

固定式および可動式潜水直方体に作用する波力の特性

平田 佳嗣*・近藤 俊郎**

1. はじめに

近年、広範囲、大水深の海域を対象とする開発が進むにつれて、各種の浮体構造物や潜水構造物の必要性が次第に顕在化している。このうち浮体構造物については既に海上空港、沖合人工島など海洋空間利用の諸構想の中で研究が推進された。それに対し潜水型の構造物に関しては基礎的な研究段階に留まっている現状にある。

海域における潜水型の構造物の利用として考えられるものには貯留タンク、海中トンネル、潜水基礎、海流・潮流エネルギー変換装置などが挙げられ、将来における海洋の有効利用に不可欠なものと考えられる（例えば（社）日本海洋建設協会編（1988））。これらは一般的な浮体構造物に比べて台風時などの大波力を軽減できるメリットがあるが、その反面設置作業や維持・補修が困難で、海中構造物を機能的かつ安全に維持するのに解明すべき多くの問題がある。

そこで本研究においては潜水型の構造物に関する問題を波力および係留問題に絞り、土木構造物に多いと思われる2次元の直方体の中空および非中空潜水物に作用する波力および係留力を対象とすることにした。係留方式は脚柱型式を対象に四脚固定型、一脚固定型、一脚可動型の種の方式を対象とし、それらを実験と数値解析により明らかにしようとするものである。

2. 対象とする潜水型構造物の形式

本研究においては係留形式としては図-1に示すような四脚固定型、一脚固定型、ならびに一脚可動型の潜水構造物を対象とすることにした。一般に固定型とする場合には最も安定な四脚固定型とする場合が多いが、これは波や海流の方向に対する方向変換が不可能であることと設置水深が200m以上になると建造コストが高くつくなど不利な点も多い。それに対して一脚固定型は水平面内での方向変換が可能で、さらに一脚可動型は鉛直方向の回転や上下動に対しても動きが可能なものであり、仮

に海流発電の立場に立って考えるならば、流れや波の方向に順応が可能でより多くのエネルギーを取得できる一脚固定型もしくは一脚可動型のようなタイプが適すると思われる。しかし、この2型式は係留脚に応力が集中しやすく耐久性の面などで多くの検討を要する。

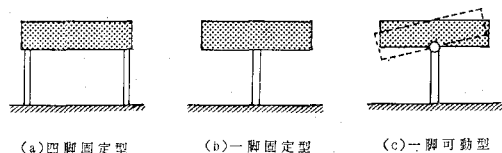


図-1 潜水構造物の脚柱型係留方式

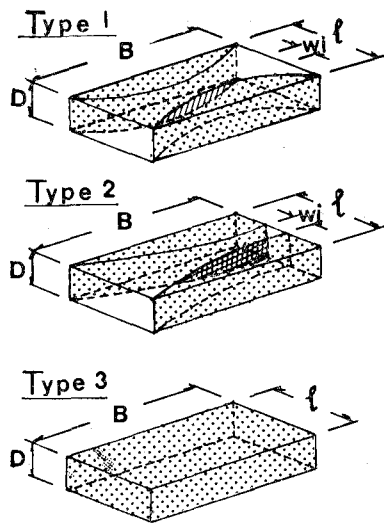


図-2 潜水直方体の形状

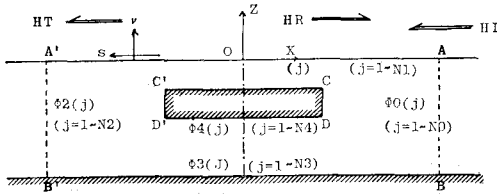
潜水物体形状としては、図-2に示すような中空の対象型（Type 1）と非対象型（Type 2）ならびに不透過型（Type 3）の3種類である。

3. 数値解析

上記に掲げた3型式の潜水型構造物を対象とした境界要素法による数値計算の方法を述べる。流体は微小振幅運動を行う2次元の完全流体として扱い、流体力は潜水物体のみに作用するとする。具体的にはポテンシャル関

* 正会員 工修 神奈川県湘南海岸整備事務所
(前室蘭工科大学院生)

** 正会員 工博 室蘭工業大学教授 工学部土木工学科



図一3 解析領域とポテンシャル関数

数および伝達率、反射率を未定係数とおき、グリーンの式を用いてそれらの未知量に関する積分方程式を導き、これを離散化して数値的に求める方法である（井島ら，1978）。

