

浮遊式波浪制御構造物の水槽実験結果について

海洋科学技術センター

續 辰 之 介
浮 田 基 信
石 井 進 一

1. はじめに

四面を海に囲まれ、国土が狭く、かつ資源が乏しい我が国にとって、海を有効利用することが必要であるが、この場合最も障害となる海洋環境条件は波浪であることはいまでもない。このため、これを適度に制御し、静穏な海域を創成する技術は、海洋開発の各利用分野に共通した基盤の技術であり、これらの技術の確立が海洋空間の有効利用の促進に及ぼす影響は非常に大きい。特に現在未利用となっている外海に面する沿岸域の有効利用が図れば、我が国の海洋生産性を飛躍的に高めることが可能となることを考慮すると、外海に適した波浪制御技術の確立の持つ意義は極めて大きいものがある。

一般に波浪制御技術は、重力式防波堤型と浮消波堤型に大別される。前者は今までの施工例も多く消波性能も優れており、技術的には確立しているといえるが、海水の流通を阻害したり、水深が大きくなると建造コストが高くなるなどの短所がある。一方、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長のほか、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があるが、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、浮消波堤型に代表される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っていくうえで、非常に重要な課題であると考えられる。

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ことを目的として、以下に述べるような研究を実施したのでここに報告する。

なお、本研究は科学技術庁の昭和57～59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「浮遊式波浪制御構造物の技術的可能性に関する研究」の成果をとりまとめたものである。

2. 研究の方法

2.1 技術的可能性の検討

外海の自然条件に適合して十分な消波性能を発揮し、かつ、安全性・経済性の優れた浮遊式波浪制御構造物の可能性を検討するため、まず最初に、実規模の構造物を想定して概略の試設計を行うこととする。この場合、消波機構や形状を考慮して、表1に示す8形式を選択して比較検討を行うことにする。

概略の試設計を行う場合の自然環境条件はつぎのとおりである。

(1) 波浪：最高波高 $H=18\text{m}$

有義波高 $H\ 1/3 = 9\text{m}$ 周期 $T=14\text{sec}$

(2) 風速：50m/sec

(3) 潮流：1.5 ノット

(4) 水深：50m及び100m

(5) 海底：砂質 平坦

また、消波性能は有義波高 $H\ 1/3 = 9\text{m}$ 以下、すなわち波高伝達率を0.56以下にすることを目標とする。

表1 検討を行う型式及び主な消波機構について

型 式 名	主な消波機構
A. 三重バリアー型	エネルギー反射型
B. 空気制御型	エネルギー吸収型
C. 傾斜板型	エネルギー消散型
D. 動揺制御型	エネルギー吸収型
E. 田型浮体型	エネルギー消散型
F. 正面開口空気室型	エネルギー吸収型
G. 透過プリズム型	エネルギー消散型
H. 水平安定板付ポンツーン型	エネルギー吸収型

2.2 検討の対象とする構造物の抽出

上記の8型式に対して、同一の自然環境条件を与えて概略の試設計を行い、構造強度、係留等の安全対策及び概略の製造コスト等について比較検討を行い、今後研究開発を進める形式として3種類の構造物の抽出を行う。

2.3 基本的な消波特性の把握

選定した3形式の構造物の基本形状をもとに消波特性などについて、二次元規則波中における水理実験を行い把握することとする。

(1) 固定状態での消波機構及び特性を把握する。

(2) 係留状態での消波特性、運動特性及び係留力等を明らかにするとともに問題点などを抽出し、改良点を加え、最終的に性能の優れた型式、形状を見出すこととする。なお、これらは、いずれも水深160mを対象とする。

(3) 最適構造型式のものについて、消波特性や運動特性に及ぼす水深の影響を明らかにし、設計に必要な資料を得る。

なお、水深は50mとする。

2.4 概略の設計

二次元水理模型実験で得られた最適構造型式、消波特性等の結果をもとに、外海の自然環境条件を与えて構造強度、係留などの安全性、施工法及び製造コストなどについて検討し、十分成り立ちうることを確認する。

