

杭係留浮体による波浪制御に関する実験的研究

金 憲泰*・榎 本 亨**・青木 伸一***

1. ま え が き

近年沿岸海域の水質汚染などが問題となり既存の増養殖施設を沖側へ移動しようとする試みが考えられているが、この際防波堤などにより波をある程度遮蔽することが必要になる。特に消波の対象物が小割イケス等浮養殖施設になると周期5～6秒以下の短周期成分が対象になるため水質交換機能を有する浮防波堤が適切である(中村, 1991)。このような浮防波堤に関する波の透過率と反射率の問題については従来から数多くの研究が行われ、その形状においても様々なものが存在する(加藤, 1984)。しかしながらそれらの大半はカテナリー係留方式によるもので他の係留方式によるものは数少ない。また従来の浮防波堤は波浪制御のみが目的であり、浮体の動揺を積極的に利用しようとするものであるのに対して、浮揚式海上立地として利用するような大型浮体構造物においては浮体動揺をなるべく小さくすることを目的としている(池野ら, 1989)。このような相反する機能を同時に満足させることは難しく、そのような浮体構造物を検討した例はほとんどない。本研究はこの点に着目し、浮防波堤の係留系を工夫することにより、従来の浮防波堤より波浪減衰効果を上げることを主目的としつつ、通常の波浪時には浮体動揺を抑えて浮体の上部スペースを利用する(居住性)といった付加的な活用法の可能性を模索しようとしたものである。本研究では杭係留された浮体を取りあげ、2次元水理模型実験により波浪および浮体動揺を低減させるための最適な浮体形状および係留方法を明らかにしている。

2. 半拘束浮体の消波性能

本研究で対象とした杭係留浮体は浮体の運動モードのうち Sway, Surge および Yaw の水平運動をほぼ完全に拘束し、さらに Roll および Pitch もある程度拘束した言わば半拘束浮体とみなすことができる。浮体がある程度拘束することにより当然動揺を小さくすることができる

が、拘束することによって透過率や波力がどのように変化するかを検討しておく必要がある。そこで、ここでは簡単のために2次元矩形断面浮体の拘束条件を種々変えることにより、透過率がどのように変化するかを数値計算(井島ら, 1972)により検討する。

図-1は2次元矩形浮体モデル($B/L=0.7$, $d/B=0.29$, $I_{ROLL}/\rho g B=1.16$, ここに B : 浮体幅, h : 水深, d : 喫水, I_{ROLL} : Roll の慣性モーメント, ρg : 流体の単位体積重量)について、自由浮体, Sway のみを拘束した場合, Sway と Heave を同時に拘束した場合, Sway と Roll を同時に拘束した場合, および運動を完全に拘束した浮体に関する透過率 K_t を B/L (L : 波長) に対して示した図である。図-1から明らかなように B/L が0.35よりも大きい領域においては、各半拘束状態の透過率は完全拘束浮体と自由浮体の間の値を示しており、この場合には、Roll と Sway を同時に拘束した場合に最も消波効果が高くなっている。一方 $B/L=0.35$ 以下では拘束条件によって透過率の B/L に対する依存性が大きく変化しており、Sway のみを拘束した場合には自由浮体よりもかえって消波機能が低下している。Sway と Heave を拘束した場合には $B/L=0.25$ 付近で完全拘束浮体よりも透過率は低減しているものの、 $B/L=0.35$ 付近では逆に大きな透過率を示している。また Sway と Roll を拘束したケースでは、自由浮体と完全拘束浮体との中間的な変化特性を示している。

このように、浮体の拘束状態を変えることによって、自由浮体の消波特性をかなり改善できることがわかる。

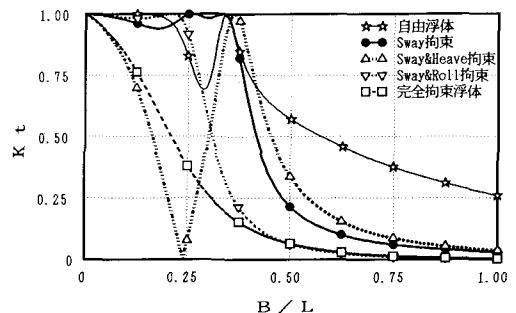


図-1 拘束状態の違いによる透過率の変化

* 学生員 工修 大阪大学大学院 工学研究科
 ** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 工博 大阪大学助手 工学部土木工学科

