

振動流場で渦励振動している円柱に作用する波力特性について

林 建二郎*・桧 垣 太**・藤 間 功 司***・重 村 利 幸****

1. 緒 言

柱状な海洋構造物に作用する波力としては、波の進行方向に作用する進行方向波力 F_x とその直角方向に作用する揚力 F_y がある。揚力の大きさは進行方向波力に比べて小さい場合が多いが、その卓越周波数は進行方向波力の卓越周波数の整数倍である。その倍数値は、Keulegan-Carpenter 数 (KC 数) で規定されている。従って、構造物が揚力と共振する可能性は高く、石油掘削用ライザー管や海中トンネルのような柱状な弾性海洋構造物の設計においては、進行方向波力とあわせて作用揚力に対する応答振動 (渦励振動) 問題も十分に検討する必要がある。

渦励振動量の推定には、適用された振動方程式中の減衰定数および強制外力項となる波力の的確な評価が不可欠である。しかし、渦励振動している構造物に作用する波力は、振動する構造物と流れとの相互作用現象のため①放出渦強度の増加や②放出渦の構造物軸方向相関性の増加が生じる結果、構造物が振動しない場合より大きくなっている。従って、渦励振動量の評価をより精度良く行うには、渦励振動している構造物に作用する波力の増加特性を十分に把握する必要がある。

一方向流れ場で渦励振動している円柱に作用する流体力の増加現象に関しては多くの研究成果が得られているが (Blevins, 1977; Bearman, 1984), 波動場や振動流場で渦励振動している円柱に作用する流体力の増加現象については、研究例も少なくまだ十分に把握されていないようである (林ら, 1994)。

本研究は、波動場で渦励振動している柱状海洋構造物に作用する波力の増加特性に関する基礎的な研究として、振動流場で渦励振動している円柱に作用する波力の直接計測を試み、同円柱固定時の計測波力との比較・検討を行ったものである。

2. 実験装置及び方法

実験は、水平方向に正弦運動する振動台上に固定された鉄枠製ガラス張り水槽を用いて行った (振動流発生装置, 林ら (1993))。本装置の正弦振動は、ファンクション・ジェネレーターによって制御可能であり、振動流の振動周波数 f_a および振動振幅を任意に変化させることができる。実験装置の概略を図-1 に示す。

支点と引っ張りバネを用いて、水槽内に水平設置した外径 $D=3$ cm, 長さ=48 cm のアクリル製試験円柱は円振動をする。円振動の振動角度が小さい場合、水平方向 (X 方向) の振動成分は鉛直方向 (Y 方向) の振動成分に比べて無視できる。従って、本試験円柱は揚力方向となる鉛直方向にのみ振動するとみなせる。自由水表面の動揺を防ぎ、一様振動流としての流れ場を確保するために、水槽上面にアクリル製の上蓋を設けた。円柱は上蓋内に設けた幅 20 mm のスリット孔を通る 2 枚の端板 (長さ=40 cm, 幅=5 cm, 厚さ=2 mm) で支持されている。円柱に組み込んだ二分力計を用いて長さ=3 cm のセグメント円柱の単位長さ当りに作用する流れ方向 (X 方向) と揚力方向 (Y 方向) の流体力 ΔF_x , ΔF_y を計測した。実験に先立ち空中と静水中で減衰自由振動実験を行い、