3.技術的可能性と今後開発を進める型式の選択

3.1 技術的可能性の確認¹⁾

8型式の型式について概略の試設計を行った結果、外海の条件の中で十分安全などが確保されることが明らかになり浮遊式構造物による波浪制御の可能性があるとわかった。

そこで、今後研究開発すべき型式の選択にあたっては、主に次の点に留意して検討を行った。すなわち、(1)構造強度(2)係留、(3)経済性、及び(4)複数浮体群間の安全である。これらの点を考慮した結果、今後研究開発を進める型式としてF：正面開口空気室型、G：透過プリズム型及びH：水平安定板付ポンツーン型の3型式を選択した。これ以外のA～Eの5型式は、既に実海域での実績があり、これらは内海・内湾用としては完成された技術であるといえるが、これをそのまま外海の条件に合わせてスケールアップして適用するにはやや無理が生ずる恐れがある。一方、F～Hの3型式は初めから外海用の構造物として考えたもので、問題点に対する対応を比較的容易であるとする。この3型式の構造物の概略を図1に示す。また、特徴及び狙いなどはつぎのとおりである。

(i) 正面開口空気室型

これは波エネルギーを空気エネルギーに吸収変換して消波する型式である。この装置のメカニズムは、空気室内の海水(水柱)が入射して来る波より振動が励起され、これにより空気室内の空気が空気室上面に設けられたノズルから流出するというもので、特に図のように空気室の前方側面に鉛直壁(projecting wall)を付けた固定空気室は、かなり広い周期の波のエネルギーを吸収し、かつ空気出力のPeak値が現れる周期を長周期側にするとされている²⁾。また、堤体長幅よりも広くエネルギーを吸収できるとする三次元効果も、固定空気室型について、堀田²⁾、Count^{3),4)}らによって検討されているので、この効果を浮遊式構造物として狙うものである。

(ii) 透過プリズム型

これは穴明板または格子構造等によって波エネルギーを消散させて消波する型式であり、堤体長幅を長くすることにより浮体の動揺を抑えることを狙うものである。

(iii) 水平安定板付ポンツーン型

これは波エネルギーを反射させて消波する型式である。しかし、単純な反射で消波効果を期待しようとするれば浮体の規模は自然に大きくならざるを得ない。そこで、ここでは浮体の運動によって発生した波と入射波の干渉を利用することにする。ポンツーン・バリアー型浮体については、加藤⁵⁾らが検討しており実用的な消波堤であるとしている。これを応用して外海に適用しようとするものである。

