

II-9 海・潮流発電用潜水直方体の水理特性

室蘭工業大学 学生員 平田 佳嗣

室蘭工業大学 正会員 近藤 俊郎

【1】はじめに

海・潮流エネルギー取得のために使用する潜水型構造物は大型であり、一般に海洋中の特定の箇所になんら長期係留されながらその間常に波浪外力を受けるものである。したがって厳しい環境条件の中で構造物を安全かつ経済的に保持させなければならない問題点があるが、潜水型構造物に関しては一般的な浮体構造物に比べると波浪や係留問題等においてほとんど研究対象とされていないのが現状である。本研究では、これらの潜水型構造物が海中に固定された場合を想定し、四脚固定式と一脚固定式の二種類を考えて速度ポテンシャルに関する2次元境界値問題として数値解析を行ない、さらに後ほど示す3つモデルを使用し基礎的な実験を行うことにした。

【2】数値解析

潜水型構造物の場合、波動場領域と物体表面の境界線が不連続である。ここでは図-1に示すようななんらかの形で海域に固定された矩形潜水物体に作用する流体力を算定する。解析は2次元流体運動としてとして取扱ひ、ポテンシャルに関するグリーンの公式を数値的に解いて未知量を求めていくものである。

〔1〕基本条件

図-1に示すような没水面 $CDD'C'$ をもつ矩形潜水物体が波動場領域 $ABB'A'$ に存在するものとし、原点 O を静水面、 x 及び z 軸を水平及び鉛直上方にとり、波動場では静水時における水深 h を一定とする。ここでは外表面と内表面の2つの不連続な境界面が存在し、 AB と $A'B'$ が仮

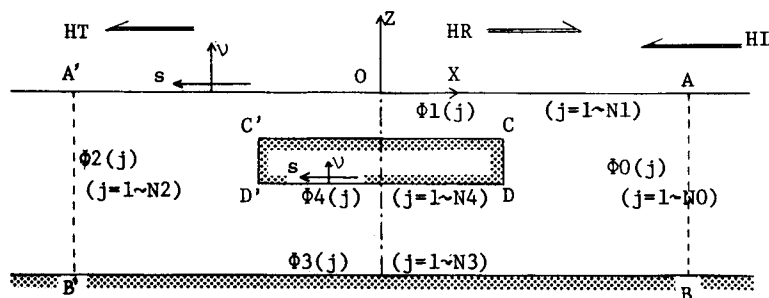


図-1 潜水物体が存在する波動場領域

想境界面で、 AA' は自由水面、 BB' は水底、 $CDD'C'$ は構造物表面に対応している。また、法線方向 v は外向方線としている。図-1では右方から振幅 ζ 、周波数 σ の正弦波が入射してくるため、仮想境界面 AB は入射波と反射波が存在する境界、 $A'B'$ は伝達波のみが存在する境界となる。

流体は微小振幅運動を行なう非圧縮・非粘性の完全流体とし、 g を重力加速度とすると速度ポテンシャルは次式で表わされる。

$$\Phi(x, z, t) = \frac{g \zeta_0}{\sigma} \phi(x, z) e^{i\sigma t} \quad \text{-----} \quad (1)$$

$\phi(x, z)$ はポテンシャル関数で波動場領域内では次のラプラスの方程式を満足している。

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

流体圧力を p 、流体密度を ρ とすると、

$$p = -i \rho g \xi_0 \phi(x, z) e^{i\sigma t} \quad \text{-----} \quad (3)$$

波動場領域 $ABB'A'$ におけるポテンシャル関数 ϕ と法線微分値 $\bar{\phi}$ の関係は次のようになる。

1) 自由表面条件

$$\bar{\phi} = \frac{\sigma^2}{g} \phi \quad \text{-----} \quad (4)$$

2) 不透過面（水底、物体表面）における条件

$$\bar{\phi} = 0 \quad \text{-----} \quad (5)$$

3) 仮想境界面 AB における条件

$$\begin{aligned} \phi_0(x, z) &= \phi_i(x, z) + \phi_r(x, z) \\ &= C(k, z) (e^{ikx} + K_r e^{-ikx}) \end{aligned} \quad \text{-----} \quad (6)$$

