

浮遊式波浪制御構造物の水槽実験結果について(2)

海洋科学技術センター

統 辰之介

浮 田 基 信

1 はじめに

海洋構造物による海洋空間等の面的な利用拡大を図るためには、海洋構造物の大型化および大水深化が要求されるとともに、この構造物を外海の激しい気象、海象から保護するための波浪制御技術が不可欠である。従来波浪制御構造物には防波堤に代表される重力式防波堤と浮遊式の浮消波堤がある。特に、後者は海水の流通を妨げず、一時的な使用や地盤を選ばない特徴のほか、大水深での利用に適し比較的工費が安くなるなどの長所を有するが、今までは波高が小さく、かつ波長の比較的短い内海や港湾等に適用が限られており、外海での適用は困難であるとされていた。しかしながら、この浮遊式波浪制御構造物は技術的に適用が可能であれば、今後の海洋空間の拡大を図るうえで重要な技術であるといえる。

そこで、本研究では外海に適用できる浮遊式波浪制御構造物の型式、基本形状を明らかにするため二次元規則波実験においてボンツーン型を基本形状とする水平安定板付ボンツーン型が技術的および経済的にも充分可能性のあることを確認した。¹⁾ しかしながら、面的な波浪制御を行なうためには構造物を複数個係留設置する必要があり、構造物間の開口部および構造物端部からの回折波を含む消波特性、浮体運動による構造物間の相互の安全性および係留などの位置保持の確認、さらには後背域に係留設置される大型海洋構造物との相互干渉等検討すべき課題も多い。そこで、まず水平安定板付ボンツーン型浮消波堤を基本形とする構造物を複数個係留し、浮体開口部および端部からの回折波を含む浮体後方の波浪状態および浮体の動揺特性並びに位置保持などを検討するため実験を中心とする研究を実施した。

なお、本研究は科学技術庁の昭和60年度科学技術振興調整費による「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」のうち「浮遊式新型波浪制御構造物に関する研究」の成果をとりまとめたものである。

2 研究の概要

2.1 研究の目標

海洋空間等の面的利用に用いられる大型の浮遊式海洋構造物を保護するための浮遊式波浪制御構造物は、ある間隔で複数個係留されることが予想されるが、この場合の浮体後方の波浪状態を把握することは、大型浮遊式海洋構造物の構造、係留系の設計や安全性を検討するうえで重要である。また、外海での波浪は方向性を持つので斜め波中における浮体相互の挙動並びに安全性の確認も大切である。

以上の点を踏まえて、本研究の目標をつぎのようにする。

- ① 浮体開口部および端部からの回折波を含む波浪状態の把握
- ② 斜め波中における浮体相互の安全性の確認
- ③ 浮体の動揺特性および係留張力の把握

2.2 研究の概要

上記の研究目標を検討するため、想定実機の1/40縮尺模型を用い、規則波および不規則波並びに正面波($\alpha=90^\circ$)および斜め波($\alpha=60^\circ$)を発生させ、浮遊式波浪制御構造物後方における数点での波浪計測、浮体の動揺量および張力の計測、さらにビデオカメラによる浮体相互の運動等を観察することにする。

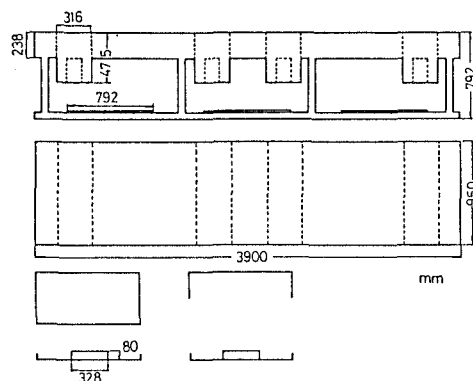


図 1 模型の概略図

3 研究実施内容および結果

3.1 供試模型および実験水槽

水槽実験に用いた構造物模型は、ボンツーン型を基本形とする水平安定板付ボンツーン型で想定実機の1/40にしたものである。その概略および主要目を図1、表1に示す。実験水槽は運輸省船舶技術研究所海洋構造物試験水槽で、その大きさは長さ40m、幅28mである。また、実験時の水深は1.8mとし、これは実機スケールで72m水深に相当する。