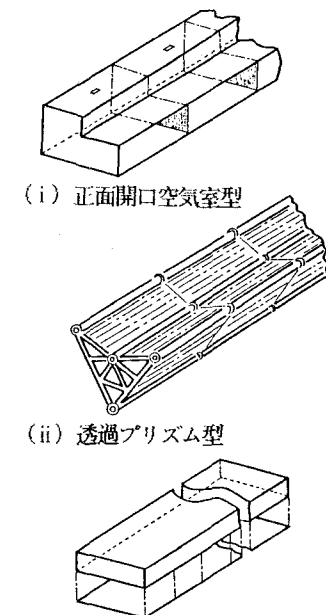


図1 研究開発を進める浮遊式波浪制御構造物の概略図

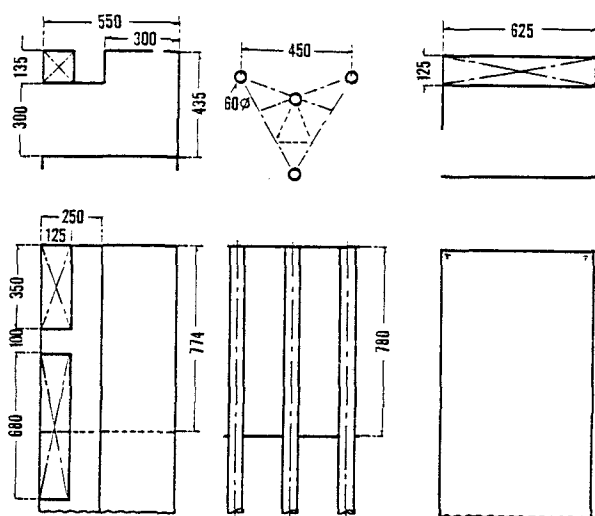


図2 基本形状の供試模型の主要目

4.基本形状の消波特性について⁶⁾

前述した型式をもとに、消波特性などを明らかにするとともに外海に適用できる浮遊式波浪制御構造物の基本形状を明らかにするために、規則波中での二次元水理模型実験を行った。図2に示す供試模型を用い、二次元波動水槽(40m×4m×2m)において、波長及び波高を変えた実験を行った。模型縮尺は波動水槽の能力から想定実機寸法の1/80とした。波長(λ)は各々の浮体幅(B)の2~10倍、入射波高(H_i)は5, 10, 15cm(実機波高4, 8, 12m相当)である。また、係留は3本の線型パネを組み合わせたものを用いた。ただし、拘束は水平のみで鉛直の拘束は行っていない。計測は入射波高、透過波高、浮体運動(ヒービング、ピッチング、サージング)及び係留力などである。

4.1 正面開口型空気室型(A-1型)

基本形状であるA-1-a型の固定状態での消波特性を図3-(1)に示す。これは入射波のエネルギーを透過波のエネルギー、反射波のエネルギー及び吸収・消散・渦等によるエネルギー損失とに区分して示したもので、次のように表される

$$K_t + K_r + K_{loss} = 1$$

ここに、 $K_t = H_t/H_i$:伝達率、 $K_r = H_r/H_i$:反射率、 K_{loss} :エネルギー損失率である。

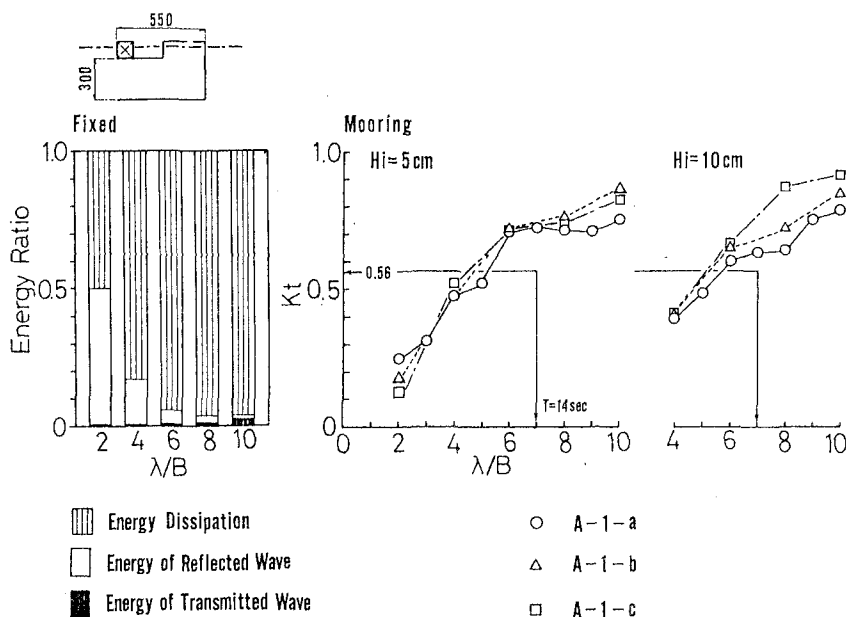
図によると、 $\lambda/B \leq 4$ までは反射のエネルギーの割合は大きい、波長が長くなるにしたがい小さくなる。

