

浮体と没水水平版のハイブリッド構造物による波の制御

小島 治幸*・入江 功**・古賀 巖***

1. ま え が き

沿岸域の高度で多様な利用に伴い、海水交換を妨げず広範囲の海域を静穏にする消波構造物が望まれている。このような構造物として没水水平版や浮体構造物（例えば、Kowalski, 1974）が考えられている。没水水平版は、版長および天端水深を適切に選定することにより、比較的、波長の長い波に対して消波効果を発揮するとともに波長を短縮する機能がある（小島ら, 1989）。浮体構造物は波のエネルギーが水面近くに集中している比較的波長の短い波に対して消波効果を有していることから、これらの構造物を組み合わせたハイブリッド構造物は、より優れた波浪制御効果が期待できる。また、潮位による大きな水位変化がある場合や海岸海洋工事における作業の稼働率を高めるための簡易的な消波構造物を考える場合は、このハイブリッド構造物を索により緩係留する方式が考えられる。この場合、浮体と水平版の相対的な位置を適切に選ぶことにより波浪による動揺を抑え堤体を中立に保ち、有効な波浪制御効果を維持することが期待される。

本研究は、環境的に優れた特徴を有している水平版と浮体を固定して組み合わせた形の透過性構造物およびそれらを係留した形の係留式消波構造物の波遮断効果と水理特性を水理実験と理論計算により明らかにすることを目的とする。この際、固定した状態と運動を許容した係留状態の2つに分け、それぞれの水理特性を調べるとともに、堤体の諸元や係留方式等を変えて消波効果の比較検討を行う。

2. 水理実験と数値解析の概要

2.1 水理実験の方法と条件

実験は、一端に吸収式造波装置を持つ2次元造波水路（長さ28m、幅0.3m、高さ0.5m）を用い、水槽のほぼ中央に堤体を設置した。水深（ h ）は0.35mの一定とし、入射波はすべて規則波とし相対水深を $h/L=0.08\sim0.44$

と0.02刻みで変化させた。入射波の振幅（ ξ_0 ）は、固定状態で $\xi_0/h=0.03\sim0.10$ 、係留状態で $\xi_0/h=0.03\sim0.05$ と変え波高の影響を調べた。入射波高は、造波機の前面7mに設置した容量波高計でペン書きレコーダに記録した。堤体の前後2.5mのところに設置した2本ずつの容量式波高計で測定した水面変位をサンプリング周波数20Hzでデジタルレコーダに記録し、分離推定法（合田ら, 1976）により波の通過率と反射率を求めた。

a) 固定状態の条件

固定状態の実験においては、アクリル製の水平版と木製の浮体を各々独立した状態でアルミ板を用いて固定し、水平版と浮体をそれぞれ単体で用いた場合とそれらを組み合わせた場合の実験を行った。堤体の諸元は、図-1の断面の概略図に示すように、水平版長を B_p 、その没水深を h_s 、浮体幅を B_f 、浮体の喫水を h_f 、水平版と浮体の間隔を W_s 、浮体間隔を W_f と定義し、これらを変化させたときの消波特性を検討した。

b) 係留状態の条件

係留状態における実験では、図-1に示すようにアクリル板と木製の板で製作した水平版と浮体をL字型の

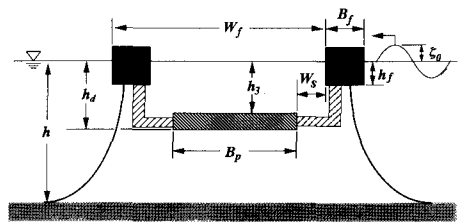


図-1 天橋立海岸における海浜の形成状況

表-1 係留状態における実験の条件

	B_p/h	B_f/h	W_s/h	W_f/h	h_s/h	h_f/h	重心の水深 (cm)	係留方式 (係留箇所)
CASE 1	1.00	0.20	0.00	1.20	0.20	0.10	5.1	弾性バネ (水平版)
CASE 2	1.00	0.20	0.00	1.20	0.20	0.10	5.1	弾性バネ (浮体)
CASE 3	1.00	0.20	0.00	1.20	0.20	0.10	6.8	非弾性索 (水平版)
CASE 4	2.00	0.20	0.00	1.20	0.20	0.10	6.2	弾性バネ (水平版)
CASE 5	1.00	0.20	0.90	3.00	0.20	0.10	5.3	非弾性索 (水平版)

