

浮魚礁に作用する波力に関する研究

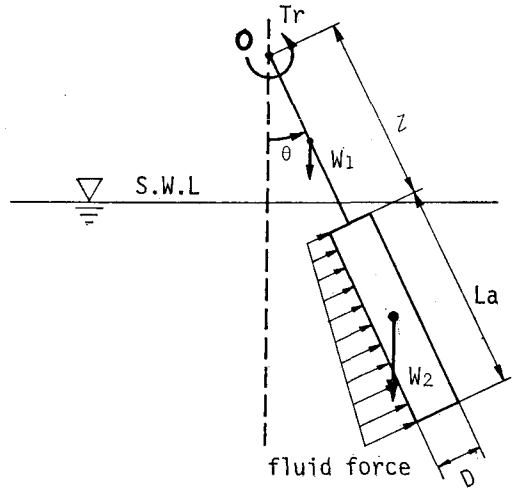
松原雄平*・野田英明**

1. 緒 言

現在、わが国の沿海域には各種の増養殖施設が設置され、沿岸漁業の漁獲量の増大ならびに生産性の向上に、大きく貢献しつつある。浮魚礁は、この増殖施設の一つであり、比較的大水深に係留される水中浮遊式の魚礁施設である。

従来より著者らは、この浮魚礁施設の波による動的応答問題を理論的ならびに実験的に検討し、波の作用により施設が大きく動揺すること、また係留索には大きな張力が発生することなどを明らかにしてきた^{1),2)}。しかし、このような海中係留構造物を設計しようとする場合、まず第一段階として構造物に作用する波力の正確な見積り、とくに構造物の抗力係数および付加質量係数をどのようにとるかということが問題である。従来からこの問題は多くの研究者により波動場あるいは振動流場において、直立円柱や水平円柱を対象として多岐にわたる研究がなされてきた^{3),4)}。しかし従来の方法では、水粒子速度あるいは水粒子加速度の時空間分布の詳細を知ることおよび、波力の測定精度をきわめて高くすること等の要件を満たす必要があり、必ずしも満足すべき結果が得られているとはいえない。また、小口径の海中係留円柱に対して、同様の目的でなされた研究は少なく、現在まで十分な資料の蓄積がなされていないようである。

そこで本研究は、静水中で円柱魚礁モデルに減衰自由振動を与え、その非定常運動の軌跡より円柱の抵抗係数 C_D および付加質量係数 C_a を算定するとともに、従来、波動場、振動流場で得られている結果と比較して、本研究で明らかにした波力係数算定方法の妥当性を検証しようとするものである。本研究で検討する波力係数算定方法は、波動場における実験と比較し、(1) 浮体変位量の測定結果のみで C_D , C_a を算定することができ、算定精度の向上が期待でき、(2) 比較的大きい値のレイノルズ数が容易に得られること等の利点を有している。



図一1 座標系および浮体模式図

2. 理論的検討

2.1 係留円柱の減衰振動方程式

図一1は、長さ l の剛な支持棒と長さ L_a 、直径 D の円柱を連結し、支持棒の一端を点 O で1点係留した振動系と座標系を模式的に示したものであって、円柱は常に静水中にあるようにしてある。さらに、円柱の振動により、円柱が受ける流体力および外力をも示してある。この円柱に、一定の初期変位を与えると、円柱は振動をくり返しながら、次第にその変位は減衰していく。円柱の運動が2次元平面内に限定されるとすると、運動方程式は、 O 点に関するトルクのつり合いより導かれる。すなわち、円柱とともに O 点を中心として回転する系の慣性モーメントを I とし、流体力としてモリソン式を参照すれば、

$$I\ddot{\theta} = -\{W_1 l + (\rho_0 - \rho)gV_2(l + L_a/2)\} \sin \theta - \frac{\rho}{8} C_D \{(l + L_a)^4 - l^4\} D \dot{\theta} |\dot{\theta}| - C_a \rho V_2 \{l^2 + lL_a + L_a^2/3\} - T_T \theta \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここに、 ρ_0 , ρ : 円柱および水の密度、 W_1 : 支持棒重量、 V_1 , V_2 : 支持棒および円柱の体積、 C_D , C_a : 円柱の抗力係数ならびに付加質量係数、 T_T : 点 O にお

* 正会員 工修 鳥取大学助手 工学部海洋土木工学科
 ** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部海洋土木工学科

