の、CKC 数に対する変化特性を 図-4 A), B) にそれぞれ示す。水深波長比 d/L が約 0.14 である Case 1-S の場合、 $6 < CKC < 16$ の範囲では $CLM(2) > CLM(3)$, $16 < CKC$ では $CLM(2) < CLM(3)$ である。この KC 数に対する変化特性は、ほぼ同じ水深波長比での揚力係数に関する Isaacson ら (1976) の実験結果と同様である。一方、 $d/L = 0.24$ である Case 2-S の場合では、上記の場合や一樣振動流における従来の結果とは異なり、 $8 < CKC < 24$ の広範囲において $FLM(2) > FLM(3)$ である。本結果は、円柱下部点に作用する揚力モーメントであることや、KC 数として CKC 数を用いていること等に対する検討を必要とするが、波動場中の直円柱に作用する揚力の水深方向変化特性を示す興味深い結果である。

4.2 渦励振動特性および波との相互作用

(a) 減衰定数静

静水中での自由振動実験で得られた円柱体の減衰振動記録より、静水面位置における円柱体の減衰する各振幅量 Y_h に対応する減衰定数 h_{tw} を対数減衰法を用いて

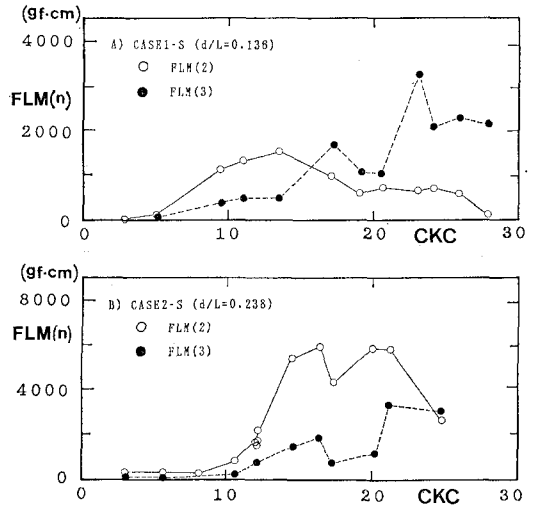


図-4 静止円柱に作用する揚力モーメント

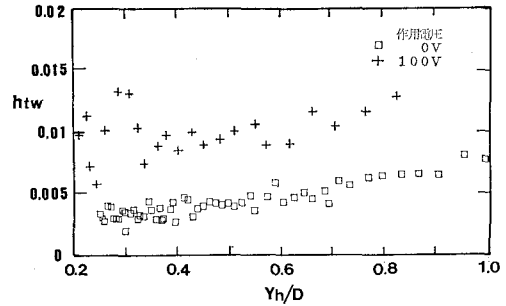
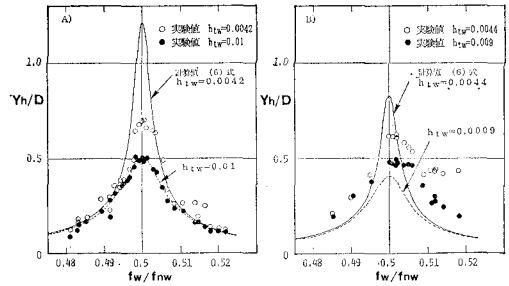


図-5 減衰定数 h_{tw} と Y_h/D の関係 (CASE 1 の 1 例)



A) Case 1-A ($d/L \approx 0.14$) B) Case 2-A ($d/L \approx 0.24$)

図-6 振動変位 Y_h/D と周波数比 f_w/f_{nw} の関係

算定した。Case 1 の実験で得られた h_{tw} と Y_h/D との関係を図-5 に示す (電磁減衰器への作用電圧 $V=0$ V, および $V=100$ V の場合のみ)。図より、電圧 $V=100$ V を作用させた結果 h_{tw} は 2 倍増加していること、および Y_h/D の増加に伴い h_{tw} が増加していることがわかる。後者の現象は、 Y_h/D の増加に伴い発生する円柱後流渦による圧力抵抗 (=円柱振動速度の 2 乗に比

例) によるものと思われる(林, 1986).
 このようにして得られた各測定ケースにおける h_{tw} の代表値を表-1 に示している.

