

海・潮流発電のための潜水中空直方体に作用する波力特性

室蘭工業大学 正会員 近 藤 俣 郎
同 上 学生員 平 田 佳 嗣

【1】はじめに

今日における世界的な石油依存型のエネルギー需要形態は、やがてエネルギー源の枯渇化と価格の上昇化などによりさらに長期的に確保できる新たなエネルギー資源の開発利用を目指す必要へとせまられている。石油代替エネルギーの一つとしてはクリーンエネルギーである海洋エネルギーが近年注目されており、幸いわが国は島国であるということからもその利点を生かした海洋エネルギー利用の開発が今後の脱石油対策として期待されている。本研究ではその中でも従来ほとんど研究対象とされていなかった海・潮流エネルギー取得のために使用する潜水型構造物を取り上げ、係留問題を主眼にその動的な特性を明らかにしようとした。これは、きびしい環境条件によって不規則に動揺する潜水構造物を安全かつ経済的に海中に位置させることができるようなシステムを開発することを目的としたためである。実験における係留方法は固定式と一点係留式の二種類とし、固定式は物体に作用する流体力による耐久性や動揺などを知るための基礎的なもの、また一点係留式は動揺を伴い波の進行方向に開口部が追従できるものを想定した。このように潜水構造物の動的特性を明らかにすると同時に、併せて数値解析を行なって今後の実用化に向けた基礎的な資料を得ることを目的とする。

【2】潜水構造物と係留問題

海・潮流エネルギー取得のための装置の一つとして考えられる潜水型の構造物に関する研究は、波浪及び流れによる構造物の動揺に対して一般的な浮体に対する解析と比較するとほとんどなされていないのが現状であり、波浪・温度差・潮汐エネルギーが既に実海域での試験・実用運転がなされているのに比べると依然として基礎的な段階である。このもっとも大きな理由は、流速の変動に対して一定の出力を出し得るシステムの必要性から、小さな密度のエネルギーを取得するためにどうしても大規模な構造物を流水中に設置しなければならず、波力に対抗できる係留方法や据え付け部分の耐久性などが主たる問題点とされてきたためである。

潜水型構造物には一般的に浮体と同様な固定式と可動式が考えられる。一般に固定式は設置水深が浅いところに適するが、半永久没水型のためメンテナンス上の問題や地震・洗掘などの地盤対策上の問題がある。それに対し、可動式は固定式より設置水深を深くとることができ、構造的にも容易である。また可動式の主なものとしては多点係留と一点係留があり、一般には多点係留がよく使用されている。これは、多点係留の方が風や波浪、流れによる物体の動揺を拘束し低く抑えることが可能となるためであるが、発電の立場に立つならばより多くのエネルギーを得るために流れの方向に対応できる一点係留が最適であろう。ただし一点係留は波の影響を受け安く動揺が激しくなるため耐久性などに問題があり、構造物の動揺を最小限に食い止めることができるようなシステムを設計することが必要となる。

【3】実験の概要

〔1〕模型と実験方法

本実験では潜水型の縮尺模型を用いてその係留システムの設計の基礎となるべき構造物の動特性を調べるものとした。実験に用いた潜水型模型は長さ0.7 m、幅0.35 m、高さ0.1 mを外形とする矩形物体を基本とし、外殻の材質はアクリル製として内部に発泡スチロールを充填した。図-1に示すような内部をくり抜いた特殊な内部形状を有する対称型と非対称型の二つの中空型模型を使用した。これらは内部を自由に水が移動できるものである。それら