る摩擦による減衰運動を表わす定数である。また、 $\cdot$ 印は時間に関する微分演算を表わす。式(1)を整理すると、点0に関する円柱の角運動方程式が得られる。すなわち、

$$(I + C_a A) \ddot{\theta} + C_D B \dot{\theta} | \dot{\theta} | + T_r \dot{\theta} + C \sin \theta = 0 \quad \dots (2)$$

ここに $A = \rho(l^2 + lL_a + L_a^2/3)V_2$

$$B = \rho(l + L_a)^4 - l^4 \cdot D/8$$

$$C = (\rho_0 - \rho)gV_2(l + L_a/2) + \rho_0 gV_1 l/2 \quad \text{である。}$$

式(2)に示されるように、円柱の運動は、静水中における剛体振子の減衰振動方程式で表わされる。しかし、粘性による減衰項ならびに復元項が非線型となっているため、解析的に解くことは困難であるため、浮体の変位および点0における摩擦による減衰定数の算定にあたっては、4次のルンゲ・クッタ法を用いて数値解を求めた。

2.2 C_D , C_a の算定方法

従来より実測波力をもとに C_D および C_a の各係数を算定する方法はいくつか提案されているが、その代表的なものとして

(1) C_D および C_a の値が時間的に変化しないものとして水粒子速度と水粒子加速度の位相差を利用する方法、

(2) C_D および C_a の値が時間とともに変化するものとし、異なる2時刻における波力の測定値より連立方程式の解として求める方法、が挙げられる。ここでは、まずはじめに、上記の二方法を、式(2)に適用して C_D および C_a が算定できることを示そう。

静水中を振動する円柱浮体に第1の方法を適用すると、 C_D および C_a は、円柱の角速度 $\dot{\theta}$ および角加速度 $\ddot{\theta}$ の位相差から算定されることになる。すなわち C_D の値は円柱の角加速度 $\ddot{\theta}$ が0となる位相で式(2)に $\ddot{\theta}=0$ を代入して得られた次式

$$C_D = -(C \sin \theta + T_r \dot{\theta}) / (B \dot{\theta} | \dot{\theta} |) \quad \dots (3)$$

から算定される。一方、 C_a の値も同様にして $\dot{\theta}=0$ となる位相で、式(2)に $\dot{\theta}=0$ を代入して得られる次式

$$C_a = -(C \sin \theta / \ddot{\theta} + I) / A \quad \dots (4)$$

で算定されることになる。

一方、第2の方法で式(2)から C_D , C_a を算定するためには、異なる時刻 $i=t$ および $i+1=t+dt$ における θ , $\dot{\theta}$ ならびに $\ddot{\theta}$ の値を式(2)に代入して、この dt 間で、 C_D および C_a は一定であるとして、二つの運動方程式を連立させて解くことになる。いま時刻 $i=t$ における角変位置、角速度ならびに角加速度をそれぞれ θ_i , $\dot{\theta}_i$, $\ddot{\theta}_i$ で表わすと、 C_D , C_a は

$$C_D(i) = \frac{1}{B} \left\{ \frac{T_r(k_1 f_0 - k_0 f_1) + C(f \cdot s_1 - f_1 s_0)}{f_1 \cdot h_0 - f_0 \cdot h_1} \right\} \quad \dots (5)$$

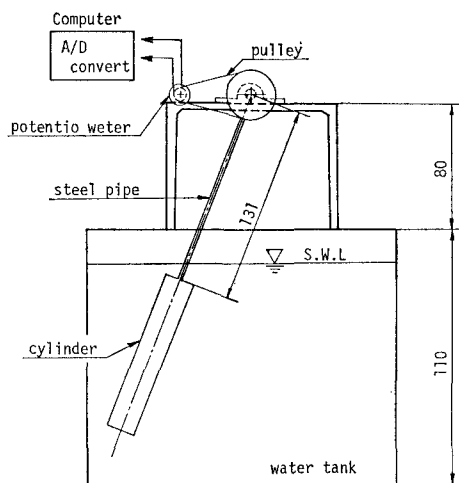


図-2 振動測定装置

$$C_a(i) = \frac{1}{A} \left\{ \frac{T_r(k_1 h_0 - k_0 h_1) + C(h_0 s_1 - h_1 s_0)}{f_0 h_1 - f_1 h_0} \right\} - \frac{I}{A} \quad \dots (6)$$

となる。ここに、 $f_n = \dot{\theta}_{n+i}$, $k_n = \dot{\theta}_{n+i}$, $h_n = \dot{\theta}_{n+i} | \dot{\theta}_{n+i} |$, $s_n = \sin(\theta_{n+i})$ ($n=0, 1$) である。