* 正会員 工博 九州共立大学助教授 工学部土木工学科
 ** 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科
 *** 復建調査設計株式会社

アングルで結合し、表-1に示すように、4本のばね(ばね定数 $K=5.18 \text{ kg/m}$)で水平版から係留した場合(CASE 1)と浮体から係留した場合(CASE 2)、4本の非弾性索で水平版から緩係留した場合(CASE 3)、CASE 1の版長(B_p)を変化させた場合(CASE 4)およびCASE 1の浮体間隔(W_f)を変化させた場合(CASE 5)を行い、係留方式や断面形状による消波特性等の比較を行った。係留は左右対称のopenタイプとした。弾性係留ばねの初期張力は、一本当たり鉛直方向に500 gとし、係留角度を水平床からCASE 1とCASE 4では 37.7° 、CASE 2では 49.4° とした。緩係留のCASE 3とCASE 5では重心位置の許容変位を中心位置から水平方向に左右5 cmづつとした。また係留状態では、水平版の動きをビデオカメラで記録し、水平版と水槽にそれぞれ設けたマーカーとグリッドから、堤体の重心の変位と回転角を求めた。なお、各運動の変位は、3~5波の波作用下における平均値とした。

2.2 理論解析法

理論計算は、吉田ら(1990)が提案したポテンシャル接続法(選点解法)を用いて、固定状態における波と構造物との線形干渉問題を解き、通過率と反射率を算定した。なお、計算においては構造物の端点で生じる渦や水平版上で起きる砕波等によるエネルギー損失は無視した。

3. 結果と考察

3.1 固定状態

a) 浮体と水平版のハイブリット構造物の消波特性

図-2は、没水水平版(SHP)および浮体(FB)、水平版と浮体を組み合わせたハイブリット構造物(HFP)の3種類の堤体における計算および実験結果で(各寸法は図中に示される通り)、通過率(K_T)を上図に、反射率(K_R)を下図に示したものである。これらの結果は、入射波振幅が $\zeta_0/h=0.03$ の場合で、砕波が生じない条件である。構造物の隅角部で生じる渦によるエネルギー減衰を理論解析では取り入れていないため、通過率、反射率とも理論値は実験値よりも若干大きめの値となっているが、通過率と反射率の相対水深に対する特性については、理論値は実験結果を良く表している。ここで取り上げた他の断面形状においても同様の結果が得られており、固定状態における通過・反射率特性を理論計算によって求めることができる。この図から明示されるように、固定状態のハイブリット構造物の場合は、水平版と浮体をそれぞれ単体で用いる場合よりも、相対水深のかなり広い範囲にわたって通過率が大きく低下している。これは、水平版と浮体を組み合わせることにより波と水平版の干渉効果および水平版上で波長が短縮された波と浮体の干

渉効果が相乗して現れるためと考えられる。すなわち、水平版下の流体の振動により発生する radiation waves と水平版上と浮体を通過した波とがほぼ等振幅で逆位相となり、それらが重合すると相殺して、波をほぼ完全に遮断することになる。このため、浮体と比べ波長の長い波のところから通過率の著しい低下が見られ、またスリット式等の他の透過性消波構造物と比べても、その消波効果は大きく、特に波をほぼ完全に遮断する波長帯域が広いという特徴がある。

図-3は、上と同じ条件のハイブリット構造物における3つの相対水深に対する波振幅の場所的分布の計算値を表している。通過率が最小となる $h/L=0.30$ では反射側でほぼ完全反射となるので波高が大きくなるが、浮体間や通過側ではそれが非常に小さくなっている。 $h/L=0.45$ では浮体間で波がトラップされ、波高が極度に大き