(b) 周波数応答特性

図-6 は, Case 1-A と Case 2-A の実験で得られた応答振動量 Y_h/D と周波数比 f_w/f_{nw} の関係を減衰定数 h_{tw} をパラメーターとして示したものである. 図中, A) は d/L =約 0.14 の場合である. B) は d/L =約 0.24 の場合である. 両ケースとも CKC 数は約 12 に固定されている. 図中の計算値は, 同様な波が静止円柱に作用した場合の作用揚力モーメントの 2 倍周波数成分 FLM (2) と, 応答振動量 Y_h/D の実測値に対応する静水中における減衰定数 h_{tw} を (6) 式に代入して得られたものである. 例えば, Case 1-A の $h_{tw}=0.0042$ の場合, FLM (2) = 1300 gf·cm (図-4-a 参照), $h_{tw}=0.0042$ (図-5, $V=0$ V, 参照). このようにして h_{tw} を選んだ理由は, 円柱の振動速度の 2 乗に比例する非線型な減衰項(樁木ら, 1976) を (3) 式の線型振動方程式中で考慮するためである. 共振時には, 円柱振動と波との相互作用により作用揚力が増大する結果, 実測値は計算値より大きくなるものと予想されていたが, そのような結果は Case 2-A の $h_{tw}=0.009$ の場合において若干認められるのみである. 両ケースとも減衰定数が小さい場合 ($h_{tw}=0.0042$), 共振点付近 ($f_w/f_{nw}=0.5$) において計算値は実験値よりかなり大きくなっている.

(c) 共振振動量と CKC の関係

作用揚力モーメントの 2 倍周波数成分 FLM (2) に円柱が共振している場合の共振振動量 Y_h/D と CKC の関係を水深波長比 d/L と作用電圧 V (=減衰定数) をパラメーターとして図-7a)—d) にそれぞれ示す. 図中に示されている計算値は, (7) 式に, 静止円柱に作用する ELM (2), および表-2 に示す減衰定数 h_{tw} を代入したものである. 実験値 Y_h/D は, $d/L=0.136$ の場合は $6 < CKC < 20$ の範囲で, $d/L=0.238$ の場合は $8 < CKC$ の広範囲それぞれで増加している. この特性に対する電圧(減衰定数)の影響は認められない. d/L 値によるこの相違は, 静止円柱に作用する FLM (2) 特性とよく類似している(図-4, 参照).

次に, $d/L=0.136$ の場合は約 $6 < CKC < 10$ の範囲で, $d/L=0.238$ の場合は約 $4 < CKC < 12$ の範囲で, 実験値は計算値よりも大きくなっている. このことは, 直円柱が作用揚力の 2 倍周波数成分と共振している場

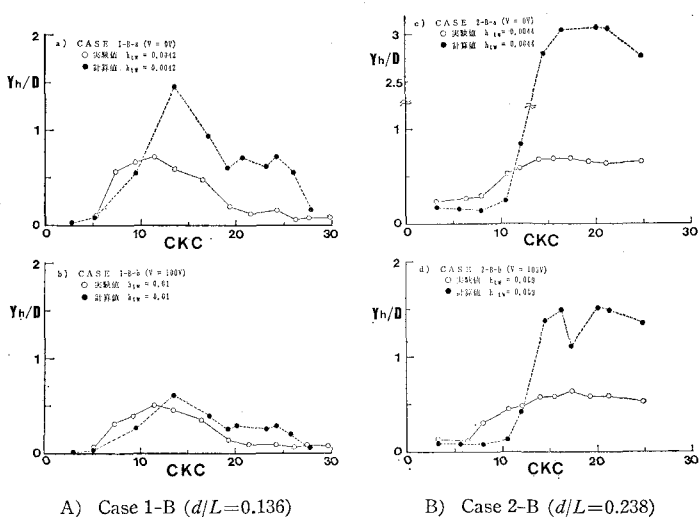


図-7 振動変位 Y_h/D と CKC の関係

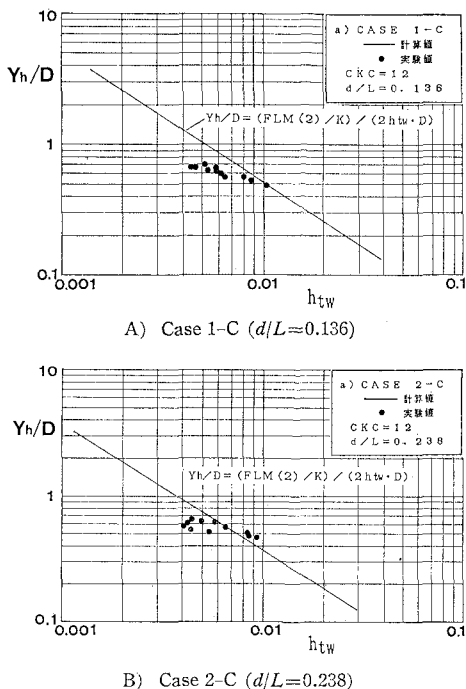


図-8 振動変位 Y_h/D と減衰定数 h_{tw} の関係

合, 波と振動円柱との相互作用による作用揚力の増加は, d/L 値による差はあるものの約 $6 < CKC < 10$ の範囲で起こることを示している. この理由としては, $CKC < 10$ の範囲ではまだ不安定な静止円柱からの円柱後流渦の円柱軸方向相関性が, 円柱の振動ともない増加したため考えられる. 一方, CKC が大きく(=約14)なると計算値は実験値よりも顕著に大きくなっている(Case 1-B-bを除いて). これは, CKC の増加にともない無視で