さらに、浮体の動揺をある程度許容することで、完全拘束浮体に比べて波力を低減できることから、自由浮体と完全拘束浮体の両方の長所を生かすような半拘束浮体を開発することが可能であると推定できる。

本研究でとりあげた杭係留浮体は、理想的には Heave のみを許容する形式となっているが、実際には摩擦によって Heave もある程度拘束されるし、また Roll を完全に拘束することは構造上も難しく、また波力の面からも好ましくない。したがって、以下に示す実験で用いた杭係留浮体は、いずれも Sway についてはほぼ完全に拘束され、Heave, Roll についてはある程度の拘束力が働いている状態になっている。

3. 実験方法

(1) 係留方法

本研究で用いた係留方式は、図-2 に示したように 4 本の支持杭（塩ビパイプと鋼パイプの 2 種類）を浮体の 4 隅に設置し、杭と浮体の間にはローラー（1 あるいは 2 個、図-3 参照）を用いることによって、浮体の運動モードのうち Sway をほぼ完全に拘束すると同時に、塩ビパイプの杭を用いた場合にはパイプのたわみにより、また、鋼パイプを用いた場合には、ローラー部に組み込んだ板バネのたわみにより、スムーズに Heave と Roll 運動ができるようにした。この係留方式では係留杭には水平方向力だけを受けさせるので、揚力がほとんど生じないことに特徴がある。

(2) 浮体形状

本研究で用いた浮体の形状および諸元を表-1 に示す。まず矩形断面を基本型として幅を 3 種類に変えた形

表-1 実験に用いた種々の浮体形状とその諸元

形状 No.	形状	幅	高さ	喫水	フロート 形式	底板と 孔の有無
1		35	15	10	1 連	無
10		45	15	10		
11		55	15	10		
2		35	15	10	2 連	無
9		35	15	10		
3		35	25	17.5	2 連	有 (孔) 有
4		35	25	20		
5		35	25	17.5	2 連	有
6		35	25	20		
7		35	25	20	2 連	無
8		35	25	17.5		
12		55	15	10	1 連	スリット

状 (No. 1, 10, 11)、フロートを 2 連にした形状 (No. 2~9)、また従来低反射岸壁でよく用いられている縦スリットを浮体側面に取り付けた形状 (No. 12)、側面にスクートを付けた形状 (No. 3~8)、また、浮体底面に底板を設置した形状 (No. 5, 6) とその底板に孔を設けた形状 (No. 3, 4) など、計 12 種類の浮体形状を用意して実験を行った。また板バネを用いた実験および不規則波実験においては一つの形状 (No. 8) を対象にした。

(3) 実験装置および実験条件

実験は、長さ 27 m、幅 1.5 m、高さ 1.8 m の断面 2 次元水槽で行った。浮体の設置水深は 0.5 m と一定にし、作用させた規則波は実験ケースによって若干異なるが周期を 0.5~3.0 s の 21 種類、不規則波については Bretschneider-光易型で、有義波周期を 3 種類 ($T_{1/3}=0.66, 1.32, 2.71$ s) とした。また全ての波は越波が生じない範囲の波高を用いた。波高計は浮体の沖側に 4 本、岸側に透過波測定用に 2 本を設置し入射波分離法を用いて透過波高および反射波高を算出した。また浮体動揺測定には変位計を浮体の上面中央両端部に 2 台設置し、Heave と Roll 量を分離して測定できるようにした。杭にかかる力の測定は、塩ビパイプ杭の場合は杭の支持端部に防水性ひずみゲージを、鋼パイプ杭の場合は係留装置に組み込んだ板バネにひずみゲージを貼って測定を行った。