一方、波長の長いところでは、吸収等のエネルギー損失が大きい。また透過波のエネルギーは非常に小さく、これを波高伝達率 K_t で示すと、 $\lambda/B = 8$ で0.14程度である。これらのことから、この型式は、固定に近い状態を作れば消波性能を高めることが可能となるといえる。このためには浮体の動揺を抑えることが必要となろう。

次に係留状態での消波特性について述べる。またA-1型の運動特性を図4に示す。

まず、基本型であるA-1-a型の消波特性をみると、波長が長くなるにしたがい伝達率が高くなる傾向がある。図に示されるような消波曲線を持つ浮体のことをPassive Devices(P.D.)という。固定時に比べて浮遊させると伝達率が極めて高くなるが、これは浮体が入射波によって運動するからで、この浮体をP.D.として働かせるためには、係留系を含め入射波と浮体の運動特性について考慮する必要がある。また、A-1-a型の運動特性をみるとピッチングが大きい特徴がある。そこで、浮体の動揺を抑えるために、GMの減少及びフーチングを付したのがA-1-b型(フーチングなし)、A-1-c型(フーチング付き)

である。運動特性をみると、ヒービング以外のサージング、ピッチングはA-1-a型よりも小さくすることができた。しかしながら、伝達率はさほど変化がみられず、 $K_t = 0.56$ を示すのは $\lambda/B = 5$ 程度であり、 $T = 14\text{sec}$ である $\lambda/B = 7$ では $K_t = 0.7$ となり伝達率は高い。消波性能をさらに向上させるためには、ヒービングを含めた浮体の運動を制御する必要がある。また、GMを減少させるために、空気室前面の浮力室を削除したが、このことより空気室への水柱の円滑な流入が妨げられたことも考えられるため、この点の配慮も必要であろう。



(1)固定状態(A-1-a型)

(2)係留状態

図3 A-1型の固定、係留状態での消波性能

4.2 透過プリズム型(V-1型)

固定状態における入射波のエネルギーの配分は図5に示すとおりで、波長が長くなるにしたがい透過するエネルギーが大きくなる。また、消波機能は反射するエネルギーもあるが、穴甲板によるエネルギー損失が大半を占めている。 $T = 14\text{sec}$ である $\lambda/B = 8$ での伝達率 k_t は0.6である。これを係留した場合の消波特性は図示しないが、 $\lambda/B = 8$ での k_t は0.9となり目標値は満足しない。また、この形式は堤体長幅を長くすることにより浮体の運動を制御することを狙ったものであるため、二次元での検討には限界があると考え以後の検討は行っていない。しかしながら、不規則波中では浮体の運動が抑制され伝達率が小さくなることが考えられる。

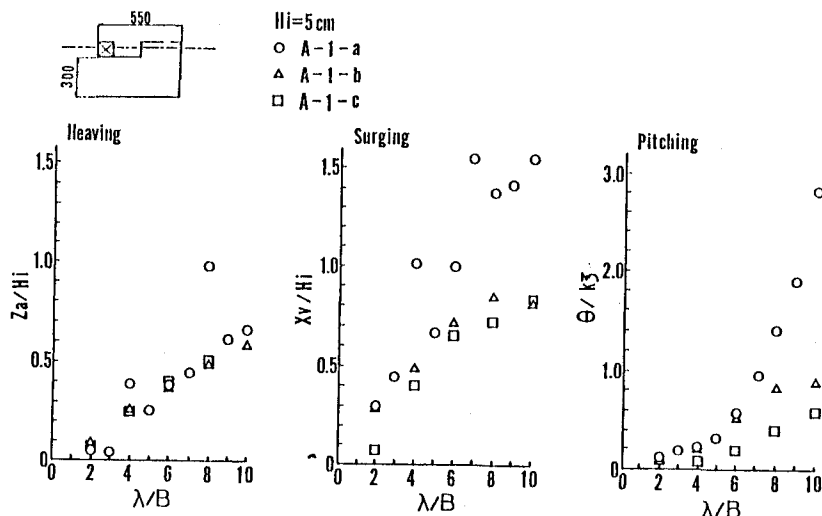


図4 A-1 型の運動特性

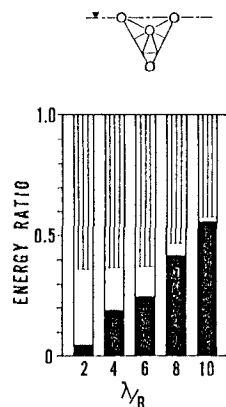


図5 V-1 型の固定状態の消波特性

4.3 水平安定板付ポンツーン型 (P-1 型)