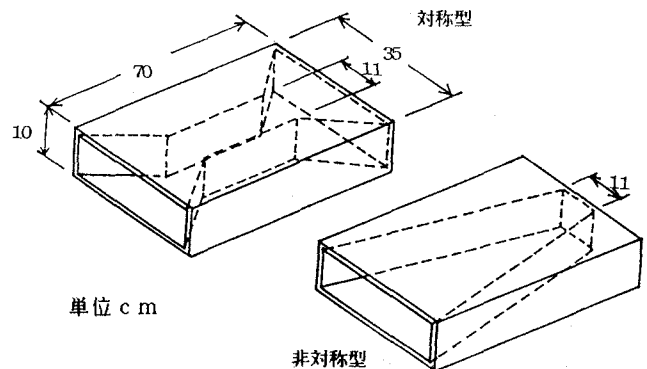


図-1 中空型模型の寸法図

と比較するために、内部全体を充填した不透水性な矩形型についても実験した。模型寸法や実験条件等は実海域での使用を考慮しフルード相似則に従う縮尺1/50を想定し実験を行なうものとした。

実験方法は、二次元造波水路に潜水模型を図-2、図-4のように設置し、模型に対する波長の比である B/L を0.3~1.2(周期は0.63~1.2s)と変化させて行う。波高は6cm、静水時における水深を40cm、静水時の水面から物体重心までの深さを15cmと一定にしてそれぞれの模型に作用する流体力を一点係留と固定式のそれぞれについて測定する。固定式は鉛直力と水平力に分けて行い、さらに鉛直力については前肢と後肢に分けて測定を行なうことにした。また、一点係留については併せて動揺測定も行い、運動は水平(SURGING)・鉛直(HEAVING)・回転(PITCHING)の3モードで、ここでは三次元要素であるSWAYING, ROLLING, YAWINGは考えないものとした。

(2) 実験装置

1) 一点係留式

模型の係留点の位置はそれぞれ静水時での水中におけるつり合い重心であり、係留索には保湿状態で破断強度が46kgのテトロン道糸を使用した。また係留索中央部には図-3に示すようなリング型の歪測定器を取り付けた。この測定器はリングの両側に歪ゲージ(6M82)を張り付けたもので、材質は応力に対して復原力の大きい真鍮を用いた。また、動揺の測定にはビデオカメラを用いて行なった。

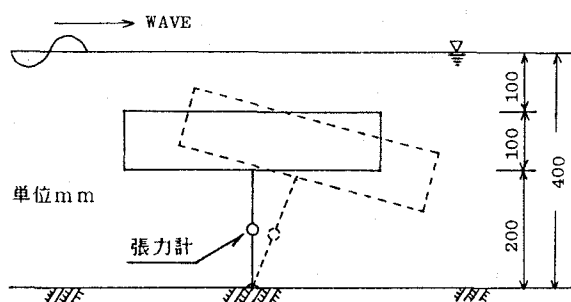


図-2 一点係留式潜水物体

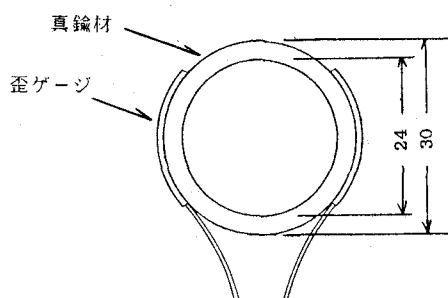


図-3 円形歪測定器(張力計)

2) 固定式

図-4に示す四点固定を施した装置を用いた。二次元造波水路に設置し、係留部であるL型円柱の鉛直・水平部分に、一箇所につき二個のずつ歪ゲージをそれぞれ二箇所取り付け、鉛直力を水平円柱部で、水平力を鉛直円柱部においてそれぞれの流体力を測定した。具体的には図-5に示すように、一本の円柱二箇所にそれぞれ二個のゲージを張り付け、ゲージ位置における円柱歪の差を電圧差として出力させるものである。具体的に原理を説明すると、図-5のようなホイーストブリッジ回路に結ばれた各ゲージの初期抵抗を $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ とし、外力の作用による抵抗変化を $\Delta R_1=\Delta R_2=\Delta R_3=\Delta R_4=\Delta R$ とするとAC, AD間に流れる電流は、

$$i_{AC} = \frac{E}{(R + \Delta R) + (R - \Delta R)} = \frac{E}{2R} \quad \text{----- (1)}$$

$$i_{AD} = \frac{E}{(R + \Delta R) + (R - \Delta R)} = \frac{E}{2R}$$

したがって、AB間の電位差をEとすると、CD間の電位差は、

$$V_{CD} = V_{AC} - V_{AD} = \frac{E}{2R} (\Delta R - \Delta R) \quad \text{----- (2)}$$