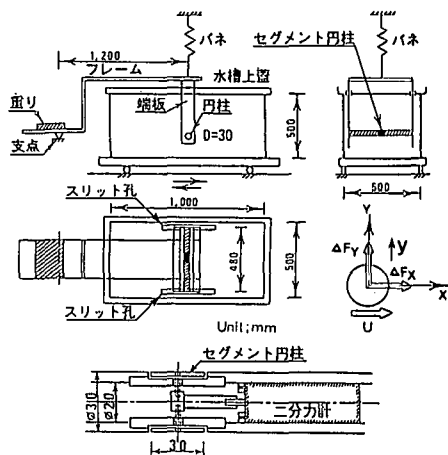


図-1 実験装置の概略

* 正 会 員 Ph. D. 防衛大学校助教授 土木工学教室

** 学生会員 防衛大学校大学院 理工学研究科

*** 正 会 員 工 博 防衛大学校助教授 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 実験ケース

Case	KC	f_{nu}/f_d	f_d (Hz)	β 値 ($=R_e/KC$)
V 1	10	1.40~2.70	0.380~0.700	437~806
V 2	17	1.90~6.80	0.150~0.550	125~458
V 3	25	2.30~9.80	0.100~0.450	82~370
V 4	40	3.20~12.10	0.080~0.320	62~246
V 5	2~20	2	0.515	593
V 6	2~32	3	0.344	287
V 7	4~40	4	0.258	188
V 8	10~40	5	0.206	156
V 9	12~40	6	0.172	130
V 10	14~40	8	0.129	102
R 1	10	1.40~2.70	0.380~0.700	285~525
R 2	17	1.90~6.80	0.150~0.550	110~404
R 3	25	2.30~9.80	0.100~0.450	68~305
R 4	40	3.20~12.10	0.080~0.320	54~217
R 5	2~20	2	0.515	593
R 6	2~32	3	0.344	260
R 7	4~40	4	0.258	195
R 8	10~40	5	0.206	156
R 9	12~40	6	0.172	117
R 10	14~40	8	0.129	89
空中固有振動数	$f_{na}=1.136$ Hz			
水中固有周波数	$f_{nw}=1.031$ Hz			
空中減衰定数	$h_{ta}=0.0031$			
水中減衰定数	$h_{tw}=0.015$ ($Y/D=0.2$)			
Mass Ratio 値	$m_e/(\rho D^2)=6.30$			
Reduced damping 値	$K_s=2m_e(2\pi \cdot h_{ta})/(\rho D_s)=0.245$			

試験円柱の空中および静水中における固有振動 f_{na} , f_{nw} と減衰定数 h_{ta} , h_{tw} を求めた。

本実験で行った実験条件を表-1 に示す。渦励振動量の支配パラメーター (林ら, 1985) である Mass ratio 値 ($m_e/(\rho D^2)$, m_e : 水中付加質量をも含む試験円柱の換算単位長質量, ρ : 水の密度) と Reduced damping 値 ($K_s=2m_e(2\pi \cdot h_{ta})/(\rho D^2)$) はそれぞれ 6.3 と 0.245 である。

Case V1~V4 では, KC 数を 10, 17, 25, 40 のそれぞれに固定し振動流周波数 f_d を変化させ, 渦励振動量および作用流体力の周波数比 f_{nu}/f_d に対する変化特性を調べた。

Case V5~V10 では, 作用揚力の第 2, 3, 4, 5, 6 次の周波数成分すなわち振動流周波数 f_d の 2, 3, 4, 5, 6 倍の周波数を持つ揚力成分のそれぞれを円柱の静水中における固有振動数 f_{nw} と一致させ, 共振時の渦励振動量および作用流体力の KC 数に対する変化特性を調べた。

Case R1~R10 では, 比較のために振動を許さないように固定設置した試験円柱のセグメント円柱部に作用する流体力 ΔF_x , ΔF_y を, Case V1~V10 の実験で使ったものと同じ振動流を用いてそれぞれ測定した。

水槽の振動変位 a および試験円柱の振動変位 y の測定には, ポテンシオメーターおよび光学式変位計を使用した。これらの出力信号は, 流体力 ΔF_x , ΔF_y の出力信号と共にサンプリング周波数 20 Hz または 50 Hz で AD 変換した。サンプリング個数は 2000~6000 とした。

3. 実験結果および考察

3.1 渦励振動円柱に作用する流体力の評価例

静水中で自由振動している円柱や一方向流れ場で渦励振動している円柱に作用する流体力の評価法としてモリソン式等を用いた解析結果が報告されている (松原ら, 1986; Sarpkaya, 1978)。本実験においては, 円柱の振動加速度を精度良く計測できなかったため, 今回は以下に示す流体力の大きさのみの評価を行った。