P-1 型の消波特性を図6に示す。まず、固定状態での入射波のエネルギー配分を見ると、波長が短い領域では反射されるエネルギーが多く透過するエネルギーは小さい。一方、波長が長くなるにしたがい反射されるエネルギーは小さくなるとともに透過するエネルギーが大きくなる。このように、この形式を固定すると、その消波機構の主なものは入射波を単純に反射することによって消波性能を得ていることがわかる。

次にこの浮体を係留した場合は、図に示すように、ある周期のところで伝達率が小さくなる点が現れる特徴を有する。このような浮体のことをActive Devices (A.D.)⁷⁾といい、この点では入射波が浮体の運動によって発生した波と干渉して、透過波高が小さくなったものと考えられ、それ以外の波長帯ではPassiveな状態になっているものとみなせる。また、係留の影響も考えられる。伝達率は $T=14\text{sec}$ である $\lambda/B=6$ で波高の小さい場合は目標を達成できるが、波高が高くなると消波性能は下がる傾向にある。

この型式は入射波の波周期と浮体運動との関係を利用すれば、波高伝達率を低くすることが可能である。この場合、浮体の上下運動(Heaving)を消波させたい入射波の波周期に同調させる必要がある。消波機構としては、ある波長付近ではActiveな状態を示し、入射波とを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、その他の波長帯ではPassiveな状態で反射や摩擦により消波効果を発揮させようとするものである。

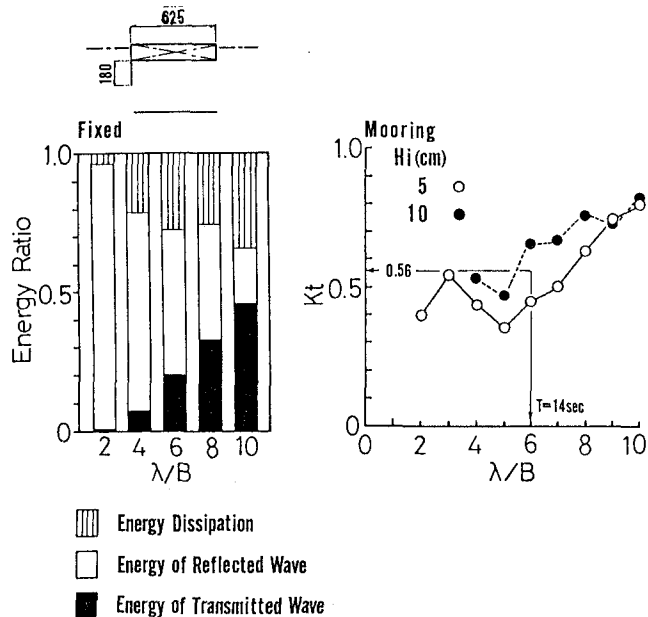
5.改良型形状の消波特性について

水槽実験の方法は、前項で述べたとおりであるが、安全上の見地から係留方法として中間シンカー付きカタナリー方式を採用し、実験を行った。係留の条件としては、浮体と中間シンカーまでの長さを L 、水深を h とすると、 $L/h=1.4$ 、初期張力 T は 1.5 kg である。

5.1 正面開口空気室型 (A-2 型)

所定の消波性能を発揮する波長帯の範囲内において、浮体の特性がP.D.となるようにする。この場合の消波機構としては、吸収などのエネルギー消散と浮体前面板による反射が主体となろう。改良型モデルの概略を図7に、また、消波性能を図8に示す。なお、比較のために基本形状であるA-1-a型の消波性能も併せて示してある。