となる。これが外力によって生じる電位差である。しかし実験においては水平円柱部に出力されてはいけな水平力が検出されてしまい、そのためこの影響を防ぐための補正作業を綿密に行なうことにした。

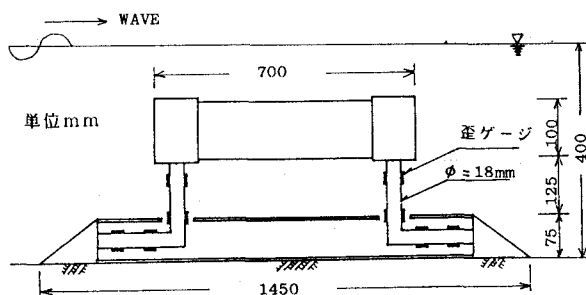


図-4 固定式潜水物体

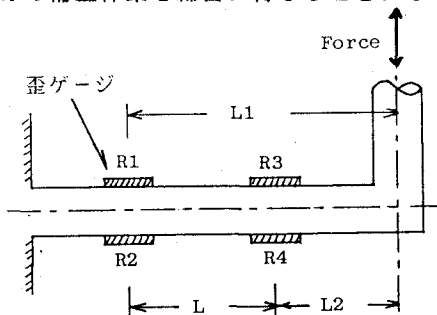


図-5 二点間歪による外力の検出方法

【4】数値解析

固定式の潜水構造物については境界要素法を用いて理論解析を行なった。流体は微小振幅波運動を行なう非圧縮・非粘性の完全流体と仮定し、図-7に示すように静水面に原点、水平方向にx軸、鉛直上方にz軸をとる。いま、水深が一定でhの海域に潜水物体が存在し、一定の周波数の正弦波が入射してこれが構造物内域に作用するものとする。ただし、装置の円柱部分にかかる波力は微小であるとみなし無視した。

(1) 基本方程式

流体運動を支配する速度ポテンシャル $\phi(x, z, t)$ は質量保存則により次の2次元ラプラス方程式を満足する。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{----- (3)}$$

さらに運動量保存則により、

$$(u, v) = \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad \text{----- (4)}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{p}{\rho} - g z$$

ここで、u, vは水平・鉛直方向の流速成分で、pは流体圧力、 ρ は流体密度である。

(2) 境界条件

1) 自由表面での条件

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{----- (5)}$$

2) 水底での条件

$$\phi_v = 0 \quad \text{----- (6)}$$

ϕ_v ; 法線方向微分

v ; 法線方向ベクトル

3) 物体表面での条件

$$\phi_v = 0 \quad \text{----- (7)}$$

(3) 境界要素法の適用

図-7に示すような波動場に境界要素法を適用して潜水構造物に作用する流体の圧力を基本方程式の元で解析する。潜水構造物の場合物体への水の浸入がないため、物体表面が一つの境界面となる。つまり、波動場領域と物体表面の二つの境界面（外表面と内表面）が存在することになる。図-7においてABA'B'は波動場（外表面）、CDC'D'は物体表面（内表面）であり、AA'は自由表面、BB'は水底に対応している。いま、境界線をN個の小要素に分割し、各要素接点を (x_i, z_i) とする。それぞれにおける境界条件を与えると、i番目の要素に対して以下のようなGreenの式を満足する。