表 1 模型の主要目

全 長	L	3.9	m
全 幅	B	0.95	m
高 さ	D	0.792	m
喫 水	d	0.722	m
排 水 量	∇	450	kg
Heaving の固有周期		2.2	sec
Rolling の固有周期		2.9	sec

3.2 計測項目

構造物模型を3基係留設置し、以下の計測を行なった。

(1) 入射波および浮体後方の波浪

入射波は、サーボ式波高計を用い水槽側壁の造波装置近くにおいて計測した。また、浮体後方の波浪は計11点で、容量式波高計を用いて計測した。

(2) 浮体の動揺量

中央模型の中心で6自由度動揺計測装置により浮体の動揺量を計測した。

(3) 係留張力

正面波では中央模型の波上側の両端部で、また、斜め波では波に対して横に展開された係留系の張力をリングゲージで計測した。

表 2 実験で用いた規則波

3.3 波条件

(1) 規則波

本実験で使用した規則波を表2に示す。

(2) 不規則波

不規則波はJONSWAP 型スペクトラムで、ここでは波高と波周期から求めた。²⁾

	波 周 期	波 高
模型周期 (sec)	0.95 1.26 1.58 1.90 2.21 2.53 2.85	波形こう配 0.02 0.03 0.35
実験周期 (sec)	6.0 8.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0	5cm, 10cm 一定

$$\Phi(\omega) = \alpha H_{1/3}^2 / T_p^4 (\omega/2\pi)^5 \exp \left[-4/5 (T_p \omega/2\pi)^{-4} \right] \gamma \exp \left[-(T_p \omega/2\pi - 1)^2 / 2 \sigma^2 \right] \quad (3.1)$$

ここで、 $\gamma=3.3$, $\alpha=0.166$, $\sigma=0.07, 0.09$, $T_p=1.1 T_{H1/3}$

(3.1) 式により作成した不規則波の実測データを計測し、ゼロアップクロス法で求めた統計量を表3に示す。

表 3 実験で用いた不規則波の統計量

正 面 波		1	2	3	4	5	6
模型	$H_{1/3}$ cm	23.7	22.5	24.6	13.7	10.6	12.5
	T_{mean} sec	1.94	1.39	1.56	1.36	1.02	1.15
実験	$H_{1/3}$ m	標準 9 m			標準 5 m		
	T_{mean} sec	12.3	8.8	9.9	8.6	6.5	7.3

斜 め 波		1	2	3	4	5	6
模型	$H_{1/3}$ cm	25.6	22.6	25.2	16.6	12.7	14.7
	T_{mean} sec	1.87	1.38	1.68	1.38	1.05	1.16
実験	$H_{1/3}$ m	標準 9 m			標準 5 m		
	T_{mean} sec	11.8	8.7	10.6	8.7	6.6	7.3

3.4 縦波中における水槽実験

3.4.1 規則波中での結果

(1) 消波特性

縦波中における波浪計測位置および係留ラインの張り方を図2、図3にそれぞれ示す。また、各点での波高伝達率 $K_t (=H_T/H_{IN})$ について、横軸に実機想定での入射周期、縦軸に K_t を取って図4-a~cに示す。これによると、波長が長くなると波高伝達率 K_t が悪くなる傾向を示す。ここでは図示していないが、特に周期10秒の $H_{1.1}$ および $H_{1.3}$ で K_t が1以上を示している。この原因についてははっきりしないが、測点が浮体端部および開口部であり、かつ浮体の近傍であることを考えると、浮体からの反射波、あるいは浮体端部および開口部からの回折波との干渉により波高が高くなったものと考えられる。しかしながら、10秒のみこの現象がみられることについての理由はわからない。また、入射波の計測位置は水槽壁および浮体の近傍であるため、それからの反射の影響を受けることが考えられるが、計測データを読みとる時には反射波の影響が出ない箇所を選んでいたので問題はないと思われる。いずれにしても、今後さらに検討する必要があるだろう。