3. 実験装置および方法

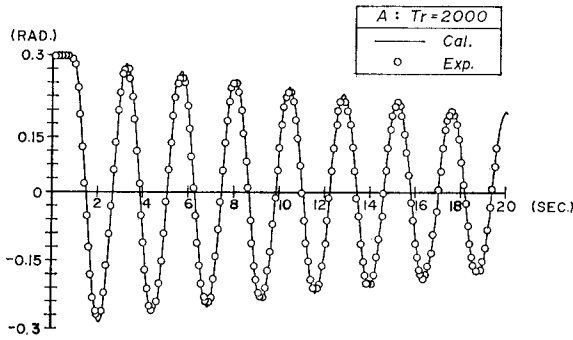
実験は、図-2に示すような幅0.6m、深さ1.1mの鋼製水槽の上部に模型懸架台を設置して行なった。模型懸架台上には、直径5mmの鋼棒を介して円柱模型と連結された回転軸、軸受け、およびプーリーを介して回転軸と連動するポテンシオメータが設置されている。特にポテンシオメータの分解能は実験精度を大きく左右するため、高分解能のポテンシオメータを用いた。水中における円柱の振動は、最終的にポテンシオメータの電圧出力に変換され、マイクロコンピュータを用いて、A/D変換処理を施した後解析した。A/D変換時のサンプリング周波数は10Hzとした。

実験に用いた4種類の円柱は、いずれも鋼鉄製の中実円柱であり、表面を塗装したものである。表-1に、各円柱の諸元を示す。

実験では、まず減衰定数 T_r の値を算定するために空気中における円柱の減衰振動の測定を行なった。

表-1 模型円柱諸元

諸元	円柱名	A	B	C	D
半径 $D/2$ (cm)		3.0	4.0	3.6	4.8
長さ L_a (cm)		30.0	40.0	18.3	24.3
自重 W (gf)		1 167	6 903	1 464	3 436
慣性モーメント ($g \cdot cm^4$)		37 595.3	92 483.0	30 464.2	73 164.0
T_r ($g \cdot cm^2/sec$)		2 000	3 000	2 000	2 100



図—3 空気中における円柱変位量の時間的変化

図—3 は、その実験結果の一例であって、円柱 A に対する角変位量の時間的変化 (丸印) を示したものである。なお、図中の実線は、式 (2) において、 $C_D=C_a=0$ において T_r の値を試行錯誤的に変え、実験値と最も良く一致する T_r の値に対して得られた計算結果である。図からわかるように、 $T_r=2000$ とした場合、計算値と実測値とはきわめて良く対応している。他の円柱に対しても同様の計算を行ない、減衰定数を定めた。これらの結果も表—1 に合わせて示されている。

4. 実験結果の検討および考察

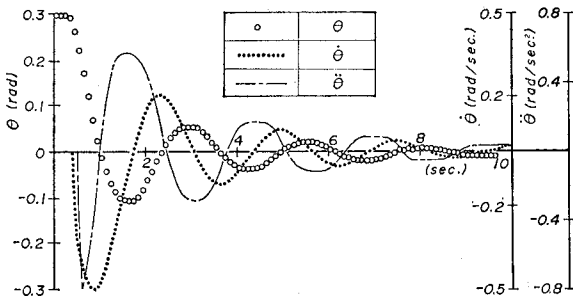
4.1 静水中における円柱の減衰振動

図—4 は、円柱 C の静水中における減衰自由振動より測定された角変位量 θ (図中丸印) ならびに角変位量から算定された角速度 $\dot{\theta}$ (点線)、角加速度 $\ddot{\theta}$ (一点鎖線) の時間的変化を示したものである。なお、 $\dot{\theta}$ および $\ddot{\theta}$ の算定には、前進差分である次式を用いた。すなわち

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_i &= (\theta_{i+1} - \theta_i) / \Delta t \\ \ddot{\theta}_i &= (\theta_{i+1} - 2\theta_i + \theta_{i-1}) / \Delta t^2\end{aligned}\quad \cdots \cdots (7)$$

であり、ここに、 Δt : サンプリグ間隔 (=0.1 sec) である。

さて、同図より水中における円柱の減衰振動は空気中のそれと比較して減衰がきわめて大きく、振動開始後、三周期経過後には、円柱変位量は微小となることがわかる。すなわち、円柱の減衰振動の最初の数周期が解析対