揚力の第 2 次周波数成分と円柱が共振している場合 (Case V5, $f_{nu}/f_d=2$) のセグメント円柱部に作用する流体力の評価例として $KC=7$ の場合の結果を図-2 に示す。比較のために, 同じ振動流中に試験円柱を固定させた場合の流体力の測定結果も同時に示す。図-2(a) は, 水槽変位 a と円柱の振動変位 y/D の時間変化を示す。図-2(b) は, 二分力計で計測した X 方向の流体力 ΔF_x の時間変化を示す。図-2(c) は, 二分力計で計測した Y 方向の流体力 ΔF_y と (1) 式で評価された流体力 ΔF_{ya} の時間変化を示す。

$$\Delta F_{ya} = \text{円柱振動時の } \Delta F_y - \Delta F_{ia} \dots\dots\dots (1)$$

円柱振動時の ΔF_y には, 質量力 ΔF_{ia} (=セグメント円柱の単位長さ当りの質量 $\times$ 円柱の振動加速度) が含まれている。円柱振動時の ΔF_y よりこの質量力を取り除いた ΔF_{ya} は, 振動円柱に作用する正味の揚力である。円柱の振動加速度計測を行っていないので円柱の振動変位を用いる簡便法 (林ら, 1994) により ΔF_{ia} の算定を行った。振動時の流体力 ΔF_x , ΔF_{ya} は共に円柱固定時よりも増加していることが認められる。

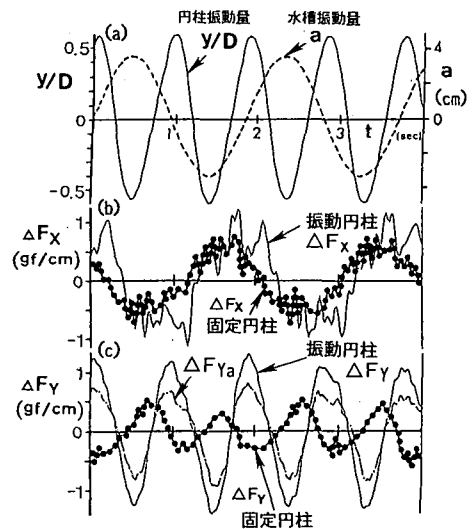


図-2 振動円柱と固定円柱に作用する流体力の比較例 ($f_{nu}/f_d=2$, $KC=7$)

3.2 渦励振動量と流体力の周波数比に対する変化特性

円柱の渦励振動量 y の時間変化波形の実効値と最大片幅振幅値を Y_{rms} と Y_{max} とする。作用流体力 ΔF_x , ΔF_y , $\Delta F_{y_{rms}}$ の時間変化波形の実効値を $\Delta F_{x_{rms}}$, $\Delta F_{y_{rms}}$, $\Delta F_{y_{rms}}$ とする。渦励振動時の円柱に作用する流体力 $\Delta F_{x_{rms}}$, $\Delta F_{y_{rms}}$ の増加率 M_x , M_{y_a} を (2), (3) 式で定義する。

$$M_x = \text{円柱振動時の } \Delta F_{x_{rms}} / \text{円柱固定時の } \Delta F_{x_{rms}} \quad (2)$$

$$M_{y_a} = \text{円柱振動時の } \Delta F_{y_{rms}} / \text{円柱固定時の } \Delta F_{y_{rms}} \quad (3)$$