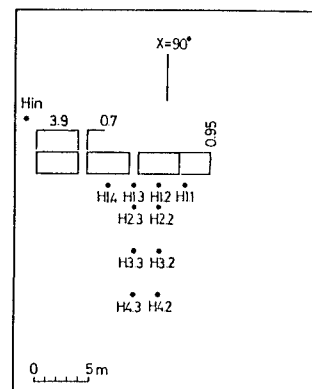


図 2 縦波中における波浪計測位置

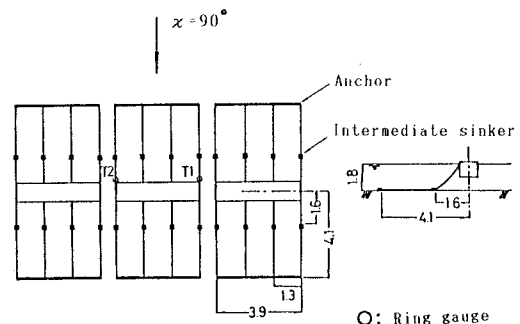


図 3 縦波中における係留ラインの張り方

図3に示すような状態でのこの浮体の基本性能はおよそH1.4のKtのカーブで表される。これによると、T=10sec付近で伝達率が一番小さくなる点が表れており、これは浮体がActive Devices(A.D.)な状態を呈していることを示している。一方、その他の周期帯では波長が長くなるに従い伝達率が高くなる傾向を呈するので、ここでは浮体がPassive Devices(P.D.)な状態であることがわかる。このように、入射波の波周期と浮体の運動との関係を利用すれば伝達率を小さくすることができる。

本研究での要求消波性能はT=14secでKt=0.56であるが、この観点から規則波の波高伝達率をみると、場所によって異なるがT=15sec以上の長周期波になると全体的にKt=1近くになり、ほとんど消波効果がないことがわかる。浮体後方のある範囲でKt=0.56を満足する入射周期はT=10~12secで、目標値であるT=14secは満足していないが、これは、浮体端部等からの回折波を抑える手段を講じることによりKtはさらに下がるものと思われる。

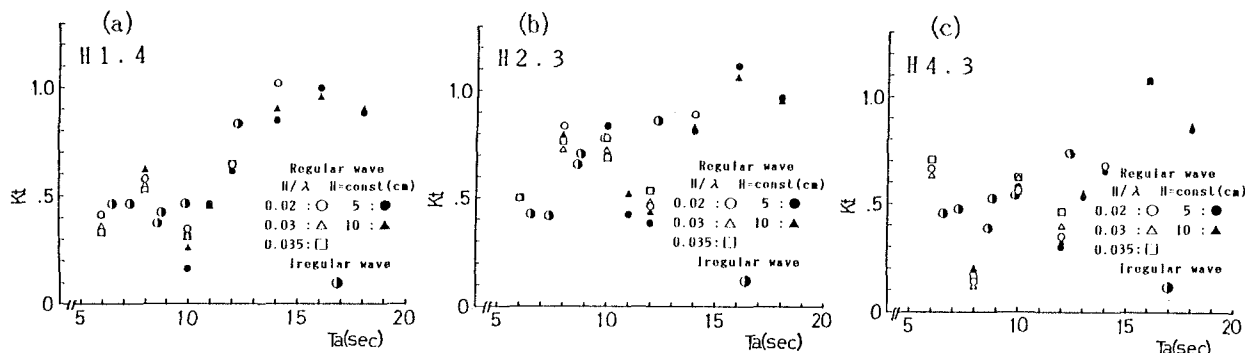


図4 主な計測点における波高伝達率(Kt)

ところで、回折現象は避けられない現象であり、これを把握しておくことは消波特性および配置などを考慮するさいに非常に重要である。そこで、ここでは近似解法として、半無限防波堤の場合を基準にして浮体端部および開口部からの回折波等の重ね合わせによる方法で検討を行なった。

浮体後方の回折現象に影響を与える要因としては入射波長、入射波向および開口部の間隔など考えられる。ここで、入射波長を λ 、開口部の間隔をBとすると、今回の実験では $B/\lambda = 0.08 \sim 0.50$ の範囲であり、Bは波長に比べて非常に小さい場合である。このような場合の入射波は開口部を点源として各方向に一樣に広がり、波高分布は(3.2)式で近似される。³⁾