$$\bar{\phi}_0(x, z) = i k C(k, z) (e^{ikx} - K_r e^{-ikx}) \quad \text{-----} \quad (7)$$

$$C(k, z) = \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh}$$

ϕ_i, ϕ_r ; 入射波, 反射波による速度ポテンシャル

K_r ; 反射率

k ; 波数。 $\sigma = g k \tanh kh$ を満足する

4) 仮想境界面 $A'B'$ における条件

$$\phi_t(x, z) = C(k, z) K_t e^{ikx} \quad \text{-----} \quad (8)$$

$$\bar{\phi}_t(x, z) = -i k C(k, z) K_t e^{ikx} \quad \text{-----} \quad (9)$$

K_t ; 伝達率

〔2〕グリーンの公式とBEM法への適用

一般に2次元閉領域内の任意点 (X_i, Z_i) におけるポテンシャル関数は N 個の要素点 (X_j, Z_j) に対して次のようなグリーンの式を満足している。

$$\sum_{j=1}^N \{ F_{ij} \phi_{(j)} - E_{ij} \bar{\phi}_{(j)} \} = 0 \quad \text{-----} \quad (10)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2\pi} \int_{\Delta_{ij}} \log r_{ij} \, ds$$

$$F_{ij} = \begin{cases} \bar{E}_{ij} & (i \neq j) \\ \bar{E}_{ij} + \delta_{ij} & (i = j) \end{cases}$$

$$\bar{E}_{ij} = \frac{1}{2\pi} \int_{\Delta_{ij}} \frac{\partial \log r_{ij}}{\partial \nu} \, ds$$

$$r_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$$

Δs_{ij} は要素長で、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタであり、境界上で δ_{ij} は $1/2$ である。いま、図-1 に示すような波動場領域の境界線 $AB, AA', A'B', BB', CDD', C'$ 上の未知のポテンシャル関数及び未知係数は $K_r, \phi_1(j), K_t, \phi_3(j), \phi_4(j)$ であり、境界線をそれぞれ N_0, N_1, N_2, N_3, N_4 個の点で分割する。(10) 式に前述の境界条件をあてはめ未知項と既知項に分けると次のような離散化方程式が

成り立つ。

$$\begin{aligned} & K_r \sum_{j=1}^{N0} C(k,z) (F_{1j} + i k E_{1j}) e^{-ikx} + \sum_{j=1}^{N1} (F_{1j} - \frac{\sigma^2}{g} E_{1j}) \phi_{1(j)} \\ & + K_t \sum_{j=1}^{N2} C(k,z) (F_{1j} + i k E_{1j}) e^{ikx} + \sum_{j=1}^{N3} F_{1j} \phi_{3(j)} + \sum_{j=1}^{N4} F_{1j} \phi_{4(j)} \\ & = - \sum_{j=1}^{N0} C(k,z) (F_{1j} - i k E_{1j}) e^{ikx} \end{aligned} \quad \text{-----} \quad (11)$$

このように、任意の要素点*i*に対して(11)式が成り立つので、総数*N0*+*N1*+*N2*+*N3*+*N4* 個の連立方程式を解くことによって同数個の未知量を求めることが可能となる。

【3】実験

(1) 模型と内部抵抗損失

本実験に用いた潜水模型は長さ0.7 m、幅0.35m、高さ0.1mの矩型物体で、図-2に示すような3つのタイプの模型を用いる。このうちType 1 (対称型)とType 2 (非対称型)は内部をくり抜いた中空模型で内部を自由に水が移動できる。両Typeの内部形状は異なっており、Type 1が曲率0.611m、Type 2が曲率2.282mの円弧を取り入れている。Type 3は内部全体を充填した不透水性のものである。またさらに中空模型 (Type 1とType 2) については内部形状の違いによる抵抗損失の比較を行なうことにした。方法は、定常水路中に設置した抵抗測定器に模型を設置し、模型の前後に設けたマンメータで水頭差を測定するものである。