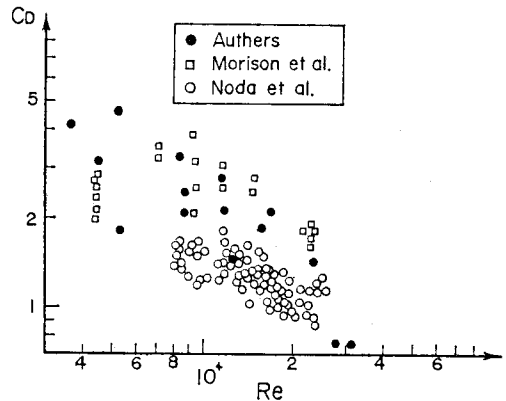
図—4 静水中における円柱変位量の時間的変化

象となり、この間の円柱の振動現象がきわめて重要であることを示している。一方、円柱の角変位量から算定される $\dot{\theta}$ および $\ddot{\theta}$ の時間的変化は、円柱の変位量の時間的変化とよく対応しており、上記の方法で、 $\dot{\theta}$ および $\ddot{\theta}$ が比較的精度良く算定されることがわかる。

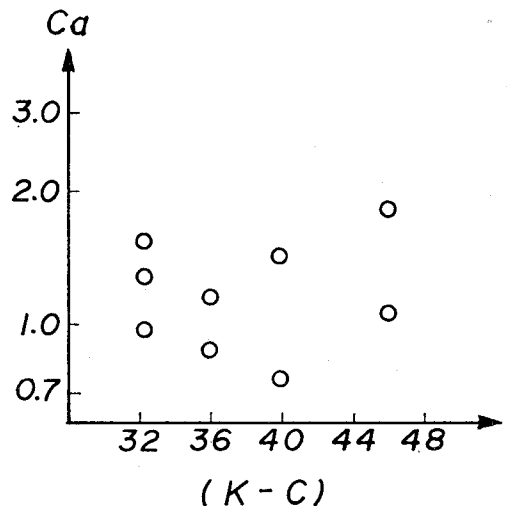
4.2 $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$ の位相差による C_D および C_a の算定結果

図—5 は、式 (3) より算定された抗力係数 C_D とレイノルズ数 Re の関係を示したものである。横軸の Re 数に含まれる速度は、円柱の角速度と点 0 からこの振動系の重心までの距離を用いて算定したものである。この図より、 C_D の算定結果は、ほぼ従来の実験結果と一致すること、また Re 数が減少するにつれて C_D の値が大きくなることがわかる。

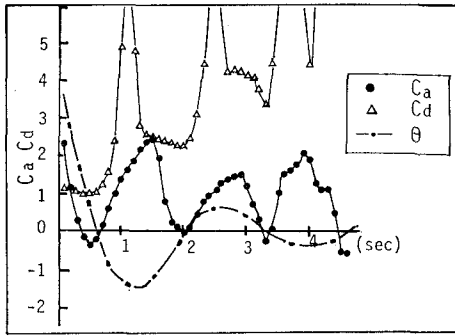
図—6 は、同様にして式 (4) より算定された付加質量係数 C_a と $K-C$ 数の関係を示したものである。 $K-C$ 数は、円柱の最大角速度から算定された値を用いて表わし



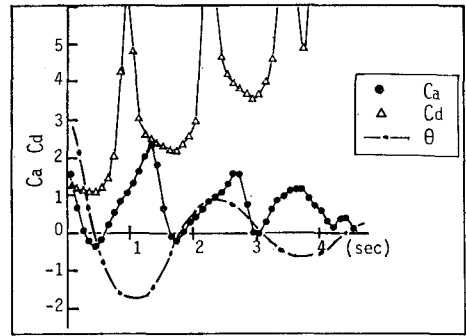
図—5 C_D の算定結果と Re 数の関係



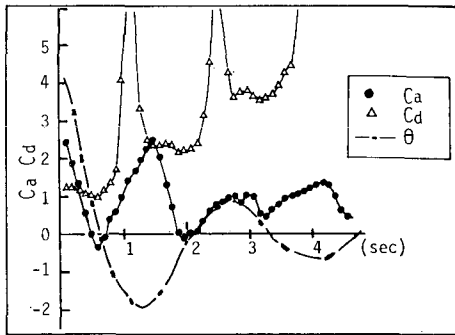
図—6 C_a の算定結果と $K-C$ 数の関係



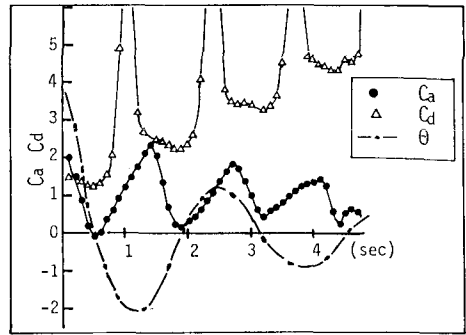
(a) (円柱 A)