きなくなる作用揚力モーメントの 3 倍周波数成分 CLM (3) を計算値には考慮していないためと考えられる。

(d) 共振振動量と減衰定数との関係

図-8 は、 $f_w/f_{nw}=1/2$, $CKC=12$ の場合における、 Y_h/D と減衰定数 h_{wv} との関係を示したものである。 h_{wv} は、静水中での自由振動実験により得られた電磁減衰器への各作用電圧 V に対する h_{wv} と Y_h/D の関係結果(図-5 参照)より求めた値である。図中に示されている計算値は、(7)式に静止円柱に作用する FLM (2) を代入して得られたものである。図中、A) は $d/L=0.136$ の場合、B) は $d/L=0.238$ の場合である。相互作用効果が無ければ、実験値は計算値で示されるように、減衰定数 h_{wv} の -1 乗に比例するはずであるがそのような傾向はどちらのケースにおいても認められない。これは、振動する円柱に作用する揚力は、円柱振動量の関数として変化すること(波と円柱振動との相互作用効果)を示している。また、 Y_h/D が約 0.5 より小さくなると実験値は計算値より大きくなるようである。

4.3 局所波力

図-9 は、 $CKC=11$, $d/L=0.136$ の場合 (Case 3) における共振時と静止時の円柱に作用する局所波力の測定例を作用波の水位変化 η と一緒にそれぞれ示したものである。局所波力測定点での KC 数は 8.9 である。この図より、共振時には、進行波方向の局所波力 ΔFX は著しく増加しているが、揚力の局所波力 ΔFL の増加は少ないことが分かる。 ΔFL の値には、円柱振動による部分円柱の慣性力および付加質量力が含まれている。静水中での自由振動実験結果より推定されるこれらの力を取り除いたものを ΔFLV とし、その時間変化例を静止円柱時に作用する局所波力 ΔFLS と一緒に図-10 に示す。 ΔFLV は静止円柱に作用する局所揚力 ΔFLS より小さい。これは、Case 1, Case 2 において得られた“共振時に作用する揚力は必ずしも増幅されるわけではない”という興味深い現象と同じである。

5. おわりに

以上は、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検討したものである。解析に用いた、振動方程式、減衰定数、ならびに作用揚力の評価法等に対する詳細な検討を要するが、主要な結果として以下の 2 点が挙げられる。

1) 直円柱が作用揚力の 2 倍周波数成分と共振している場合、円柱振動と波の相互作用の結果、作用揚力が増加する KC 数の領域は、静止円柱に作用する揚力の 2 倍周波数成分が卓越する KC 数の全領域ではなく、一部の範

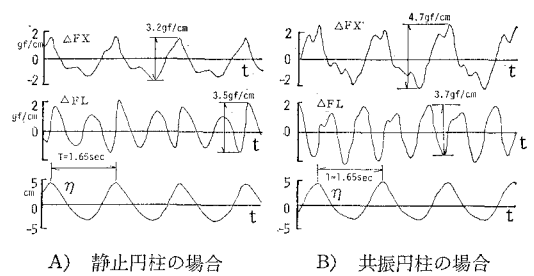


図-9 局所波力の時間変化例 (Case-3)

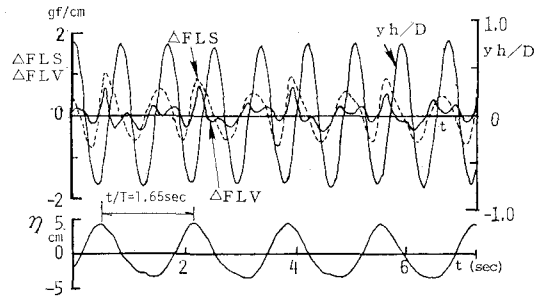


図-10 ΔFLS と ΔFLV の比較

囲 ($6 < CKC < 10$) のみである。

2) 共振時における円柱振動量は、波と円柱振動との相互作用効果の結果、減衰定数の -1 乗に比例しない。

最後に、図面の作成にご協力頂いた防衛大学校土木工学教室の白浜和樹技官に深く感謝致します。

参考文献

- 榎木 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・J. R. Chaplin (1985): 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, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 511~515.
- 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.
- Blevins, R. D. (1977): Flow-induced vibration, Van Nostrand Reinhold, 363 p.
- Isaacson, M. S. and D. J. Maull (1976): Transverse forces on vertical cylinder in waves, Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, Vol. 102, WW1, pp. 49~60.
- Ramberg, S. E. and O. M. Griffin (1976): Velocity correlation and vortex spacing in the wake of a vibrating cable, Journal of Fluid Engineering, March, pp. 10~18.
- Toebes, G. H. (1969): The unsteady flow and wake near an oscillating cylinder, Journal of Basic Engineering, September, pp. 493~505.