KC=10 の場合における, 上記の円柱振動量, 流体力およびその増加率の周波数比 f_{nw}/f_d に対する変化特性を図-3 に示す。KC=10 の場合, 固定円柱に作用する揚力の卓越周波数は振動流周波数 f_d の2倍となるため, 共振点は $f_{nw}/f_d=2$ で生じると予想されるが $f_{nw}/f_d=1.93$ で生じている。この原因としては, 渦励振動時には円柱の水中付加質量が静水時より減少し, 円柱の固有振動数が静水中における固有振動数 f_{nw} よりも増加することが考えられる。流れ方向の流体力 $\Delta F_{x_{rms}}$ は共振点近傍において円柱固定時より大きく増加し, 増加率 M_x は最大値 1.8 を示している。揚力 $\Delta F_{y_{rms}}$ は, 共振点近傍では円柱固定時より若干増加しているが, その他の振動領域においては円柱固定時より著しく減少し増加率 M_{y_a} は 0.5 まで下がっている。

KC=17, 25, 40 のそれぞれにおける円柱振動量と流体力増加率の f_{nw}/f_d に対する変化を図-4 に示す。水平振動する架台に鉛直設置した円柱を静水中で正弦振動させた場合の渦励振動特性を調べた McConnell ら (1982) の KC=25 における結果を比較のために示す。

KC=17 の場合, 円柱振動量のピーク値は $f_{nw}/f_d=3, 4$,

5 の近傍で生じている。これら周波数領域では増加率 M_x , M_{y_a} は共に 1 以上となっている。 M_x は $f_{nw}/f_d=3$ で最大値 1.6 を, M_{y_a} は $f_{nw}/f_d=5$ で最大値 1.5 を示す。

KC=25 の場合, McConnell ら (1982) の結果と同様に円柱振動量は $f_{nw}/f_d=4, 5, 6$ でピーク値を示す。これら

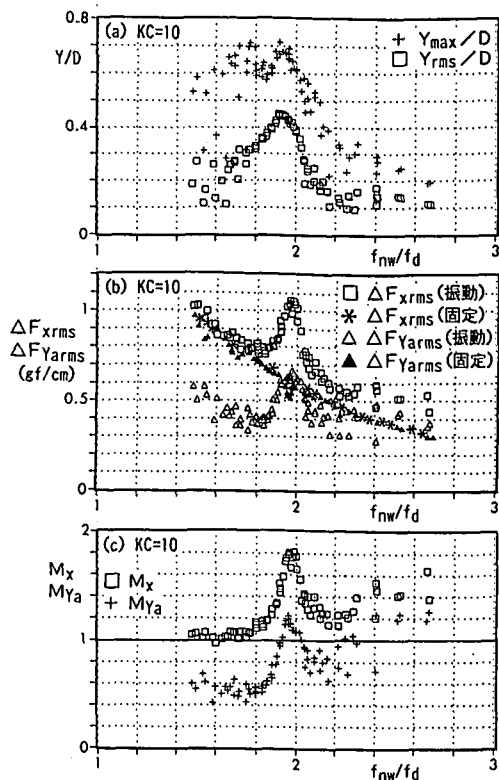


図-3 振動量、流体力および増加率の f_{nw}/f_d に対する変化特性 (KC=10 の場合)