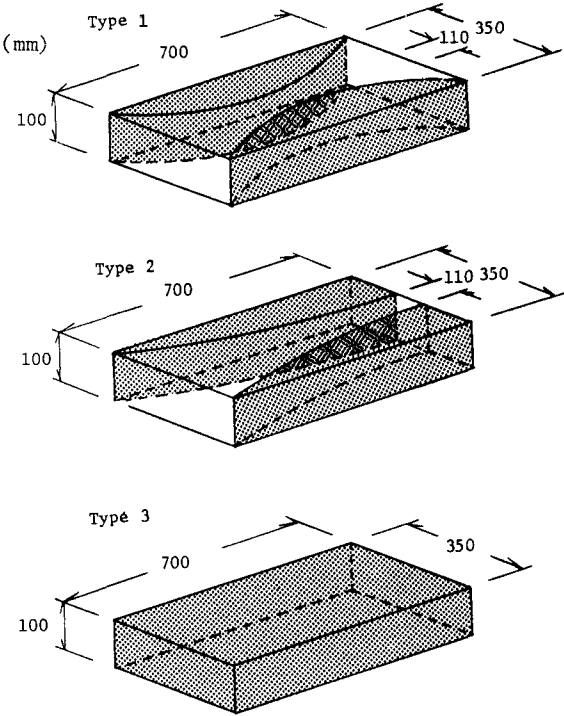


図-2 潜水模型の寸法図

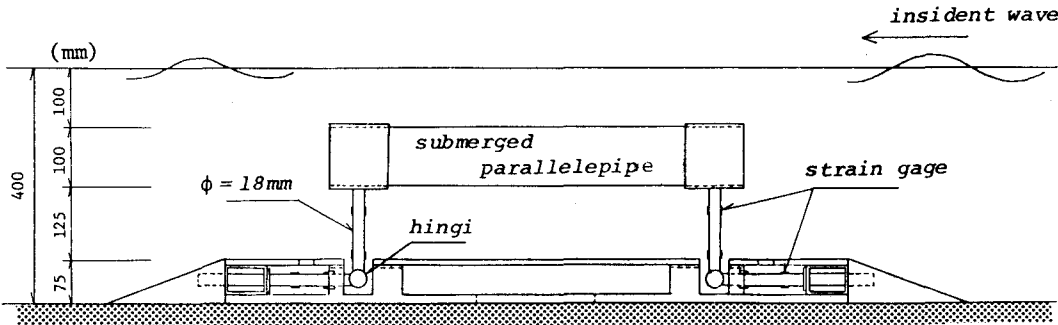


図-3 四脚固定式潜水物体

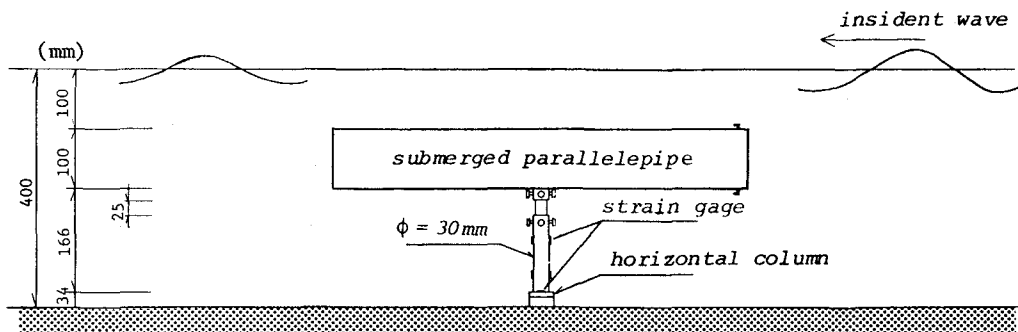


図-4 一脚固定式潜水物体

〔2〕実験方法

実験は四脚固定式と一脚固定式の2種類について行い、構造物に作用する流体力を測定する。長さ18.5mの造波水路に図-3と図-4の要領で模型を設置し、フルード相似則1/50を想定して水深を0.4m、静水面から物体重心までの深さ0.15m、波高6cmを一定にして模型長に対する波長の比 B/L を0.3~1.3と変化させて行なう。両方式ともに鉛直力と水平力にわけてを行なうが、四脚固定式については鉛直力を前脚と後脚に分けてそれぞれ測定することにする。測定方法は両方式とも2箇所のゲージ位置における歪差を出力させるものであり、特に四脚固定式の鉛直力については水平力による影響を排除するために図-3のように円柱接合部をヒンジ結合とし、ヒンジ位置にかかる反力を水平力とした。