(c) (円柱 C)



(b) (円柱 B)



(d) (円柱 D)

図-7 C_D および C_a の時間的変化

た. 同図より, 算定された C_a の値は, $K-C$ 数の変化にかかわらず, $0.7 \sim 2.0$ の範囲にばらついている. 以上のような C_D , C_a の算定値のばらつきは, θ および $\dot{\theta}$ 算定誤差とともに, 円柱の両端面における流れのはく離も含まれると考えられるがこうした算定方法では精度の向上はそれほど期待できない.

4.3 C_D , C_a の時間的変化に関する検討

図-7 の (a), (b), (c) および (d) は, それぞれ円柱 A, B, C および D の静水中における減衰振動から算定された C_D ならびに C_a の時間的変化を示したものであり, 円柱の角度 θ の時間的変化 (図中 1 点鎖線) もあわせて示してある. これら一連の図は, 第 2 の方法 (式 (5) および式 (6) 参照) によって算定されたものであって, いずれの円柱の実験結果も, C_D の値は, 振動開始直後 $C_D \approx 1.0$ となりその後円柱の変位が最少値となる位相で急激に増大する. その後, C_D の値はいったん減少して $2 \sim 3$ を示すが, θ が極大となる位相で再び増大すること, さらに, この変化をくり返しながら, C_D の値は, 漸増していくことなどがわかる. θ が極大, 極小値となる位相における C_D の値の急激な増大は, 円柱の角速度 $\dot{\theta}$ の値が, 0 となる位相に対応していること, ならびに, C_D の値が漸増するのも, 同様に, 振動回数の増加とともに, $\dot{\theta}$ の値が減少していくことによるものである. 一方, C_a の時間的変化は, C_D と対照的に, 円柱の

運動と対応して, ほぼ周期的に増減をくり返し, 減衰の一周期間に 2 つのピークが現われていることがわかる. また, すべての実験結果において, C_a の極大値は, 円柱の変位量 θ が, 最大値あるいは最小値をとった直後の位相で現われること, 最初の C_a の極大値は, 約 2.0 程度であるが, 時間とともに 1.0 に近くなることが認められる. さらに, 円柱の角速度の値が, ほぼ 0 となる位相においては, 付加質量係数の値も, 0 に近い値をとることがわかる.

林らは, 波動場において, 前述の (2) の方法で, 円柱の抗力係数および慣性力係数 ($1+C_a$) の値を算出している. また, Sarpkaya⁵⁾ は同様の方法で, C_D ならびに C_a を算定しているが, ここで得られた結果とその傾向は一致している. しかし, C_a の値については, 本研究で算定した値が若干大きく, これが計算過程における誤差によるものか, 円柱の形状特性によるものか現段階では明確ではない. この点については, 今後, さらに計算精度を向上させて, より広範な実験結果をもとに検討すべきであろう.

5. 結 語

本論文では, 浮魚礁等の海中構造物の波力特性を明らかにするために, 静水中における円柱の減衰自由振動から波力算定係数を推定する方法を導くとともに, その算

定結果について検討を加えた。特に、 C_D 、 C_a の算定方法として時間的に一定であるという前提の下で算定する方法と、 C_D および C_a を時間の関数として算定する方法の2方法を用いて算定結果の妥当性の検証を行なった。その結果、本文で導いた方法で、波動場での実験結果とほぼ同程度の精度で C_D および C_a を算定できること、さらに、 $K-C$ 数や R_e 数のかなり広範囲にわたり実測が可能であることが明らかとなり、海中構造物の動的応答特性の解明にきわめて有効であることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 松原雄平・野田英明：浮魚礁に関する研究，第 28 回海岸工学講演会論文集，pp. 436~440, 1980.
- 2) 松原雄平・野田英明：浮魚礁の実用化に関する研究，第 29 回海岸工学講演会論文集，pp. 496~500, 1983.
- 3) 林建二郎・竹内俊雄：波動場における抗力係数，質量係数の時間変化について，第 25 回海岸工学講演会論文集，pp. 362~366, 1978.
- 4) 重村利幸・西村建二・竹内俊雄：傾斜円柱に作用する波力について，第 25 回海岸工学講演会論文集，pp. 367~371, 1978.
- 5) Sarpkaya, T.: Mechanics of wave force on offshore structure, 651 p., Litton Educational Publishin Inc., New York, 1981.