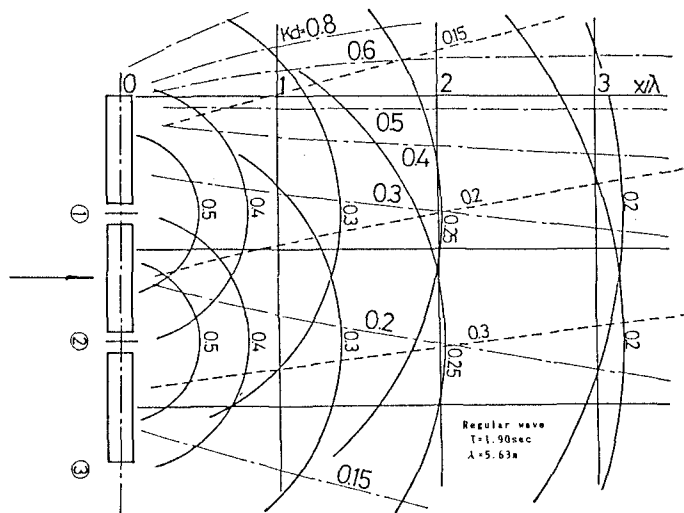


図5 浮体後方における回折図の一例(T=1.90sec, $\lambda=5.63m$)

$$Kd = |F(\gamma, \theta)| = \frac{\pi}{2} \sqrt{\kappa B [\ln \kappa B / 8 + \gamma]^2 + \pi^2 / 4} \sqrt{B / \pi \gamma} \quad \text{--- (3.2)}$$

ここで、 $\gamma = 0.5772$ (オイラーの定数)

図5は一例としてT=1.90secの場合について、(3.2)式を用いて浮体開口部からの波高分布を求め、さらに浮体端部からの回折波は半無限防波堤による回折図から読み取り、これらを図示したものである。

今回計測した波浪は回折波、反射波および透過波などが重なり合ったものである。そこで、上述のような方法で求めた回折図をもとに、浮体後方の波高分布が推測できるかどうか検討したのが表4である。これによると、浮体後方の波高分布は概ねこの方法で推測できそうであるが、事例も少ないのでさらに検討する必要がある。なお、斜め波の場合は開口部の幅をB'とすると $B \sin \theta$ として同様に求めることができる。

(2) 運動特性

図6, 7, 8にHeave, Roll, Sway についてそれぞれ示す。Heaveの固有周期は実機スケールで14secである。

表4 各計測点における回折係数の実測値と推測値の比較

計測点	T=1.90sec		T=1.26sec	
	実測値	推測値	実測値	推測値
H1.1	0.70	0.83	0.83	0.76
H1.2	0.67	0.70	0.46	0.44
H1.3	0.63	0.74	0.63	0.47
H1.4	0.65	0.76	0.58	0.44
H2.2	0.67	0.64	0.25	0.42
H2.3	0.46	0.65	0.83	0.38
H3.2	0.83	0.57	0.50	0.41
H3.3	0.74	0.54	0.58	0.34
H4.2	0.78	0.55	0.58	0.40
H4.3	0.35	0.49	0.17	0.31

また、Rollの固有周期は16sec 付近にみられるが、自由浮体での固有周期は18sec であるので、これは係留系や他の運動との影響によるものであろう。Swayは12sec 前後で変動量が一番大きい。しかしながら、波を正面で受けるためPitch, Surge, Yaw は極めて小さい。

本浮遊式波浪制御構造物の消波原理は波周期と浮体運動との関係を利用するもので、この場合、浮体の上下運動を消波させたい波周期に同調させ、入射波と浮体の運動によって発生する波との干渉により消波効果を発揮させようとするものである。したがって、今回もHeave の固有周期を消波させたい波周期と一致するように設定したが、浮体の運動は他の運動との連成、渦、係留等の影響を受けるとともに三次元影響も大きいので、浮体の運動によって消波効果を期待する型式はこれらを含めた検討が必要である。