〔4〕結果と考察

図-5は中空型模型(Type 1とType 2)の抵抗損失でレイノルズ数との関係を示している。また、図-6と図-7は四脚固定式の

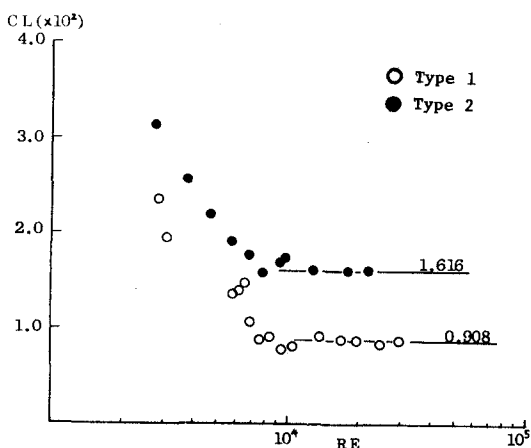


図-5 中空型模型の抵抗損失

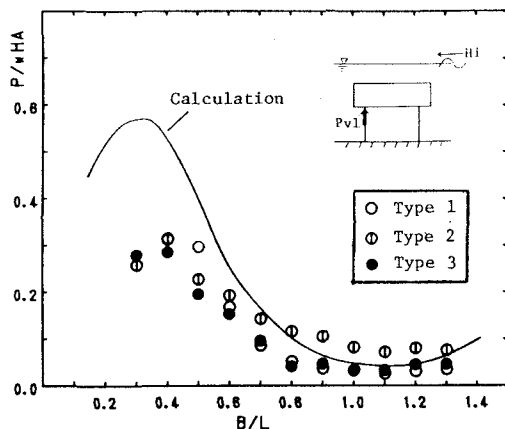


図-6 四脚固定式潜水物体の前脚鉛直力

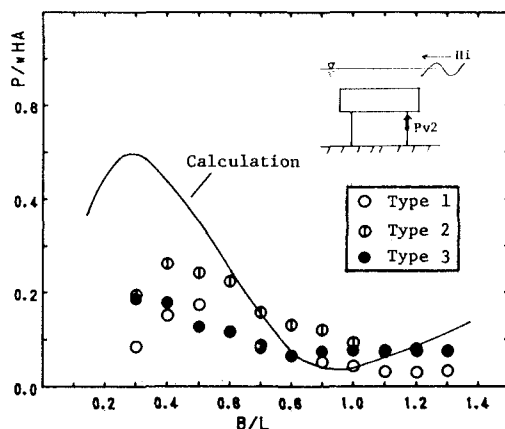


図-7 四脚固定式潜水物体の後脚鉛直力

前脚と後脚に作用する鉛直力で、図-8は水平力を示したものである。図-6と図-7の実験結果をみると、全体的に後脚より前脚にかかる鉛直力の方が大きく、 B/L が0.4と1.1付近でそれぞれ極大と極小が見られる。模型による違いは前脚に比較して後脚の方が幾分顕著であり、特にType 2の値が他より大きいのは物体の内部形状が非対称型を有しているためと思われる。また水平力については模型の内部形状による違いが比較的明確に現れ、特に $B/L=0.3\sim 1.0$ の間ではType 3の値がずばぬけて大きいのがわかり、またType 1とtype 2については図-5に示した抵抗損失の関係からType 2の方が大きくなっているのがわかる。図-9と図-10は一脚固定式に作用する鉛直力と水平力を示したものである。四脚固定式に比べて鉛直力のピークにずれがあり、またピークの現れかたもはっきりしているようである。水平力については模型による差がほとんど見られない。