図-3 に示すような没水面 $CDD' C'$ をもつ矩形潜水体が波動場領域 $ABB' A'$ に存在するものとし、原点 O を静水面上に、また x 軸及び z 軸を水平及び鉛直上方にとり、静水時における水深および潜水物体の設置水深を一定にする。ここでは AB と $A'B'$ が仮想境界面で、 AA' は自由水面、 BB' は水底に対応している。図-3 では右方から振幅 ξ_0 、周波数 σ の正弦波が入射してくるものとし、そのため仮想境界面 AB は入射波と反射波、また $A'B'$ は伝達波が存在する境界となる。いま、重力加速度を g とすると、速度ポテンシャル Φ は一般に次式で表わされる。

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

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

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

流体密度を ρ とすると、流体圧力は一般に静水圧を無視した形で次式のように表わすことができる。

$$p = -i\rho g \zeta_0 \phi(x, z) e^{i\sigma t} \dots\dots\dots (3)$$

一脚可動型はもちろん、一脚固定型の潜水構造物も微少な動揺運動を行うと仮定すると、この運動は次式によって表わされる。

$$\left. \begin{aligned} x_t &= \mathbf{x} e^{i\sigma t} \\ z_t &= \mathbf{z} e^{i\sigma t} \\ \delta_t &= \boldsymbol{\theta} e^{i\sigma t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで x_t, z_t, δ_t はそれぞれ時刻 t における水平, 鉛直, 回転方向への変位量で, $\mathbf{x}, \mathbf{z}, \boldsymbol{\theta}$ はそれぞれの複素変位を表わしている.

また、各境界における境界条件は以下のようになる。

- ### 1) 自由表面

$$\frac{\partial \phi}{\partial \nu} = \frac{\sigma^2}{g} \phi \dots\dots\dots (5)$$

- ## 2) 水底および四脚固定型潜水物表面

$$\frac{\partial \phi}{\partial \nu} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

- ### 3) 仮想境界面 AB

$$\phi = C(n, z) (e^{ikx} + K_r e^{-ikx}) \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \nu} = ikc(k, z) (e^{ikx} + K_r e^{-ikx}) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 K_r は反射率、 k は波数で $C(k, z)$ は次式により示されるものである。

$$C(k, z) = \frac{\cosh h(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots (9)$$

- 4) 仮想境界面 $A'B'$

$$\phi = C(k, z) K_t e^{ikx} \dots \dots \dots (10)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \nu} = -ikc(k, z) K_t e^{ikx} \dots \dots \dots (11)$$

ここで、 K_t は伝達率である。

- 5) 一脚固定型および一脚可動型の潜水物体表面

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial \nu} = & i \theta \frac{\sigma^2}{g \zeta_0} \left[\left\{ \mathbf{x} - (z - \bar{z}_0) \theta \right\} \frac{dz}{ds} \right. \\ & \left. - \{ \mathbf{z} + (x - \bar{x}_0) \theta \} \frac{dx}{ds} \right] \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

ここで、 S は物体表面に沿って測る長さで $(\bar{x}_0, \bar{z}_0)$ は静水時における物体重心である。

以上の境界条件をグリーンの式に適用し、境界節点数と同数だけの連立方程式を導き各未知量を求める。

3. 実験方法

(1) 潜水直方体模型

本実験に用いた潜水直方体模型は図-2 で示した形状の直方体出、模型寸法は幅員 $B=0.7\text{ m}$ 、長さ $l=0.35\text{ m}$ 、高さ $D=0.1\text{ m}$ 、開口幅 $W_i=0.11\text{ m}$ である。実物との縮尺比は約1/50程度を想定している。タイプ1（以下 T-1 と略記）は対称、タイプ2（T-2）は非対称の内部中空形状を有し、堤体内部が水が移動できる型式である。T-1 は堤体中央部に、また T-2 は堤体後端に狭さく部を有し、そこで海・潮流エネルギーを吸収できるものである。タイプ3（T-3）は堤体全体が不透水である（近藤ら、1989）。

(2) 波力実験

実験は四脚固定型、一脚固定型、および一脚可動型の3種類について行い、それぞれの構造物に作用する流体力を測定するものとする。2次元規則波造波水路（ $0.4 \times 1 \times 18.5\text{m}$ ）に造波板から約7mの地点に図-4、図-5および図-6の要領で模型を設置する。模型幅 B の波長に対する比 B/L を0.3~1.3と変化させて行った。また、静水時における水深を0.4m、潜水物体の設置水深（静水面から物体重心までの深さ）を0.15m、波高を6cmの一定条件にて行う。