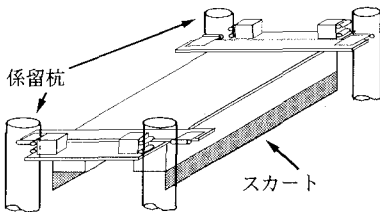


図-2 実験に用いた杭係留浮体

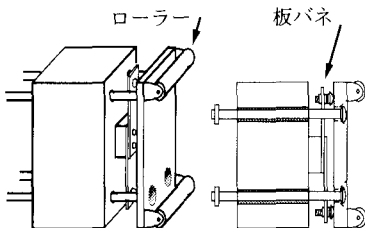


図-3 ローラー 2 個と板バネを用いた係留装置

4. 実験結果とその考察

(1) 実験値と計算値の比較

ここでは、塩ビパイプの杭と1個のローラーを用いた No. 1 のケースに対して領域分割法(井島ら, 1972)を用いた計算との比較を行う。図-4 及び 5 は透過率 K_t と反射率 K_r を B/L に対してプロットしたものである。図中の計算値は、Sway と Heave を拘束した場合、および Sway と Roll を拘束した場合の透過率と反射率を示している。図-4 からわかるように、 $B/L=0.25$ 以下において実験による透過率は2種類の半拘束状態の計算値の間に現れる結果となっているが、図-5 の反射率については透過率とは違って、Sway と Roll を拘束した場合の反射率に近い値を示している。このような結果は、前述したように実験においては Heave と Roll の運動時に杭とローラーの間で摩擦が起ることや、浮体の運動が完全にスムーズでないこと、またローラーを1個だけ使ったために、浮体の動揺時に杭とローラーの間にクリアランスが生じたことなどがその原因であると考えられ、従来の計算法は、摩擦や幾何学的な非線型性を考慮しない限り、本係留方式には適用できないと思われる。また杭にかかる力は、クリアランスが生じたことが杭に衝撃的な力を発生させる結果となったが、これは次節で述べるよ

うにローラー部分に板バネを設置することによって改善できた。

(2) 浮体形状の影響

ここでは表-1 に示した12種類の形状のうち特徴のあるケースについてのみその結果を示す。図-6 および 図-7 は浮体形状 No. 1, 2, 8, 12 に関する透過率と反射率の比較をしたものである。まず、フロートの形式(1連: $\blacktriangle$, 2連: ∇) による透過率および反射率の差はほとんど現れていない。これは鶴谷ら(1987)の研究と異なった結果となっている。一方浮体側面に縦スリットを設けた場合の形状 No. 12 ($\circ$) はすべての B/L において他の形状に比べ反射率は低減しているが、逆に透過率は大きくなっており、縦スリットの設置は透過波に対しては逆効果となっていることがわかる。スカートを取り付けた場合($\bullet$)にはそうでない場合($\blacktriangle$)に比べ、特に $B/L=0.2$ 以上の短周期側で反射率は比較的大きいが、透過率は小さくなっており、スカートが浮防波堤の波浪減衰に有効であることを示している。ただし、反射率が增大していることから考えて、スカートはエネルギー逸散よりも反射率の増大に寄与していることがわかる。

(3) 係留装置の初期反力の影響

上述の実験では杭と浮体の間にローラー1個を用いたために、浮体動揺時にクリアランスが生じ、杭に大きな

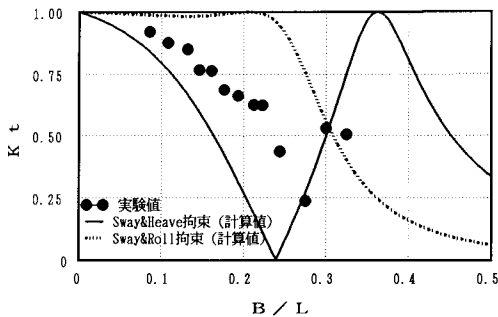


図-4 実験値と計算値の比較 (透過率)