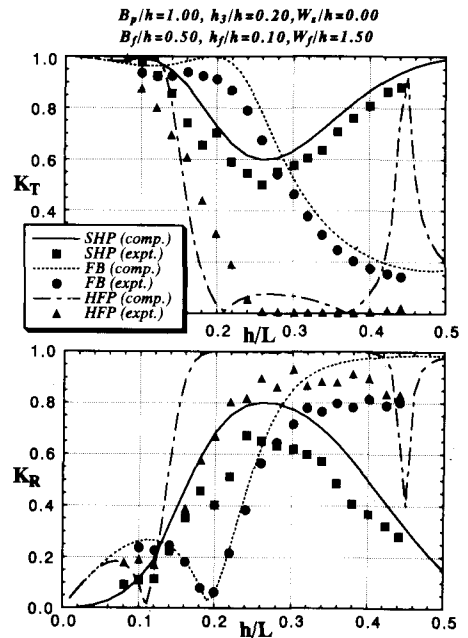


図-2 3種類の堤体に関する通過率と反射率の比較

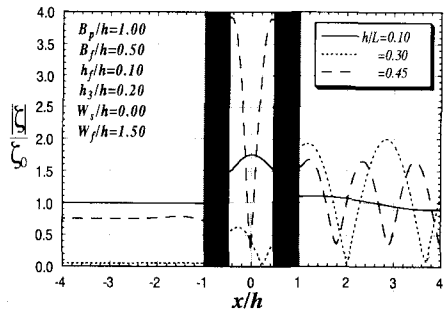


図-3 ハイブリッド構造物周辺の波の振幅分布

くなっている様子がうかがえる。

b) 堤体諸元の消波特性に及ぼす影響

図-4 は水平版と浮体の水平方向の間隔(W_s)を変化させた場合の通過率と反射率を示している。図において W_s/h がマイナスのときは、浮体の内端が水平版上にあることを意味する。これより間隔が大きくなるにつれ、極小通過率となる波長とその値が大きくなり、浮体が $W_s/h=0.00$ 前後の位置にある場合に、波の広い波長帯域に対して消波効果がよいことが分かる。これは W_s/h があまり大きくなると先に述べた波の干渉効果が低下してしまうためと考えられる。また、 $W_s/h=0.50$ のように2つの浮体が合体して水平版上に自由水面がなくなると、実線で示すように通過率の周波数特性が異なり、浮体のみの場合と同様な特性となる。

図-5 は、 $W_s/h=0.00$ における水平版の没水深(h_3)を変化させた場合の通過率を示している。没水深を大きくしていくと、相対水深に対する特性曲線が波長の短い方にシフトしていき、通過率の極小値が徐々に大きくなっていく。逆に、没水深が小さくなると、水平版下部からのエネルギー伝達量が版上部のそれより大きくなるため通過率の曲線が折り返しの状態になる。特に、浮体の内端が水平版上にある場合は、この折り返し効果が顕著に現れるため、最適な消波効果を得るには水平版の没水深を大きくとることができる。

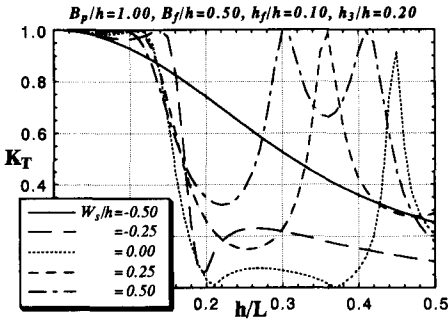


図-4 浮体と水平版間隔に対する通過率の変化

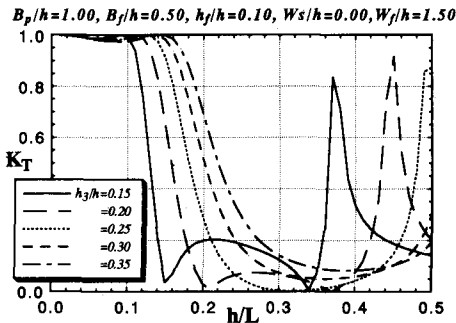


図-5 水平版の没水深に対する通過率の変化

図-6 は水平版の版長(B_p)を変化させた場合の通過率を示しているが、版長が長くなるほど消波効果の高い波長が長いほうへ移り、消波効果の良い波長帯域が狭くなる傾向が見られる。また、ここには示していないが、浮体の幅(B_f)と喫水(h_f)を変化させた場合は、幅と喫水が小さくなるにしたがって、通過率の減少傾向は若干落ちて行くものの、それほど極端に低下するものではない。このことから、浮体の大きさに関してはあまり大きくする必要はないと思われる。