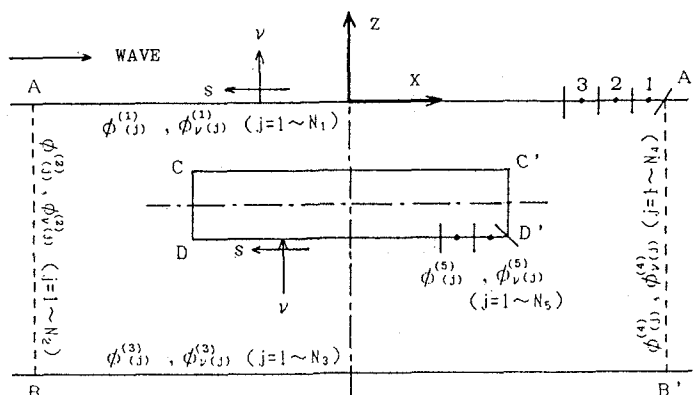


図-6 波動場における解析領域

$$c_1 \phi_1 + \int_{s_1} \phi \phi_v^* ds + \int_{s_2} \phi \phi_v^* ds = \int_{s_1} \phi_v \phi^* ds + \int_{s_2} \phi_v \phi^* ds \quad \text{----- (8)}$$

境界上では c_i は1/2であり、 u^* は基本解である。(8)式を波動場に当てはめると

$$\sum_{j=1}^{N_1} H_{1j} \phi^{(1)}(j) + \sum_{j=1}^{N_2} H_{2j} \phi^{(2)}(j) + \dots + \sum_{j=1}^{N_5} H_{5j} \phi^{(5)}(j) \quad \text{----- (9)}$$

$$= \sum_{j=1}^{N_1} G_{1j} \phi_v^{(1)}(j) + \sum_{j=1}^{N_2} G_{2j} \phi_v^{(2)}(j) + \dots + \sum_{j=1}^{N_5} G_{5j} \phi_v^{(5)}(j)$$

ここで係数マトリクスH, Gは、

$$H_{ij} = \frac{1}{2\pi} \int_{\Delta s_j} \frac{\partial \log(1/r)}{\partial \gamma} ds$$

$$G_{ij} = \frac{1}{2\pi} \int_{\Delta s_j} \log(1/r) ds \quad \text{----- (10)}$$

r は (x_i, z_i) と (x_j, z_j) との距離であり、 Δs_j は要素長である。いま、(8)式の第一項に c_i を乗じているため以下のように定義する。

$$H_{ij} = \hat{H}_{ij} \quad (i=j)$$

$$H_{ij} = \hat{H}_{ij} + 1/2 \quad (i \neq j)$$
----- (11)

積分経路は外表面に対しては半時計周りに、内表面に対しては時計周りにとって境界面を連続なものとする。いま境界 s_1, s_2 で組み立てられる係数マトリクスをそれぞれ H_1, H_2 および G_1, G_2 とし、ポテンシャル値およびポテンシャル流束値を U_1, U_2, Q_1, Q_2 として係数マトリクスによる積分方程式を組み立てれば、

$$\begin{bmatrix} H_1 & H_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 & G_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad \text{----- (12)}$$

と表わせる。(12)式を既知項と未知項に分けGaussの消去法を用いて解くと、すべての境界でのポテンシャルが得られる。

【5】結果と考察

〔1〕一点係留

図-7が一点係留型模型の波高6cmにおける係留力の最大値を示したものである。 B/L の変化による係留力は $B/L = 0.8 \sim 1.0$ 付近において極小を示しており、 B/L の増加とともに値の増加がみられ、特にこの傾向は矩形型が最も著しい。実験では、周期 $T 1.37 \sim 0.61$ 秒についてだけであるが、グラフでの $B/L = 1.0$ 以上の傾向を見るとこの範囲以外に物体の固有周期が存在すると思われる。