図によると、基本形状モデルに比べて全体的に消波性能が向上していることがわかる。特に $\lambda/B=7$ ぐらいまでの波長帯で良好な消波効果を示している。



(1)固定状態 (2)係留状態
図6 P-1 型の固定、係留状態での消波性能

Kt をみると、 $T=14\text{sec}$ である $\lambda/B=7$ では約0.6 を示し、 $kt \leq 0.5$ でみると $\lambda/B=6$ まで有効に作用していることを示していることから、要求性能である $Kt=0.56$ をほぼ満足するものと思われる。

浮体系の特性は、その形状や係留状態の影響を受けて変わることはいうまでもない。A-2型の特性をみると $\lambda/B=4$ 前後の波長帯ではActiveな状態を示していて、ここで最大の消波効果が生じている。観察によると、ここでは入射波と浮体の運動とにズレが生じ、次ぎに入射してくる波が浮体前面板に衝突するのがみられることから、これで入射波エネルギーが減殺されるものと考えられる。また、そのほかの波長帯ではPassiveな状態を示し、入射波エネルギーを吸収などのエネルギー消散あるいは浮体前面板で反射させて消波効果を生じているものと考えられる。一方、A-1型は、全ての波長帯に対してPassiveな状態である。このように、両者は断面形状は相似であるが浮体の性質及び係留状態の相違により消波性能の現れかたが異なるものと考えられる。

以上述べたようにA-2型は、ほぼ要求性能を満足する型式であるといえる。

5.2 水平安定板付ポンツーン型 (P-2 型)

本研究で対象とする波浪条件のうち、波周期は14secであり、模型縮尺では $T_0=1.57\text{sec}$ に相当する。そこで、浮体のヒービング周期をこれにあわせた改良モデルP-2型を製作した。また、浮体の運動はヒービングだけでなく、ピッチングおよびサージングなどの影響を受けるので、ここではピッチング周期の違いがどのように消波性能に影響を与えるかを調べるため、図9に示すような模型を用いて実験を行った。なお、図中斜線部は、浮力体を表している。両者はともにヒービング周期が同じであるが、ピッチング周期はP-2-a型でb型の2倍長い特徴を持つ。

図10に消波性能の結果を示す。横軸の波周期及び波長は実機スケールである。

まず、P-2-a型について述べる。浮体の特性をみると、 $\lambda/B=3$ 付近でActiveな状態になっているが、その他の波長帯ではPassiveな状態になっている。目標とする波長帯では浮体による単純な反射や渦などによって消波効果を生じているものと考えられる。

伝達率では $\lambda/B=3$ より長い波長では消波曲線が急激に立ち上がっており、 $\lambda/B=6$ になると伝達率は0.7以上と高くなり、要求性能を満足させるためには浮体幅を波長の $1/4 \sim 1/5$ にする必要がある。すなわち、このことは長波長を対象とする外海では浮体幅が長くなるので構造物としては大型になることを意味する。

一方、P-2-b型をみると、 $\lambda/B=7$ 付近でActiveな状態を示し、ここでは浮体が入射波と逆位相の波を発生させ、その干渉によって消波効果を生じているものと考えられる。また、その他の波長帯ではPassiveな状態を示す浮体となっている。b型は、a型に比べて、 $\lambda/B=4$ 以上の長周期側で優れた消波性能を有していることがわかる。要求性能を満足する波長は $\lambda/B=8$ まで伸びており、このことは浮体幅をより短くできることを意味する。また、同調点付近では波高の影響を強く受けるが、Passiveな状態ではそれほど波高の影響は認められない。これは、同調点付近で、非線型減衰が浮体に働くためであり、Passiveな状態のときには非線型要素の影響が小さいことを示している。