c) 入射波高の影響

図-7 は、実験を行った範囲で最も消波効果の良いケースにおける入射振幅(ζ_0)の変化に対する通過率の変化を示しており、 $\zeta_0/h=0.08$ 以上で全相対水深において水平版上で碎波が生じている。入射波高の違いによる通過率の変化はあまりないが、前述した位相差による相殺効果が卓越して通過率が低下すると思われる $h/L=0.2 \sim 0.4$ のところでは、波高が大きくなって碎波によるエネルギー損失が起こる場合は通過率が若干増大する傾向が見られる。この現象は没水水平版を単体で用いるときにも見られる。

3.2 係留状態

a) 係留状態における消波と運動特性

図-8 は、係留状態 (CASE 1, CASE 2, CASE 3) における通過率と反射率を示しており、比較の目的で固定

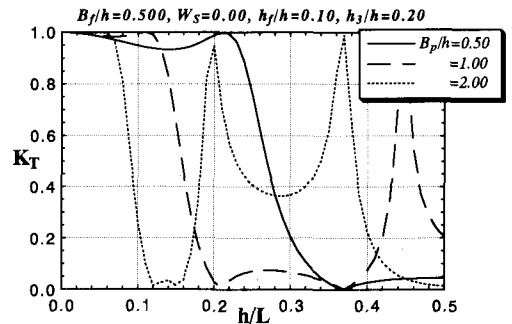


図-6 水平版長に対する通過率の変化

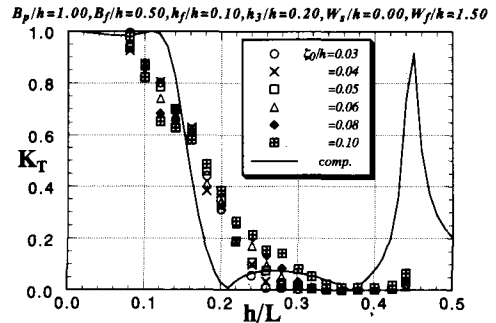


図-7 入射波高に対する通過率の変化

状態における計算結果を実線で示している。図-9は、構造物の重心の鉛直(η)と水平(ξ)変位の無次元振幅を、図-10では構造物の回転角(θ)の変化を示している。消波特性の図を見ると固定状態では h/L が 0.14 を超えるあたりで通過率が著しく減少する。係留状態でも弾性索で係留された CASE 1 と CASE 2 ではほぼ同じ相対水深で通過率が減少する傾向が見られるが、最小通過率が 0.5 を下回することはなかった。消波効果が低下した原因としては、図-9, 10 が示すように、構造物の運動によりそれ自身が造波効果を持ちそれにより radiation waves が発生するが、固定状態と見なしたときの通過波が実線で示すようにほとんどないことから、それらの位相差による相殺効果が期待できないためと考えられる。係留方式の違いを見ると、 h/L が 0.08~0.15 の間で CASE 1 の通過率が若干大きくなり、 h/L が 0.15~0.32 の間で CASE 2 の通過率がやや大きくなるがほぼ同じような特性を示すのに対し、非弾性索係留の CASE 3 では波の通過率が下がるピーク時の値はそれほど差がないものの、 h/L が 0.40 前後の所でしか消波効果を示さず、他の 2 つのケースのようにある程度広い範囲で消波効果を示すものではなかった。