四脚固定型については鉛直力を前脚(岸側)と後脚(沖側)に分けて行い、併せて水平力も測定する。また一脚固定型と一脚可動型についても同様に鉛直力と水平

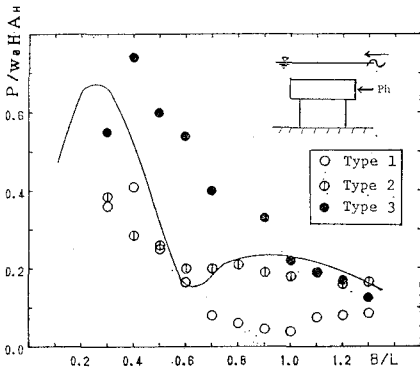


図-10 四脚固定型水平力

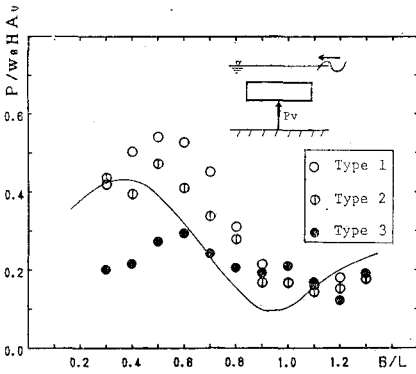


図-11 一脚固定鉛直力型

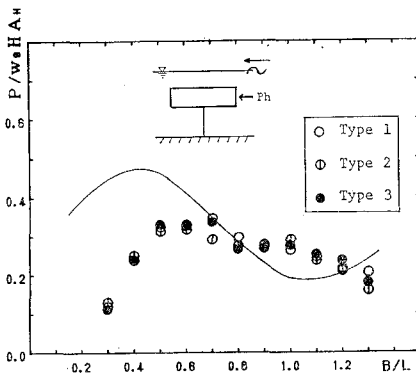


図-12 一脚固定型水平力

後脚に作用する力が他のタイプと比べて大きくなったものと思われる。水平力については、鉛直力に比べて模型のタイプによる違いがかなり明確に表われている。T-3は完全不透水性で水平方向への抵抗が最も大きいものであり、そのため他の2型式に比べて水平力はかなり大きなものとなっている。T-1とT-2の中空模型については、 $B/L=0.6$ 以下においてT-3よりかなり値は小さく、またT-2はT-1に比べて水平への内部抵抗が大きいことから、 $B/L=0.6\sim 1.2$ において、両タイプの形状抵抗の影響による水平力への差が明確に現われている。

るようである。

一脚固定型の鉛直力、水平力については、それぞれ図-11、図-12に示した通りである。鉛直力については、四脚固定型に比べると模型による差はかなり明確に出ており、特に $B/L=0.6$ 付近の最大ピークにおいては最もそれが顕著であるのが特徴である。しかし水平力について見ると模型による差はほとんどみられず、特に $B/L=0.3\sim 0.6$ 付近は全体的に急変の傾向が見られる。これは一脚固定による構造物全体のたわみや構造物の固有周期による影響などが考えられるが、いずれにせよ他に類を見ないような興味深い挙動を示している。

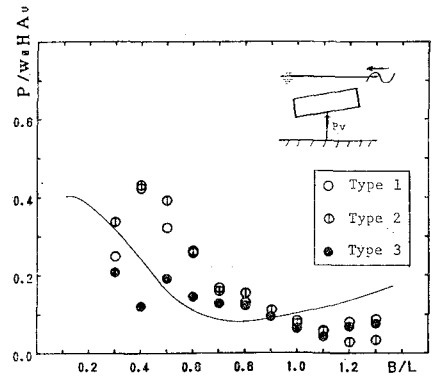


図-13 一脚可動型鉛直力

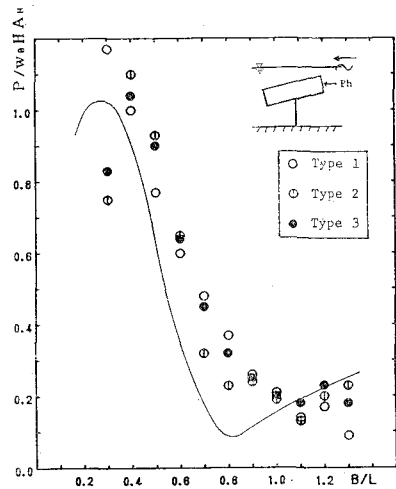
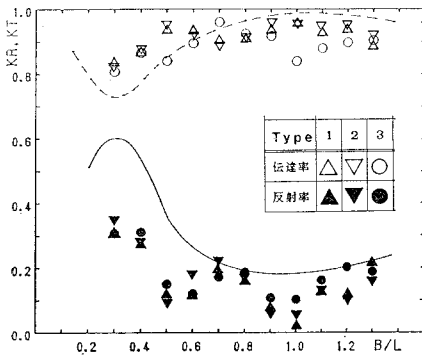
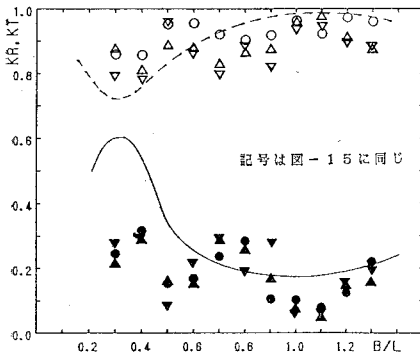