つぎに、これらの運動特性を図11に示す。これから、サージング及びピッチングの動揺量に差は見られないが、ヒ

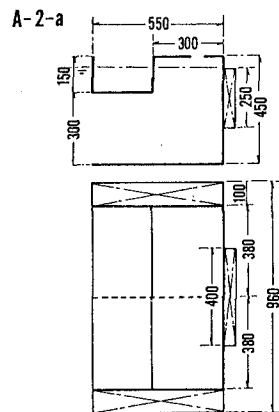


図7 A-2型の主要目

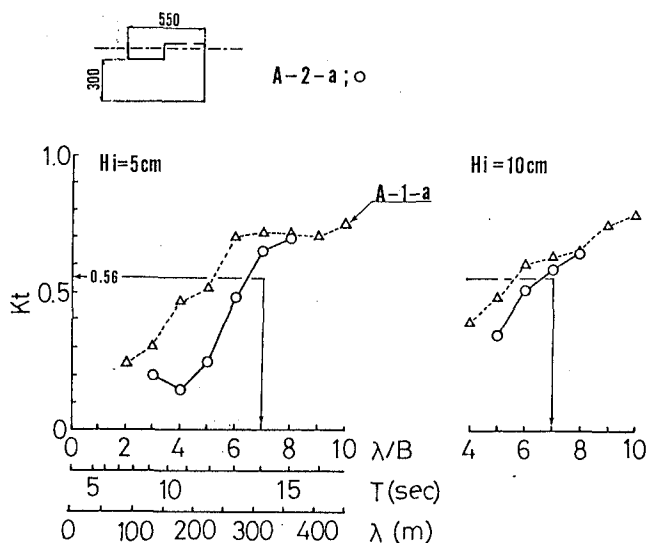


図8 A-2型の消波性能

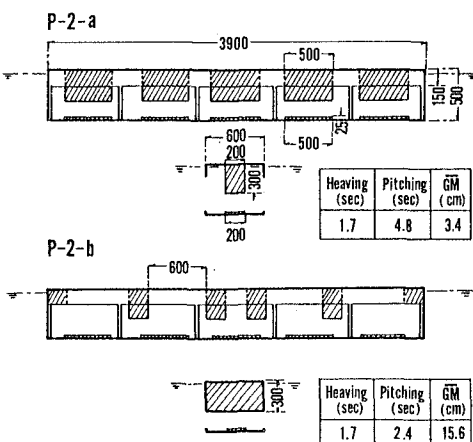


図9 P-2型の主要目

ーピングについては b 型のほうが動揺量が大きいことがわかる。ヒーピングに差が見られる原因については、他の運動との連成作用、渦、浮体体間の相互影響などが考えられるが、はっきりとせず、今後の課題である。いずれにせよ、これらのことが複雑に作用して、a 型と b 型の消波性能に差が表れたものと思われる。

6. 結 言

以上、一連の模型実験等を通して外海に適用できる浮遊式波浪制御構造物の型式及び基本形状と消波性能等を明らかにすることができた。特に、浮体の運動により発生した波と入射波の干渉を利用する水平安定板付ポンツーン型 (P-2-b 型) は、 $\lambda/B \leq 8$ の範囲で $kl \leq 0.56$ を保つ優れた消波性能を有する構造物であり、長波長で大波高の条件を有する外海で最も適した浮遊式波浪制御構造物になりうるものといえよう。