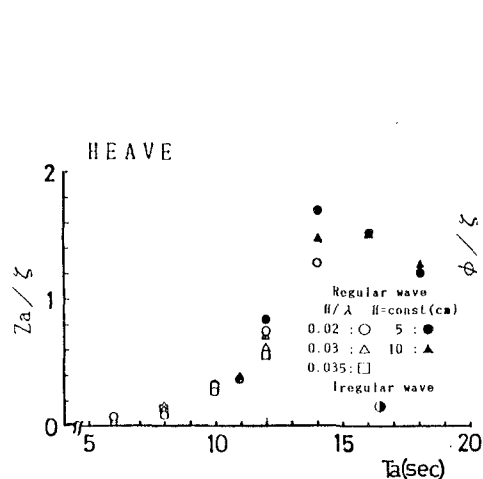


図 6 Heave の応答特性

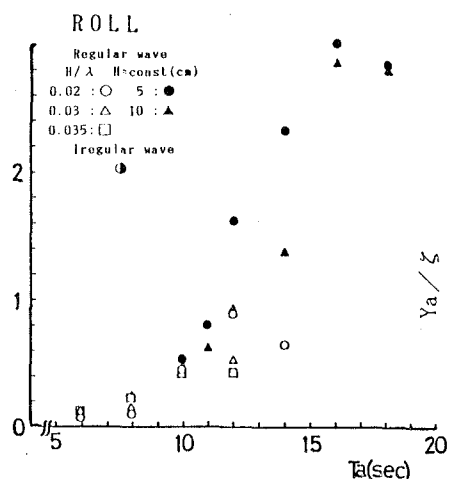


図 7 Rollの応答特性

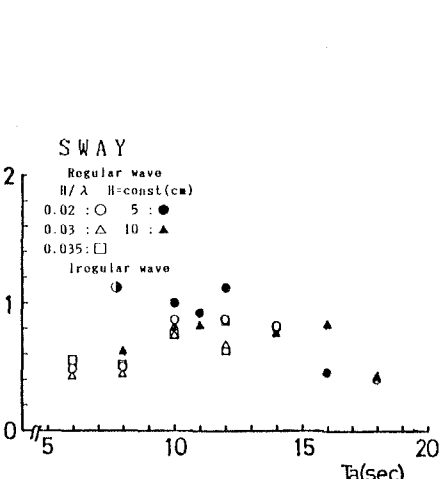


図 8 Swayの応答特性

(3) 係留張力

図9はT1(図3参照)での各周期に対する係留力の最大値を示めたもので、14sec 前後で最大張力が表れている。これは浮体の運動、特にHeave の影響を受けたためであろう。

3.4.2 不規則波中での結果

(1) 消波特性

不規則波中における波高伝達率は各計測点での $H_{T1/3}$ と入射波 $H_{1/3}$ との比を求め、図4-a-c上の○印で示した。なお、この場合の波周期は平均周期(= $2\pi m_0/m_1$)を用いている。

各周期に対する K_t の変動はほぼ規則波のそれと同じ傾向を示していることがわかる。また、規則波で見られたような K_t の極端な変動現象は見られないが、

これは、浮体からの反射波などがあるものの次々と変化する波高や周期が来襲するため平均化されたためであろう。つぎに平面的な伝達率の分布の一例について、図10に示す。この例では浮体後方で消波目標の0.56を満足するが、これ以上の波周期になると十分な消波効果は期待できないが、浮体端部、開口部からの回折波も含まれる点や、浮体の配置などを考慮すれば伝達率はさらに下がることが予想される。