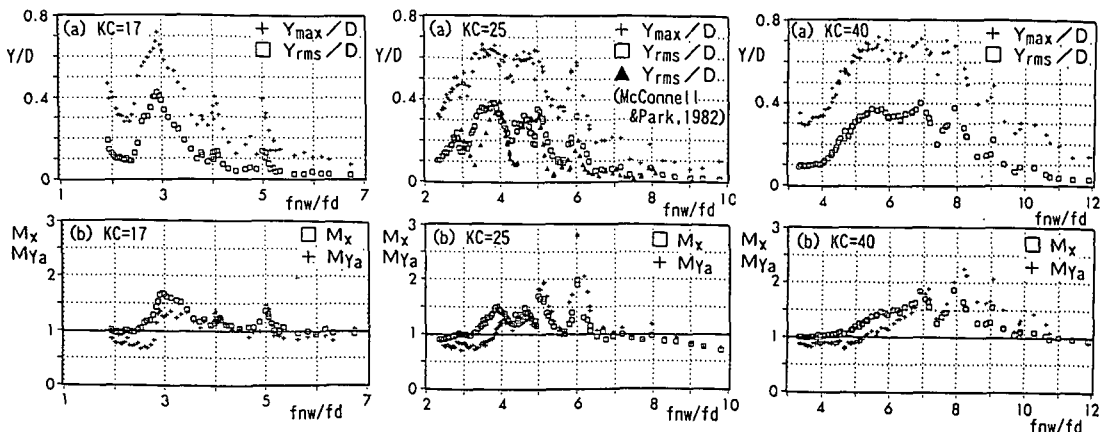


図-4 振動量と増加率の f_{nw}/f_d に対する変化特性 (KC=17, 25, 40 の場合)

周波数領域では M_x , M_{y_a} は共に 1 以上であり、その最大値 $M_x=2.8$, $M_{y_a}=2$ は共に $f_{nw}/f_d=6$ で生じている。

KC=40 の場合, $5 < f_{nw}/f_d < 7$ の領域で大きな円柱振動が生じ $f_{nw}/f_d=8$ と 9 でそのピーク値が認められる。 M_x , M_{y_a} も共に $f_{nw}/f_d=8$ と 9 で顕著なピーク値を示している。

3.3 渦励振動量および流体力の KC 数に対する変化特性

試験円柱が作用揚力の第 3 次周波数成分と共振している場合 (Case V6, $f_{nw}/f_d=3$) における, 前節 3.2 で定義した振動量, 流体力ならびに増加率の KC 数に対する変化特性を図-5(a)~(c) に示す。円柱振動量 $Y_{\max}/D$, Y_{rms}/D は, KC が 13 を過ぎると急増し KC=15 で最大値を示し, その後は KC 数の増加に伴い漸減している。流れ方向の流体力 $\Delta F_{x\text{rms}}$ は, KC が 13 を過ぎると急増し, $13 < KC < 22$ の領域で円柱固定時より増加している。増加率 M_x は, 円柱振動量が最大となる KC=15 の少し手前の KC=14 近傍で, 最大値 1.9 を示している。揚力 $\Delta F_{y\text{rms}}$ も, KC=13 を過ぎると急増し, $13 < KC < 20$ の領域で円柱固定時より増加している。増加率 M_{y_a} は, KC=15 近傍で最大値 2 を示している。

円柱が, 作用揚力の第 2 次, 3 次, 4 次, 5 次, 6 次の周波数成分とそれぞれ共振している場合 (Case V5~V10) の振動変位 Y_{rms}/D と増加率 M_x , M_y の KC 数に対する変化特性を, 周波数比 f_{nw}/f_d をパラメータとして図-6(a)~(c) に示す。これら図より以下のことが明らかである。

(a) 周波数比 f_{nw}/f_d が 2 から 6 へと大きくなるに従って, 大きな円柱振動が出現する KC 数の値は高くなり, その領域も広がっている。

(b) 円柱振動量は狭い KC 領域で急激に増加している。その KC 数領域は周波数比によって明確に異なっている。

(c) 周波数比が大きくなるに従って, M_x および M_{y_a} が大きくなる KC 数の値は高くなり, その領域も広がっている。

(d) 円柱振動量と M_x の KC 数に対する変化特性は良く類似している。従って M_x と円柱振動量との相関は高い。

(f) M_{y_a} は円柱振動量が大きくなる KC 数の領域で必ずしも大きな値を示していない。 M_{y_a} は, 急激に振動変位が増加するところつまり渦励振動量の変化率が大きくなる KC 数の領域で大きな値を示している。

$f_{nw}/f_d=2$ の場合, 渦励振動による円柱振動は KC=5 から生じ, 狭い KC 数領域 ($5 < KC < 8$) で急激に増加している。従って, 海中トンネル (国栖ら, 1993) の様に一般に KC 数が小さい大型水中構造物の設計において