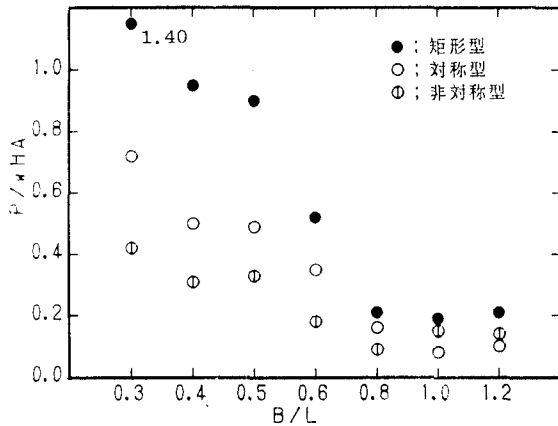


図-7 一点係留された潜水物体の係留力

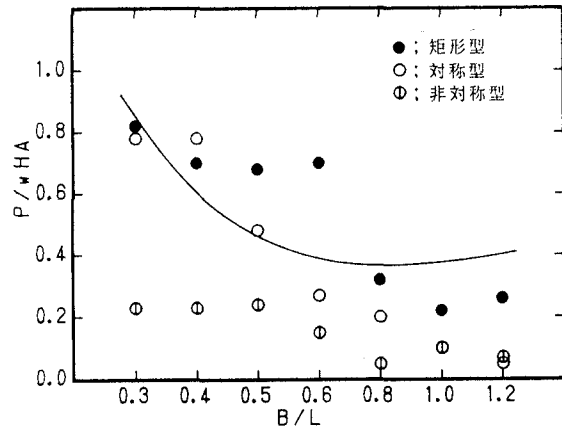


図-8 固定された潜水物体の前肢鉛直力

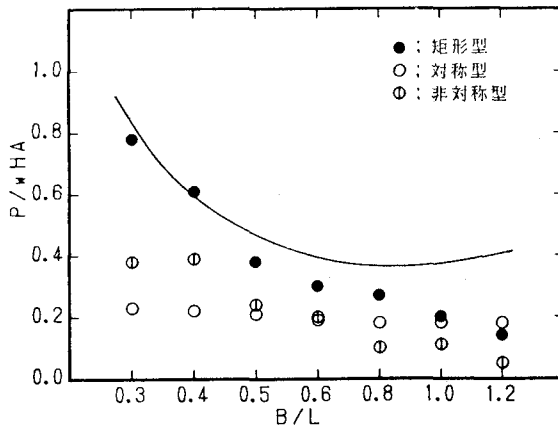


図-9 固定された潜水物体の後肢鉛直力

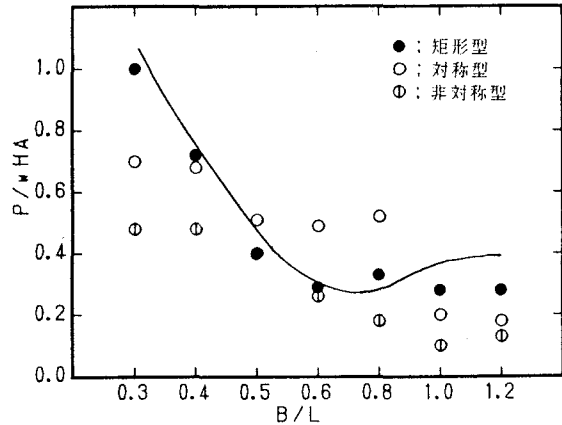


図-10 固定された潜水物体の水平力

一般に、物体は周期が固有周期に近づくとき共鳴し変位が大きくなるため係留力は増大する。 $B/L = 1$ 、0以上において実験値が増大の傾向を示しているのはこのためと思われ、一定の固有周期に近づくまである程度増大するものと考えられる。非対称型については模型の重心が他の二つと異なるため動揺の形態が変わり、それが係留力に影響して全体的に値が小さく出たと予想される。

動揺については矩形型模型を用い、ビデオカメラにより水槽上の目盛りを読みとって行なった。図-11と図-12が物体重心Gと係留点における最小と最大の回転変位を示したものである。それぞれの変位は B/L が0.8~1.2で変位も小さく著しい変化がみられず、 $B/L = 0.8$ 付近において極小を示しており係留力の傾向とよく似ている。物体重心における回転は、図-11を見ると、正の方向では B/L による際だった変化はみられず、それはむしろ負の方向に顕著である。一般に、物体の動揺が激しくなるほど係留力が増大することがこの実験からも容易に理解される。