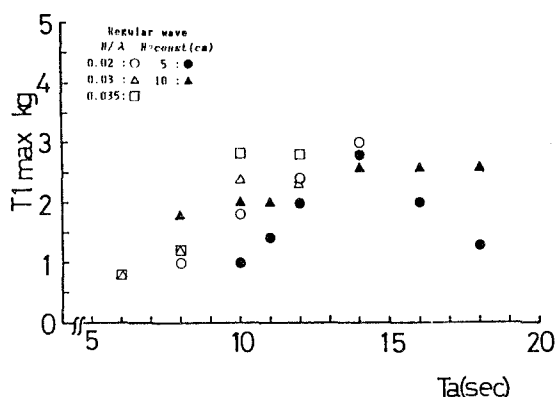


図 9 最大張力の応答特性

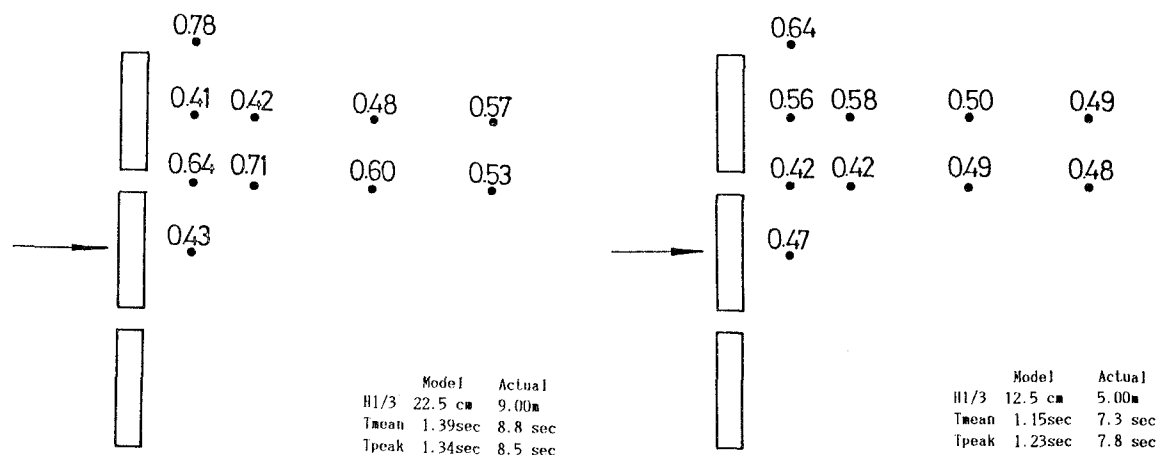


図 10 各計測点における波高伝達率の一例

(2) 運動特性および係留張力

運動特性の一例として図 11 に示すパワースペクトラム($T_{peak}=2.30\text{sec}$)を呈する入射波に対するHeave, RollおよびSwayの応答スペクトラムを図 12, 13, 14 にそれぞれ示す。これから、Heave とRollはおおよそそれぞれの固有周期に対応してピークが表れている。また、Swayでは波のスペクトラムピークに対応してピークがあらわれており、特に長周期側でエネルギー密度の高いピークがある。これは長周期運動を生じたためである。この長周期運動の生じる原因の一つとして、不規則波中で浮体に加わる長周期の変動漂流力があげられる。ここでは図示していないが、張力のスペクトラムをみると、波のスペクトラムピークとSwayの長周期のピークに対応してピークが表れている。このように浮体の長周期運動は係留系に多大な影響を与えていることがわかる。