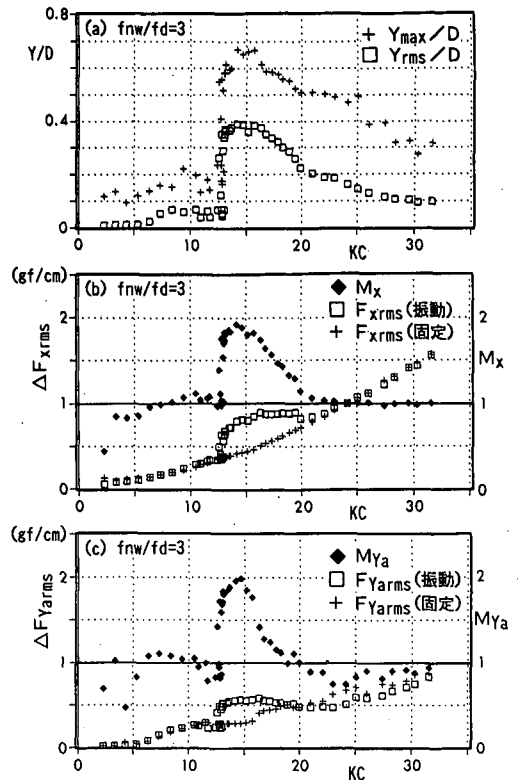


図-5 振動量、流体力および増加率の KC 数に対する変化特性 ($f_{nw}/f_d=3$ の場合)

も, 渦励振動問題に対する検討は必要である。

3.4 渦励振動量および流体力の V_r 数に対する変化特性

上記の振動変位 Y_{rms}/D と増加率 M_x , M_{y_a} の, (4) 式で定義される Reduced Velocity 値 (V_r) (Blevins, 1977) に対する変化特性を, f_{nw}/f_d をパラメータとして図-7(a)~(c) に示す。

$$V_r = U_m / (f_{nw} \cdot D) = KC / (f_{nw}/f_d) \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中の U_m は振動流主流の最大流速である。

$f_{nw}/f_d=2$ の場合, 広範囲な V_r 値の領域 ($3 < V_r < 8$) で振動量 Y_{rms}/D は大きくなっているが, $f_{nw}/f_d=3, 4, 5, 6$ の場合においては, $V_r=5.5$ 近傍の狭い領域のみで振動量は大きくなっている。従って, 振動変位の V_r 値に対する変化特性においては, 周波数比の影響は $f_{nw}/f_d=2$ の場合を除くと明確に認められない。 M_x と V_r 値の関係においても $f_{nw}/f_d=2$ の場合を除くと周波数比の影響は明確には認められず, 大きな M_x 値が出現する領域は $V_r=5$ 近傍に限られている。同様に M_{y_a} は, $f_{nw}/f_d=2$ の場合には $V_r=2.8$ 近傍で顕著なピーク値 $M_{y_a}=6$ を示しているが, $f_{nw}/f_d=3, 4, 5, 6$ の場合には $V_r=5$ 近傍で M_{y_a} は 3 以下のピーク値を示している。