図-14 一脚可動型水平力

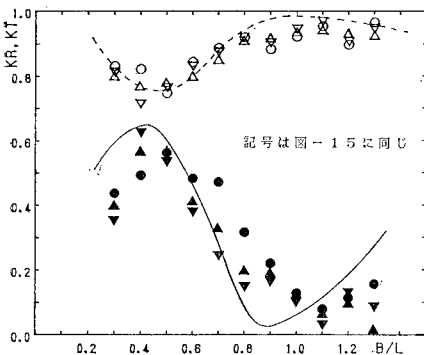
一脚可動型については、図-13に鉛直力を、図-14に水平力をそれぞれ示している。注目されるのは水平力であり、全タイプとも $B/L=0.4$ 付近の大きく鋭いピークが特徴で、全体的に値もかなり大きい。この原因としては、まず第一に波浪外力が作用する物体の水平方向への投影面積が物体の動きによって大きくなること、第二に構造物そのものの固有周期の影響、などが考えられる。また鉛直力については、模型内部を中空にした場合の方



図—15 四脚固定型の伝達率・反射率



図—16 一脚固定型の伝達率・反射率



図—17 一脚可動型の伝達率・反射率

が値が大きくなっており、一脚固定型の鉛直力に比べて全体的に値はやや小さいが、傾向はかなり似ていることが伺える。

(3) 伝達率および反射率

図—15～17に示したのがそれぞれ四脚固定型、一脚固定型、一脚可動型における結果である。上記3型式について見ると、模型のタイプによる伝達および反射率の差はほとんどなく、物体の内部形状による差がほとんどないことを示している。また四脚固定型と一脚固定型は同じ固定式のものであるため、全体的に両型の値はそれほど変わらない。しかし一脚可動型の場合について見る

と、全タイプの模型について特に $B/L=0.4\sim0.6$ における反射率はかなり大きく、またその分だけ伝達率が小さくなっているのが特徴である。

(4) 数値解析の考察

数値解析による結果は、波力の実験結果(図—8～14)においては黒丸の T-3 の実験値に対応している。解析結果は、全体的に B/L が小さいほど実験値とよく一致しているといえる。しかし長周期波になるほど、構造物上での波の変形や周辺渦が発生することが考えられるため、したがって B/L が大きくなるほど実験値と一致し難い結果となっている。また伝達率と反射率の解析結果(図—15, 16, 17の白丸と黒丸に対応)も同様に T-3 についてのみ示している。

数値解析は室蘭工大の情報処理センター (FACOM G-150) において行なった。境界要素法による線形要素の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領域形状が細長くなり、そのため積分計算の際に微小項が生じ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、構造物の長さも考慮して領域の縦横の比を 1:9 とした。

5. むすび

二次元の潜水直方体に作用する波力の特性を、係留方式と堤体形状の違いによる効果を中心に検討した。その結果、①波力は係留方式によって特徴があるが、共通的には無次元波力が相対幅員 $B/L=0.4\sim0.6$ 付近で最大となり、 $B/L=1.0$ で最小となる場合が多い。②2種の中空直方体の波力は、四脚固定式の水平力以外はほとんど差がない、ことなどが知れた。

本研究を遂行するのに際し室蘭工大河海工学研究室的藤間 聡助教授のご指導と、山岸 泰技術補佐員、大学院生玉手 聡君、学部四年生柴田秀人君(現東亜建設工業(株))ならびに同高萩 俊(君現福島県庁)の協力ならびに同地域共同研究開発センター田中良弘客員教授(大成建設(株))のご助言頂いたことを記し、深く感謝する。

参考文献

- 井島武士・吉田明徳・山本督夫 (1978): 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, 272号, pp. 53～63.
- 近藤俊郎・平田佳嗣 (1989): 海・潮流発電用潜水直方体の水理特性, 北海道支部論文報告集, 45号, pp. 243～248.
- (社)日本海洋建設協会 (1988): 21世紀に向けて「これからの海洋開発」, 山海堂, 110p.