重心位置の変位に関しては、図-9 に示されるように鉛直変位が h/L の全域でどのケースもほとんど同じであるのに対して、水平変位と図-10 の回転角は係留方式の違いによる相違がはっきりと現れた。水平変位は、非弾性索係留の CASE 3 の方が弾性索係留よりも変動量が小さい。これは、弾性索係留の場合は共振現象が比較的波長の短いところでも起きるので実験結果ではそれが $h/L=0.14$ から 0.18 にかけて現れているが、緩係留の場合は、井島ら (1972) が理論計算によって示した自由浮体の結果と同様に、波長の非常に長いところでしか共振現象が起こらないためと思われる。回転角の場合は逆に非弾性索係留の方がかなり大きな値を示しており、 h/L が 0.10~0.36 の領域で回転運動が激しく、この範囲で消波効果が低下していることがわかる。また、井島ら (1972, 1978) が単一浮体においてその関係を理論的に明かにした水平運動と回転運動との連成作用は、今回実験を行った範囲では、はっきりとは現れなかった。

b) 消波効果の改善

係留消波構造物において、通過率を低減するためには、波による運動を極力抑えて固定状態に近づけるか、あるいは堤体の運動によって励起される radiation waves と固定状態と見なしたときの通過波との位相差による相殺に起因する消波効果のどちらかに頼らざるを得ない。

ここでは、浮体と水平版の間隔を適切に選定することにより、それぞれに作用する波力の位相の違いから回転運動を抑え、堤体をほぼ中立に保つことが可能であると

思われ、前者の固定状態に近づける方法を試みた。そこで浮体同志の間隔を $W_f/h=3.0$ (浮体と水平版の間隔 $W_s/h=0.9$) と離し、非弾性索で係留したとき (CASE 5) の実験結果を CASE 3 ($W_f/h=1.2$) のそれとともに図-11 に示す。 $W_f/h=3.0$ における回転運動 (Δ) の大小と通過率 ($\blacktriangle$) の増減とは対応しており、回転角が 0 に近づく $h/L=0.3$ 近傍、すなわち浮体間隔が波長程度になるとき通過率が減少し最小値は 0.2 以下となる。しかし、相対水深がその値から外れて行くと回転角とともに通過率は急激に増大するため有効な消波効果を発揮する波長帯域が固定状態と比べ狭い結果となっている。