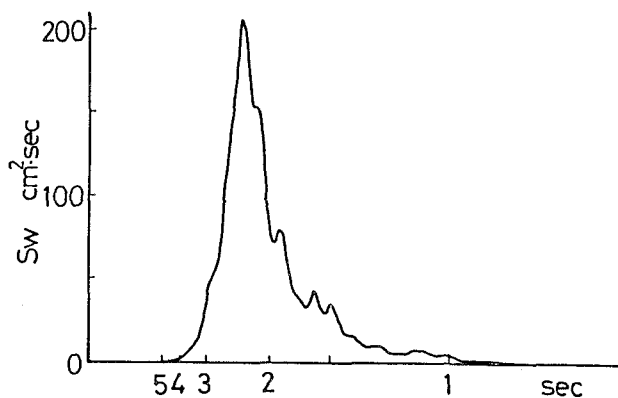


図 11 入射波のパワースペクトラム

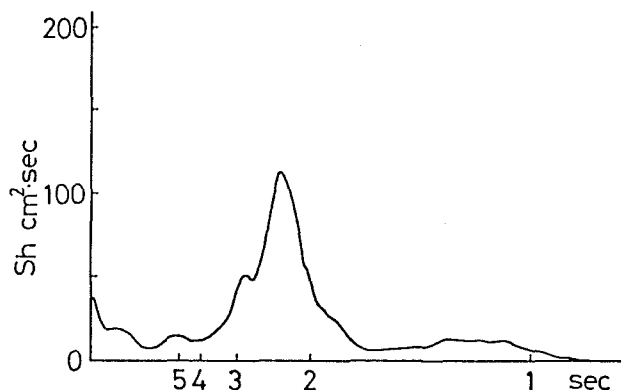


図 12 Heave の応答スペクトラム

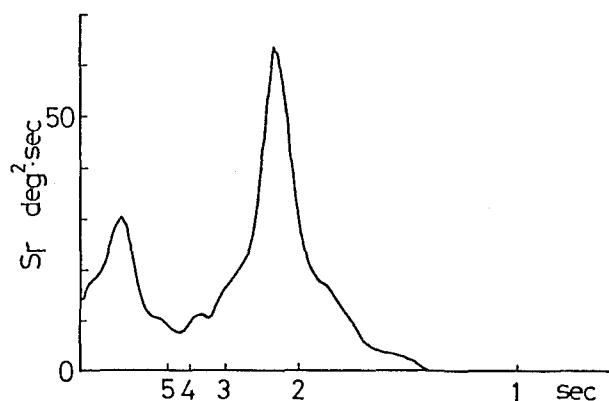


図 13 Rollの応答スペクトラム

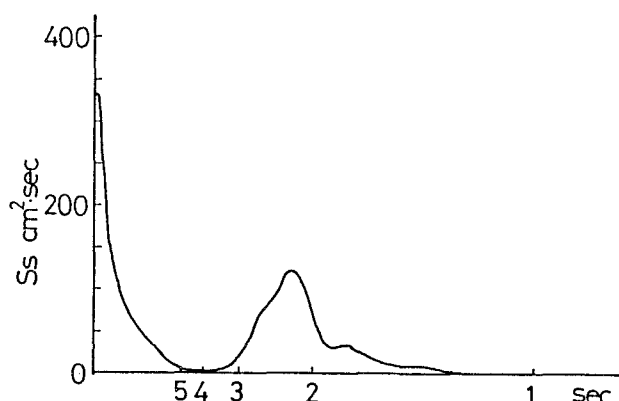


図 14 Swayの応答スペクトラム

4 結 言

以上、外海に適用できる浮遊式波浪制御構造物の開発を目標にして、二次元規則波実験で得た成果を基に、その力学的および形状の相似に留意しつつ、より実海域に近い条件での平面水槽実験を行なった。本報告は縦波中での結果について述べたが、消波性能としては $T=10\sim 12\text{sec}$ 前後ではほぼ0.56を満足する結果が得られた。また、浮体端部や開口部からの回折波を含む浮体後方の波浪分布は、近似解法として浮体開口部からの波高分布と浮体端部からの回折波は半無限防波堤による回折図を描いてこれから読み取り、これらを重ね合わせて求める方法でおおよそ推定できそうであるが、今後さらに検討する必要がある。

一方、斜め波中でも諸特性把握のための実験を実施しており、この結果については別の機会で述べるつもりであるが、特に斜め波で不規則波中では相互の浮体が運動するため衝突の可能性があるが、今回の実験の範囲内では充分安全であることが確かめられた。

今後さらにこの浮遊式波浪制御構造物の後背域に係留される大型の浮遊式海洋構造物との相互干渉等が考えられるので、構造物間の波浪状態や相互の運動について調べ総合的に検討する予定である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、有益なご意見を頂いた「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」の研究推進委員会および建設技術ワーキンググループの各委員の皆様へ心から謝意を表します。また、実験に際して、実験水槽並びに計測器等にご配慮頂いた運輸省船舶技術研究所海洋開発工学部 高石敬史元部長並びに安藤定雄現部長に謝意を表します。さらに、実験等に際していろいろとご協力頂いた海洋科学技術センター・海洋開

発研究部の工藤君明、宮崎武晃、堀田平、鷺尾幸久の各氏に、並びに東海大学海洋学部研究生吹田憲治、同卒業研究生林秀明の両君に心からの謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 続辰之介、浮田基信、石井進一、1985：浮遊式波浪制御構造物の水槽実験結果について、第10回海洋開発シンポジウム論文集、93-98.
- 2) 小山建夫、藤野正隆、前田久明、1982：船体と海洋構造物の運動学、成山堂書店
- 3) 岩垣雄一、棋木亨、1979：海岸工学、共立出版