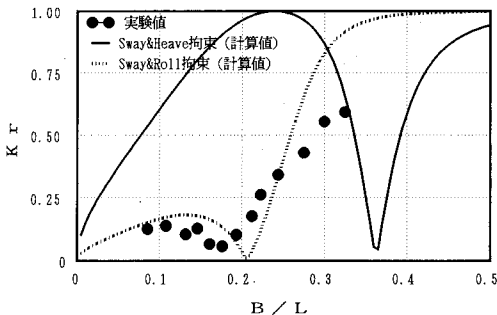


図-5 実験値と計算値の比較 (反射率)

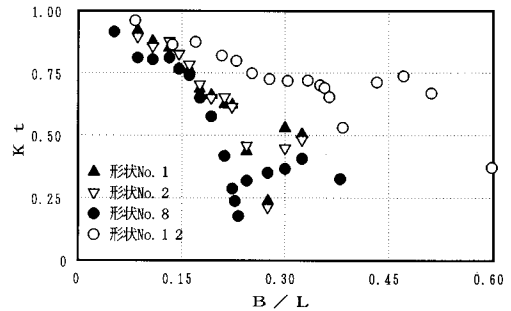


図-6 浮体形状の違いによる透過率の変化

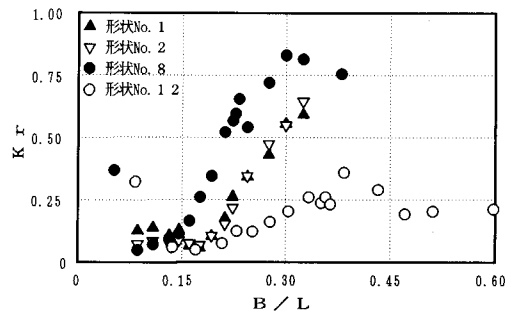


図-7 浮体形状の違いによる反射率の変化

衝撃力が働くという問題点が生じた。この点を改良し、浮体動揺をよりスムーズにして衝撃力の発生を防止するために図-3のようにローラー2個と板バネを用いることを考えた。対象とした浮体は12種類の異なる浮体形状に対する実験結果から、浮防波堤として最も消波効果が優れていると判断できる形状No.8を選んだ。また実験では板バネに4種類の初期反力($R_x=0.0, 3.5, 6.0, 14.7$ kgf)を与えその影響を明らかにした。板バネのバネ常数は $K=28.4$ kgf/cmである。図-8は透過率 K_t を B/L に対してプロットしたものである。図中のケース1~4は、それぞれ初期反力 $R_x=0.0, 3.5, 6.0$ および 14.7 kgfとしたケースに対応している。ケース4のように極端に大きな初期反力を与えた場合には、他のケースに比べ大きな透過率を示している。しかしながら、ケース1~3の場合、ローラー部の初期反力の相違による透過率の差はあまり現れておらず、 $B/L=0.15$ 以上では透過率が0.5以下となり浮防波堤として十分な機能を有していることがわかる。一方、図-9は B/L に対するHeave量(縦軸 Z はHeaveの振幅を入射波振幅で除したものを示した図であるが、初期反力を大きくするにつれてHeave量は大幅に減少する傾向を示しており、ケース3では波高の半分程度にとどまっていることがわかる。またケース4の場合は拘束力が大きいことからほとんど0に近い値を示している。図-10はRollの動揺量(θ はRollの回