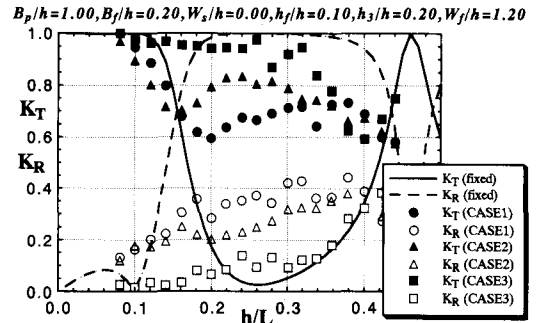


図-8 固定式と係留方式に対する通過率と反射率の変化

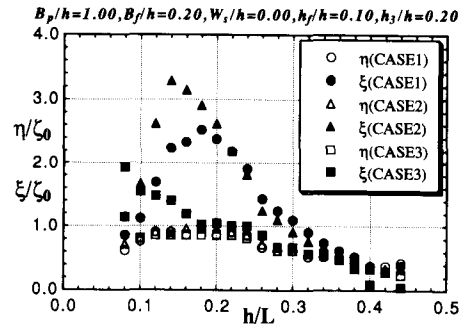


図-9 係留方式に対する水平変位と鉛直変位の変化

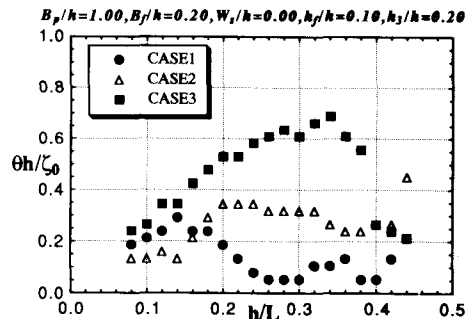


図-10 係留方式に対する回転角の変化

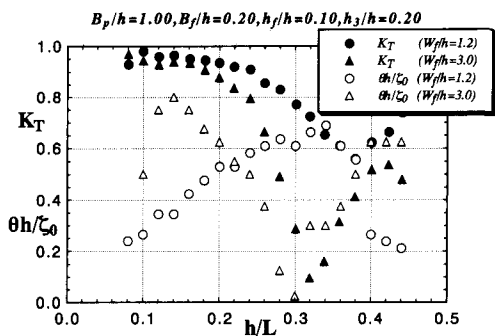


図-11 浮体間隔に対する通過率と回転角の変化

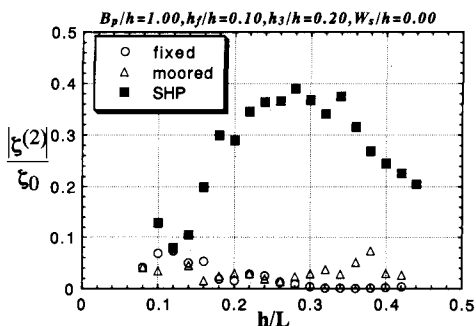


図-12 非線形干渉による2倍周波数成分波の振幅

c) 高周波成分波の励起

没水構造物に水面波が入射すると一般的に高周波成分波が発生し波の分裂が起こる。浮体と没水水平版を組み合わせたハイブリッド構造物を固定および係留 (CASE 3) した場合に $\zeta_0/h = 0.05$ の波が入射したときの通過波における2倍周波数成分波の振幅 $|\zeta^{(2)}|$ の大きさを没水水平版 (SHP) の結果とともに示したものが図-12である。固定状態、係留状態とも単体の没水水平版と同じ版長の水平版をもつにもかかわらず、波との非線形干渉によって励起する高周波成分波の振幅が著しく小さい結果となった。固定状態でもこのような結果が得られたことは興味深く、波の分裂を抑制する効果があるものと思われる。

4. あとがき

本研究により以下のことを明かにした。

1) 固定状態において水平版と浮体を組み合わせたハイブリッド構造物は、その形状を適切に選定することにより、それぞれを単体で用いるよりも優れた消波効果を発揮し、断面形状が小さく簡単な構造形式で他の透過性の消波構造物に比べ広い波長帯域の波をほぼ完全に遮断することが可能である。このとき、浮体と水平版の間隔は小さいか、あるいはそれらが重なり合っている場合に消波効果がよく、水平版の没水深と浮体の喫水を調節することにより最適な消波効果が得られる。また、水平版長により遮断する波の波長を選択することができる。

2) 係留状態の場合は、構造物の運動による造波効果により、固定状態に比べ消波効果が低下したが、浮体間隔を波長程度にすると、回転運動を抑制して有効な消波効果が得られる。今後は、断面形状や重心の位置および係留方式の改善を図り、さらに良好な消波特性を有する係留システムの条件を見いだすとともに作用波力および係留張力の特性を明らかにすることが課題である。

最後に、本研究を遂行するにあたり、九州大学工学部吉田明徳助教授より貴重なご助言を頂き、九州大学工学部技官牛房幸光氏、当時九州共立大学学生酒井孝尚、高田暢樹君より真摯なる協力を得た。ここに感謝の意を表する。また、本研究は五洋建設(株)からの受託研究による成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 井島武士・田淵幹修・湯村やす (1972): 有限水深の波による矩形断面物体の運動と波の変形, 土木学会論文集, 第202号, pp. 33-48.
- 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, 土木学会論文集, 第272号, pp. 53-63.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治 (1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, pp. 1-24.
- 小島治幸・井島武士 (1989): 没水水平版による波の分裂と波浪制御に関する研究, 海岸論文集, 第38巻, pp. 529-530.
- 吉田明徳・小島治幸・鶴本良博 (1990): 波動境界値問題におけるポテンシャル接続法の選点解法, 土木学会論文集, 第417号/II-13, pp. 310-319.
- Kowalski, T. (1974): Floating Breakwaters Conference Papers, Univ. of Rhode Island, Marine Tech. Rep. Ser. No. 24, pp. 1-253.