〔2〕固定式

鉛直力を前肢と後肢に分けて測定し、同時に水平力も測定した。図-8、9が前肢と後肢にかかるそれぞれの鉛直力で、図-10が水平力を示したものである。傾向としては、水平・鉛直力とも一点係留式に非常に似ている。鉛直力についてはほとんどの模型が前肢の方で大となり、非対称型だけが内部形状の特殊性によって他の二つの模型と結果が異なったものと思われる。また、前肢と後肢にかかる鉛直力は、物体長に支配される位相差により正負がほぼ交互にかかる挙動を示した。さらに構造物上の波形を観察すると長周期波ほど碎波になりやすく、波の運動に順応しやすい一点係留式に比べかなりの波の変形があったことを付記しておく。数値解析については鉛直力、水平力両方ともやはり $B/L = 0.8$ 付近で極小を示しており、実験と同じような傾向がうかがえる。また解析による前肢と後肢の鉛直力が等しくなったのは入射波によるポテンシャルのみで解析を行なったのが原因であろう。本来ならば波の変形も考慮できる領域分割法による解析が望ましいと思われる。

【6】むすび

係留問題を考える場合、耐久性の観点から丈夫で耐力的な固定型が理想である。しかし、実際の海域にこれらの構造物を設置する場合、より大きな海流エネルギーを取得するために設置水深を深くとらなければならない。さらに構造物を波の動きに順応させなければならない。一点係留の場合たしかに耐久性の点で多少の難はあるが、周期に合わせた構造物の物体形状（波長に対する物体長、内部形状など）によってある程度の改善が見込まれたため、今後もその点を重点的に取り扱っていくことにする。

本研究の一部は銆西村組奨学寄付金によることを付記する。終わりに、本学土木工学科河海工学研究室において共同で研究された松岡功氏（現神奈川県庁）、野村勝利氏（現岩田建設）、玉手聡君（本学大学院1年）の多大なる御協力に感謝します。

参考文献

- 1) 加藤直三、寺尾裕；「海流・潮流発電」 日本造船学会誌、637、1982
- 2) 日野幹雄、宮永洋一；「グリーン関数および仮想法による波力と波の解析計算」 土木学会論文集、237、1975
- 3) 近藤、松岡；「一点係留された水中物体の波による運動について」 北海道支部論文報告集43号、1982
- 4) 近藤、松岡、平田；「一点係留された海・潮流発電用潜水体の水理特性」 土木学会第41回年次学術講演講演概要集（Ⅱ）、1982
- 5) 近藤、平田；「海・潮流発電用潜水体に作用する波力特性」 北海道支部論文報告集44号、1983

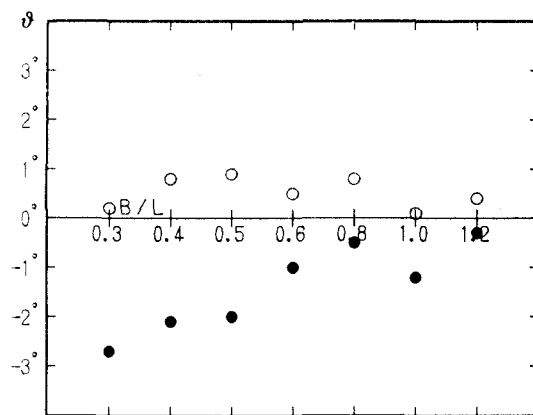


図-11 物体重心のまわりの回転θ

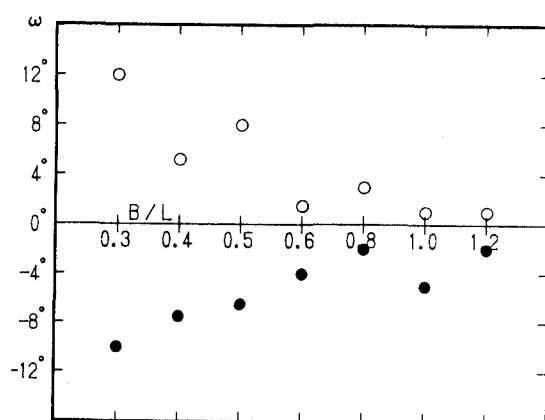


図-12 係留点のまわりの回転ω