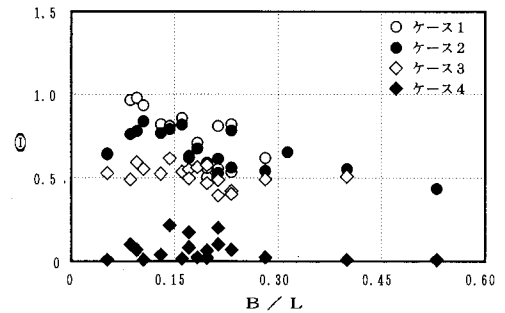


図-10 Rollの運動振幅

転角振幅に浮体半幅 $B/2$ を乗じ、さらに入射波振幅で除したものの)の変化を見たものであるが、Rollの場合もHeaveと同様、初期反力を大きくすることによって動揺量が低減していることがわかる。またRollに特有の共振応答が現れていないのは、このような係留装置では、杭とローラーとの摩擦によるエネルギーロスが大きいためであろう。以上の結果より、係留装置の初期反力を適当に与えることにより透過率にはほとんど影響することなく浮体のHeaveとRollをかなり低減できることがわかる。一方、図-11は杭にかかるモーメントの最大値 M ($M=F \cdot L_a / (\rho g \cdot L_a \cdot B \cdot d \cdot H/2)$, F :板バネから得られた拘束力を含む力, L_a :水底から力の作用点までの距離, L_a 浮体の奥行き長さ, B :浮体幅, d :喫水, $H/2$:入射波振幅)と B/L の関係を示したもので、マイナスの符号は波の進行方向の逆向きに力が働いていることを意味する。ケース1~3については、初期反力にはほとんど無関係で、しかも B/L の全域にわたってほぼ一定の値を示していることがわかる。

これは初期反力のある程度与えてもそのために動揺が小さくなる分、拘束力を含めた杭にかかるモーメントの増大には直接結びつかないことを示している。しかしケース4のように初期反力がかかなり大きい場合は、つまり

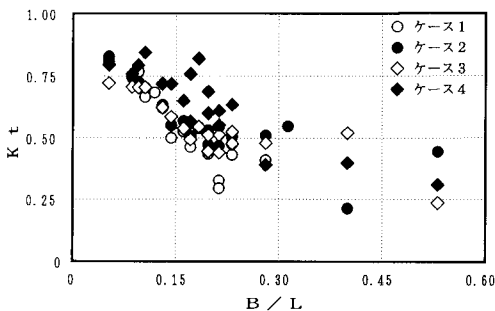


図-8 初期反力の違いによる透過率の変化

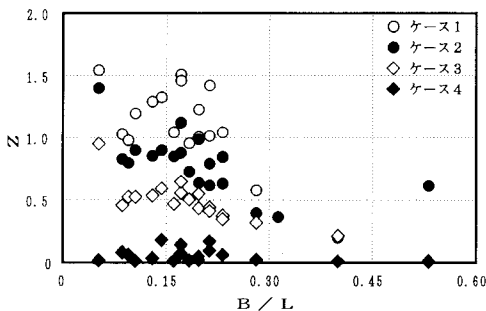


図-9 Heaveの運動振幅

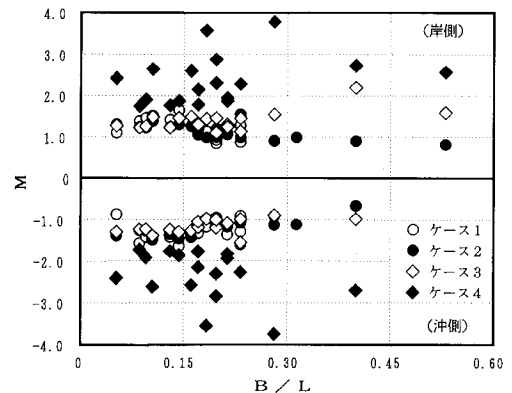
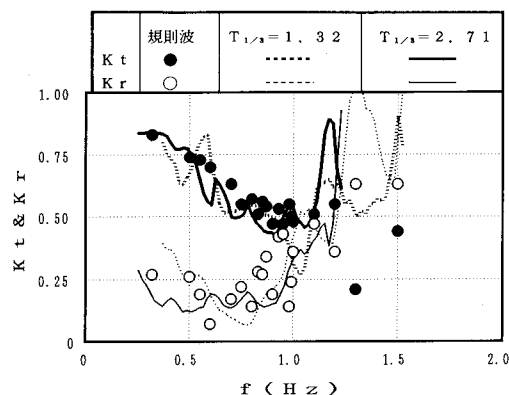


図-11 杭にかかる最大モーメント

表—2 不規則波実験の結果

(無次元量)