今までは、水深 160m 相当での諸性能を把握した。しかし、浮遊式はあまり水深を選ばない特徴があり、本研究でも対象とする水深を 50～100 m としている。そこで、今後は水深の浅い場合を対象として、消波性能や運動特性に及ぼす影響について把握するつもりである。さらに、不規則波、斜め入射に対する諸性能を把握し総合的に検討する必要がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、有益な御意見を頂いた「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」の研究推進委員会及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、設計や実験に際して、御助言頂いた日本浮消波堤協会に感謝いたします。さらに、実験に際して色々と御協力頂いた海洋科学技術センター海洋利用技術部 (現海洋開発研究部) 工藤君明、宮崎武晃、堀田平、鷺尾幸久の各氏に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 海洋科学技術センター、1982：昭和57年度 浮遊式波浪制御構造物の技術的可能性に関する研究・報告書、海洋科学技術センター、93pp.
- (2) 堀田 平、宮崎武晃、鷺尾幸久、竹内俊介、1983：振動水柱型波力発電装置の空気出力に関する基礎的研究、第30回海岸工学講演会論文集、633—637.
- (3) Count, B. M., R. Fry, & J. Haskell., 1983：An experimental investigation of the harbour concept in wave energy, CEBG Lab. Note TPRD /M /1298/N82.
- (4) Count, B. M. & D. V. Evans., 1984：The influence of projecting sidewalls on the hydrodynamic performance of wave-energy devices, J. Fluid Mech., 145, 361-376.
- (5) 加藤重一、山内亮太郎、小菅 茂、渡辺 哲、1983：浮消波堤の実用化について (II), OCEAN AGE, 15 (5), 47—52.
- (6) 海洋科学技術センター、1983：昭和58年度 浮遊式波浪制御構造物の技術的可能性に関する研究・報告、海洋科学技術センター、177pp.
- (7) 日本水産資源保護協会編、1979：浮消波堤評価基準、(財)日本水産資源保護協会、78pp.

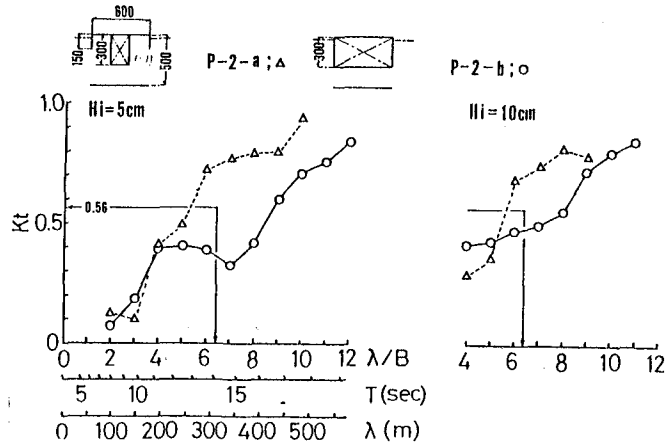


図10 P-2型の消波性能

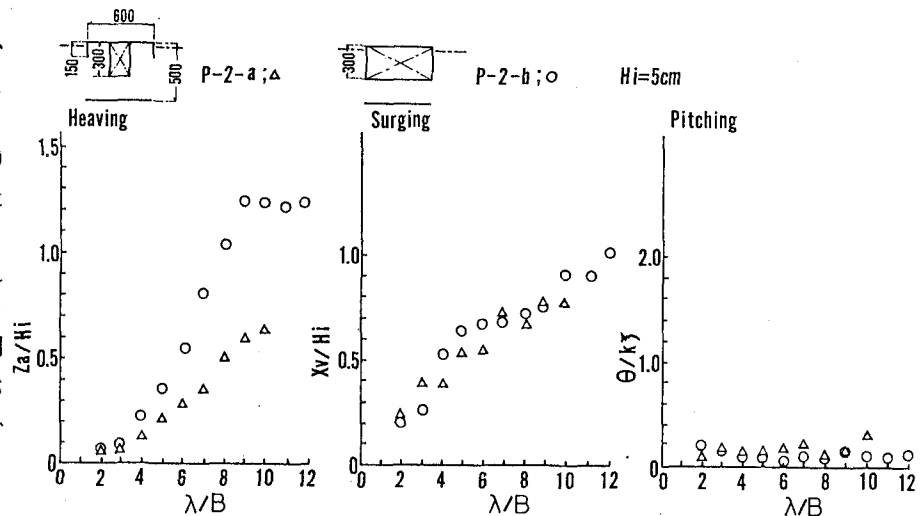


図11 P-2型の運動特性