これら振動量および増加率が大きくなる KC 数の領域

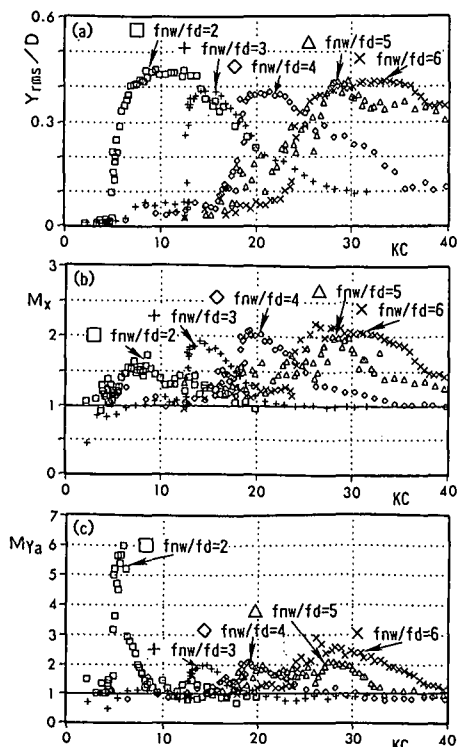
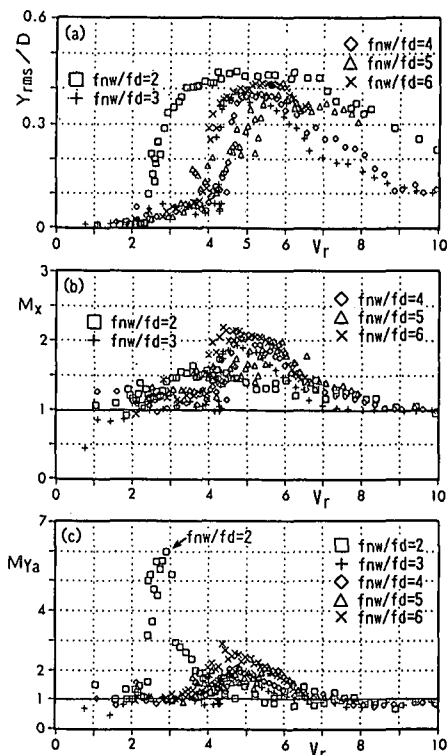


図-6 振動量と増加率の KC 数に対する変化特性

図-7 振動量と増加率の V_r 値に対する変化特性

は、周波数比によって異なっていたが(図-6 参照), V_r 値との関係では、その領域は $V_r=5$ 近傍である程度ままとまっている。これは、 V_r 値は一方流れ場のみならず振動流れ場においても、渦励振動量および流体力の増加特性を支配する重要なパラメーターであることを示している。

4. 結 論

振動流れ場における円柱の渦励振動特性および渦励振動円柱に作用する流体力の特性を調べた。限られた実験条件の範囲ではあるが、以下の主要な結果が得られた。

(1) 渦励振動量および渦励振動円柱に作用する流体力の増加現象は、周波数比 f_{nw}/f_d (f_{nw} : 円柱の固有振動数, f_d : 振動流周波数) と KC 数で規定されている。

(2) Reduced Velocity (V_r) 値は、周波数比 $f_{nw}/f_d=2$ の場合を除くと振動流れ場でも一方流れ場の場合と同様に渦励振動特性を規定する重要なパラメーターである。

(3) 振動流れ場においては KC 数が 5 以上になると渦励振動が生じる。

参 考 文 献

- 国栖広志・水野 普・水野雄三・山下俊彦・佐伯 浩 (1993): 高波浪下における水中トンネルの動揺および流体力特性, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 881-885.
- 林建二郎・J.R. Chaplin (1985): 波動場における直円柱の渦励振動について, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 633-637.
- 林建二郎・藤間功司・重村利幸・荻原洋聡 (1993): 振動流中における円柱の渦励振動特性と流れとの相互作用現象, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 841-845.
- 林建二郎・松垣 太・藤間功司・重村利幸 (1994): 波動場で渦励振動している直円柱に作用する波力の増加現象について, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 841-845.
- 松原雄平・野田英明・大島祐二 (1986): 海中係留円柱に作用する波力に関する研究, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 536-540.
- Bearman P. W. (1984): Vortex shedding from oscillating bluff bodies, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 16, pp. 195-222.
- Blevins, R. D. (1977): Flow-induced vibration, Van Nostrand Reinhold, 363p.
- McConnell, K. G. and Y. S., ParK (1982): The Response and Lift-Force Analysis of an Elastically-Mounted Cylinder Oscillating in Still Water, Proc. of 3rd BOSS Conference, Vol. 2, pp. 671-680.
- Sarpkaya, T. (1978): Fluid forces on oscillating cylinders, Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol. 104, WW4, pp. 275-290.