$T_{1/3}$ (sec)	CASE	K_t	K_r	heave	roll	杭の最大 MOMENT
0.49	1	0.297	0.753	1.027	—	0.237
0.66	2	0.355	0.701	0.106	0.326	1.142
0.65	4	0.361	0.858	0.005	0.020	3.395
1.32	1	0.544	0.374	1.237	1.023	0.652
1.31	2	0.538	0.376	0.474	0.692	1.238
1.32	4	0.625	0.545	0.005	0.027	2.209
2.71	1	0.750	0.253	1.036	0.881	0.456
2.71	2	0.755	0.217	0.347	0.609	1.220
2.71	4	0.839	0.350	0.003	0.016	2.275



図—12 透過率及び反射率の周波数応答曲線

Heave と Roll モードが 0 になる固定浮体に近い状態になると図—9 に示したように透過率が大きくなるだけでなく、杭にかかるモーメントも拘束力の分だけ大きくなることがわかる。

(4) 不規則波実験 (板バネの場合)

ここでは板バネを用いたケースに対する不規則波実験の結果について述べる。

表—2 に、初期反力の異なる 3 ケース (Case 1, 2, 4) に対する透過率 ($H_{t1/3}/H_{i1/3}$), 反射率 ($H_{r1/3}/H_{i1/3}$), Heave ($Z_{max}/H_{i1/3}$), Roll ($\theta_{max}/H_{i1/3}$) と 1 本の杭に働く最大モーメントの 4 本の平均値 ($M_{max}/H_{i1/3}$) を示す。この表より、浮体係留時に初期反力を与えることによる各物理量の変化、例えばケース 1 と 2 の透過率、反射率の変化が小さく、ケース 4 の場合が大きくなっていることなどが規則波実験と同様に現れていることがわかる。一方杭に働く最大モーメントに関しては規則波実験結果と異なり初期反力を大きくするにつれてモーメントも大きくなる結果となっている。図—12 はケース 2 (初期反力 $R_x=3.5$ kgf) に対する透過率、反射率の周波数応答曲線を示したものである。図中実線は有義周期 $T_{1/3}=1.31$ s のケースから求めたもの、破線は $T_{1/3}=2.71$ s のケースから求めたものである。また黒丸および白丸は規則波実験で得られた透過率と反射率を示している。この図より透過率、反射率共に、不規則波実験による周波数応答関数は規則波実験の結果とほぼ一致しており、透過率、反射率については、規則波の重ね合わせとして表現しても差し支えないことがわかる。

5. あとがき

本研究では浮防波堤に半拘束浮体である杭係留浮体を用いるといった新しい試みを検証し、いくつかの浮体断面形状および係留方法についてその消波特性を実験的に調べた。その結果、係留装置を工夫することによって波浪制御効果を維持しつつ、浮体の動揺を抑えることが可能であることを指摘することができた。ただし、杭力については初期反力を与えた場合に不規則波の最大杭力が増大するといった問題があり、現在は杭とローラーの間の摩擦力を考慮できる数値シミュレーションの開発とあわせて検討中である。

最後に、本研究を行うに当たりご協力いただいた石田総一郎君 (大阪大学大学院) および西田寿生君 (JR 西日本) に謝意を表します。

参考文献

- 井島武士・吉田明徳・湯村やす (1972): 有限水深の波による矩形断面浮体の運動と波の変形, 土木学会論文報告集, 第 202 号, pp. 33-48.
- 池野正明・平口博丸・鹿島遼一 (1989): 共振周波数成分を含む不規則波による大型浮体の動揺特性, 第 36 回海講論文集, pp. 764-768.
- 加藤重一 (1984): 水産土木概論, 恒星社厚生閣, p. 264.
- 鶴谷広一・木原 力・成瀬 進 (1987): PC 製浮防波堤の開発と現地実験, 浮防波堤 (現状と課題), 第 3 章, (社) 国際海洋科学技術協会, pp. 9-16.
- 中村 充 (1991): 水産土木学, 工業時事通信社, p. 399.