数値解析は本学の情報処理センターにて行なった。BEM法による要素分割については、領域の節点数を212点とし、自由表面と水底でそれぞれ71点仮想境界面でそれぞれ17点、構造物表面で32点とした。波動場領域における仮想境界面のとり方についてはできるだけ境界面を構造物から無限遠にとるのが望ましいのだが、あまり離れた場所にとると計算の際に微小項が生じるため計算精度が悪くなる。したがって本解析においては、構造物の端から仮想境界面まで1~2波長分の距離を取るのが適当と思い、構造物の長さを考慮して縦横の比を1:9とした。節点数については本来ならば現象の激しい自由表面や構造物表面における節点をもっと細かくとればよいのだが、むやみに多くの節点をとると前述と同じような微小項が原因となって計算精度はむしろ悪くなるとされる。計算の結果については図-6~10のグラフに示しており、これらはType 3の実験値に対応している。

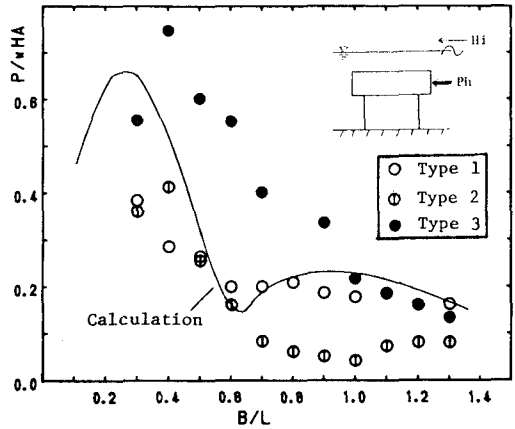


図-8 四脚固定式潜水物体の水平力

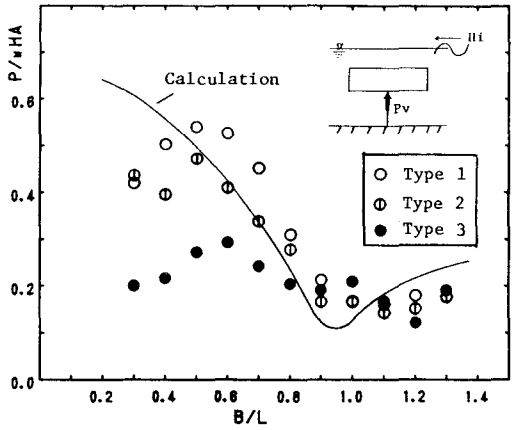


図-9 一脚固定式潜水物体の鉛直力

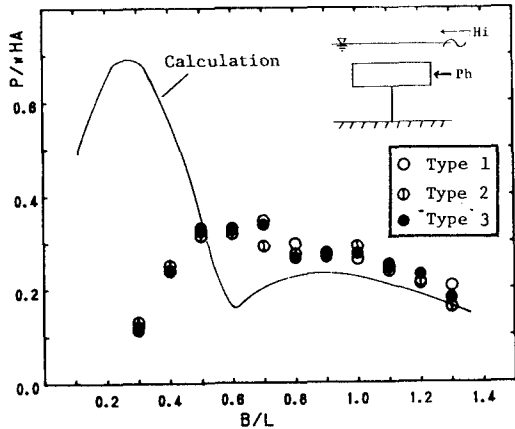


図-10 一脚固定式潜水物体の水平力

【5】むすび

このような固定式の潜水構造物の場合、実海域においては波の動きに順応されないことや構造が複雑になると設置水深が浅いところにしか適さないなどの欠点がある。しかし、一脚固定式の場合は波の進行方向に順応が可能で、四点固定式に比べ構造も容易である。今後は一脚固定式を更に発展させ、動揺を伴い構造物が波の動きに順応できるシステムを考えている。

本研究の一部は髙西村組奨学寄付金によることを付記する。また本研究の遂行にあたり実験等で協力された本学4年目の柴田秀人君と高萩 俊君に感謝します。

【参考文献】

- 1) 井島・周・吉田 「グリーンの公式による有限水深の波の境界値問題の解法」 九大工学集報48巻6号
- 2) 井島・吉田・山本 「任意断面浮体の2次元係留運動と波の変形」 土木学会論文報告集第272号, 1978
- 3) 奥園英明 「遊水部をもつ有孔壁岸壁の消波特性に関する研究」 九州大学学位論文, 1974
- 4) 近藤・平田 「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」 海洋開発論文集 VOL4, 1988